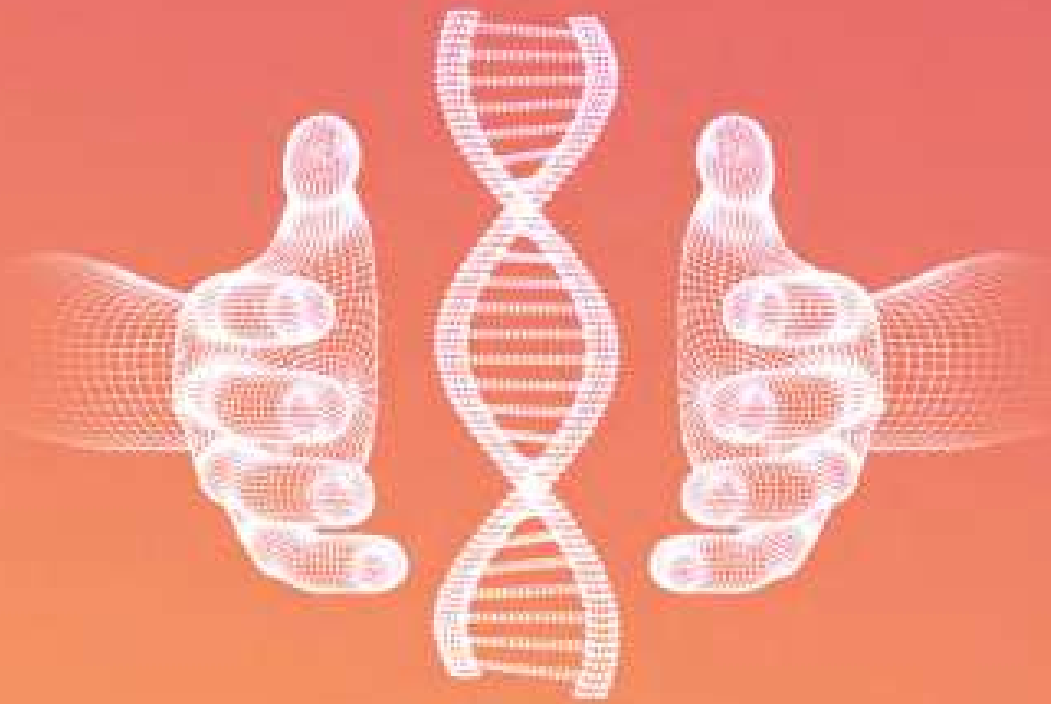
فياض محمد شريف

علم الحياة الكمومي



علم الحياة الكمومي

تأليف
فياض محمد شريف

هنـــداوي

علم الحياة الكمومي

فياض محمد شريف

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إنَّ مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: يوسف غازي

الترقيم الدولي: ٤ ٣٠٦٣ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر هذا الكتاب عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة للسيد الدكتور فياض محمد شريف.

المحتويات

الإهداء	٧
مُقدِّمة	٩
١- مدخل إلى نظرية التعقيد والتفكير المنظومي	١٥
٢- ميكانيك الكم	٤٩
٣- بيولوجيا الكَم	٦٥
٤- أساسيات علم الحياة	٨١
٥- الحالة الكمومية تكمُن في تركيب جُزيئة الـ «دي إن إيه»	١٦٥
٦- دَورُ ميكانيك الكَم في عمل الإنزيم دي إن إيه بوليميريز	١٧٩
٧- الإنزيمات وميكانيك الكَم	١٨٧
٨- ميكانيك الكَم والقنوات الأيونية والاتصالات الخلَوية	٢٠٥
٩- الـ «دي إن إيه» والماء والمجال الكهرومغناطيسي	٢٢٩
١٠- الشَّم وميكانيك الكَم	٢٤٣
١١- التحسُّس المغناطيسي والبوصلة الكمومية	٢٦١
١٢- دور البيولوجيا الكمومية في عملية الرؤية	٢٨٣
١٣- تجلِّي دَور ميكانيك الكَم في التركيب الضوئي	٢٩١
١٤- الوعي وميكانيك الكَم	٣١٩
١٥- ميكانيك الكم ونشوء الحياة	٣٥٥
١٦- من البيولوجيا الكمومية إلى الهندسة	٤٠٣
مراجع	٤٢٥

الإهداء

«إلى زوجتي تماضر عبد القادر،
وأبنائي؛ رياض وأثير وشهرزاد وأسيل وهديل.»

مُقدِّمة

الطبيعة في كوكب الأرض على الأقل ميَّزَت المواد إلى مجموعتَين؛ هما المواد غير الحية، والكائنات (المواد) الحية، وهكذا تميَّزَت العلوم الطبيعية إلى علوم فيزيائية، شملَت الفيزياء والكيمياء وعلم الأرض (الجيولوجي) والتي تدرُس بالأساس الموادَّ غير الحية، وعلوم الحياة التي تدرُس الحياة والكائنات الحية. هذا إضافةً إلى الرياضيات التي وفَّرَت الوسائل لضبط القياس والكميَّات، وإحداثيات المكان، والتعبير التجريدي للعلاقات بين المتغيِّرات وغيرها، وصارت اللغة الدقيقة للعلوم. وحيث إن ظاهرة الحياة قد انبثقَت من تعقُّد وتطوُّر المواد غير الحية وهي في حالة تفاعلٍ دائمٍ معها، كان لا بد أن تعتمد علوم الحياة على مُنجَزات علوم الفيزياء والكيمياء والجيولوجيا. وهكذا تَبلوَر مفهوم الخلية من خلال مُشاهدتِها لأول مرة من قِبَل روبرت هوك، سنة ١٦٦٥م، باستخدام المِجهَر المركَّب. كما أن التعرُّف على تركيب جُزيئة الـ DNA تم باستخدام التصوير بالأشعة السينية، واختراع المِجهَر الإلكتروني الذي مكَّن من مشاهدة الفايروسات والتراكيب الخلَوية، وهي تطبيقاتٌ لقوانينَ فيزيائية في البصريات. كما أن التعرُّف على تراكيب وفعاليات الأحياء لم يكن ممكنًا دون معرفة خواصِّ العناصر والتفاعلات الكيميائية وطُرق التحليل الكيميائي. وقدَّمَت الجيولوجيا معلوماتٍ مهمةً عن تشكُّل الأرض، والدهور، والمُتحجِّرات، والدور التحفيزي للمعادن وغيرها. وبذلك فإن تطوُّر علوم الحياة ارتبط ارتباطًا وثيقًا بتطوُّر هذه العلوم والتقنيات العلمية الناتجة عن تطبيقاتها.

تطوُّر علم الفيزياء قاد إلى تَبلوُر ميكانيك نيوتن، والديناميكا الحرارية، والنظرية النسبية، أو ما صار يُعرف بالفيزياء التقليدية، والتي تدرُس سلوك الطاقة والمادة على المدَيات المكانية والزمانية المنظورة والكبيرة، وميكانيك الكَم الذي يدرُس الطاقة والمادة على المستويات المِجهَرية تحت الذرية والذرية والجزيئية.

بطريقةٍ مناظرة تقريبًا، يدرُس علم الحياة ظاهرةَ الحياة والكائنات الحية بمدَياتها المنظورة، التي تخضع لقوانين الفيزياء التقليدية، وكذلك مستوياتها المِجهَرية بما فيها التراكيب الجُزيئية، والذرية، وتحت الذرية، وهذه تخضع جزئيًّا للفيزياء التقليدية أيضًا (الديناميكا الحرارية) وميكانيك الكَم.

تتميَّز الفيزياء التقليدية بالاختزالية، والحتمية، ودقَّة القياس، وثبات الحقيقة، بينما تتميَّز فيزياء الكَم باعتماد التجزُّؤية، واحتمالية الحقيقة وارتباطها بعملية القياس ومبدأ عدم الدقَّة.

وفي الوقت الذي تنسجم فيه قوانينُ ومبادئُ الفيزياء التقليدية مع البديهة البشرية؛ كونها تتعامل مع الأشياء والظواهر التي يتعامل معها الإنسان يوميًّا، فإن الظواهر الكمومية كثيرًا ما تبدو غير مألوفة بل منافية للبديهة؛ كالتراكُب، والتسرُّب، والتشابُك، والتي لا يتحسَّسها الإنسان.

الكائنات الحية هي الأخرى تُظهِر هذه المفارقة؛ كون أجسامها من الأشجار الضخمة، والحيتان إلى البكتيريا التي تقع ضمن أبعاد العالم الكبير أو المرئي، لكنها مبنيةٌ من تراكيبَ خلَوية، وتحت خلوية، جُزيئية وذرية، وتحت ذرية. كما أنها تُظهِر خواصَّ مألوفة؛ كونها تتألَّف من العناصر الكيميائية نفسها للمواد غير الحية. وتخضع للجاذبية وقوانين الحركة ذاتها، وفي الوقت نفسه تُظهِر خواصَّ غريبةً عن المواد غير الحية، كالتحسُّس والنمو والتكاثر. هذه المسألة تفسِّر سبب عمل الفيزياء التقليدية والفيزياء الكمومية في الأحياء.

وحيث نشأ علم الحياة سويةً مع نشوء العلوم الفيزيائية في القرن السابع عشر، فقد اعتمد في تفسير الفعاليات والحركيات البيولوجية على مبادئ ميكانيك نيوتن، واستمر في ذلك حتى بعد اكتمال فيزياء الكَم في الربع الأول من القرن العشرين. وأول بادرة للبحث عن دور ميكانيك الكَم في ظاهرة الحياة أُطلقَت سنة ١٩٤٣م، من قِبَل P. Jordan واستخدم مصطلَح البيولوجيا الكمومية. بعد ذلك بسنة، بحث الفيزيائي النظري المعروف، وأحد مؤسسي نظرية الكَم أروين شرودنجر دَوْر ميكانيك الكَم في وراثة الكائنات الحية وأدواره المُحتمَلة في النظام الأحيائي.

إن نشوء علم الحياة الجُزيئي في النصف الثاني من القرن العشرين سلَّط الضوء على التراكيب والفعاليات الجزيئية، ومكَّن من نشوء التقنية الحيوية والتقارُب أكثر فأكثر مع العلوم الفيزيائية؛ لتنشأ التقنية النانوية وتبرُز الحاجة إلى ميكانيك الكَم في تفسير الظواهر البيولوجية، حيث تَعجز الفيزياء التقليدية عن تفسيرها.

تضمَّن الفصل الأول مدخلًا لتكوين نظرةٍ علميةٍ شاملة لعمل الطبيعة، من خلال نظرية التعقيد والتفكير المنظومي؛ فمن خلال الوحدة والتباين، الحركة والتآثر وهي خواصُّ أساسية، تنتظم جميع الأشياء في الطبيعة في منظوماتٍ متصاعدة التعقيد. هذه النظرة تؤكِّد على ترابُط جميع الأشياء في الكون على الرغم من تمايُز المنظومات المختلفة. ومن أهم خواصِّ الحياة أنها تنبثق في منظوماتٍ معقَّدةٍ مفتوحة، بعيدة عن حالة التوازُن، وهي بذلك تكون قادرةً على تصحيح الأخطاء.

في الفصل الثاني تَمَّ التعريف بميكانيك الكم ونشوئه والمبادئ التي يرتكز عليها كالتجزُّؤية والطبيعة الموجية للأشياء والاحتمالية، وعدم الدقَّة والتماسُك، ودَور عمليات القياس في فك التماسُك. ويتضمَّن الفصل الظواهر الكمومية كثنائية الموجة الجسيمة والتماسُك، وفك التماسُك والتراكُب والتسرُّب والتشابُك.

يتناول الفصل الثالث علم الحياة الكمومي، نُشوءَه، ودَورَه في تعميق فهم الظواهر البيولوجية، وعلاقته بالعلوم الأخرى، كما يُبرِز علم الحياة الكمومي الخصوصية المميزة للكائنات الحية، باعتبارها منظوماتٍ معقدةً مفتوحة، بعيدة عن حالة التوازُن ما يمكِّن من عمل الظواهر الكمومية في ظروف درجات الحرارة العالية، والاكتظاظ الجُزيئي، وضوضاء البيئة. هذا ما لم يألفه الفيزيائيون، حيث إن دراسة الظواهر الكمومية على المواد غير الحية تتطلَّب عزلًا تامًّا عن البيئة، وظروفًا خاليةً تمامًا من وجود أية جُسَيمات أو ذرَّات (فراغ تام) وفي درجات حرارة تقترب من الصفر المطلَق. وهكذا يُقدِّم علم الحياة الكمومي نموذجًا مختلفًا يُسهِم في فهم وتطوير تقنيات البحث العلمي ليس في علوم الحياة فحسب، بل وفي الفيزياء والكيمياء والحواسيب الكمومية.

يتضمَّن الفصل الرابع عرضًا مختصرًا لأساسيات علم الحياة، والتي تُساعِد في فهم مواضيع الكتاب. هذا يشمل تركيب المادة والعناصر الطبيعية والتفاعلات الكيميائية والمواد ذات الأهمية البيولوجية وتركيب الخلية وتكاثُر الأحياء وتقسيمها.

ويستعرض الفصل الخامس دَوْر ميكانيك الكَم في نشوء الطفرات التلقائية والمستحثَّة في جُزيئة الـ DNA، بعيدًا عن تأثير العوامل الخارجية المُسبِّبة للطفرات. وهكذا يعمل ميكانيك الكَم أخطر الأدوار مع أهم التراكيب البيولوجية، والتي تمكِّن من تطوُّر الأحياء.

يتناول الفصل السادس عمل الإنزيم DNApolymerase المسئول عن تضاعُف جُزيئة الـ DNA ودقَّته وسرعة ذات الملامح الكمومية، وحفظ المعلومات، بالإضافة لما هو مخزون في الـ DNA.

الفصل السابع يستعرض عمل الإنزيمات المعتمد على التسرُّب الكمومي للإلكترونات والبروتونات أيضًا.

في الفصل الثامن تَمَّ تناوُل عمل القنوات الأيونية والاتصالات الخلَوية. وتضمَّن تفسير الانتخابية العالية وكفاءة القنوات الأيونية في نقل الأيونات على أساس التماسُك الكمومي والرنين لجُزيئات البروتين المكوِّن للقنوات. إضافةً إلى الاتصالات الخلَوية المعتمدة على الجُزيئات والجُزيئات الإشارية ثمَّة اتصالاتٌ خلَوية تتم بواسطة الإشارات الكهرومغناطيسية التي تتسم بالسرعة الفائقة، وتُعالج باستخدام الظواهر الكمومية. والاتصالات بين أجزاء الخلية وبينها والخلايا الأخرى تتم أيضًا بواسطة الفوتونات الحيوية المتماسكة كُموميًّا.

الفصل التاسع يناقش الملاحظات غير المتوقَّعة والمثيرة للجدل فيما يُعرف بذاكرة الماء؛ فجُزيئات الماء النقي المستحصلة من نموات الأحياء الدقيقة أو محاليل جزيئات الـ DNA وتحت تأثير الموجات الكهرومغناطيسية ذات التردُّد الضعيف من البيئة، تتمكَّن من حفظ ونقل المعلومات الجُزيئية بما في ذلك معلومات الـ DNA عن طريق المجالات المتماسكة التي تنشأ وهي بأبعادٍ نانوية.

الفصل العاشر عرضٌ للآليات الجُزيئية لعملية الشم في الحيوانات، والتي وجدَت تفسيرها الأفضل على أساس التسرُّب الكُمومي غير المَرِن للإلكترون.

الفصل الحادي عشر يُقدِّم آلية تحديد الاتجاهات في عملية هجرة الحيوانات، ويعرض دَور التشابُك الكُمومي بين أزواج الجذور في بروتينات عيون الطيور والحشرات وغيرها من الحيوانات، ودَورها في تحديد الاتجاهات أثناء الهجرة بتأثير المجال المغناطيسي للأرض.

الفصل الثاني عشر يناقش عملية الرؤية في الأحياء، ودَور البروتينات الصبغية مثل الرودوبسين والراتينال والآليات الكُمومية المسيِّرة لها.

الفصل الثالث عشر يتناول أهمية الظواهر الكُمومية؛ كالتراكُب والتشابُك والتي تتجلَّى في أهم عمليةٍ بيولوجيةٍ هي التركيب الضوئي، التي يتم فيها اقتناص طاقة الضوء بكفاءةٍ تقترب من الكمال في عملياتِ أكسدةِ اختزالٍ تنتهي بتكوين المركَّبات العضوية.

الفصل الرابع عشر يناقش مسألة الوعي في الأحياء والإنسان ودَور الظواهر الكُمومية في نشوئه عَبْر ثلاث آلياتٍ مقترحة، تتمثَّل بدور الأُنيبيبات الدقيقة والفسفور وجُزيئات بوزنر والقنوات الأيونية تحت تأثير تماسُك المجال المغناطيسي.

الفصل الخامس عشر يبحث مسألةَ نشوء الحياة على الأرض، ودَور ميكانيك الكَم في تشكُّلها.

الفصل السادس عشر يعرض دَور علم الحياة الكُمومي كمنطلقٍ لإيجاد موادَّ وأجهزةٍ جديدةٍ عَبْر التقنية النانوية الأحيائية والهندسة؛ عن طريق محاكاة التراكيب والفعاليات البيولوجية المعتمِدة على ميكانيك الكَم والمُنطلِقة من اكتشافات علم الحياة الكُمومي.

إن علم الحياة الكُمومي علمٌ صاعد، سريع التطوُّر من خلال الأبحاث المتلاحقة التي لا تشمل المواضيع التي تطرَّق إليها هذا الكتاب فحسب، وإنما قد تشمل موضوعاتٍ أخرى، كنقل الإلكترونات عَبْر جُزيئات البروتين والـ DNA، وكذلك البروتينات المتألِّقة، وعمل المستقبلات الخلَوية والأدوية والآليات المناعية، والمتحسِّسات والمواد المحفِّزة، والوقاية الضوئية، وتوليد الضوء، وغيرها.

الكتاب موجَّه بالأساس للباحثين والطلبة في كليات العلوم، والكليات الطبية والهندسية، وكذلك لعُموم القُراء الذين يتُوقون إلى معرفة كيف تتشكَّل الأشياء من الفوضى، وما هي الحياة وكيف نشأَت على الأرض، وكيف تعمل الظواهر الحياتية، وكيف يتكوَّن الوعي الذي نعرف به كل ذلك.

فياض محمد شريف

الفصل الأول

مدخل إلى نظرية التعقيد والتفكير المنظومي[1]

Introduction to Complexity Theory and Systems Thinking

«بدون تغيير أنماط تفكيرنا، لن نتمكَّن من حل المشكلات التي نُوجدها بنمط تفكيرنا الحالي.»

آينشتاين (Cabrera, 2006)

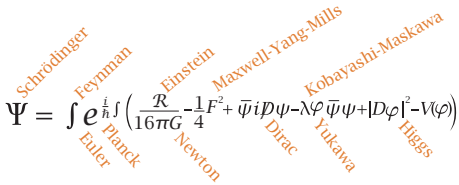
علَّمَتنا الأساطير، والفلسفة، وعلوم القرن السابع عشر، والثامن عشر، والتاسع عشر، مُكلَّلةً بقوانين ميكانيك نيوتن، أن العالم يسير بانضباطٍ عالي الدقة في مكانٍ وزمانٍ مطلَقَين. وكما يبدو من ظاهر حركة الكواكب والنجوم، وتوالي الليل والنهار، والفعل ورَدِّ الفعل، بل هو يعمل كالساعة المتقنة. غير أن ظهور النظرية النسبية بتأكيد تغيُّر الزمان والمكان وتفسير الجاذبية المرتبط بها في مطلع القرن العشرين وفيزياء الكَم (Quantum physics) وما كشفَته من تقلُّب الأشياء وعدم الدقَّة واحتماليات الحقيقة لا ثباتها وما أحدثَته من تطبيقاتٍ تكنولوجيةٍ متعاظمة، كشفَت لنا أن ما نراه وندركه هو مزيجٌ من النظام والفوضى، مَر ويمُر بتاريخٍ متعرِّجٍ من التعقيد. بدأ من الصفر (النقطة المُفرَدة في الانفجار الكبير) وصولًا

[1] سبق أن نُشر هذا الفصل كمقالٍ للمؤلِّف في موقع الحوار المتمدن، عدد ٦١٤٤، في ٢٠١٩/٢/١٣م، وأُعيد هنا مع بعض التغيير.

إلى أعدادٍ هائلةٍ من الجُسَيمات والمادة، وكمياتٍ أعظم بكثيرٍ من الطاقة والمعلومات، والأعظم منها من المادة المظلمة والطاقة المظلمة.

عند تفحُّص الطبيعة من ناحية المكان (الأبعاد؛ الأطوال والحجوم)، ثمَّة الأبعاد التي يتعامل بها الإنسان والأحياء الأخرى، وتكون بحدود ملمترات إلى سنتمترات، وأمتار وكيلومترات، والتي تُسمَّى أحيانا بالعالم الوسَطي (Meso World). وثمَّة أبعادٌ مهولةٌ تتمثل بحدود الكون المرئي، وتصل إلى ٢٥١٠م (متر) تنتشر فيها مليارات المجرَّات، التي تتألَّف من مليارات النجوم وأعدادٍ أكبر من الكواكبِ والكُويكِبات. وهذه المسافات تُقاس عادةً بالسنة الضوئية كوحدة قياس، والتي تبلغ ٩ × ١٥١٠م. هذا المجال من الكون مع الحيِّز الذي يتعامل به الإنسان يُسمَّى بالعالم الكبير (Macro World). في المقابل ثمَّة العالم الصغير (Micro World) الذي يبدأ بالميكرومتر (مكم = ١ / ١٠٠٠ملم) نزولًا إلى النانومتر (١ / ١٠٠٠مكم أو ١ × ١٠-٩م) وما دونه. وفي العالَم الصغير يمكن تمييز مستويَين من الأبعاد؛ الأبعاد النانوية (Nano Dimensions) التي تنحصر بين ١ و١٠٠ نانومتر (ن م) والأبعاد الذرية التي تُقاس بالأنكستروم (١ / ١٠ن م) وما دون ذلك. المواد في العالم الصغير (النانوي) يمكن أن تُظهِر صفاتٍ تختلفُ كثيرًا عما تُظهِره في العالم الكبير بسبب المساحة السطحية العالية نسبة إلى الحجم؛ فالمواد غير المُوصلَة للكهرباء يمكن أن تصبح مُوصلَة له، كما أن بعضها يتوهَّج بدرجاتِ حرارةٍ أقل كثيرًا عما هو في العالم الكبير، أو تُظهِر خواصَّ مغناطيسيةً جديدة واختلافًا في درجة الذوبان أو التفاعلات الكيميائية وغير ذلك. ولهذه الأبعاد أهمية كبيرة جدًا؛ حيث تفسِّر جزئيًّا الخواصَّ والفعاليات الغريبة التي تُظهِرها المواد والخلايا الحية؛ كون أجزائها الفعَّالة الرئيسة ذات أبعادٍ نانوية. كما أن سلوك المادة في العالم الصغير الذي تحكُمه بشكلٍ واضحٍ قوانينُ ميكانيك الكَم، يُظهِر الحالات الفريدة المتمثِّلة بازدواجية الوجود كأجسامٍ وموجاتٍ في نفس الوقت، وظاهرة التراكُب الكمومي (Superposition) حيث تكُون الجُسَيمات في اللحظة المعيَّنة في أي مكانٍ حسب احتمالياتها، وحالة الاختراق (Tunnelling) حيث تخترق الجُسَيمات حواجز الطاقة دون ارتقائها. وظاهرة التشابُك (Entanglement) بين الجُسَيمات التي تُبدي ترابطًا سلوكيًّا بغَض النظر عن المسافة الفاصلة بينها. هذه الخواص تظهَر بفعل ما يُعرف بالتماسك (Coherence) بينما لا تبدو هذه القوانينُ واضحةً في العالم الكبير، الذي تحكُمه قوانين ميكانيك نيوتن والنسبية، بسبب ظاهرة فك التماسُك (Decoherence).

غير أن الأجسام والنُّظُم في العالم الكبير (رغم كِبَر حجمها) تتألَّف بدَورها من مكوِّناتٍ ونُظمٍ تقع في أبعاد العالم الصغير (إلكترونات وبروتونات وذرَّات وجُزيئات)؛ ما يجعل من ظواهر ميكانيك الكَم تعمل في العالم الكبير أيضًا في بعض مظاهرها على الأقل (Abbott *et al.*, 2008). وهذا ما يدفع الفيزيائيين لإيجاد نظريةٍ موحَّدة (نظرية كل شيء) والتي تُفسِّر سلوك المادة والطاقة والمعلومات. لقد تَوصَّل الفيزيائيون حسب Turok (2015) إلى معادلةٍ شاملةٍ يُقال عنها: إنها تشمل الفيزياء كلها.



مع ذلك فجهود العلماء لا تتوقَّف من أجل إيجاد نظريةٍ شاملةٍ تتضمَّن نظرية الأوتار (String Theory) أيضًا التي تم توحيد نُسخِها المختلفة في نظرية M. كذلك محاولة توحيد النسبية مع ميكانيك الكَم في نظرية الانبثاق (Emergency Theory) من قِبَل فريق Klee Irwin (2018). مع ذلك، وبسبب محدودية حواسِّنا التي تُمكِّننا من تصوُّر وفهم الحقيقة كما نبَّه إليها الفيلسوف الألماني عمانوئيل كانْت سنة ١٧٨١م في كتابه «نقد العقل المحض». واختلاف معرفتنا بالأشياء حسب الأدوات والتقنيات التي نستخدمها في كشفها؛ كالتلسكوبات والمجاهر ... إلخ. والتي تتطوَّر باستمرار، والزمن المتأخر دائمًا لإدراكنا بالشيء لتأخُّر وصول الإشارة من الشيء إلى الدماغ، وعملية المعالجة فيه، لا يُمكِننا الوصول إلى الحقائق النهائية أبدًا، لكننا بالبحث نقترب منها أكثر دائمًا. وهكذا لا تُوجد نظرية «كل شيء» وإنما تُوجد آخر نظريةٍ متطورة؛ فالمعرفة متجدِّدة دائمًا حسب Marcelo (2014) وآخرين.

بيَّنَت الأبحاث والدراسات في شتى فروع العلم في العقود الأخيرة، عدم كفاية فهم الظواهر المختلفة، خصوصًا المعقَّدة منها؛ كالطقس، والزلازل، والنظم البيئية للأحياء، وعمل الدماغ البشري، وحركة المجتمعات، وتقلُّبات الأسواق، وعمل الجينات، وغيرها، على أسس المنهج التبسيطي الاختزالي وكذلك المنهج الآلي الحتمي، وضرورة أن تكون الدراسات

للنُّظم الكلية كما هي في الواقع، بكل تقلُّباتها واحتمالات نتائجها. كما بيَّنَت أهمية تضافُر العلوم المختلفة؛ كالرياضيات، والحاسوب، والفيزياء، والكيمياء، وعلوم الحياة، والعلوم الاجتماعية، والاقتصاد وغيرها في تناوُل الظاهرة. حصَل هذا بعد عقودٍ من التفارُق والتطوُّر المنفرد لكل علمٍ على حِدَة، باعتماده المنهج التبسيطي الاختزالي بتفكيك الظاهرة المعقَّدة إلى أجزائها المكوِّنة، والذي كان ضروريًّا في المراحل السابقة على مدى ٣٠٠ سنة، وأدَّى إلى بلوغ كلٍّ منها مستوياتٍ رفيعةً من تراكُم المعلومات والمعطيات، والكشف عن القوانين التي تحكُم مكوِّناتها ومجالات دراستها.

ظهَرَت نتائج هذا التوجُّه الجديد في العقود الأخيرة من القرن العشرين، بنشوء علوم بيولوجيا النُّظم (Systems Biology) والمجموع الجيني (Genomics) والمجموع البروتيني (Proteomics) والمجموع الأيضي (Metaboleomics) في البيولوجيا، والتقنية النانوية (Nanotechnology) وعلم التعقيد (Complexity Science) والتفكير المنظومي (Systems Thinking) على المستوى العام. كما نشأَت مراكزُ أبحاثٍ متخصِّصة مثل Santa Fe Institute وNew England Complex Systems Institute وThe Complex Systems Network of Excellence في الولايات المتحدة؛ تضُم باحثين ذوي رؤًى بمختلف التخصُّصات، للإجابة عن الأسئلة الكبرى التي تهمُّ البشرية؛ كنشوء، وتطوُّر، ومصير الكون والحياة. وكان مُحِقًّا عالم الفيزياء الكبير ستيفن هاوكنك حين أعلن أن القرن الحادي والعشرين سيكون قرن التعقيد (MacKay, 2008).

(١) نظرية التعقيد Complexity theory

أنا الأول، وأنا الآخر.
أنا البغي، وأنا القدِّيسة.
أنا الزوجة، وأنا العذراء.
أنا العاقر وكثرٌ هم أبنائي.
أنا في عرسٍ كبيرٍ ولم أتخذ زوجًا.
أنا القابلة ولم أُنجِب أحدًا.
وأنا سلوةُ أتعابِ حملي.
أنا العروس، وأنا العريس.

وزوجي من أنجبَني.
أنا أم أبي، وأخت زوجي،
وهو من نسلي.

عشتار (فراس السواح، ٢٠٠٢م)

«الغيوم ليست كروية، والجبال ليست مخاريط، والشواطئ ليست دوائر، والقلف ليس بأملس، كما أن البرق لا يسير بخطوطٍ مستقيمة.»

Benoît Mandelbrot (Gleiser, 2014)

(١-١) التعقيد Complexity

حسب المفهوم القاموسي، فإن المعقَّد يتكوَّن من أجزاءٍ مترابطةٍ أو متناسجة Bar-Yam (1997). وحسب فكرة كولموكروف؛ فإن مقياس تحديد تعقيد منظومةٍ معيَّنة، ينطلق من افتراضِ أنَّ لكل تركيبٍ معيَّن ثمَّة حجمٌ أدنى من خوارزمية (برنامج حاسوبي) تصف ذلك التركيب وكل تفاصيله. ومقياس حجم هذه الخوارزمية حسب لغة الوصف العامة سيكون عدد البايتات (البايت = ٨ بت) التي تتكوَّن منها. غير أن من الصعب أن لم يكن مستحيلًا تحديد الحجم الأدنى للخوارزمية بالضبط، وهو ما يُعرف بنظرية عدم الاكتمال لكايتين. مع ذلك، ثمَّة من يستخدم فكرة كولموكروف بشكلٍ تقريبي (Mayer, 2020).

التوصيف الأكثر قبولًا هو أن التعقيد حالةٌ تقع بين النظام والفوضى؛ فالمنظومات المعقَّدة ليست منتظمة وقابلة للتنبؤ كحالة ثبات الجُزيئات في البلورة، ولا هي عشوائية أو شواشية كحركة جُزيئات الغاز. إنها تُظهِر مزيجًا من الحالتَين؛ فهي قابلة للتنبؤ إلى حدٍّ ما في بعض الوجوه وعصية على التنبؤ في وجوهٍ أخرى. الوضع الوسَطي يوازن بين التصلُّب والهيجان، ويُعرف بـ «حافة الشواش». أن التوازُن القلِق هذا مطلوبٌ لأغراض التكيف والتنظيم الذاتي والحياة للأنظمة المعقَّدة التي تنحو تلقائيًّا باتجاه حافة الشواش. وتُظهِر المنظومات المعقَّدة حالة التمايُز بين مكوِّناتها التي تكون كثيرةً في الغالب والترابُط بين المكونات من خلال علاقات التآثر بينها؛ أي الاستقلالية مع شيء من الاعتمادية. إن مكوِّنات المنظومة المعقَّدة هي في الواقع عوامل (Agents) كونها هي ذاتها منظوماتٍ مفردةً ضمن المنظومة المعقدة وتتصرف استجابة للأحداث التي تؤثِّر فيها؛ فالبشر هم عوامل في منظومة

المجتمع المعقدة، الخلايا عوامل في منظومة النسيج، وجُزيئات البروتين عوامل في منظومة الخلية الحية، والأحماضُ الأمينية عوامل في منظومة البروتين، وذرَّات الكاربون والنتروجين والهيدروجين والأوكسجين عوامل في منظومة الحامض الأميني، وكل ذرة من تلك العناصر هي منظومةٌ تتألف من بروتونات وإلكترونات وهكذا.

ويُنظر لعوامل المنظومة المعقَّدة ضمنيًّا على أنها ذات أهداف؛ فأفعالها تصُب في مجرى تعظيم أهليَّتها، نفعها، أو تفضيلاتها الفردية. وفي حالة عدم تمييز هدفٍ معيَّن لها؛ فإن نشاطها سيخضع لمنطق السبب–التأثير أو الشرط–الفعل (إذا–فإن). وبسبب الصِّلات التي تربط عوامل المنظومة ببعضها، فإن الفعل الذي يُحدِثه أحد العوامل (تأثير موضعي) سيقدح تأثيراتٍ إضافيةً لواحد، أو أكثر من العوامل المجاورة في البداية، ثم الأخرى البعيدة في المنظومة، وهكذا تحصُل سلاسل من الأحداث يمكن أن تشمل المنظومة كلَّها (تأثير عام) (Heylighen *et al.*, 2008).

مع ذلك وكما يرى الفيزيائي Perez-Mercader (2020) فإن التعقيد على السطح هو انعكاسٌ لبساطةٍ عميقةٍ جدًّا.

عواملُ نشوء التعقيد متعدِّدة وهي تتضمَّن:

(١–٢) الوحدة والتنوع Unity and Diversity

وَحْدة الوجود ترجع إلى أن كل شيء نشأ من المجال الكُمومي (Quantum field). والأخير هو بحرٌ مُتلاطِم من نسيج المكان والزمان (الزمكان) عند التوسُّع السريع للكَون بعد الانفجار العظيم. كما أن جميع الجُسَيمات الأولية التي تكوَّنَت من المجال الكُمومي، وكذلك الذرَّات التي كوَّنَتها وتُكوِّنها وكل المواد التي نعرفها في الطبيعة هي من حيث البنية طاقةٌ مكثفة. وهكذا فإن الطاقة والمادة هما جوهرٌ واحد. وهذا ما أكَّدَته معادلة آينشتاين الشهيرة:

الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء

$$E = MC^2$$

والتي تعني تحوُّل أحدهما إلى الآخر، وهو ما يحصُل في توليد طاقة الشموس، والذي يجعل الحياة ممكنةً على الأرض من خلال استغلال طاقة ضوء الشمس، وما جرى تطبيقه عمليا في القنابل الذرية والهيدروجينية، ويجري استخدامه في توليد الطاقة الكهربائية في المفاعلات النووية، كذلك تحلُّل المواد المشعَّة. من ناحيةٍ أخرى فإن من أهم

المميزات الوجودية التي أكَّدَتها فيزياء الكم هي التجزُّؤية أو التفرُّدية (Discretness) لكافة مُكوِّنات الطبيعة بدءًا من الطاقة؛ حيث تُوجد بشكل كَماتٍ (Quanta) صغيرةٍ وليست ككلٍّ مستمر، إلى الجُسَيمات تحت الذرية (كواركات، فوتونات، بروتونات، إلكترونات ... إلخ.) إلى المعلومات (Information) ووَحْدتها المكوِّنة البت (Bit). والحال ينطبق على الأجسام المكوَّنة من تجمُّع ذرات وجزيئات؛ أي جميع ما نعرفه من أجسام في الطبيعة. ومن المعروف جيدًا أن الأجسام التي تبدو كأنها كتلةٌ واحدةٌ متماسكة (الهواء، الماء، الصخور، النباتات، الحيوانات، الكواكب والنجوم) هي في الواقع تجمُّعات لجزيئات، وذرات، وإلكترونات، وبروتونات، كلٌّ يحتفظ بفردانيته، وإن ارتبط بالمكوِّنات المماثلة أو المختلفة بقصوَى أو أواصر كيميائية.

ويمكن القول إن التفرُّدية أوجدَت الأعداد في الطبيعة أو الحاجة لمنطق الأعداد الرياضية. التفرُّدية مكَّنَت من تحقيق ظواهرَ وجوديةٍ أساسية؛ التماثُل، والتضاد، والتشابُه، والاختلاف بين الطاقات والجُسَيمات والذرَّات والتكوينات الناتجة عنها. التضاد يتمثَّل في أن أي جُسَيمٍ أو جسمٍ تم أو يتم تكوينه يترافق بتكوين جسيمٍ أو جسمٍ مضادٍّ له، وتصادمُهما يؤدِّي إلى فَنائهما، وتكوين فوتونات (هوكنج. ٢٠٠٦). والطاقة الكهرومغناطيسية موجبة، بينما طاقة الجاذبية سالبة، والإلكترون ذو الشحنة السالبة له جسمٌ مضادٌّ هو البوزترون ذو الشحنة الموجبة، وهكذا. ويمكن أن تتضادَّ الجسيمات المتجاورة من حيث الشحنة الكهربائية؛ فبعضها مشحون بشحنةٍ سالبة (إلكترونات) وأخرى بشحنةٍ موجبة (بروتونات). وحتى على مستوى الذرات، فالذرة التي تكتسب إلكترونًا تصبح شحنتها سالبة (أيون سالب) والتي تفقد إلكترونًا تصبح شحنتها موجبة (أيون موجب). ويمكن أن يتضاد استقطاب الفوتونات إلى أعلى أو إلى أسفل، كذلك البَرم المغزلي (Spin) للإلكترون يمكن أن يكون مع أو عكس عقرب الساعة. كذلك تضادُّ لفَّ الإلكترونات أو استقطاب الفوتونات المتشابكة (Entangled).

وكقاعدةٍ عامةٍ لا يمكن فهم الكثير من الأشياء والظواهر إلا بضدها، أو نقيضها (ضوء-ظلام، حار-بارد، موجب-سالب، مفترس-فريسة، نظام-فوضى ... إلخ.).

أمَّا الجُسَيمات من النوع نفسه فتكون متماثلة. والأمر ينطبق على تماثُل الذرَّات والجُزيئات من النوع نفسه (فذرَّات الحديد متشابهة وجُزيئات الهيدروجين متشابهة) وبالتالي الأجسام المكوَّنة منها تكون متشابهة أيضًا.

يمكن اعتبار التضاد والتماثُل حالتَين وصفيتين (Qualitative) والمنطقة بينهما يُعبَّر عنها بالاختلاف والتشابُه. وهما صفتان كميتان (Quantitative) متلازمتان. حيث يمكن

اعتبار التضاد أقصى درجات الاختلاف، والتماثل أقصى درجات التشابه؛ فبينما يحتوي أو يظهر المختلفان قليلًا من التشابه، يحتوي المتشابهان قليلًا من الاختلاف، ولا يمكن المقارنة إلا بوجودهما معًا. هذه الخصائص الأساسية للأشياء في الطبيعة هي مصدر الوحدة والتنوع الهائل فيها؛ فجميع الأحياء تتشابه وتختلف مع بعضها في الوقت نفسه، كذلك كل مكوِّنات الطبيعة غير الحية تُظهِر الخاصية نفسها لا بل إن الأحياء كلها تتشابه وتختلف مع المواد والتكوينات غير الحية؛ كونها جميعًا مؤلَّفة من ذرات عناصر متشابهة، لكنها بتجمُّعاتٍ جُزيئية وترتيباتٍ مختلفة.

وكقاعدةٍ عامة، فإن كل الموجودات في الطبيعة تحمل بذاتها صفتَي التشابُه والاختلاف في الوقت نفسه، وهي مصدرٌ مهمٌّ لنشوء التعقيد.

(١-٣) الحركة والتغيُّر Motion and Change

كل شيء في الكون يتحرك (Tyson *et al.*, 2000) ولا يُوجد سُكونٌ في الطبيعة (Schiller, 2016). والحركة تكون نسبية؛ أي إن حركة الشيء تكون نسبة إلى شيءٍ آخر. وإذا كان تعريف الحركة المنسجم مع البديهة هو تغيُّر موقع الشيء في المكان مع الزمن، فإن التعريف الأدق والأشمل هو تغيُّر حالة الأشياء (Schiller, 2011) أو كما عبَّر عنها الفيلسوف الإغريقي هيرقليطس (٤٨٠–٣٥٠ق.م.) «إنك لن تعبُر النهر مرتَين». وللأهمية الكونية العظمى للحركة، فقد درس الباحث الألماني Christoph Schiller الحركة في كتابٍ من ستة أجزاء (٢٤٨٥ صفحة) يحمل عنوان «جبل الحركة Motion Mountain» مفاده أن الحركة هي الملاحظة الأكثر أساسية عن الطبيعة، وأن أي شيءٍ يحصُل في العالم هو نوع من الحركة. ثمَّة أنواعٌ مختلفة من الحركة مثل الحركة الزاويَّة حيث يتحرَّك الشيء حول محوره (دوران الأرض حول نفسها) أو محورٍ خارجي (دوران الأرض حول الشمس)، أو حركةٍ خطية حيث تكون الحركة بخطٍّ مستقيم (حركة كرة البلياردو)، وحركةٍ عشوائية (حركة جُزيئات الغازات والسوائل) وحركةٍ دورية (البندول، عضلات القلب) وحركةٍ موضعية (حركة الأطراف في الإنسان أو أغصان الشجرة) وغيرها.

ما هو الشيء الذي يسبِّب أو يمكِّن من الحركة ومن يوجِّهها؟ حسب Lloyd (2006) فإن الطاقة هي التي تمكِّن الشيء من الحركة (فهي القدرة على إنجاز شغل) والمعلومات (Information) هي التي تُوجِّه سلوكه في ظل قوانين الطبيعة. وهكذا فإن الحركة هي

مفتاح التغيُّر، وما يُرافِقها من تبادُل وتحوُّل للمعلومات عَبْر التصادُم والتآثُر ما بين الأشياء ومعالجة المعلومات، وما ينتج عنها من حالاتٍ جديدة.

مع الانفجار العظيم كانت الطاقة متجانسةً بشكل أشعة جاما، وثمَّة القليل من المعلومات لوصفها بسبب عدم التميُّز. ومع تمدُّد الكون (حركة) خلال الأجزاء القليلة جدًّا من الثانية من الانفجار العظيم، تكوَّنَت قُوى الطبيعة الأربعة؛ القوة النووية الضعيفة، والقوة النووية القوية، والكهرومغناطيسية، والجاذبية. ثم تكوَّنَت البروتونات والنيوترونات من الكواركات (تايسون وكولدسمث، ٢٠١٢). بعدها تكوَّنَت نوى الذرَّات ثم ذرَّات العناصر الأخف؛ الهيدروجين (٩٠٪) والهيليوم، ونُدرة من الليثيوم، والديوتيريوم والتريتيوم.

تَرافَق تكوينُ القُوى الأربعة والجُسَيمات الأولية والذرَّات بزيادةٍ هائلةٍ للمعلومات. تَبِع ذلك تكثُّف للمادة (حركة)؛ حيث نشأَت المجرَّات والنجوم، بينما تكوَّنَت العناصر الأثقل؛ كربون، نتروجين، أوكسجين ... إلخ، في قلب النجوم الكبيرة، بسبب تفاعلات الاندماج النووي، ثم انتشرَت مع انفجار النجوم في مستعراتٍ كبرى (Supernova)؛ ليتكون الغُبار ما بين النجوم، والذي تتكوَّن منه نجومٌ (شموس) جديدةٌ مع كواكبها وأقمارها على الكواكب، ومنها كوكب الأرض. مكَّنَت الطاقة الحرة الوافرة وانخفاض درجات الحرارة لمستوياتٍ مناسبة من تكوين مركَّباتٍ عضوية مختلفة التعقيد، والتي تُوِّجَت بنشوء الأشكال الأولية للمادة الحية (Lloyd, 2006). وما كان لهذه الأخيرة أن تتطوَّر إلى الأحياء البدائية والراقية لولا الاختلاف في المادة الوراثية، والذي نتج عن الطفرات والتكاثُر الجنسي. والطفرات تتضمن عمليات حذف أو حشر أو استبدال للقواعد النووية الأربعة (كوانين، أدنين، سايتوسين، وثيامين) من أو في جُزيئة DNA الأصلية، بينما يعتمد الاختلاف في التكاثُر الجنسي على عملية العبور للِقطَع الكروموسومية. وكلتا العمليتَين تتطلَّبان فعل الحركة.

إن الحركة والتغيير شرطان لا بد منهما لنشوء التعقيد؛ فالتعقيد يتطلَّب تأثُّر وتفاعُل العوامل المكوِّنة للمنظومة، ما يمكِّن من نشوء علاقات وتراكيبَ جديدة، تغيِّر وتزيد من المعلومات التي تحملها المنظومة.

(١-٤) المُكوِّنات والعلاقات Components and Relations

سبق وأن ذكَرنا أن كل الأشياء في الطبيعة تتألَّف من مكوِّناتٍ قد تكون متشابهة أو مختلفة. ولا بد لكل مُكوِّنٍ من مكونات الطبيعة أن يتأثَّر ويؤثِّر، بصورة مباشرة أو غير مباشرة بالمكوِّنات الأخرى، وبقيمٍ مختلفةٍ تتناسَب وطبيعة كل مكوِّن. الشيء بذاته (خواصه) مهم؛

حيث سيُشكِّل الجزء. كما أن علاقته بالأشياء الأخرى لا تقل أهمية، وستُسهِم في تشكيل الكل؛ فكل جسمٍ مهما كان كبيرًا أو صغيرًا، يتبادل تأثير الجاذبية مع الأجسام الأخرى. كما يتعرَّض كل جسمٍ لوابلٍ متواصلٍ من الإشعاعات والجُسَيمات والمجالات الكهرومغناطيسية الصادرة عن أجسام أو مجالات أخرى؛ ففي الثانية الواحدة تتخلَّل أجسامنا ترليوناتٌ من النيترينوات المنبعثة من الشمس. وتتعرَّض جميع الأجسام للتصادُم أو الاحتكاك مع أجسامٍ أخرى؛ مما يجعلها عُرضةً لتغيُّر تركيبها وحركتها على الدوام. وعلى العموم تتواجد جميع الأجسام كمنظوماتٍ (Systems) لتجمُّعاتٍ ذريةٍ أو جُزيئية نتيجة لروابط تجمع مكوِّناتها، بل إن الذرات والجُزيئات الحرة ذاتها تشكِّل منظوماتٍ بشكل معادن (بلورات) أو غازات أو سوائل. وفي كل منظومة ترتبط عناصرها المكوِّنة بعلاقاتٍ مميزة تزيد من تعقيدها. كما ترتبط المنظومات مع المحيط، ويمكن أن تتبادل الطاقة والمعلومات معه، وتخضع للانتخاب الطبيعي في تشكُّلها وتطوُّرها (Heylighen, 2018). وغالبًا ما تكون العلاقات بين الأشياء في الطبيعة بشكل شبكاتٍ تنشأ عن تأثير المكوِّن من خلال الفردية والحرية والتأثُّر مع المكوِّنات الأخرى عَبْر الخضوع لقواعد التأثُّر. على مستوى الكائنات الحية ثمَّة اتصالاتٌ خلَويةٌ داخلية وما بين الخلايا المتجاورة سواء كانت بشكل أحياءٍ مفردة الخلية (بكتيريا، خمائر) أو متعدِّدة الخلايا (نباتات، حيوانات) تُنظِّم فعالياتها وعلاقاتها مع البيئة. كما تنشأ روابطُ مهمَّة بين أفراد المجتمعات النباتية والحيوانية والبشرية حيث تلعب أدوارًا هامة في تشكيل سلوكها كمجموعاتٍ متميزة وعلاقاتٍ متبادلة فيما بينها ككل، ومع البيئة حيث تشكِّل الأنظمة البيئية والنظام الحيوي ككل. وتُظهِر المجتمعات البشرية علاقاتٍ اجتماعية، اقتصادية، ثقافية مُتنوِّعة، ومختلفة التعقيد على المستويات المحلية والعالمية. وكقاعدةٍ عامة كلما زادت أو تعمَّقَت العلاقات والروابط بين مكوِّنات المنظومة، وقل التمايُز بين المكوِّنات، زاد النظام (قلَّت الفوضى) كمثال تحوُّل الماء إلى جليد؛ مسيرة شعبية سلمية، في حين أن زيادة تمايُز المكوِّنات مع قلة الروابط بينها تؤدِّي إلى زيادة الفوضى كمثال تحوُّل الماء إلى بخار، وقمع المسيرة الشعبية باستخدام العنف. كما أن زيادة تنوُّع وأعداد المكوِّنات وزيادة العلاقات بينها يزيد من تعقيد المنظومة.

(١-٥) اللاخطية Nonlinearity

اللاخطية هي الوصف الرياضي للظواهر التي لا تتناسب فيها الأسباب والنتائج، أو لا تتماشى فيها المُخرَجات مع المُدخَلات. وتفسِّر اللاخطية التغيُّرات في العوامل مع الزمن.

اللاخطية يمكن أن تُفضي إلى عدم الدقَّة، وغير المتوقَّع والشواش (Chaos) والتعقيد، وعكس البداهة التي تكون خطية. في الطبيعة تُوجد علاقاتٌ خطيةٌ؛ مثل حركة البندول البسيط، السقوط الحر للأشياء، حركة الكواكب، علاقة المبيعات والأرباح. أما العلاقات اللاخطية فهي التي تَسِم معظم الظواهر في الطبيعة؛ كتغيُّر شكل الأميبا، والمُناخ، والأعاصير، وعمل أسواق الأوراق المالية، والحركات الاجتماعية، والتقلُّبات السياسية، والفن التجريدي، وحسب. Schiller (2011) فإن اللاخطية يمكن أن تُفسِّر عدم الانسجام، كما يمكن أن تؤدِّي إلى تأثيراتٍ أقوى. وفي بعض النُّظم يمكن ملاحظة تحوُّل العلاقات الخطية إلى علاقاتٍ لا خطية أو العكس، لتفاعُل المتغيِّرات نفسها؛ كعلاقة سرعة التفاعلات الكيميائية، ودرجة الحرارة؛ حيث تزيد بعلاقةٍ خطية ثم تتحوَّل إلى علاقةٍ لا خطية بعد تخطي عتبةٍ معيَّنة من درجات الحرارة العالية. كذلك منحنى نمو البكتيريا حيث يكون لا خطيًّا، لكن جزءًا مهمًّا منه يكون خطيًّا (طور الثبات).

إن مبعث اللاخطية يكمُن في تأثُّر واعتمادية مكوِّنات المنظومة المعقدة على بعضها، وكذلك في احتمالية الحقيقة كما أكَّدَتها فيزياء الكم؛ فالحقيقة المتحقِّقة ليست حتمية التحديد سلفًا، لكنها تكون حيث يكون واحد من العديد من المُمكِنات، التي تتناسب مع احتمالاتها التي تحدِّدها قوانين الطبيعة؛ فمرورك يوميًّا في هذا الطريق، الذي تزينه الأشجار العالية من جانبَيه، لا يُعرِّضُك لخطر سقوط شجرة أو غصنٍ على رأسك. وهو الحال الذي يتحقَّق في أغلب الأوقات؛ لأن احتماليَّته أكبر بكثيرٍ من احتمال سقوط الشجرة أو الغصن. لكن مثل هذا الاحتمال الأخير والنادر قد يحصُل مع ذلك، ولا يُمكِنك الجزم بعدم إمكانية حصوله. نسبة ظهور الصورة أو الكتابة للعملة المعدنية عند رميها حسب العلاقة الخطية هي ٥٠٪، لكن في مثل هذه التجارب قد تحصل على نسبٍ أخرى، مع أن نسبة ٥٠٪ هي الأرجح لو تم تجريب رمياتٍ كثيرةٍ جدًّا. في حالاتٍ أخرى فإن أحداثًا معيَّنة تحصُل من خلال الصدفة (الحظ) فقط؛ كتلقيح النطَف للبيضة ونشوء الجنين؛ حيث إن من يُحقِّق الفعل هو واحدٌ من عشرات الآلاف أو الملايين، وكذلك الفوز بجوائز اليانصيب المتحقِّق هو الاحتمال الضعيف جدًّا (واحد من ملايين). هذه الأحداث اللاخطية تتصف بعدم القدرة على التنبُّؤ بها.

العامل الآخر هو حساسية النُّظُم الطبيعية للأوضاع الابتدائية، حيث وبسبب طبيعة العوامل المكونة ذاتها؛ فإن التغيرات البسيطة يمكن أن تؤدِّي إلى تغيُّرات مهمة مع الزمن. وللتعبير عن هذه الحالة شاع استخدام ما يُعرف بتأثير الفراشة (Butterfly Effect)

الذي يقول بأن رفرفة جناح فَراشة فوق بكين يُمكِن أن يتحوَّل بعد زمنٍ إلى إعصارٍ فوق نيويورك. أو كما تعبِّر عنه أغنيةٌ فولكلوريةٌ أمريكية حسب (غليك، ١٩٨٧):

بسبب مسمار، سقطَت حدوة حصان.
بسبب حدوةٍ تعثَّر الحصان.
وبسبب حصانٍ سقط فارس.
وبسبب فارسٍ خسرتُ معركة.
وبسبب معركة فقدتُ مملكة.

أغلب الأعاصير تبدأ بارتفاعٍ بسيطٍ في درجة حرارة مياه البحر أو المحيط في منطقةٍ معيَّنة، يؤدي إلى سخونة الهواء وخلخلة الضغط ونشوء الريح وهكذا. تصلُّب الشرايين يبدأ بخدشٍ بسيطٍ أو التهاب في بطانة الشريان، لتترسَّب عليه بعض مُكوِّنات الدم وجُزيئات الكوليسترول والتي يزداد سُمكُها مع الوقت، ويُمكِن أن تسبِّب موت المريض نتيجةً لانسداد الشريان بجلطةٍ دمويةٍ فجائية.

(١-٦) المعلومات ونشوء التعقيد Information and origin of complexity

حسب Lloyd (2006) فإن المعلومة هي الاختيار بين بديلَين؛ مثل ٠-١؛ حار-بارد؛ موجب-سالب، وهكذا. وكل متقابلَين اثنَين يكوِّنان بتًا (Bit) واحدًا، والأربعة تنتج اثنَين من البِتات، وهكذا. والبِت هو أصغر قيمة للمعلومات، ويمثِّل وحدة المعلومات. كل جُسَيمٍ أو ذرةٍ أو جُزيئةٍ أو جسم يُسجِّل معلومات (المعلومات هنا تتمثَّل بالشحنة مثلًا سالبة-موجبة أو مشحونة-متعادلة، البرم مع عقرب الساعة-عكس عقرب الساعة ... إلخ). أيُّ تصادُمٍ ما بين هذه المكوِّنات وغيرها وأي تغيُّرٍ حركي في الكون بغَض النظر عن حجمه، يُعالِج هذه المعلومات بطريقةٍ منهجية، تمثِّل عملية حوسَبة. وعملية الحوسَبة تتضمَّن استخدام عملياتٍ منطقية (Logic Operations) مثل AND وNOT وCOPY وOR تقوم بتحويل البِتات بطرقٍ بسيطةٍ محددة وبوابات منطقية (Logic gates) بسيطة وقليلة تنشأ عنها حيث تُعالج المعلومات المدخَلة (مُدخَلات) إلى معلوماتٍ خارجة (مُخرَجات). وتنشأ عن تشكيلاتٍ من البوابات المنطقية دوائرُ منطقية (Logic Circuit) تقوم بتحويلاتٍ أكثر تعقيدًا للمعلومات المُدخَلة. ما يفعله الحاسوب الاعتيادي هو إعمال البوابات المنطقية

للبِتات تدريجيًّا في برامجَ يُحدِّدها المبرمج. والبرنامج هو نَسَقٌ معيَّن من البِتات تُخبِر الكومبيوتر ماذا يعمل. وحيث إن المواد والطاقة والمعلومات في الكون تخضع لقوانينِ ميكانيك الكَم، فإن الكون يمثِّل كومبيوترًا كموميًّا، والبِتات تكون بشكل بِتاتٍ كموميةٍ أو كيوبت (Qubit) وهذا يمتاز عن البِت الذي يُستخدَم في الحاسوب الرقمي الاعتيادي (الذي يكون حالةً من حالتَين ٠ أو ١) بأن يكون ٠ أو ١ أو ٠ و١ في نفس الوقت نتيجةَ ظاهرة التراكُب (Superposition) ما يجعلُه بإمكاناتٍ حاسوبيةٍ فائقة. ونتيجةَ التقلُّبات والتحوُّلات العشوائية للبِتات في الطبيعة، والتي تقوم بها الجُسَيمات والذرات والجُزَيئات والأجسام المتصادمة والمتأثِّرة باستمرار، والتي أغلبها يُنتِج خربشاتٍ أو أخطاءً عشوائية، لكن بعضها يُنتِج برامجَ قصيرةً أدَّى تراكُمها وتداخُلها على مدى ملايين ومليارات السنين إلى كل التعقيد الذي نراه اليوم. ويُرجِع الباحث Lloyd (2006) هذا التعقيدَ الرائعَ في الكون إلى ثوراتِ معالجةِ معلوماتٍ كبرى، تمثَّلَت أوَّلها بالانفجار العظيم، ثم نشوء المادة الحية، واختراع الجنس، وتطوُّر الدماغ ثم اللغة والكتابة والحساب. ولكل ثورةٍ معلوماتيةٍ كبرى تقنيتُها التي بُنيَت على تقنية الثورات المعلوماتية التي سبقَتها.

ثمَّة من يميِّز مكوِّنات الطبيعة إلى أربعةِ مستوياتٍ عامة من التعقيد:

المستوى الأول وهو الأقل تعقيدًا، يتمثَّل بالطاقة والقوى الأساسية الأربعة (الكهرومغناطيسية، النووية الضعيفة، والنووية القوية، والجاذبية) والجُسَيمات الأوَّلية تحت الذرِّية (كواركات، إلكترونات ... إلخ.) والذرات والمواد بحالاتها الأربعة (الصلبة، والسائلة، والغازية، والبلازما) وحركتها. ولكونها الأبسط فإن تراكيبها وسلوكها يمكن فهمه بمنطقٍ رياضي دقيق، وقوانين ميكانيك نيوتن والنسبية التي تعمل في العالم الكبير المرئي (ملمترات، أمتار، كيلومترات/ثانية، دقيقة، ساعة، يوم، سنين) وميكانيك الكَم التي تعمل في العالم الصغير غير المرئي (ميكرومتر، نانومتر، بيكومتر .../أجزاء الثانية، ... فمتوثانية) المستندة إلى الاحتمالات وعدم الدقة. العلم الذي يدرُس هذا المستوى من التعقيد هو الفيزياء.

المستوى الثاني يتمثَّل بتفاعُل الذرات والجُزيئات للعناصر الطبيعية، وعلاقاتها الطاقيَّة، وتكوين المركَّبات بدرجات تعقيدها المختلفة بما فيها البوليمرات (الجُزَيئات الضخمة) ذات النشاط الحيوي. ومع أن هذا المستوى هو أكثر تعقيدًا من المستوى الأول، إلا أنه يخضع في الكثير من جوانب دراسته للمنطق الرياضي ويُعبَّر عنه بمعادلات وقوانين،

إلا أن الحيود يكون أكبر من المستوى الأول، خاصة في الكيمياء الحيوية التي تدرُس الجُزيئات العضوية الضخمة؛ كالبروتينات والإنزيمات والأحماض النووية وكيمياء النانو. العلم الذي يدرُس هذا المستوى من التعقيد هو الكيمياء.

المستوى الثالث يشتمل على المواد والكائنات الحية والتي تتضمن موادَّ وتراكيبَ عضوية معقدة جدًّا، وذات تنظيمٍ خاص، وتراكيب نانوية الأبعاد، وفعالياتٍ مميزة لا تُظهِرها المواد غير الحية، تتمثَّل من بين أمورٍ أخرى بالقدرة على التحسُّس والتكاثُر والتغايُر والتطوُّر وحفظ النوع. وتُوِّج تطوُّر الأحياء بظهور الإنسان العاقل (*Homo sapiens*) الذي يتصف بوعي الذات وامتلاك اللغة والقدرة على التفكير والتعلُّم والابتكار واستخدام الآلة. إن أجسام معظم الأحياء تقع ضمن أبعاد العالم الكبير، إلا أن تراكيبها الدقيقة الفعَّالة (الخلية وأجزاءها) تقع ضمن أبعاد العالم الصغير؛ وعليه فإنها تخضع لقوانين الفيزياء التقليدية، وفيزياء الكم والكيمياء، وكذلك البيولوجيا. وبسبب المستوى العالي من التعقيد ليس من السهل التعبير عن الظواهر البيولوجية، بالقوانين والمعادلات الرياضية، لوجود درجاتِ حريةٍ عاليةٍ للمتغيرات؛ وبالتالي تتركَّز القوانين والمعالجات والمعادلات الرياضية في مجال البيولوجيا التخليقية (Synthetic Biology) والبيولوجيا النظرية (Theoritical Biology) والبيولوجيا الرقمية (Digital Biology) وهي فروعٌ بيولوجيةٌ صاعدة، والوراثة والفسيولوجيا والبيئة. بينما يشيع استخدام الإحصاء والحوسَبة في جميع فروع البيولوجيا خصوصًا علم الحياة الجُزيئي، وتقسيم الأحياء. العلم الذي يدرس هذا المستوى من التعقيد هو البيولوجيا أو علم الحياة.

المستوى الرابع وهو الأكثر تعقيدًا يتمثل بالمستوى الاجتماعي الذي يتألَّف من أعدادٍ كبيرة من البشر، وكل فردٍ فيه يمِّثل أعقدَ وأرقى الكائنات في الطبيعة التي نعرفها الآن. ويُمكِن القول إن الكيان الاجتماعي هو تجمُّعٌ عضويٌّ سائب لعددٍ قليلٍ أو كثير من الأفراد تشُدُّه علاقاتٌ واتصالاتٌ مباشرة وغير مباشرة، تُشبِه بحدودٍ معينة تجمُّع خلايا الكائن الحي أو تُشكِّل ما يعرف بالكائن الحي العُلْوي (Metaorganism). يتأثَّر سلوك الإنسان بالوراثة والبيئة والعلاقات الاجتماعية والاقتصادية ومستوى التحضُّر. وللعادات والتقاليد والمعتقدات الدينية والمشاعر القومية أدوار في التأثير على السلوك، حسب مستوى التسامُح أو التعصُّب فيها. ويزداد تعقيد السلوك البشري مع زيادة عدد الأفراد وتنوُّع وتشابُك علاقاتهم من العائلة إلى المجتمع المحلي ومجتمع الدولة والمجتمع الإنساني. في هذا المستوى من التعقيد يصعُب التعبير عن الظواهر بقوانينَ رياضية مع وجود بعض القوانين

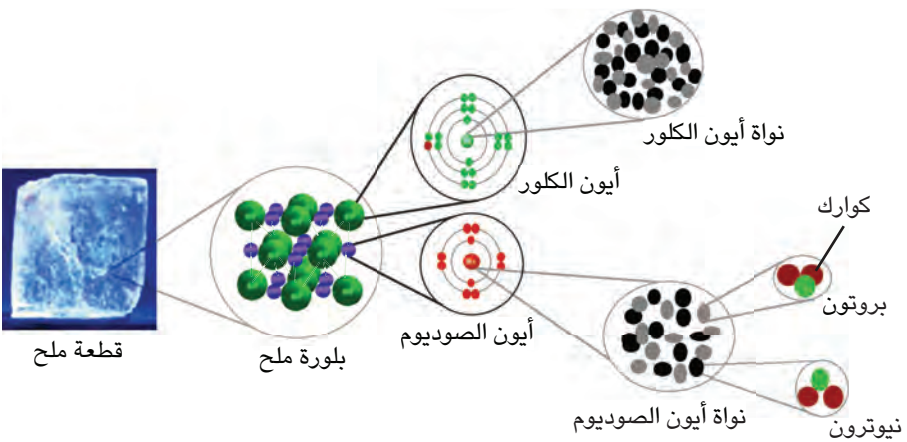
الاقتصادية والاجتماعية والتاريخية والحقوقية المرنة بينما يُستخدم الإحصاء والحوسَبة في فهمها. هذا المستوى هو مجال علوم المجتمع والاقتصاد والتاريخ والقانون، إضافة إلى الآداب والفنون.

يُفيد هذا التقسيم لمستويات التعقيد في إلقاء الضوء مُبكِّرًا، لكشف الملامح الكلية للنماذج التي تُدرَس في نظرية التعقيد. ومن الضروري التأكيد على تداخُل المستويات الأربعة المذكورة؛ فالمستوى الأول من التعقيد متضمَّن في المستوى الثاني، وتداخُلُهما شرطٌ أساسي لتكوين المستوى الثالث، والمستوى الأخير لا يتم دون المستوى الثالث. وحسب Heylighen (2018) فإن مكوِّنات الطبيعة علائقية؛ أي إنها جوهريًّا معتمدةٌ الواحدةُ على الأخرى، ومترابطة، وكل عنصرٍ أو مكوِّنٍ في الطبيعة يُوجد فقط بالعلاقة مع العنصر الآخر، وشبكة العلاقات التي تنشأ بهذه الطريقة هي الأساس لتكوين التنظيمات المعقَّدة.

ويميِّز Kauffman (2019) البيولوجيا والموادَّ الحية عن الفيزياء والمواد غير الحية كون الأخيرة تكون أركودية (Ergodic) أي إنها تستكشف جميع فضاءات الحالة للمنظومة؛ وبالتالي تكون درجات تعقيدها محدودة؛ كمثال الغاز المحصور في وعاءٍ جُزيئاته تستكشف كافة فضاءات الحالة ضمن فترةٍ زمنيةٍ معينة. وكذلك الكواكب التي تدُور حول شموسها، وهكذا. لكن المنظومات الحية غير أركودية؛ وبالتالي لا يمكنها استكشاف جميع فضاءات الحالة ضمن زمن وجودها؛ وبالتالي درجة تعقيدها تكون مفتوحةً غير محدودة. الكون من خلال الفيزياء كوَّن الذرَّات بكل الأنواع الممكنة لينتج ١٠٠ نوعٍ فقط من عناصر الجدول الدوري. كما كوَّن بواسطة الكيمياء آلاف أو عشرات آلاف المركَّبات الكيميائية غير الأحيائية خلال أكثر من ١٠ مليارات سنة، دون أن يُنتِج التعقيدات التي كوَّنها بواسطة البيولوجيا في فترة أقل من ٤ مليارات سنة. لنأخذ البروتين كمثال؛ البروتين كما هو معروفٌ يتألَّف من سلسلةٍ قد تطول أو تقصر من الأحماض الأمينية المرتبطة التي عدد أنواعها ٢٠. البروتينات النمذجية في جسم الإنسان تكون مؤلَّفة من ٣٠٠ حامضٍ أميني. لو اخذنا بروتينًا مؤلَّفًا من ٢٠٠ حامضٍ أميني، فإن عدد أنواع البروتينات المختلفة الممكن تكوُّنها سيكون $٢٠^{٢٠٠}$ أو $٢٦٠^{٢٠}$ وهو رقمٌ فوقُ فلكي. بدون البيولوجيا، لو أن الكون ومنذ نشوئه حاول تكوين هذا العدد من البروتينات وخلال عمره كله ١٣,٧ مليار سنة أو $١٠^{١٧}$ ثانية من عدد الذرات في الكون والبالغة $١٠^{٨٠}$ ومع كل دقة من زمن بلانك البالغة $١٠^{-٤٣}$ من الثانية (وهو أقل زمن يُمكِّن من إنجاز شغل) فانه يحتاج $١٠^{٣٩}$ مرةً بعمر الكون؛ وعليه ومن خلال البيولوجيا لا حدود للتعقيد الذي يمكن أن يصلَه الكون.

وهكذا فإن كل شيءٍ أو ظاهرةٍ في الطبيعة تتسم بهذه الدرجة أو تلك من التعقيد، كما أن جميع النُّظم المعقَّدة تُظهِر سمات وآلياتِ عملٍ متشابهة. هذا قاد إلى نشوء نظرية أو علم التعقيد الذي يمثِّل جهدًا مُضنِيًا لفهمِ ما يدور فينا وما حولنا، بدءًا من المكوِّنات تحت الذرِّية إلى الذرات والجُزيئات والكائنات الحية والكواكب والنجوم، بل الكون كله، مستخدمين مُجمَل المعرفة البشرية والأبحاث العلمية بكافَّة فروعها.

(١-٧) التفكير المنظومي Systems Thinking



شكل ١-١: جسمٌ ملموسٌ مثل قطعة من الملح يمثل منظومة تتألَّف من بلوراتٍ كلٌّ منها يمثِّل منظومة، وبدَورها تتألَّف من منظوماتٍ عديدة؛ هي أيونات الكلور والصوديوم. وكلٌّ منها يحتوي في مركزه على منظوماتِ النوى الذرِّية التي تتألَّف من منظومات البروتونات والإلكترونات، وكلٌّ منهما منظومةٌ تتألَّف من ثلاثة كواركات.

هي طريقة التفكير التي تنظُر لمعظم الأشياء في الطبيعة الحية وغير الحية على أنها منظوماتٌ متداخلة، منظومةٌ صغرى داخل منظومةٍ أكبر، داخل منظومةٍ أكبر، داخل منظومةٍ أكبر (شكل ١-١) وهكذا إلى أن تصل إلى المنظومة الأكبر وهي الكون بأكمله. وعند تعامُلنا مع أي جسمٍ أو ظاهرةٍ طبيعية، فنحن نتعامل مع منظومةٍ تقع ضمن تراتُبيةٍ هرميةٍ تصاعدية (زيادة في التعقيد) فتكون المنظومة هذه منظومةً صغرى (Subsystem).

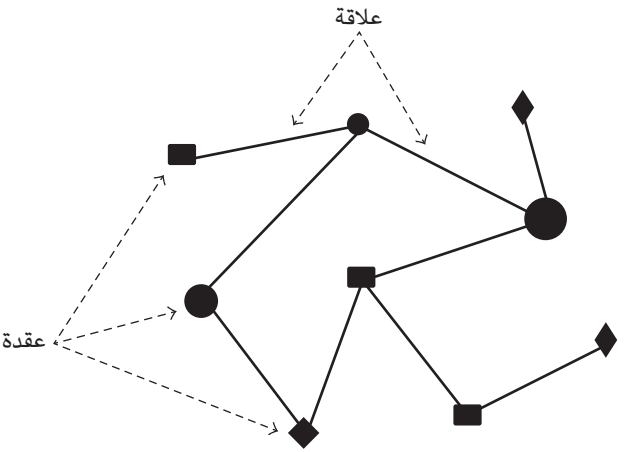
كمثال الإنسان كفردٍ يمثِّل منظومةً صغرى ضمن منظومةٍ عليا (Supersystem) هي العائلة ثم منظومةٍ أعلى هي المجتمع وهكذا. أو أنها تكون على رأسِ تراتُبيةٍ هرميةٍ تنازُلية فتكون منظومةً عليا تتألَّف من مراتبَ من عددٍ من المنظومات الصغرى، كمثال اللغة منظومة عليا تتألَّف من منظوماتٍ صغرى هي الجمل، وهذه تتألَّف من منظوماتٍ صغرى هي الكلمات، وهذه تتألَّف من منظوماتٍ صغرى هي الحروف. أدنى المنظومات الصغرى هي تلك التي لا تتمكَّن عواملها المكوِّنة من النشاط المستقل (Johnson IV *et al.*, 2013). وعلى الرغم من التنوُّع الهائل في أنواع المنظومات، فإنها تشترك في سماتِ تركيبها وآلياتِ عملها؛ ما يُمكِّن من دراستها وتكوين نظرةٍ علميةٍ عامة لما يدور من حولنا.

(١-٨) المنظومة System

المنظومة هي كلٌّ موحَّدٌ مؤلَّف من مكوِّناتٍ مترابطةٍ مُتبادلة التأثير (متأثِّرة) تُوجد في بيئةٍ تكون مفصولةً عنها بواسطة حاجز يفرقها أيضًا عن غيرها من المنظومات، ويُكسِبها هويتها الخاصة. مكوِّنات المنظومة تكون كثيرةً في الغالب، متشابهة أو متباينة، ولا يُمكِن تقسيمها إلى أجزاءٍ مستقلة، وليس لأي مكوِّنٍ فيها تأثيرٌ مستقلٌ على كل المكوِّنات. المكوِّنات يُمكِن أن تكون ذات طبيعةٍ مختلفة؛ ذرَّات، جُزيئات، خلايا، ترانسيستورات، خلايا عصبية، ناس، شركات، رموز، مفاهيم ... إلخ. العلاقة تمثِّل التأثير الذي يُحدِثه أحد المكوِّنات على سلوك المكوِّن الآخر (Heylighen, 2018). اللافت في المنظومة هو أن الكل أكبر من حاصل الجمع البسيط لمكوِّناتها، وهو ما أكَّده مُنظِّر التفكير المنظومي Bertalanffy (1972) في أن مقولة الفيلسوف الإغريقي أرسطو «الكل أكبر من مجموع أجزائه» تمثِّل حجر الأساس لمفهوم المنظومة؛ فبلورة مِلح الطعام NaCl كمنظومةٍ طعمُها مالح تتألَّف من الصوديوم، وهو فلزٌّ قلويٌّ والكلور وهو لا فلز (غازٌ سام)؛ حيث ليس لأيٍّ منهما الطعم المالح لبلورة الملح الذي هو المنظومة. الأجزاء المعزولة للسيارة لا تتمكَّن من أداء عملها كوسيلة نقل، ولا تتمكَّن أعضاء جسم الكائن الحي المعزولة من الحياة دون ارتباطاتها لتكون منظومةً كاملة.

يؤدِّي التأثُّر (Interaction) ما بين مكوِّنات المنظومة إلى حصول ظاهرة الانبثاق (Emergence) وهي صفاتٌ أو أفعالٌ تسِم المنظومة ككل؛ كالطعم المالح والنقل المُوجه والحياة في الأمثلة المذكورة. سيتم مناقشة موضوع الانبثاق لاحقًا.

يمكن اعتبار المنظومة شبكة، كل مكوِّن فيها يمثِّل عقدة، والتأثيرات المتبادلة بين المكوِّنات تمثِّل العلاقات أو الصِّلات كما في الشكل ١-٢.



شكل ١-٢: شبكة المُكوِّنات المرتبطة بعلاقات.

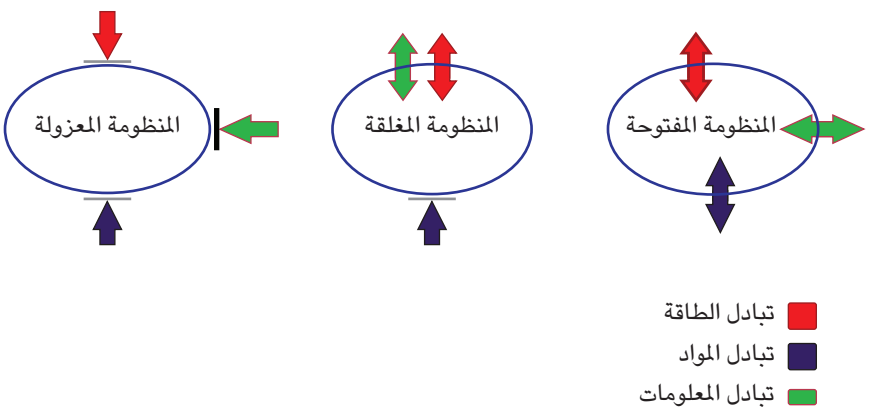
ومع أهمية المكوِّنات في تشكيل المنظومة، فإن وجودها دون علاقاتٍ متبادلة فيما بينها لا تُشكِّل منظومة بل مجموعة (Set). وأية مجموعة يُمكِن وصفها بمكوِّناتها المؤلَّفة منها، وبذلك يُعبَّر عنها بمجموع مكوِّناتها. وتتميَّز المجاميع غير المنظومية بارتفاع الإنتروبي (Entropy) (وهو مقياسٌ لدرجة القلَق وقلَّة المعلومات والتفكُّك) وانعدام الطاقة الحرة القابلة للاستغلال، والتي تمكَّن من أداء شغلٍ وليس لها تركيبٌ ملحوظ. كمثال كَومة الرمل لا تُشكِّل منظومة؛ حيث تغيب العلاقات بين حبَّات الرمل المكوِّنة لها. كذلك عُلبة الأدوات الميكانيكية لا تشكِّل منظومة؛ فكلُّ أداةٍ فيها يمكن أن تؤدِّي عملها دون الحاجة إلى الأخرى.

تختلف المنظومات من حيث درجة تعقيدها وعلاقاتها بالمحيط أو البيئة وفعالياتها. يمكن تقسيم المنظومات إلى:

المنظومات المعزولة: هي المنظومات التي لا تتبادل الموادَّ والطاقة والمعلومات مع المحيط الخارجي أو البيئة (شكل ١-٣). لا تُوجد منظوماتٌ معزولة في الطبيعة، والمنظومة المعزولة الوحيدة هي الكون بأكمله.

المنظومات المُغلَقة: هي المنظومات التي لا تتبادل الموادَّ لكنها يمكن أن تتبادل الطاقة والمعلومات مع المحيط (شكل ١-٣). تتحدَّد الحالة النهائية للمنظومة المُغلَقة بواسطة شروطها الأولية. وتتجه المنظومات المغلَقة جميعها نحو حالة من التوازُن والإنتروبي الأقصى. كمثال، الحاضنة الحرارية (الترمس)، أو غازٍ محصور في وعاءٍ محكَم.

المنظومات المفتوحة: هي المنظومات التي تتبادل المادة والطاقة والمعلومات مع البيئة وتستخدم تبادُل الطاقة لديمومة تركيبها. كل الأنظمة الحية بضِمنها المنظومات المعقَّدة المتكيِّفة هي منظوماتٌ مفتوحة (شكل ١-٣). ولكن ليس كل منظومةٍ مفتوحة هي معقَّدة ومتكيِّفة (كمثال الشمعةِ المُشتعِلة تمثِّل منظومةً مفتوحةً غير معقدة وغير متكيِّفة).



شكل ١-٣: أنواع المنظومات وعلاقاتها مع البيئة.

(١-٩) المنظومات المعقَّدة المتكيِّفة Complex Adaptive Systems

يمكن اعتبار المنظومة المعقَّدة المتكيِّفة منظومة متعدِّدة العوامل (Multi Agents System) تتبادل التأثير مع غيرها من المنظومات أو مع البيئة. العامل هنا هو المكوِّن الواحد في المنظومة والذي هو بدَوره عادةً ما يكون منظومةً بذاته أيضًا. كما أن العوامل في المنظومة تكون غير قابلةٍ للتجزُّؤ، وتُؤثِّر في ديناميكية المنظومة (Kaisler & Madey, 2009).

تتبادل المنظومة المواد والطاقة والمعلومات مع البيئة والتي تمثِّل المُدخَلات (Input) في حين أن ما يصدُر عن المنظومة من هذه الموارد أو التأثيرات يمثِّل المُخرَجات (Output). عندما تكون مُخرجَاتُ منظومةٍ ما أو بعض منها مدخلاتٍ لمنظومةٍ أخرى ستحصُل علاقةٌ متبادلة بين المنظومتَين. وعند ارتباط عددٍ من المنظومات على أساس المُدخَلات والمُخرَجات بشكلٍ متماسكٍ ستُشكل منظومة عليا (Supersystem) تضُم المنظومات المشتركة التي ستمثِّل بدورها منظوماتٍ صغرى (Subsystems) (Heylighen *et al.*, 2007). كمثال الخلية الحية للأحياء الراقية: تضُم الخلية عددًا من العُضَيَّات مثل النواة (واحدة عادة) التي تحتوي على معظم الـ DNA حيث المعلومات الوراثية، والميتاكوندريا (عديدة) حيث تُنتِج معظم الطاقة بشكل جزيئات ATP، والرايبوسومات (كثيرة جدًّا) حيث تُنتِج البروتينات إضافةً إلى عددٍ من العُضَيَّات الأخرى المهمة لا نذكُرها للاختصار. كل العُضَيَّات موجودة في محلولٍ مائي، غَروي، كثيف، هو السايتوبلازم الذي يحتوي الكثير جدًّا من المواد المختلفة بضمنها؛ بروتينات، وسكريات، ودهون، ومركَّباتٌ متنوعة كثيرة جدًّا، ومحاطٌ بغشاءٍ يفصل الخلية عن الخلايا المجاورة أو عن البيئة. لكي تقوم الرايبوسومات بدورها، فإنها تستلم المعلومات الخاصة بإنتاج البروتين من النواة بشكل جُزيئات RNA، وتستلم الأحماض الأمينية التي سيتكوَّن منها البروتين الجديد، محمولةً على نوعٍ آخر من جُزيئات RNA من السايتوبلازم، كما تحتاج إلى الطاقة التي تحصُل عليها من الميتاكوندريا والسايتوبلازم. تنتج الرايبوسومات البروتينات التي ستذهب إلى السايتوبلازم لمعالجتها ونقلها إلى العُضيَّات أو الأجزاء التي تحتاجها. من جهتها تحتاج الميتاكوندريا إلى سكرياتٍ ودهونٍ تُعالج جزئيًّا في السايتوبلازم لكي تُنتِج الطاقة بشكل جُزيئات ATP. الطاقة التي تنتجها الميتاكوندريا تذهب إلى النواة والرايبوسومات وغيرها من العضيات في السايتوبلازم لإتمام عملها. وهكذا تكون مُخرَجات النواة مُدخَلات للرايبوسومات، ومُخرَجات الرايبوسومات مُدخَلات للنواة والسايتوبلازم، ومُخرَجات السايتوبلازم مُدخَلات للميتاكوندريا، ومُخرَجات الميتاكوندريا مُدخَلات للنواة والرايبوسومات والسايتوبلازم. وهكذا تمثِّل الخلية المنظومة العليا، وكل عُضَيٍّ يمثل منظومةً تحتية. في مَرتبةٍ أعلى، ستمثِّل خلايا الكبد منظوماتٍ تحتية لنسيج الكبد وتراكيب أوعيةٍ دموية وقنواتٍ صفراوية، هذه بمجموعها ستُشكِّل منظومة عليا هي الكبد كعضو، وهكذا القلب والدماغ وجميع أعضاء الجسم كلٌّ منها سيمثِّل منظومةً عليا بالنسبة للخلايا والأنسجة التي يتألَّف منها والتي تمثِّل منظوماتٍ تحتية. وفي مرتبةٍ أعلى، ستُشكِّل الأعضاء

كلها منظومة عليا هي الجسم، بينما تمثِّل الأعضاء منظوماتٍ تحتية. ويمكن الانتقال إلى مرتبة أعلى؛ حيث يمثِّل جسم الفرد ونشاطه الكامل منظومةً تحتية لمنظومةٍ عليا هي المجتمع. وينطبق الحال على التجمُّعات الحيوانية والنباتية وكل الأحياء الأخرى حيث تُشكِّل منظوماتٍ تحتية تتبادل المُدخَلات والمُخرَجات لتُشكِّل منظومةً عليا هي مجموع الكائنات الحية (Biosphere). كذلك الأقمار مع الكوكب التي تدور حوله تمِّثل منظومةً صغرى، الكواكب وأقمارها التي تدور حول شمسها ستكوِّن منظومةً أعلى هي المجموعة الشمسية، ومليارات المجاميع الشمسية ستمثِّل منظوماتٍ صغرى تشكِّل منظومةً عليا هي المَجرَّة، ومليارات المجرَّات ستشكِّل المنظومة الأعلى وهي الكون.

هل للعوامل أو المنظومات التحتية هدف؟ الجواب نعم؛ فلكل عاملٍ أو منظومةٍ تحتية ميلٌ أو هدفُ تحقيقِ الممكنات، بغَض النظر عن درجة تعقيده حيًّا كان أم غير حي. يتم تحقيق الميول أو الأهداف من خلال التجربة والخطأ والتي ستُنتِج تغيُّراتٍ تخضع للانتخاب الطبيعي، الذي سيحدِّد الحالة الممكنة التي هي أكثر أهلية، مثلما تستكشف الجُسَيمات جميع المواضع المحتملة دائمًا حسب ميكانيكا الكم (Turok, 2018)؛ فالشحناتُ الكهربائية المختلفة تميل تلقائيًّا للاقتراب من بعضها بينما تنفر من مثيلاتها، والجُزيئات المُستقطِبة مثل جُزيئات الماء تميل للارتباط مع الجُزيئات المُستقطِبة (مثل جزيئات الماء الأخرى والسكريات والأملاح)، كما تفعل الجُزيئات غير المُستقطِبة مثل جُزيئات الدهون الشيءَ نفسَه مع الجُزيئات غير المُستقطِبة (مثل الهكسان والكلوروفورم)، والأقطاب المغناطيسية المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب. ذرَّات العناصر اللافلزية مثل الهيدروجين (H) والأوكسجين (O) والنتروجين (N) وغيرها تتفاعل تلقائيًّا مع مثيلاتها، لتكوين جُزيئاتٍ ثنائية الذرة H_2 وO_2 وN_2 على التوالي. كذلك جميع التفاعُلات الكيميائية التلقائية، مثل تفاعُل الهيدروجين والأوكسجين، لتكوين جُزيئات الماء، تحصُل لميل الذرات والجزيئات للوصول إلى مستوًى منخفضٍ من الطاقة الحرة. وجميع الأجسام غير الحية الأخرى، مثل دقائق التربة أو الصخور، تسعى إذا ما حُرِّكَت بقوةٍ خارجية من مواقعها للبحث باستمرار عن موقعٍ يخفض طاقتَها الموضعية (الكامنة)، مثلما تتدحرج الصخرة أو ينحدر ماء الشلال من أعلى الجبل إلى الوادي. أما الكائنات الحية كلُّها من أبسطها إلى أرقاها لها هدفٌ بيولوجيٌّ أساسي مشترك، هو البقاء حيةً عَبْر زيادة الأهلية في البيئة. هذا الهدف البيولوجي الذي يتضمَّن درجاتٍ مختلفةً من الوعي الذي هو انبثاقٌ ظهَر بسبب

الطبيعة الخاصة والتنظيم والتعقيد العاليَين للتركيب الكيميائي للكائنات الحية، والذي لا يظهر في المواد غير الحية بسبب انخفاض مستوى التعقيد.

المنظومات الصغرى تتمتَّع باستقلالية، وقد تتعارض ميولها أو أهدافها الذاتية وليس لها هدفٌ عامٌّ أو مشترك، هذا يُجبِر المنظومات المختلفة على التكيُّف مع الضغوط والتأثيرات التي تتعرَّض لها من المنظومات الصغرى الأخرى. كما أنها تتعرَّض لمحدِّداتٍ تفرضها عليها المنظومة العليا. كمثالٍ قد يرغب الطير المُفرَد أو الفرد من الماشية باعتبار كلٍّ منها منظومةً صغرى بالطيران أو المسير بأي اتجاه، لكن حينما يكون كلٌّ منهما جزءًا من سِربٍ أو قطيع؛ أي جزءًا من منظومةٍ عليا، فإنه سيخضع لقواعدَ محدَّدة ولكن بسيطة، كأن يطير أو يسير مع الاتجاه العام للقريبين منه، وأن يتفادى التصادُم مع الأقربين حيث ينبثق نوعٌ من النظام. وجميع الأنظمة المائية في العالم؛ الأنهار، الشلالات، البحيرات، البحار والمحيطات مع كل تنوُّعها وعظمتها وجمالها، فإنها تخضع لقاعدةٍ بسيطةٍ واحدة وهي أن الماء يبحث عن موضعٍ يحقق الطاقة الكامنة الأقل (Kaisler & Madey, 2009).

(١-١٠) التنظيم الذاتي والتجميع الذاتي

Self-Organization and Self-Assembly

كم نندهش حينما نتأمل زهرةً جميلةً معقَّدة كزهرة الأوركيد، أو فراشةً مطرَّزةً بالألوان! مثلما نُعجَب بالعمارات الشاهقة أو تفحُّص تركيب الساعة. وحيث إننا نعرف أن العمارة أو الساعة من تصميم مهندسين فلا بد أن تكون الأزهار والفراشات، بل كل شيء لا يصمِّمه ويصنعه الإنسان، من تدبير قوةٍ خارجيةٍ خارقة. هذا ليس حال العامة فقط، بل حتى المتعلمين بمختلف مستويات التعليم؛ كونه ينسجم مع البداهة أولًا، ويتماشى مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية الذي ينص على أن الإنتروبي (الفوضى) للمنظومة تزداد دائمًا؛ أي إن أية منظومة تتجه نحو التفكُّك والانحلال، وكذلك نمط التفكير على أسس الفيزياء التقليدية الذي يُفضي إلى مبدأ السبب والنتيجة المحتَّمة.

غير أن نظرية التعقيد والتفكير المنظومي تفسِّر الظواهر الطبيعية على أساس التنظيم الذاتي، والتجميع الذاتي والانبثاق؛ فعند تفحُّص المؤشِّرات العيانية (الكبيرة) فقط لمنظومةٍ ما، سيكون ثمَّة عدم يقينٍ مناسب حول التفاصيل الدقيقة لهيئة أو ترتيب المنظومة. التخمين الأفضل سيكون بإعطاء كل حالةٍ ممكنة الاحتمالية نفسها دون القدرة على تعيين أيٍّ منها؛ كونها الحالة المتحقِّقة بسبب ارتباط الإنتروبي مع عدم اليقين. لكنَّ عمليتَي

التنظيم الذاتي والتجميع الذاتي اللتَين تُولِّدان التركيب في المنظومة، سيخفضان عدم اليقين حيث لا تبقى الحالات الدقيقة متساوية الاحتمالية؛ فبعضها يتحقق والبعض الآخر لا، وبذلك يخفض عدد الاحتمالات (الإنتروبي). غير أن تكوين التركيب في المنظومة يقتضي زيادة الإنتروبي بإنتاج الحرارة لمعادلة تخفيض عدم اليقين. وهكذا يتضح ترافُق الإنتروبي مع المعلومات والتركيب الناشئ للمنظومة. القول بالتنظيم الذاتي والتجميع الذاتي يرجعُ إلى كون التركيبِ الذي يُحدِثانه في المنظومة لا يُفرَض من قِبَل مصدرٍ خارجي للمعلومات؛ حيث إن التأثير الخارجي لا يكون كافيًا لتفسير حالة النظام الذي يظهر في المنظومة. الفرق بين التنظيم الذاتي والتجميع الذاتي يرجع إلى آليات الديناميكا الحرارية لهما (Halley *et al.*, 2008; Grisogono, 2017)؛ فالتجميع الذاتي يحصُل تلقائيًّا؛ كون الحالة التي تكون فيها المكوِّنات غير مرتبطة مع بعضها أعلى طاقيًّا من حالة التجميع لهم؛ فهي عملية «محرِّرة للطاقة». أمثلة ذلك تشمل تجميع الوحدات الفردية المكوِّنة للبوليمرات وتكوين البلورات في المحاليل فوق المشبعة. وهكذا يكون التجميع الذاتي عمليةً تنحو ولا تحتاج إلى دعمٍ لاستمرارها سوى توافُر جُزيئات المكوِّن أو المكوِّنات لتجميعها. هذه العملية ستُحرِّر الطاقة بشكل حرارةٍ منتجة إنتروبيًّا، يعادل المعلومات التي أوجدها التجميع الذاتي.

أما التنظيم الذاتي فهو عملية ليست في حالة توازُن، وتتميز بثباتِ نمط الترتيب الحاصل نتيجة تأثُّر مكوِّنات المنظومة، وتتطلب الضخَّ المستمر للطاقة (عملية ماصة للطاقة) وكذلك المواد المطلوبة لاستمرارها. وهكذا؛ فعند حصول انخفاضٍ مهم أو انقطاعٍ للطاقة، ستنهار حالة التنظيم الذاتي (Howard, 2010; Grisogono, 2017)؛ وعليه، فإن التنظيم الذاتي يُعرَّف على أنه التكوُّن التلقائي لنمطٍ عامٍّ متماسكٍ من خلال التأثُّرات المحلية لمكوِّنات المنظومة. كلُّ منظومةٍ معقَّدةٍ متكيِّفة تنحو لأن تتخذ تركيبًا عامًّا تلقائيًّا ينتُج عن تآثُر عواملها المكوِّنة. كما أن التلقائية حسب (Heylighen, 2008) تعني عدم وجود عاملٍ داخليٍّ أو خارجي يسيطر على هذه العملية؛ حيث يمكن الاستغناء عنه أو استبدال أيِّ عاملٍ مُفرَد من المنظومة الكبيرة بما يكفي، دون الإضرار بتركيبها. هذا الأمر يجعل المنظومة قويةً ومقاومةً للتقلُّبات. هي لم تُصمَّم من الخارج مثل المكائن أو غير ذلك مما يصنعه الإنسان، ولا يمكن تحديد شكل المنظومة من خلال خواصِّ عناصرها، مثلما لا يمكن التنبُّؤ بنوع البناء من مجرد معرفة خواصِّ الطابوق (Cleveland, 1994).

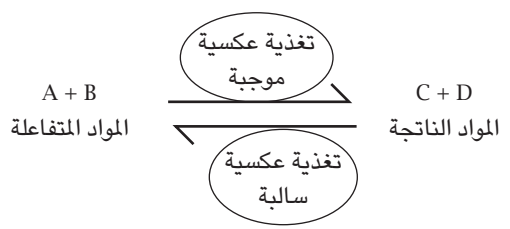
تنحو المنظومة الديناميكية دائمًا، بغَض النظَر عن نوعها أو مكوِّناتها، الوصول إلى حالة التوازُن أو ما يُطلَق عليه الجاذب (Attractor). الجاذب هو النقطة أو المحور الذي

يندفع إليه الشيء، مثل حركة البندول؛ فعند تحريك الجسم المعلَّق من نقطة سكونه فإنه سيبتعد عن موقعه الأصلي ثم يعود إليه ويغادره ويرجع بالاتجاه الآخر، ويبقى يُكرِّر هذه الحركة بفعل الاستمرارية إلى أن يستقر في موقعه الأصلي الذي يمثِّل الجاذب. كذلك ترسيب العوالق في محلولٍ بواسطة جهاز الطرد المركزي؛ حيث ستترسَّب العوالق في قعر الأنبوب، حيث يكون الجاذب، في حالة التوازن هذه تكون الأجزاء المختلفة للمنظومة متكيِّفة تكافليًّا. وكلما زادت العشوائية المؤثِّرة في المنظومة، أسرعَت في الوصول إلى الجاذب وتحقيق التنظيم الذاتي بزيادة النظام. وحسب De Wolf & Holvoet (2005) التنظيم الذاتي يتطلَّب الموازنة بين النظام (Order) والشواش (Chaos) والوصول إلى حافة الشواش حيث يتمتَّع بالمرونة المناسبة. هنا يمكن اعتبار الحالة السائلة للماء مثلًا تمثِّل حافة الشواش لجزيئات الماء؛ حيث المزيد من النظام يقود إلى الانجماد (الجليد) بينما المزيد من الشواش يقود إلى حالة الفوضى (البخار). في النظم السياسية، الديمقراطية تمثِّل حافة الشواش؛ حيث إن المبالغة في النظام تقود إلى الدكتاتورية، بينما الحرية المُنفلِتة (مزيد من الشواش) تؤدِّي إلى الفوضى. وفي الاقتصاد، يمثِّل اقتصاد السوق حافة الشواش بينما يمثِّل الاقتصاد الموجَّه مركزيًّا والاقتصاد غير المتبلور طرفَي المبالغة بالنظام أو الفوضى على التوالي.

تبدأ عملية التشكُّل من خلال التأثُّر الموضعي بين عوامل المنظومة بينما تكون العوامل البعيدة غير معنية أو مستقلة عن بعضها. لكن التأثير سينتقل تدريجيًّا إلى تلك المناطق مع الوقت بسبب ترابُطها مع جميع عوامل المنظومة، وبسبب التبادُل المعقَّد لعمليات التغذية العكسية الموجبة (تكبير التأثير) والسالبة (تخفيض التأثير) يصعُب التنبؤ بالتأثير البعيد الذي يمكن أن يبدو عشوائيًّا في البداية. وهكذا لا تكون حصيلة التأثُّرات محدَّدةً مسبقًا لكنها يمكن أن تُظهِر تفضيلاتٍ أو وضعياتٍ على حساب أخرى. ويمكن أن تُنتخب الحالات التي هي أكثر أهليةً من غيرها إما من قِبَل البيئة مباشرة أو من قِبَل العوامل التي سبق أن تكيَّفَت مع البيئة. الآلية الأساسية للتنظيم الذاتي هي التغايُر الذي يستكشف مناطقَ مختلفةً من فضاء الحالة (State Space) وفضاءُ الحالة هو حاصل الضرب الديكارتي لفضاءات الحالة لكل مكوِّنات المنظومة (أو كل الحالات الممكنة) حتى يدخُل في جاذب. هذا الأمر سيمنع التغيُّرات خارج الجاذب وبذلك يقيِّد حرية عوامل المنظومة بالتصرُّف المستقل. وإذا كان نمط أو هيئة أو تركيب المنظومة يتطلَّب طاقةً حرة يحصل عليها من البيئة أو يُحرِّرها من موادَّ مخزونةٍ داخليًّا أصلها البيئة أيضًا، فإنه سيخفض الإنتروبي للمنظومة، ويُصدِر مزيدًا من الإنتروبي بشكل حرارة إلى البيئة. وبذلك فهو يتماشى مع القانون الثاني

للديناميكا الحرارية؛ فالكائنات الحية كمنظوماتٍ معقَّدةٍ مفتوحة تعتمد طاقة الفوتونات في ضوء الشمس في عملية التركيب الضوئي (البكتيريا الخضراء المزرقة والطحالب والنباتات) أو الأحياء المتغذِّية على النباتات لبناء مركباتٍ خازنة للطاقة (سكريات، دهون) تستخدمها كمصدرٍ داخلي للطاقة الحرة عند الحاجة. بناء المركَّبات المعقَّدة لغرض النمو يتطلَّب عكس ما يفرضه القانون الثاني للديناميكا الحرارية بزيادة التحلُّل (الإنتروبي). لكن تخفيض الإنتروبي الداخلي سيتم تعويضه بتصدير المزيد من الإنتروبي إلى البيئة الخارجية بشكل حرارة وغازات وفضلات.

إن عملية تكوين الأنماط (التراكيب) في المنظومة وإدامتها وتطوُّرها تتطلَّب إنجاز شغل. هذا يتم من خلال ما يُعرف بدورات الديناميكا الحرارية، التي تحصل في المنظومة وتقودها من حالة إلى حالةٍ تالية ليعود إلى الحالة الأولى لكن مع تحقيق شغل؛ إما من قِبَل المنظومة على البيئة أو العكس. وهكذا يمكن أن تستمر الدورة مرةً بعد أخرى مع إنجاز الشغل من خلال استغلال الطاقة الحرة المُستحصَلة من البيئة وتصدير الإنتروبي إليها. كمثال على ذلك، حصول التحفيز الذاتي لتفاعلاتٍ كيميائيةٍ معيَّنة (شكل ١-٤) والدورات الأيضية في الخلايا، وتكوُّن ذرات العناصر والجُزيئات، ونشوء الأشكال البدائية للحياة، وتكوُّن النجوم والمجرَّات وبقاؤها وتحوُّلها.



شكل ١-٤: تفاعُل كيميائي.

الخلية الحية تعتمد في تركيبها وفعالياتها على عمليات التنظيم الذاتي والتجميع الذاتي؛ تركيب وتفكيك مكوِّنات الفايروسات ضمن دورة حياتها المتكرِّرة، والرايبوسومات (مصانع البروتين الخلوية) تنتظم ذاتيًّا حيث إنها تتألَّف أساسًا من عدد من جُزيئات RNA والبروتين بشكل وحدةٍ صغيرة ووحدةٍ كبيرة، تكونان منفصلتَين، وتتحدان لتتخذ تركيبًا فعَّالًا لإنتاج البروتين بمصادفتها لجُزيئة mRNA وبعد الانتهاء من بناء البروتين تُعاوِد

شكل ١-٥: سفيان الكثبان الرملية (أعلى يمين) والتشقُّقات الطينية وتموُّجات جِلد سمكة الأرنب، وتخطيطات الزبرا والتفافات أوراق رأس اللهانة وزخرفة حبة طلع نبات *Forsythia* والجسم الثمَري لِفطر الموريل وعش النمل الأبيض وتفرُّعات دماغ القط (أسفل يسار).

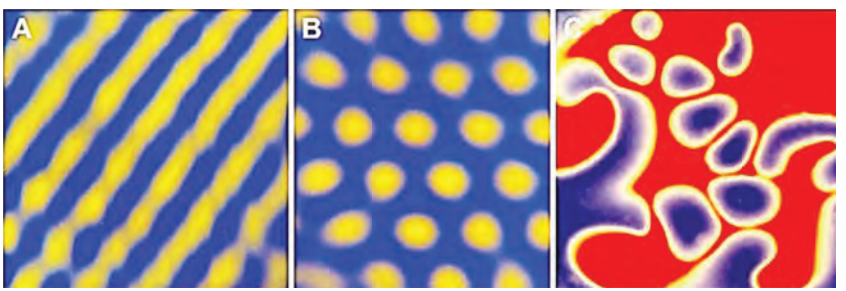
التفكُّك. وهكذا جهاز كولجي العُضَي الذي يُعالِج البروتينات، ويتألَّف من عدد من الأكياس والحويصلات المرتَّبة ينتظم ذاتيًّا (Schuberth *et al.*, 2015)، الأُنيبيبات الدقيقة التي تشكِّل الهيكل الخلَوي وتقوم بالنقل ومعالجة المعلومات تتجمَّع ذاتيًّا (Dumond, 2012)،

الحويصلات الناقلة، عمل الجينات، مضاعفة جُزيئات DNA، تكوين البروتينات وجُزيئات RNA، الانقسام النووي والانقسام الخلَوي، تشكُّل جزيئات البروتين؛ حيث يكون الشكل الأوَّلي للبروتين عند تكوُّنه خيطيًّا، ثم يتخذ الشكل الثانوي بهيئةٍ صفائحية أو لولبية، ثم الشكل الثالثي الثلاثي الأبعاد من الأشكال السابقة، أو الشكل الرابعي عندما يندمج اثنان أو أكثر من جُزيئات البروتين. تحصُل هذه التحوُّلات تلقائيًّا من خلال وجود شحناتٍ موجبة وسالبة على جُزيئات الأحماض الأمينية المختلفة المكوِّنة للبروتين. كذلك وجود مناطقَ مُحبة للماء، وأخرى كارهة للماء؛ حيث تنشأ أواصرُ هيدروجينية، والتفاعُل بين بعض السلاسل الجانبية المُكَونة. ومن الأمثلة الأخرى للتنظيم الذاتي: مستعمرات البكتيريا العالية الكثافة، وتكوين الأغشية الحيوية (Cho *et al.*, 2007)، عمل الجهاز العصبي في الإنسان والحيوانات الراقية المؤلَّف من ملايين الخلايا العصبية المترابطة (Yufik *et al.*, 2017)، عمل الجهاز المناعي الذي يضُم ملايين الخلايا المختلفة التي تعمل معًا ضد الجراثيم، تطوُّر الجنين (Shahbazi *et al.*, 2016)، السوق الذي يُلبِّي حاجات ملايين المشترين والبائعين البالغة التنوُّع والتغيُّر المستمرَّين، الإنترنت الذي يتألَّف من زريليونات المليارات من بِتات المعلومات في الثانية الواحدة. اللغة كمثال منظومةٍ عالية التنظيم والتركيب وتتألَّف من حروف وكلمات برموزٍ صوتية ومكتوبة، وهي ذاتية التنظيم تبدأ بسيطة وتنمو وتتعقَّد مع الوقت وتتطوَّر وتتفاعَل مع اللغات الأخرى. ويمكن أن تفشل في مواجهة التحديات فتضمحل، أو تنقرض كما تنقرض الكائنات الحية. اللغة لم تنشأ بجهد فردٍ أو قوةٍ خارجية. إنها منتوجٌ ذاتي للمنظومة البشرية في إقليم أو منطقةٍ جغرافية أفرزَتها شبكة العلاقات ما بين الأفراد وبينهم كمنظومة والبيئة التي يعيشون فيها.

ومن أمثلة التجميع الذاتي تكوُّن الشكل المخروطي لكومة الرمل عند الصب التدريجي لحبات الرمل في نقطةٍ معينة، تكوين الكثبان الرملية وسفيان الرمال المتموِّجة في الصحراء بسبب الرياح، وكذلك أشكال الهندسة الكسرية (Fractals) التي تظهر في الشكل المتكرِّر على أبعادٍ مختلفة، والتي تخضع لمعادلاتٍ بسيطة مثل: $Y = X^2 + C$ حيث إن Y تساوي دالة X وX هو العامل المتغير، وC عددٌ ثابت. كما في تشقُّقات الطين المغمور بعد جفافه، تشكُّل ضفاف الأنهار وسواحل البُحيرات والبحار والزخارف المميزة في جلود حيوانات الحمار الوحشي والنمور والقطط وبعض الأسماك، وكذلك أشكال زهرة القرنبيط وترتيب أوراق اللهانة (شكل ١-٥) وحبوب عبَّاد الشمس وتفرُّع الأشجار والخيوط الفطرية والأوعية الدموية وغيرها.

(١-١١) الانبثاق Emergence

نتيجة التنظيم الذاتي، وتشكُّل التركيب الناتج عن تأثُّر العوامل المكوِّنة للمنظومة، تنشأ ديناميكيةٌ وظيفيةٌ كُلية للمنظومة تتصف بالتماسُك والقوة والتآزُر والتناظُر. هذه الأنماط (Patterns) والوظائف الجديدة على المنظومة تنشأ عن تأثُّر الكل وليس عن أيٍّ من العوامل المنفردة، وتؤكِّد مقولة أن الكل أكبر من مجموع أجزائه المكوِّنة. والنمَط هو تكوينٌ أو تشكيلٌ أو فاعلية لم تكُن موجودةً مسبقًا قبل تأثُّر مُكوِّنات المنظومة كما تظهَر في الشكل ١-٦ وتفاعُل بيلوسوف-زابوتينسكي (BZ reaction) حيث إن تفاعُل مادتَين يؤدي إلى ظهور تشكيلاتٍ مختلفةٍ دورية تُسمَّى الأنماط.



شكل ١-٦: أنماطٌ مختلفة يُظهِرها تفاعُل مادتَين كيميائيتَين حيث يظهر نمطٌ بشكلِ خيوط (A) وآخر بشكلِ بُقَع (B) وثالث بشكلِ كرات (C). عن: Hazen (2009).

كمثال، الماء في الحالة السائلة له قدرةٌ على البلَل أو على إذابة الكثير من المركَّبات الكيميائية، وهي حالاتُ انبثاقٍ ناتجة عن التنظيم التلقائي لجُزيئاته، بينما لا تتمكَّن مُكوِّناته (جزيئاته) المُفرَدَة من ذلك كما في بخار الماء؛ حيث تفتقد الجُزيئات للتنظيم الذاتي المتماسك، وتتصرَّف كلُّ جُزيئة بمفردها بحركةٍ عشوائية، أو عند تجمُّعها بهيئة بلوراتٍ مقيَّدةٍ عالية التنظيم كما في الجليد. منظَّمات المجتمع المدني والنقابات هي منظوماتٌ تتألَّف من أفرادٍ تنبثق عنها أنشطة وفعالياتٌ لا يمكن تحقيقها بالجمع البسيط للأنشطة الفردية لأعضائها. ظاهرة الحياة هي انبثاقٌ يتمثل بتبادُل المواد والطاقة والمعلومات مع المحيط وفعاليات التنفُّس والنمو والتكاثر وغيرها في منظومة الخلية الحية، أو الكائن الحي والتي تحصل سوية، بينما لا يتمكن أي مكوِّن لوحده فيهما من تحقيقها. الإدراك

والعقل والفكر هي انبثاقاتٌ لنشاط شبكة الخلايا العصبية للدماغ، ولا يمكن تفسيرها على أساس الجمع البسيط لأنشطة الخلايا العصبية المنعزلة. القطعة الموسيقية هي انبثاقٌ يُظهِر الإيقاع والأنغام والانسجام (الهرموني) لمنظومة الآلات الموسيقية المتزامنة، ولا يمكن تحقيقُه بالنُّوتات المُفرَدة أو العزف الانفرادي المستقل للآلات الموسيقية. والانبثاق يتجسَّد بأنماطٍ تُنتِجها المنظومة وتكون منفصلةً عن المادة الفيزيائية المنتجة لها؛ فالوعي والتفكير أنماطٌ معلوماتيةٌ منفصلة عن الدماغ مثلما أن المعلومات التي نتحصَّل عليها من العمليات الحاسوبية تكون منفصلة عن الحاسوب كمنظومةٍ فيزيائية. وحسب Tegmark (2014) فإن ذلك مُشابِه للموجة الناتجة عن رمي حجر في الماء؛ فالموجة لها طولٌ وتردُّد وسرعة ومعادلاتٌ تُوصِّفها، وهي منفصلة عن جُزيئات الماء التي تحقَّقَت فيها.

الانبثاق كما التنظيم الذاتي ينشأ بتراتُبٍ تصاعُدي، أو ما يُعرف بالقاع صعودًا (Bottoms-Up) أي بنشاط العوامل أو المنظومات التحتية الذي ينتقل ويؤثِّر في نشاط المنظومات الأعلى فالأعلى، حتى يشمل المنظومة العليا التي سينبثق عنها نمطٌ أو فعاليةٌ أو وظيفةٌ تآزريةٌ جديدة بينما تحتفظ المنظومات التحتية باستقلالياتها الذاتية ضمن التكامُل الذي يشمل جميع المنظومات. التفاعُل التآزري سيكون مصدرًا مهمًّا للقيمة المضافة التي يتسِم بها الانبثاق؛ فعند تفاعُل ذرتَين أو جُزيئتَين فإن منظومة الإلكترونات وهي منظومةٌ تحتية ضمن منظومة الذرَّة أو الجُزيئة العلويتَين مَن يقوم بالتفاعل بينما يحصل انبثاق وهو حالةٌ جديدةٌ يشمل الذرتَين أو الجُزيئتَين، وتحتفظ المنظومات التحتية الأخرى (نواتا الذرتَين أو ذرات الجزيئتَين) باستقلالها الذاتي. النبات عندما يتفاعل مع الضوء فإن البلاستيدات الخضراء (وهي منظومةٌ تحتية ضمن منظومة الخلية) هي مَن يقوم بهذه الوظيفة، وامتصاص الماء والأملاح تقوم به خلايا الجُذر، وهي منظومةٌ تحتية أخرى، لكن جميع الخلايا الأخرى في المنظومة العليا (النبات) ستتعامل مع نشاط الخلايا الخضراء وخلايا الجُذر، وينبثق نشاطٌ حيويٌّ مُنوَّع يتمثَّل بديمومة النمو والأنشطة الحيوية الأخرى لمنظومة النبات ككل. الجهاز المناعي كمنظومةٍ عليا في مقاومة الجسم للمسبِّبات المرضية يتكوَّن من منظوماتٍ تحتيةٍ مختلفة، كلٌّ منها يتألَّف من ملايين الخلايا كالخلايا البلعمية والخلايا المتعادلة والخلايا اللمفاوية، كما تُنتج منظومة متنوِّعة من جُزيئات الأجسام المضادة (الكلوبيولينات). يقوم أفراد كلِّ منظومةٍ بعملٍ مختلفٍ مضادٍّ للجراثيم يُتوَّج بتآزُر عملِ هذه المنظومات بانبثاق حالة المناعة تجاه المرض.

من العوامل المؤسسة للانبثاق فعل ظاهرتَين متناقضتَين هما التفاضُل (Differentiation) والتكامُل (Integration). التفاضُل هو التمايُز الذي يمكِّن من وجود وعمل المنظومات التحتية بمستوياتها المختلفة بينما يُوفِّر التكامُل الفعل التآزُري للمنظومات التحتية بتراتبياتها الهرمية الذي يفضي إلى الانبثاق. ومع أن هذه المفاهيم فعَّالة في جميع أشكال الانبثاق إلا أنها تتوضَّح بجلاء في بعض الأمثلة مثل انبثاق أعشاش النمل؛ فمُستعمَرات النمل تضُم ملايين الأفراد غير المتمايزين مظهريًّا وفسلجيًّا وبمستوى ذكاءٍ فرديٍّ منخفض؛ فحسب أحد الباحثين لا تتمكن الأعداد القليلة (حتى ٥٠٠ نملة) من النمل المحارب من التصرُّف الذكي بالبحث عن الغذاء وتستمر في الدوران حول نفسها حتى تستهلك طاقتها وتَهلِك. لكن الآلاف أو الملايين منها والتي ستُشكِّل منظومةً تتصرف بسلوكٍ ذكي، وتنقسم إلى منظوماتٍ تحتية يقوم كلٌّ منها بعملٍ معيَّن كالبحث عن الغذاء أو الحراسة أو بناء العش. هذه الأنشطة المختلفة تتآزر وتتكامل مؤدِّية إلى انبثاقِ عُشٍّ بهيئة بناءٍ معماريٍّ بارتفاعات وتشكيلاتٍ مختلفةٍ يحتوي على أنفاق ومداخل ومخارج، يشمل المستعمرة كلها دون وجود مُوجِّهٍ لها كالملكة مثلًا؛ فهذه تقتصر مهمتها على وضع البيض.

يُمكِن للانبثاق أن يُفسِّر ظواهر تبدو معقَّدةً للغاية كالتشكُّل المظهري (Morphogenesis) في الأحياء وتطوُّر الجنين من خليةٍ واحدةٍ إلى مجموعة خلايا غيرِ متمايزة إلى التكوُّن التدريجي للأعضاء واكتمال تكوُّن الجنين. قدَّم Turing (1952) معالجةً نظريةً لهذا الموضوع، وبيَّن أن هذه التغيُّرات تنبثق من خلال آليةٍ واحدة؛ هي الزيادة الموضعية لتفاعُلٍ (تنشيط موضعي) يُتبع بتثبيطٍ طويل المدى لهذا التفاعُل. مثلًا من خلال فعل الجينات والهرمونات ثم الإنزيمات يمكن أن يحصُل تفاعُل في عددٍ محدودٍ من الخلايا يؤدِّي إلى زيادة جهدها الأزموزي، وهذا يؤدِّي إلى توسُّعها ثم يتوقَّف التفاعُل بعد ذلك كاسرًا التناظُر الموجود سابقًا؛ ليُنتِج تشكيلًا جديدًا. أو تنشيط تفاعُلات «موت الخلايا المبرمج» (Apoptosis) في عددٍ محدودٍ من الخلايا مما يؤدِّي إلى موتها وتحلُّلها، ثم يتوقَّف التفاعُل بعد ذلك محدثًا تجويفًا مستدامًا في أنسجة الجنين كما في القلب أو الكُلى أو غير ذلك. أما تشكُّل الأعضاء المختلفة للجنين فيحدُث من خلال برامجِ تشغيلِ وتثبيطِ مجاميعَ جينيةٍ متسلسلة، تؤدِّي إلى تمايُز خطوطٍ خلَويةٍ رئيسة. بعدها تفعل برامجُ مماثلةٌ على جيناتٍ مختلفةٍ تؤدِّي إلى تمايزاتٍ خلويةٍ أكثر تخصُّصًا، وهكذا تنشأ الأنسجة والأعضاء المختلفة. من المؤكَّد أن مثل هذه الأحداث تحصُل بتفاصيلَ كثيرةٍ جدًّا ومتداخلة

تشترك فيها جُزيئاتٌ إشاريةٌ تستلمها بروتيناتٌ مُستقبِلة، وتنتقل بواسطة سلاسل من البروتينات لتصل إلى الجينات، وهنا تعمل آلياتٌ مختلفة تشترك فيها بروتينات وجُزيئات RNA ورايبوسومات، لتُنتِج بروتيناتٍ جديدة تلعب أدوارًا في التمايُز والتخصُّص الخلَوي. علمًا ثمَّة أنواعٌ مختلفة جدًّا من التشكُّل المظهري وبدرجاتٍ مختلفةٍ من التعقيد تتناسَب وتعقُّد الكائن الحي.

(١-١٢) التغذية العكسية Feedback

يُمكِن تعريف التغذية العكسية على أنها عمليةٌ يعود التأثير فيها إلى (أو يؤثِّر في) مُسبِّبه. أو أن مخرجاتِ منظومةٍ ما تُعاوِد الدخول مباشرة أو من خلال منظومةٍ وسطية أو أكثر، إلى المنظومة نفسها، وبذلك تلعب تلقائيًّا دَور السبب (Heylighen, 2018). كمثال، المناخ يؤثِّر تأثيرًا مباشرًا على الغطاء النباتي للأرض من خلال الضوء والغازات ودرجة الحرارة والرطوبة. في المقابل يؤثر الغطاء النباتي في المُناخ من خلال تخفيض الضوء المُنعكِس وتقليل الحرارة المُنعكِسة من سطح الأرض، وزيادة الرطوبة من خلال النتح، وزيادة تركيز الأوكسجين وتخفيض تركيز ثاني أوكسيد الكاربون من خلال عملية التركيب الضوئي؛ وبالتالي يخفضُ من ظاهرة الاحتباس الحراري.

ثمَّة نوعان أساسيَّان من التغذية العكسية:

(أ) التغذية العكسية الموجبة Positive Feedback

وفيها يقوم السبب بتعظيم نفسه، أو تستمر المنظومة بأداء العمل الذي تقوم به، ما يؤدي إلى معدلاتِ نموٍّ عالية في المُخرَجات قد تقود إلى الشواش. وهكذا تُعتبَر التغذية العكسية الموجبة مصدرًا مهمًّا لنمو وتغيُّر المنظومة (نمو أسي، تذبذب، شواش). كما أن التغذية العكسية الموجبة تمثِّل الأساس لظاهرة الاعتماد الحسَّاس على الشروط الأولية، ومظهرًا للَّاخطية في المنظومة حيث تُنتِج تأثيراتٍ كبيرةً من مسبباتٍ صغيرة. إن التغذية العكسية الموجبة تتمثَّل في العلاقة التالية بين متغيِّرَين مثل A وB؛ فالزيادة في قيمة أو نشاط العامل A تؤدي إلى زيادة في قيمة أو نشاط العامل B، والزيادة في B تؤدي إلى زيادة في A وهكذا. كمثال، التفاعل الكيميائي المولِّد للحرارة، حصول التفاعُل يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة، هذا العامل بدوره سيزيد من سرعة التفاعل وهكذا. إذا لم يتم التخلُّص

من الحرارة الناتجة من التفاعل، فستنفجر المنظومة (فوضى). تفاعُل الاندماج النووي لنوى ذرات الهيدروجين وتكوين الهليوم في قلب الشمس؛ فما إن يبدأ تفاعُل كهذا بوصول درجة الحرارة إلى مقادير عالية جدًّا؛ نتيجة ضغط كتلة الهيدروجين الضخمة جدًّا، حتى تنتُج عن التفاعُل طاقةٌ عالية بشكل حرارة وضوء. وهذه بدورها ستُمكِّن من استمرار التفاعُل لحين نفاذ الهيدروجين. عملية نُضْج الثمار (الموز مثلًا) تتم بحلقة تغذيةٍ عكسيةٍ موجبة؛ فنضج ثمرةٍ واحدةٍ سيؤدي إلى إطلاقها لغاز الإثيلين الذي يعمل كهرمون سيُحفِّز نضج الثمار المجاورة التي استلمَت الغاز. وهذه بدَورها ستنضُج وتُنتِج المزيد من غاز الإثيلين، وتنضج مزيدٌ من الثمار، وهكذا. ظاهرة الطلق أثناء الولادة تقدِّم مثالًا للتغذية العكسية الموجبة؛ حيث إن تقلُّصات الرحم تحفِّز إنتاج هرمون Oxytocin وهذا الهرمون بدَوره يزيد من تقلُّصات الرحم وهكذا لحين الولادة. ومن الأمثلة النموذجية لتوضيح التغذية العكسية الموجبة، ظاهرة انتشار الأمراض المعدية في النبات والحيوان والإنسان؛ فالإصابات الفايروسية، البكتيرية أو الفطرية تبدأ بوحدةٍ واحدةٍ أو عددٍ قليلٍ من الوحدات التكاثُرية لهذه الميكروبات (السبب) حيث تصيب خليةً واحدةً أو عددًا قليلًا من خلايا العائل الحسَّاس للإصابة (التأثير). مع الوقت تتكاثر أعداد المسبِّب المرضي لتصيب خلايا جديدة. استمرار تكاثُر المسبِّب المرضي يؤدي إلى زيادة الإصابات الجديدة، وهذه ستؤدي إلى زياداتٍ هائلةٍ في أعداد الميكروبات. وهكذا يُمكِن أن تُصاب معظم خلايا العائل، ثم تنتشر منه لتُصيب أعدادًا أكبر من الأفراد، وبذلك يحصُل الوباء، وهو حالةٌ شواشيةٌ مدمِّرة بالنسبة للأحياء.

(ب) التغذية العكسية السالبة Negative Feedback

وهي آليةٌ لا خطية، تخفضُ فعل الأسباب الكبيرة إلى تأثيراتٍ صغيرة، وهذه تؤدِّي على العموم إلى حالة التوازُن المُستقِر بسبب عكس أي انحرافٍ عن حالة التوازن، وإعادة المنظومة إليها. حالة التوازن هذه يمكن اعتبارُها «هدفًا» ضمنيًّا تسعى المنظومة دائمًا للرجوع إليه (Heylighen, 2018). كمثال، المحافظة على درجة حرارة الغرفة باستخدام مولِّد حرارة (Heater) مرتبط بمثبِّت حرارة (Thermostat)؛ فعند نزول درجة حرارة الغرفة عن قيمةٍ محدَّدةٍ في مثبِّت الحرارة، هذه المعلومة ستجعل مثبِّت الحرارة يشغِّل مولِّد الحرارة، وبذلك ترتفع درجة حرارة الغرفة إلى المستوى المطلوب المحدَّد في مثبِّت الحرارة. عند ذلك تعمل هذه المعلومة على إيقاف عمل مولِّد الحرارة بواسطة مثبِّت الحرارة وهكذا.

مثالٌ آخر، التفاعل الكيميائي المذكور سابقًا في الشكل ١-٤ حيث إن سَيْر التفاعُل بين المواد المتفاعِلة نحو اليمين بتغذيةٍ عكسيةٍ موجبة، يعكس بتغذيةٍ عكسيةٍ سالبة بتفاعل المواد الناتجة لإعادة تكوين المواد المتفاعلة ووصول المنظومة إلى حالة التوازن. كذلك العلاقة بين العرض والطلب في الاقتصاد؛ فزيادة المنتوج يؤدي إلى زيادة العرض، وهذا بتغذيةٍ عكسيةٍ سالبة يؤدي إلى انخفاض السعر. واستمرار انخفاض السعر عن حدٍّ حرجٍ معيَّن، سيؤدي من خلال تغذيةٍ عكسيةٍ موجبة إلى خفض الإنتاج ومن ثَم قلة العرض. والحالة الأخيرة عَبْر التغذية العكسية السالبة ستقود إلى ارتفاع السعر، والوصول إلى حالة التوازن بين العرض والطلب. وفي البيولوجيا، تلعب التغذية العكسية دورًا مهمًّا للغاية من أجل تحقيق حالة التوازُن الديناميكي (Homeostasis) في جميع الفعاليَّات والأنشطة الحيوية لجميع الكائنات الحية؛ فمعظم إن لم تكن كافَّة التفاعُلات والعمليات الحيوية تُظهِر حالتَين متناقضتَين متلازمتَين هما: التنشيط أو الزيادة عَبْر التغذية العكسية الموجبة، والتثبيط أو التخفيض من خلال التغذية العكسية السالبة. الأولى تتمثَّل بزيادة التعبير الجيني (تشغيل الجينات) بتكوين موادَّ مطلوبة أو زيادة النمو أو زيادة التكاثر ... إلخ. استمرار هذه الحالة ستقود إلى تراكُم يفوق الحاجة، ويستنفد خزين الموارد الجُزيئية والطاقة، ويقود إلى التضخُّم والأمراض السرطانية؛ أي باتجاه الشواش. والثانية تتمثَّل بتثبيط التعبير الجيني (إيقاف عمل الجينات) الذي يحفِّزه تراكُم منتجات التغذية العكسية الموجبة؛ وبالتالي تدفع باتجاه ضبط الانحراف عن حالة التوازن الديناميكي والرجوع إليها.

وهكذا تُعتبَر آلياتُ التغذية العكسية الموجبة والسالبة من العوامل المهمة في التنظيم الذاتي والانبثاق وتطور وديمومة المنظومات.

من كل ما تقدم نخلُص إلى أن كل ما نراه من تنوُّع وتعقيد في الطبيعة، ينبع من حقائقَ وجوديةٍ أساسيةٍ تتلخص بالوحدة والتباين، بالحركة والتأثُّر، بالتنظيم الذاتي والانبثاق التلقائي للتراكيب والأنماط والفعاليات والألوان والموسيقى، بتعقُّد المعلومات من خلال تقلُّباتها ومعالجاتها من كل مكوِّنات الكون المترابطة بمنظوماتٍ متداخلة، لتُنتِج برامج تتعقَّد باستمرار في حاسوب الكون الكمومي؛ الذي يعمل وَفْق قوانينَ فيزيائيةٍ بسيطة وقليلة، يمكن أن تُكتب على قميص.

الفصل الثاني

ميكانيك الكم

Quantum mechanics

«عندما تعمل الطبيعة فإنها لا تعلم كيفية معرفتنا بها، وقوانينا العلمية في تفسيرها.»

«نحن من يتعلَّم من الطبيعة، ولا يُمكِنُنا فرضُ قوانينَ عليها كنا قد تعلَّمناها منها.»

(Tarlacı & Pregnolato, 2015)

في مقابلةٍ تلفزيونية مع الباحث المصري اللامع أحمد زويل، الحائز على جائزة نوبل في الكيمياء، سألَته مقدِّمة البرنامج عن ميكانيك الكَم وصعوبته المعروفة عنه. أجاب الأستاذ زويل بأنه وخلال دراسته في الولايات المتحدة، كان يتوجَّب عليه اجتيازُ الامتحان بميكانيك الكم. وهو كان قد سمع أيضًا بصعوبته التي كان الطلاب كثيرًا ما يكرِّرونها. قال: قرَّرتُ أن أُكرِّس كل جهدي لفهم الموضوع واجتياز الامتحان وهو من التحديات الأساسية. قال: فهمتُ الموضوع جيدًّا، ونجحتُ في الامتحان، وحصلتُ على أعلى درجة. لكن لو تطلبين مني الآن أن أَشرحَه لكِ فأنا لا أستطيع. ويُذكر عن اثنَين من أبرز علماء ميكانيك الكم؛ نيلز بور، وريتشارد فينمان، قولهما: «إن من يقول إني فهمتُ ميكانيك الكم ولم يُصَب بالدوار، فإنه لم يفهم ميكانيك الكم.» هذا عمَّق عندي الرغبة في معرفة علمٍ أساس لديَّ معلوماتٌ قليلةٌ عنه. ومن المحفزات أيضًا كان اطلاعي المتزايد على التقنية النانوية الصاعدة في تسعينيات القرن العشرين، والتطبيقات المتنوِّعة لميكانيك الكَم في الحياة العصرية.

بالتأكيد أن ميكانيك الكم هو من أصعب مواضيع الفيزياء؛ لأنه يدرُس المواد وهي في حالتها الجُسيمية أو الذرية أو الجُزيئية؛ وهي حالات لا نتحسَّسها كما نتحسَّس الأجسام الكبيرة التي درسناها في الفيزياء التقليدية. علاوةً على غرابة الظواهر الكمومية التي تبدو مناقضةً للبديهة التي بنَينا أفكارنا على أساسها، ولكن بالنسبة لمتخصِّص البيولوجي أو بالحقيقة لمتخصِّصي العلوم الأخرى بل وحتى لغير المتخصصين، يكون الاطلاع على الظواهر الكمومية غايةً في الأهمية من أجل استكمال رؤيةٍ علميةٍ للكون والحياة؛ لأنها منبعُ كلِّ شيء؛ وعليه فإنني حاولتُ فهم الظواهر الكمومية للحد الذي تُمكِّنني أدواتي المعرفية، وكان تركيزي على النتائج والمناقشة والاستنتاج وليس الخوض في الاشتقاقات. والذي شجَّعني كثيرًا في هذا الاتجاه، هو الاطلاع الواسع والعميق الذي يُظهِره علماء الفيزياء والكيمياء والرياضيات والجيولوجي لمواضيع علوم الحياة ومواكبتهم لأدق التفاصيل البيولوجية. كما أن التغيُّر في استراتيجيات البحث العلمي من انعزال وتباعُد العلوم سابقًا إلى التقارُب والتداخُل وتشكيل فرق البحث المشتركة ومراكز البحوث المتعدِّدة الاختصاص، أمرٌ محفِّز لمعرفة تخصُّصٍ بعيدٍ ولكن مُشوِّق كميكانيك الكم. والأمر الأكثر دفعًا كان اطلاعي وإعجابي الشديد بمواضيع البيولوجيا الكمومية؛ التي وجدتُها صاعدةً وتتكامَل باستمرار.

ميكانيك الكَم أحد أعمق النظريات في العلم؛ فهو يصف الحقائق الغريبة لعالم الذرات والجُسَيمات تحت الذَّرِّية والتي تحكُمها الاحتمالات وليس الكميَّات المعروفة، وأفضى إلى الاختراقات الكبرى في تقنيات العصر الحديث (Simpson, 2018).

مع بداية القرن العشرين، وعند دراسته لما يُعرَف بإشعاع الجسم الأسود، وهو الإشعاع الذي يصدُر عن الجسمِ الصُّلبِ عند تسخينه، بيَّن ماكس بلانك (Max Planck) أن هذا الطيف ينتُج عن الطبيعة التجزُّؤية أو الفردانية لمستويات الطاقة بشكل كمَّاتٍ (Quanta)؛ فزيادة الطاقة الحرارية للجسم تؤدي إلى تذبذُب ذرات الجسم وإلكتروناتها. هذه الإلكترونات المتسارعة حسب معادلات ماكسويل ستشع طاقةً كهرومغناطيسيةً (ضوءًا). وكلما زاد التسخين، زاد تذبذُب الذرَّات، وزاد تردُّد الأشعَّة الضوئية الصادرة.

وسنة ١٩٠٥م أثبت آينشتاين أن الضوء هو سيل من الكمَّات، التي هي الفوتونات، وهذه عندما تصدم المادة تحرِّر الإلكترونات التي تكتسب كمَّاتِ الطاقة المحمولة بالفوتونات، والتي يمكن حسابها من العلاقة العامة:

$$E_n = nhf$$

حيث يشير n إلى مستويات الطاقة وf هي التردُّدات المميزة للتذبذُبات الداخلية وh هو ثابت بلانك. هذا أدى إلى تحوُّلٍ ثوريٍّ في الفيزياء بالافتراق عن ميكانيك نيوتن، واعتماد دالَّة الموجة لوصف ميكانيك الكم. وُضعَت معادلات أروين شرودنجر (Erwin Schrödinger) سنة ١٩٢٦م (للحالة غير النسبية) وباول ديراك (Paul Dirac) سنة ١٩٢٨م (وتتماشى مع النسبية الخاصة) لتطور دالَّة الموجة لوصف حركة الجُسيمات الأولية والذرات. حسب ميكانيك الكم فإن للأشياء مَظهرًا مَوجيًّا، ومَظهرًا جُسيميًّا فيما يُعرف بازدواجية الموجة-الجُسَيم. تُظهِر دالَّة المَوجة أن تحديد موقع الجسيم في الفضاء هو احتمالي، كما يمكن لدوالِّ الموجة أن تحيد وتتداخل معًا في حالة تراكُب، (Superposition) ما يعني أن الجُسَيمات الكمومية تُوجد في حالات ومواقعَ متعدِّدة في المكان في الوقت نفسه. وعند إجراء الملاحظة أو القياس يتم التجسُّد بحالةٍ واحدة، وتنتهي حالة التراكُب الكمومي إلى حالةٍ تقليديةٍ في عملية تُعرَف بانهيار دالَّة المَوجَة أو فك التماسُك الكمومي (Decoherence).

خاصيةٌ أخرى في ميكانيك الكم تُعرف بمبدأ عدم الدقة أو عدم اليقين (Uncertainty principle) الذي وضَعه ورنر هايزنبرغ (Werner Heisenberg) سنة ١٩٢٧م، والذي ينُص على عدم إمكانية الدقة عند إجراء عمليتَي قياس متتاليتَين لزوجٍ من المتغايرات المتتامَّة؛ فمثلًا لا يمكن تحديد موقع الجُسَيم وسرعته بدقة في الوقت نفسه، بينما يمكن تحديدُ أحد الخواصِّ بدقة دون الأخرى.

أظهر تطوُّر البحث في ميكانيك الكم أن مظاهره لا تقتصر على الجُسيمات دون الذَّرية، وإنما تمتد إلى منظوماتٍ متشكِّلة منها كالذرَّات والجُزيئات. وهكذا تصبح المنظومة المؤلَّفة من عدة جسيماتٍ لها دالةٌ مَوجيةٌ واحدة، تصف سلوكها الكلي وليست دوالَّ منفردة لكل مكوِّنٍ منها. هذا سيُنتِج ما يُعرف بالتماسُك الكمومي (Quantum coherence). وهنا ستفقد المكوِّنات الفردية ذاتياتها وتعمل المنظومة ككلٍّ واحد. وما إن تكون الجُسيمات أو مكوِّنات المنظومة في حالة تماسُكٍ كمومي، حتى تبقى مترابطةً فيزيائيًّا حتى بوجود الفواصل المكانية بينها. وهذا يفضي إلى أن عمليات المراقبة أو القياس لأحد المكوِّنات ستؤدي إلى انهيار دالَّة المَوجَة للمنظومة كلها، وستتأثَّر جميع المكوِّنات فورًا بغَض النظر عن موقعها في المكان. هذا التأثُّر عن بُعدٍ يُشار إليه بالتشابك الكمومي (Quantum entanglement) غير الموضعي. عندما تتأثَّر مثل هذه المنظومة مع البيئة بطريقة ديناميكا حراريةٍ غيرِ متعاكسة، يحصُل فكُّ التماسُك (Decoherence).

هذا يؤدِّي إلى أن المكوِّنات المختلفة للمنظومة والتي كانت في حالة تراكُبٍ كموميٍّ تفقد القدرة على التداخُل فيما بينها. وهكذا فإن إجراء التجارب الكمومية في مختبرات الفيزياء ومن موقع الحرص على إبقاء التماسُك الكمومي، تتم في درجاتِ حرارةٍ منخفضةٍ جدًّا، تقترب من الصفر المطلَق، وفي أجهزةٍ مفرَّغةٍ من الهواء، ومعزولة جيدًّا، لغرض استبعاد حصول فك التماسُك. لكن السلوك الإجمالي للمنظومات المتعددة المكوِّنات بيَّن إمكانية تحقُّق ظواهر ميكانيك الكَم في الأشياء الكبيرة؛ مثل البلورات والمغانط الحديدية وفي درجة حرارة الغرفة.

لقد امتد ميكانيك الكم بنجاح ليشمل المركَّبات والتفاعُلات الكيميائية وينشأ علم كيمياء الكَم. وتجلَّى هذا في الفهم الأفضل للأواصر الكيميائية خاصة التساهمية؛ التي هي مشاركة إلكترونات. وبالطبع ليست الكيمياء الحيوية بعيدة عن هذا المجال؛ حيث تلعب التفاعُلات الكيميائية ونشوء وتفكُّك الأواصر الكيميائية في المركَّبات العضوية، كما هو الحال في المركَّبات اللاعضوية.

بل إن التجارب المتكرِّرة بيَّنَت أن المنظومات المتعددة المكوِّنات وفي أوساطٍ مكتظةٍ بالجُزيئات مثل المنظومات البيولوجية، يمكن أن تُظهِر تجليات ميكانيك الكَم، وإن كان ذلك يتعرض للنقد والجدل حتى الآن (Hameroff *et al.*, 2014).

حسب Sia *et al.*, (2014) فإن ميكانيك الكَم يقدِّم النظرية الأصح مقارنةً بالنظريات التقليدية السابقة، التي تفسِّر سلوك المادة والطاقة. وإن الافتراق بين السلوك التقليدي والسلوك الكمومي يتوضَّح أكثر على المستوى المِجهَري.

يستند ميكانيك الكَم على أربعةِ مفاهيمَ أساسية: (١) جميع الأشياء في الكَون (من الجسيم المفرَد إلى الإنسان وحتى المجرَّة) يمكن وصفها جيدًا بمساعدة دالَّة المَوجَة الكمومية. (٢) وجود وسيلةٍ تُمكِّننا من تطوير دوالِّ الموجة هذه في الزمن هي معادلة شرودنجر. (٣) إن الكميات الفيزيائية المفتاحية بضمنها الطاقة والعزم الزاوي تتبدَّى بوحداتٍ فردانيةٍ هي الكمَّات (Quanta). (٤) في لحظة الملاحظة أو القياس يقدِّم الشيء نتيجةً معيَّنةً حيث «تنهار دالَّة الموجة»، عندها لن تبقى ثمَّة حاجةٌ لدالَّة الموجة الاحتمالية لوصف المنظومة. تلك النتيجة تصبح حقيقةً تقليديةً متحققة.

بناءً على ما تقدَّم، فإن الوصف الاحتمالي للكون يتضمَّن: (أ) تتصرَّف المادة والطاقة إما بشكلٍ موجيٍّ أو بشكلٍ جسيمي، اعتمادًا على نوع الملاحظة. (ب) إن بعض خواص الشيء لا يمكن معرفتها بدقةٍ محدَّدة في اللحظة نفسها مثل معرفة موقع وعزم الجُسيم.

هذا ما يُعرف بمبدأ «عدم الدقة» لهايزنبرج. (ج) في اللحظة نفسها، يمكن أن تكون الأشياء في أكثر من حالةٍ واحدةٍ وهو ما يُعرف بالتراكُب الكمومي (Quantum superposition). لكن هذه ستزول فَور ملاحظة المنظومة أو إجراء القياس عليها.

لماذا تسلُك الأشياء سلوكًا مزدوجًا؟ السلوك العادي (التقليدي) المألوف في العالم الكبير (المستوى الذي نتعامل به كالتفاحة والكرسي والكرة ... إلخ.) والسلوك الكمومي في العالم الصغير (مستوى الجسيمات والذرات والجزيئات). السبب هو أن الموادَّ الصُّلبة والسائلة (بما فيها الغازية) ومنها المواد التي نتعامل بها في محيطنا، تتألَّف من جُزيئاتٍ وذرَّات وجُسيمات، وهي تتحرك بفعل الحرارة بشكلٍ عشوائي. هذه العشوائية ستُدمِّر السلوك الموجي الذي تمتلكه هذه المكوِّنات (إذا ما تُرِكَت دون تشويش) والذي بدونه لا تتمكن من السلوك الكمومي (ظواهر التراكُب والتسرُّب والتشابُك). كمثال، عند رمي حجر في بُحيرةٍ ساكنةٍ ستتشكَّل موجاتٌ منتظمةٌ لها أطوالٌ موجيةٌ وتردُّدات وسرع وتأخذ بالاتساع. لكن في موضع اصطدامِ ماء الشلال بماء البُحيرة ستنشأ موجاتٌ كثيرة يُلغي بعضها بعضًا، ويُشوِّش بعضها بعضًا، ويضيع التماسُك الملحوظ في المثال السابق. هذا يحصل أيضًا عند المراقبة أو القياس لنفس السبب، وكذلك عند التآثُر مع البيئة بطريقةٍ غير متعاكسةٍ من ناحية الديناميكية الحرارية. العملية هنا مُكافِئة لفقدان المنظومة للمعلومات إلى البيئة.

من خواص ميكانيك الكم التي تؤدي إلى نشوء التعقيد هي التجزُّؤية (Dis-creteness) والاحتمالية (Probability).

التجزُّؤية تفرض أن تكون المنظومة (من أصغرها إلى الكون بأَكمِله) رقمية (Digital) وبالتالي فإنها ستكون بمثابة معالجِ معلوماتٍ على المستوى المِجهَري حيث تقلب البِتات. معالجة المعلومات تتم من خلال برامج التقلُّبات الكمومية العشوائية. المعلومة تنشأ كما مَرَّ ذِكْره، نتيجة التقابل بين حالتَين؛ موجب-سالب. ٠-١، مشحون-متعادل ... إلخ. وكل عنصر من هذه يسجل بِتًا واحدًا من المعلومات. من بين الجُسَيمات الأولية التي يتكوَّن منها الكون ثمَّة عددٌ قليلٌ منها كالإلكترونات والبروتونات والنيوترونات والفوتونات تبقى لفتراتٍ طويلة. التآثر بين هذه الجُسَيمات في مدًى طاقيٍّ معيَّن سيؤدِّي إلى نشوء تعقيد بشكل عناصرَ أوَّلية، وهذه بدَورِها تتفاعل فيما بينها لتُنتِج جزيئاتٍ وموادَّ مختلفةً بدرجات تعقيدٍ متزايدة، وصولًا إلى التعقيد الأعلى الذي يتمثَّل بالمواد المظهرة للحياة.

على الرغم من أن العديد من عمليات ميكانيك الكم هي خطية و حتمية (De-terministic)، إلا أن بعضها تكون احتماليةً ويتم تحقُّق أحد الاحتمالات في الواقع التقليدي عند الملاحظة أو القياس أو الاتصال بالبيئة من خلال عملية فك التماسُك. وهكذا يرفدُ ميكانيك الكَم الواقع التقليدي بمعلوماتٍ عشوائيةٍ باستمرار؛ وعليه فإن التقلُّبات الكمومية وهذه المعلومات العشوائية هي مصدرُ التغايُر الذي هو أساسُ التطوُّر (Lloyd, 2008).

(١) الظواهر الكمومية Quantum phenomena

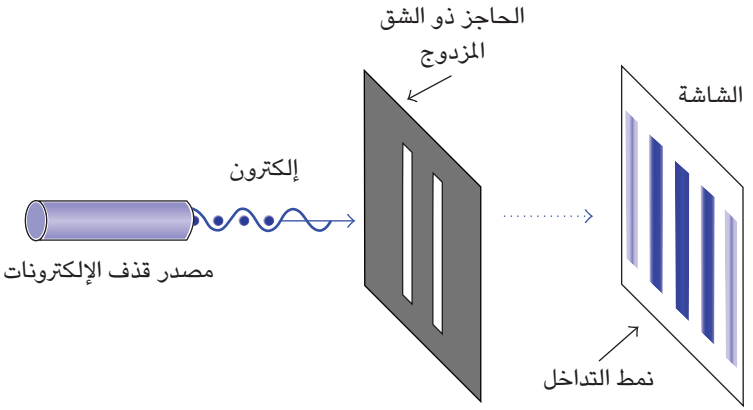
(١-١) ازدواجية الموجة-الجُسيم Wave-Particle Duality

الجسم، أي جسم، سواء كان جسم إنسان أو حصوة أو دقائق غبار أو جُزيئات أو ذرَّات أو جسيماتٍ تحت ذرِّية كالفوتونات أو الإلكترونات ... إلخ. تتميَّز بكثافتها وتحرُّكها كوحداتٍ مركزة. أما الموجات كموجات الضوء والصوت أو أمواج البحر وغيرها فتكون منتشرة ويميَّز فيها طولُها وتردُّدها وسرعتُها. إنها نمط (Pattern) ينتج عن اهتزاز الجسم أو الجُزيئات أو المكوِّنات الذرية (Tegmark, 2017).

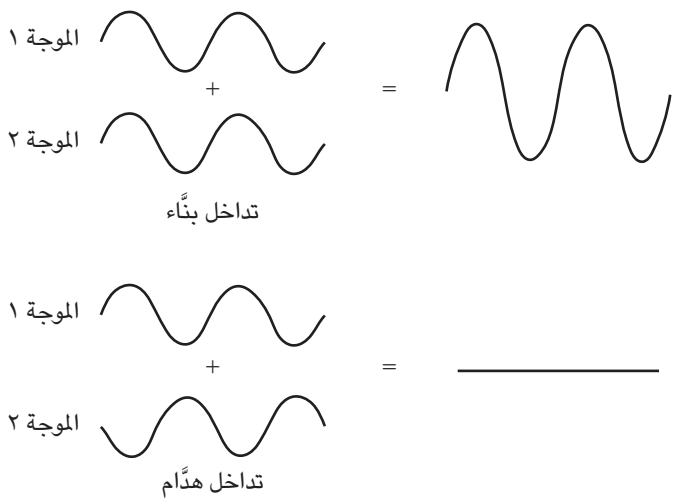
لقد اعتقد الإغريق أن الضوء جُسيمي، لكن تفسير تجارب نيوتن في البصريات في القرن السابع عشر استدعى أن يكون الضوء موجيًّا، واستمر هذا الاعتقاد مع ماكسويل الذي اعتبر كل الظواهر الإلكترومغناطيسية بأنها موجاتٌ ضوئية. مع نهاية القرن التاسع عشر لم يكن أمام ماكس بلانك في تفسيره لظاهرة إشعاع الجسم الأسود إلا افتراض أن يكون الضوء مؤلَّفًا من جُسيمات، سمَّاها بالفوتونات، وأن طاقتها تتناسب مع تردُّد موجاتها. وحسب ماكس بلانك فإن كل فوتون يحمل كميةً من الطاقة هي «الكم Quantum». وهكذا نشأت فكرة ازدواجية الموجة-الجسيم؛ فالموجة مرتبطة بالجسيم، والجُسيم تصاحبه موجة. الجُسيم يُوجد في الغالب حيث تكون الموجة كبيرةً (Lloyd, 2006).

(أ) تجربة الشق المزدوج Double-Slit Experiment

على الرغم من بساطة هذه التجربة فإنها تكشف الطبيعة الموجية للجُسيمات والأجسام الصغيرة. وحسب الفيزيائي المعروف Richard Feynman فإن تجربة الشق المزدوج تحتوي على كل غرائب ميكانيك الكم (Feynman *et al.*, 1965).

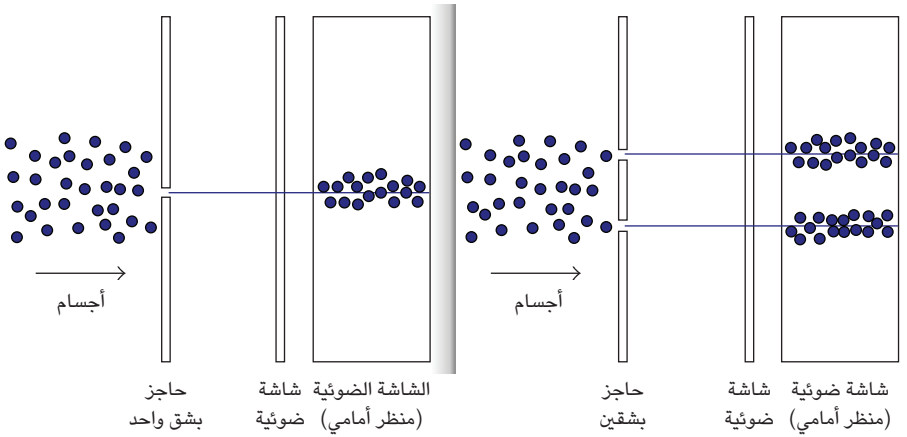


شكل ٢-١: تجربة الشقِّ المزدوج باستخدام الإلكترونات.



شكل ٢-٢: تداخُل الموجات البنَّاء والهدَّام.

تتم التجربة بتسليط ضوءٍ أحادي اللون (Monochromatic)، لتجنُّب تداخُل موجات بأطوالٍ موجيةٍ مختلفة، تُشوِّش التجربة كما هو حال الضوء الأبيض من مصدر على حاجزٍ يحتوي على شقَّين ضيقَين، يتم التحكُّم مسبقًا بعرضهما والمسافة الفاصلة بينهما. الضوء



شكل ٢-٣: تسليط أجسامٍ كبيرةٍ نسبيًّا مثل الرصاصات على حاجز ذي شقٍّ واحدٍ (يسار) أو شقَّين (يمين).

الذي سيخترق الشقَّين سيقع على شاشةٍ حساسةٍ للضوء، تقع خلف الحاجز بمسافةٍ مناسبة. عند مرور الفوتونات من كلا الشقَّين ستتكوَّن على الشاشة حزمٌ متبادلةٌ مضيئة، وداكنةٌ مختلفة الكثافات (شكل ٢-١). الحزم المضيئة تنشأ بسبب وقوع الفوتونات عليها، والحزم الداكنة دلالة على عدم وقوع الفوتونات على هذه المناطق من الشاشة. والسبب هنا يعود إلى تداخُل الموجات المارَّة من الشق الأيسر مع تلك المارَّة من الشق الأيمن، فإذا تطابقَت قمة الموجة وقعرُها من أحد الشقَّين مع قمة الموجة وقعرها من الشق الآخر، تكبرُ الموجة لحصول ما يُعرف بالتداخُل البنَّاء للموجتَين، وستكون الفوتونات موجودةً فيها وتكون نقطة سقوطها مضيئة. أما إذا تطابقَت قمة الموجة من أحد الشقَّين مع قعر الموجة من الشق الآخر، فسيحصل تداخُلٌ هدَّامٌ وستُلغي الموجتَان بعضهما ولا تتكوَّن موجة (شكل ٢-٢) وبذا لا تُوجد فوتونات وتكون قبالتها على الشاشة مظلمة. وإذا تم غلق أحد الشقَّين، فستظهر حزمةٌ واحدة بسبب عدم وجود تداخُل. وهكذا يتطلَّب التداخُل عبور الضوء من الشقَّين في نفس الوقت. هذه النتائج تنسجم مع البديهة التي نعرفها عن الفوتونات؛ كونها تسلك سلوك الجُسيم والموجة.

ماذا لو أجرينا التجربة بقذف أجسامٍ كبيرةٍ نسبيًّا كالرصاصات؟ فإذا أُطلقَت الرصاصات بوجود شقٍّ واحدٍ مفتوح، فإنها ستصطدم في الشاشة في منطقةٍ مقابلةٍ

للشق المفتوح فقط. كما في الشكل ٢-٣ يسار. وإذا أُطلقَت الرصاصات بوجود الشقَّين مفتوحَين، فستصطدم الرصاصات بالشاشة في منطقتَين كلٌّ منهما مقابل أحد الشقَّين، دون حصول تداخُل كما هو متوقَّع؛ ما يؤكِّد أن الرصاصات لا تكون خلال مسيرها موجات (شكل ٢-٣ يمين).

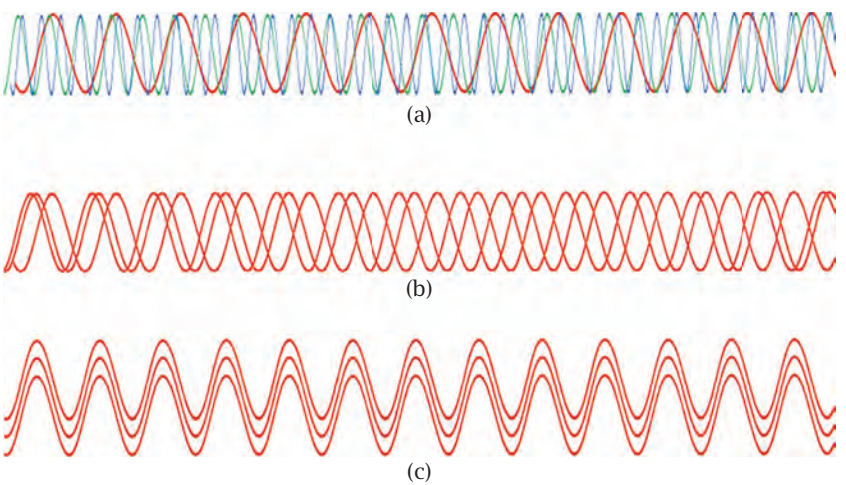
الآن نُعيد التجربة بقذف إلكترونات بوجود شقٍّ واحدٍ مفتوح، ستظهر على الشاشة حزمةٌ واحدةٌ تُدلِّل على أن الإلكترونات سلكَت سلوك الرصاصات كجُسيماتٍ وليس كموجات، كما في الشكل ٢-٣ يسار. وعند تكرار التجربة بوجود الشقَّين مفتوحَين، سنحصُل على حزمٍ مضيئةٍ وحزمٍ داكنةٍ متبادلة كما في الشكل ٢-٣ ما يشير إلى أن الإلكترونات سلكَت سلوك الموجات حيث حصل التداخُل. الحالة الأخيرة تحصُل حتى لو تم قذف الإلكترونات بشكلٍ فرديٍّ (إلكترون واحد في كل مرة) مع وجود الشقَّين مفتوحَين؛ هذا يعني أن الإلكترون الواحد يمُر من خلال الشقَّين في نفس الوقت؛ هذه التجربة تُثبِت أن الإلكترونات يمكن أن تسلُك سلوكَ الجُسيمات وسلوكَ الموجات.

(٢-١) التماسُك وفكُّ التماسُك Coherence and Decoherence

لو أُعيدَت التجربة الأخيرة مع مراقبة مرور الإلكترونات من أحد الشقَّين المفتوحَين بوضع جهازٍ يتحسَّس الإلكترون، عند مروره من الشق الأيمن مثلًا. في هذه الحالة سيمُر كل إلكترونٍ إما من الشق الأيمن أو الشق الأيسر، وليس من الشقَّين في الوقت نفسه. وهكذا لن يحصُل تداخُل، وتُشكِّل الإلكترونات على الشاشة حزمتَين مضيئتَين فقط كلٌّ مقابل أحد الشقَّين. هنا سلكَت الإلكترونات سلوكَ الجسيمات أو السلوك التقليدي العادي. لو تَمَّ تكرار التجربة ولكن مع إيقاف تشغيل جهاز تحسُّس الإلكترونات، ستكون الإلكترونات حزمًا مضيئةً وداكنةً متبادلة هذه المرة، بسلوكها سلوكًا موجيًّا. في المرحلة الأولى عملية تحسُّس الجهاز لعبور الإلكترون من الشق تُشوِّش موجة الإلكترون وتُؤدي إلى (انهيارها) أو مركزتها، فتظهر بحالةٍ تقليديةٍ واحدة (متموضعة). التشويش هنا ينشأ من خلال مشاركة الجهاز معلومات الإلكترون. هذا الأمر لا يتعلَّق بحجم جهاز التحسُّس؛ حيث إن اصطدام الإلكترون حتى مع فوتون أو ذرة أو أي شيءٍ آخر صغيرًا كان أم كبيرًا، سيؤدي إلى تشويش دالَّة الموجة وانهيارها، ويحصل ما يُعرف بفَكِّ التماسُك. يمكن أن تُظهِر البروتونات والذرات والتكوينات الصغيرة مثل الجزيئات كما هي الـ Buckyballs

وهي جزيئاتٌ نانوية مؤلَّفة من ٦٠ ذرة كاربون، السلوكَ الجُسيمي الموجي المزدوج. لكن مع زيادة كبر الأشياء تصعُب هذه العملية؛ حيث إنها لم تنجح مع البكتيريا التي تكبر الـ Buckyballs بمائة مرة؛ لهذا السبب تُجرى تجربة الشق المزدوج في جوٍّ مفرَّغ من الهواء. وللسبب ذاته لا تتمكَّن الأجسام الكبيرة كالحيوانات أو الإنسان من التواجُد في أكثر من مكان في الوقت نفسه؛ فلكونها مؤلَّفة من عددٍ هائلٍ من الذرَّات، وفي بيئةٍ تعجُّ بأعدادٍ أكبرَ من الذرات، سيحصُل تشويشٌ كبيرٌ يؤدي إلى انهيار موجات الجسم فورًا؛ وبالتالي سيتَمركَز في حالةٍ واحدةٍ أو مكانٍ واحدٍ وهو الحالة التقليدية (Lloyd, 2006).

التماسُك الكُمومي (Quantum coherence) هو ترابُط الأشياء شبه الموجيَّة، وهو كمِّيةٌ احتماليةٌ مكثَّفة محفوظة (Dannenberg, 2008). والتماسُك هو ما يحفظ علاقاتِ الطور الحسَّاسة بين مختلف مكوِّنات دالَّة الموجة. وحسب Briegel & Popescu (2014) فإن الحالة الكمومية تبدأ بالتماسُك.



شكل ٢-٤: الموجات في زمنٍ معيَّنٍ وكدالَّة للمسافة. (a) عديدة اللون (Polychromatic)، ضوءٌ غير متماسكٍ يتضمَّن بضعةَ أطوالٍ موجية. (b) ضوءٌ أحادي اللون (Monochromatic) يتألَّف من موجاتٍ عشوائية الطور؛ زمانيًّا متماسكة لكن مكانيًّا غير متماسكة (طول قليل التماسُك). (c) ضوءُ الليزر؛ متماسكٌ مكانيًّا وزمانيًّا وطولٌ عالي التماسُك. عن Madl & Egot-Lemaire (2015).

التماسُك يشير إلى ثبات أو توقُّع طَور الموجة، أو فرق طورٍ ثابتٍ بين موجتَين مع الوقت. والموجات تكون في الطَّور إذا كانت قممُها وقيعانُها تتطابق على مكانٍ وزمانٍ معيَّن. وهكذا تكون الموجاتُ متماسكةً إذا كان لها التردُّد نفسه وفرق طورٍ ثابت. وكمثالٍ بارزٍ ضوء الليزر الذي يُظهِر التماسُك المكاني والزماني كما في الشكل ٢-٤. ولكن حتى الضوء المتعدِّد اللون يمكن أن يكون متماسكًا إذا كانت التردُّدات المختلفة مقترنةً حيث تُظهِر درجةَ حريةٍ واحدة (Madl & Egot-Lemaire 2015).

غير أن تآثُر المنظومة الكمومية مع البيئة سيفُك تماسُك دالَّة الموجة مؤديًا إلى انهيارها؛ فضوضاء البيئة تشوِّش أطوار المنظومة الكمومية. وما إن يُفَك تماسُك المنظومة الكمومية حتى يتصرَّف كمنظومةٍ تقليدية (Davis, 2008).

إن ما يُميِّز العالم التقليدي عن الحالة الكمومية هو الوجود الموضوعي؛ فالحالات التقليدية والتي نتعامل معها في الحياة اليومية يمكن إيجادها عن طريق القياس دون تشويشها بسبب عملية الملاحظة أو القياس. على عكس ذلك، فإن محاولة اكتشاف الحالة الكمومية عن طريق القياس سيؤدي إلى انهيارها؛ وبالتالي انهيار الحالة الكمومية للمنظومة المتماسكة والتي ستتصرف أو تُظهِر الحالة التقليدية (العادية) وستكون الحالة بعد القياس هي ما وجدَه المراقب، والتي غالبًا ما لا تكون هي ذاتها قبل عملية القياس (Ollivier, *et al.*, 2004).

إن تحقُّق الظواهر الكمومية في المنظومة يتطلب أن يكون زمن تحقيق التماسُك لها أقصر من زمن تحقيق فك التماسُك؛ كأن يكون زمن تحقيقِ التماسُك بمقياس الفمتوثانية أو البيكوثانية، وزمن تحقيقِ فك التماسُك بالنانوثانية أو الميكروثانية أو أكثر.

العوامل المحدِّدة لزمنِ فك التماسُك حسب معادلة زوريك هي: (١) الكتلة أو عدد الجُسيمات في المنظومة المتماسكة كموميًّا؛ فكلما زادت الكتلة أو عدد الجُسيمات، يقصُر زمنُ فكِّ التماسُك أو يعجل حصول فكِّ التماسُك. إن زمن فك التماسُك يقصُر مع مربَّع الكتلة، فإذا زادت كتلة الجسم ١٠ أضعاف، قصر زمنُ فكِّ التماسُك ١٠٠ مرة، وإذا زاد مليون مرة، قصر زمن فك التماسك ترليون مرة. هذا يفسر عدم إمكانية تحسُّس الظواهر الكمومية في الأجسام الكبيرة، التي نتعامل معها يوميًّا. (٢) الإزاحة بين الحالات الكمومية؛ فكلما كبرَت المسافة بين المواقع المتبادلة للجُسيمات، قصر زمنُ فك التماسُك. (٣) درجة الحرارة؛ فكلما زادت درجة الحرارة، قصر زمنُ فك التماسُك. (٤) المرونة؛ فكلما زادت صلابة المنظومة، طالت فترة تماسُكِها، وزاد زمن فك التماسُك، والعكس

صحيح. هذه العوامل تحصُل في المنظومات البسيطة جدًّا. أما في المنظومات الكبيرة ومنها الكائنات الحية، فإن التماسُك الكمومي يمكن أن يحصُل على مستوى الجُسيمات والذرَّات والتراكيب النانوية فيها كما سيتضح في الفصول القادمة.

(١-٣) التراكُب Superposition

التراكُب والاحتمالية هما مبدآن أساسيان في ميكانيك الكم. والتراكُب يعني إمكانية جمع أيِّ حالتَين كموميتَين أو أكثر لتنتُج حالةٌ كمومية، أو أن الحالة الكمومية يمكن أن تكون مجموع حالتَين كموميتَين أو أكثر.

هنا تقوم الجُسيمات بعمل شيئَين أو أكثر (مئات أو ملايين) في الوقت نفسه. هذا يمكِّن المنظومة الكمومية من إنجاز أعمالٍ خارقةٍ مقارنةً بالمنظومة التقليدية. هذه الظاهرة مكَّنَت من ظهور التعقيد الذي نراه في مواد الكون؛ فمن مادةٍ بسيطةٍ كانت تملأ الكون في بدايات تكوُّنه بشكل ذرات الهيدروجين فقط إلى نشوء عنصر الهيليوم (تتألف نواته من بروتونَين ونيترونَين) إلى العناصر المتدرِّجة في التعقيد كالكاربون والأوكسجين والكبريت، ومعظم عناصر الجدول الدوري التي يتألَّف منها الكون الحالي.

حسب ميكانيكا الكم، فإن وجود عدة بروتونات (موجبة الشحنة) في النواة يقتضي تحوُّل بعضها إلى نيوترونات (متعادلة الشحنة)، كما أن وجودَ مزيدٍ من النيوترونات يحتِّم تحوُّل بعضها إلى بروتونات؛ بحيث يكون عدد البروتونات مساويًا تقريبًا لعدد النيوترونات، والتي ستُشكِّل الوزن الذري حيث الإلكترونات واطئة الكتلة ويمكن إهمالها. من المعروف أن العامل الحاسم الذي يحدِّد طبيعة العنصر (خواصه الكيميائية) هو عدد البروتونات وبالتالي عدد الإلكترونات المساوي له (العدد الذري). وإذا كان للعنصر العدد الذري نفسه ولكن الوزن الذري مختلف، كأن تكون النواة تحتوي على نيوترون واحد أو أكثر زيادة عن عدد البروتونات، فهذه ستكون نظائر (Isotopes) للعنصر. للبروتون والنيترون نمطان مختلفان من البَرم المغزلي (Spin) الذي يمكِّنهما من الترابُط معًا. يُشبِّهُهما McFadden & AlKhalili (2014) برقصة الفالس الحميمية البطيئة، ورقصة الوينغ السريعة. الشيء الذي يمكِّنهما من الارتباط هو قيامهما بكلا النوعَين المختلفَين من البرم في الوقت نفسه، من خلال ظاهرة التراكُب، بدون هذه الظاهرة لا يمكن للبروتونات والنيوترونات من الالتصاق معًا في النواة. أمثلةٌ أخرى تشمل وجود الجُسيم في أكثر من

مكانٍ في نفس الوقت، واتخاذ المعلومة لقيمٍ مختلفةٍ في نفس الوقت كما في الكومبيوتر الكمومي.

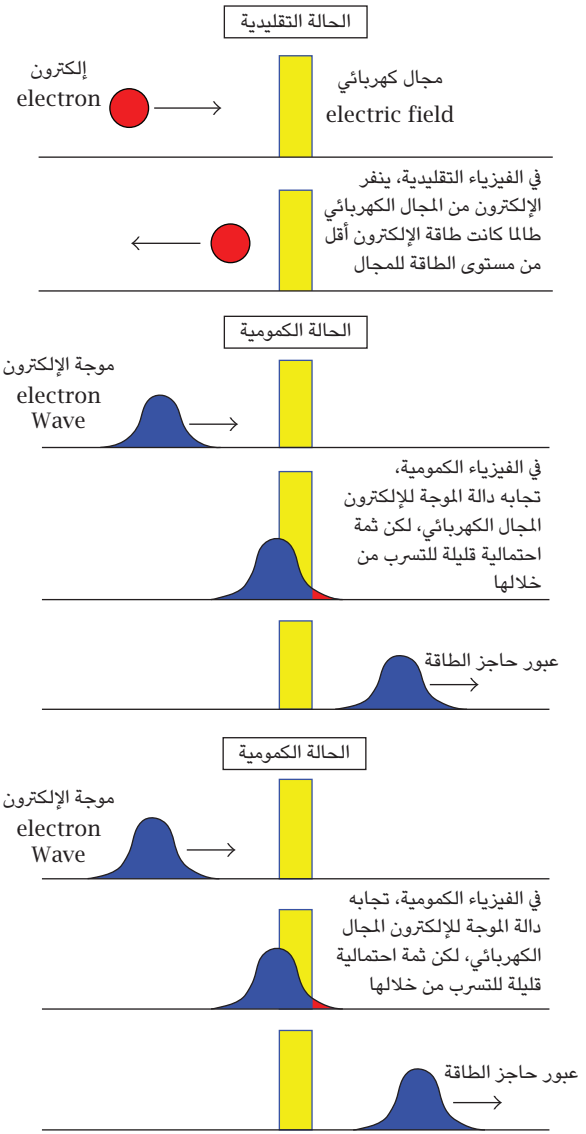
(١-٤) التسرُّب Tunneling

هذه الظاهرة الكمومية تتمثل في قدرة الجُسيمات تحت الذرية، مثل الإلكترونات والبروتونات، على اختراق حاجز الطاقة بفعل السلوك المَوْجي للجُسيم. هذا الفعل يُشبِه إلى حدٍّ ما اختراقَ الجدار. تعتمد هذه الظاهرة على مبدأ عدم الدقة؛ حيث ثمَّة عدم إمكانية تحديد موقع الجُسيمات الخفيفة، ما يسمح لها بكسر قواعد الميكانيك التقليدي ولو باحتماليةٍ قليلة، والتحرُّك في الفضاء دون الحاجة للعبور من فوق حاجز الطاقة بل التسرُّب من خلاله (شكل ٢-٥).

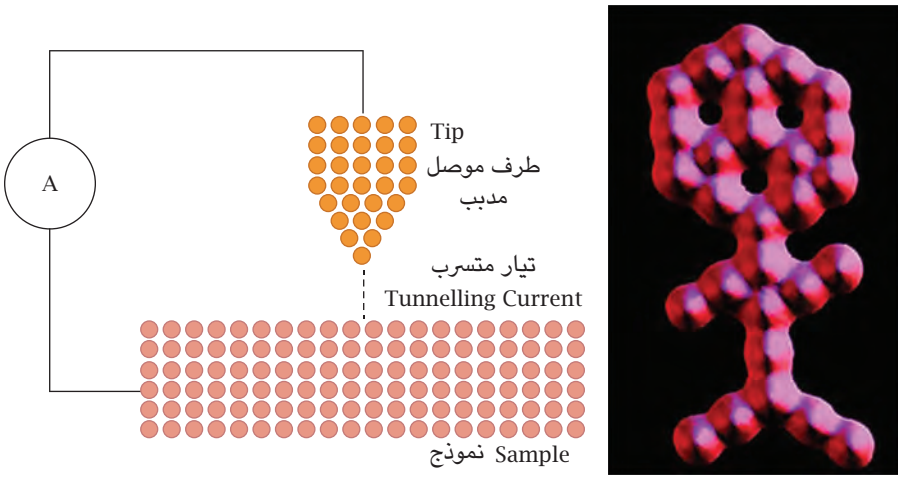
إن ظاهرة التسرُّب من بين أمورٍ أخرى هي الأساس في إنتاج الشمس للطاقة؛ فذَرَّة الهيدروجين تتألَّف من بروتونٍ واحدٍ يُشكِّل النواة التي يدور حولها إلكترونٌ واحد. وبفعل الكتلة الهائلة للشمس (أو أي نجمةٍ أخرى) يتولَّد ضغطٌ عالٍ جدًّا، وبالتالي حرارةٌ عاليةٌ جدًّا في مركزها يُجبِر نوى ذرَّات الهيدروجين من خلال التصادُم على الاندماج. لكن الشحنة الموجبة المتماثلة للنواتَين تتنافران بعد اقترابهما الشديد من بعضهما، ويُشكِّل هذا حاجزَ طاقة. هنا تعمل ظاهرة التسرُّب؛ حيث يتصرَّف البروتون كموجة ويخترق حاجز الطاقة ويحصُل الاندماج، مُزيحًا طاقةً كبيرةً ستشع بشكلِ ضوء وحرارة. إن الاحتمالية المنخفضة لحصول عملية التسرُّب للبروتونات تفسِّر حصول الاندماج النووي التدريجي في قلب الشمس وطول عمر الشمس. لكن الاشعاع الهائل للشمس يرجع إلى الأعداد الهائلة للبروتونات المتصادمة.

ومن الظواهر التي يلعب فيها التسرُّب دورًا مهمًّا هي التحلُّل الإشعاعي للمواد المُشعَّة مثل اليورانيوم، والتي تنطلق من نواها غير المستقرة جُسيمات وطاقة، لتتحول إلى عناصرَ أكثرَ استقرارًا. كما أن للتسرُّب تطبيقاتٍ في فيزياء المواد الصلبة وعمل الدايودات.

هذه الظاهرة تعمل مع الإلكترونات والبروتونات، والفرصة تكون أكبر كلما قلَّت كتلة الجُسيم والمسافة الفاصلة. ثمَّة عددٌ من الحالات المهمة التي تعمل فيها هذه الظاهرة، كما سيأتي شرحه في الكائنات الحية، ومنها عمل الإنزيمات وجُزيئات DNA وحاسة الشم وغيرها.



شكل ٢-٥: رسمٌ تخطيطيٌّ يوضِّح التسرُّب الكمومي. في الحالة التقليدية (أعلى) لا يتحقَّق التسرُّب الكمومي، وفي الحالة الكمومية (أسفل) يتحقَّق التسرُّب الكمومي.



شكل ٢-٦: تصوير الذرَّات بِمجهَر التسرُّب الماسح (يسار) حيث تظهر الذرات المفردة كجُسيمات (يمين).

وكتطبيقٍ لهذه الظاهرة اختُرع المِجهَر النفقي الماسح (Scanning Tunnelling Microscope) وصار بالإمكان تصوير الذرات المفردة بواسطته؛ حيث يتم تقريبُ طرفٍ معدني، دقيق، مدبَّب بمسافةٍ صغيرةٍ جدًّا من السطح المراد تصويره، فإذا كان ثمَّة فرق جهد بين طرف المعدن والسطح، فإن بعض الإلكترونات ستتسرَّب عَبْر الفراغ بين القطب والسطح، وتكون شدة التيار مُتأثِّرةً جدًّا بالمسافة الصغيرة للفراغ، حتى وإن كان بارتفاع ذرةٍ واحدة، وبذلك سيتم تصوير طوبوغرافية السطح على مستوى الذرَّات (أي يمكن تصوير الذرَّات المفردة) (شكل ٢-٦).

(١-٥) التشابُك Entanglement

فوتونات الضوء المتشابكة في الطاقة والزمن، لا تقتصر على الأبعاد الصغيرة (الذَّرية أو الجُزيئية) ولكن تتعدَّاها إلى الأبعاد الكبيرة؛ فالتشابك الكمومي هو ظاهرةٌ فيزيائية تحصُل عندما تتولَّد أو تتآثر أزواج فوتونات (جُسيمات) الليزر بطُرق؛ حيث لا يمكن وصف الحالة الكمومية لكل جُسيمٍ بمعزل عن حالة الجسيم الآخر، حتى لو كانت المسافات الفاصلة بينهما كبيرة. وهكذا يتوجَّب وصف الحالة الكمومية للمنظومة ككل. وظاهريًّا

يبدو وكأن أحد الزوجَين المتشابكَين «يعرف» أن ثمَّة عمليةَ قياسٍ تجري على الزوج المتشابك الآخر، ونتيجة القياس أيضًا على الرغم من انعدام وسيلة اتصال لنقل المعلومات بينهما، وتفصلهما حينها مسافاتٌ شاسعة. لقد أطلق آينشتاين على هذه الظاهرة التي لم يكن متحمِّسًا لها بـ «الشبحية عن بعد».

التشابُك هو التناسُق غير الموقعي، أو عن بُعد بين المنظومات الكمومية المتمايزة. وحسب تعبير شرودنجر في مناقشته لمفارقة آينشتاين-بودولسكي-روزن (EPR) كما ينقله Whaley *et al.*, (2011) «أن التشابُك الكمومي هو الخاصية المميزة لميكانيك الكم، والتي دفعَته إلى المغادرة التامة لخطوط التفكير التقليدي.» وهذه الظاهرة هي كموميةٌ خالصة حيث إنها على خلاف التطوُّرات شبه الموجية ليس لها مشابهٌ تقليدي؛ فالعلاقات غير الموقعية تنشأ عن تركيب الحالات الكمومية للمنظومة المتكاملة؛ فهذه العلاقات الكمومية في المنظومة المتشاكلة هي مستقلة عن الفصل المكاني للمكوِّنات، وبذلك فهي في معنًى معيَّنٍ يبدو على أنها تسلك كمنظومةٍ واحدةٍ ما يؤدي إلى انتهاك الحقيقة الموقعية (البديهية) وهو ما أدى إلى مفارقة (EPR). ومن منظور المعرفة، تمثِّل حالة التشابُك الخالصة للمنظومة المتشاكلة معرفةً قُصوى حيث تكون إنتروبي (شواش، وتُقابِل الجهل) فان نيومان صفرًا. وكما يعبِّر عنها شرودنجر «إن المعرفة الممكنة الأفضل للكل لا تتضمن بالضرورة المعرفة الممكنة الأفضل لأجزائه.» وفي الوقت الحاضر تعدَّت دراسات التشابُك الحالات الثنائية المكوِّن لتشمل التشابُك في المنظومات المتعدِّدة المكوِّنات بما فيها المنظومات البيولوجية.

حالة التشابك تزيد من قدرات معالجة المعلومات للمنظومات الكمومية لكنها حسَّاسة جدًّا. عند حصول تشابُكٍ بين جُسيمَين يمكن أن يحصُل تشابُكٌ مع جُسيمٍ ثالث أيضًا، لكن يفقد التشابُك بين الجُسيمَين الأولَين وهكذا. ولغرض دراسة هذه الظاهرة في الفيزياء يتوجب استخدام جهازٍ معزولٍ ومفرَّغٍ تمامًا، ودرجةِ حرارة منخفضةٍ جدًّا. غير أن هذه الظاهرة، وعلى عكس التوقُّع، يمكن أن تحصُل في المنظومات البيولوجية على المستوى الجُزيئي في ظل قوانين ميكانيك الكَم. السبب في ذلك أن المنظومة البيولوجية منظومةٌ مفتوحة بعيدة عن حالة التوازن الحراري، وتكون قادرة على تصحيح الأخطاء الكمومية كحالة فقدان التشابُك. إن التماسُك هو بداية الحالة الكمومية. والتشابُك هو قمتُها Briegel & Popescu (2014).

الفصل الثالث

بيولوجيا الكَم

Quantum Biology

«ما نلاحظه ليس الطبيعة بذاتها، بل الطبيعة التي تتكشَّف لطريقتنا في السؤال.»

ويرنر هايزنبرك (Gleiser, 2014)

العلم هو جهدٌ معرفيٌّ تراكمي، يهدف إلى فهم الطبيعة عن طريق البحث، وصولًا إلى منظومة فرضياتٍ ونظرياتٍ تنفيها أو تؤكِّدها التجربة، ويُطوِّرها النقد دائمًا.

علم الحياة هو أحد العلوم الصِّرفة؛ التي تشمل الفيزياء والكيمياء والرياضيات والجيولوجيا. وهذه العلوم تسير بمسلكَين متكاملَين؛ العلم الأساس (Basic science) والذي يدرُس الموضوع بذاته بهدف إغناء المعرفة دون توقُّع التطبيق المباشر لنتائجه، والعلم التطبيقي (Applied science) الذي يدرُس الموضوع برجاء الحصول على نتائجَ تطبيقيةٍ مباشرة أو قريبة. كلا المسلكَين ضروريان؛ حيث إن العلم الأساس يمكن أن يُوفِّر خلال مسيرته أو نتائجه منطلقاتٍ لأبحاثٍ تطبيقيةٍ مهمة. مثلًا عزل وتشخيص أحد الكائنات الحية الدقيقة غير المعروفة، بحث أساسًا يمكن أن يُوفِّر مجال البحث التطبيقي بغرض استغلاله كمصدرٍ غذائيٍّ أو دوائي. الدراسات الأساسية في وراثة الأحياء مكَّنَت من انطلاق العديد من الأبحاث التطبيقية، في مجال تحسين السُّلالات الحيوانية والنباتية؛ بقصد زيادة إنتاجيتها أو مقاومتها للأمراض. من جانبٍ آخرَ فإن العلوم التطبيقية وما تُنتِجه من تقنياتٍ متطوِّرة، يُمكِن أن تُحفِّز الأبحاث الأساسية وتيسِّرها. كمثال التقنية

النانوية كشفَت عن ظواهرَ غيرِ عادية تُظهِرها الموادُّ في الأبعاد المِجهَرية، والكشف الذي قدَّمه تلسكوب هابل عن تباعُد المجرات، أسهم في تكوين نظرية الانفجار العظيم.

لقد كشف علم الحياة للعلماء أعقد منظومة في الطبيعة على الإطلاق لدراستها، كما أن العلماء في شتى فروع العلم هم أنفسُهم نُظمٌ بيولوجيةٌ (Sergi, 2009). وحسب تعبير Goel (2008) فإن النُّظُم البيولوجية تُوفِّر مختبرًا ممتازًا لسبر أغوار تآثُر المادة والطاقة والمعلومات.

علم الحياة أو البيولوجيا يهدف إلى دراسة ظاهرة الحياة والكائنات الحية وتآثُرها فيما بينها ومع البيئة. تراكُم المعلومات والتعقيد العالي للمواد الحيوية والتنوُّع الهائل للكائنات الحية وتطوُّر تقنيات البحث العلمي، أدَّى إلى نشوء فروعٍ عديدةٍ لعلم الحياة التقليدي؛ شَملَت علوم المظهر (Morphology) والتشريح (Anatomy) وتقسيم الأحياء (Taxonomy) والخلية (Cytology) والأنسجة (Histology) والأجنة (Embryology) والفسلجة (Physiology) والوراثة (Genetics) والحيوان (Zoology) والنبات (Botany) والبكتيريا (Bacteriology) والفطريات (Mycology) والطحالب (Algae) والفايروسات (Virology) وفي مرحلةٍ متقدِّمةٍ علم الحياة الجزيئي (Molecular biology) وعلم الوراثة الجزيئية (Molecular genetics) والتقنية الحيوية (Biotechnology). كما تلاقى علم الحياة مع العلوم الأساسية الأخرى، فنشأَت علوم الكيمياء الحيوية (Biochemistry) والفيزياء الحيوية (Biophysics) والإحصاء الحيوي (Biostatistics) والمعلوماتية الحيوية (Bioinformatics) وأخيرًا وليس آخرًا بزغ علم الحياة الكمومي (Quantum biology).

وهكذا تأريخيًّا، اتجه علم الحياة من دراسة الأحياء والظواهر البيولوجية العامة إلى التفاصيل التركيبية والفعاليات الخلَوية، إلى الكشف المتزايد العمق على المستويات الجُزيئية والذَّرية وتحت الذَّرية. من جانبٍ آخر، ركَّز ميكانيك الكَم عند نشوئه على الظواهر المِجهَرية للفوتونات والإلكترونات والذرَّات. لكن مع الوقت تزايد توجُّه الفيزيائيين لدراسة الأجسام والظواهر المتزايدة التعقيد. وهكذا تقاربَت الأبعاد المدروسة في البيولوجيا والفيزياء، وبرز السؤال عما يمكن أن تقدِّمه فيزياء الكَم في ولعلوم الحياة (Arndt *et al.*, 2009).

إن جذور بيولوجيا الكَم تعود إلى أربعينيات القرن العشرين حيث أصدر P. Jordan سنة ١٩٤٣م كتابًا متسائلًا فيه ما إذا كانت قوانين الفيزياء الذرية والكمومية ذات أهميةٍ أساسيةٍ للحياة، واستخدَم لأول مرة مصطلح البيولوجيا الكمومية Quanten-Biologie (Huelga & Plenio, 2013).

(١) لماذا علم الحياة الكمومي Why Quantum Biology

نتيجة التقدم العلمي والتقني برزَت اتجاهاتٌ بحثيةٌ جديدة، تهدف إلى التحقُّق من تأثيرات فيزياء الكم في البيولوجيا، والتي تحدُث في أبعادٍ مكانيةٍ وزمانية تسمح للظواهر الكمومية والتقلُّبات البيئية بالتداخُل المثمر، لتمكين العمليات البيولوجية.

في النصف الأول من القرن العشرين ورغم التقدُّم الهائل في علم الحياة بكافَّة فروعه، ورسوخ نظرية التطوُّر لدارون، وكَشفِ الكثير من التفاصيل التركيبية والتفاعلات الكيموحيوية في الكائنات الحية، كان ثمَّة الكثير من الأسئلة المهمة التي ينبغي الإجابة عنها؛ منها: طبيعة المورثات، وتكوين البروتينات، وعمل الإنزيمات، ونشوء الحياة؛ والتي اعتَمدَت على مبادئ الفيزياء والكيمياء التقليدية.

عشر سنواتٍ بعد حصوله على جائزة نوبل، ألقى نيلز بور (Niels Bohr) أحدُ مؤسِّسي فيزياء الكَم محاضرة عنوانها «الضوء والحياة *Light and Life*» سنة ١٩٣٢م في كوبنهاكن. في هذه المحاضرة أثار سؤالًا حول ما إذا يمكن أن تُسهِم نظرية الكم في الفهم العلمي للنُّظُم الحية. وكان ضمن مستمعيه ماكس ديلبروك (Max Delbrück) الذي ألهمَه حديثُ نيلز بور، وأسهَم في تأسيس علم الحياة الجُزيئي، وحاز على جائزة نوبل سنة ١٩٦٩م، لاكتشافاته في علم الوراثة (Marais *et al.*, 2018).

سنة ١٩٤٤م، نشر الفيزيائي النظري المعروف، وأحد مؤسِّسي ميكانيك الكم، أروين شرودنجر (Erwin Schrődinger) كتابا صغيرًا بعنوان: ما هي الحياة؟ *What is Life?* تساءل فيه عن كفاية ميكانيك نيوتن وقوانين الديناميكا الحرارية (Thermodynamics) في تفسير الظواهر الحياتية خاصةً طبيعة وعمل المورِّثات والتي يستند عليها علماء البيولوجيا؛ فقد جلَب علمُ الوراثة وانعزال الصفات الوراثية، ودقة عمل الجينات التي لم يكن يُعرف شيءٌ مهمٌّ عن تركيبها اهتمامَ هذا العالم. أشار شرودنجر إلى أن انعزال الصفات الوراثية يفترض التجزُّؤية (Discreteness) وهي صفةٌ أساسيةٌ في ميكانيك الكَم؛ حيث إن الطاقة والموادَّ في الكون، كما أشرنا سابقًا، تُوجَد بشكلٍ مجزَّأ بهيئة كمَّات (Quanta) ومن هنا سكَّ اسمُ ميكانيك الكَم (Quantum mechanics). وهكذا استنتَج شرودنجر أن حوامل الصفات الوراثية لا بد أن تكون بهيئة جُزيئات.

انطلق شرودنجر من فكرة أن دقة عمل الجينات تتطلَّب ألا تكون مؤلَّفةً من أعدادٍ هائلةٍ من الذرات والجُزيئات؛ فلو كانت كذلك فإنها ستخضع لقوانين الديناميكا الحرارية (الفيزياء التقليدية) التي تعتمد على الإحصاء أو معدَّل تأثير الجزيئات؛ حيث إن الجُزيئات

المفردة في نظم كهذه تسلُك سلوكًا عشوائيًّا، والذي يُمكِن أن يُنتِج «النظام من خلال الفوضى» ودرجة عدم الدقة (التشويش) فيه تكون عاليةً نسبيًّا. وللتوضيح نُورِد المثال التالي: ظاهرة الانتشار (Diffusion)؛ فعند وضعنا لقطرة حبر أو صبغة (كلٌّ منهما يحتوي على أعدادٍ هائلةٍ من الجزيئات) في كميةٍ من الماء موضوعةٍ في كأسٍ زجاجية، تبدأ الصبغة بالانتشار في الماء تدريجيًّا، وبشكلٍ فوضويٍّ بسبب الحركة العشوائية الناتجة عن الطاقة الحركية لجُزيئات الصبغة وجُزيئات الماء. وعلى الرغم من الحركة العشوائية لجزيئات الصبغة بجميع الاتجاهات، إلا أن معدَّل حركة الجُزيئات سيكون من المنطقة التي فيها تركيز هذه الجُزيئات عالٍ إلى المناطق التي يكون فيها تركيزها واطئًا. وبعد فترة من الوقت سيكون تركيز الصبغة في المحلول متجانسًا. وهكذا نتج النظام (التوزُّع المُنتظِم لجُزيئات الصبغة في المحلول) من خلال الفوضى. لكن طالما أن الجينات تُظهِر درجةً عاليةً من الدقة؛ حيث نسبة الشذوذ (الطفرات) منخفضة جدًّا، فمن المرجَّح حسب شرودنجر أن تكون الجينات منخفضةَ عدد الذرات؛ وبالتالي لا تخضع لقوانين الفيزياء التقليدية، بل لفيزياء الكم. رجَّح شرودنجر أن يكون حجم الجين بحدود مكعَّبٍ حَرفُه ٣٠٠ أنكستروم (= ١ × ١٠⁻⁷م). هذا الحجم سيتألف من حوالي ١ مليون ذرة؛ بناءً على ذلك سيكون معدَّل الخطأ (الشذوذ أو الطفرة) يساوي ١ / ١٠٠٠ (واحد مقسوم على الجذر التربيعي للعدد) لو أن عمل الجين يعتمد على الفيزياء التقليدية (الديناميكا الحرارية). في حين أن معدَّل الطفرات التي تُظهِرها الجينات هو أقل من ١ في المليار؛ بناءً عليه يُرجَّح خضوع الجينات لقوانين ميكانيك الكَم وعمل مبدأ «النظام ينشأ من النظام». المسألة الجوهرية هنا أن البيولوجيا تعتمد على تراكيبَ صغيرةٍ عالية التنظيم، لكنها ذاتُ فعاليةٍ غيرِ عادية (انظر إلى الفعاليات المتنوعة جدًّا، والتي تُظهِرها ملايين الأنواع من الكائنات الحية، ولا يمكن للمواد غير الحية إظهارُها). هذا ما يميِّز المادة الحية عن غير الحية في كونها يمكن أن تُظهِر تأثيرات ميكانيك الكم في درجات الحرارة العالية، ومع وجود جُزيئاتٍ كثيرةٍ جدًّا، والذي لا تُظهِره المواد غير الحية في الطبيعة إلا على المستوى المِجهَري، أو تحت ظروف درجات الحرارة المنخفضة جدًّا (قرب −٢٧٣م°) وفراغٍ شبهِ تامٍّ في المُختبَر، والذي سنناقشه لاحقًا. وهكذا لخَّص شرودنجر الجوانب الجُزيئية الصاعدة حينها في علوم الحياة، وكان كتابه مُمهِّدًا لبزوغ علم الحياة الجُزيئي.

في النصف الثاني من القرن العشرين، شهد علم الحياة تطورًا نوعيًّا بظهور علم الحياة الجُزيئي، الذي تكفَّل بدراسة الأسس الجزيئية للظواهر الحيوية المفتاحية؛ فقد

تم كشف تركيب جُزيئة الـ DNA وآليات تضاعُفها وتركيب وعمل الجينات وجُزيئات RNA وتكوين البروتينات بضمنها الإنزيمات ودورها في حياتية الخلايا الحية. أحدَث هذا العلم تطورًا شاملًا في جميع فروع علم الحياة باتجاه كشف الأُسس الجُزيئية للظواهر البيولوجية. مكَّن هذا العلم من النظر إلى الخلية الحية على أنها منظومةُ إكثار ومعالجة المعلومات، تحتوي على الكثير من المكائن النانوية التي تطوَّرَت طبيعيًّا، والتي تحتاج إلى ميكانيك الكم لوصفها في بعض مستوياتها (Abbott *et. al.*, 2007). وحسب Davis (2007) فإن مؤسِّسي ميكانيك الكم الآخرين بضمنهم نيلز بور وويرنر هيزمبرغ ويوجين وغنر، شارَكوا شرودنجر في إقراره إلى أن فيزياء الكم هي المفتاح لفهم الحياة. وارتكزَت أفكارُ مؤسِّس التقنية النانوية (Nanotechnology) أريك ديكسلر (Eric Drexler) على مُنجَزات البيولوجيا الجُزيئية وآليات عمل الـ DNA والرايبوسومات والبروتينات والفايروسات في بناء مكائنَ نانويةٍ تُحاكي المكوِّنات الأحيائية؛ حيث تتمكَّن من تكوين منتجات، وتتمكَّن من نَسخِ نفسها (Dexler, 1986). كما تلاقت الفروع العلمية الصاعدة؛ التقنية النانوية (Nanotechnology) والتقنية الأحيائية (Biotechnology) والتقنية الكمومية (Quantum technology) ومعالجة المعلومات الكمومية (Quantum information processing) لتُشكِّل ما يُعرف بـ BINS اختصارًا لـ Bio-Info-Nano-Systems (Abbott *et. al.*, 2007). إضافةً إلى ما تقدَّم فإن مساهمة علم الحياة الكبرى في تعزيز وتعميق نظرية التطوُّر لجارلس دارون؛ حيث توضِّح فِعلَها ليس في مجال نشوء وتطوُّر الأحياء فحسب، بل في جميع المجالات بما فيها تطوُّر الكون والمجتمعات واللغة والاقتصاد وغيرها. وهكذا تَبلوَر مصطلَح الداروِنية العامة (Universal Darwinism) والداروِنية (Dawkins, 1976; Blackmore, 1995; Dennett, 1995) الكمومية (Quantum Darwinism) التي تفسِّر ظهور الحقيقة الموضوعية في العالم المرئي عن الاحتمالات العديدة لحالات النظام الكمومي عَبْر آليات التعدُّد والاختلاف وانتخاب الحالة الأصلح من خلال الانتخاب الطبيعي (Zurek, 2009). من ناحيةٍ أخرى ومع تَبلوُر ميكانيك الكَم برز تفسيران لحصول الحقيقة الكمومية في الواقع العادي المرئي؛ الأول عُرف بتفسير كوبنهاجن، وتبنَّاه نيلز بور وويرنر هايزنبرغ، والذي يقول بأن الحقيقة هي ذاتية (Subjective) تعتمد على المُراقِب؛ حيث تؤدِّي مراقبته أو قياسه للظاهرة أو التجربة إلى انهيار دالَّة الموجة الكمومية على احتمالٍ واحدٍ من العديد من الاحتمالات الممكنة في العالم العادي. التفسير الثاني الذي تحمَّس له آينشتاين وشرودنغر

يُقِر بأن الحقيقة موضوعية (Objective) ومستقلة عن مسألة المراقبة أو القياس. ويؤكِّد زوريك، الفيزيائي النظري الأمريكي من أصلٍ بولوني، على موضوعية الحقيقة من خلال عمل الدارونية الكمومية، كما ذكرنا أعلاه. هذه المعضلة بل نشوء وتبلور الأفكار عمومًا قادت إلى التساؤل عن آلية عمل الدماغ البشري، والتفكير في عموم الأحياء بما فيها الأحياء الدقيقة كي يتم التأكُّد من «فعلية» الحقائق التي نُكوِّنها عن العالم. وهكذا أصبحَت دراسة الوعي موضوعًا غاية في الأهمية ليس لعلماء الأحياء فحسب، بل للفيزيائيين والرياضيين أيضًا (Penrose, 1989; 1994; Tegmark, 2007; 2014; Hameroff & Penrose, 2014; Adamatzkya *et al.*, 2018).

من ناحية المكان، فإن أجسام الأحياء كبيرة، تُقاس بالأمتار والسنتمترات كما هي معظم الحيوانات والنباتات والكثير من الفطريات والطحالب، وبعضها كالبكتيريا والأركيا تُقاس بالميكرومترات. هذه الأبعاد تُعَد كبيرةً بمقاييس ميكانيك الكمَ الذي يعمل بأبعاد النانو والبيكو والفمتومتر على مستوى الجُسيمات الذَّرية والذَّرات والجُزيئات. هذه الأبعادُ للكائنات الحية يُفترض خضوعها لقوانين الفيزياء التقليدية، وهي كذلك فعلًا، كما هو حال الأجسام غير الحية الكبيرة. لكن كما هو معروفٌ فإن هذه الأجسام تتألَّف من جُسيماتٍ وذرَّات وجُزيئات، والعامل الرئيس الذي يفرق الأجسام الحية عن غير الحية، هو نوعية الجُزيئات وتعقيدها وتنظيمها الفريد. ومن ناحية الزمان، يحصُل التماسُك الكمومي (Coherence) الذي هو شرطُ تحقُّق الظواهر الكمومية في أوقاتٍ قصيرةٍ جدًّا، تُقاس بالفيمتوثانية (١ × ١٠$^{-١٥}$ ثانية) والبيكوثانية (١ × ١٠$^{-١٢}$ ثانية) أو النانوثانية (١ × ١٠$^{-٩}$ ثانية) عادة، نتيجة حصول فك التماسُك (Decoherence) الذي ينقل الفعل الكمومي إلى الحالة التقليدية التي نتلمَّسها. وفي الكائنات الحية تحصُل العديد من التفاعُلات والفعاليات الحيوية في فتراتٍ زمنيةٍ قصيرة جدًّا تُقاس بالفمتوثانية والبيكوثانية والنانوثانية، وبعضها بالميكروثانية (Maldonadoa & Gómez-Cruzb, 2014) والميلي ثانية؛ فعلى المستوى الأساسي، جميع الأشياء هي كمومية؛ لأنها كلها مبنيةٌ من حالات وقواعدَ كمومية تحكُم الذرات (Brookes, 2017). وهكذا فإن الماكنة الكيميائية التي تُسيِّر النُّظم البيولوجية، تتألَّف من تراكيبَ جُزيئيةٍ معقدة، وهي بأبعادٍ نانوية ودون النانوية. وبذلك ستخضع الماكنة الكيميائية للأحياء لقوانين ميكانيك الكم. ومن المعروف أن ميكانيك الكم يلعب دورًا مركزيًّا في الكيمياء (Lloyd, 2011). كما أن الطبيعة الاحتمالية للعمليات البيولوجية تتماشى مع الطبيعة الاحتمالية لمكوِّنات المنظومة الكمومية (Ozhigov, 2015).

من ناحيةٍ أخرى، لا تتبدَّى الظواهر الكمومية في التجارب الفيزيائية، إلا في ظروف خُلُو المكان من الجُسيمات والذَّرات والجُزيئات غير تلك التي قيد الدراسة، وفي درجاتِ حرارة منخفضةٍ جدًّا تقترب من الصفر المطلق (−٢٧٣م°) والعزل التام عن البيئة؛ تجنبًا للتشويش وحصول فكِّ التماسُك. وبذلك فإن الاعتقاد الذي كان سائدًا يستبعد حصول الظواهر الكمومية، أو أن يكون حصولها على نحوٍ عابرٍ في النظم البيولوجية لوجود اكتظاظٍ شديدٍ بأنواعٍ مختلفةٍ من الجُزيئات ودرجة الحرارة الفسلجية، التي تحصل فيها الفعاليات البيولوجية، والتي هي عاليةٌ جدًّا مقارنة بدرجات الحرارة المنخفضة التي تتطلَّبها الحالة الكمومية في التجارب الفيزيائية المذكورة آنفًا. مع ذلك أظهرَت الأبحاث والدراسات الحديثة تجلي ظواهر ميكانيك الكَم على نحوٍ مؤثِّر (غير عابر) في عددٍ مهمٍّ من الفعاليات الحيوية؛ كالتركيب الضوئي، وهجرة الطيور المهاجرة، وحاسَّة الشم في الحيوان والإنسان، وآلية عمل الإنزيمات والقنوات الأيونية في أغشية الخلايا والطفرات، وغيرها، والحاجة إليها في تفسير نشوء الحياة. وحسب Ogryzko (2009) فإن أي شيء بغَض النظر عن كونه كبيرًا أو صغيرًا، يمكن أن يكون له بعض الصفات التقليدية (يخضع لقوانين الفيزياء التقليدية) وكذلك بعض الصفات الكمومية، فمثلًا الإلكترون كشيءٍ كموميٍّ كما هو معروف، مع ذلك فله صفاتٌ تقليديةٌ كالكتلة والشحنة مثلًا. ويؤكد زوريك، وهو الباحث الرئيس في موضوع فك التماسُك، على أن الحالة التقليدية (وهي الأشياءُ أو الظواهرُ التي نشاهدها ونتعامل بها في الواقع اليومي) هي الحالة الكمومية (الأصلح) التي تم انتخابها، وأصبحَت حقيقةً موضوعيةً من خلال الدارونية الكمومية (Zurek, 2002; 2003; 2009).

ويعتقد الباحثون، وهم مُحِقُّون من وجهة نظري، أن التطور من خلال الانتخاب الطبيعي ولعددٍ لا يُحصى من تجارب ومحاولات الصح والخطأ في عددٍ هائلٍ من أشكال الحياة، وبيئاتٍ غاية في التنوُّع على امتداد مليارات السنين، يُمكِن أن يكون قد حل مشكلة فكِّ التماسُك الكمومي؛ بحيث صارت الحالات الكمومية على المستوى المتوسِّط أو الكبير خواصَّ ضروريةً لبقاء الكائنات الحية. وكما سنرى في الفصول القادمة الأدوار الأساسية التي تلعبُها الجُسيمات تحت الذَّرية كالفوتونات والإلكترونات والبروتونات والذَّرات والجُزيئات وكذلك المجالات الكهرومغناطيسية في تركيب وعمل الخلايا وهي خاضعةٌ لقوانين ميكانيك الكَم؛ فمن الممكن أن تمتد إلى مكوِّنات الخلية من الإنزيمات والأحماض النووية والعُضَيَّات الخلَوية والتي هي نانوية الأبعاد أو تجمُّعات لتراكيبَ

نانوية. كما أن الكثير جدًّا من الفعاليات الحيوية داخل الخلايا تحصل بسرعةٍ فائقةٍ تُقاس بالفمتو والبيكو والنانوثانية؛ ما يجعل من الممكن أن تمتد الحالة الكمومية عَبْر الخلايا وإلى الأنسجة والأعضاء. وإن تحقُّق الظواهر الكمومية في العديد من الفعاليات الحيوية في الكائنات الحية، ربما يستند إلى القدرة التي طوَّرَتها الأحياء في التخلُّص من الضوضاء عَبْر ترشيحها (Hameroff *et al.*, 2014). كما سنرى أن ثمَّة ظواهرَ بيولوجيةً تُوظَّف فيها الضوضاء المتولِّدة عن اهتزاز الجُزيئات في خلق حالة التماسُك الكمومي.

وكما يرى Arndt *et al.*, (2009) فإن نسبةً مئويةً قليلة من التحسين في المنظومات الحية يمكن أن تعمل فرقًا في بقائها؛ لذلك يكون حصول الظواهر الكمومية مثل التماسُك والتشابُك في المنظومات الحية حتى وإن كان لفتراتٍ زمنيةٍ قصيرة جدًّا، ومناطق في المكان صغيرة جدًّا، يمكن أن يكون لها فوائد في بقاء الأحياء. كل المنظومات الحية تتألَّف من جُزيئات، وإن جميع الجُزيئات تُوصف بواسطة ميكانيك الكَم. لكن تقليديًّا، بسبب الفارق الكبير في المقاييس بين المنظومات التي تُوصف بميكانيك الكَم (نانومترات وما دون) والمنظومات البيولوجية، إضافةً إلى الخواص التي تبدو مختلفةً بين المواد غير الحية والمواد الحية، أبقت بعض الفصل بين النوعَين من المعرفة. مع نشوء وتطوُّر التقنيات المُختبَرية كالمطيافية الفائقة السرعة، ومطيافية الجُزيئة المُفرَدة والتصوير المِجهَري الموقوت، وتصوير الجُسيمة المُفردَة، مكَّنَت من دراسة الحركيات البيولوجية المتزايدة الصِّغَر مكانيًّا وزمانيًّا، كشَفَت عن عملياتٍ مختلفةٍ ضرورية لوظائف المنظومات البيولوجية، والتي تعتمد على التبادُل الحسَّاس بين التأثيرات الفيزيائية الكمومية والتقليدية؛ فبيولوجيا الكَم هي استخدام نظرية الكَم لجوانب في البيولوجيا تفشل الفيزياء التقليدية في وصفها على نحوٍ صحيح. من المؤكَّد أن جميع المنظومات الحية تتألف من جُزيئاتٍ وذرَّاتٍ وجُسيماتٍ تحت ذرية، وهذه هي ساحة ميكانيك الكَم. ومع تطوُّر تقنيات البحث صار بالإمكان دراسة الحركيات البيولوجية على مقاييسَ متزايدةٍ الصِّغَر مكانيًّا وزمانيًّا، واعتمادها على تبادُل الأدوار الحسَّاس بين التأثيرات الفيزيائية الكمومية والتقليدية. وهكذا ينحو البيولوجي الكمومي إلى استخدام نظرية الكم، لمعالجة جوانب البيولوجي التي لا تتمكَّن الفيزياء التقليدية من تفسيرها (Marais *et al.*, 2018).

وهكذا تعمَّقَت واتسعَت الحاجة إلى نشوء علم الحياة الكمومي لتقصِّي أهميته، وإمكانات حدوثه، وتفسير الظواهر البيولوجية التي لم تجد لها تفسيرًا بعدُ، باستخدام الكيمياء والفيزياء التقليدية.

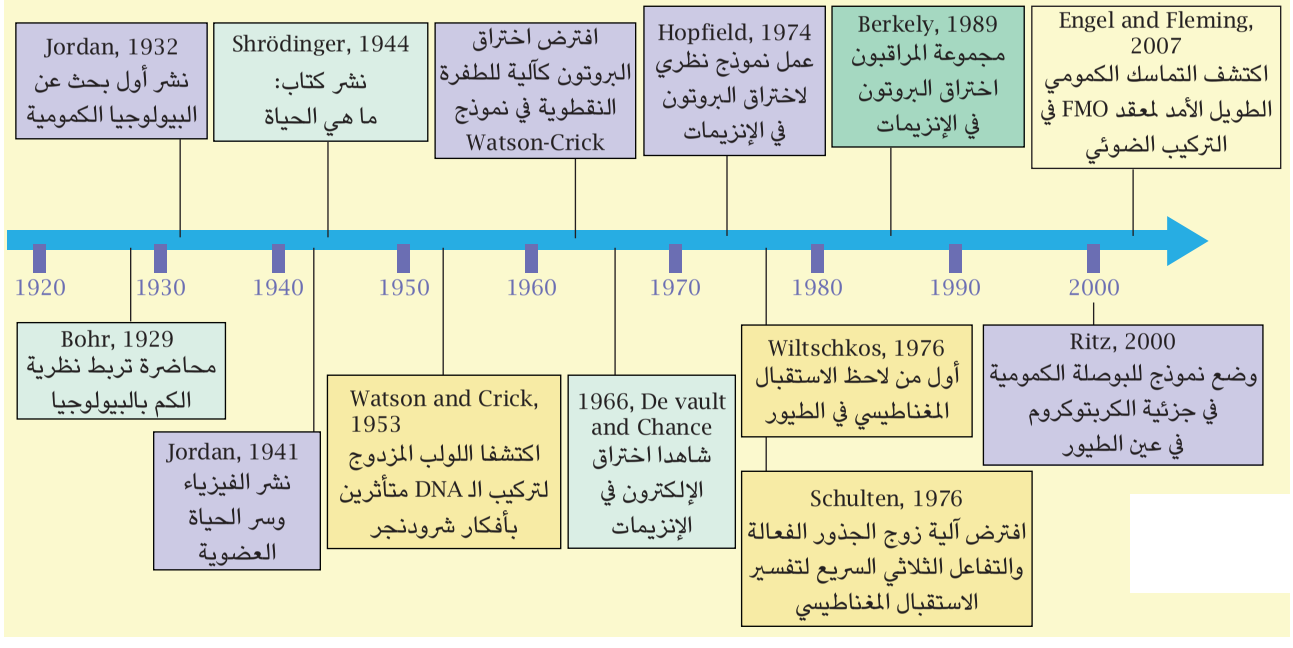
وحسَب Huelga & Plenio (2013) فإن بيولوجيا الكَم هو مجالٌ صاعدٌ من البحث يهتم بالكشف التطبيقي والنظري للظواهر الكمومية غير العابرة في المنظومات البيولوجية.

لقد توالى على نحوٍ متزايد، نشرُ الأبحاث وعقدُ المؤتمرات والمحاضرات، ونشرُ عددٍ من الكُتب حول البيولوجيا الكمومية مثل:

- Quantum evolution: Life in the Multiverse (McFadden, 2000).
- Human nature: fact and fiction (McFadden, 2006).
- Aspects of quantum biology (Abbott *et al.,* 2007).
- Life on the edge The coming of age of quantum biology (McFadden & Al-Khalili, 2014).
- Quantum effects in biology (Mohseni *et al.*, 2014).

في الشكل ٣-١، عرضٌ لأهم الأعمال التي ساهمَت في إرساءِ قواعدِ هذا العلم الصاعد. عالَج Huelga & Plenio (2013) موضوع بيولوجيا الكَم وثبَّتا الملاحظات التالية:

(١) النُّظُم البيولوجية هي منظوماتٌ مفتوحة، يتوجَّب أن تُرفَد بالطاقة باستمرار للمحافظة على حالة اللاتوازن التي هي ضرورية للحياة. غير أن المنظومات المفتوحة ومنها المنظومة البيولوجية تكون حارةً ورطبةً وضوضائية (لاكتظاظها بالجُزيئات المختلفة) وبالتالي ستكون معرَّضةً للتقلُّبات البيئية، والتي تؤدي إلى فك التماسُك الكمومي سريعًا وتثبيط الظواهر الكمومية. وهكذا يبدو للوهلة الأُولى عدم إمكانية عمل الظواهر الكمومية في البيولوجيا. غير أن ثمَّة دلائل تشير إلى عكس ذلك؛ فالتراكيب البيولوجية الفعَّالة كالبروتينات والأحماض النووية وعلى المستوى الجُزيئي عمومًا، تحصُل التفاعلات والفعاليات البيولوجية بسرعةٍ فائقةٍ تُقاس بالبيكوثانية والفمتوثانية، وفي أبعادٍ نانوية؛ وبالتالي يمكن أن تحصُل معها الظواهر الكمومية قبل أن تتمكَّن البيئة من تحطيمها. وحسَب المعلومات الكمومية، فإن الضوضاء في المنظومات التي هي ليست في حالة التوازُن يمكن أن تدعم التماسُك والتشابُك الكمومي. وهكذا فإن الحركيات الكمومية ستتعزَّز من خلال تبادُل التأثير مع البيئة بما يُشجِّعها أو يُولِّدها. والمسألة الواجب التحقُّق منها ما إذا كانت الطبيعة قد وظَّفَت الظواهر الكمومية كآلياتٍ غيرِ عابرة، وعملُها لا يمكن تفاديه، وهي ليست مجرَّد ناتجٍ ثانويٍّ عن عمل الظواهر الكمومية على مستوى الأواصر الكيميائية.



شكل ٣-١: خطُّ الزمن للمعالم المفتاحية في تطوُّر البيولوجيا الكمومية خلال القرن العشرين وبداية القرن الحادي والعشرين مُحوَّر عن McFadden & Al-Khalili (2018). الأشكال الرباعية تشير إلى المراجع التالية: 1929 (Kalckar, 2013); 1932 (Jordan, 1932); 1941 (Jordan, 1941); 1944 (Schrödinger, 1944); 1953 (Watson & Crick, 1953); 1963 (Löwdin, 1963); 1966 (DeVault & Chance, 1966); 1974 (Hopfield, 1974); 1976 (Hopfield, 1974; Emlen *et al.*, 1976; Schulten *et al.*, 1976; Schulten & Weller, 1978); 1989 (Cha *et al.*, 1989); 2000 (Ritz *et al.*, 2000); 2007 (Engel *et al.*, 2007).

(٢) البيولوجي والحركية والنقل. من المؤكَّد أن المنظومات البيولوجية تراكيبُ حركيةٌ تتطلب التزوُّد بالطاقة والتخلُّص من الإنتروبي، للحفاظ على حالة اللاتوازن المطلوبة. هذا يستدعي عمليات نقلٍ بضمنها نقل طاقة التهييج والجُسيمات.

(٣) الخواصُّ الكمومية والفوائد. تتميَّز الظواهر الكمومية بالعديد من الخواص التي تميِّزها عن الظواهر الفيزيائية التقليدية، والتي يمكن أن تُحسِّن من الوظائف البيولوجية. تشمل هذه ظاهرتَي التماسُك الكمومي والتداخُل، التي تُفرِزها الخاصية الموجية للجُسيمات تحت الذرية والتي تُسرِّع العمليات. كما تُوفِّر حالة التشابُك الكمومي حساسيةً أكثر للإشارات الخارجية. كما تُوفِّر حالة التجزُّؤ أو كمومية الطاقة من حصول تردُّداتٍ اهتزازيةٍ تُمكِّن من بناء أدواتِ تحسُّس.

(٤) منظوماتٌ كموميةٌ مفتوحة. المنظومات البيولوجية منظوماتٌ مفتوحةٌ على اتصال مع البيئة، في الوقت الذي تكون التقلُّبات الحرارية للبيئة نافعةً لتسيير التفاعُلات الكيميائية وتشكل (انثناءات) البروتينات، فإن فوائد اتصال المنظومات البيولوجية والبيئة تكون أقل وضوحًا في العالم الكمومي؛ حيث ستبرزُ حالات فك التماسُك. ولكن وُجد أن التآثُر بين المنظومة البيولوجية والبيئة يمكن أن يُوجِد حالاتٍ كموميةً كالتماسُك والتشابُك، كما توضح في التركيب الضوئي. معرفة آليات حصول مثل هذه الخواصِّ الكمومية في عمليات النقل والعمل الإشاري والتحسُّس سيكون ذا فائدةٍ كبيرة.

(٥) البيئة مركَّبة التأثير. البيئة ليست سلبية في التأثير على المنظومات البيولوجية؛ فالبيئة تُظهِر نوعَين رئيسَين من التأثيرات على المنظومة البيولوجية؛ خلفية ناعمة عريضة ذات ذاكرةٍ قصيرةٍ وتتآثَر مع المنظومة البيولوجية من خلال تقلُّباتها، مسببةً ضوضاء وحالاتٍ محدَّدةً تشبه حركةً اهتزازيةً طويلة المدى، يمكن أن تقود إلى تبادُلٍ حركيٍّ غير متوازن شِبه متماسِكٍ بين المنظومة والبيئة. هذه الخلفية الناعمة تعود في الغالب إلى بيئة البروتين وعمليات الضوضاء الناشئة عن المذيبات، بينما المظاهر الحادة يمكن أن تتسبَّب من اهتزاز الجُزيئات الموجودة في سقالاتِ البروتين. هذه الخواص تختلف عن البيئة التي تُدرس عادةً في التقنيات الكمومية، وتكشف عن تأثيراتٍ غيرِ عابرة، والتي اكتُشفَت من قِبل الطبيعة وتتطلَّب دراسةً جدِّية.

(٦) حالة اللاتوازن والتأثير العكسي. العديد من العمليات المهمة لبيولوجيا الكَم تُحفَّز بالتكوين المفاجئ لإثارةٍ أوليةٍ كمثل الطاقة الكمومية، التي يتوجَّب نقلُها والتي تُبعِد المنظومة عن حالة التوازن. ونتيجةً لهذه الإثارة المفاجئة لا المنظومة ولا البيئة ستبقيان

ثابتتَين. حركياتُ اللاتوازن هذه ستؤدِّي إلى اضطراباتٍ بيئيةٍ مصدرها المنظومة، وتأثيرٍ عكسيٍّ من البيئة ذاتها على المنظومة، وبذلك يحصُل تبادُلٌ حركيٌّ بين المنظومة والبيئة. وإذا كانت الاضطرابات البيئية تخُص الخلفية الناعمة العريضة فسترجع بصورةٍ سريعةٍ جدًّا إلى حالة التوازن بسبب ذاكرتها القصيرة. أما إذا أُثيرَت حالةٌ حادةٌ مرتبطة بنمط اهتزازاتٍ طويلةِ الأمد، فستؤدي إلى حركةٍ شبهِ متماسكةٍ طويلةِ الأمد للبيئة، مع احتمال قدْحِ تبادُلٍ شِبهِ مُتماسكٍ مع المنظومة. هذا وغيره من تبادُل اللاتوازن بين المنظومة والبيئة، يمكن أن يكون له تأثيراتٌ مهمةٌ على حركيات المنظومة واتجاه نقل الطاقة، كما يمكن أن يؤدي إلى حصولِ تماسُكٍ كموميٍّ طويل الأمد في المنظومة.

(١-١) ميكانيك نيوتن والديناميكا الحرارية وميكانيك الكَم

Newton Mechanics, Theromodynamics and Quantum Mechanics

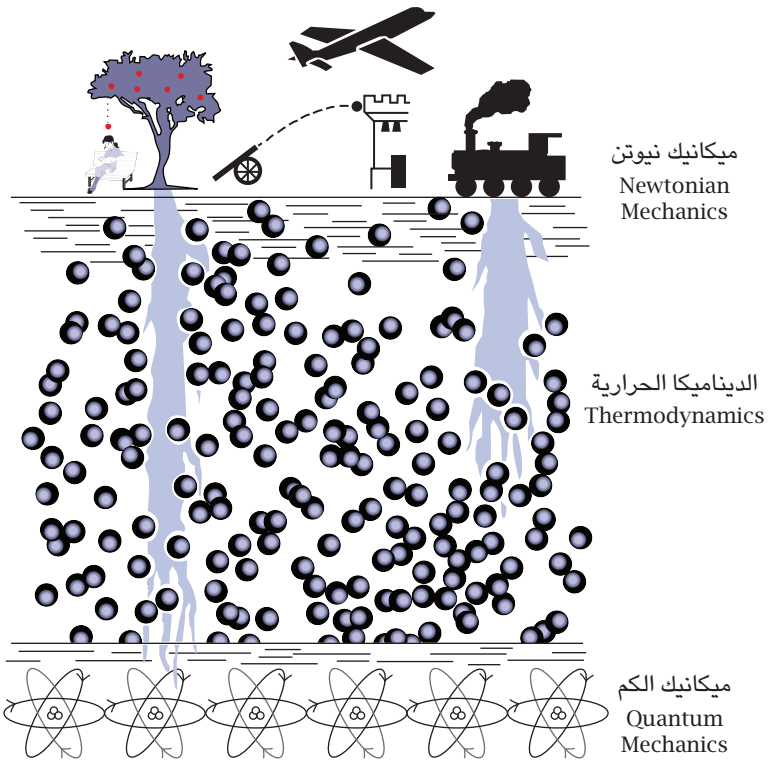
يطرح McFadden & Al-Khalili (2014) مبدأ تراتُب الحقيقة الفيزيائية على ثلاثة مستويات؛ المستوى الأول والأعلى هو العالم الكبير؛ حيث تكون الأجسام المختلفة التي نتعامل معها يوميًّا، حية أو غير حية، كالنمل أو الصخرة أو الشجرة أو القمر، وتتضمَّن المستويَين الأدنى وهذه تخضع لقوانين نيوتن في الحركة؛ فالحركات الانتقالية والموضعية للكائنات الحية وجريان السوائل في أوعية الحيوانات والنباتات والقوى التي تنشأ عن ضغط الامتلاء في الخلايا، التي تُمكِّن بادراتِ النباتِ من اختراق التربة السطحية هي بعض الأمثلة لفعل الميكانيك التقليدي.

المستوى الثاني الذي ينشأ عن الحركة العشوائية للجُزيئات، كما في الغازات والسوائل، وتتميَّز بنشوء النظام من الفوضى، وتخضَع لقوانين الديناميكا الحرارية؛ فالتفاعُلات الكيميائية والحركة البراونية والانتشار والأزموزية وفقدان الحرارة هي بعض وجوه فعل الديناميكا الحرارية في الأحياء.

المستوى الثالث والأساس الذي يتألَّف من الجُزيئات والذَّرات والجُسيمات تحت الذرية وتخضع لقوانين ميكانيك الكَم (شكل ٣-٢). هذا المستوى يتصف بتجلِّي الإمكانات غير المعتادة في العالم الكبير؛ كازدواجية المادة الجُسيم، التماسُك والتراكُب والاختراق والتشابُك.

كما موضَّح في الشكل ٣-٢ فإن معظم مكوِّنات العالم الكبير يقتصر إطارها على الطبقة السطحية للحقيقة الفيزيائية؛ فهذه الأجسام تحتوي في داخلها على أعدادٍ هائلةٍ

من الجُزيئات التي تشوِّش دوالَّ الموجة للجُزيئات والذَّرات، وتؤدِّي إلى انهيارها وتحقق حالة فك التماسُك الكمومي وظهور الحقيقة التقليدية.



شكل ٣-٢: الطبقات الثلاثة للحقيقة؛ الطبقة العليا هي العالم المرئي المليء بالأشياء كالتفَّاحات الساقطة، وقذائف المدفع والقطارات البخارية والطائرات حيث تُوصف حركتُها بميكانيك نيوتن. الطبقة التالية (الوسطية) طبقة الديناميكا الحرارية حيث الجُزيئات المتصادمة كتصادُم كُرات البلياردو التي حركتُها تكون عشوائية في الغالب. هذا المستوى يكون مسئولًا عن نشوء «النظام من الفوضى»، القوانين التي تحكُم سلوك الأشياء كالمكائن البخارية. الطبقة الثالثة التحتية طبقة الجُسيمات الأساسية التي تُحكَم بقوانين ميكانيك الكَم. ويبدو أن معظم التراكيب التي نراها حولنا تمتد إلى الطبقة التي تحكُمها قوانين نيوتن أو الديناميكا الحرارية، لكن الكائنات الحية تمتد جُذورُها إلى طبقة ميكانيك الكَم التي هي أساس الحقيقة. مُحوَّر عن: McFadden & Al-Khalili (2014).

بعض نُظُم العالم الكبير تمتد إلى الطبقة الثانية؛ حيث تعمل قوانين الديناميكا الحرارية، ويمكن أن تنتج ظواهر تعتمد على نشوء النظام من خلال الحركة الفوضوية للجُزيئات الهائلة العدد. كمثال عمل المحرِّكات البخارية والغازية، والتفاعُلات الكيميائية المعتمدة على الحرارة، والتبخُّر وظاهرة الانتشار. أما الكائنات الحية فتمتد عبر الطبقات الثلاث؛ فهي تخضع في عددٍ من خواصِّها للميكانيكا التقليدية، ولاحتوائها أو تعامُلها مع السوائل والغازات تُظهِر تأثيرات الديناميكا الحرارية، كما توظِّف الظواهر الكمومية في عددٍ من الفعاليات البيولوجية الأساسية، التي سترد تفاصيلها في الفصول القادمة.

ترجع قدرة الأحياء على استثمار الخواص الكمومية إلى التركيب الجُزيئي المنظَّم تنظيمًا خاصًّا، وإلى كونه يشكِّل منظوماتٍ معقدةً مفتوحة بعيدة عن حالة التوازن مع البيئة، وإلى طبيعته التي تقع على حافة الشواش بين النظام والفوضى، وإلا يفترض أن يكون كما الأشياء غير الحية حيث تقتصر فعالياته على ظواهر الميكانيكا التقليدية والديناميكا الحرارية؛ فمعظم الكائنات الحية لها أجسامٌ كبيرةٌ بما فيها البكتيريا. هذه الخواص البيولوجية الفريدة وفَّرَتها بالأساس الجُزيئات العضوية الكبيرة خاصة البروتينات والأحماض النووية والصبغات؛ فكما هو معروف أن محيط الكائن الحي يعجُّ بالجُزيئات والجُسيمات التي تصطدم بالكائن الحي وتُصدِر ضوضاء واهتزازات، يمكن أن تشوِّش أية حالة تماسُكٍ كموميٍّ قد تحصل بسرعة، من خلال فك التماسُك. لكن التركيب الخاص للبروتينات جعلَها تُحافِظ على الموجات والاهتزازات الكمومية الداخلية، لا بل تستثمر ضوضاء البيئة في إيجاد وتعزيز الحالات الكمومية. يمكن تشبيه المسألة بإبحار سفينة في أمواجٍ متلاطمة. يُمكِن لهذه الأمواج والرياح التي تضرب السفينة من كل جانب، أن تَحرِف السفينة عن مسارها أو تقلبها، لكن الربَّان ومن معه بتوجيه الأشرعة يمكن أن يُحافِظ على خط سيرها، بل يزيد من سرعتها باستغلال قوة الرياح (ضوضاء البيئة). لكن لو تخطَّت الضوضاء حدًّا حرجًا معينًا، لن يتمكن القبطان من السيطرة على توازُن السفينة، فتَتيه أو تنقلب (فك التماسُك الكمومي)؛ وعليه لا بد من المواءمة بين حركة السفينة وضوضاء المحيط من أجل الإبحار الناجح. كما تُشبِه الحالةُ العزفَ الموسيقي الأركسترالي؛ فغالبًا ما يتم عزفٌ جماعي لآلاتٍ إيقاعيةٍ ووتَريةٍ تُوفِّر خلفية (ضوضاء بيضاء/خفيفة) لعزف آلة الكمان أو الفلوت المنفردة (ضوضاء ملونة/قوية). لقد طوَّرَت الأحياء على مدى ملايين السنين قُدرتَها على استغلالِ تقلُّبات البيئة والفوضى التي تُحدِثها من أجل المحافظة على التماسُك الكمومي، في حالاتٍ أساسيةٍ

كالتركيب الضوئي؛ فقد ابتُكرَت طرقٌ لتقليل الطاقة الزائدة للفوتونات من خلال تبديدها بشكل اهتزازاتٍ تنتقل من خلال الجُزيئات المتجاورة في منظومة التركيب الضوئي. في الوقت نفسه طُوِّرَت التراكيب المسئولة عن التركيب الضوئي، لتحافظ على الحالة الكمومية للفوتونات، وتستغل طاقتها بنسبة تصل إلى ١٠٠٪. هناك أبحاث تؤكِّد أن العمليات الكمومية أساسيةٌ للحياة (Miller Jr., 2016; Aerts *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2007).

وهكذا فالمنظومة البيولوجية وهي منظومةٌ معقَّدةٌ مفتوحة، ليست بحالة توازن مع البيئة وإنما تكون على حافة فوضى الديناميكا الحرارية، ونظام العالم الكمومي؛ فبعضُ مظاهر الحياة محكومةٌ بقوانين نيوتن والديناميكا الحرارية، وبعضُها معتمد على الظواهر الكمومية. وبذلك فالحياة ظاهرة لمنظومةٍ حسَّاسة ومعرَّضة للتغيُّر أو التدهوُر أو الموت بين التحلُّل الذي يفرضُه الإنتروبي والجمود الذي ينتهي إليه النظام التام.

وحسب Bordonado & Ogryzko (2013) فإن معظم البيولوجيين يعُدُّون التأثيرات المنافية للبديهة لميكانيك الكَم غير مناسبة للدراسات البيولوجية. وهذا حسَب الباحثين راجعٌ إلى سيادة المفاهيم التقليدية وعدم بحث الموضوع في الخلايا الحية المُفرَدة. أما في الوقت الحاضر فإن مثل هذه الدراسات صارت ممكنة بتوافُر تقنيات البحث المتطوِّرة، وصار من المطلوب تشخيص الحاجة لدراسة البيولوجيا الكمومية على المستوى الخلَوي وتقييم آثارها المبهرة، التي تُوفِّرها لعلوم الحياة. كما أن الأمر يتعدى البيولوجيا إلى العلوم الأخرى؛ حيث إن المنظومات الحية تُوفِّر تنظيماتٍ متعددةَ المستويات التعقيدية، وكذلك تعقيد علاقاتها مع البيئة؛ وبالتالي فإن دراسة ظاهرة الحياة يمكن أن تُوفِّر إطارًا تجريبيًّا ونظريًّا لظاهرة فك التماسك، ومسألة الانتقال من الحالة الكمومية إلى الحالة التقليدية. وبذلك فمن المتوقَّع أن يكون للتقدُّم في مجال البيولوجيا الكمومية على المستوى الخلَوي، آثارٌ إيجابيةٌ في الفيزياء أيضًا.

الفصل الرابع

أساسيات علم الحياة

Basics of Biology

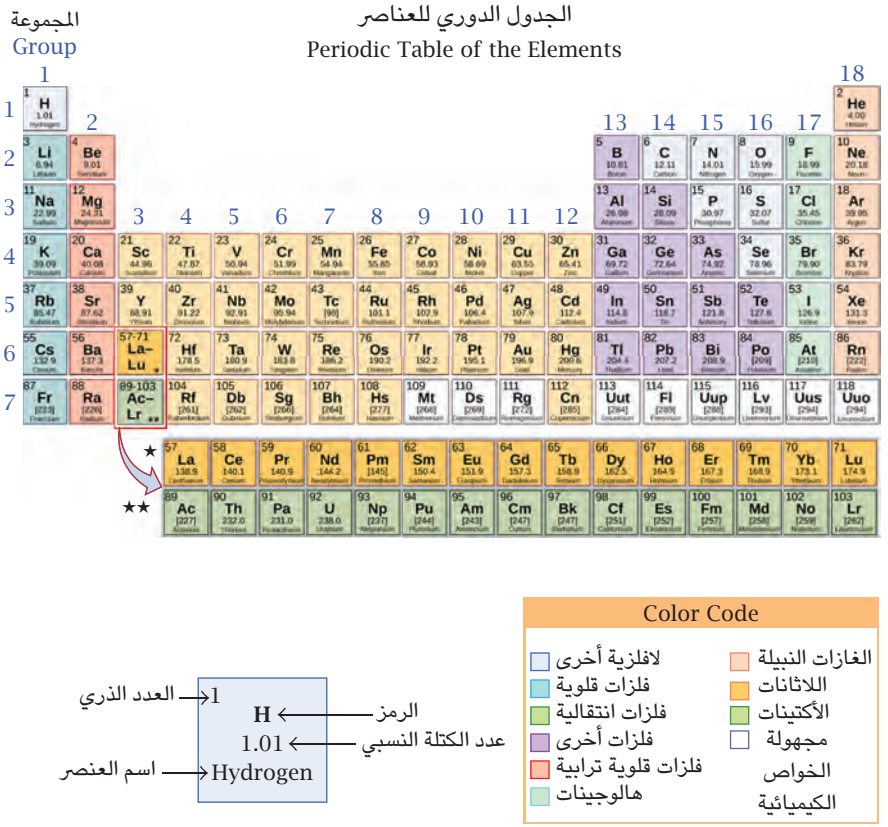
هذا الفصل يهدف إلى تنشيط الذاكرة بمواضيع البيولوجيا لغير المتخصِّصين، ويُسهِّل فَهْم ما سيَرِد في الفصول القادمة حيث تدور الأحداث والظواهر البيولوجية بواسطة قوًى وجُزيئاتٍ وتراكيبَ تتطلب وجود معرفةٍ وتصوُّرٍ لطبيعتها. من المؤكَّد أن هذا الفصل لا يرمي إلى تقديم عرضٍ تفصيليٍّ شامل يغطِّي مواضيع البيولوجيا، وإنما بأقل ما يمكن، لتسهيل فهم موضوع الكتاب.

(١) المادة Matter

يتألف الكون المرئي من مادة وطاقة. المادة هي حالةٌ مكثَّفة من الطاقة تمتلك كتلةً وتشغل حيِّزًا في الفضاء. وكل كتلةٍ تترافَق مع تردُّدٍ مُناسبٍ لمجال الطاقة. وكتلة أي جُسَيم هي نغمة (تردُّد) لنمط الاهتزاز هذا (Wilczek, 2005). تتألف المادة من عنصرٍ أو عناصرَ ذاتِ خواصَّ فيزيائيةٍ وكيميائية متفرِّدة. كل الذي نشهده في الكون من مليارات الأشياء كالنجوم والكواكب وما حولنا من صخور ومياه وهواء ونباتات وحيوانات، يتألَّف من مواد. هذه المواد تتألَّف من ملايين الجُزيئات، وكل هذا التنوُّع الهائل من الجُزيئات.

تتألف المادة من جُسيماتٍ تحت ذرية، وذرات عناصر، ومركباتٍ لعناصرَ متفاعلةٍ بشكل جُزيئاتٍ مختلفةِ التعقيد.

(١-١) أنواع العناصر في الطبيعة Types of Elements In Nature



شكل ٤-١: الجدول الدوري.

يُوجد في الطبيعة ٩٢ عنصرًا. تتشابه العناصر في كونها تتألَّف من ذرات. وهذه الذرات بدورها تتألَّف من الجُسيمات الذرية (البروتونات والنيوترونات والإلكترونات) ذاتها. وتختلف فيما بينها في عدد البروتونات وعدد وترتيب الإلكترونات. تشترك بعض العناصر في الخواصِّ الفيزيائية أو الكيميائية فثمَّة عناصرُ تكون غازية أو سائلة أو صلبة في درجة حرارة الغرفة. بعض العناصر تكون فعَّالة وأخرى خاملة كيميائيًّا. يُظهِر الجدول الدوري (شكل ٤-١) الذي وضعه مندليف سنة ١٨٦٩م، العناصر مرتَّبة

في أعمدةٍ وصفوفٍ حسَب العدَد الذري، وبشكل مجاميعَ تشترك في بعض الخواص الكيميائية العامة.

من بين هذا العدد ثمَّة ١١ عنصرًا تدخُل في تركيب الكائنات الحية. في الإنسان تُوجد هذه العناصر بالنسب التالية: الأوكسجين ٦٥٪، الكاربون ١٨,٥٪، الهيدروجين ٩,٥٪، النتروجين ٣,٣٪، الكالسيوم ١,٥٪، الفسفور ١٪، البوتاسيوم ٠,٤٪، الكبريت ٠,٣٪، الصوديوم ٠,٢٪، الكلور ٠,٢٪، المغنسيوم ٠,١٪.

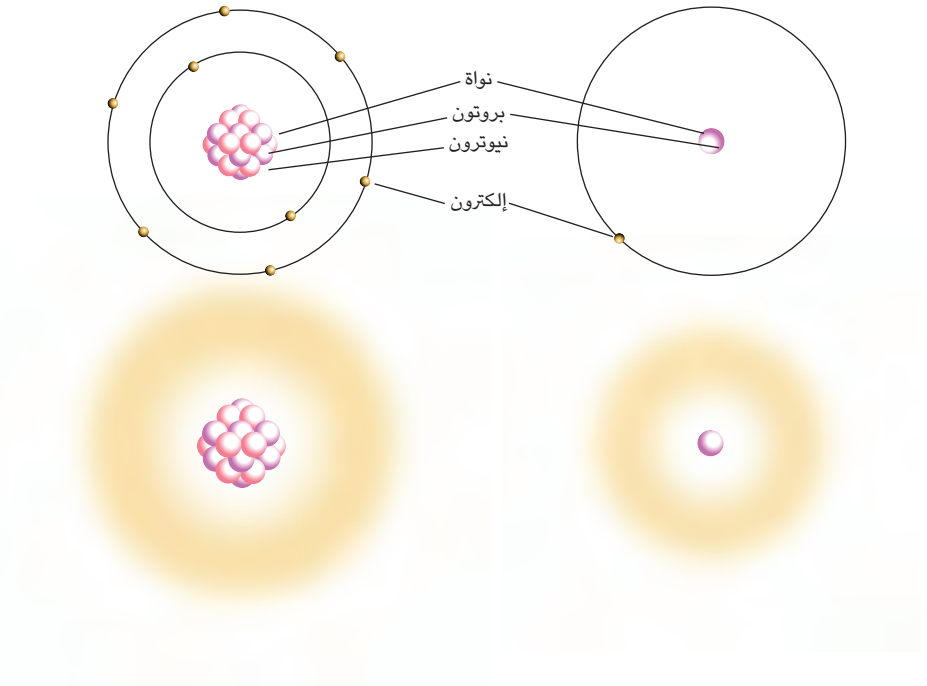
هذا إضافةً إلى ١٥ عنصرًا تُوجد بمقادير ضئيلة؛ مثل الحديد والمنغنيز والنحاس والزنك. المُلاحَظ أن العناصر التي تدخُل في تركيب الكائنات الحية موجودة بالطبع في المواد غير الحية أيضًا، كما أن نِسَبها في الكائنات الحية لا ترتبط بنِسَبها في البيئة. ثمَّة ٤ عناصر هي الأوكسجين والكاربون والهيدروجين والنتروجين تُشكِّل أكثر من ٩٦٪ من وزن الإنسان.

(١-٢) الذَّرات والجُزيئات Atoms and Molecules

الوحدة التركيبية لأي عنصر هي الذرة. الذرة هي أصغر منظومة للعنصر وتحتفظُ بخواصه. تتكون الذَّرة من نواةٍ ثقيلةٍ في المركز يدور حولها إلكترونٌ واحدٌ أو أكثر في مداراتٍ محددةٍ بعيدة عن النواة. النواة تتألَّف من بروتونٍ واحدٍ كما في عنصر الهيدروجين أو بروتونات ونيوترونات في بقية العناصر الكيميائية. الإلكترونات تدور حول النواة بعيدًا عنها مُشكِّلةً غيمةً تحتل معظم فضاء الذرة، الذي يزيد عن قُطر النواة ١٠٠٠٠٠ مرة، كتقريبٍ مثل نسبة حبة البازلاء إلى ساحة سباق الخيل.

البروتون والنيوترون متساويان تقريبًا في الكتلة التي تساوي ١,٦٧ × ١٠$^{-٢٤}$غم، واصطَلح العلماء على اعتبارها وحدة الكتلة الذرية أو ١ دالتون. البروتون يحمل شحنةً موجبة، بينما يكون النيوترون متعادلًا لا يحمل شحنة.

الإلكترون ذو كتلةٍ صغيرةٍ جدًّا تساوي ٩,١١ × ١٠$^{-٢٨}$غم أو ١ / ١٨٤٠ دالتون، ويحمل شحنةً كهربائيةً سالبة. وهكذا ستكون كتلة الذرة أو ما يُعرف بعدد الكتلة مساويًا لمجموع كُتل أو عدد البروتونات والنيوترونات. وهذه البروتونات والنيوترونات قابلةٌ للتحوُّل أحدهما إلى الآخر عند اختلال عددهما؛ فعدد الكتلة لذرة الهيدروجين التي تتألف نواتها من بروتونٍ واحدٍ سيكون ١، بينما عدد الكتلة لذرة الهليوم التي نواتها



شكل ٤-٢: رسمٌ تخطيطيٌّ تقليدي لذرة الهيدروجين (أعلى يمين) وذرة الأوكسجين (أعلى يسار) ورسمٌ تخطيطيٌّ للذَّرتَين أقرب للحقيقة حيث تظهر السحابة الإلكترونية (أسفل يمين وأسفل يسار).

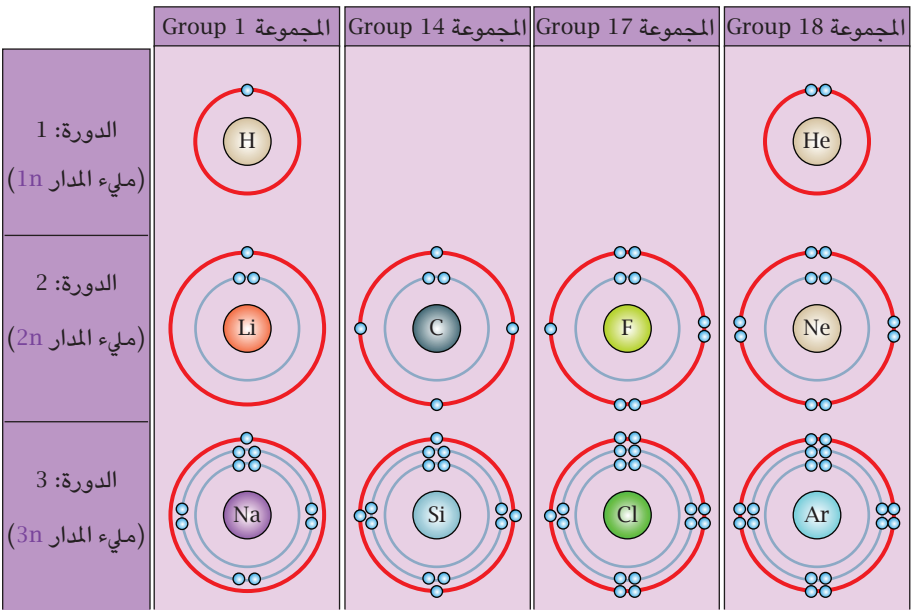
تتألف من ٢ بروتون و٢ نيوترون سيكون ٤ وهكذا. إن التنافُر الموجود بين البروتونات بسبب تماثل شحناتها الموجبة يحول دون اندماجها. لكن بسبب اصطدامها المباشر الناتج عن سرعتها الفائقة في قلب النجم وبسبب وجود النيوترونات التي تُساعِد على التصاقها تتشكل نواة الذرة. عدد الكتلة يؤثِّر في الخواص الفيزيائية للعنصر.

في الذَّرة عدد البروتونات يكون مساويًا لعدد الإلكترونات ويُعرف بالعدد الذري. وبذلك ستكون النواة ذات شحنةٍ موجبة، بينما الذرة ككل تكون غير مشحونة (متعادلة)؛ لوجود عدد من الإلكترونات مساويًا لعدد البروتونات. العدد الذري سيُحدِّد الخواص الكيميائية للعنصر من خلال فقدان أو اكتساب إلكتروناتٍ أو الاشتراك بها مع ذراتٍ أخرى فيما يُعرف بالتفاعُل الكيميائي.

تدور الإلكترونات في مداراتٍ محدَّدةٍ حول النواة حسب طاقتها وعددها. المدار الأقرب للنواة هو الأقل طاقة. بينما تزداد طاقة المدارات كلما ابتعدَت عن النواة؛ حيث يكون المدار الخارجي هو الأكثر طاقة. تحت الظروف القياسية يتم إشغال المدار الأقرب للنواة أولًا، والذي يتسع إلى ٢ إلكترون، بينما يتسع المدار الثاني إلى ٨ إلكترونات، والمدار الثالث إلى ١٨ إلكترونًا، ويبقى المدار الخارجي للذرة الذي يحدِّد تكافؤ العنصر متغير عدد الإلكترونات بما لا يزيد عن سَعة المدار (شكل ٤-٢). يمكن أن ينتقل الإلكترون من مداره إلى المدار الأكثر طاقة.

إذا حصل على طاقة فوتون، ويمكن أن يعود إلى المدار الأقل طاقة إذا فقد الطاقة مُحرِّرًا فوتونًا. وتميل الذرة إلى الحالة الأكثر استقرارًا لمداراتها الخارجية، عن طريق فقدان أو اكتساب الإلكترونات أيهما أيسر طاقيًّا. في حالة الذرات التي تكون مداراتها الخارجية غيرَ مُشبَعة (عدد الإلكترونات أقل من سعة المدار) فإنها ستفقد أو تكتسب إلكترونًا واحدًا أو أكثر، وتتحول إلى أيون وهو ذرةٌ مشحونة؛ فذرة عنصر الصوديوم مثلًا وعددها الذري ١١ يحتوي مدارها الخارجي على إلكترون واحد. فقدان هذا الإلكترون أيسر طاقيًّا من اكتساب ٧ إلكترونات لإشباع المدار؛ وعليه فإنها تفقد الإلكترون وتتحول إلى أيونٍ موجَب (Cation). أما ذرة الكلور أو الفلور ذات العدد الذري ١٧ و٩ على التوالي، فمدارها الخارجي يحتوي على ٧ إلكترونات. وهكذا فإن اكتساب إلكترونٍ واحدٍ لإشباع المدار أيسر طاقيًّا من فقدان ٧ إلكترونات للوصول إلى حالة الاستقرار الطاقي. وهكذا ستتحوَّل ذرة الفلور أو الكلور إلى أيونٍ سالبٍ (Anion). وفي الشكل ٤-٣ تنحو ذرة الهيدروجين أو الليثيوم إلى إشباع المدار الخارجي لها باكتساب إلكترونٍ عن طريق المشاركة به مع ذرةٍ أخرى وتكوين آصرةٍ تساهمية، أو فقدان الإلكترون وتكوين أيونٍ موجبٍ (بروتون). كذلك في المجموعة ١٤ من الجدول الدوري، لذرة الكاربون والسيليكون ٤ إلكترونات في مدراتها الخارجية، ويمكنها اكتساب أو المشاركة بإلكترونات مع ذراتٍ أخرى لتكوين جُزيئات. وهكذا تُعتبَر مثل هذه العناصر نشطةً كيميائيًّا يمكِّنها من التفاعُل مع الذرات أو الجُزيئات الأخرى. في حينَ أن ذرات الهيليوم والنيون والأركون في المجموعة ١٨ ذات مداراتٍ خارجيةٍ مشبعة؛ وبالتالي فهي ليست بحاجة إلى فقدان أو اكتساب إلكترونات، وبذا تكون عناصرَ غيرَ نشطة كيميائيًّا.

(أ) النظائر Isotopes



شكل ٤-٣: توزَّع الإلكترونات لعناصرَ تعود إلى ٤ مجاميعَ من الجدول الدوري حسب مخطَّطات بور.

عادةً يكون عدد البروتونات مساويًا لعدد النيوترونات في نواة ذرة العنصر. لكن يمكن أن يُوجد العنصر في الطبيعة بنفس العدَد الذري (نفس عدد البروتونات والإلكترونات) ولكن بعدد كتلةٍ مختلف، بسبب وجود نيوتروناتٍ تزيد عن عدد البروتونات في النواة. مثل هذه العناصر التي تزيد فيها عدَد النيوترونات عن عدد البروتونات مع بقاء العدد الذري نفسه، تُسمَّى بالنظائر. كمثالٍ عنصر الكاربون C يُوجد في الطبيعة بثلاثة نظائر؛ C-12 حيث يكون عدد النيوترونات مساويًا لعدد البروتونات = ٦. يُشكِّل هذا النظير ٩٩٪ من الكاربون في الطبيعة. النظير C-13 يحتوي على ٧ نيوترونات، والنظير الأكثر ندرةً هو C-14 يحتوي على ٨ نيوترونات. بعض النظائر مثل C-14 تنحو إلى التحلُّل باتجاه تكوين نظيرٍ ذي عددِ كتلةٍ أقل. في هذه الحالة ستترافق العملية بإطلاق كمياتٍ من الطاقة بهيئة إشعاعٍ، ومثل هذه النظائر تُسمَّى بالنظائر المشعة. إن معدَّل التحلُّل لكل

عنصر يكون ثابتًا، وعادةً يقدَّر بعمره النصفي. تُستخدَم النظائر المشعة في تقدير عمر المواد المتواجدة فيها، وفي علاج الأورام بقتل الخلايا السرطانية كما أن لها استخداماتٍ في التجارب البيولوجية لمتابعة دَور أو أثَر عنصرٍ أو مركَّبٍ معيَّنٍ عن طريق استخدام ذرة عنصرٍ مشعٍّ في المركَّب تحت الدراسة والكشف عنه.

(٢) الطاقة Energy

الطاقة هي القدرة على إنجاز شغل، ووحدة قياسها هي الجول، ويُساوي الطاقةَ اللازمةَ لتحريك جسمٍ مسافة ١م بقوة ١ نيوتن. والطاقة كميةٌ محفوظة؛ فحسَب قانون الديناميكا الحرارية الأول فإن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث. وإنما يُمكِن أن تتحوَّل من شكلٍ إلى آخر.

ثمَّة شكلان أساسيان للطاقة هما الطاقة الحركية الملازمة للأجسام المتحركة، والطاقة الكامنة التي تكون مخزونةً في موقع مجال القوة كقوة الجاذبية أو القوة الكهربائية أو المغناطيسية، أو قوة المرونة التي تتبدَّى في مَط للأجسام الصلبة، أو الطاقة الكيميائية المخزونة في الأواصر التي تربط الذَّرات في الجُزيئات. وكما أشرنا سابقًا فإن المادة والطاقة قابلتان للتحوُّل إحداهما إلى الأخرى.

حيث إن الكائنات الحية منظوماتٌ معقَّدة، مفتوحة، فإنها تتبادل المواد والطاقة مع البيئة، وتتمكَّن من التعامل مع أشكال الطاقة المختلفة بما فيها طاقة الفوتونات في ضوء الشمس (الأحياء القادرة على التركيب الضوئي) والطاقة الكهرومغناطيسية والحرارة وكذلك الطاقة الكيميائية في المواد الغذائية.

تتمكَّن الأحياء من خَزن الطاقة في جُزيئاتٍ خازنةٍ للطاقة مثل ATP وGTP ومساعداتٍ إنزيميةٍ مختزلة مثل NADH وNADPH وFADH2 والجُزيئات العضوية المختزلة. ويُمكِن تحرير الطاقة المخزونة في هذه المركَّبات من خلال تحليلها أو أكسدَتها واستخدام الطاقة المتحرِّرة في بناء مركَّباتٍ جديدةٍ أو توليد الحرارة لأغراض النمو والتكاثُر.

(٣) المعلومات Information

تقليديًّا اعتُبِرَت المعلومات كمفهومٍ مشتق أو ثانوي؛ حيث اعتبرت الفيزياء أن الحجر الأساسي للحقيقة هي وحدات البناء المادية للكون مُتمثِّلة بالجُسيمات والأوتار والمجالات.

وحيث إن بِتات المعلومات تُمثَّل دائمًا بدرجات الحرية للمادة، يتم اختزال خواص المعلومات إلى قواعدها المادية. غير أن هذه الاعتمادية انقلبَت في العقود الأخيرة لتكون المعلومات جذر الحقيقة وليس المادة. هذا الجهد ارتبط باسم العالم جون أرشيبالد ويلر الذي أطلق مقولته الشهيرة «إنها من البِت» (Walker *et al.*, 2017).

المعلومات قيمةٌ فيزيائيةٌ مصاحبة للجُسيمات والأجسام، وهي التي توجِّه الطاقة لإنجاز الشغل. تنشأ المعلومة لوجود الاختلاف أو التناقُض بين حالتَين للجُسيم أو الجسم كالبرم المغزلي للجُسيم أو الشحنة. وحسَب مقولة Bateson (1972)، فإن المعلومة أو وحدة المعلومات، هي الفرق الذي يعمل فرقًا؛ وبالتالي فإن كمية المعلومات تعتمد على الخواصِّ المختلفة التي يمتلكها الجُسيم أو الجسم؛ وبالتالي فهي تتناسب ودرجة التعقيد.

إن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يخص المعلومات وكيفية معالجتها على المستوى المِجهَري. ينُص القانون على أن الإنتروبي (وهو مقياسٌ للمعلومات) يتجه نحو الزيادة. وإن كل منظومةٍ فيزيائيةٍ تحتوي على عددٍ معيَّنٍ من وحدة المعلومات البِتات. هذه المعلومات غيرُ مرئية أو إنتروبي ومعلوماتٌ أخرى مرئية ويُمكِننا الوصول إليها، تُعالَج وتُحوَّل بحركيات المنظومة دون إنقاصها.

كل منظومةٍ فيزيائيةٍ تُسجِّل وتُعالِج معلومات. ويمكن للمعلومات أن تنتقل بين الجُسيمات والأجسام من خلال حركياتها وتآثُرها، ويمكن حفظ المعلومات على المواد الصلبة.

في الكائنات الحية جميع الجُسيمات والذَّرات والجُزيئات تمتلك معلومات، وهي تزداد في الجُزيئات المعقَّدة؛ كالبروتينات والأحماض النووية. تُعَد جُزيئات DNA الأكثر قدرةً على حفظ المعلومات ونقلها؛ كونها تحتوي على الكثير جدًّا من القواعد النووية المختلفة، بما يشبه الحروف التي يمكن تكوين الكثير جدًّا من (المعاني) منها، وهي مستقرةٌ كيميائيًّا، وطويلةٌ جدًّا، ما يتيح حفظ الكثير من المعلومات الخاصة بالكائن الحي وفعالياته المختلفة. كما تمتاز جزيئة الـ DNA بإمكانية نسخها ونقلها كاملةً إلى الخلايا الوليدة، ما يمكِّن من حفظ ونقل المعلومات الوراثية.

تحصُل الخلايا أو الكائنات الحية على الكثير من المعلومات المحمولة على الجُسيمات والذَّرات والجُزيئات من البيئة؛ كالفوتونات بأطوالٍ موجية، وتردُّداتٍ مختلفة، وبأنواعٍ متعددة من الذَّرات والجُزيئات، كما تعطي هي أيضًا معلوماتٍ إلى البيئة من خلال تصديرها للحرارة والجُزيئات الفائضة وغير ذلك.

لقد وُصفَت الحياة كمعلوماتٍ تتدفَّق في تياراتٍ جُزيئية (Dawkins, 1996).

(٣-١) التفاعُلات الكيميائية Chemical Reactions

عندما يكون المدار الخارجي للذرة مكتمل العدد اللازم لإشباع المدار بالإلكترونات، فإنها تكون مستقرةً طاقيًّا وخاملةً كيميائيًّا. لكن إذا كان المدار الخارجي للذرة غير مكتمل العدد اللازم لإشباعه بالإلكترونات فإنها ستكون غيرَ مستقرةٍ طاقيًّا، وستتفاعل مع ذراتٍ أخرى من العنصر نفسه، أو عناصرَ أخرى هي أيضًا غيرُ مستقرةٍ طاقيًّا. التفاعُل الكيميائي هذا سيؤدِّي إلى إشباع المدارات الخارجية للذَّرات المتفاعلة عن طريق منح أو أخذ أو الاشتراك بالإلكترونات وتكوين الجُزيئات. تكوين الجُزيئة يتم عن طريق ارتباط الذَّرات بأواصرَ كيميائية (Chemical bonds).

يحصُل التفاعُل الكيميائي عند تفاعل ذرَّتَين أو أكثر لتكوين جُزيئةٍ أو جُزيئاتٍ أو تحلُّل الجُزيئة بكسر آصرة أو أواصرَ كيميائيةٍ تربط الذَّرات مع بعضها.

العناصر التي تبدأ التفاعُل تُسمَّى بالمواد المتفاعِلة (Reactants) وتُكتَب في يسار معادلة التفاعُل. والتي تتكوَّن بسبب التفاعُل تُسمَّى بالمواد الناتجة (Products) وتُكتَب في يمين معادلة التفاعُل. في أي تفاعُلٍ كيميائيٍّ تتساوى عدد ذرات المواد المتفاعلة مع عدد ذرات المواد الناتجة عن التفاعُل.

عند تفاعُل ذرَّتَي عنصرٍ معيَّن، فإن الناتج هو جُزيئةٌ ثنائية الذرة للعنصر نفسه؛ كمثال تفاعُل ذرَّتَي هيدروجين لتنتج جُزيئة هيدروجين، أو ذرَّتَي أوكسجين لتنتج جُزيئة أوكسجين، وهكذا.

H	+	H	$\longrightarrow$	H_2
ذرة هيدروجين		ذرة هيدروجين		جزيئة هيدروجين
O	+	O	$\longrightarrow$	O_2
ذرة أكسجين		ذرة أكسجين		جزيئة أكسجين

وعند تفاعُل ذرَّات أو جُزيئات عنصرٍ معيَّن مع ذرَّاتِ أو جزيئاتِ عنصرٍ آخر، ينتُج ما يُعرف بالمركَّب (Compound) (شكل ٤-٤). كمثالِ تفاعُل الهيدروجين مع الأوكسجين لتكوين جُزيئة الماء.

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

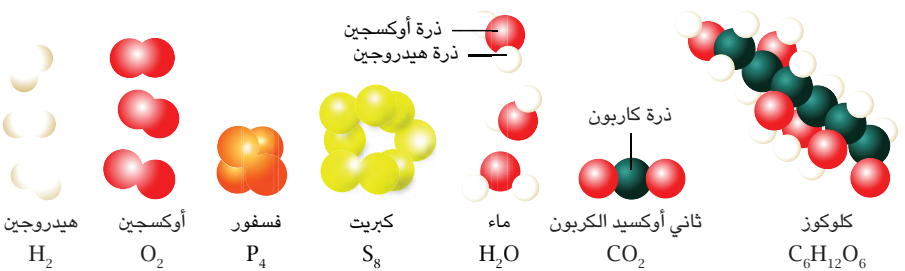
المركَّب هو جزيئةٌ تتألَّف من ذراتِ عنصرَين مختلفَين أو أكثر. ويمكن أن ينتُج المركَّب نتيجة تفاعُل جُزيئتَين لمركَّبَين مختلفَين، أو تحلُّل جُزيئة مركَّبٍ آخر. كمثالِ تفاعُل حامض الهيدروكلويك مع هيدروكسيد الصوديوم لتكوين كلوريد الصوديوم والماء، أو تحلُّل بيروكسيد الهيدروجين لتكوين ماء وأوكسجين.

$$HCl + NaOH \longrightarrow NaCl + H_2O$$

حامض الهيدروكلوريك — هيدروكسيد الصوديوم — كلوريد الصوديوم — ماء

$$2H_2O_2 \longrightarrow 2H_2O + O_2$$

بيروكسيد الهيدروجين



شكل ٤-٤: تتألَّف جُزيئات عناصر الهيدروجين والأوكسجين والكبريت والفسفور مثلًا من ذرتَين أو أكثر للعنصر نفسه. أما جُزيئات المركَّبات مثل الماء وثاني أوكسيد الكاربون والكلوكوز فتتألَّف من ذراتِ عناصرَ مختلفة. محوَّر عن: Download for free at http://cnx.org/content/col11760/latest/.

بعض التفاعلات الكيميائية تستمر فيها المواد المتفاعِلة بالتفاعُل وتكوين المنتج لحين استهلاك كل الجُزيئات المتفاعِلة. وهكذا يسير التفاعل باتجاهٍ واحد، ويُشار إليه بسهمٍ واحدٍ باتجاه المنتج. كمثال تحلُّل بيروكسيد الهيدروجين المُشار إليه أعلاه.

في تفاعُلاتٍ أخرى يستمر التفاعل باتجاه تكوين المنتج إلى تركيزٍ حرجٍ معيَّن، بعده تبدأ جُزيئات المنتَج بالتحوُّل نحو تكوين المواد المتفاعِلة وتستمر هذه الحالة باتجاهَين، لغاية الوصول إلى حالة التوازُن (Equilibrium) حيث يكون معدَّل التفاعُل بالاتجاهَين متساويًا. وبذلك مثل هذه التفاعُلات تكون عكسيةً (Reversible) ويُشار إليها في المعادلة الكيميائية بسهمَين متعاكسَين. أغلب التفاعُلات في الخلايا الحية تكون من هذا النوع. لكن في الأنظمة البيولوجية غالبًا ما لا تحصُل حالة التوازُن؛ حيث إن تراكيز المواد المتفاعِلة أو الناتجة تتغيَّر باستمرار؛ حيث تُستخدَم في تفاعُلاتٍ أخرى. كما أن منتجاتِ تفاعُلاتٍ معيَّنة يمكن أن تكون موادَّ متفاعِلةً لتفاعُلاتٍ أخرى. كمثالٍ للتفاعُل المتعاكِس في الأحياء هو تنظيم حموضة (pH) الدم بتكوينِ حامض الكاربونيك من أيونات الهيدروجين المسبِّبة لزيادة الحموضة مع جذر البيكاربونات. لكن حامض الكاربونيك يمكن أن يتحلَّل بتفاعُلٍ معاكسٍ آخر حيث يكون غاز ثاني أوكسيد الكاربون يتحرَّر عَبْر الزفير إلى الخارج وجُزيئات ماء.

$$HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons H_2CO_3$$

جذر بيكربونات — أيون الهيدروجين — حامض الكاربونيك

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H_2O + CO_2\uparrow$$

حامض الكاربونيك — ماء — ثاني أوكسيد الكاربون

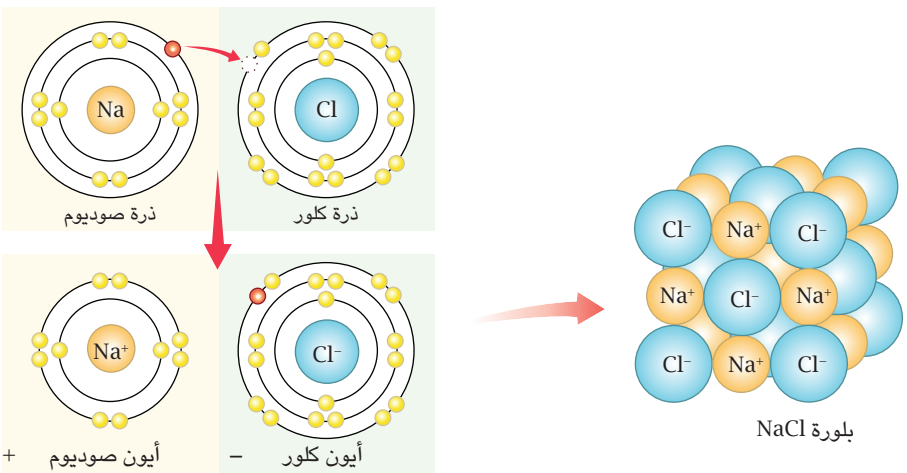
(٣-٢) الأواصر الكيميائية Chemical Bonds

باستثناء العناصر النبيلة، لا تُوجد في الطبيعة ذرَّات العناصر منفردة، بل بشكلِ جزيئاتٍ مؤلَّفةٍ من ذراتٍ مترابطة. عند تكوين الآصرة بين ذرتَين، فإن الإلكترونات بين نواتَي الذَّرتَين ستنجذب إليهما، والنواتان ينجذبان إلى الإلكترونات في ذلك الموقع. القوة الجاذبة التي تربط الذراتِ المختلفةَ في الجُزيئة تُسمَّى الآصرة الكيميائية.

كل منظومة في الطبيعة تنحو لأن تكون أكثر استقرارًا طاقيًّا، وتكوين الأواصر الكيميائية يخفض طاقة المنظومة ليجعلها أكثر استقرارًا. وعند تكوين الآصرة الكيميائية تَتحرَّر طاقة مقدارها يختلف باختلاف نوع الآصرة. بالمقابل فإن كسر الآصرة الكيميائية سيحتاج إلى طاقةٍ تُساوي الطاقة المُتحرِّرة عند تكوينها.

ثمَّة أنواعٌ مختلفة من الأواصرِ الكيميائية:

(أ) الآصرة الأيونية (Ionic Bond)



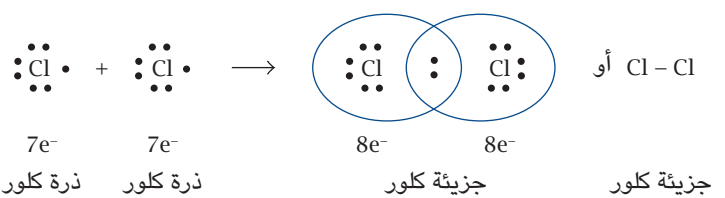
شكل ٤-٥: تكوين كلوريد الصوديوم للأواصر الأيونية. عندما تمنح ذرة الصوديوم إلكترونًا إلى ذرة الكلور تتحول إلى أيونٍ موجب وتتحول ذرة الكلور إلى أيونٍ سالب (يسار). يكون كلوريد الصوديوم شبكةً من أيونات الصوديوم وأيونات الكلور المتبادلة تُعرف بالبلورة (يمين).

تحصُل الآصرة الأيونية في الغالب عندما ينتقل إلكترونٌ واحدٌ أو أكثر من ذرة عنصرٍ فلزيٍّ إلى ذرة عنصرٍ لا فلزِّي. فقدان ذرة الفلز للإلكترون سيُحوِّلها إلى أيونٍ موجب، بينما تتحول ذرة اللافلز إلى أيونٍ سالب. هنا ستنشأ الآصرة الأيونية كقوةِ جذبٍ كهربائيةٍ مستقرة بين الأيونات المختلفة الشحنة بصورةٍ متساويةٍ ما يؤدي إلى تجمُّعها على شكل شبكةٍ بلوريةٍ أو بلورات. كمثال تفاعُل ذرَّاتِ الصوديوم مع ذرَّات الكلور لتكوين كلوريد الصوديوم كما سبق ذكره، وموضَّح في الشكل ٤-٥.

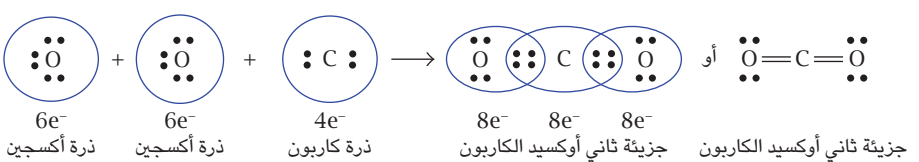
الآصرة الأيونية تكون قويةً حيث تنتج طاقة تُساوي −٧٦٩ كيلوجول للمول لتكوُّنها في حالة كلوريد الصوديوم وتحتاج المقدار نفسه من الطاقة لكسرها.

(ب) الآصرة التساهمية Covalent Bond

تنشأ الآصرة التساهمية عندما تشترك ذرَّتان بمقدارٍ مُتساوٍ في الإلكترونات في مداراتها الخارجية؛ نظرًا لميلهما المتساوي لجذب الإلكترونات. كمثالٍ تشترك ذرَّتا الهيدروجين كلٌّ بالإلكترون الخارجي لها، ليصبح لكل ذرة في جُزيئة الهيدروجين زوجٌ من الإلكترونات؛ وبالتالي تتشبَّع مداراتها الخارجية بالإلكترونات وتستقر، كما هي ذرة الهيليوم التي يحتوي مدارها الخارجي على زوجٍ من الإلكترونات. كما تشترك ذرَّتا الأوكسجين كلٌّ بزوجٍ من الإلكترونات، وبذا يتشبَّع المدار الخارجي لكلٍّ منهما في الجُزيئة حيث يُصبِح ٨ إلكترونات. وفي الشكلَين ٤-٦ و٤-٧ أدناه ارتباط ذرتَي كلور بآصرةٍ تساهمية، لتكوين جُزيئة الكلور، وارتباط ذرَّتَي أوكسجين مع ذرة كاربون بأواصر تساهمية، لتكوين ثاني أوكسيد الكاربون. عمومًا تكون الأواصر بين العناصر اللافلزية تساهمية.



شكل ٤-٦: تكوين آصرةٍ تساهميةٍ بين ذرَّتَي كلور لتكوين جُزيئة كلور.

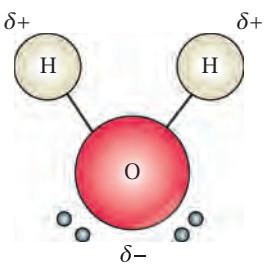


شكل ٤-٧: تكوين أواصرَ تساهميةٍ بين ذرَّتَي أوكسجين وذرة كاربون لتكوين ثاني أوكسيد الكاربون.

تتوقَّف قوة الآصرة التساهمية على عدد الإلكترونات المشتركة بين الذرتَين؛ فقوة الآصرة التساهمية بين ذرَّتَي الأوكسجين المكوِّنة لجزيئة أوكسجين أقوى من تلك التي بين ذرَّتَي هيدروجين أو كلور لتكوين جُزيئتَي هيدروجين أو كلور على التوالي؛ ففي الحالة الأولى تتم المساهمة بإلكترونَين فتتشكَّل آصرةٌ مزدوجة، بينما في الحالتَين الأخيرتَين تتكون أواصرُ مفردة. وهكذا تكون الآصرة الثلاثية N≡N كما في جُزيئة النتروجين N_2 أقوى من الآصرة المزدوجة. هذا يفسِّر عدم قدرة أغلب الكائنات الحية على استغلال النتروجين الغازي وهو الأكثر وفرة في الهواء، بسبب الطاقة العالية المطلوبة لتكسير أواصره التساهمية الثلاثية. بسبب ضعف قوة التجاذُب بين ذرات الجُزيئات الناتجة عن الأواصر التساهُمية حيث تكون متعادلة الشحنة، فإنها تُظهِر صفاتٍ فيزيائيةً تختلف عن تلك المكوِّنة للأواصر الأيونية؛ فهي في الغالب تكون سوائل أو غازات في درجة حرارة الغرفة وضعيفة الذوبان في الماء، كما أنها أقل قدرةً على التوصيل الكهربائي لمحاليلها في الماء وغير ذلك.

تُقسَّم الأواصرُ التساهميةُ إلى أواصرَ تساهميةٍ مستقطبة وأواصرَ تساهميةٍ غير مستقطبة.

(ج) الآصرة التساهمية المستقطبة Polar Covalent Bond



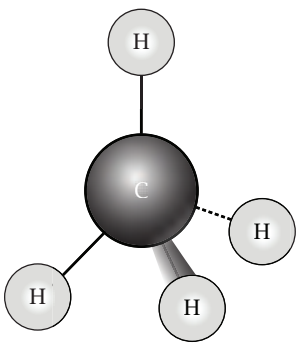
شكل ٤-٨: جُزيئة الماء تُظهِر الأواصرَ التساهميةَ المستقطبة.

تنشأ الآصرة التساهمية المستقطبة بسبب اختلاف السالبية الإلكترونية للذرات المكوِّنة للآصرة التساهمية (شكل ٤-٨)؛ فالإلكترونات المشتركة بين ذرتَين مختلفتَي السالبية الإلكترونية ستقترب أكثر من نواة الذرة الأكثر سالبيةً إلكترونيةً منها من نواة الذرة الأقل سالبيةً إلكترونية. هذا سيجعل الأولى تكتسب مقدارًا قليلًا من الشحنة السالبة

($\delta-$) والثانية مقدارًا قليلًا من الشحنة الموجبة ($\delta+$) وهكذا سيكون للجُزيئة قطبان مشحونان أحدهما أكثر.

سالبية والآخر أكثر إيجابية. تتجلى أهمية الآصرة التساهمية المستقطبة في الماء الذي تجعل منه مذيبًا عامًّا فعالًا للأملاح الأيونية والجُزيئات المستقطبة التي تُوصَف بسبب ذلك بالمُحبَّة للماء (Hydrophilic).

(د) الآصرة التساهمية غير المستقطبة Nonpolar Covalent Bond



شكل ٤-٩: جُزيئة الميثان كنموذجٍ للأواصر التساهمية غير المستقطبة.

تحصُل الآصرة التساهمية غير المستقطبة بين ذرَّتَي العنصر نفسه أو عنصرَين مختلفَين تشتركان بالإلكترونات بالتساوي. أمثلة ذلك جُزيئات H_2 وO_2 وN_2 ... إلخ. وكذلك الميثان والإيثان والبنتان وغيرها (شكل ٤-٩). عمومًا المواد غير المستقطبة لا تذوب بالماء، وتُسمَّى بالمواد الكارهة للماء (Hydrophobic) أو المُحبَّة للدهون (Lipophilic) ولكن تذوب في السوائل غير المستقطبة؛ مثل رباعي كلوريد الكاربون CCl_4، البنزين C_6H_6 والهكسان $CH_3(CH_2)_4CH_3$ وغيرها.

(هـ) الآصرة الهيدروجينية Hydrogen Bond

تُعَد الأواصر الهيدروجينية من الأواصر الضعيفة السهلة الكسر. في الجُزيئات ذات الأواصر التساهمية المستقطبة، تنشأ بين ذرة هيدروجين من جُزيئة؛ حيث تكون ذات شحنةٍ موجبةٍ قليلة ($\delta+$) مع ذرة ذات شحنةٍ سالبةٍ قليلة ($\delta-$) مثل ذرة أوكسجين أو ذرة نتروجين من

جُزيئةٍ أخرى أو ضمن الجُزيئة نفسها. الأواصر الهيدروجينية شائعة وتحصُل بانتظامٍ بين جُزيئات الماء. وبرغم ضعف هذه الأواصر إلا أن كثرتَها في جُزيئات الماء والبوليمرات يجعل منها قوةً مهمةً في تثبيت التشكيلات الجُزيئية في الخلايا الحية. تلعب الأواصر الهيدروجينية أدوارًا مهمةً في تحديد شكل البروتينات وارتباط شريطَي الـ DNA وغيرها.

(ز) آصرة فاندرفال van der Waal Bond

آصرة فاندرفال من الأواصر الكيميائية الضعيفة. تنشأ أواصر فاندرفال بين جزيئتَين أو أكثر نتيجة التذبذُب القليل غير المُتناظِر في كثافات الإلكترونات حول الذرة. ولحصول هذه الأواصر ينبغي أن تكون الجُزيئات متقاربةً جدًّا من بعضها. تُسهِم هذه الأواصرُ إلى جانب الأواصرِ من الأنواع الأخرى في تكوين التراكيب الثلاثية الأبعاد للبروتينات والتشكيلات الخلَوية الأخرى.

تلعب الأواصرُ الضعيفة أدورًا بيولوجيةً مهمة جدًّا بضمنها التعرُّف الكيموحيوي (Rebek, 1991).

(ح) التركيب الجُزيئي للخلية Molecular Composition of The Cell

مثل بقية المنظومات الأخرى في الكون، تتألَّف الكائنات الحية من عناصرَ كيميائيةٍ مختلفة تم الإشارة إليها مسبقًا. الخاصية التركيبية المميِّزة للكائنات الحية هي وجودُ جزيئاتٍ عضوية، وتراكيبَ عاليةِ التنظيم والتعقيد لا تُوجد في المواد أو التراكيب غير الحية. مع ذلك، لا يمكن لأيٍّ من هذه الجُزيئات أو التراكيب المميِّزة للكائنات الحية الحالية مهما بلغ حجمها ودرجة تعقيدها أن تُظهِر خواصَّ الحياة وهي منفردة. وهكذا لا تُوجَد مادةٌ حية بل منظومة من الجُزيئات والتراكيب الخاصة التي تشكِّل كلًّا متكاملًا تتآثَر مُكوِّناته، لتُظهِر أنماطًا وفعالياتٍ حيويةً مميزة. هذه المنظومة هي الخلية (Cell) التي تُشكِّل الوحدة التركيبية والوظيفية للكائن الحي؛ فالحياة هي انبثاقٌ لتآثُر مكوِّنات الخلايا.

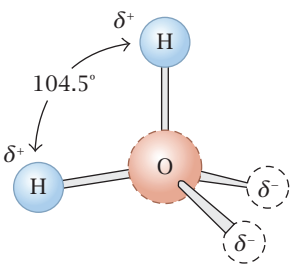
الكائنات الحية متنوعةٌ جدًّا؛ بعضها يتألَّف من خليةٍ واحدةٍ كما في البكتيريا والأركيا والخمائر، مستعمرةٌ من عددٍ من الخلايا المتشابهة مظهريًّا كما في بعض أنواع الطحالب، أو عددٌ كبيرٌ من الخلايا المتخصِّصة تُشكِّل أنسجةً وأعضاء، كما في النباتات والحيوانات.

الخلية الحية هي منظومةٌ معقَّدةٌ متكيِّفة معزولة عن البيئة، وتتبادل المواد والطاقة والمعلومات معها. ويُمكِن اعتبارُ الخلية كمحلولٍ مائيٍّ كثيفٍ يعجُّ بالجُزيئات العضوية واللاعضوية التي تتفاعل لتُنتِج الطاقة والمواد اللازمة لنُموِّها وتكاثُرها.

(ط) الماء

تتألَّف جُزيئة الماء من ذرة من الأوكسجين، ترتبط بآصرةٍ تساهميةٍ مع كل من ذرتين من الهيدروجين (شكل ٤-١٠). هذا التركيب الكيميائي والتوزُّع الفراغي لذرَّتَي الهيدروجين وذرة الأوكسجين، جعلها جُزيئةً مستقطبةً وقادرة على تكوين أواصرَ هيدروجينيةٍ مع الجُزيئات المستقطبة الأخرى. هاتان الصفتان أكسبتا الماء العديد من الصفات الفيزيائية الكيميائية الفريدة، والتي أسهمَت إلى جانب عواملَ أخرى في تفرُّد وتميُّز الكائنات الحية.

تُعتبَر جزيئة الماء ثالث أكثر الجُزيئات شيوعًا في الكون بعد جُزيئة الهيدروجين وأول أوكسيد الكاربون (Messori, 2019). والماء هو المادة الأكثر وفرةً على سطح الكرة الأرضية، كما أنه الأكثر وفرةً في الخلية الحية. هذا إلى جانب أن الأواصر الهيدروجينية الضعيفة التي يُكوِّنها الماء مع الجُزيئات الأخرى، مكَّنَت من أن يكون الماءُ الوسطَ الذي تتحرك فيه الجُزيئات المختلفة دون أن تُمسِك بأواصرَ تساهميةٍ أو أيونية.



شكل ٤-١٠: التركيب الفراغي لجُزيئة الماء.

تقيِّد حركتها ونشاطها؛ وبالتالي يمكِّنها من التفاعُل مع غيرها وتكوين مُركَّباتٍ جديدة. وارتبطَت الحياة بالماء؛ فهو على الأرجح مهَّد نشوء الأشكال الأولى للحياة في الماضي، كما أن الحياة في الوقتِ الحاضرِ تزدهر حيث يتوافَر الماء بكثرة كما في الغابات المطيرة، وتقلُّ في الصحاري لشحَّته.

بسبب قطبية جزيئاته، اكتسب الماء ظاهرتَي التماسُك (Cohesion) والتلاصُق (Adhesion)؛ فبِسبَب تجاذُب جُزيئاته فيما بينها يحصُل التماسُك الذي مكَّنه من أن يكون سائلًا في درجة حرارة الغرفة، ويظهر الشد السطحي، كما يلعب أدوارًا مهمةً في حياتية الكائنات الحية؛ كصعود أعمُد الماء إلى مسافاتٍ عاليةٍ في أوعية النباتات. أما

التلاصُق فيحصُل حينما تتجاذَب جُزيئات الماء مع الجُزيئات المستقطبة الأخرى، والتنافُر مع الجزيئاتِ غيرِ المستقطبة. ولهذه الخاصية أهميةٌ بيولوجيةٌ كبيرة تُمكِّن الماء من الارتباط مع مختلف مكوِّنات الخلية، وتُسهِم في تكوين أغشية الخلية.

بسبب الأواصر الهيدروجينية التي تربط جُزيئاته والتي تحتاج إلى طاقةٍ كبيرةٍ لتكسيرها، يمتاز الماء بحرارته النوعية العالية ودرجة تبخُّره العالية أيضًا. هذان العاملان يمكِّنان الكائنات الحية من المحافظة على درجة حرارتها من الارتفاع إلى مستوياتٍ مؤذية، بتحرُّر الطاقة نتيجة عمليات التنفُّس أو بسبب التعرُّض لمصادر الحرارة العالية من البيئة. وبسبب الصفة الغريبة للماء حيث يزداد حجمه عند انجماده وبالتالي تقلُّ كثافته، تحول الطبقات السطحية الطافية من الجليد على سطوح البُحيرات والبحار من انجماد مياهها والمحافظة على بيئةٍ مناسبةٍ للأحياء المائية.

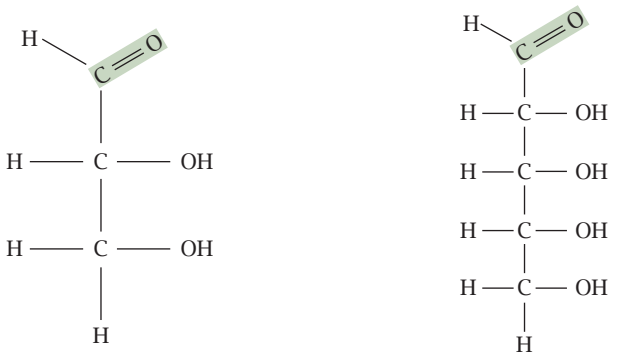
الماء مذيبٌ عامٌّ فعَّال يعمل كوسطٍ لحصول التفاعُلات داخل الخلايا. كما يدخل كمادةٍ متفاعلةٍ أو ناتجةٍ من التفاعُلات الخلَوية؛ كتفاعُلات التحلُّل المائي أو تفاعُلات إزالة الماء. كما أن الماء يُظهِر صفاتٍ مهمةً سيتم التطرُّق إليها في مواضعَ أخرى أو الفصول القادمة.

(ي) الجُزيئات الضخمة Macromolecules

تحتوي الخلايا الحية على مركباتٍ عضويةٍ مختلفة متدرِّجة التعقيد تشمل مركَّباتٍ صغيرةً تتألَّف من عددٍ قليلٍ من الذَّرات، إلى مركَّباتٍ معقدةٍ هي بوليمرات لمركَّباتٍ بسيطةِ التركيب. تضُم المركَّباتُ العضويةُ المهمة لحياتيةِ الخلايا الحية الكاربوهيدرات، والدهون، والبروتينات، والأحماض النووية. على اختلاف أنواع هذه المجاميع، فإن تكوين البوليمرات أو الجُزيئات الضخمة من مركَّباتها البسيطة أو تحلُّل الجُزيئات الضخمة إلى مُكوِّناتها من المركَّبات البسيطة يخضع للطريقة نفسها؛ فعند تكوين الجُزيئات الضخمة ينبغي ربط الوحدات المكوِّنة بواسطة أواصرَ تساهميةٍ يتم فيها إزالة مجموعة $OH-$ من إحداها وذرة H من الأخرى، وهذا يتطلب طاقةً لتكوين الآصرة، وتتحرَّر جُزيئة ماءٍ في كل خطوة. هذا التفاعُل يُسمَّى إزالة الماء (Dehydration reaction). وعند تحلُّل الجُزيئات الضخمة، يحصُل عكس هذا التفاعُل والذي يُسمَّى بالتحلُّل المائي (Hydrolysis) حيث تتم إضافة جُزيئة ماءٍ، وتتحرَّر طاقة الآصرة التي كانت تربط الوحدتَين المكوِّنتَين في كل خطوة.

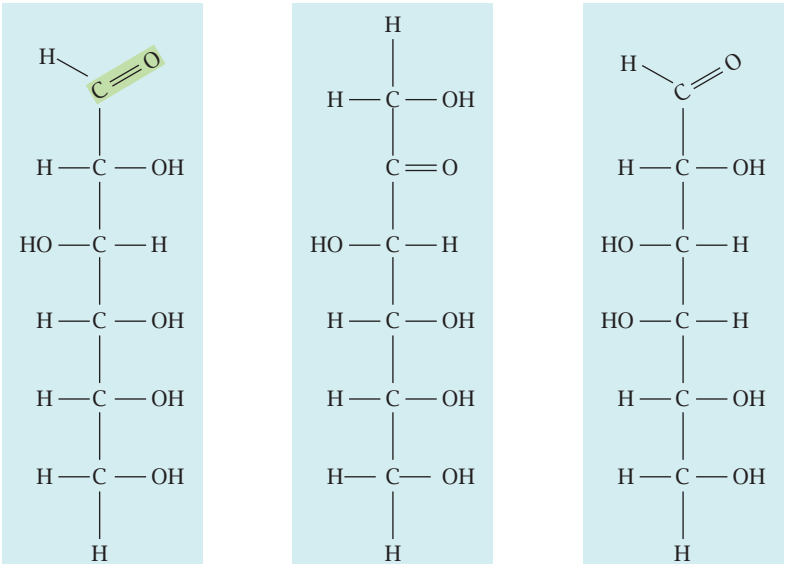
(ك) الكاربوهيدرات Carbohydrates

في الخلايا الحية، تُستخدَم الكاربوهيدرات (السكَّريات) كمصدرٍ للطاقة وهياكل كربونية لبناء المركَّبات العضوية المختلفة، كما تشترك مع البروتينات في تكوين البروتينات السكَّرية التي لها أهمية في التعرُّف (Recognition) وبعضها يدخُل في تركيب الأحماض النووية وتُشكِّل أو تدخُل في بناء جدران الخلايا. تتألَّف جميع المركَّبات الكاربوهيدراتية من عناصر الكاربون والهيدروجين والأوكسجين بنسبة ١:٢:١.

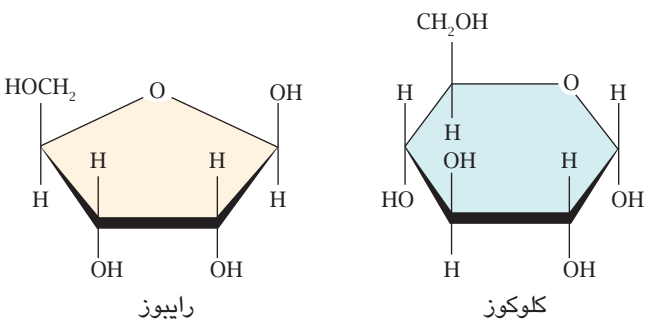


شكل ٤-١١: التركيب الجُزيئي الخطِّي لجُزيئاتِ سكَّرياتٍ ثلاثيةٍ وخماسية.

تُقسَّم الكاربوهيدرات إلى سكَّرياتٍ بسيطةٍ أو أحادية (Monosaccharides) حيث تحتوي الجُزيئة على ٣ إلى ٦ ذرات كاربون، مثل كليسرالدهايد (3C) وأرثروز (4C) ورايبوز (5C) وكلوكوز (6C). وثمَّة سكَّرٌ سباعيٌّ هو Sedoheptulose في النباتات. والسكَّريات الأحادية تميَّز إلى سكرياتٍ أحاديةٍ ألديهايدية؛ مثل الكلوكوز والزايلوز لاحتوائها على مجموعة ألديهايد، أو سكَّرياتٍ أحاديةٍ كيتونية؛ مثل الفركتوز والزايليلوز لاحتوائها على مجموعة كيتون. وسكرياتٍ ثنائيةٍ (Disaccharides) تتألَّف جُزيئتها من ارتباط جُزيئتَي سكَّرٍ بسيطٍ سداسية الكاربون متماثلة أو مختلفة بآصرةٍ كلايكوسيدية؛ مثل المالتوز الذي يتألَّف من جُزيئتَي كلوكوز، والسكروز من جُزيئتَي كلوكوز وفركتوز، واللاكتوز من جُزيئتَي كلوكوز وكالكتوز. وسكَّرياتٍ معقَّدةٍ (Polysaccharides) هي



شكل ٤-١٢: التركيب الخطِّي لجُزيئات السكَّريات السداسية.



شكل ٤-١٣: التركيب الحلقي لجُزيئات السكَّر.

بوليمرات من جُزيئات سكَّرٍ سداسيٍّ الكاربون هو الكلوكوز؛ مثل الكلايكوجين والنشاء والسليلوز، أو بوليمرات من الفركتوز مثل الإنيولين (Inulin).

جُزيئات السكَّريات يُمكِن أن تكون بشكلٍ خطيٍّ مفتوح كما في الأشكال ٤-١١ و٤-١٢ أعلاه، أو غالبًا بشكلٍ حلقيٍّ في المحاليل المائية كما في الشكل ٤-١٣.

تظهر السكَّريات الأحادية آيزوميرية D وL وهي تشير إلى الوضعية الفراغية لذرة الهيدروجين H− ومجموعة OH− إلى يمين أو يسار ذرَّة الكاربون المجاورة لذَرة الكاربون للكحول الطرفي في الجُزيئة. وكلٌّ منها صورة مرآةٍ للأخرى. إذا كانت مجموعة OH− إلى اليمين يكون السكَّر آزومير D والعكس صحيح. إن جميع السكَّريات في الكائنات الحية ينبغي أن تكون بهيئة آزومير D.

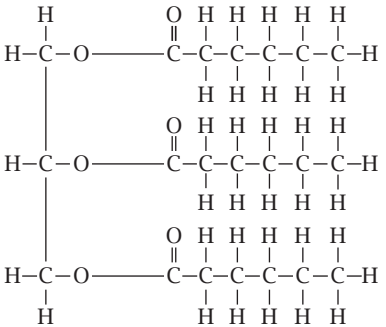
(ل) الشحوم Lipids

تضُم الشحوم مركَّباتٍ عضويةً غير متجانسة ذات جُزيئاتٍ غير مستقطبة. تتألَّف جزيئاتُ الشحوم من ذرات الكاربون والأوكسجين والهيدروجين، مرتبطةً في الغالب بأواصرَ تساهميةٍ غيرِ مستقطبة، وبعضها يحتوي على الفسفور؛ لهذا السبب فهي لا تذوب في الماء بل في المُذيبات الدهنية. تتكوَّن الشحوم كإستراتٍ لتفاعُل الأحماض الدهنية مع قاعدةٍ عضويةٍ مثل الكليسرول. تضم الشحوم: الدهون (Fats) التي تكون أواصرها مشبعة وتكون صلبةً عادةً وتكثُر في الحيوانات، والزيوت (Oils) التي تحتوي جزيئاتها على أواصرَ غيرِ مشبعة وتكون سائلةً وتشيع في النباتات، والشحوم الفوسفاتية (Phospholipids) التي تحتوي على أواصرَ مستقطبةٍ وأخرى غيرِ مستقطبة، والشمع (Wax) الذي يتكوَّن من تفاعُل أحماضٍ دهنيةٍ عديدة ذرات الكاربون مع كحولات غير الكليسرول، والسترويدات (Steroids) التي تشترك مع الشحوم في كونها جُزيئاتٍ غيرَ مستقطبة، وتتألَّف من ٤ حلقاتٍ ملتحمةٍ وربما بعضِ السلاسل المفتوحة وبعض مجاميعِ الهيدروكسيل (شكل ٤-١٤).

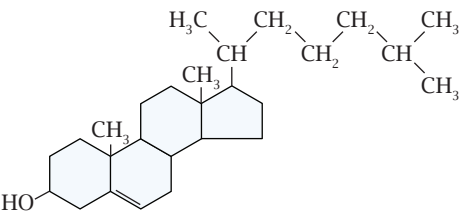
تتكوَّن الدهون والزيوت من اتحاد ثلاثة أحماضٍ دهنيةٍ مع الكليسرول. تُوفِّر الدهونُ والزيوت مصادرَ طاقةٍ مخزونة، كما تُوفِّر الدهون طبقاتٍ عازلةً حراريًّا للحيوانات.

الشحوم الفوسفاتية تتكوَّن من اتحاد الكليسرول مع اثنَين من الأحماض الدهنية، ومجموعة فوسفاتٍ مشحونةٍ ترتبط مع جزيئاتٍ عضويةٍ مشحونة أيضًا؛ مثل كولين (Choline)، إيثانولامين (Ethanolamine) أو الحامض الأميني سيرين (Serine).

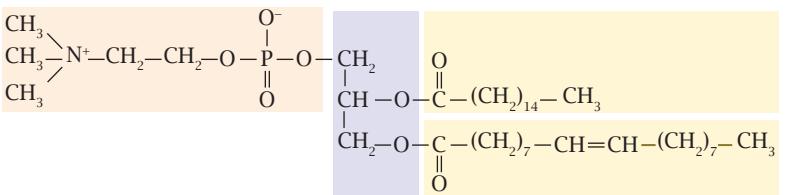
يمكن أن تُستخدَم الشحوم كمصادرَ للطاقة. احتواء جُزيئات الشحوم الفوسفاتية على أجزاءٍ مشحونةٍ وأجزاءٍ غيرِ مشحونةٍ مكَّنها من أن تلعب دورًا عظيمًا في حياتية الخلايا الحية، من خلال تكوينها للأغشية الخلَوية.



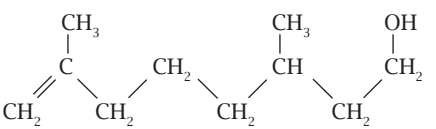
دهون ثلاثية (Triglycerides)



ستيرويدات (Cholesterol)



شحوم فوسفاتية (Phosphatidyl Choline)

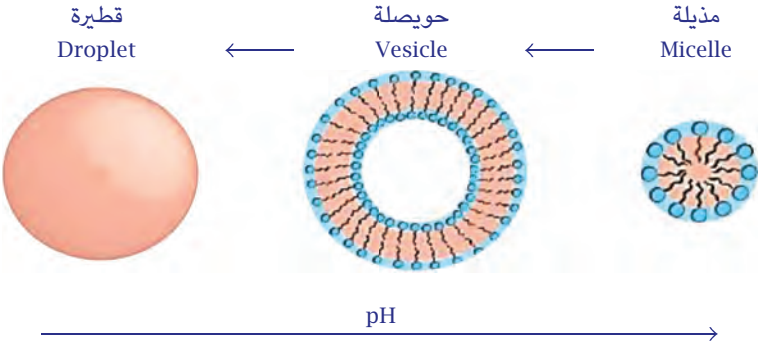


تربينات (Citronellol)

شكل ٤-١٤: التركيب الجُزيئي لمجاميع الشحوم.

وتدخُل الستيرولات مثل الكوليسترول في أغشية الخلايا الحيوانية والنباتية، والأركسترول في أغشية الخلايا الفطرية للتحكُّم في سيولة الأغشية. وتُمثِّل الستيرويدات مصادرَ لعددٍ من الهرمونات وفيتامين D. وللشمع أهميةٌ في حياتية بعض الحيوانات؛ كحشرات نحل العسل والنباتات؛ حيث تُشكِّل طبقةً تمنع فقدان الماء من الأوراق.

من الشائع أن وجود الأحماض الدهنية في المحلول المائي يؤدِّي بشكلٍ تلقائيٍّ إلى تكوُّن حوصلاتٍ ذاتِ أغشيةٍ ثنائية الطبقة. لكن ذلك في الواقع يعتمد بقوة على حموضة الوسط (pH) ودرجة الحرارة وطول سلسلة الحامض الدهني وتركيز الأيونات ووجود



شكل ٤-١٥: رسمٌ تخطيطيٌّ لثلاث حالاتٍ تُظهِرها الأحماض الدهنية المزدوجة الميل للماء والدهون في المحلول المائي وعلاقتها مع درجة الحموضة pH. اللون الأزرق يشير إلى المناطق المحبة للماء، بينما اللون البرتقالي يشير إلى المناطق الكارهة للماء. الأحماض الدهنية المزدوجة الميل الفاقدة للبروتونات تمامًا ستكون مذيلات داخلها كاره للماء وخارجها محب للماء. مزيجٌ من هذه المركَّبات ذات البروتونات والفاقدة للبروتونات يمكن أن تتنظَّم ذاتيًّا، وتكون حويصلات بأغشيةٍ مزدوجةٍ داخلها مائي. أما المركَّبات التامة البروتونات في المحلول المائي، فتكون قطيراتٍ كارهةً للماء. مُحوَّر عن: Jordan *et al.*, (2019).

أو غياب الأيونات الثنائية التكافؤ (Milshteyn *et al.*, 2018). في الشكل ٤-١٥ سلوك الأحماض الدهنية المزدوجة الميل للماء والدهون في المحلول المائي بدرجاتِ حموضةٍ مختلفة والتي يُمكِن أن تكون مذيلات، حوصلات مزدوجة الغِشاء أو قطيرات دهنية.

(م) البروتينات Proteins

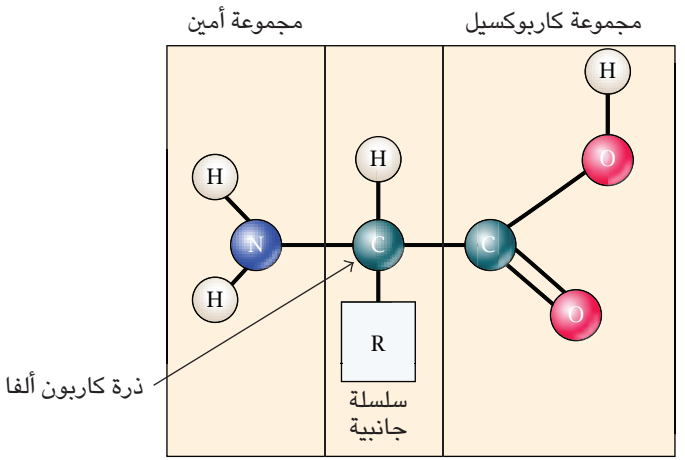
البروتينات من الجُزيئات الضخمة الأكثر تعقيدًا وتنوُّعًا ووجودًا في الخلايا الحية حيث تُشكِّل ٥٠٪ من الوزن الجاف للخلية. التركيب الكيميائي للبروتينات يتضمَّن عناصر الكاربون والأوكسجين والهيدروجين والنتروجين وبعضُها يحتوي على الكبريت أو الفسفور، كما تحتوي بعض البروتينات على عناصرَ أخرى ملحقةٍ مثل الزنك والمنغنيز والنحاس والحديد. البروتينات يمكن أن تكون تركيبيةً تدخُل في تركيب الأغشية وجميع العُضيَّات الخلَوية، أو وظيفيةً كإنزيمات تمكِّن من التفاعُلات الكيميائية، أو هرمونات ومنظمات نمو أو عوامل حركة ونقل أو وقائية أو كسموم وغيرها. إن أغلب إن لم يكن جميع المواد في الخلية أو الكائن الحي هي بروتيناتٌ أو تحتوي على بروتينات أو تنتُج عن نشاط

البروتينات. والكثير من الباحثين يُسمُّونها روبوتاتِ الخلية. تحتوي الخلايا على مئات آلاف الأنواع المختلفة من البروتينات.

جميع البروتينات هي بوليمرات لأحماضٍ أمينيةٍ تختلف في الحجم بين الصغيرة التي تتألَّف من عددٍ محدودٍ من الأحماض الأمينية إلى الكبيرة التي تتكوَّن من مئات الأحماض الأمينية. وتختلف أنواع البروتينات باختلاف أنواعِ وترتيب وعدد الأحماض الأمينية المكوِّنة.

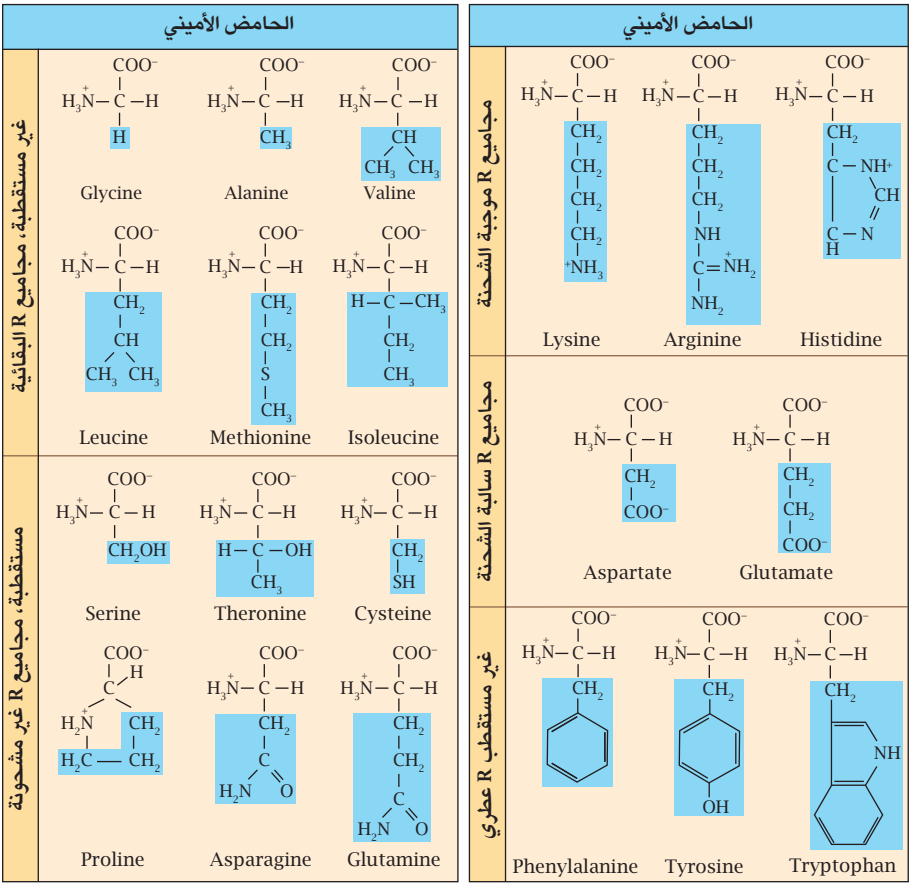
إن سلسلةً تتألَّف من ٢٠٠ من الأحماض الأمينية العشرين فقط، تُوفِّر إمكانيةً لتكوين $١٠^{٢٦٠}$ نوعًا من البروتينات. إن هذا الرقم هائلٌ جدًّا؛ حيث إن عدد الذرات في الكون تُقدَّر بـ $١٠^{٨٠}$. ما بالك لو ازداد طول السلسلة؟! سنكون أمام رقم لا يمكن تصوُّره (Cockell, 2017; Lloyd, 2006). إن هذه الإمكانية الفائقة على التنوُّع الذي تتمتَّع به البروتينات هو العامل الأكثر فاعليةً في تنوُّع الأحياء.

(ن) الأحماض الأمينية Amino Acids



شكل ٤-١٦: تمثيل الصيغة التركيبية العامة للحامض الأميني.

الأحماض الأمينية هي الوحدات المكوِّنة للبروتينات. تشترك الأحماض الأمينية المختلفة بذات التركيب الكيميائي الأساسي؛ فجُزيئة الحامض الأميني تتألَّف من ذرة كاربون مركزيةٍ سُمِّيَت بكاربون ألفا، ترتبط بذرة هيدروجين وبمجموعة أمين ($-NH_2$) من جهة



شكل ٤-١٧: تركيب الأحماض الأمينية.

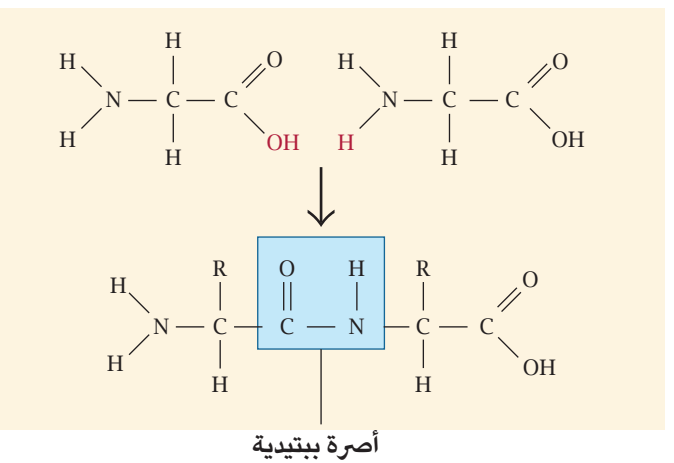
وبمجموعة كاربوكسيل (COOH-) من الجهة المقابلة. كما ترتبط ذرة الكاربون ألفا بمجموعةٍ جانبيةٍ تُسمَّى بالجذر (Radical) ويُرمز له (R). الجذر هو الجزء المتغير والذي تتميَّز على أساسه الأحماض الأمينية المختلفة. يمكن أن يكون الجذر ذرة هيدروجين أو مجموعةً كيميائيةً أخرى (شكل ٤-١٦). وهكذا فإن نوع الحامض الأميني ستُحدِّده طبيعة السلسلة الجانبية R.

عدد الأحماض الأمينية الشائعة في الطبيعة ٢٠، ومن النادر أن تستخدم بعض الأحياء حامضَين أمينيَّين آخرَين هما Selenocysteine وPyrrolysine. تختلف الأحماض الأمينية

كما أسلفنا بنوعية السلسلة الجانبية في الجُزيئة؛ فهذه يمكن أن تكون ذرةَ هيدروجين كما في الحامض الأميني كلايسين، أو سلاسلَ أليفاتية أو عطرية، غير مستقطبة أو مستقطبة، موجبة أو سالبة الشحنة، وبعضُها يحتوي عنصر الكبريت، إضافةً لعناصر الكاربون، الهيدروجين، والنتروجين، والأوكسجين، التي تكوِّن الأحماض الأمينية الأخرى (شكل ٤-١٧).

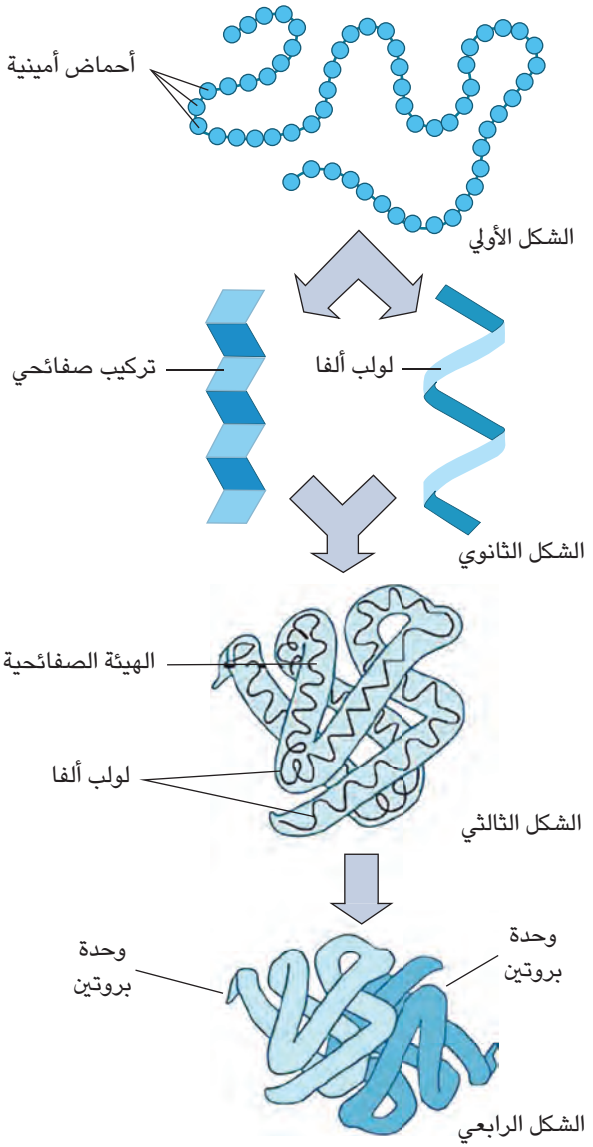
تظهر الأحماض الأمنية آزوميرية مرآتية كما سبق ذكره مع السكَّريات اعتمادًا على موقع مجموعة اليمين إلى يمين ذرة الكابون ألفا (D) أو يسارها (L). جميع الأحماض الأمينية في المواد البيولوجية ينبغي أن تكون من الآيزومير L.

(س) البروتينات proteins

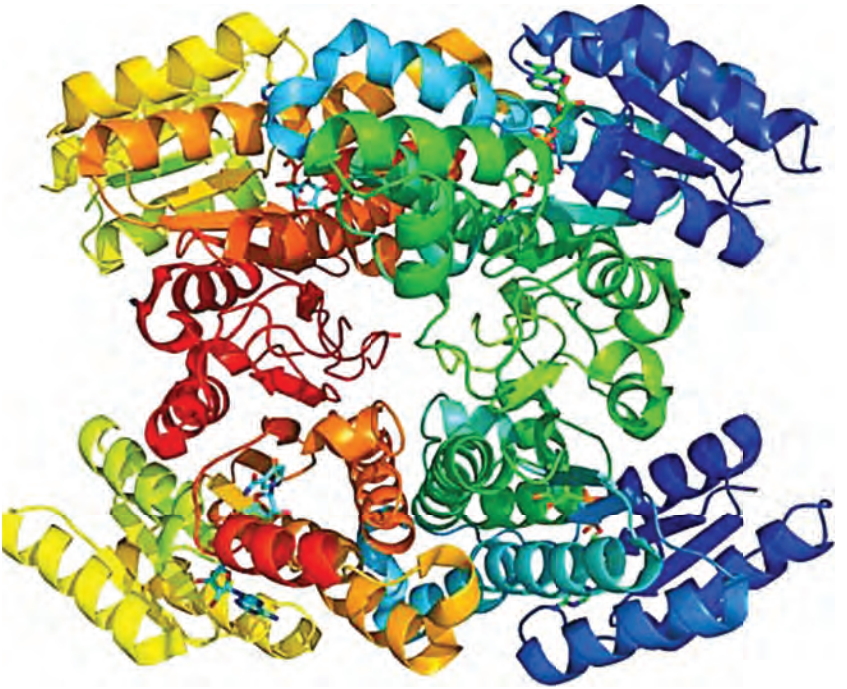


شكل ٤-١٨: تكوين الآصرة الببتيدية بين اثنَين من الأحماض الأمينية.

ترتبط الأحماض الأمينية فيما بينها بأواصرَ تساهميةٍ تُسمَّى بالأواصر الببتيدية (شكل ٤-١٨)؛ حيث تتفاعل مجموعة الأمين من حامضٍ أمينيٍّ مع مجموعة الكاربوكسيل من حامضٍ أمينيٍّ آخر مع تكوين جُزيئة ماء. المركَّب الناتج يُسمَّى ثنائي الببتيد (Dipeptide) إذا تكوَّن من ارتباط اثنَين من الأحماض الأمينية، وثلاثي الببتيد (Tripeptide) إذا تكوَّن من ثلاثة أحماضٍ أمينية، وهكذا. لكن عند تعدُّد الأحماض



شكل ٤-١٩: مخطَّطات لأشكال البروتين.



شكل ٤-٢٠: هيئة البروتين. هذه الصورة لبروتين Butanediol dehydrogenase وهو إنزيم تفاعلات أكسدة-اختزال لبعض المركَّبات العضوية. مع ما يبدو عليه من تعقيد، فهو يتألف من أشكالٍ أوليةٍ من لوالب ألفا (الأضلاع الملتوية) وصفائح بيتا (سهام مسطَّحة) مرتبطة بأوتار من الأحماض الأمينية. ويتضح من التركيب كيف أن البروتينات تتركَّب من ترتيب الأحماض الأمينية. عن: (Cockell, 2017).

الأمينية المرتبطة مع بعضها فالمركَّب الناتج يُسمَّى عديد الببتيد (Polypeptide) أو بروتين، فالبروتين هو مركَّبٌ عديدُ الببتيد. كل عديد الببتيد يمتلك مجموعةَ أمين حرةً تُسمَّى الطرف الأميني (N terminus) ومجموعة كاربوكسيل حُرة من الجانب الآخر وتُسمَّى الطرف الكاربوكسيلي (C terminus).

لجُزيئة البروتين شكلٌ معيَّن، له أهميةٌ كبيرةٌ في عمل البروتين؛ تغيُّر أو تشوُّه شكل البروتين يخفض أو يثبِّط فاعليته تمامًا. ثمَّة أربعةُ أشكالٍ للبروتين وهي تتشكَّل تلقائيًّا:

الشكل الأوَّلي (Primary) حيث يكون بهيئة سلسلةٍ خطيةٍ من الأحماض الأمينية المترابطة.

الشكل الثانوي (Secondary) يكون بهيئة لولب (α-Helix) وصفيحة β (β-sheet). هذه الأشكال تحصُل بسبب نشوء أواصرَ هيدروجينيةٍ مُتكرِّرة على مسافاتٍ من السلسلة في الحالة الأولى وحصول أواصرَ هيدروجينيةٍ بين السلاسل المتجاورة في الحالة الثانية. كما يُمكِن أن تتشكَّل عناصرُ الشكل الثانوي بما يُعرف بالبرمات (Motifs) أو التركيب فوق الثانوي $\beta\alpha$ أو $\beta\alpha\beta\alpha\beta$. أو مثل برميل β حيث تنطوي الصفيحة على نفسها لتُشكِّل أنبوبًا. يلعب الشكل الثانوي دورًا تركيبيًّا مهمًّا.

الشكل الثالثي (Tertiary) وهو الشكل النهائي للبروتينات الكروية؛ حيث تتموضع البرمة والطيَّات للمجاميع غير المستقطبة إلى الداخل. يتم ذلك من خلال تآثُرات المجاميع الكارهة للماء مع الماء، وكذلك المجاميع الفعَّالة المختلفة والأواصر الهيدروجينية والأيونية وأواصر فاندرفال. ثمَّة طرقٌ عديدةٌ جدًّا لطيِّ أجزاء البروتين المختلفة، لتصل من الشكل الأقل استقرارًا طاقيًّا إلى الشكل الأكثر استقرارًا طاقيًّا. وحسَب العلماء ثمَّة 10^{140} طريقة بالمتوسِّط، وهي تعتمد على طول البروتين، وتتراوح بين 10^{50} إلى 10^{300} طريقة، وهي أرقامٌ هائلة.

العديد من البروتينات بحجم ١٠٠ إلى ٢٠٠ حامضٍ أمينيٍّ تنشأ عن تشفير إكسوناتٍ مستقلَّةٍ على mRNA. تقوم هذه البروتينات باتخاذ أشكالها بصورةٍ مستقلة، وتُسمَّى حقولًا (Domains). ثمَّة سلسلةٌ ببتيديةٌ تقوم بربط هذه الحقول لتُشكِّل البروتين. يمكن أن يكون لكل حقلٍ عملُه المستقل؛ ففي الإنزيم مثلًا يمكن أن يكون أحدُها يعمل على ربط العامل المساعد بينما آخرُ يقوم بربط المادة الأساس (شكل ٤-١٩ و٤-٢٠).

الشكل الرابعي (Quaternary) وينتُج عن اندماج بروتينَين ثلاثيَّين أو أكثر. منطقة الاتصال بين وحدات البروتين تكون غيرَ مستقطبة في الغالب، ولها أهميةٌ حيث تنقل معلوماتٍ عن نشاط الوحدات الأخرى.

تقسَّم البروتينات إلى مجموعاتٍ تشمل:

البروتينات البسيطة: وهي التي تُعطي عند تحلُّلها المائي أحماضًا أمينيةً فقط، وتُقسَّم إلى:

البروتينات الليفية (Fibrous proteins): وهي ذاتُ وزنٍ جُزيئيٍّ عالٍ، ولا تذوب في الماء أو المحاليل المائية، وتتألف من سلاسل لولبية ألفا، وتكون ذات وظائفَ تركيبيةٍ وثباتٍ كيميائيٍّ عالٍ. تشمل بروتينات الكولاجين وإيلاستين وكيراتين.

البروتينات الكُروية (Globular proteins): وهي ذاتُ شكلٍ ثالثي، وتذوب في المحاليل المائية، وتشمل الألبومينات والكلوبيولينات والهستونات.

البروتينات المركَّبة (Conjugated proteins): وهي التي تُعطي عند تحلُّلها المائي مركَّباتٍ أخرى، إضافة إلى الأحماض الأمينية. تشمل هذه المجموعة:

البروتينات النووية (Nucleoproteins): وتتألَّف من بروتيناتٍ قاعديةٍ وأحماضٍ نووية.

البروتينات السكَّرية (Glycoproteins): وتنتج عن ارتباط البروتينات مع السكَّريات.

البروتينات الدهنية (Lipoproteins): وتنتج عن ارتباط البروتينات مع الأحماض الدهنية.

البروتينات الملوَّنة (Chromoproteins): وتنتج عن ارتباط البروتين مع مركَّباتٍ صبغية، كما في ارتباط بروتين كلوبين مع الهيم لينتج هيموكلوبين.

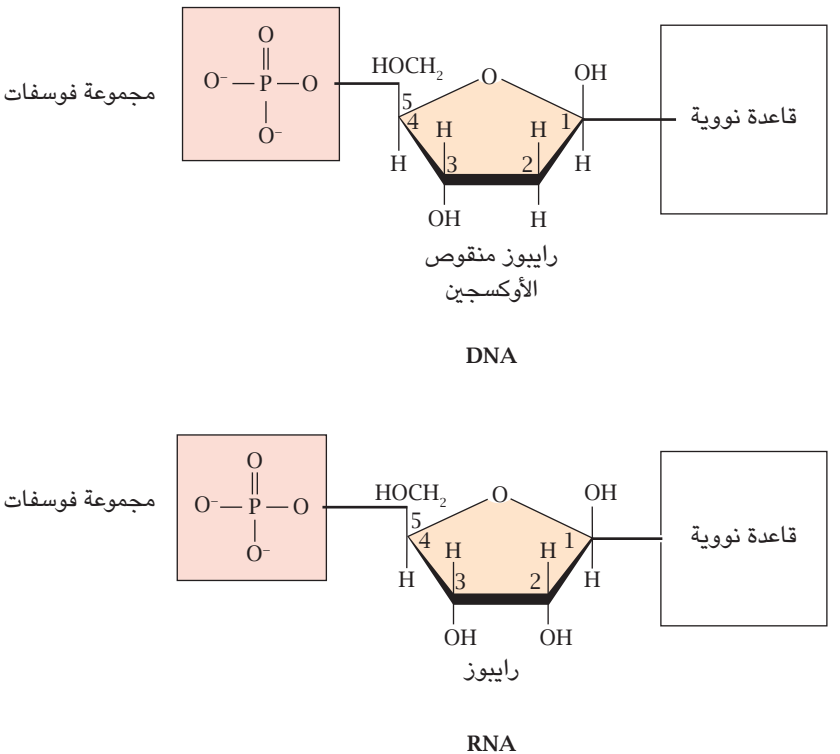
البروتينات الفوسفاتية (Phosphoproteins): وتنتج كإسترات لتفاعُل البروتين مع حامض الفوسفوريك.

(ع) الأحماض النووية Nucleic Acids

الأحماض النووية هي أهم الجُزيئات الضخمة في الخلية، إلى جانب البروتينات والتي تُنظِّم عمل الخلية وديمومتها. ثمَّة نوعان من الأحماض النووية هما الحامض النووي الرايبوسي المنقوص الأوكسجين (Deoxyribonucleic acid) ويُكتَب اختصارًا DNA والحامض النووي الرايبوسي (Ribonucleic acid) ويُكتَب اختصارًا RNA. تتألف الأحماض النووية من عناصر الكربون والأوكسجين والهيدروجين والنتروجين والفسفور. وهي بوليمرات لوحداتٍ تُسمَّى النكليوتيدات (Nucleotides).

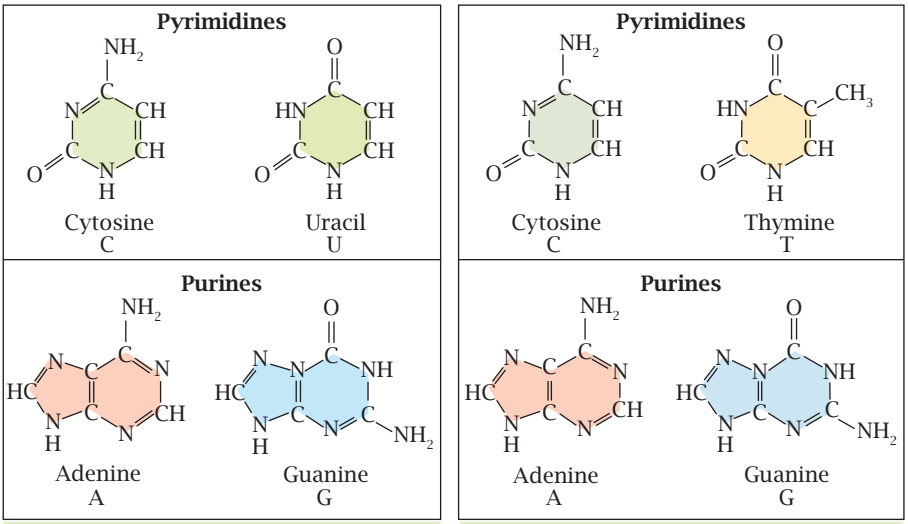
النكليوتيدة الواحدة تتألَّف من ثلاثة مكوِّنات هي: السكَّر الخماسي رايبوز (Ribose) في حالة الـ RNA أو السكَّر الخماسي رايبوز المنقوص الأوكسجين (Deoxyribose) في حالة الـ DNA، ومجموعة فوسفات وقاعدةٌ نووية (Nucleobase) (شكل ٤-٢١). ثمَّة أربعة أنواعٍ من القواعد النووية؛ اثنان منها من البيورينات (Purines) التي جُزيئتها تكون

ثنائية الحلقة وهما: الأدنين (Adenine) والكوانين (Guanine)، واثنان من البريميدينات (Pyrimidines) وتتألَّف جُزيئتها من حلقةٍ واحدة. وهما السايتوسين (Cytosine) والثيامين (Thymine) في حالة الـ DNA واليوراسيل (Uracil) بدل الثيامين في حالة الـ RNA (شكل ٤-٢٢).



شكل ٤-٢١: تركيب النكليوتيدة في جُزيئات الـ DNA والـ RNA.

ترتبط مجموعة الفوسفات بمجموعة الهيدروكسيل لجُزيئة السكَّر بآصرةٍ فوسفاتيةٍ ثنائية الإستر في ذرة الكاربون ٥′ من نكليوتيدة ومجموعة الهيدروكسيل لجُزيئة السكَّر في ذرة الكاربون ٣′ في النكليوتيدة التالية. وترتبط جُزيئة إحدى القواعد النووية بآصرةٍ تساهميةٍ مع ذرة الكاربون رقم ١ من جُزيئة السكَّر.



شكل ٤-٢٢: القواعد النووية في جُزيئات الـ DNA والـ RNA.

(ف) DNA

تمثل الـ DNA المادة الوراثية لجميع أنواع الخلايا وأنواع من الفايروسات؛ حيث تحتوي على المعلومات اللازمة لبناء مكوِّنات الخلية وعملها، وهي قادرةٌ على حفظ هذه المعلومات ونقلها إلى الخلايا الجديدة باستمرار.

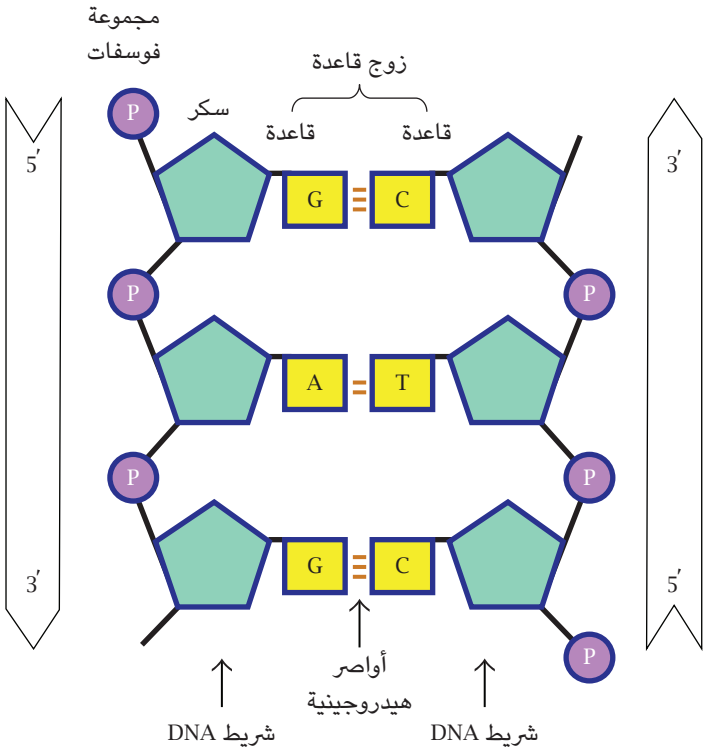
تُوجد الـ DNA أساسًا في النواة. كما تُوجد بكمياتٍ محدودةٍ في كلٍّ من الميتاكوندريا والبلاستيدات في الأحياءِ الحقيقيةِ النواة. في الأحياءِ البدائيةِ النواة مثل البكتيريا تُوجد الـ DNA في السايتوبلازم.

الـ DNA جُزيئةٌ طويلةٌ جدًّا مقارنة بأبعاد الخلايا؛ فطول جُزيئة DNA معزولة من أحد الكروموسومات في خليةٍ بشريةٍ وممدودة يساوي ٣سم أو ٣٠٠٠٠مكم، علمًا أن قطر الخلية البشرية النموذجية يُساوي ١٠مكم. وطول جُزيئة DNA من خلية البكتيريا يساوي ١ملم أو ١٠٠٠مكم، علمًا أن طول الخلية البكتيرية لا يتجاوز ٢مكم. هذا يعني أن طول جُزيئة DNA البشرية يزيد عن طول الخلية الموجودة فيها بـ ٣٠٠٠ مرة، وطول DNA البكتيريا يزيد عن طول الخلية الموجودة فيها بـ ٥٠٠ مرة. هذه الحالة تتطلب

بالضرورة أن تضغط جُزيئة الـ DNA عن طريق البرم والبرم المضاعف، لتقصر بحدود ١٠٠٠٠ مرة، لتكون بطول الكروموسوم في الخلايا الحقيقيةِ النواة أو أقصر من طول خلية البكتيريا. ومع أن جُزيئة DNA طويلةٌ جدًّا، إلا أن سُمكها (أو قطرها) صغيرٌ جدًّا؛ فهو يساوي ٢نـ م فقط (Calladine *et al.*, 2004).

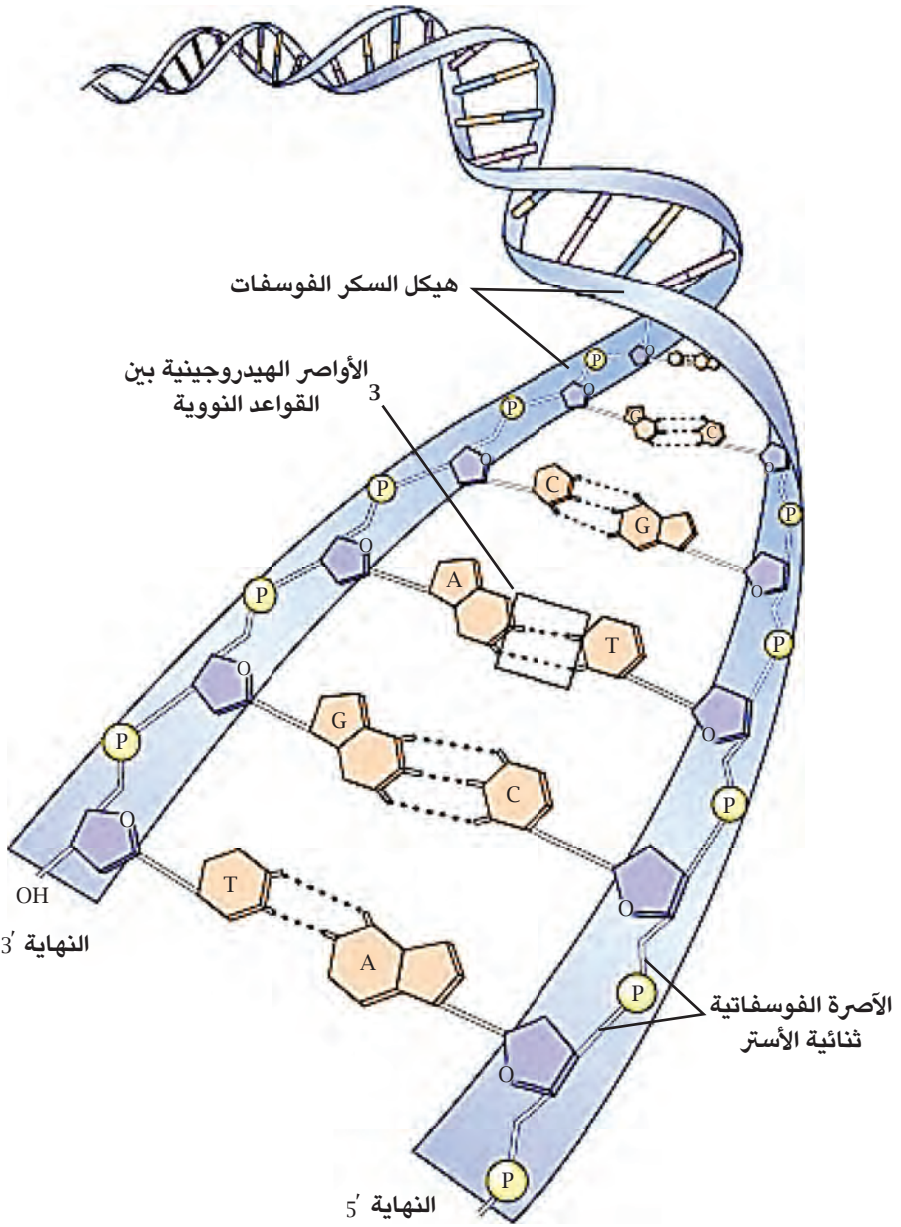
امتدادات أو مناطق من جُزيئة الـ DNA تمثِّل الجينات التي تكونُ مسئولةً عن تشفير البروتينات أو جُزيئات RNA. تتحكَّم الـ DNA في فعاليات الخلية من خلال تشغيل أو إيقاف عمل الجينات. تُوجد الـ DNA بشكل شريطٍ لولبيٍّ مزدوج (Double helix). كل شريط يتكوَّن من سلسلة نكليوتيدات تكون فيها مجاميع الفوسفات وجُزيئات السكَّر المرتبطة بها إلى الخارج والقواعد النووية المرتبطة بجُزيئات السكَّر والمضغوطة على بعضها بفواصل قدرها ٠,٣٤ نانومتر إلى الداخل. الشريطان متوازيان ومُتعاكِسَا الاتجاه حيث تُقابِل ذرة الكاربون ٥′ من شريط ذرة الكاربون ٣′ من الشريط المُقابِل. وترتبط قاعدةٌ نوويةٌ بيورينية من شريط مع قاعدةٍ بريميدينيةٍ متممةٍ من الشريط الآخر بواسطة أواصرَ هيدروجينية. هذا يُحافِظ على انتظامِ سُمكِ الشريط اللولبي المزدوج. في جُزيئة الـ DNA القاعدة النووية البيورينية أدنين والقاعدة النووية البريميدينية ثيامين قاعدتان مُتتامَّتان ترتبطان بزوجٍ من الأواصر الهيدروجينية، والقاعدة النووية البيورينية كوانين والقاعدة النووية البريميدينية سايتوسين قاعدتان مُتتامَّتان ترتبطان بثلاثِ أواصرَ هيدروجينية (شكل ٤-٢٣). الواضح أن تركيب النكليوتيدات وارتباطاتها مع النكليوتيدات الأخرى ضمن الشريط الواحد بأواصرَ قويةٍ يصعُب كسرها، أما ارتباط الشريطَين المزدوجَين فيكون أقل قوة، ما يُمكِّن من فك الشريطَين وإعادة ارتباطهما بسهولةٍ أكبر، وهو ضروري لتضاعُف ونسخ جُزيئة الـ DNA.

الجدير بالملاحظة أن وحدات السكَّر ومجاميع الفوسفات لا تتغيَّر في جميع النكليوتيدات التي تشكِّل شريطَي الـ DNA لذلك فهي لا تحمل معلوماتٍ (Information) مهمة؛ فالمعلومة تنتُج عن وجود اختلافٍ أو تقابُل مثل ٠ و١ أو + و– أو أدنين وثيامين ... إلخ. إن دَور هذه الوحدات هو تكوينُ هيكلٍ محوريٍّ يحمل ويثبِّت القواعد النووية ويمكِّن من الأشكال الفراغية المتغيِّرة لجُزيئة الـ DNA (شكل ٤-٢٤). أما القواعد النووية كونها مختلفة فإن كل قاعدتَين في السلسلة تُشكِّل بِت معلومات (A C C G T A T T) ولوجود أعدادٍ كبيرةٍ جدًّا منها وتَغيُّر أنماط قراءتها فإنها توفِّر المعلومات الوراثية وتحفظها.

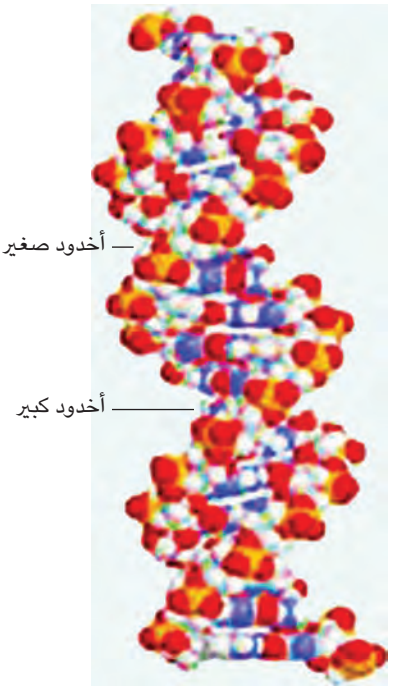


شكل ٤-٢٣: توضيح ترتيب واتجاه شريطَي الـ DNA.

يتضح من الشكلَين ٤-٢٣ و٤-٢٤ أن جُزيئات الفوسفات خارجيةُ الموقع، وهي مشحونة؛ وبالتالي يمكن أن ترتبط مع جزيئات الماء المحيط بأواصرَ هيدروجينية، بينما لا يحصُل ذلك مع القواعد النووية الداخلية المواقع. بسبب أن الآصرتَين اللتَين تربطان القاعدتَين النتروجينيَّتَين مع جُزيئتَي السكَّر ليستا متقابلتَين تمامًا، فإن هيكل الجُزيئة السكَّري الفوسفاتي لا يتباعد بالتساوي. هذا يؤدِّي إلى نشوء ما يُعرف بالأُخدود الكبير (Major groove) والأُخدود الصغير (Minor groove) في التركيب الفراغي لجُزيئة الـ DNA (شكل ٤-٢٥). هذا يمكِّن جُزيئات البروتين من الارتباط بجُزيئة الـ DNA من خلال الأُخدود الكبير. ينتُج عن ذلك نشوءُ أواصرَ هيدروجينيةٍ بين ذرَّات الأحماض الأمينية الجانبية



شكل ٤-٢٤: توضيح التركيب اللولبي المزدوج لشريطَي الـ DNA.



شكل ٤-٢٥: الأخدود الكبير والأخدود الصغير في جزيئة الـ DNA.

لهذه البروتينات مع أزواج القواعد النتروجينية بطريقةٍ تختلف من زوجٍ لآخر؛ وبالتالي ستتعرَّف البروتينات المرتبطة على تتابُع القواعد النتروجينية.

طول جُزيئة الـ DNA الخلَوية يمكن أن يصل إلى بضع مئات ملايين النكليوتيدات. ويُستخدَم عدد أزواجِ النكليوتيدات (زق أو bp) كمقياسٍ لطول الـ DNA المزدوجة، وعادةً يستخدم الألف زوج قاعدة (ك زق أو kbp أو kp) كوحدة لطول. أو مجازًا لحجم جُزيئة الـ DNA.

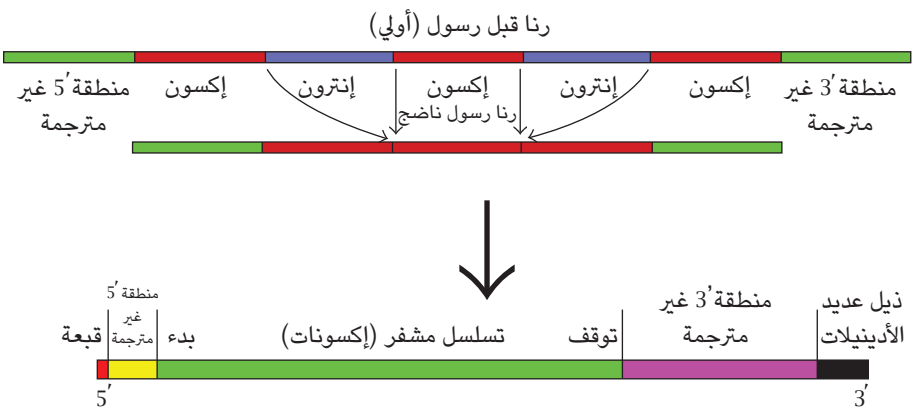
(ص) RNA

تُوجد جُزيئات الـ RNA في الغالب كشريطٍ مفرد، إلا أنه يمكن أن ينطوي على نفسه في مناطقَ معيَّنة ويكون شريطًا مزدوجًا من خلال الأواصر الهيدروجينية بين القواعد النووية المتتامَّة. يتراوح طول جُزيئة RNA بين أقل من ١٠٠ إلى عدة آلاف من النكليوتيدات.

في الأحياء الحقيقيةِ النواة تتكوَّن جزيئات RNA في النواة وتنتقل إلى السايتوبلازم حيث تلعب أدوارًا أساسيةً في عملية تخليق البروتينات. ثمَّة أربعةُ أنواعٍ أساسية من جُزيئات RNA هي: RNA الرسول (Messenger RNA اختصارًا mRNA) وRNA الناقل (Transfer RNA اختصارًا tRNA) وRNA الرايبوسومي (Ribosomal RNA اختصارًا rRNA) وRNA الصغير (microRNA).

تتكوَّن جُزيئات RNA في النواة بواسطة الإنزيم RNA polymerase بنسخ امتداداتٍ من شريطٍ مُفرَدٍ لجُزيئة الـ DNA التي تعمل كقالب وتُنتِج جُزيئات RNA كشريطٍ مُفردٍ متمم. أغلب أنواع RNA تكون من نوع rRNA.

تتكوَّن جُزيئات mRNA وtRNA الأولية في حقيقياتِ النواة، وتحصُل لها عمليةُ معالجةٍ حيث يتم تقطيع واستبعاد التتابُعات غير المشفَّرة (Introns) وتضفير أو ربط التتابُعات المشفَّرة، (Exons) ثم تحصُل لها عمليةُ تقبيعٍ في النهاية ٥′ وتذييل بعديد الأدينيلات في النهاية ٣′ وتُصبح جُزيئة RNA ناضجةً، ثم تُغادر النواة إلى السايتوبلازم (شكل ٤-٢٦).



شكل ٤-٢٦: عمليةُ معالجةِ RNA الأولى.

يحتوي RNA الرسول على سلسلة القواعد النووية المتمِّمة للقواعد النووية في الـ DNA واللازمة لتكوين البروتين. تتركَّب قطعتا الرايبوسوم على شريط RNA الرسول وتقرأ القواعد النووية المتتابعة عليه كشفرات (Codones)؛ حيث تتمثَّل الشفرة بثلاثِ

قواعدَ نوويةٍ متتابعة من قِبَل طرف RNA الناقل الذي يلج الرايبوسوم المعروفة بالشفرة المضادة (Anticodon). يجب أن تكون القواعد النووية الثلاثة التي تتألَّف منها الشفرة المضادة لـ RNA الناقل متممة للشفرة على RNA الرسول.

تحمل كل جُزيئة RNA الناقل في طرفها الحر أحد الأحماض الأمينية حسب شفراتٍ محدَّدةٍ لكل حامضٍ أمينيٍّ وفي موقعٍ محدَّدٍ على الرايبوسوم. ترتبط الأحماض الأمينية المتجاورة في حركتها المتتالية على الرايبوسوم بواسطة إنزيم لتكوِّن عديد الببتيد أو البروتين الذي ينفصل عن الرايبوسوم بعد الوصول إلى شفرة النهاية على mRNA.

RNA الرايبوسومي يشترك مع بعض البروتينات في تكوين الرايبوسوم.

(٤) الخلية The Cell

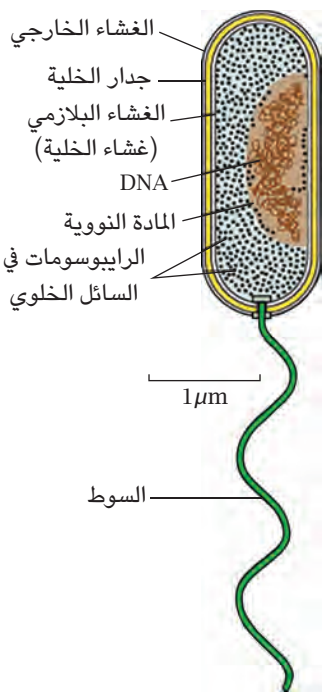
الخلية هي الوحدة الأساسية للحياة، وجميع الكائنات الحية تتألف من خليةٍ واحدةٍ أو أكثر، وإن الخلايا الجديدة تنشأ من خلايا موجودةٍ قبلها. ومع اختلاف الخلايا من حيث المظهر الخارجي، وتفاصيل التراكيب الداخلية، إلا أنها جميعًا تشترك في كونها منظوماتٍ عضويةً معزولة عن البيئة بحواجز تسمح لها بتبادُل المواد والطاقة والمعلومات مع البيئة، وبذلك فهي منظوماتٌ معقَّدةٌ مفتوحة.

الخلايا عمومًا منظوماتٌ صغيرةٌ مِجهَرية يتراوح عَرضُها بين ١ إلى ١٠٠مك (ميكرومتر) تحتوي على تراكيبَ أصغرَ تُقاس أبعادها بالنانومترات في وسطٍ مائيٍّ مكتظٍّ بالجُزيئات المختلفة. صِغَر الخلية ومكوِّناتها يُكسِبها مساحاتٍ سطحيةً هائلة مقارنةً بالحجوم، ويُظهِر الفعاليات غير العادية للمكوِّنات النانوية الأبعاد، إضافةً إلى خواص الماء المتنوِّعة، وتآثُر هذه العوامل كلها بالإضافة إلى الظواهر الكمومية (التي سنناقشها لاحقًا) يؤدي إلى انبثاق (Emergence) فعالياتٍ وخواصَّ فريدةٍ لا تتمكَّن المنظومات غير الحية من إظهارها. تتمثَّل هذه الخواص بالتحسُّس (Sensitivity) والنمو (Growth) والتكاثر (Reproduction) وحفظ النوع (Survival).

تُميَّز الخلايا إلى مجموعتَين هما: الخلايا البدائية النواة (Prokaryotic cells) والتي تفتقد الخلية فيها للنواة وللعُضيَّات الخلَوية الأخرى. الأحياء البدائية النواة تضُم البكتيريا (Bacteria) والأركيا (Archaea). والخلايا الحقيقية النواة (Eukaryotic cells) حيث تمتلك الخلية فيها النواة والعُضيَّات الخلَوية الأخرى. الأحياء الحقيقية النواة تشملالأوَّليَّات (Protista) والفطريات (Fungi) والنباتات (Plants) والحيوانات (Animals). على الرغم

من أن التمييز أو التقسيم أعلاه يُشير إلى أن الخلايا الحقيقية النواة هي أكثرُ تعقيدًا وتطوُّرًا مقارنةً بالخلايا البدائية النواة، إلا أنها جميعًا عالية التعقيد والتنظيم الخاص للجُزيئات والتراكيبِ المكوِّنة لها. وعلى الرغم من التنوُّع الهائل في مظهر وحجم ومحتويات وفعاليات الخلايا إلا أنها تشترك في العديد من الخواص التركيبية والوظيفية الأساسية، وأنها تطوَّرَت عن خليةٍ أوليةٍ (Protocell) بدائية. الكائن الحي يمكن أن يتألَّف من خليةٍ واحدة، مجموعة خلايا متجمِّعة، أو عدد هائل من الخلايا المتنوِّعة قد يصل إلى ١٠ ترليون خلية كما في الإنسان.

(٤-١) الخلية البدائية النواة Prokaryotic Cell



شكل ٤-٢٧: رسمٌ تخطيطيٌّ مع مقياس رسمٍ لخليةٍ بكتيرية. مُحوَّر عن: Milo & Fillips (2015).

الخلية البدائية النواة تمثِّل الوحدة التركيبية، أو جسم البكتيريا الحقيقية (Eubacteria) والبكتيريا الخضراء المزرقة (Cyanobacteria) والأركيا (Archaea). هذه الخلايا هي الأصغر بين خلايا الكائنات الحية بأبعاد ١–٢مك، وتكون مفردةً في الغالب أو مزدوجةً أو في تجمُّعاتٍ قليلةٍ كما في البكتيريا الحقيقية، أو بشكل سلاسلَ كما في البكتيريا الخضراء المزرقة، وهي على العموم محدودة التنوُّع التركيبي والوظيفي مقارنةً بالأحياء الحقيقية النواة. مع ذلك توجد آلاف الأنواع من هذه المجاميع من الأحياء. أنواعٌ قليلةٌ من البكتيريا الحقيقية تكون ذاتية التغذية؛ حيث تتمكَّن من الحصول على الطاقة عن طريق أكسدةِ موادَّ مختزلة. أنواعٌ أخرى منها وكل أنواع البكتيريا الخضراء المزرقة، وبعض أنواع الأركيا تتمكَّن من استغلال طاقة ضوء الشمس عَبْر التركيب الضوئي. أما غالبية أنواع البكتيريا والأركيا الأخرى، فتحصُل على الطاقة من خلال أكسدة المركَّبات العُضوية الميتة أو من أنسجة الكائنات الحية.

تعيش البكتيريا في جميع البيئات على الأرض، بما فيها المياه والتربة والهواء، وهي أكثر أنواع الأحياء انتشارًا؛ حيث يمكن أن تُوجد على عمقٍ يصل إلى ٧ أميال في مياه المحيط وعلى ارتفاع يصل إلى ٤٠ ميلًا في الغلاف الجوي. ويُقدَّر عدد خلايا البكتيريا على الأرض بـ ٥ × ٣٠١٠ بوزن يبلُغ مليار طن، كما يُقدَّر مخزون الكاربون في البكتيريا بقَدْر المخزون منه في النباتات (Lodish *et al.*, 2003).

الأركيا تعيش في البيئات المتطرِّفة كالمناطق الشديدة الملوحة، والتي يصل تركيز الأملاح فيها إلى ٤٠٪، أو الشديدة الحموضة؛ حيث يمكن أن تصل الـ pH إلى ٢ أو انعدام الأوكسجين. تتمكَّن الأركيا من تكوين غاز الميثان من ثاني أوكسيد الكاربون والماء.

شكل الخلية البكتيرية يكون في الغالب عَصَويًّا (Bacillus) أو كُرويًّا (Coccus) ويمكن أن يكون مُكعَّبًا أو لولبيًّا.

تتألف الخلية البكتيرية من جدارٍ قوي، يتكوَّن من الببتيدوكلايكان (Peptidoglycan) وهي موادُّ سكَّرية مع وحداتٍ بروتينية. تبرُز من الجدار الكثير من التراكيب الخيطية القصيرة التي تُسمَّى الأهداب، (Cilia) والتي تساعد على التشبُّث بالأرضية، ويمكن أن يكون لها دَورٌ في عملية التزاوُج. وفي البكتيريا المتحرِّكة يمكنُ أن يُوجد سوطٌ (Flagellum) واحدٌ أو أكثر يمكِّن من الحركة الانتقالية (شكل ٤-٢٧). بعض أنواع البكتيريا خاصة المرضة منها تكوِّن مَحفظةً (Capsule) تُحيط بالجدار من الخارج وتتألَّف من موادَّ سكريةٍ معقدةٍ توفِّر الحماية للخلية.

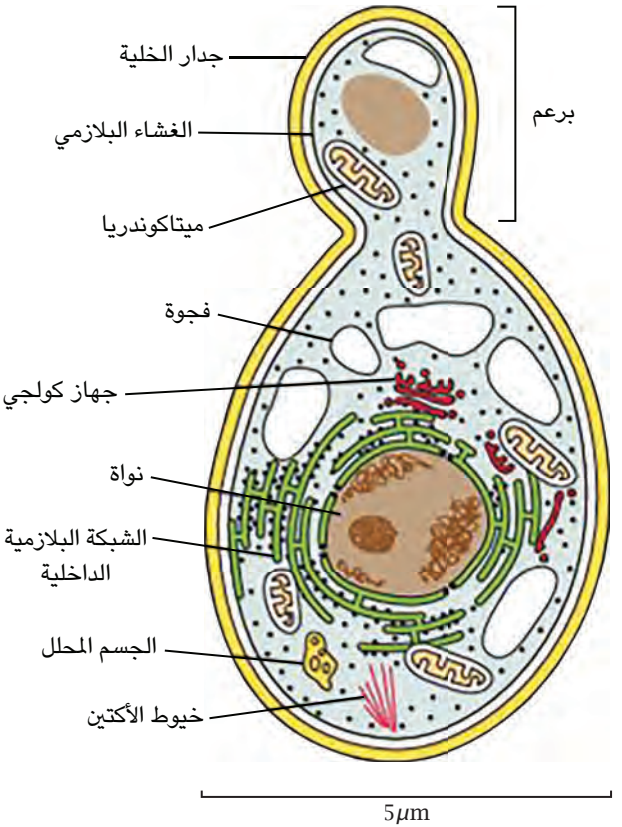
يحتضن جدار الخلية السايتوبلازم وهو محلولٌ غرويٌّ كثيف يُحاط من الخارج بغشاء الخلية كما هو الحال في الأحياء الحقيقية النواة. كما يُشابِه غشاءُ الخلية في تركيبه الأساس نظيره في الأحياء الحقيقية النواة؛ كونَه يتألَّف من طبقتَين من الشحوم وتتوزَّع فيه بعض البروتينات. غشاء الخلية البكتيرية يفتقد الستيرولات مثل الكوليسترول التي تكون موجودةً في حقيقيات النواة. كما تُوجد على غشاء الخلية البكتيرية العديد من الإنزيمات والتي تكون موجودة في الغالب في العُضيَّات الخلَوية في الأحياء الحقيقية النواة. وينظِّم غشاءُ الخلية دخول وخروج الجُزيئات المختلفة بطريقةٍ انتخابيةٍ مثلما هو الحال في الأحياء الحقيقية النواة.

يحتوي السايتوبلازم على آلاف الرايبوسومات، وهي التراكيب المسئولة عن تخليق البروتينات مثلما في حقيقيات النواة، إلا أنه يكون من نوع 70S بينما يكون 80S في الأحياء الحقيقية النواة.

جُزيئة الـ DNA في البكتيريا تكون مزدوجة الشريط أيضًا، وهي طويلةٌ تفوق طول الخلية بأضعاف المرات؛ لذا فهي تنطوي وتنضغط كما أنها تكون مغلقة وتتصل في نقطة على غشاء الخلية؛ ففي البكتيريا المعروفة *Escherichia coli* التي يبلغ طولها ٣-٤مك يصل طول جُزيئة الـ DNA إلى ١٤٠٠مك (Hogg, 2005). يتراوح حجم الجينوم البكتيري من ١٣٠ك ز ق إلى ١٤ مليون زق (McCutcheon *et al.,* 2011; McCutcheon *et al.,* 2014) ويتراوح عدد الجينات في البكتيريا الحرة المعيشة بين ١٥٠٠ إلى ٧٥٠٠ جين وفي الأركيا بين ١٥٠٠ إلى ٢٧٠٠ جين (Gregory, 2005).

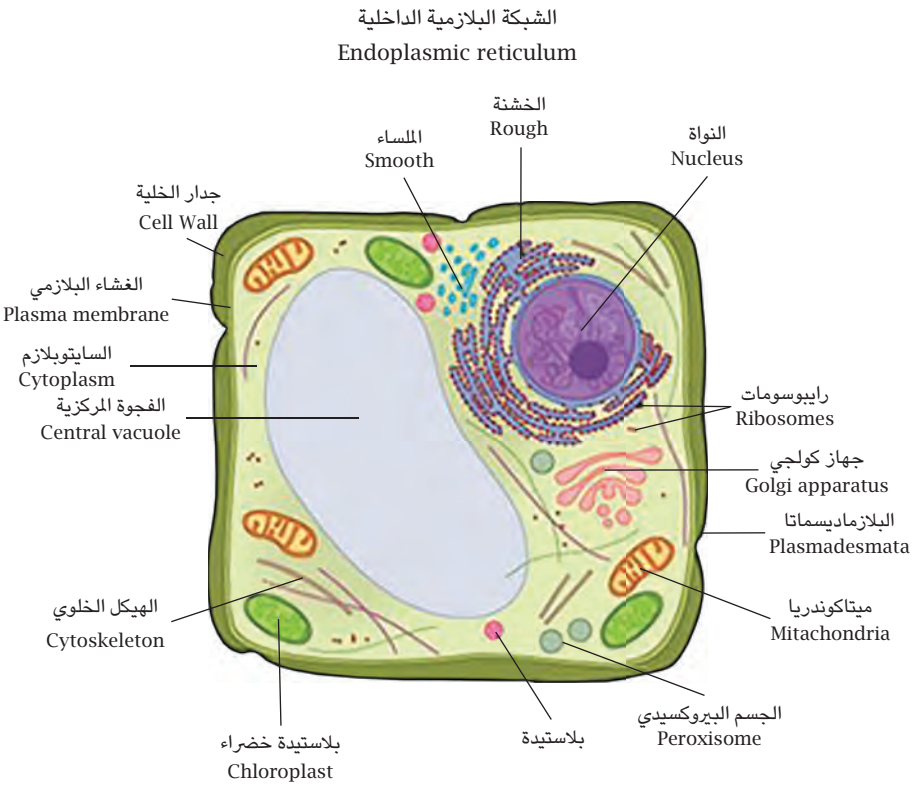
(٤-٢) الخلية الحقيقية النواة Eukaryotic Cell

الخلية الحقيقية النواة هي الوحدة البنائية لمجموعة الأحياء الحقيقية النواة. تمتاز هذه الخلية باحتوائها على منظوماتٍ صغرى، كلٌّ منها مُحاطٌ في الغالب بغشاءٍ مزدوجٍ وتؤدي وظيفة أو مجموعة وظائفَ محدَّدة وتُعرف بعُضَيات الخلية (Cell organelles). كما تضُم الخلية الحقيقية النواة هيكلًا خلَويًّا. يُعتقَد أن نشوء الخلية الحقيقية النواة حصل نتيجة الاندماج والتعايُش بين خلايا بدائية النواة عَبْر مسارٍ تطوري، إحداها أصبح الخلية والباقي فقد الكثير من مكوِّناته وتخصَّص في أداء وظيفة أو بعض الوظائف المترابطة فتحوَّل إلى عُضيَّات. إن حجم الخلية الحقيقية النواة أكبر من الخلية البدائية



شكل ٤-٢٨: رسمٌ تخطيطيٌّ مع مقياسِ رسمٍ لخلية الخميرة. مُحوَّر عن: Milo & Fillips (2015).

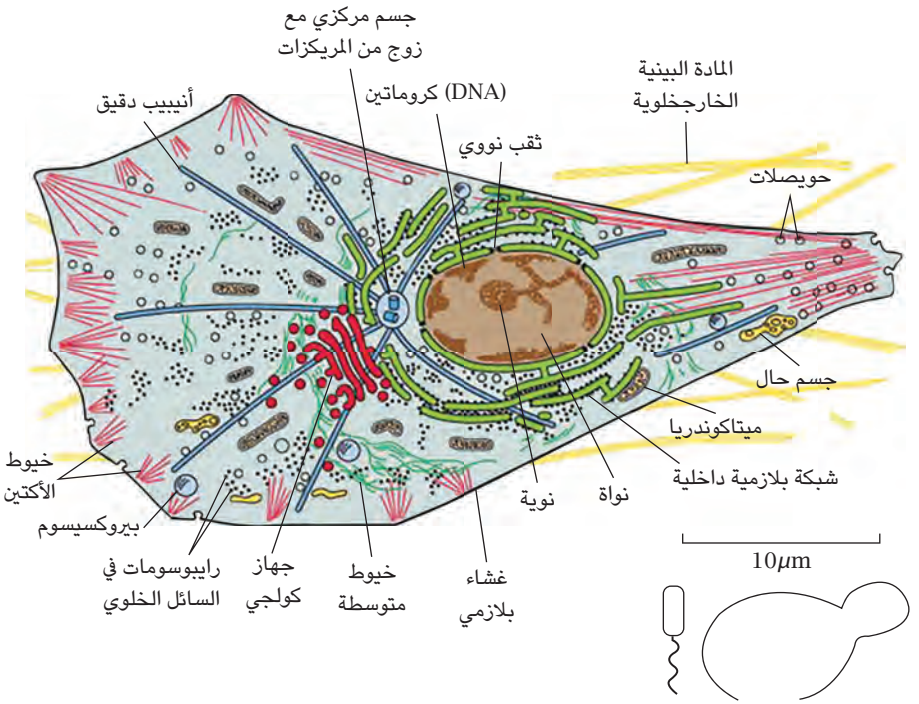
النواة بحوالي ١٠٠٠٠ مرة. والمادة النووية التي تكون في النواة منظَّمة في كروموسومات عددها ٢ في الأقل إلى عشرات الكروموسومات. معظم الخلايا الحقيقية النواة مِجهَرية قطرها حوالي ١٠مكم، لكنْ أنواعٌ قليلةٌ منها تكون كبيرةً مثل بيوض الطيور والزواحف. وعلى الرغم من وجود تشابهٍ كبيرٍ جوهري بين خلايا الأحياء الحقيقية النواة (الأشكال ٤-٢٨ – ٤-٣٠)، إلا أنها يمكن أن تتخذ أشكالًا وتراكيبَ مميَّزة وتؤدي وظائفَ عامةً أو متخصِّصة.



شكل ٤-٢٩: رسمٌ تخطيطيٌّ لتركيب الخلية النباتية.

(أ) جدار الخلية Cell Wall

يُوجد جدار الخلية في جميع أنواع الخلايا عدا الخلايا الحيوانية والحيوانات الابتدائية (Protozoa) والخلايا المتحرِّكة في الأحياء الأخرى. وهو تركيبٌ سميكٌ يتألَّف بالأساس من الكاربوهيدرات المعقَّدة مع بعض المشتقَّات النتروجينية والبروتينات. مع ذلك يختلف التركيب الكيميائي لجدار الخلية، ويكون مميَّزًا في مجاميع الأحياء المختلفة؛ ففي النباتات يتألَّف بشكلٍ رئيسي من السليلوز والبكتين واللكنين وفي الفطريات من الكلوكونات والمانانات والكايتين وفي الطحالب من السليلوز والمانان والزايلان والأكار وغيره. يسمح



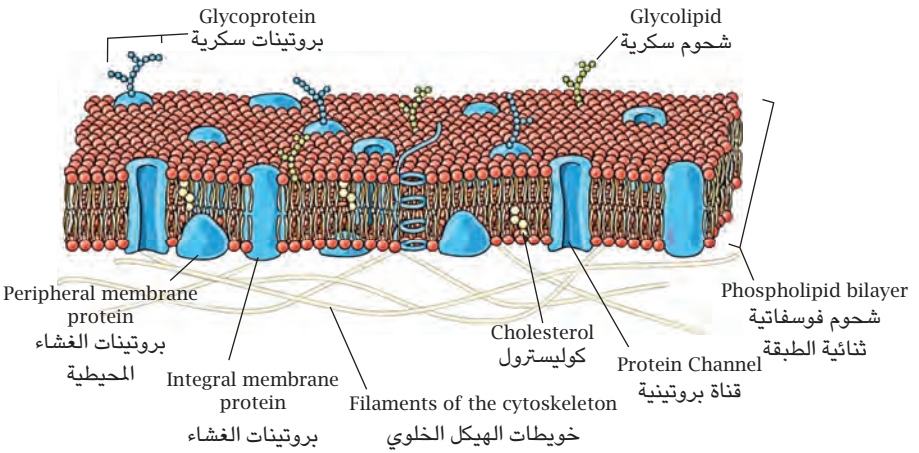
شكل ٤-٣٠: رسمٌ تخطيطيٌّ مع مقياسِ رسمٍ لتركيب الخلية الحيوانية. مُحوَّر عن: Milo & Fillips (2015).

جدار الخلية بعبور جميع أنواع الجُزيئات إلا أنه يُمكِن أن يُعيق عُبور الكتل الجُزيئية الكبيرة. الوظيفة الرئيسة للجدار هي حمايةُ محتوياتِ الخلية، وتحديدُ شكلِ الخلية، ويشترك في تنظيم الأزموزية والعلاقات المائية.

(ب) السايتوبلازم Cytoplasm

يتمثَّل السايتوبلازم بمحلولٍ مائيٍّ غَروي كثيف، يُعرف بالسائل الخلَوي (Cytosol) يحتوي على الكثير من الأيونات والجُزيئات اللاعضوية والعضوية والعديد من عُضيَّات الخلية، ويُحاط السايتوبلازم بغشاء الخلية.

(ج) غشاء الخلية Cell Membrane



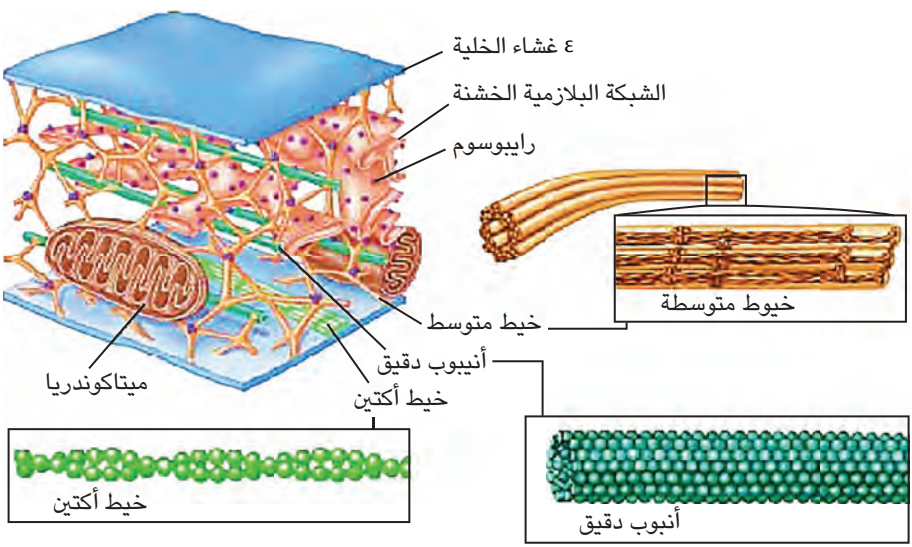
شكل ٤-٣١: رسمٌ تخطيطيٌّ لغشاء الخلية.

غشاء الخلية هو التركيب الذي يُحيط بمحتويات الخلية، وهو الفاصل والواصل بينها والبيئة الخارجية بما فيها الخلايا المجاورة. بدون غشاءِ خليةٍ لا تُوجد خلية؛ أي لا تُوجد حياة. يتألَّف غشاء الخلية من طبقتَين من الشحوم الفوسفاتية بسُمكِ جُزيئتَين (٥ن م). جزيئة الشحوم الفوسفاتية تتألف من رأسٍ مستقطبٍ محبٍّ للماء وذيلٍ غيرِ مستقطبٍ كارهٍ للماء. وحيث إن الخلية وغشائها في تماسٍّ مع الماء، ستترتَّب جُزيئاتُ الشحوم الفوسفاتية حيث رءوس الجُزيئات في الطبقة الخارجية والطبقة الداخلية المواجهة للماء وذيول الجُزيئات تتجه إلى داخل الغشاء. إضافةً إلى الشحوم الفوسفاتية يحتوي غشاء الخلية في الحيوانات والنباتات على جُزيئات الكوليسترول وفي الفطريات جُزيئات الأركسترول للتحكُّم في مستوى سيولة الغشاء. تتخلَّل طبقتَي الشحوم عددٌ من البروتينات، التي تعمل كقنواتٍ أيونية، وبروتينات ناقلة متخصصة في نقل الجزيئات المختلفة، إضافةً إلى بعض الشحوم السكَّرية التي تتمكَّن من التعرُّف على النسيج والبروتينات السكَّرية التي تتمكَّن من التعرُّف على الذات. بروتينات الغشاء المختلفة تقوم بوظائفَ متعدِّدة؛ منها النقل، النشاط الإنزيمي، المستقبلات لموادَّ مختلفة، الموسمات المحدِّدة لهُوية الخلية،

البروتينات اللاصقة لربط الخلايا المتجاورة والبروتينات الرابطة للغشاء مع خويطات الهيكل الخلَوي (شكل ٤-٣١).

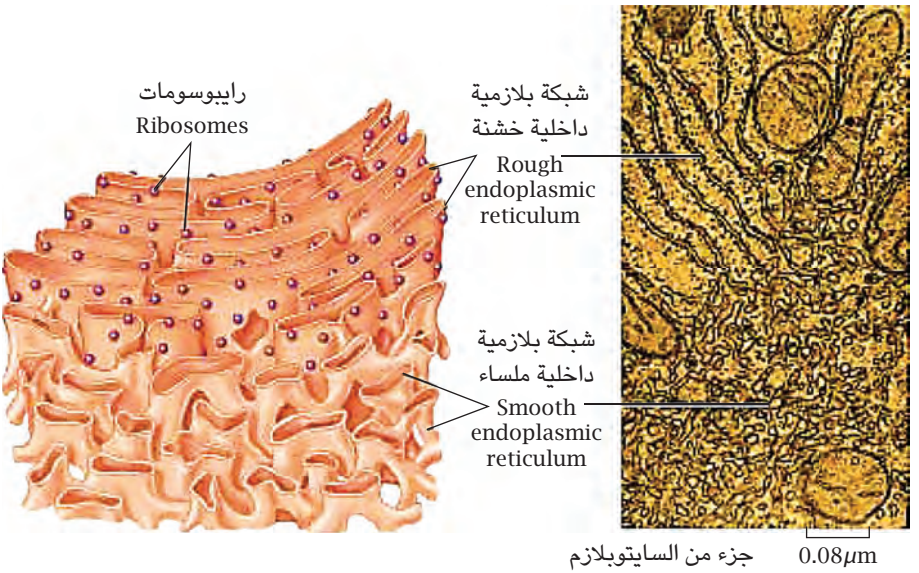
تمُر الجُزيئات غير المستقطبة مثل O_2 وCO_2 من خلال طبقتَي الشحوم، بينما تمُر الجُزيئات المستقطبة مثل الأحماض الأمينية والسكَّريات وغيرها بمساعدة بروتينات الغشاء، وتمُر جزيئاتُ الماء من خلال قنواتٍ خاصة (Aquaporine)، وتعبر الأيونات مثل H^+ وNa^+ وK^+ وCa^+ من خلال القنوات الأيونية المتخصصة. وبسبب التوزُّع غير المتجانس للأيونات على السطح الخارجي والسطح الداخلي للغشاء بفعل عمل بعض القنوات الأيونية يعمل غشاء الخلية كبطارية تُجهِّز جُزيئات ATP الغنية بالطاقة.

(د) الهيكل الخلَوي Cytoskeleton



شكل ٤-٣٢: رسمٌ تخطيطيٌّ لمكوِّنات الهيكل الخلَوي.

يحتوي السايتوبلازم على شبكة من البروتينات الليفية توفِّر هيكل الخلية، وتُموضِع عُضيَّات الخلية فيه، وتُمكِّن من التغيير السريع لشكل الخلية، كما تُوفِّر مسالك لنقل الجُزيئات داخل الخلية. تتشكَّل هذه البروتينات كبوليمرات من ارتباط وحداتٍ متماثلة



شكل ٤-٣٣: صورة بالمِجهَر الإلكتروني لجزء من السايتوبلازم (يمين) مع رسمٍ تخطيطيٍّ للشبكة البلازمية الداخلية (يسار).

تلقائيًّا، ويمكن أن تتحلَّل إلى وحداتُها المكوِّنة حسب حاجة الخلية. ثمَّة ثلاثة أنواعٍ من هذه الخيوط الهيكلية:

خيوط الأكتين (Actin): وتكون بشكل لُييفاتٍ طويلةٍ قطرها ٧ن م، وكل لُييف هو سلسلة من البروتين الكروي الأكتين. يتشكَّل الخيط الأكتيني من التفاف لُييفَين اثنَين حول بعضهما. تعمل خيوط الأكتين في الحركة كالتقلُّص والتمدُّد.

الأُنيبيبات الدقيقة (Micrtubules): وهي أنابيبُ مجوَّفة قطرها الخارجي ٢٥ن م وقطرها الداخلي ١٥ن م، تتشكَّل من ارتباط حلقاتٍ كلٌّ منها يتألف من ١٣ وحدة، وكلٌّ من هذه الوحدات تتألَّف من جُزيئتَي بروتين كروي هي تيبيولين ألفا وتيبيولين بيتا. تمتد هذه الأُنيبيبات من مركز الخلية وتتحلَّل خلال دقائق أو ثوان؛ اعتمادًا على نشاط الخلية. تُساعد هذه التراكيب في الحركة والنقل ونقل العُضيَّات بتأثير بروتينات كاينسين (Kinesin) وداينين (Dynein).

الخيوط المتوسطة (Intermediate Filaments): وهي المكوِّن الأكثر بقاءً من مكوِّنات الهيكل الخلَوي وتتألَّف من بروتيناتٍ مختلفة بشكل خيوطٍ قطرها ٨–١٠ن م (شكل ٤-٣٣).

(هـ) الشبكة البلازمية الداخلية Endoplasmic Reticulum

وهي منظومةٌ من الأغشية تتألَّف من طبقتَين من الشحوم الفوسفاتية ومتضمِّنة بروتينات تشغل حيزًا واسعًا من السايتوبلازم، وتمتزج سطوحها مع عصارة الخلية. تنطوي هذه الأغشية فتقسم السايتوبلازم إلى رَدَهات، وبين طيَّات الأغشية تتكوَّن قنواتٌ عديدة (شكل ٤-٣٣). تُوفِّر هذه الأغشية وما تُشكِّله من مستودعاتٍ وقنواتٍ مجالاتٍ لحركة الجُزيئات وانتقالها في الخلية، كما تُوفِّر السطوح الملائمة لحصول التفاعُلات الكيميائية وتكوين ونقل مركَّباتٍ مهمة؛ مثل البروتينات والشحوم والسكريات. يتركَّز توزُّع الرايبوسومات على العديد من هذه الأغشية، وفي هذه الحالة تُسمَّى بالشبكة البلازمية الداخلية الخشنة لمظهرها الحُبيبي؛ حيث تتكوَّن البروتينات على سطوحها ثم تنتقل إلى تجاويفِ الشبكة؛ حيث تنتقل إلى أجسام كولجي لمعالجتها. النوع الآخر من الشبكة البلازمية يقل فيه وجود الرايبوسومات، فتُعرَف بالشبكة اللازمية الداخلية الملساء، وتكون موضعًا لتكوين الشحوم والسكَّريات.

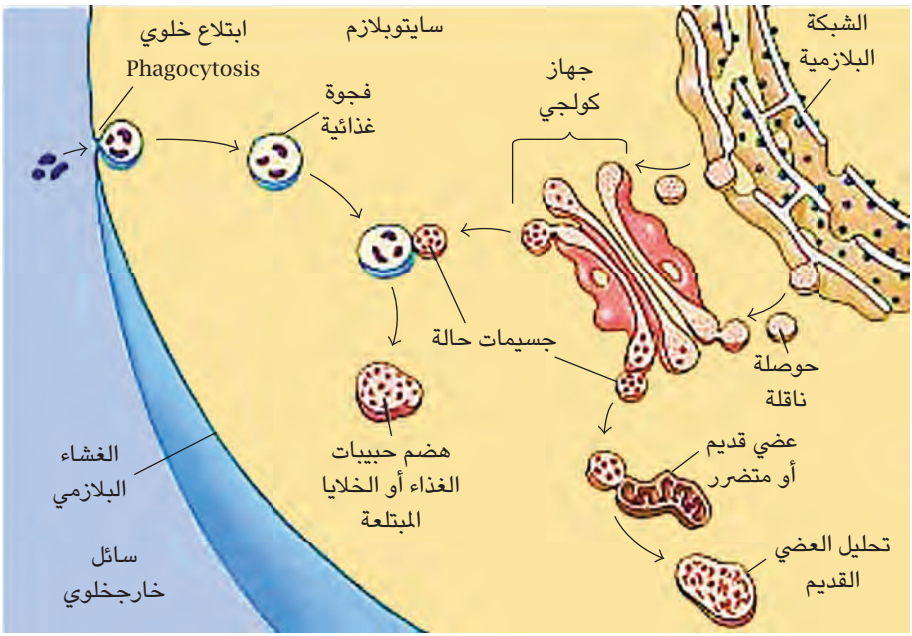
(و) جهاز كولجي Golgi Apparatus

يتألَّف جهاز كولجي في معظم خلايا الأحياء الحقيقية النواة من أغشيةٍ تُشكِّل مجموعة أكياسٍ منضَّدة، وحويصلاتٍ على حواف أو قرب الأكياس (شكل ٤-٣٤). غير أن عدد هذه التراكيب يختلف بين مجاميع الأحياء فقد يكون واحدًا كما في الأوَّليَّات و٢٠ في الإنسان وعدة مئاتٍ في النبات. كما يختلف ترتيبُها فقد تكون مبعثرةً كما في الكثير من الفطريات. الوظيفة الرئيسة لجهاز كولجي هي معالجة وتعبئة وتوزيع البروتينات والدهون في الخلية. السطح القريب للأكياس من الشبكة البلازمية يُسمَّى *cis* حيث تُصدَّر إليه البروتينات من الشبكة البلازمية الخشنة والدهون من الشبكة البلازمية الملساء؛ حيث تُعالَج وتخرج مُعبأةً في حويصلاتٍ من السطح الخارجي البعيد عن الشبكة البلازمية، بعد إكمال معالجتها؛ حيث تُرسَل إلى مواقع استخدامها. المعالجة بمساعدة إنزيمات داخل الأكياس تتم بشكلٍ رئيسٍ عن طريق تكوين بروتيناتٍ سكَّرية وشحومٍ سكَّرية.

شكل ٤-٣٤: صورةٌ بالمِجهَر الإلكتروني لجهاز كولجي من خلية كلاميدوموناس يُظهِر الأكياس المنضَّدة مع الحُويصلات. عن: Biophoto Associates/science Photo Library.

(ز) اليحلول أو الجُسَيمات الحالَّة Lysosomes

اليحلولات أو الجُسيمات الحالَّة هي عُضيَّاتٌ خلَوية بهيئة حويصلاتٍ محاطة بغشاء، وتحوي إنزيماتٍ مُحلِّلَة لهضم البوليمرات المختلفة؛ كالسكَّريات المعقدة والشحوم والبروتينات والأحماض النووية. تمثِّل هذه العضيَّات الجهاز الهضمي للخلية حيث تُحلِّل دقائقَ المواد الغذائية والجراثيم كجُسيمات الفايروسات والخلايا البكتيرية وغيرها المبتلَعة من الخارج، وكذلك العُضيَّات الخلَوية القديمة أو المُتضرِّرة، فتنقل نواتجها البسيطة إلى السايتوبلازم وتستبعد المُتبقِّيات منها إلى خارج الخلية (شكل ٤-٣٥). تكثُر هذه العُضيَّات



شكل ٤-٣٥: رسمٌ تخطيطيٌّ لتكوين وعمل الجُسَيمات الحالَّة.

في الخلايا الحيوانية. مصدر اليحلول هو جهاز كولجي، وفي شكلها الأوَّلي تبدو كفجواتٍ كُرويةٍ كثيفة محاطة بغشاء مُفرَد. لكن حجمها وشكلها يتغيَّر مع احتوائها على الموادِّ التي تعمل على تحليلها. تحتوي اليحلولات على ٥٠ من إنزيمات التحلُّل المائي، وهذه تعمل في pH حوالي ٥. تخفيض حموضة اليحلول يرجعُ إلى عمل مضخَّة الهيدروجين في الغِشاء التي تُدخل أيونات الهيدروجين من السايتوبلازم. وجود هذه العُضيَّات يحفظ تراكيب الخلية من تأثير الإنزيمات المحلِّلة. حدوث طفراتٍ تؤدي إلى تعطيلِ عملِ إنزيمٍ أو أكثر من إنزيمات الجُسَيمات المُحلِّلة يُسبِّب أمراضًا عديدة في الإنسان (Pryor, 2012; Cooper, 2000).

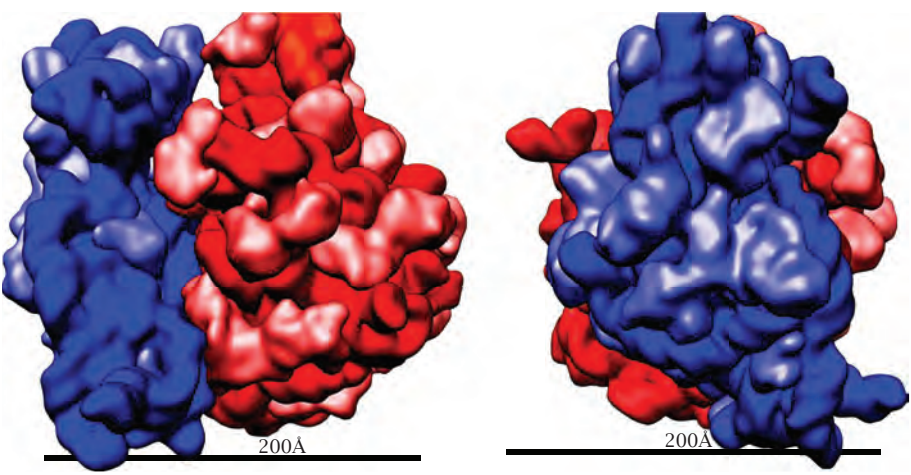
(ح) الأجسام الدقيقة Microbodies

هي مجموعةٌ من الحُويصلات المختلفة الحاوية على إنزيمات في خلايا مختلف المجاميع الأحيائية. هذا يُمكِّن الخلية من حصول تفاعُلاتٍ مختلفةٍ في السايتوبلازم. بعض الأجسام الدقيقة تُسمَّى كلايوكسيزوم (Glyoxysome) تحتوي على إنزيماتٍ تُحوِّل الشحوم إلى

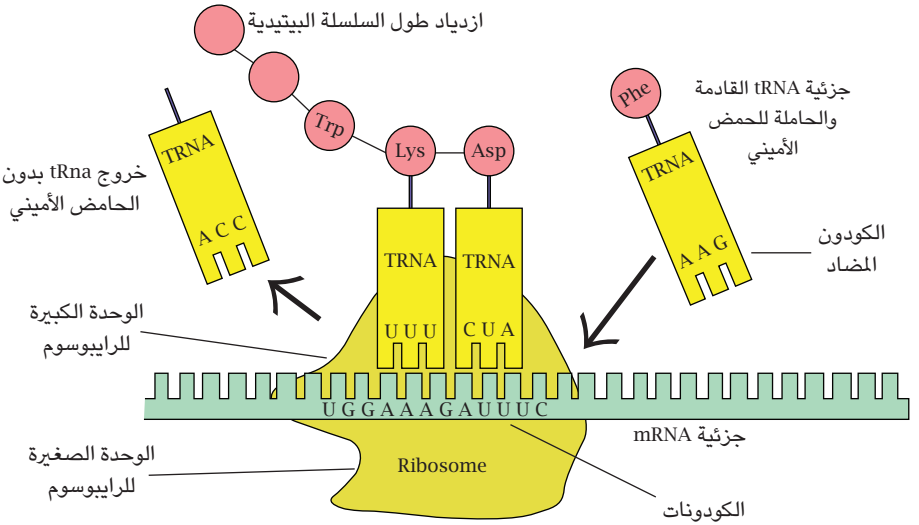
سكَّريات. وأخرى تُسمَّى بيروكسيزوم (Peroxysome) تحتوي على إنزيماتٍ مؤكسدةٍ ينتج عنها المركَّب الشديد الأكسدة بيروكسيد الهيدروجين. غير أن امتلاك البروكسيزومات لإنزيم كاتاليز (Catalase) يمكِّن من تحليل بيروكسيد الهيدروجين إلى غاز ثاني أوكسيد الكاربون والماء.

(ط) الرايبوسومات Ribosomes

الرايبوسومات (شكل ٤-٣٦) هي المكائن النانوية لتكوين البروتين. تُوجد الرايبوسومات في جميع الأحياء بضمنها البدائية النواة، كما تُوجد في عُضيَّات الخلية كالميتاكوندريا والبلاستيدات. تتألَّف الرايبوسومات من عددٍ من أنواع RNA الرايبوسومي (rRNA) تُشكِّل ثُلثَي كتلة الرايبوسوم مع حوالي ٨٠ نوعًا من البروتين الرايبوسومي. في البكتيريا وكذلك العُضيَّات الخلَوية المذكورة يكون الرايبوسوم صغيرًا من نوع 70S بقطر ٢٠ن م وبكتلة ٢٧٠٠ كيلو دالتون مقارنةً برايبوسوم الأحياء الحقيقية النواة الذي يكون أكبر من نوع 80S بقطر ٢٥–٣٠ن م وبكتلة ٤٢٠٠ كيلو دالتون.



شكل ٤-٣٦: منظوران لرايبوسوم بكتيري. الوحدة الكبيرة باللون الأحمر والوحدة الصغيرة باللون الأزرق. طول خط القياس ٢٠ن م. عن Vossman-Wikipedia.



شكل ٤-٣٧: تكوين الرايبوسوم للبروتين. محوَّر عن Boumphreyfr-Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7200200.

عدَد الرايبوسومات في الخلايا البكتيرية يكون عدة آلاف؛ ففي خلية البكتيريا المعروفة *E. coli* يساوي ٢٠٠٠٠ بينما تصل أعدادها في الخلايا الحقيقية النواة إلى عدة ملايين. تنتشر الرايبوسومات حرةً في السايتوبلازم أو على سطوح أغشية الشبكة البلازمية الخشنة. على الكروموسوم تُوجد العديد من نسخ الجينات المشفرة لل RNA الرايبوسومي، وعند نسخها تتدلى من الكروموسوم وترتبط بها البروتينات الرايبوسومية لتتشكل الرايبوسومات مكونة مناطق مكتظة داكنة في النواة تعرف بالنويات (Nuclei). عند اكتمال تنصيبها وهي بهيئة وحدتَين منفصلتَين؛ هما: الوحدة الكبيرة (Large sub-unit) والوحدة الصغيرة (Small sub-unit) تُغادِر مكوِّنات الرايبوسومات النواة إلى السايتوبلازم.

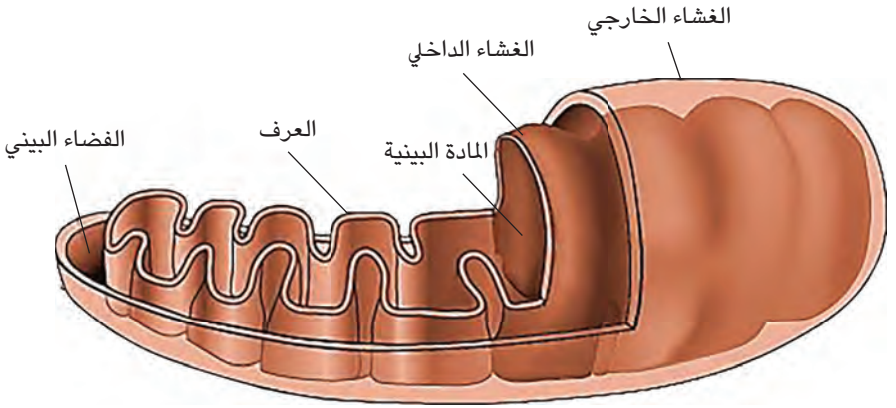
عند وصول جزيئة mRNA والتي نُسخَت عن جينٍ في النواة إلى السايتوبلازم، ترتبط بها الوحدة الصغيرة للرايبوسوم من خلال RNA الرايبوسومي ثم الوحدة الكبيرة ليكتمل تركيب الرايبوسوم. على الوحدة الصغيرة ثمَّة مواقعُ ثلاثة A وP وE ترتبط بأولها جُزيئة tRNA التي تحمل شفرة مضادٍّ يتمِّم الشفرة الموجودة على mRNA وطرفها الحُر يحمل

جزيئةَ حامضٍ أميني معيَّن. تنتقل tRNA إلى الموقع التالي لترتبط جُزيئةُ tRNA أخرى في موضعها الأول الشاغر، وهكذا (شكل ٤-٣٧). تقوم RNA القطعة الكبيرة بربط الأحماض الأمينية المتجاورة من خلال نشاطها الإنزيمي حيث تعمل كرايبوزيم. مع استمرار هذا النشاط تتكون سلسلةٌ من الأحماض الأمينية المرتبطة بأواصرَ ببتيديةٍ مكوِّنةً بروتينًا ينفصل بعدها عن الرايبوسوم. بعد انتهاء عمل الرايبوسومات فإنها تتفكَّك، ويُمكِن أن يُعاد تركيبها تلقائيًّا كما أوضحنا، أو تتحلَّل إلى مُكوِّناتها الجُزيئية.

(ي) الميتاكوندريا Mitochondria

شكل ٤-٣٨: صورة بالمِجهَر الإلكتروني لاثنَين من الميتاكوندريا. مُحوَّر عن Louisa Howard – http://remf.dartmouth.edu/imagesindex.html http://remf.dartmouth.edu/images/mammalianLungTEM/source/8.html.

الميتاكوندريا هي العُضَيُّ المنتج الرئيسي للطاقة بشكل جُزيئاتٍ ATP من خلال أكسدة السكَّريات والشحوم. شكلُها مختلف بين البيضوي إلى المتطاول، وحجمها بحجم



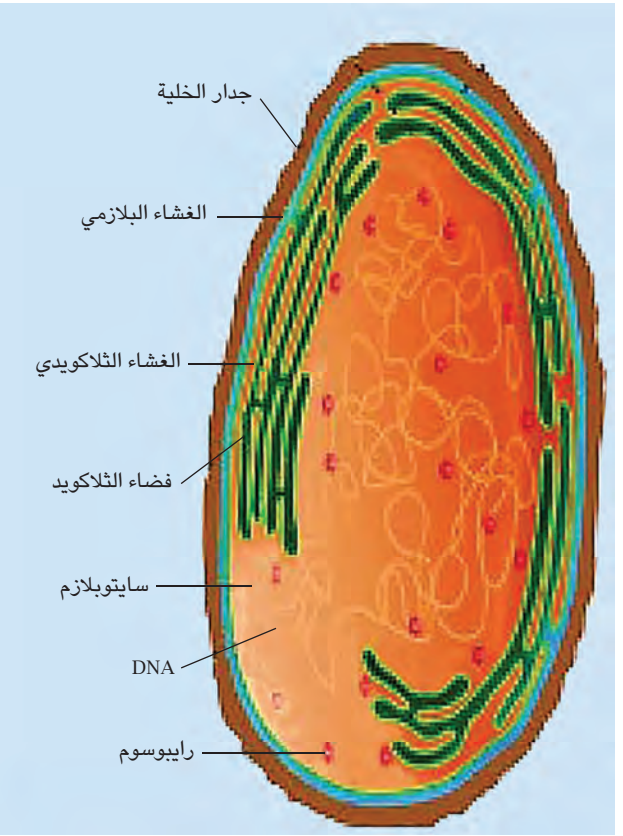
شكل ٤-٣٩: رسمٌ تخطيطيٌّ لتركيب الميتاكوندريا.

خلايا البكتيريا، كما أن عددها يختلف باختلاف نوع الكائن الحي وطبيعة نشاط الخلية. تتألَّف الميتاكوندريا من غشاءٍ خارجيٍّ أملس، وغشاءٍ داخلي يُظهِر طيَّاتٍ أو أعرافًا تزيد من مساحته السطحية ويُحيط بالمادة البينية (شكل ٤-٣٨ و٤-٣٩). كما يُوجد فضاءٌ بين الغشاءَين الخارجي والداخلي.

الغِشاء الخارجي للميتاكوندريا يحتوي على بروتيناتٍ تسمح بالمرور الحر للجُزيئات الصغيرة. هذا سيجعل الفضاء البيني شبيهًا بالسائل الخلَوي حيث يحتوي على الكثير من الجُزيئات والأيونات. أما الغشاء الداخلي فيحتوي على ٧٠٪ من بروتينات الميتاكوندريا، بضمنها إنزيمات الفسفرة التأكسدية، فيعمل كغشاءٍ انتخابي يُعيق دخول الجُزيئات الصغيرة والأيونات لضمان توفير منحدرِ بروتوناتٍ ذي فرق جهدٍ كهربائي يمكِّن من عملية الفسفرة التأكسدية. تحتوي المادة البينية للميتاكوندريا إنزيماتِ الفسفرة التأكسدية والمادة الوراثية.

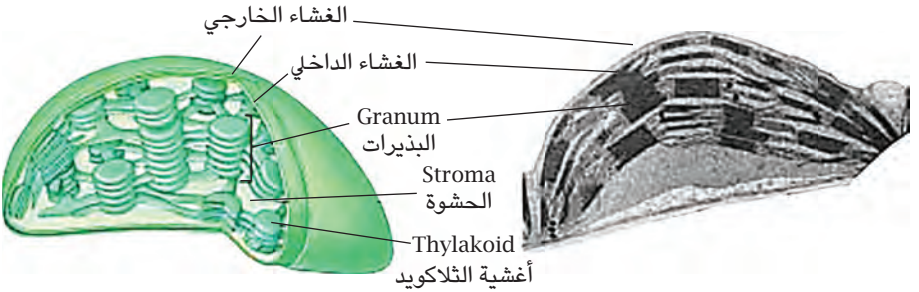
تحتوي الميتاكوندريا على المادة الوراثية DNA والرايبوسومات الخاصة بها، وهي شبيهة بـ DNA وريبوسومات البكتيريا والتي تؤمِّن بعض البروتينات الخاصة بها. مع ذلك ثمَّة الكثير من بروتينات الميتاكوندريا تُشفَّر من قِبَل DNA النواة. يختلف حجم المادة الوراثية في الميتاكوندريا باختلاف المجموعة الأحيائية؛ فهي تتراوح بين ١٦ك ق في الإنسان والحيوانات، و٨٠ك ق في الخمائر، و٢٠٠ك ق في النباتات (Cooper, 2000). الطفرات في بعض جينات الميتاكوندريا ترتبط بالشيخوخة (Aging) وعددٍ من الأمراض.

(ك) البلاستيدات الخضراء Chloroplasts



شكل ٤-٤٠: رسمٌ تخطيطيٌّ لخلية بكتيريا خضراء مزرقة يوضِّح طيَّات الغِشاء البلازمي لتكوين ثلاكويد التركيب الضوئي. مُحوَّر عن: (Pollard *et al.*, 2017).

البلاستيدة الخضراء هي الماكنة الدقيقة للتركيب الضوئي في خلايا الأحياء الحقيقية النواة. التركيب الضوئي هو المصدر الأساسي للمركَّبات العضوية والطاقة الكيميائية التي تستخدمها الأحياء كافةً لغرض النمو والتكاثُر. يتم التركيب الضوئي في بعض أنواع البكتيريا والطحالب والنباتات باستغلال طاقة الفوتونات بواسطة مركز تفاعُلٍ يحتوي على صبغاتٍ خاصة وبروتيناتٍ وعوامل أكسدة-اختزال لتحرير إلكتروناتٍ عالية الطاقة



شكل ٤-٤١: صورةٌ بالمِجهَر الإلكتروني (يمين) ورسمٌ تخطيطيٌّ (يسار) لتركيب البلاستيدة الخضراء. مُحوَّر عن: (Raven *et al.*, 2014).

تُمكِّن من إنتاج جُزيئاتِ ATP والمساعد الإنزيمي NADPH والتي تُستخدَم لاختزال CO_2 إلى مركَّباتٍ سكَّريةٍ ثلاثية الكاربون. من هذه المركَّبات السكَّرية يمكن أن تتكوَّن سكَّرياتٌ أخرى، ومركَّباتٌ عضويةٌ مختلفة.

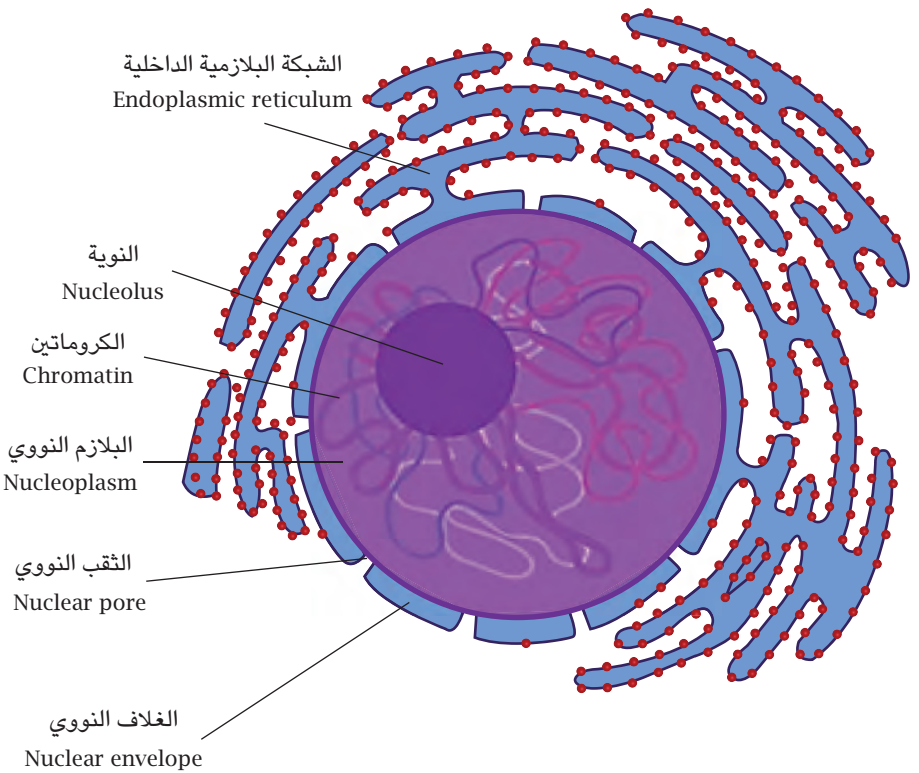
في البكتيريا الأرجوانية والبكتيريا الخيطية الخضراء تعمل صبغات Pheophytin وQuinone كمستقبلات إلكترون بما يُشبِه مركز التفاعُل II في السيانوبكتيريا والبلاستيدات الخضراء. في بكتيريا الكبريت الخضراء والهليوبكتيريا يُوجد مركز تفاعُل حديد-كبريت كمستقبل إلكتروناتٍ شبيه بمركز التفاعُل I للسيانوبكتيريا والبلاستيدات الخضراء. في السيانوبكتيريا تقوم أغشية الثالوكويد الناشئة عن غشاء الخلية بالتركيب الضوئي (شكل ٤-٤٠).

في الخلية النباتية يُوجد ١٠ إلى ١٠٠ بلاستيدةٍ خضراء بينما يحتوي المليمتر المربَّع من الجزء الداخلي للورقة النباتية على ٤٥٠٠٠٠ إلى ٨٠٠٠٠٠ بلاستيدة. تتألَّف البلاستيدة الخضراء من غشاءٍ خارجيٍّ وغشاءٍ داخليٍّ ينتظم بشكل أكياسٍ تُسمَّى الثالوكويدات (Thylakoids). تحتوي الثالوكويدات على الصبغات التي تشكِّل نظامًا ضوئيًّا (Photosystem) وتترتَّب بهيئة نضائد، لتُشكِّل كل مجموعةٍ ما يُعرف بالبُذَيرة (Granum). تُحيط بالثالوكويدات مادةٌ شبه سائلةٍ تُسمَّى الحشوة (Stroma) تحتوي على الإنزيمات المُشترِكة في تثبيت الكاربون (شكل ٤-٤١).

كما الميتاكوندريا تحتوي البلاستيدة الخضراء على جُزيئةٍ DNA حلقيةٍ تُمكِّنها من التضاعُف وتؤشِّر لأصلها البكتيري. تحتوي DNA البلاستيدة الخضراء على ٢٥٠ جينًا تُشفر لوحدات بروتينٍ تشترك في التركيب الضوئي، وتُساعد في انقسام البلاستيدة وrRNA

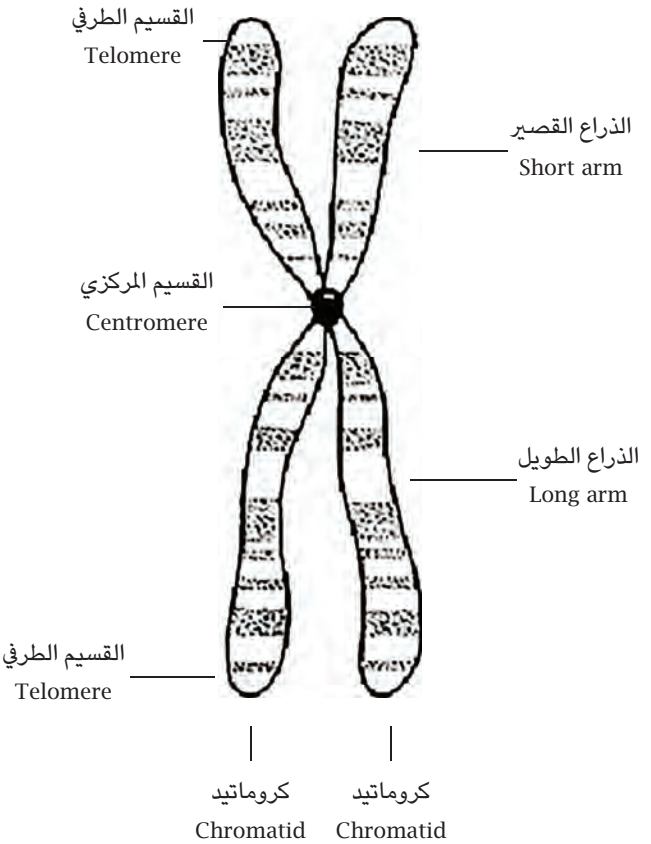
ومجموعة tRNA. لكن النواة أيضًا تُشفر لأكثر من ٢٠٠٠ من بروتينات البلاستيدة (Pollard *et al.*, 2017).

(ل) النواة Nucleus



شكل ٤-٤٢: رسمٌ تخطيطيٌّ لمكوِّنات النواة.

تمثِّل النواة مركز المعلومات الأساسي في خلايا الأحياء الحقيقية النواة، من خلال احتوائها على كل أو معظم جُزيئات DNA في الخلية. تحتوي الخلية على نواةٍ واحدةٍ عادة، لكنها يمكن أن تحتوي على نواتَين أو أكثر كما في الفطريات وبعض الخلايا الحيوانية والنباتية، بينما يُمكِن أن تفقد الخلية النواة كما في كُريات الدم الحمراء الناضجة والأنابيب



شكل ٤-٤٣: رسمٌ تخطيطيٌّ للكروموسوم.

المنخلية في لحاء النباتات. يبلُغ قطر النواة حوالي ٦مكم في خلايا اللبائن، كما تشغل نسبةً مهمةً من حجم الخلية في النسيج المرستيمي للنباتات.

تُحاط النواة بالغِلاف النووي المؤلَّف من غشاءَين تفصلهما مسافة ١٠ إلى ٥٠ن م وتتخلَّله ثقوبٌ مؤلفة من بروتينات بقطرٍ حُر حوالي ٩ن م تكون في مناطقِ التحامِ الغشاءَين. عدد الثقوب حوالي ٣٠٠٠ إلى ٤٠٠٠ في خلايا اللبائن. الغشاء الخارجي يتصل بالشبكة البلازمية الداخلية التي تحتوي على الرايبوسومات ويستمر فضاؤها الداخلي مع الفضاء بين غشاءَيِ النواة. يسمح غلاف النواة بعبور الجُزيئات الصغيرة وبعض

البروتينات وجُزيئات RNA. الغشاء الداخلي يحتوي على بروتيناتٍ خيطية تُسمَّى لامين (Lamine) تقوم بتوفيرِ هيكلٍ نووي (شكل ٤-٤٢).

تحتوي النواة على جُزيئاتِ DNA خطيةٍ مصحوبةٍ ببروتينات لتُشكِّل الكروماتين. يلتف الكروماتين لكل جُزيئة DNA بتكرارية حول جُزيئات بروتين الهيستون لتتشكَّل الكروموسومات. يتألَّف الكروموسوم الواحد من زوجٍ من الكروماتيدات يرتبطان في منطقة القسيم المركزي (Centromere) والذي سيُحدِّد شكل الكروموسوم، ونهايتا الكروماتيد تُعرَف بالقسيم الطرفي (Telomere) (شكل ٤-٤٣). عادةً يكون الكروموسوم ممتدًّا ليسمح باتصال البروتينات بالقواعد النووية على الـ DNA وتتم عملياتُ نسخِ الجينات لتكوين البروتينات وجُزيئات DNA وتُضاعف الـ DNA بينما تزداد كثافة الكروموسوم من خلال مزيدٍ من البرمات حول جُزيئات الهيستون ليُسهل عملية انقسام النواة.

في الخلايا الجسمية تُوجد الكروموسومات بأزواجٍ متناظرة؛ أي ضِعف العدد (2N) وتُسمَّى ثنائية المجموعة الكروموسومية (Diploid) بينما تكون في الخلايا الجنسية مُفردَة (1N) أو أحادية المجموعة الكروموسومية (Haploid). عدد الكروموسومات يكون ثابتًا بالنسبة لخلايا أفراد النوع الواحد، ويختلف في الأنواع المختلفة. ويمكن أن يكون عدد الكروموسومات مُتعدِّد التضاعُف (Polyploid) في بعض الأنواع أو الخطوط الوراثية.

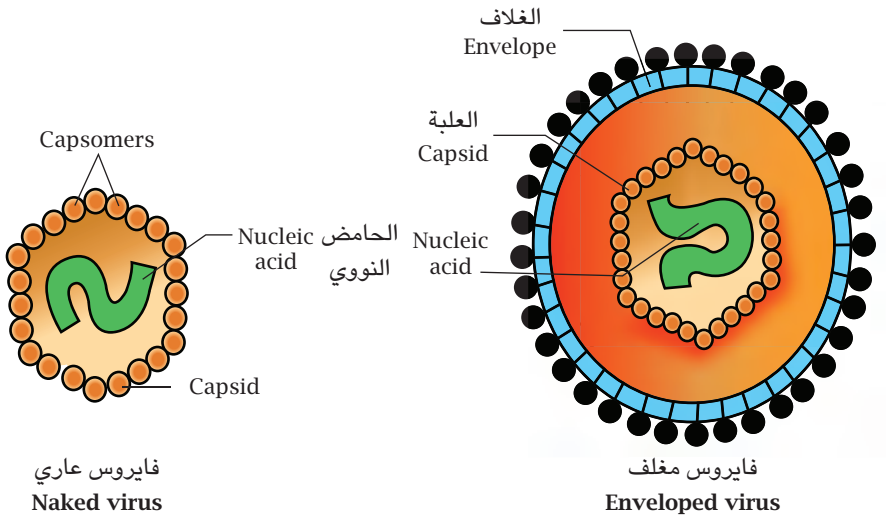
بعض الكروموسومات تحتوي على مناطق تشفر لجزيئات rRNA وتتجمع بروتينات لتشكيل الرايبوسومات مكونة منطقة داكنة تعرف بالنوية (Nucleolus).

(٥) الكائنات الحية غير الخلوية Acellular Living Organisms

ثمَّة كائناتٌ أو تراكيبُ أحيائيةٌ لا تتكوَّن من خلايا لكنها تُظهِر بعض الخواص الحياتية المهمة؛ كامتلاكها للمادة الوراثية بهيئة DNA أو RNA والقدرة على التضاعُف داخل خلايا حية، وتكسب الخلايا العائلة جينات أو بروتيناتٍ إضافيةً أو تسبِّب أمراضًا مختلفة.

(٥-١) الفايروسات Viruses

الفايروسات هي أشكال أو كائناتٌ حياتية معقَّدة ذات تنظيمٍ جُزيئيٍّ خاص، غير خلوية، وهي بسيطةٌ جدًّا إذا ما قُورنَت بالخلايا الحية؛ فهي تحتوي على مادةٍ وراثية وعددٍ من البروتينات، لكنها تفتقد الأيض الذي يُنتِج ويحوِّل الطاقة، ولا تمتلك منظومةً البروتينات

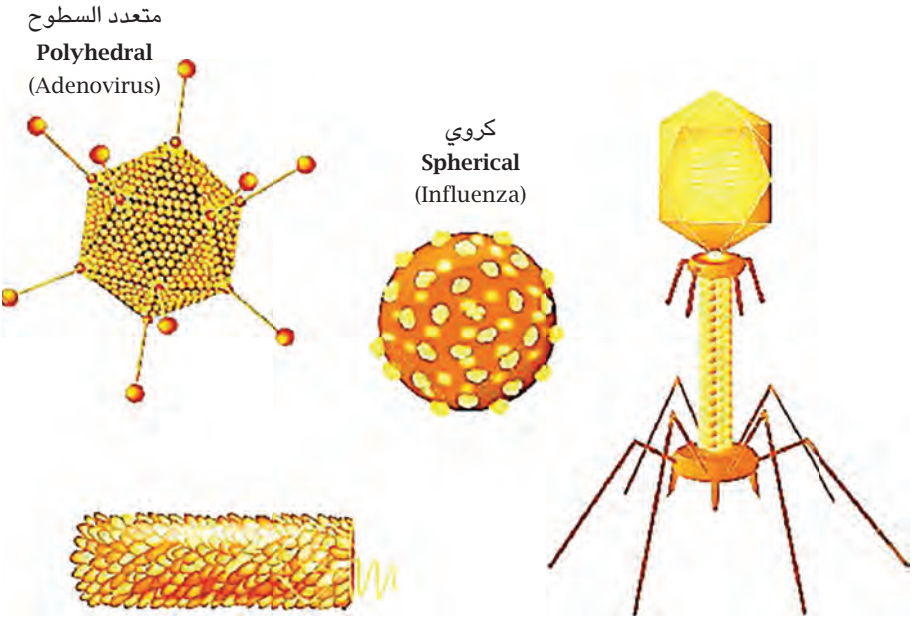


شكل ٤-٤٤: رسمٌ تخطيطيٌّ لتركيب جُسَيمة الفايروس المغلَّفة والعارية.

التي تمكِّن من التضاعُف. وبذلك فهي لا يمكن أن تتكاثَر إلا من خلال التطفُّل باستغلال إمكانات وطاقة الخلايا العائلة. واعتبار الفايروسات كائناتٍ حية من عدمه يعتمد على تعريف «الكائن الحي». التعريف الشائع يتضمَّن أن الكائن الحي يتألَّف من خليةٍ واحدة أو أكثر. وحسب هذا التعريف لا تُعتبر الفايروسات كائناتٍ حية. لكن إذا اعتمدنا على تعريفٍ أشمل للكائن الحي، وهو المنظومة التي تتمكَّن من التضاعُف والتطوَّر وحفظ النوع، تكون الفايروسات كائناتٍ حيةً طفيلية، علمًا أن الكثير من الكائنات الحية الخلوية تسلك سلوكًا مشابها للفايروسات في التطفُّل على الأحياء الأخرى.

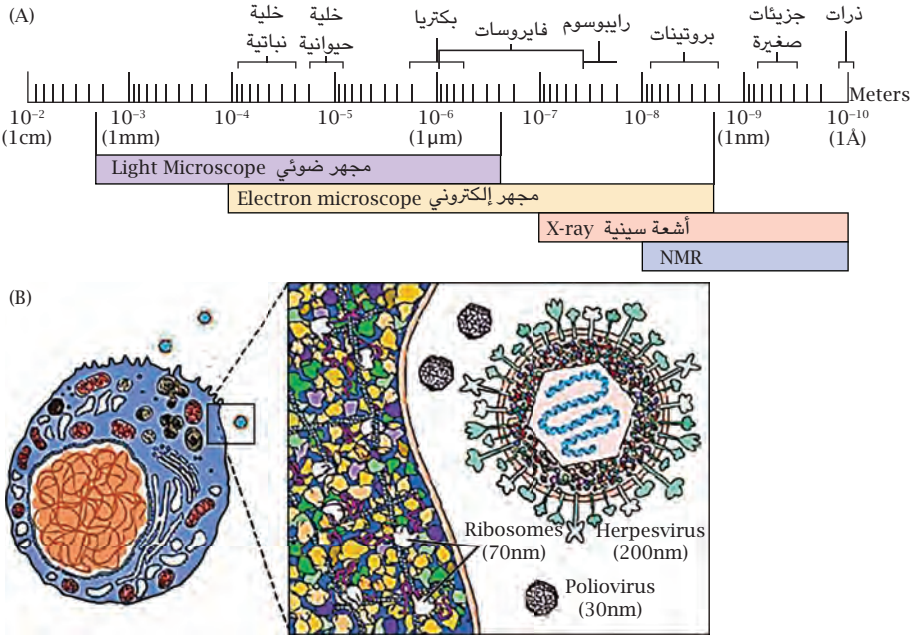
اكتُشفَت الفايروسات سنة ١٨٩٨م، على يد العالم الروسي Dimitrii Ivanovsky وكان فايروس موزائيك التبغ (TMV). يبلُغ عدد أنواع الفايروسات المشخَّصة حسَب تقرير اللجنة العالمية لتصنيف الفايروسات سنة ٢٠١٢م، ٢٦١٨م نوعًا بضمنها الفايرويدات. تتوزع هذه الأنواع على ٤٢٠ جنسًا و٩٦ عائلة و٧ رُتَب (Flint *et al.*, 2015).

تُوجد الفايروسات في كل مكانٍ على كوكب الأرض. وهي أكثر الأشكال الحية عددًا وانتشارًا، وتُصيب جميع أنواع الكائنات الحية، لا بل إن بعض الفايروسات التي



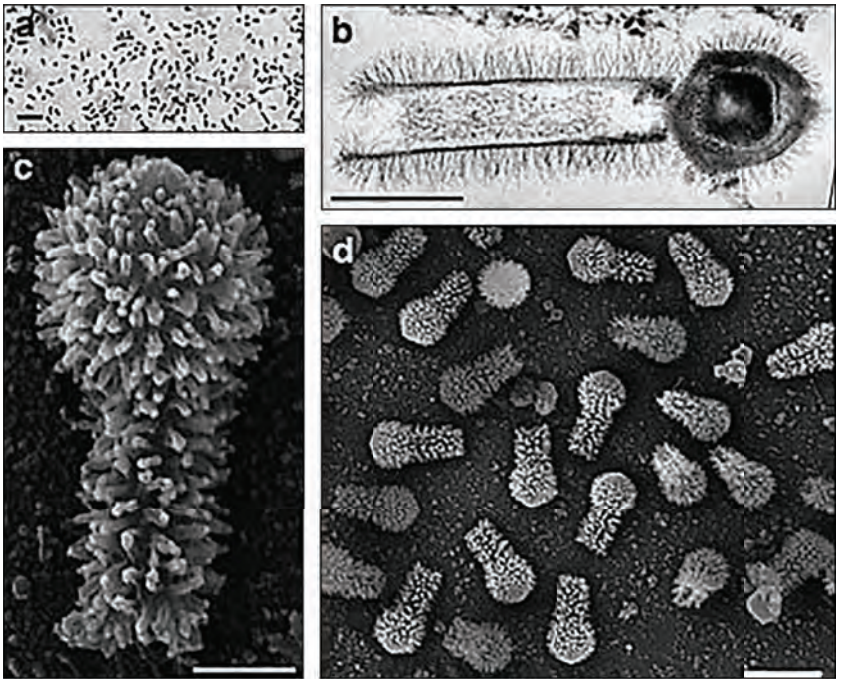
شكل ٤-٤٥: الأشكال الرئيسة لجسيمات الفايروس.

تُسمَّى عاثياتٍ فايروسية (Virophages) تتطفَّل على بعض أنواع الفايروسات الضخمة (Oliveira *et al.*, 2019; Moelling & Broecker, 2019). في كل سم^{3} من ماء البحر يُوجد ١٠–٥٠ مليون جسيمة فايروس بكتيري (Bacteriophage الفايروس الذي يُصيب البكتيريا) ويُمكِن أن يكون أكثر من هذا الرقم في بعض أنواع التربة. يقدَّر عدد جُسَيمات الفايروسات البكتيرية في الكوكب بحوالي $^{31}10$ وهذا أكبر بعشر مرات من عدد خلايا البكتيريا، وبوزن يصل إلى ١٠٠ مليون طن. في الوقت نفسه، تتعرض الفايروسات للتلَف نتيجة العوامل الفيزيائية؛ كالالتصاق بالسطوح وتأثير درجات الحرارة والإشعاعات، وكذلك الافتراس من قِبَل الحيوانات البحرية غير العائلة للفايروسات؛ حيث تؤدِّي إلى افتراس الفايروسات بنسبة تتراوح بين ١٢–٩٨٪ (Welsh *et al.*, 2020).



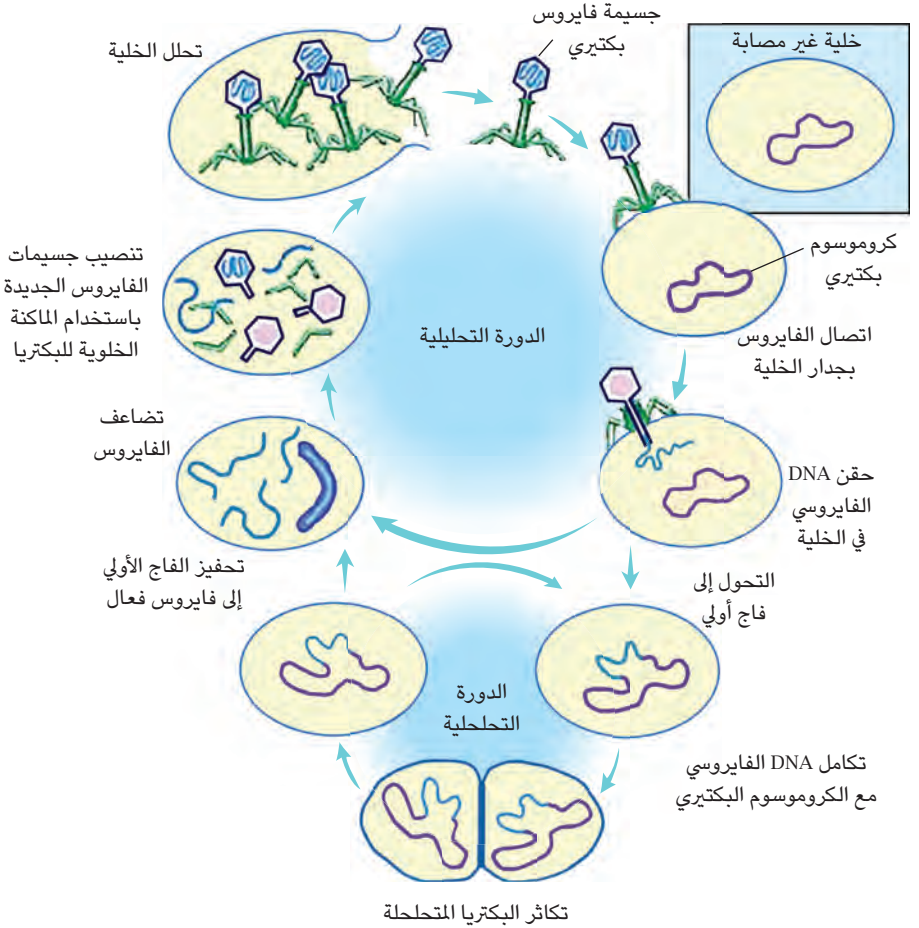
شكل ٤-٤٦: مقياس الحجوم (الأبعاد). (A) أبعاد الخلايا النباتية والحيوانية والبكتيرية والفايروسات والبروتينات والجُزيئات والذرات. قوة التفريق المستخدَمة في الدراسات البيولوجية تشمل المجهر الضوئي، والمجهر الإلكتروني وتصوير البلورات بالأشعة السينية، وطيف الرنين النووي المغناطيسي (NMR). (B) أبعاد جُسَيمات الفايروس تتراوح بين الكبيرة القريبة من خلية البكتيريا إلى الصغيرة التي هي أقل من حجم الرايبوسوم. وحدات القياس المستخدمة مع الفايروسات هي النانومتر (١ × ١٠$^{-٩}$م) والأنكستروم (١ × ١٠$^{-١٠}$م). محوَّرة عن: Flint *et al.*, (2015).

تتألَّف جُسَيمة الفايروس (Virion) من مجموع جيني (Genome) يكون بشكلِ RNA أو DNA ضمن غُلبةٍ بروتينيةٍ (Capsid) مركَّبة من واحد أو عددٍ قليلٍ من البروتينات. أحيانًا يكون لجُسَيمة الفايروس غلاف (Envelop) هو جزءٌ من غشاء الخلية العائلة يحملُه معه خلال خروجه من الخلية (شكل ٤-٤٤). عمومًا لا تحتوي جسيمة الفايروس على إنزيمات، لكن بعضها يحمل واحدًا أو عددًا قليلًا من الإنزيمات مثل: Reverse transcriptase الذي يُحوِّل RNA الفايروس إلى DNA وهي لا تعمل داخل جُسَيمة الفايروس.



شكل ٤-٤٧: (a) جسيمات Tupanvirus مكبرة × ١٠٠٠ وخط القياس ٢مكم. (b) الجُسيمة العملاقة أكبر من ١٠٠٠ن م تحت المِجهَر الإلكتروني. خط القياس ٥٠٠ن م. (c) و(d) صور بالمجهر الإلكتروني لفايروس Tupanvirus. خط الرسم ٢٥٠ن م و١مكم على التوالي. عن: Abrahão *et al.*, (2018).

شكل جسيمة الفايروس يكون أما متعدد السطوح (Ichisohedral) شبه كروي، أو لولبي متطاول أو الشكل المعقد الذي يتضمن الشكلين (شكل ٤-٤٥). يقاس حجم الفايروسات بالنانومترات، وهو يتراوح في أغلب الفايروسات بين ٣٠ن م كما في *Poliovirus* (فايروس شلل الأطفال) و٢٠٠ن م كما في *Herpesvirus* (شكل ٤-٤٦)، لكن ثمة فايروسات عملاقة تعود إلى عائلة *Mimiviridae* وبعض العوائل الأخرى والتي تصيب الأميبا، وبعض الأحياء الأخرى مثل *Tupanvirus* يمكن أن تكون بحجم أكبر من حجم عدد من أنواع البكتيريا؛ حيث يبلغ ١,٢–٢,٥مكم وجينوم ضخم يبلغ حوالي ١,٥ Mb بأكثر من ١٢٥٠ جين (شكل ٤-٤٧).



شكل ٤-٤٨: دورة حياة الفايروس البكتيري على خلية البكتيريا. الدورة التحليلية يتم فيها مضاعفةُ جُسيمات الفايروس وخروجها من الخلية بقتلها. الدورة التحلحُلية يتم فيها اندماج DNA الفايروس مع DNA البكتيريا، ويستمر ذلك لفترة قد تطول أو تقصُر مع استمرار تضاعُف الخلية العائلة، بعدها تنفصل DNA الفايروس لتدخُل في دورةٍ تحليلية. مُحوَّر عن: Mason *et al.*, (2011).

تم اكتشاف فايروسات *Mimivirus* من قِبَل La Scola *et al.*, (2003) وتسميتُها اشتُقَّت من مُحاكاتِها للميكروبات Mimicking microbes.

الجينوم يمكن أن يكون بشكلِ DNA شريطٍ مُفرَد (ssDNA) أو شريطٍ مزدوجٍ (dsDNA)، أو بشكل RNA شريط مفرد (ssRNA) موجب (ssRNA+) أو سالب (ssRNA−)، أو شريط مزدوج (dsRNA). ويمكن أن يكون الجينوم وحدةً واحدةً غير مقسَّم، أو مقسَّم، وفي الحالة الأخيرة يمكن أن يكون ضمن جُسيمةٍ واحدة أو مُوزَّعًا على أكثر من جسيمةٍ واحدة. وفي جميع الحالات ولكي تتحقَّق الإصابة يجب أن يكون الجينوم كله مُتوفرًا في الخلية العائلة.

جميع أنواع الأحياء تُصاب بنوعٍ واحدٍ أو أكثر من الفايروسات، كما أن النوع الواحد من الفايروسات يمكن أن يُصيب أفراد نوعٍ معين، أنواعٍ قريبة، أو حتى أنواعٍ غير مترابطة وراثيًّا؛ كأن يُصيب النبات والحشرة الناقلة له، أو يُصيب الإنسان أو الحيوان، وبنفس الوقت يُصيب الحشرة أو الطفيلي الناقل.

الإصابة بالفايروس تتطلَّب أن يُصبِح الفايروس في تماسٍّ مع خلية العائل، أو أن يدخُل مباشرةً إلى خلية العائل بطرقٍ مختلفة. عندما تُصبِح جُسَيمة الفايروس داخل الخلية العائلة تجري عملية تفكيك (Dessembly) حيث تتحلَّل بروتينات الغلاف ويتحرَّر الحامض النووي. سواء كان جينوم الفايروس DNA أو RNA.

من الخطوات الأولى للتضاعُف ضرورة التعبير الجيني الفايروسي بتكوين نُسَخ mRNA، لغرض تكوين البروتينات الفايروسية التي تهيِّئ إنزيمات العائل، لتكوين مكوِّنات الفايروس. معظم فايروسات DNA تتضاعف داخل النواة، ومعظم فايروسات RNA تتضاعف داخل السايتوبلازم. بعد تكوين الخلية العائلة لبروتينات الفايروس وحامضها النووي، تتم عملية التجميع (Assembly) تلقائيًّا بتكوين الكابسيد حول الحامض النووي، أو تكوين الكابسيد ودخول الحامض النووي فيه.

بعد تكوُّن جُسَيمات الفايروس تخرج من الخلية بأعدادٍ كبيرة لتُصيب خلايا مجاورةً أو بعيدة، وتخرُج أخيرًا إلى البيئة. هذه الطريقة من تضاعُف الفايروس تُسمَّى بالدورة التحليلية (Lytic cycle). طريقة التضاعُف الثانية وتُسمَّى بالدورة التحَلحُلية (Lysogenic cycle) فتتضمَّن اندماجَ جينوم الفايروس وهو بشكل DNA بعد دخولِه الخلية مع DNA الخلية العائلة وبقائِه لفترة قد تطُول أو تقصُر، خلالها تتمُّ مضاعفة جينوم الفايروس المندمج مع كل عملية انقسامٍ للخلية. أخيرًا ينفصل جينوم الفايروس ويسلكُ الدورةَ التحليلية (شكل ٤-٤٨). الدورة التحَلحُلية تُسهِم في النقل الأُفقي للجينات بين أنواع الأحياء المختلفة.

من بينِ أهمِّ الأضرار التي تُسبِّبها الفايروسات هي:

- الأمراض على الإنسان والحيوان والنبات والأحياء الأخرى.
- تغييرٌ جِدِّي في البيئة من خلال إبادتها اليومية لما يزيد عن ٢٠٪ من الميكروبات البحرية، وما يعنيه من أثَر على نِسَب الأوكسجين وثاني أوكسيد الكاربون في جو الأرض.

لكن من أهم فوائد الفايروسات:

- النقل الأفقي للجينات بين أنواع الأحياء المختلفة وأهميته العظمى في تنوُّع الأحياء؛ فحوالي ٤٠ إلى ٦٠ من جينات الإنسان هي فايروسية الأصل.
- القفزة الكبرى في تطوُّر الأحياء والتي يمكن أن تكون حقَّقَتها الأنواع القديمة من الفايروسات بتحويل الأشكال الأولى للحياة من عالم الـ RNA إلى عالم الـ DNA الحديث بواسطة إنزيمات Reverse transcriptase.

(أ) الفايروسات التابعة Satellite Viruses

وهي فايروساتٌ صغيرة يُمكِنها التضاعُف داخل الخلايا الحية فقط بوجود فايروساتٍ مساعدة (Helper viruses). جينوم هذه الفايروسات يُشفِّر فقط للكابسيد. معظم هذه الفايروسات تُصيب النباتات وبعضها يُصيب الفطريات والحيوانات الابتدائية وHepatitis delta virus RNA يُصيب الإنسان. حجم الجينوم صغيرٌ يتراوح بين ٠,٧٠ إلى ٢ك ق.

(ب) الفايرويدات Viroids

الفايرويدات تتألَّف من جينوم عارٍ بشكل RNA دائريٍّ مُفرَد الشريط، صغير الحجم، مُكوَّن من ٢٥٠ إلى ٤٠٠ نكليويدة (٠,٢٥–٠,٤٠ك ق) لا يشفِّر لأي بروتين، ولا يحتوي على كابسيد. اكتُشفَت الفايرويدات سنة ١٩٧١م، من قِبَل عالِم أمراض النبات T. O. Diener وتُصيب الفايرويدات النباتات؛ كأشجار الحمضيات، وجوز الهند، والبطاطا، وغيرها، مُسبِّبةً أمراضًا خطيرة. تنتقل الفايرويدات بواسطة التكاثُر الخضري للنبات.

بعض الفايرويدات وكذلك فايروس Hepatitis delta virus RNA وفايروسات RNA الصغيرة التابعة (Satellite viruses) تمتلك القدرة على التقطيع والربط الذاتي. هذه

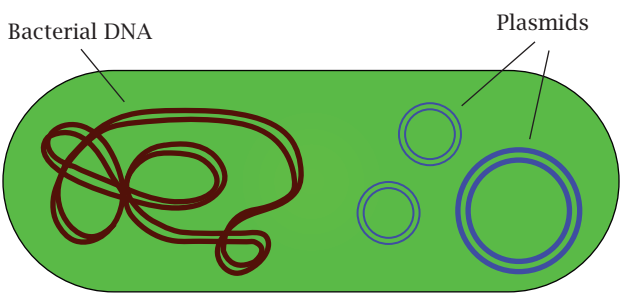
القدرة الإنزيمية تُرجع هذه الكائنات الحية إلى عالم الـ RNA حيث لعِبَت جُزيئاتُ RNA دَورَ حفظِ المعلومات الوراثية والنشاط الإنزيمي.

يحتوي الحامض النووي للعديد من الفايرويدات على تتابُعاتٍ من النكليوتيدات متتامةٍ مع مناطقَ مفتاحيةٍ على حواشي إنترونات الـ RNA للخلية ما يؤدِّي إلى إعاقتها (Beamish & Kutter, 2001).

ثمَّة عددٌ من التوابع الشبيهة بالفايرويدات تُسمَّى فايروسويدات (Virosoids) وهي جُزيئات RNA قصيرة حوالي ٣٥٠ نكليويدة، أحادية الشريط مُغلَقة، وتكون مغلَّفةً بكابسيد من فايروسٍ مُساعد (Helper virus) ويُمكِن أن تكون قد نشأَت عن الفايرويدات (Strauss & Strauss, 2008).

(ج) البلازميدات Plasmids

البلازميدات هي جزيئاتُ DNA دائريةٌ أو خطيةٌ صغيرة (شكل ٤-٤٩)، مستقلة عن الكروموسوم وتتمكَّن من التضاعُف المستقل. تُوجد البلازميدات في خلايا البكتيريا والأركيا والفطريات، وفي عددٍ قليلٍ من النباتات. البلازميدات يمكن أن تنتقل ما بين الخلايا؛ فهي مادةٌ وراثية متحرِّكة، وتلعب أدوارًا مهمةً في تطوُّر الأحياء خاصةً البدائية النواة، من خلال قيامها بالنقل الأفقي للجينات مثلما تفعل الفايروسات. تنتقل البلازميدات بين البكتيريا في الغالب من خلال عمليات التزاوُج (Conjugation).



شكل ٤-٤٩: رسمٌ تخطيطيٌّ للبلازميدات مع الكروموسوم البكتيري.

للبلازميدات جينات تعمل في الإمراضية وخصوصية العائل والمقاومة للمضادات الحيوية والأشعة فوق البنفسجية وكسمومٍ وهرمونات.

في نوى خلايا خميرة الخبز *Saccharomyces serevisiae* يوجد ١٠٠ بلازميد دائري بقُطر ٢مكم وبحجم ٦,٣ك ز ق. في بعض الخمائر يرتبط بالتشفير لسُمٍّ قاتلٍ للخمائر الأخرى، كما يُعتقد بلعب دَورٍ في عملية الشيخوخة في فطريات *Neurospora* و*Podospora*، وفي إمراضية الفطر *Fusarium solani* (Sharif, 2019).

تُستخدَم البلازميدات على نطاقٍ واسعٍ في التعامُل مع الجينات والهندسة الوراثية.

(د) الجينات القافزة Transposons

مُكررات الـ DNA تشكِّل جزءًا كبيرًا من الجينوم النموذجي للبائن، وبعضها يمكنه الانتقال من موقعٍ إلى آخرَ ضمن الجينوم، وهو ما يُسمَّى الجينات القافزة. الانتقال من موقعٍ إلى آخرَ يتم من خلال آليات القطع واللصق. لعِبَت الجينات القافزة دورًا مهمًّا في تطوُّر الأحياء. تنتشر الجينات القافزة في جميع الأحياء بدءًا من البكتيريا إلى الإنسان؛ فالجينات القافزة تشكِّل ما نسبته ٤٥٪ من جينات الإنسان وأكثر من ٨٠٪ من جينات بعض النباتات مثل الذرة. يمكن اعتبار الجينات القافزة «جيناتٍ أنانية» وتُلاقي صراعًا مع الجينات الموقعية (Muñoz-López & García-Pérez, 2010). تغيير الجينوم والتعبير الجيني بواسطة الجينات القافزة يشمل عمليات الحشر والحذف والتضاعُف والانتقال (Liu & Wessler, 2017).

(هـ) البريونات Prions

وهي جُسَيماتٌ بروتينية مسبِّبة للعدوى (Proteinaceous infectious particle) تُحدِث أمراضًا خطيرةً في الحيوانات والإنسان. هذه البروتينات تكون مشوَّهة التشكُّل نتيجة فعل التخلُّق أو فوق الجيني (Epigenetic) وتحدث تحولاتٍ مشابهة في البروتينات الطبيعية محدثةً حالةً مرضية. هذه الحالة يمكن أن تكون وراثية أو مكتسبة. من الأمراض التي تُحدِثها مرضُ الراعوش (Scrapie) في الماعز، ومرض جنون البقر ومرض Creutzfeldt–Jakob disease (CJD)، وكذلك لها دَورٌ في الأمراض العصبية؛ مثل مرض الزهايمر، وباركنسون في الإنسان (Polin *et al,* 2017).

يُوجد البريون في عددٍ من الفطريات؛ مثل خميرة الخبز *Saccharomyces serevisiae* و*Podospora anserina* ويعتقد بعضُ الباحثين أن له فوائدَ بيولوجيةً للفطريات، بينما يخالفهم في ذلك باحثون آخرون (Sharif, 2019).

(٦) تكاثُر الكائنات الحية Reproduction of Living Organisms

التكاثُر أو التضاعُف من السمات الأساسية المميِّزة للكائنات الحية. ينتُج عن التكاثُر زيادةُ عددِ الأفراد الحاملين للصفات النموذجية لنوعِ الكائن الحي. التكاثُر في الأحياء يتم بمسلكَين مختلفَين هما: التكاثُر اللاجنسي (Asexual reproduction) والتكاثُر الجنسي (Sexual reproduction). الكائن الحي يُمكِن أن يستخدم أحد المسلكَين دون الآخر، أو يستخدم كلا المسلكَين اعتمادًا على مستوى تعقيده وبالتالي نوعه.

(٦-١) التكاثر اللاجنسي

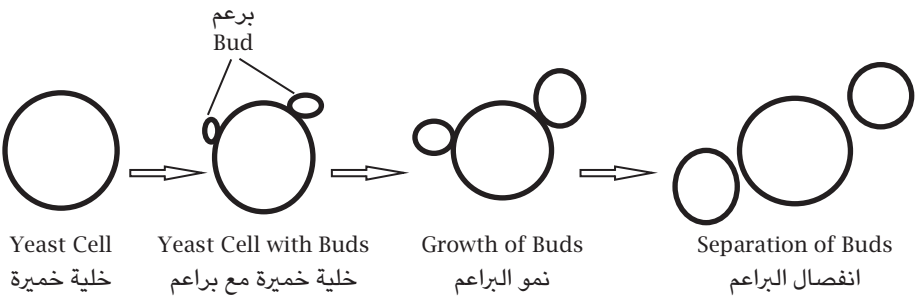
يعتمد على مبدأ قيام الخلية أو الفرد ذاته، بتكوين نسخةٍ جديدةٍ منه دون مشاركة خليةٍ أخرى أو فردٍ آخر. يهدف هذا المسلك إلى زيادة عدد الأفراد دون إحداث تغيُّراتٍ وراثيةٍ مهمة. ويمتاز بالخصائص التالية مقارنةً بالتكاثُر الجنسي: (١) أكثر كفاءةً، (٢) أكثر اقتصادًا، (٣) يحافظ على التركيبة الوراثية. ومن نواقصه أنه (١) يسمح بتراكُم الطفرات الضارة، (٢) يؤدِّي إلى الانتظام الوراثي (Genetic uniformity) الذي له عواقبُ ضارَّة كانتشار الأمراض.

ثمَّة طرقٌ متعدِّدة للتكاثُر اللاجنسي تشملُ:

الانشطار الثنائي (Binary fission): حيث تنقسم الخلية الأمية إلى خليتَين بنويتَين. وهو من أنواع الانقسام البسيطة، التي تتناسب ومستوى تعقيد الكائنات الحية، المتمثِّلة بالأحياء البدائية النواة (البكتيريا والأركيا). كما تسلُك هذا النوعَ من التكاثُر بعضُ أنواع الخمائر المنشطرة وهي من الفطريات والعديد من الحيوانات البدائية.

التبرعُم (Budding): ينشأ نتيجة بروز نموٍّ غيرِ متجانسٍ من نقطةٍ معينة، يكبر مع الوقت، وهو مرتبط بالخلية أو الكائن الحي، وتنتقل إليه نسخةٌ من النواة والمواد الخلَوية الأخرى، وبعد بلوغه حجمًا مناسبًا ينفصل عن الخلية الأم ويتصرف كفردٍ جديدٍ شكل ٤-٥٠ و٤-٥١. هذا النوع من التكاثر يشيع في الخمائر وبعض الحيوانات اللافِقارية مثل *Hydra*.

التجزُّؤ (Fragmentation): يتم من خلال تقطع الجسم إلى أجزاء؛ حيث يتمكَّن كل جزء من النمو وتكوينِ جسمٍ كامل. هذه الطريقة شائعة في الفطريات والطحالب مثل: *Spirogyra* وبعض اللافِقاريات.



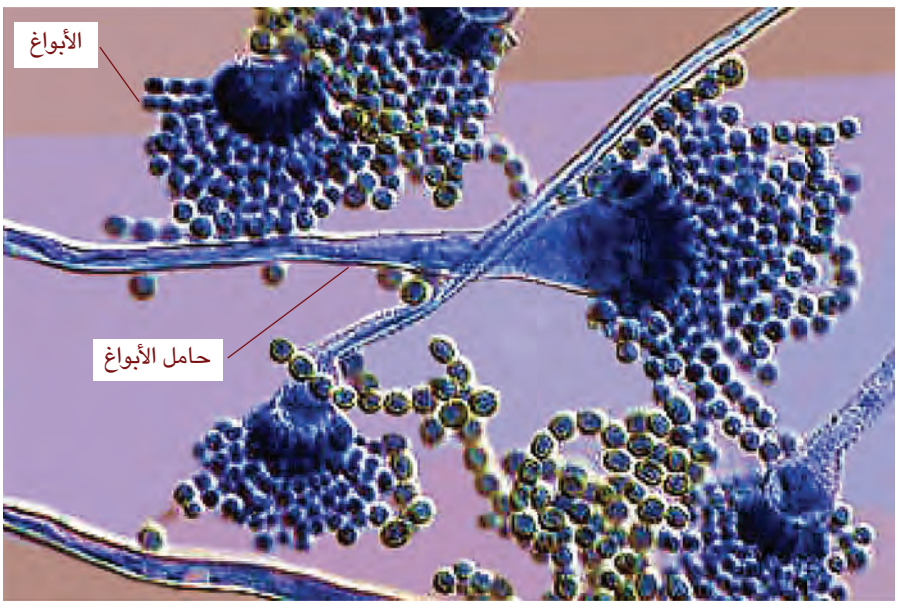
شكل ٤-٥٠: التبرعُم في الخميرة.

شكل ٤-٥١: التبرعُم في *Hydra*.

تكوين الأبواغ (Spore formation): الأبواغ هي تراكيبُ أحاديةُ الخلية، أو عددٌ قليلٌ من الخلايا تتكوَّن بأعدادٍ هائلةٍ (شكل ٤-٥٢) وعند إنباتها تُكوِّن أفرادًا جُدُدًا. هذه الطريقة شائعةٌ في الفطريات وبعض الحيوانات الابتدائية.

التكاثُر العذري (Parthenogenesis): ويتضمَّن تكوين أفرادٍ جُددٍ من بيوضٍ غير ملقَّحة. ويشيع في الحشرات مثل نحل العسل.

التكاثُر الخضري (Vegetative Propagation): ينشأ عن تكوين أفرادٍ جُددٍ من تراكيبَ جسميةٍ غير زهرية؛ كالدرنات، والأبصال، والريزومات، والكورمات. يشيع في النباتات.

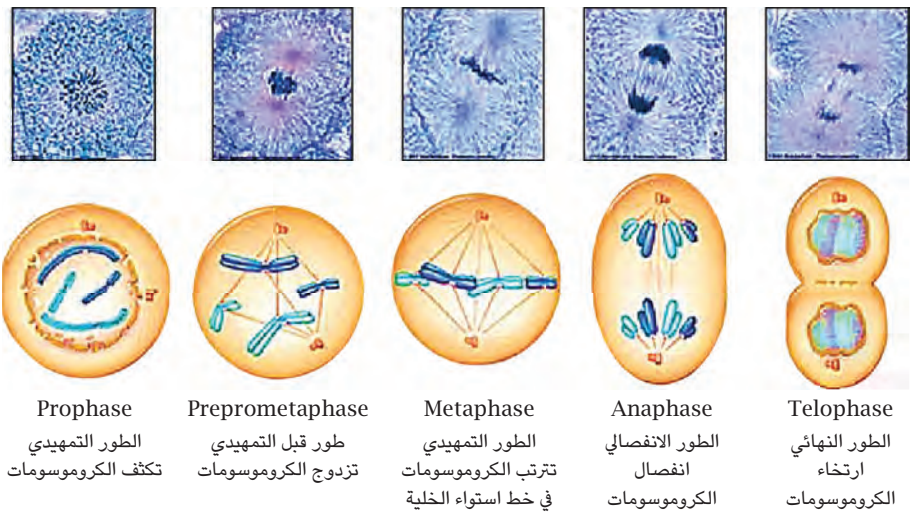


شكل ٤-٥٢: الأبواغ في الفطر *Aspergillus*.

(أ) الانقسام الخيطي (Mitosis)

في الأحياء الحقيقية النواة تعتمد طرق التكاثُر اللاجنسي على الانقسام الخيطي لإكثار الخلايا. ويتضمَّن انقسام النواة (Karyokinesis) يُتبَع بانقسام الخلية (Cytokinesis)؛ لتكوين خليتَين متماثلتَين. يحصُل الانقسام الخيطي في الأحياء الأُحادية الخلية، ويؤدِّي إلى زيادة عددها، وفي الأحياء المتعددة الخلايا والتي تكون ثنائيةَ المجموعةِ الكروموسومية عادة، وفي معظم الفطريات في الخلايا الأُحادية المجموعة الكروموسومية أيضًا لغرض النمو.

يجري الانقسام الخيطي بمراحلَ محدَّدةٍ متتالية، تبدأ بالطور التمهيدي (Prophase) ثم الاستوائي (Metaphase) والطور الانفصالي (Anaphase) وأخيرًا الطور النهائي (Telophase) (شكل ٤-٥٣). نتيجة الانقسام الخيطي تتكوَّن خليتان متماثلتان وراثيًّا من خليةٍ واحدة.



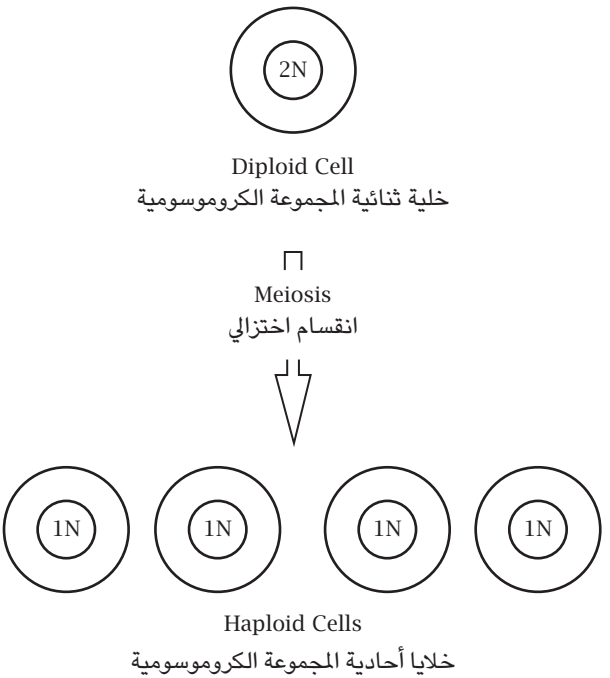
شكل ٤-٥٣: الانقسام الخيطي. مراحل الانقسام الخيطي المتتالية. في الأعلى صور حقيقية يقابلها في الأسفل رسوم توضيحية.

(٦-٢) التكاثر الجنسي

ينتُج التكاثر الجنسي عن اتحاد فردَين أو خليتَين أحاديتَي المجموعة الكروموسومية، كلٌّ منهما من أحد فردَين، وخلط المواد الوراثية، وإعادة قسمتها بقصد إيجاد تغايُرٍ وراثي يؤدي إلى التطوُّر. يتضمن التكاثر الجنسي ثلاث عمليات هي: الانقسام الاختزالي والاندماج البلازمي (Plasmogamy) والاتحاد النووي (karyogamy). تسَلسُل هذه العمليات يمكن أن يختلف بين الأنواع المختلفة؛ فالأحياء التي تتألَّف أجسامها من خلايا ثنائية المجموعة الكروموسومية (Diploid, 2N) كالإنسان والحيوانات والنباتات، يكون تسَلسُلها كما ذكر أعلاه، لكن في الأحياء التي تتألف أجسامها من خلايا أحادية المجموعة الكروموسومية

(Haploid, 1N) مثل أغلب الفطريات فتبدأ بالاندماج البلازمي، ثم الاتحاد النووي، وتتبع بالانقسام الاختزالي.

(ب) الانقسام الاختزالي (Meiosis)

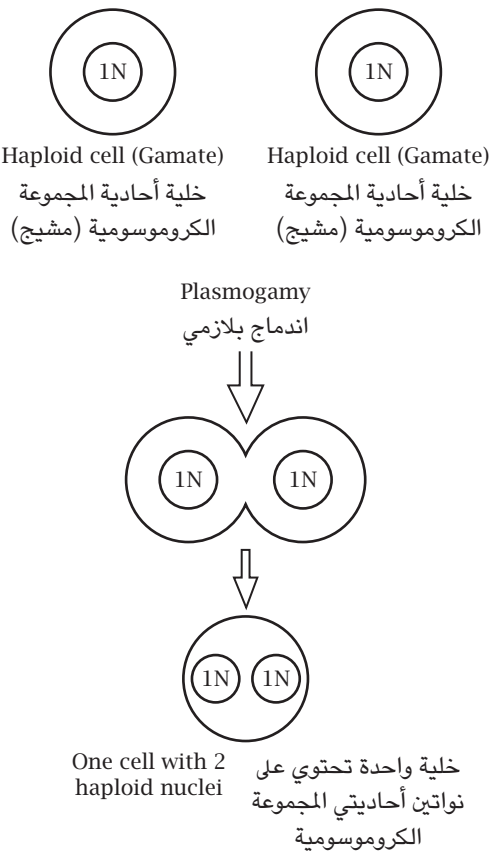


شكل ٤-٥٤: رسم تخطيطي يلخص عملية الانقسام الاختزالي.

يحصُل الانقسام الاختزالي في الخلايا الجنسية الثنائية المجموعة الكروموسومية. يتم الانقسام الاختزالي على مرحلتَين؛ الانقسام الاختزالي I والانقسام الاختزالي II. وكل مرحلة تتألف من أطوارٍ متتالية؛ الطور التمهيدي I والطور الاستوائي I والطور الانفصالي I والطور النهائي I تتبع بالطور التمهيدي II والطور الاستوائي II والطور الانفصالي II والطور النهائي II. أهم الأحداث تحصل في الانقسام الأول؛ ففي الطور التمهيدي I تجري عملية تبادُل القطع بين الكروماتيدات المتماثلة غير الشقيقة في عملية العبور (Crossing over) ويؤدي إلى إعادة الاختلاط الوراثي وفي الطور النهائي I يجري تنصيف أعداد

الكروموسومات. وفي نهاية الطور النهائي II تتكون ٤ خلايا كلٌّ منها يحتوي على نصف العدد من الكروموسومات (1N) (شكل ٤-٥٤).

(ج) الاندماج البلازمي

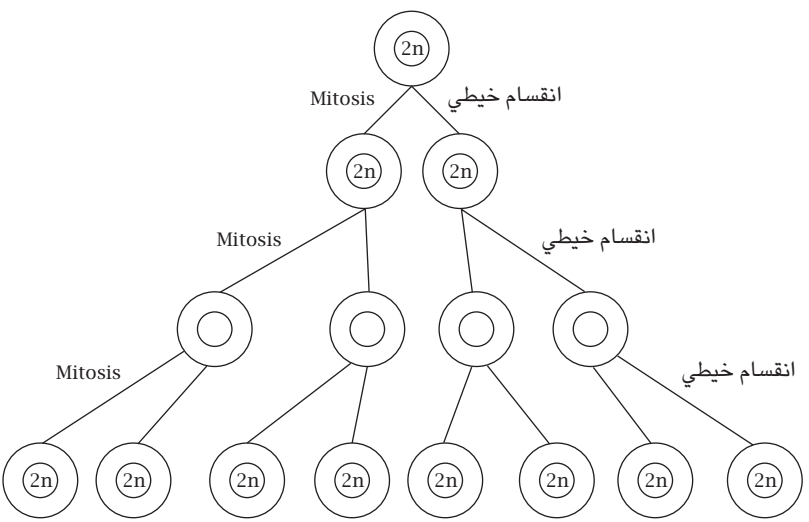


شكل ٤-٥٥: رسم تخطيطي يوضح عملية الاندماج البلازمي.

يتضمن الاندماج البلازمي تماس المشيجين المتزاوجين وذوبان أغشية (أو جدران) الخلايا في منطقة التماس واندماج محتوى البروتوبلازم للمشيجين. هذه العملية تنتج خلية واحدة بنواتين أحاديتي المجموعة الكروموسومية (شكل ٤-٥٥).

(د) الاندماج النووي

شكل ٤-٥٦: رسمٌ تخطيطيٌّ يُوضِّح الاندماجَ النووي.



شكل ٤-٥٧: تكاثُر الخلية الثنائية المجموعة الكروموسومية بواسطة الانقسام الخيطي.

في الاندماج النووي، تتحد النواتان الأحاديتا المجموعة الكروموسومية؛ لتكونا خلية بنواة واحدة ثنائية المجموعة الكروموسومية والتي تُسمَّى اللاقحة (Zygote) (شكل ٤-٥٦).

الزيادة التي تحصُل بعد ذلك في عدد الخلايا الثنائية المجموعة الكروموسومية والتي تشكِّل جسم الكائن الحي تنشأ عن عملياتٍ متكرِّرة من الانقسام الخيطي لخلية اللاقحة والخلايا الناتجة عنها (شكل ٤-٥٧).

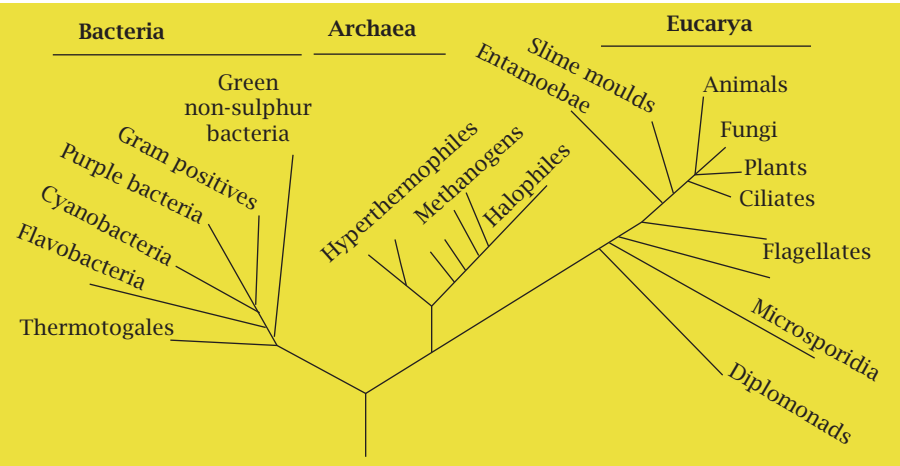
(٧) تقسيم الكائنات الحية Systematics of Living Organisms

تُعَد الكائنات الحية من بين الأشياء الأكثر تنوُّعًا في الكون؛ فثمَّة ١,٦ مليون نوعٍ موصوف من الأحياء موزَّعة على ٧ ممالك (Ruggiero *et al.*, 2015) وملايينُ أخرى تنتظر الوصف، علمًا أن هذه الأرقام هي أقل من ٠,١٪ من عدد الأنواع المنقرضة.

الكائنات الحية تُظهِر الوحدة والتبايُن. تتمثل الوحدة بخواصِّ التركيب الخلوي والمعلومات الوراثية والأيض والتكاثُر والبقاء. بينما يظهر الاختلاف في طبيعة النمو (خلايا مُفرَدة، تجمُّع أو تعدُّد وتمايُز الخلايا) والشكل واللون والحجم واختيار البيئة وطُرق الحصول على المواد العضوية والطاقة ودرجة التعقيد.

الكائنات غير الخلَوية مثل الفايروسات تشترك مع الكائنات الخلَوية بامتلاكها للمادة الوراثية والقدرة على التضاعُف والتطوُّر والبقاء بوجود الأحياء الخلَوية.

ولغرضِ التعرُّف على هذا الكَم الهائل من التشابُه والاختلاف كان لا بد للناس من تمييز هذه الأحياء؛ فبعضها نافع والآخر سامٌّ وفيها المفترس ... إلخ. وأطلق الناس عليها أسماءً تُعرف بالأسماء الشعبية. هذه التسميات محدودةٌ وغير دقيقةٍ وتختلف من منطقة إلى أخرى؛ لذلك كان لا بد من تصنيف هذه الأحياء على أُسسٍ يتفق عليها العلماء، وهو جهدٌ علميٌّ مُضنٍ، امتد لعدة قرون، يبدأ بالوصف (Description) ثم التشخيص (Identification) والتسمية (Naming) وَفْق قواعدَ معيَّنة، والذي صار من مهمة علم التصنيف (Taxonomy). لقد ارتبط التقدُّم في هذا العلم كغيره مع تطوُّر التقنيات العلمية. في البداية اعتمد على المظهر الخارجي، ثم استفاد من التشريح والتركيب الداخلي، ثم الخلوي، وبعدها على الكيمياء، ثم التركيب الجُزيئي والوراثي. في حين كانت البدايات تهدفُ إلى التفريق بين أنواع الأحياء صار الآن البحث عن علاقات القرابة والعلاقات



شكل ٤-٥٨: تمثيلٌ تخطيطيٌّ لشجرة الحياة العامة المُفترَضة للكائنات الحية مستندة إلى تتابع القواعد النووية لجُزيئة DNA المشفِّرة لجُزيئة ssrRNA، تظهر بعض مجاميع الأحياء؛ Eucarya الأحياء الحقيقية النواة وAvchaea الأركيا وBacteria. البكتيريا. عن: Woese (1994).

التطوُّرية المبنية على الأُسس الجُزيئية مثل DNA والبروتينات. هذا العلم من أكثر العلوم عرضةً للتغيُّر بسبب الأبحاث المتواصلة والتي تقترب أكثر فأكثر من الحقيقة. واستنادًا إلى وجود الصفات المشتركة قُسِّمَت الأحياء إلى مجاميعَ سُمِّيَت بالمصنَّفات (Taxa) وهذه رُتِّبَت في تسلسُلٍ هرميٍّ من الأعلى كالتالي: المملكة (Kingdom) ← الشعبة (Phylum) ← الصف (Class) ← الرتبة (Oder) ← العائلة (Family) ← الجنس (Genus) ← النوع (Species). وفي كل مرتبةٍ يمكن أن يكون ثمَّة فوق مرتبة أو تحت-مرتبة. عدد المصنَّفات والصفات المشتركة تكون أقلَّ في المراتب العالية، ثم تزيد تدرجيًّا مع كل مرتبةٍ تاليةٍ لتكون الأكثر في مرتبة النوع. في الواقع هذه المصنَّفات هي مفاهيمُ (Concepts) لا يُقابلها في الواقع شيءٌ ملموس. لكنها ضروريةٌ لتتبُّع علاقات القربى بين الأحياء. الشيء الواقعي الملموس في التصنيف والذي يُمكِن التعامُل معه هو الفرد (Individual) أو العزلة (Strain) أو الآهلة (Population). وحسَب Ruggiero *et al.*, (2015) تُقسَّم الأحياءُ إلى ٢ فوق مملكة (Superkingdom) هما فوق مملكة بدائيات النواة (Prokaryota) وفوق

مملكة حقيقيات النواة (Eukaryota) واللتان تضُمَّان ٧ ممالك و٩٦ شعبة و٣٥١ صفًّا و١٤٦٧ رتبة.

ويعتقدُ علماء الأحياء أن جميع الأنواع نشأَت من جَدٍّ مشتركٍ وتفرَّقَت نتيجة التغايُر الوراثي والبيئي والانتخاب الطبيعي. وعليه قَسَّم Woese (1994) الأحياء واستنادًا إلى التشابُه والاختلاف في تتابُع القواعد النووية في جُزيئة DNA المشفِّرة لجُزيئة ssrRNA إلى ثلاثة حقولٍ (Domains) هي البكتيريا والأركيا والأحياء الحقيقية النواة (شكل ٤-٥٨).

(٧-١) ممالك الأحياء The Kingdoms of Life

(أ) مملكة البكتيريا Kingdom Bacteria

البكتيريا أحياءٌ بدائيةُ النواة تتألَّف من خلايا مُفرَدة أو ثنائية أو بسلاسلَ أو تجمُّعاتٍ عنقودية وبأبعاد ١ إلى ٢مكم. وكما تم شرحها في موضعٍ سابقٍ من هذا الفصل.

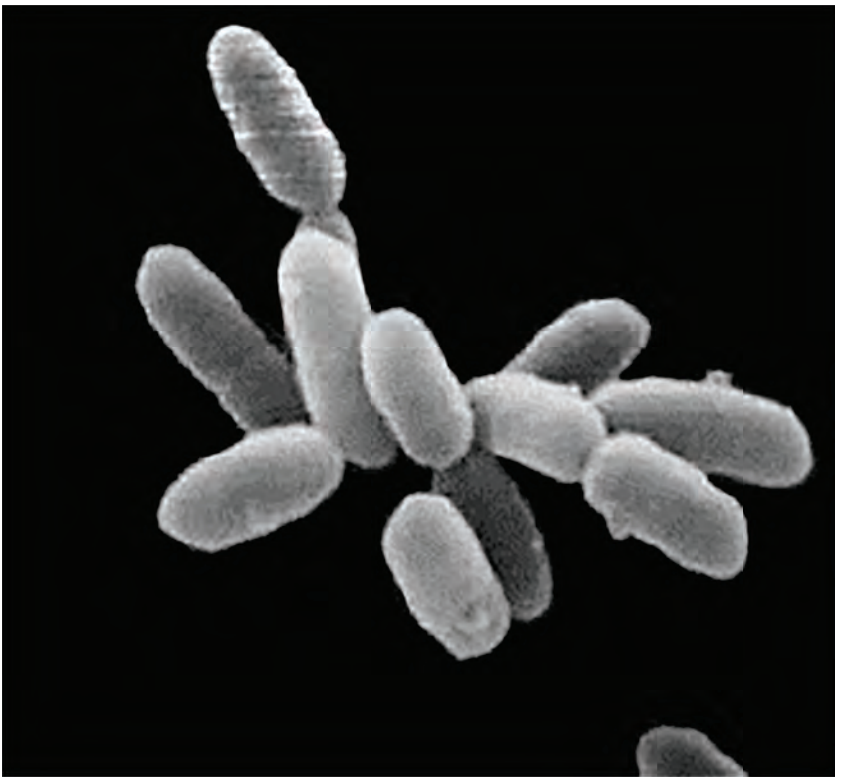
تضُم مملكة البكتيريا ٤٠٠٠ نوعٍ موصوفٍ وعشرات آلاف الأنواع التي تنتظر الوصف (Brenner *et al.*, 2001). وتتألَّف من ٢٩ شعبةً و٥٤ صفًّا و١٢١ رتبةً (Ruggiero *et al.*, 2015).

(ب) مملكة الأركيا Kingdom Archaea

الأركيا أحياءٌ بدائيةُ النواة، أُحاديةُ الخلية، مظهريًّا مُشابهة للبكتيريا وبأبعادٍ مُقارِبة (شكل ٤-٥٩)، إلا أنها تختلف تركيبيًّا وفَسْلجيًّا وبيئيًّا معها.

تتكاثَر الأركيا بالانشطار الثنائي والتجزُّؤ والتبرعُم ولا تكون أبواغًا، ولم يتم تنميتُها في المختبر. وتتميَّز الأركيا بوجود الشحوم الإيثرية مثل Archaeols في أغشية الخلايا. تعيش الأركيا في بيئاتٍ مختلفةٍ بما فيها البيئات المتطرِّفة الحرارة والحموضة والملوحة. كما تعيش في بعض أجزاء الإنسان. بعضها ذاتيُّ التغذية يعتمد ضوء الشمس، وبعضُها يُثبِّت الكاربون، ولها علاقاتٌ تعايشيةٌ غير أنها ليست طُفيلية.

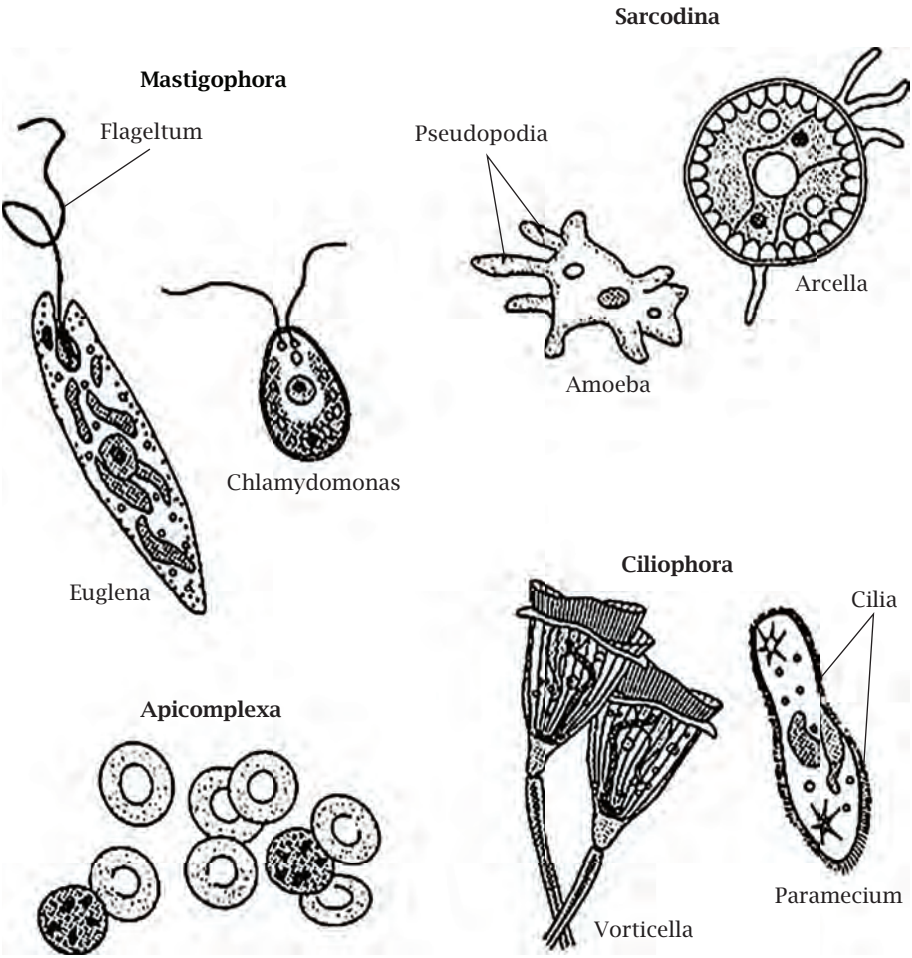
عدد الأنواع ٥٠٢ (Mora *et al.*, 2011). تضُم مملكة أركيا شُعبتَين و١٣ صفًّا و٢٠ رتبة (Ruggiero *et al.*, 2015).



شكل ٤-٥٩: خلايا الأركيا *Halobacterium*. sp. عن: Wikipedia.

(ج) مملكة الحيوانات الابتدائية Kingdom Protozoa

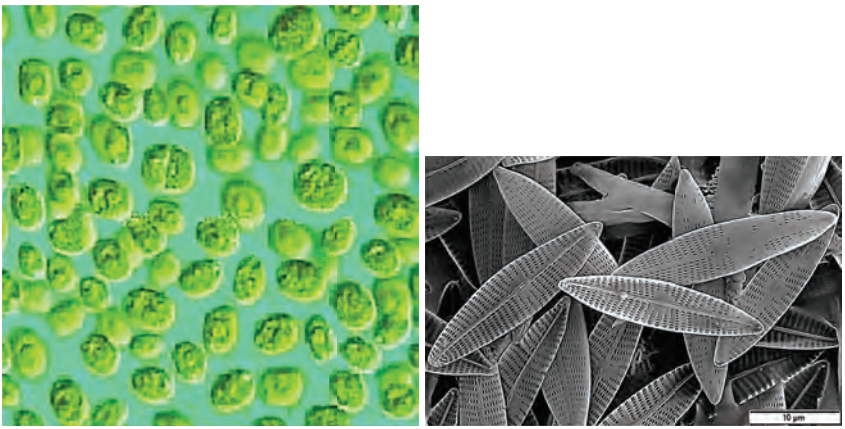
أحياءٌ حقيقيةُ النواة، معظمها أُحادية الخلية لكن بعضها يكون مستعمرات، تفتقد لجدار الخلية، وطريقةُ تغذيتها ابتلاعيةٌ بواسطة الإدخال والشرب الخلَوي. معظم الحيوانات الابتدائية غيرية التغذية. تعيش حرةً في بيئاتٍ مختلفةٍ أو داخل أحياءٍ متعدِّدة الخلايا كالحيوانات الراقية والإنسان. بعضُها يعيش بشكلٍ طُفيلي، ويُسبِّب أمراضًا للحيوانات والإنسان والنبات. للحيوانات الابتدائية تراكيبُ حركية كالأهداب والأسواط والأقدام الكاذبة (شكل ٤-٦٠). وتتميَّز دورة حياة الحيوانات الابتدائية بوجود طَورٍ خضريٍّ فعَّال هو الطَّور الغذائي (Trophozite) وطورٍ ساكنٍ مقاوم للظروف غير الملائمة هو الكيس (Cyst).



شكل ٤-٦٠: مجاميعُ من الحيوانات الابتدائية. عن: Houghton Mifflin Harcourt 2020.

عدد الأنواع ٨١١٨، والمخمَّنة ٣٦٤٠٠ (Mora *et al.*, 2011). عدد الشُّعب ٧، وعدد الصفوف ٣٩، وعدد الرُّتَب ٨٢ (Ruggiero *et al.*, 2015).

(د) مملكة الطلائعيات الصبغية (الطحالب) Kingdom Cromista



شكل ٤-٦١: نوعٌ من الدايتوم (يمين) و*Chlorella* (يسار).

تم تثبيتُ مملكة الطلائعيات الصبغية سنة ١٩٨١م، من قِبَل Cavalier-Smith (1981) وهي أحياءٌ حقيقيةُ النواة تفتقد للأنسجة المتخصِّصة. تضُم هذه المملكة معظم الطحالب البحرية والأوليات غيرية التغذية وبعض الطفيليات المُسبِّبة للأمراض في الإنسان مثل: طفيلي الملاريا، وممرضات النبات على البطاطا والبنجر، وتلعب دورًا مهمًّا في البيئات المختلفة. تتراوح هذه الأحياء من الوحيدة الخلية المهدَّبة والدياتومات (Diatoms) (شكل ٤-٦١) إلى الطحالب البُنيَّة العملاقة.

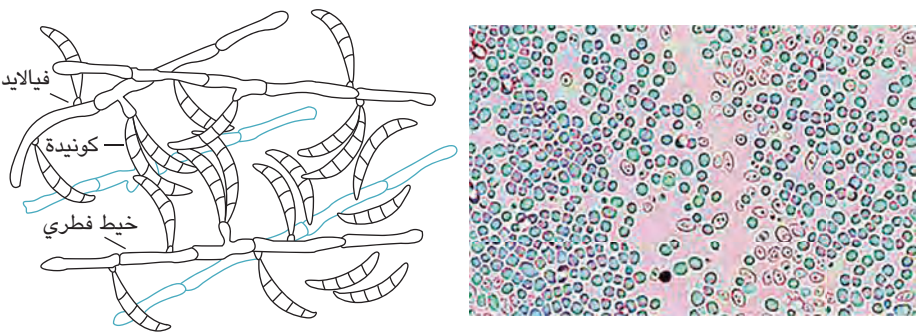
تمتلك خلايا الطلائعيات الصبغية جدران خلايا تتألَّف أساسًا من السليلوز والكلوكونات، والكثير منها خاصة الطحالب تمتلك بلاستيداتٍ خضراءَ قادرةً على التركيب الضوئي.

تضُم المملكة ١٥٠٠٠٠ نوعٍ (Cavalier-Smith, 2018) أو ١٨٠٠٠٠ نوعٍ (Corliss, 2000) معظمها من الدياتومات (١٠٠٠٠٠ نوع) والفورامينفرا (Foraminifera) حوالي ١٠٠٠٠ نوع، بالإضافة إلى آلاف الأنواع غير الموصوفة لحد الآن، وإنَّ أعدادها تفوق أعداد النباتات والحيوانات.

تضُم مملكة الطلائعيات الصبغية ٨ شُعب، و٧٠ صفًّا، و٢٩٧ رتبة (Ruggiero *et al.*, 2015).

(هـ) مملكة الفطريات Kingdom Fungi

الفطريات أحياءٌ حقيقيةُ النواة، جميعها غيرية التغذية. تضُم أنواعًا أحادية الخلايا والمتمثِّلة بالخمائر والفطريات الكتريدية، لكن معظمَ الفطريات متعددة الخلايا، خيطية، وتمتلك جدرانًا خلوية تتألَّف أساسًا من الكلوكونات والمانان والكايتين. جسم الفطر الخيطي يكون عديد الخلايا، والخيوط (Hyphae) تكون غيرَ مقسَّمة أو مقسَّمة مشكَّلة بمجموعها الغزل الفطري (Mycelium). الفطريات تفتقد للأنسجة المتخصصة. تتكاثَر الفطريات جنسيًّا ولا جنسيًّا عن طريق التبرعُم (الخمائر) والتجزُّؤ (الفطريات الخيطية) وأهم وسيلةٍ للتكاثُر هي بواسطة الأبواغ (شكل ٤-٦٢).



شكل ٤-٦٢: خلايا الخميرة (يمين) ورسمٌ تخطيطيٌّ لفطر من نوع *Fusarium*.

تعيش الفطريات في جميع البيئات، وتأتي بعد البكتيريا في أعدادها.

تدخل الفطريات في علاقاتٍ تعايشيةٍ مع الأحياء المختلفة؛ مع الطحالب وبعض أنواع البكتيريا الخضراء المزرقة مكوِّنة الأشنات (Lichens) ذات الانتشار والأهمية البيئية المعروفة. ومع النباتات بشكل مستنبتات (Endophytes) وجذورها مكوِّنة المايكورايزا (Mycorrhiza) ذات الأهمية الكبيرة لنمو النباتات وبعض الفطريات، تتعايش مع الحيوانات؛ كالحشرات والحيوانات المجترة؛ حيث تُساعدُها في تحليل المواد السليلوزية. كما أن العديد من الفطريات تُسبِّب أمراضًا خاصة على النباتات، كما تُسبِّب أمراضًا على الحيوانات والإنسان. وبعض الفطريات تُنتِج سمومًا تُعرف بالسموم الفطرية (Mycotoxins).

الفطريات من أكثر الأحياء قدرةً إنزيمية، وتلعب دورًا أساسيًّا إلى جانب البكتيريا في تحليل المواد العضوية الميتة، وطريقة تغذيتها امتصاصية. كما تُستخدم الفطريات في الصناعات الغذائية والتقنية الحيوية (Sharif, 2019).

تتألف مملكة الفطريات من تحت-مملكة ثنائيات النوى (Dikarya) و٧ شُعب، و٣٤ صفًّا؛ و١٤٨ رتبةً. عدد الأنواع الموصوفة ١٠٠٠٠٠ وعدد الأنواع المخمَّنة يفوق ٥ ملايين.

(و) مملكة النبات Kingdom Plantae

النباتات أحياءٌ حقيقيةُ النواة، مُتعدِّدة الخلايا. الخلايا ذاتُ جدرانٍ سميكة تتألَّف من السليلوز والبكتين واللكنين. جسم النبات يتألَّف من الجذر والساق وفروعه والأوراق والأزهار والثمار والبذور، مع وجود بعض أنواعٍ من النباتات غير الزهرية. أجزاء النبات تتألَّف من أنسجةٍ متخصِّصة. تعيش النباتات في البيئات المائية واليابسة.

مُعظَم النباتات ذاتيةُ التغذية تقوم بالتركيب الضوئي من خلال احتواء خلاياها على بلاستيداتٍ خضراء.

تتكاثَر النباتات جنسيًّا ولا جنسيًّا بوسائلَ متعدِّدة؛ أهمها تكوينُ البذور. وبالنظر لعدم قدرة النباتات على الحركة الانتقالية ولغرض مقاومة المسبِّبات المرَضِية والتغيُّرات البيئية، طوَّرَت النباتات أنواعًا كثيرة من المضادَّات الحيوية والسموم والبروتينات، وصارت مصدرًا مهمًّا للكثير من الأدوية. يتراوح حجم النباتات بين الصغير والقصير العمر المُتمثِّل بالنباتات العشبية إلى الكبير جدًّا مثل الأشجار الضخمة المعمرة.

عدد أنواع النباتات ٢١٥٤٦٦ والمخمَّنة حوالي ٣٠٠٠٠٠ (Mora *et al.*, 2011). عدد الشُّعب ٦، وعدد الصفوف ٤٠، وعدد الرُّتَب ٢٠٥ (Ruggiero *et al.*, 2015).

(ز) مملكة الحيوان Kingdom Animalia

الحيواناتُ كائناتٌ حيةٌ حقيقيةُ النواة، عديدة الخلايا الفاقدة لجدار الخلية، وبذلك تتمكَّن من الحركة الانتقالية. جميع الحيوانات غَيْرية التغذية وطريقةُ تغذيتها ابتلاعية. تتراوح أحجام الحيوانات بين الصغيرة إلى الكبيرة جدًّا مثل الحيتان. جسمُ الحيوان يتألَّف من أعضاء وأنسجةٍ مختلفة. تعيش الحيوانات في جميع البيئات المائية واليابسة، وتدخل في علاقاتٍ تعايشيةٍ مع البكتيريا والأركيا والفطريات. مُعظَم الحيوانات الراقية تتكاثر جنسيًّا فقط.

تضُم مملكة الحيوان ٩٥٣٤٣٤ نوعًا موصوفا، والأنواع المخمَّن وجودها ٧٧٠٠٠٠٠ (Mora *et al.*, 2011). عدَد الشُّعب ٣٤، وعدد الصفوف ٩٩، وعدد الرُّتَب ٥٠٨ (Ruggiero *et al.*, 2015).

الفصل الخامس

الحالة الكمومية تكمُن في تركيب جُزيئة الـ «دي إن إيه»

Quantum State Built In DNA Structure

افترض شرودنجر (١٩٤٤م) أنَّ عوامل الصفات الوراثية (الجينات) لا بد أن تكون بلوراتٍ غير دورية على خلاف البلورات الدورية للمواد الصلبة، كملح الطعام؛ حيث تترتَّب الذرات ضمن البلورة بنسقٍ فراغيٍّ معيَّن ومتكرِّر لا يتغير. ومثل هذه البلوراتِ لا تحمل كثيرًا من المعلومات بينما البلورة غير الدورية مثل الجين تحتوي على تراكيبَ منتظمةٍ لكنها متغيِّرة؛ وبالتالي يمكن أن تحمل الكثير من المعلومات. كما استنتج شرودنجر أن الدقة العالية لعمل الجينات (من خلال التردُّد المنخفض جدًّا للطفرات الوراثية) ذات التركيب الذري المحدود لا يمكن أن تفسَّر على أساس قوانين الميكانيك التقليدي والديناميكا الحرارية التي تتطلب أعدادًا هائلةً من الذرات؛ حيث ينشأ النظام من الفوضى، ولا بد أن يُفسَّر عمل الجينات على أساس ميكانيك الكم. بعد ١٠ سنواتٍ من أطروحات شرودنجر، بيَّن واتسون وكريك (١٩٥٣م) أن الجينات هي امتداداتٌ أو مناطقُ من جُزيئة الـ DNA وقدَّما وصفًا دقيقًا لتركيب هذه الجُزيئة وطريقة عملها. وهكذا صار معروفًا أن صفات الكائن الحي وحيويته تتحدَّد بالمعلومات المحفوظة في جُزيئة الـ DNA عَبْر تتابع القواعد النووية في شريطَي الجُزيئة اللذَين يلتفَّان على بعضهما ويشكِّلان اللولب المزدوج. وعلى الرغم من أن طول جُزيئة الـ DNA يصل إلى مئات وآلاف الميكرومترات؛ أي إنه يقع ضمن أبعاد الحالة الفيزيائية التقليدية، فإن سُمكها أو قُطرها لا يتجاوز ٢ن م؛ أي إنه يقع ضمن الأبعاد المجهرية النانوية. وحيث إن الجُزيئات المتفاعلة مع جُزيئة الـ DNA كالبروتينات وإنزيمات البوليميريز تتعامل في الواقع مع النكليوتيدات المفردة في كل خطوة بالتوالي على

شريطٍ واحد، وهي بأبعادٍ نانوية أيضًا. وهكذا فإن هذه المنظومة تسمح من حيث المبدأ بعمل الظواهر الكمومية.

هذا الدور المركزي لجُزيئة الـ DNA ينشأ من كون المعلومات المحفوظة في هذه الجُزيئة هي التي ستُحدِّد أنواع وكميات البروتينات وجُزيئات RNA التي ستُكوِّنها الخلية من خلال التعبير الجيني (Gene expression) في عمليتَي النسخ (Transcription) والترجمة (Translation).

إن كافة مكوِّنات الخلية تتألف من بروتينات وبروتيناتٍ محوَّرة (بروتيناتٍ دهنية وبروتيناتٍ سكرية) ودهونٍ وجُزيئات RNA أو موادَّ أخرى متنوِّعة تتكون من خلال نشاط الإنزيمات التي هي بروتينات أيضًا. إن نوع البروتين يتحدَّد أساسًا من خلال أنواع الأحماض الأمينية وتتابُعها فيه؛ فإن تغيُّر أحد الأحماض الأمينية أو تتابُعَه في الجُزيئة سيؤدي إلى تغيُّر تركيب البروتين ونشاطه، والذي قد ينعكس كتغيُّر في الطراز المظهري (Phenotype) للخلية أو الكائن الحي. وحيث إن أنوع وتتابُع الأحماض الأمينية في جُزيئة البروتين تشفَّر من قِبَل امتدادٍ معيَن من تتابُع القواعد النووية في شريط الـ DNA المعروف بالجين (Gene)، فإن اختلاف إحدى هذه القواعد النووية نتيجة الطفرة (Mutation)، سيؤدي إلى اختلاف نوع البروتين عما هو عليه في الخلية أو الكائن الحي الأصلي، أو ما يُعرف بالطراز البَري (Wild type).

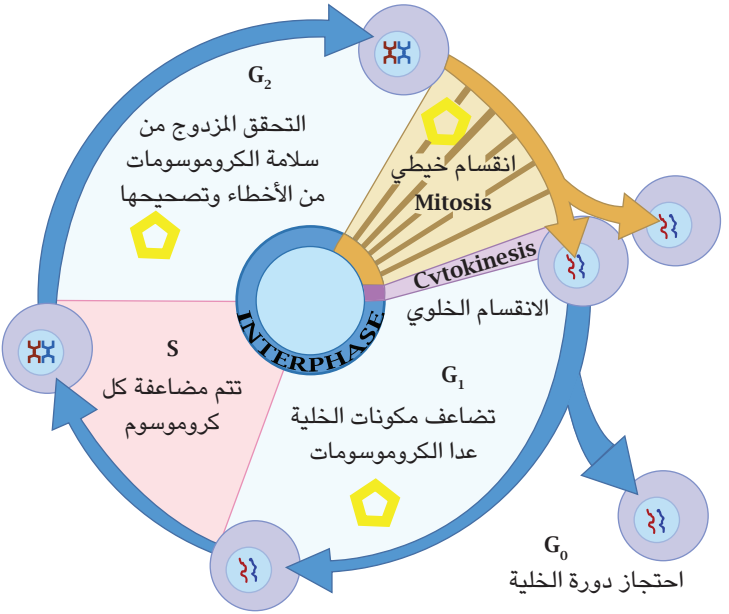
يُعَد التكاثر الذاتي أحد أهم الخواصِّ المميِّزة للكائنات الحية وشرط بقائها. هذه الخاصية تفترض بالضرورة الأمانة التامة في نقل المعلومات المحفوظة في الـ DNA؛ حيث تُورَّث للأجيال اللاحقة؛ لذلك تُسمَّى بالمعلومات الوراثية. غير أن دقة الأحداث في الطبيعة تكون محدودة، وهذا ما تُشير إليه لامتساويات وغنر (Wigner inqualities). وهكذا فإن عملية مضاعفة الـ DNA تبلغ درجةً عالية جدًّا من الدقة، وبنسبة خطأٍ تبلغ واحدًا بالمليار. ونسبة الخطأ هذه تُذكِّرنا بنسبة الخطأ (بمعنى الشذوذ أو الاختلاف) نفسها عند بداية نشوء المادة؛ فحين كان تصادُم المادة والمادة المضادة يؤدِّي إلى فنائهما وتكوين فوتونات، كان واحد بالمليار فقط من هذه المصادمات يشذُّ لينتج مادة، والتي شكَّلَت مادة الكون. صحيح أن النقل تامَّ الأمانة للمادة الوراثية لنسل الخلية أو الكائن الحي ضروريٌّ من أجل تأمين خواصها وفعالياتها، غير أن ذلك يجعلها عاجزةً عن القدرة على الحياة إذا ما تغيَّرَت عوامل البيئة؛ كدرجات الحرارة والرطوبة والضوء والموارد الغذائية ... إلخ، بمدَياتٍ مهمة، وهو ما يحصُل فعلًا؛ فعلى الرغم من أن الكائن الحي معزولٌ بحدودٍ

معيَّنة عن البيئة، إلا أنه لا يتمكن من الحياة أبدًا دون تبادُل المواد والطاقة والمعلومات مع البيئة؛ فهو منظومةٌ معقَّدة متكيِّفة مفتوحة. ومن المعروف أيضًا أن عمل معظم الجينات يتأثَّر بتغيُّر عوامل البيئة. وهكذا سيكون حصول تأثيرٍ مدمِّرٍ للعوامل البيئية لفرد من نوعٍ معيَّن من الكائنات الحية كفيلًا بتدمير جميع الأفراد الأخرى (كونها متماثلةً وراثيًّا) وتدهور أو انقراض النوع. إن عدم الدقة في تضاعُف جُزيئات الـ DNA على ضآلته يفتح إمكانية نشوء تغايُر فيها قد يكون محايدًا أو ضارًّا في الغالب أو نافعًا أحيانًا. وفي حين تؤدي التغايُرات الضارة إلى تدهور الفرد الحامل لها أو زواله، فإن التغايُرات المحايدة أو النافعة يمكن أن تتراكم مع الزمن محدثةً اختلافاتٍ تركيبيةً ووظيفية ثم تنوُّعًا يزيد من قدرة الأحياء على التكيف مع البيئة، من خلال الانتخاب الطبيعي الذي يُبقي على الأفراد الأكثر أهلية للانسجام مع البيئة. إن هذا النوع من التغاير الذي يعتمد على التغيُّر التلقائي (العشوائي) والدائم في جُزيئات الـ DNA والذي يُعرف بالطفرة هو المصدر الأوَّلي للتنوُّع والتطوُّر الذي استخدمَتْه الأشكال الأُولى للنُّظم الحية والأحياء الخلَوية البدائية، المتمثِّلة بالبكتيريا والأركيا واستمرَّت بالاعتماد عليه حتى الوقت الحاضر، مع وجود بعض آليات التغايُر الأخرى؛ كالتزاوج (Conjugation) والتحوُّل (Transformation) والتوصيل (Transduction). غير أن الأحياء الأكثر تطوُّرًا ابتدعَت طَريقا أكثر ضمانًا وتأثيرًا للتغايُر، تمثَّل بالتكاثُر الجنسي. مع ذلك، استمر فعل التغايُر التلقائي (الطفرة التلقائية) في هذه الأحياء أيضًا/والذي ورثته عن أسلافها من الأحياء الأقل تطورًا.

إضافة إلى الطفرة التلقائية ثمة أنواع أخرى تعرف بالطفرات المستحثَّة (Induced mutations) والتي تتسبَّب بفعل عاملٍ مطفِّرٍ (Mutagen) خارجي فيزيائي؛ كالأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية والإشعاعات النووية، أو كيميائية؛ كجذور الأوكسجين الفعَّالة وحامض النتروز والصوديوم أزايد والسموم الفطرية؛ الأفلاتوكين وغيرها. ويمكن أن تنشأ الطفرة المستحثَّة، إضافةً إلى الطفرة التلقائية نتيجة السلوك الكمومي في جُزيئة الـ DNA وهو موضوعُ هذا الفصل.

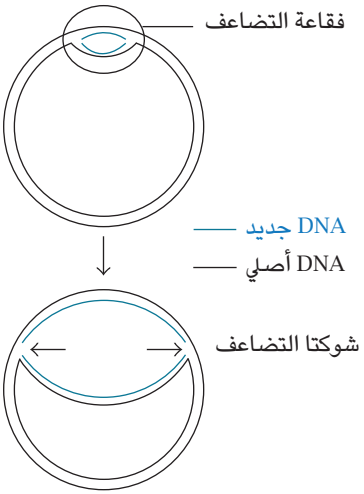
(١) تضاعُف الـ DNA Replication

تتم عمليةُ مضاعفة جُزيئات DNA في الخلايا الحية خلال دورة الخلية (Cell cycle). والأخيرة هي المدة الزمنية بين تكوُّن الخلية الجديدة بعد الانقسام حتى انقسام هذه الخلية إلى خليتَين.



شكل ٥-١: دَورة الخلية. تُمثِّل نقطةَ سيطرة.

دَورَة الخلية هي مجموعةُ أحداثٍ مرتَّبة، متتالية، يمكن تمييزها إلى جزأَين رئيسَين هما: الطور البَيْني (Interphase) والانقسام الخيطي (Mitosis). الطور البَيْني هو الأطول في دَورة الخلية، وخلالَه تُمارِس الخلية فعالياتها الطبيعية، ويميَّز إلى ثلاث فتراتٍ هي الفترة الأولى (G1) يتم خلالها بلوغ الخلية لحجمها الطبيعي ومضاعفة أعداد عُضيَّات الخلية، وتوفير البروتينات اللازمة لمضاعفة الـ DNA. وفترة التخليق (S) حيث يتم خلالها تضاعُف الـ DNA ويُصبِح كل كروموسوم مكوَّنًا من زوجٍ من الكروماتيدات بعد أن كان كروماتيدًا واحدًا. وفترة (G2) حيث تخلق البروتينات اللازمة للانقسام الخيطي. الطور الأخير (M) يتضمَّن انقسام النواة في الأحياء الحقيقية النواة، يُتبع بانقسام الخلية (Cytokinasis) حيث تنشأ خليتان تحتوي كلٌّ منهما على نواة ونفس العدد من عُضيَّات الخلية. في الأحياء البدائية النواة ينشأ جدارٌ وسط الخلية يفصل جُزيئتَي الـ DNA المتضاعفة، لتتكوَّن خليتان تحوي كلٌّ منهما جُزيئةَ DNA (كروموسوم واحد) وكميةً متساويةً من السايتوبلازم.

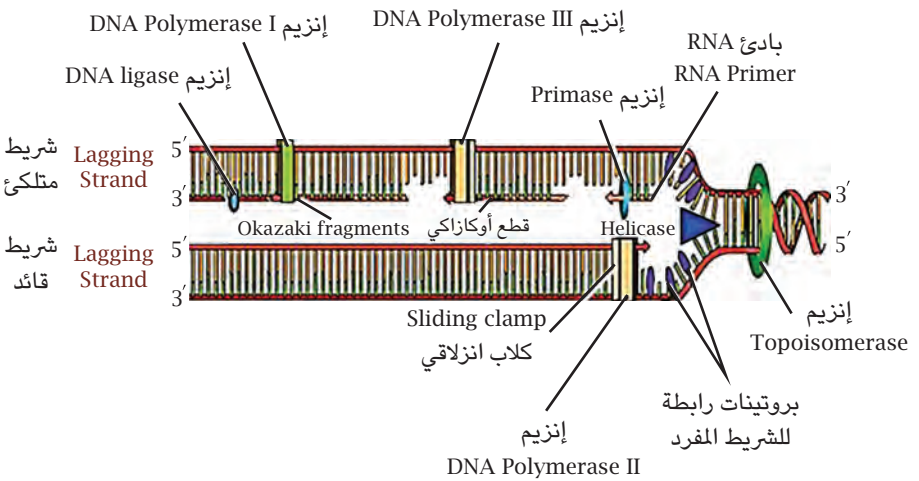


شكل ٥-٢: بدء تضاعُف الـ DNA بإفصال الشريطَين وتكوين شوكتَي التضاعُف.

في دَورة الخلية يُوجد عددٌ من نقاط السيطرة (Check points) أهمُّها في فترات G1 وG2 وM للتأكُّد من سلامة جُزيئات DNA. عند اكتشاف خطأ فيها تتم عمليةُ إصلاحٍ تتضمَّن استبدال القواعد النووية الخطأ (غير المتمِّمة للقواعد النووية في شريط القالب) بأخرى صحيحة (متمِّمة لشريط القالب) بواسطة أحد أنواع الإنزيم DNApolymerase وتستمر دَورة الخلية. لكن عند فشل عملية الاصلاح، أو عند عدم وجود المستلزمات الضرورية من أجل مضاعفة الـ DNA كما في الخلايا التي لا تنقسم بعد نُضجها كالخلايا العضلية والعصبية، فيتم احتجاز الخلية في طَورٍ يُسمَّى G0 وتتوقَّف دورة الخلية (أي إنها لا تنقسم) كما في الشكل ٥-١.

يختلف زمن دَورة الخلية بين أنواع الأحياء المختلفة؛ فهي تكون قصيرةً في البكتيريا؛ حيث تكون في الظروف الملائمة بحدود ٢٠ دقيقة في البكتيريا *Escherichia coli* و١٠٠ دقيقة في الفطر النموذجي *Neurospora crassa* و٢٤ ساعةً في الإنسان.

تتلخَّص عملية مُضاعَفة جُزيئات الـ DNA بفك شريطَي جُزيئة الـ DNA في نقطةٍ تُسمَّى نقطة الأصل وتتوسَّع تدريجيًّا، لتتخذ شكل الفقاعة والتي تحتضن انفراجَ شريطَي الـ DNA، لتُكوِّن ما يُشبِه الشوكة المتقابلة كما في الشكل ٥-٢. ويقوم الإنزيم DNApolymerase بعد ارتباطه ببادئ RNA (Primer) قصيرٍ يُكوِّنه الإنزيم Primase

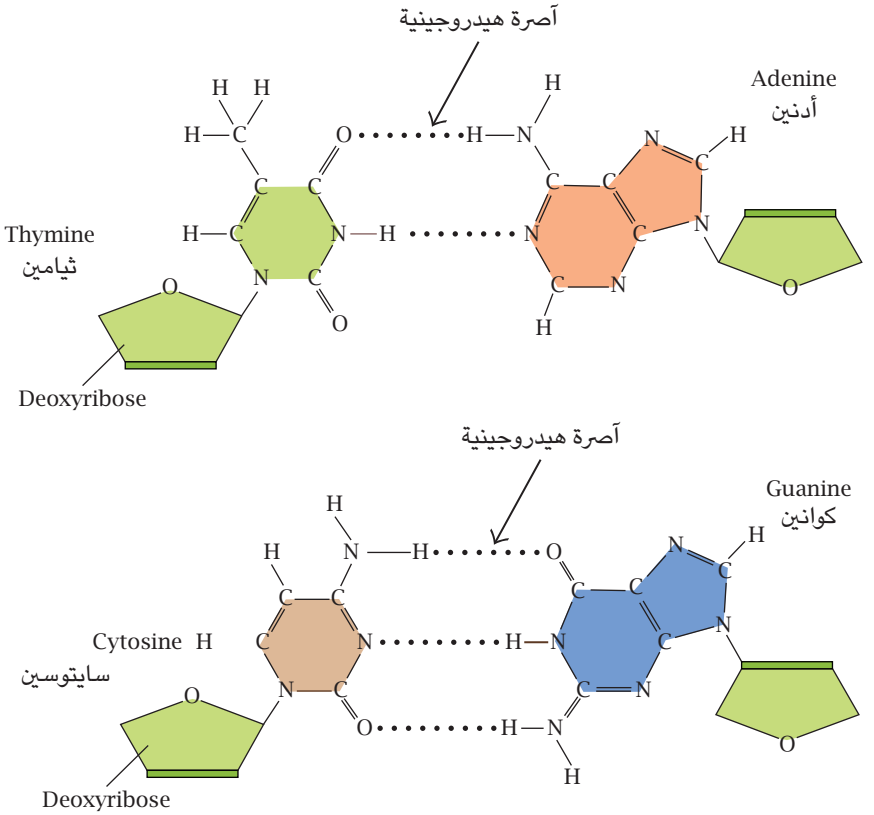


شكل ٥-٣: الإنزيمات والبروتينات المشتركة في تضاعُف الـ DNA.

بقراءة القواعد النووية على أحد شريطَي الجُزيئة الذي يستخدمه كقالب ويُنشئ شريطًا جديدًا مُتمِّمًا لشريط القالب؛ حيث يضع قاعدةً نوويةً متمِّمة متوفرة مقابل كل قاعدةٍ نوويةٍ من شريط القالب. وفي الوقت نفسه تقوم جُزيئةٌ أخرى من الإنزيم بالعمل نفسه على الشريط الآخر ولكن باتجاهٍ معاكس. وهكذا ستتكون جُزيئتان من الـ DNA يتألَّف كلٌّ منهما من شريطَين أحدهما أصلي (القالب) والآخر جديد. فك الشريطَين يتم من خلال تكسيرِ الأواصر الهيدروجينية بواسطة الإنزيم Helicase ومساعدة الإنزيم Topoisomerase وبعض البروتينات الرابطة (Binding proteins) (شكل ٥-٣).

تحصُل الطفرة التلقائية نتيجةً لطريقة ارتباط القواعد النووية في شريطَي الـ DNA؛ فمن المعروف أن القاعدة النووية أدنين (A) في أحد الشريطَين ترتبط بالقاعدة النووية المتمِّمة والمقابلة لها ثيامين (T) في الشريط الآخر بواسطة اثنَين من الأواصر الهيدروجينية. كما ترتبط القاعدة النووية سايتوسين (C) في أحد الشريطَين بالقاعدة النووية المتمِّمة والمقابلة لها كوانين (G) من الشريط الآخر بواسطة ثلاثِ أواصرَ هيدروجينية. ازدواجُ القواعد النووية القياسي هذا يُسمَّى بازدواجِ واتسون-كريك (شكل ٥-٤).

الأواصر الهيدروجينية بين القواعد النووية على الشريطَين المتقابلين للَّولب المزدوج لجُزيئة الـ DNA قُوًى مستقرة من حيث الديناميكية الحرارية. الآصرة الهيدروجينية



شكل ٥-٤: ازدواجُ واتسون-كريك للقواعد النووية في الـ DNA.

المُفرَدة ضعيفةٌ غير أن عددها الكبير جدًّا على امتداد شريطَي الـ DNA يجعل منها قوةً مهمةً وكافيةً لربط الشريطَين بشكل لولبٍ مزدوج. الآصرة الهيدروجينية تنشأ نتيجة شراكة ذرَّتَين في جُزيئتَين؛ إحداهما ذات كهروسالبيةٍ أعلى؛ مثل ذرة الأوكسجين من جُزيئة مع ذرة الهيدروجين من جُزيئةٍ أخرى، أو ذرة النتروجين من جُزيئة مع ذرة الهيدروجين من جُزيئةٍ أخرى. وحيث إن إلكترون ذرة الهيدروجين سيُسحب إلى الذرة ذات الكهروسالبية الأعلى، تبقى الجُزيئتان مرتبطتَين أو مشتركتَين بنواة الهيدروجين أو البروتون. إن تكوينَ الأواصرِ الهيدروجينية بين القواعد النووية هو الذي يمكِّن من تكوينِ ارتباطاتِ واتسون-كريك بين هذه القواعد النووية؛ فالقاعدة النووية أدنين تزدوج مع

القاعدة النووية ثيامين؛ لأن كل جُزيئة أدنين تحمل بروتوناتٍ في المواقع المناسبة التي تمكِّنها من عملِ آصرةٍ هيدروجينية مع الثيامين. ولا تتمكَّن جزيئة الأدنين من الازدواج مع الكوانيين ولا السايتوسين مع الثيامين؛ لأن البروتونات لا تتموضع في المواقع المناسبة لتكوين الأواصر. مع ذلك، يمكن أن تتكوَّن أواصرُ هيدروجينيةٌ بين الكوانين والثيامين منتجةً قواعدَ نوويةً مشابهة لازدواج واتسون-كريك. كما تزدوج القواعد النووية كوانين مع اليوراسيل في جُزيئات RNA، وتلعب دورًا مهمًّا في تركيب RNA وتآثُرات RNA-بروتين، لكن تغيُّر ازدواج كوانين-سايتوسين إلى كوانين-ثيامين في الـ DNA يُمكِن أن يغيِّر تتابُع القواعد النووية على نحوٍ مُؤثِّر مع كل انقسامٍ خلَوي؛ لذلك تُوجد آلياتُ تصحيحٍ وتصليحٍ حيث تُميز أزواج القواعد النووية المختلفة عن نموذج واتسون-كريك ويتم تصحيح معظم الأخطاء (Allison, 2007).

ومن المعروف أن سلوك الجُسَيمات تحت الذرية؛ مثل الإلكترونات والبروتونات والذرات، تخضع لقوانين ميكانيك الكَم. وكان الفيزيائي السويدي Per-Olov Löwdin، أول من أشار إلى أن موقع البروتون يخضع لقوانين ميكانيك الكَم وليس للميكانيك التقليدي (Johnjoe & Al-Khalili, 2014).

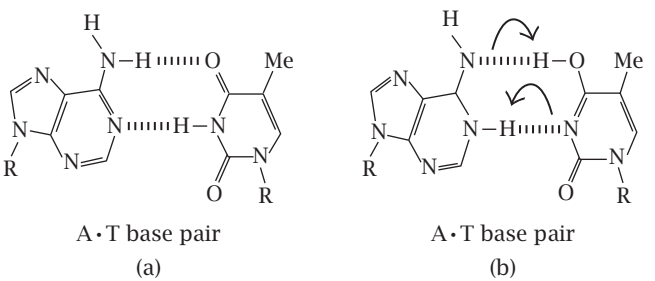
إن سلامة تتابُع القواعد النووية على شريطَي الـ DNA لا يضمن أمانة المحافظة على المعلومات الوراثية لهذه الجُزيئة ونقلها باستمرار إلى الخلايا الجديدة من خلال مضاعفة الـ DNA وحسب، وإنما هو عاملٌ مقرِّر لبناء مكوِّنات الخلايا والكائن الحي وفعاليتهما عَبْر التعبير الجيني. وهذا الأخير يتضمَّن عمل الإنزيم RNApolymerase الذي يقرأ تتابُع القواعد النووية على شريط الـ DNA مُكوِّنًا جُزيئات mRNA متمِّمة في عملية النسخ، تُتبَع بتكوين البروتينات في عملية الترجمة.

(٢) دَور البروتونات في إحداث الطفرة Role of Protons In Mutation

(٢-١) الطفرة التلقائية Spontanous Mutation

كما أشرنا سابقًا أن ارتباط القواعد النووية في جُزيئة الـ DNA يتم من خلال تكوين الأواصر الهيدروجينية، وأن العامل الحاسم في نُشوء هذه الأواصر هو مشاركة القاعدتَين النوويتَين المتقابلتَين بالبروتون. وكما نرى في الشكل ٥-٥ فإن الأواصر الهيدروجينية تمثَّل بخطوطٍ متقطِّعة لتوضيح أن مواقع البروتونات يمكن أن تكون على امتداداتِ هذه

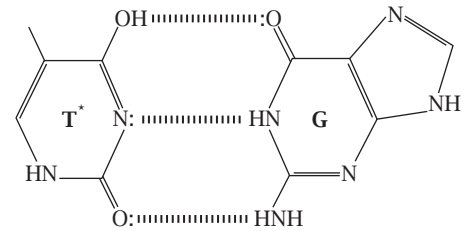
الخطوط المتقطِّعة. وكما يُلاحظ في الشكل فإن البروتون لا يكون في منتصف المسافة، بل أقرب إلى أحد الشريطَين دون الآخر. السبب في ذلك يرجع إلى أن البروتون هو جُسيمٌ ذرِّي يظهر حالة ازدواجية الجسيم – الموجة. وهكذا يمكن أن يتحرَّك البروتون كموجةٍ في المسافة بين ذرَّتَي النتروجين في الأدنين والأوكسجين في الثيامين على الشريط الآخر أو ذرة النتروجين في الثيامين على شريط وذرة النتروجين في الأدنين على الشريط الآخر. وإذا أخذنا مثال ازدواج الأدنين والثيامين في الشكل ٥-٥ (a)، فإن أحد البروتونَين سيكون أقرب إلى ذرة النتروجين في الأدنين والآخر أقرب إلى ذرة الأوكسجين في الثيامين مؤديًا إلى تكوين آصرتَين هيدروجينيتَين. لكن في الحالة الكمومية التي نُناقِشها ليس للبروتون موقعٌ ثابت؛ فهو يمكن أن يكون في جميع المواقع في الوقت نفسه، وهو أمرٌ تحدِّده الاحتمالات. وما عرضناه عن مواقع البروتونات في هذا المثال إنما يمثِّل الاحتمالاتِ الأرجح. مع ذلك لا يمكن استبعادُ الاحتمالات الضئيلة الأخرى التي تتطلَّب عملية اختراق (Tunneling). عدم التناظُر في موضع البروتونات هنا هو عاملٌ حاسمٌ في عمل جُزيئة الـ DNA (Johnjoe & Al-Khalili, 2014).



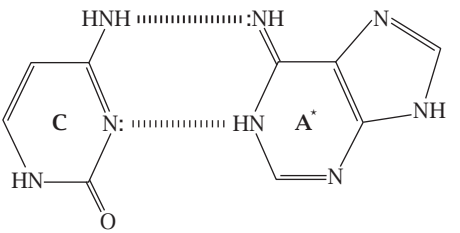
شكل ٥-٥: زوج القواعد النووية أدنين A وثيامين T. عن: Johnjoe & Al-Khalili (2014).

لو أن البروتونَين اللذَين يربطان القاعدتَين النوويتَين قفزا إلى الجانب الآخر من الآصرة الهيدروجينية، فسيكون كلٌّ منهما أقرب إلى القاعدة النووية المقابلة. هذا سيؤدي إلى تكوين شكلٍ بديلٍ لكل قاعدةٍ نووية يُسمَّى بالصنو أو التاوتومير (Tautomer) كما في الشكل ٥-٦. وهكذا كل قاعدةٍ نوويةٍ في الـ DNA يمكن أن تُوجد بصيغتها الاعتيادية الشائعة حسب ازدواج واتسون-كريك، وكذلك بصيغتها التاوتوميرية النادرة حيث تَعبُر بروتوناتها المشفَّرة إلى المواقع الجديدة. الحالة الأُولى ستُنتِج ازدواجًا طبيعيًّا للقواعد

النووية، أما الحالة الثانية فستؤدي إلى ازدواجٍ غير طبيعي، فإذا حصل أنْ أدَّى انتقال البروتونات إلى تكوين الصيغ التاوتوميرية النادرة الحدوث للقواعد النووية أثناء عملية مضاعفة شريط الـ DNA، فسيتم تضمينُ القواعد النووية الخطأ في الشريط الجديد.



Thymine (enol) Guanine (keto)



Cytosine (amino) Adenine (amino)

شكل ٥-٦: يمكن للثيامين بصيغته التاوتوميرية (الأينولية) المشار اليها بالرمز T* أن يزدوج خطأً مع الكوانين G وليس مع شريكه الاعتيادي؛ الأدنين A. كذلك يُمكِن للصيغة التاوتوميرية A* للأدنين A أن تزدوج خطأً مع السايتوسين C وليس مع الثيامين T. إذا ما تم تضمين هذه الأخطاء خلال تضاعُف الـ DNA ستنتج طفرة. عن: Johnjoe & Al-Khalili (2014).

وهكذا يُمكِن أن يزدوج الثيامين التاوتوميري مع الكوانين بدلا من الأدنين، وبذلك سيضمن الكوانين في الشريط الجديد حيث كان أدنين في الشريط القديم. كذلك لو أن الأدنين هو في الصيغة التاوتوميرية أثناء تضاعُف الـ DNA، فإنه سيزدوج مع السايتوسين بدلا من الثيامين، وسيكون الشريط الجديد محتويًا على السايتوسين؛ حيث الشريط القديم يحتوي الثيامين. وفي الحالتَين ستحصُل طفرات تنتقل إلى الذَّرية. وحسب Johnjoe & Al-Khalili (2014)، فإن كشف Wang *et al.*, (2011) من أن القواعد النووية التاوتوميرية

يمكن أن تنتظم في الموقع الفعَّال للإنزيم DNApolymerase بحيث يمكن أن تضمن في شريط الـ DNA الجديد أثناء عملية التضاعُف وتسبب الطفرات، يدعم إمكانية تحقُّق التأثير الكمومي لبروتونات القواعد النووية. غير أن نسبة القواعد النووية التاوتوميرية للـ DNA تساوي حوالي ٠,٠١٪ من مجموع القواعد النووية فيها ستؤدي إلى نسبة خطأ أو طفراتٍ مماثلة (أي ١ / ١٠٠٠٠). هذه النسبة أكبر بكثيرٍ من نسبة الطفرات التلقائية الطبيعية التي تبلُغ واحدًا في المليار، ما يُسلِّط الشك على هذه الآليَّة في تفسير الطفرات. لكن تصحيح معظم الأخطاء بواسطة الإنزيم DNApolymerase يُبقي على القليل جدًّا منها، والتي تظهر بشكل طفرات، ما يُبقي المجال مفتوحًا أمام عمل هذه الآلية الكمومية.

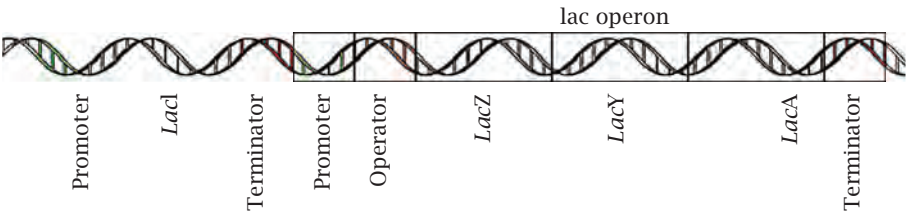
وفي بحثٍ حديثٍ وباستخدام المحاكاة الحاسوبية وطرق ميكانيك الكَم ومعتبرين التداخُلات الجُزيئية والبيئية، بيَّن slocombe *et al.*, (2021) أنَّ دَور الاختراق في زوج A–T التاوتاميري للـ DNA أقل ترجيحًا بسبب صغرِ حاجزِ التفاعُل العكسي، لكنه يكون مرجَّحًا في زوج $G^{*} - C^{*}$ حيث يلعب دَورًا غيرَ عابرٍ في إحداث الطفرة النقطوية.

(٢-٢) الطفرة المستحثَّة Induced Mutation

في جميع الأحياء يتم تكوين البروتينات بما فيها الإنزيمات عن طريق عملية النسخ (Transcription) حيث يقوم الإنزيم RNApolymerase بعد الارتباط بالمحفِّز (Promoter) الذي يقع في مقدِّمة الجين أو مجموعة الجينات المكوِّنة لمشغل (Operon) بتكوين جُزيئة mRNA كنُسخةٍ متممةٍ لتتابُع القواعد النووية المشفِّرة للبروتين في الجين. تُتبع هذه العملية بالترجمة (Translation) حيث ترتبط جُزيئة mRNA بالرايبوسوم وبمشاركة جُزيئات tRNA التي يحمل كلٌّ منها أحد الأحماض الأمينية الخاصة، وبخطواتٍ متتاليةٍ تتحد الأحماض الأمينية مُكوِّنةً سلسلةً من عديد الببتيد التي ستكوِّن البروتين حسب تسلسُل القواعد النووية في جُزيئة mRNA. إن هذه العملية خاضعةٌ لآلياتِ تنظيمٍ محكَمة؛ فباستثناء عددٍ محدودٍ من الجينات، والتي تُسمَّى جينات مدبِّرة المنزل (House keeper genes) والتي يُعبر عنها باستمرار، بقية الجينات تشغل فقط حين الحاجة إلى نواتجها من البروتينات؛ ذلك يعود إلى ضبط اقتصاد الخلية، التي هي محدودة الموارد؛ فالبروتينات جُزيئاتٌ ضخمةٌ في الغالب تتطلَّب مواردَ جُزيئيةً وطاقيةً عالية؛ وعليه فإنها لا تنتج إلا عند الحاجة إليها. كما يجري تحليل الموجود منها إلى مكوِّناتها عند عدم الحاجة إليها لاستغلالها في بناء بروتيناتٍ جديدةٍ مطلوبة. كمثالٍ معروفٍ جيد هو مشغل لاك

(*lac* Operon) (شكل ٥-٧) ويتألَّف من ثلاثة جيناتٍ متجاورةٍ هي *lacZ* و*lacY* و*lacA* تشترك بمحفِّز (Promoter) واحد، ويتم التعبيرُ عنها بتكوين ثلاثة بروتيناتٍ تشكل الإنزيم Beta-galactosidase الذي يتمكَّن من تحليل السكَّر الثنائي لاكتوز إلى السكَّرين الأحاديَّين كلوكوز وكالاكتوز؛ حيث تتمكَّن الخلية من استغلالهما في عملية التنفس. عدم وجود سُكَّر اللاكتوز في وسط نمو البكتيريا، يجعل مشغل لاك لا يعمل بسبب وجود مادةٍ كابحةٍ (Suppressor) في المحفِّز، تمنع اتصال الإنزيم RNApolymerase بالمحفِّز، وبذلك تثبِّط عملية النسخ لتكوين الإنزيم Beta-galactosidase. توافُر سكَّر اللاكتوز في الوسط يجعل جُزيئات هذا السكَّر تُزيح جُزيئة المادة الكابحة من المحفِّز ويتمكَّن الإنزيم RNApolymerase من الاتصال بمحفِّز المشغِّل لاك والقيام بالتعبير الجيني وتكوين الإنزيم Beta-galactosidase، لتحليل اللاكتوز. من ناحيةٍ أخرى، فإن حصول طفرة في أحد جينات المشغِّل تُفقد الخليةَ القدرةَ على تكوين الإنزيم Beta-galactosidase وبالتالي تُفقِدها القدرة على النمو في وسطٍ غذائي، يكون فيه سكَّر اللاكتوز هو المصدر الوحيد للكاربون. وهكذا، حسب المبدأ المركزي في البيولوجيا الجُزيئية، المعلومات التي في الـ DNA تنساب باتجاهٍ واحدٍ عَبْر عملية النسخ إلى البروتينات، وإلى بيئة الخلية أو الكائن الحي. لكن ظهور طفراتٍ بكتيريةٍ مستحثَّة قادرة على النمو في وسطٍ يحتوي على اللاكتوز كمصدرٍ وحيدٍ للكاربون من سُلالةٍ فاقدةٍ للقدرة على استغلال سكَّر اللاكتوز، يُظهِر أن العامل البيئي وهنا هو اللاكتوز، قد حثَّ على ظهور الطفرة النافعة، التي مكَّنَت البكتيريا من النمو (Cairns *et al.*, 1988). أي إن سيل المعلومات لا يكون باتجاهٍ واحدٍ فقط من الـ DNA باتجاه البيئة؛ وإنما بالاتجاه الآخر أيضًا من البيئة إلى الـ DNA. هذه الظاهرة تستند إلى مسلَّمة أنَّ البروتونات في القواعد النووية في جُزيئة الـ DNA للبكتيريا تسلك سلوكًا كموميًّا؛ فهي تكون في مواقعَ تجعل هذه القواعد النووية اعتيادية، أو أحيانًا تكون في مواقعَ تجعل القاعدة النووية تاوتوميرية. وحيث إنها في حالةِ تماسُكٍ كمومي فالبروتونات تُعاني حالة التراكُب وتكون في الحالتَين الاعتيادية والتاوتوميرية في الوقت نفسه. وجود اللاكتوز (باعتباره جزءًا من البيئة) سيعمل كمراقبٍ أو آلةِ قياسٍ ويؤدِّي إلى فك التماسُك وانهيار دالَّة الموجة، أما في الوضع الذي يكون فيه البروتون اعتياديًّا (وهنا لا تتمكَّن الخلايا من استغلال اللاكتوز لغرض النمو) وهو ما يحصُل في الغالب، أو في الوضع التاوتوميري أحيانًا، الذي تصبح فيه الخلايا طافرة وتتمكَّن من النمو على اللاكتوز (McFadden & Al-Khalili, 1999; 2014).

في هذه العملية تُحوِّل جزيئات اللاكتوز الحالة الكمومية إلى حالةٍ تقليديةٍ متحقِّقة في الواقع.



شكل ٥-٧: مشغِّل لاك (*lac* Operon).

بناءً على ما تقدَّم فإن حصول الطفرات التلقائية وكذلك الطفرات المستحثَّة يمكن أن يستند إلى خواص ميكانيك الكَم؛ كالتماسُك والتراكُب والتسرُّب.

اقترح Rieper *et al.*, (2010) أن التشابُك الكمومي يلعبُ دورًا مهمًّا في ثبات شريطَي الـ DNA. وأكَّد باحثون حصولَ التشابُك الكمومي أيضًا في عمل جُزيئة الـ DNA؛ فحسب Mihelic (2013; 2019) فإن جُزيئة الـ DNA تعمل كمعالجٍ منطقيٍّ كمومي؛ فقد بيَّنَت أبحاثٌ سابقة عن مُقاومة محورِ جُزيئة الـ DNA لنقل الإلكترونات اختلافاتٍ كبيرةً في نتائجها؛ فأحدها بيَّن أنها غيرُ مُوصِّلة، وفي بحثٍ آخر أنها شبهُ موصِّلة، وآخر موصِّلة معدنية وآخر أنها فائقة التوصيل. هذا دفع الباحث لأن يعتبرها مؤشرًا لعمل المنطق الكمومي. وقد سبق أنْ تم توضيحُ وجودِ نقلٍ متماسك للإلكترونات طوليًّا على امتداد الجُزيئة من خلال تآثُرات تنضيد pi للقواعد النووية العطرية. كما تمَّ تبيانُ أن الإلكترونات المتحركة طوليًّا على امتداد الجُزيئة، تتعرَّض لعمليةِ ترشيحٍ كفوءةٍ جدًّا لبَرمها المغزلي بسبب تآثُر لولبية الجُزيئة مع البَرم المغزلي للإلكترونات. وكان Göhler *et al.*, (2011) قد بيَّن ترشيح البَرم المغزلي في جُزيئة الـ DNA، حيث إن حركة الإلكترونات على امتداد الجُزيئة الملتفَّة إلى اليمين لا تُعيق البَرم المغزلي الأسفل للإلكترونات، لكن البرم المغزلي الأعلى يثبط على امتداد حوالي ٢٠ نكليويدة. وهذا يعني حسب الباحث أن الإلكترونات تنقل كموميًّا على امتداد مرشَّح لفٍّ مغزلي كَفوءٍ جدًّا. وهنا يلعب عدم التناضُر المرآتي لذرَّتَي الكاربون ٢ و٣ لجُزيئة الرايبوز اللاأوكسجيني في كل نكليويدة ما يمكِّن

كل نكليويدة لأن تعمل كبوابةٍ منطقية. وإن جُزيئة الـ DNA قابلةٌ للتعامُل مع عددٍ كبيرٍ من الكيوبتات وفي درجة حرارة الغرفة. التقلُّبات للمنظومة المنطقية الكمومية لجُزيئة الـ DNA تنشأ من تداخُل الجُزيئات الأخرى مثل البروتينات التي ترتبط بالـ DNA وتحدث تغيُّرات تشاكُلية (طوبولوجية)، يتم تنسيقها بواسطة قدرات المعالجة المنطقية لجُزيئة الـ DNA.

وحسَب Mihelic (2019) فإن أزواج الإلكترونات المتشابكة كموميًّا يمكن أن تُفصل بواسطة ترشيح البَرم المغزلي، وتبقى متماسكةً كموميًّا في درجات الحرارة البيولوجية ضمن البوابات الكمومية للنكليوتيدة المعزولة حراريًّا، وأن تُضمَّن في أشرطةٍ DNA منفصلةٍ خلال تضاعُف الـ DNA. وهكذا يمكن لشريطَي DNA يشتركان بإلكتروناتٍ متشابكةٍ كموميًّا أن يعانيا انقسامًا خيطيًّا ويكونا في خلايا منفصلة، وبالتالي في مزرعتَين خلَويتَين منفصلتَين. وبيَّنَت التجارب الأولية أن نموذج الـ DNA الكمومي أظهر ارتباطاتٍ في اللااستقطابية بين مزارعِ خلايا عصبيةٍ منفصلة.

وبيَّن Hubač *et al.*, (2017) حصول ظاهرة التشابك الكمومي بين القواعد النووية في جُزيئة الـ DNA وبالإضافة إلى المعلومات التقليدية المعروفة في هذه الجُزيئة، ثمَّة معلوماتٌ كمومية وهما مرتبطان معًا. وأبرز الباحثون أهمية القواعد النووية في التتابُعات المشفرة وغير المشفرة، واعتبروا لها قيمة إنتروبي المعلومات الكمومية ومجموع تتابُعات الإنتروبي الكمومي هذه تشكِّل المعلومات الكمومية في الـ DNA. وانطلاقًا من مبدأ أن الإنتروبي مقياسٌ مهم لتعقيد المنظومة، وحيث إن الجزء غير المشفر للبروتين يزداد كثيرًا مع درجة تعقيد الكائن الحي، ويصل إلى ٩٨٪ في الإنسان، فإن كمية المعلومات الكمومية لـ DNA تزداد مع زيادة تعقيد الكائن الحي وتنوُّعه.

الفصل السادس

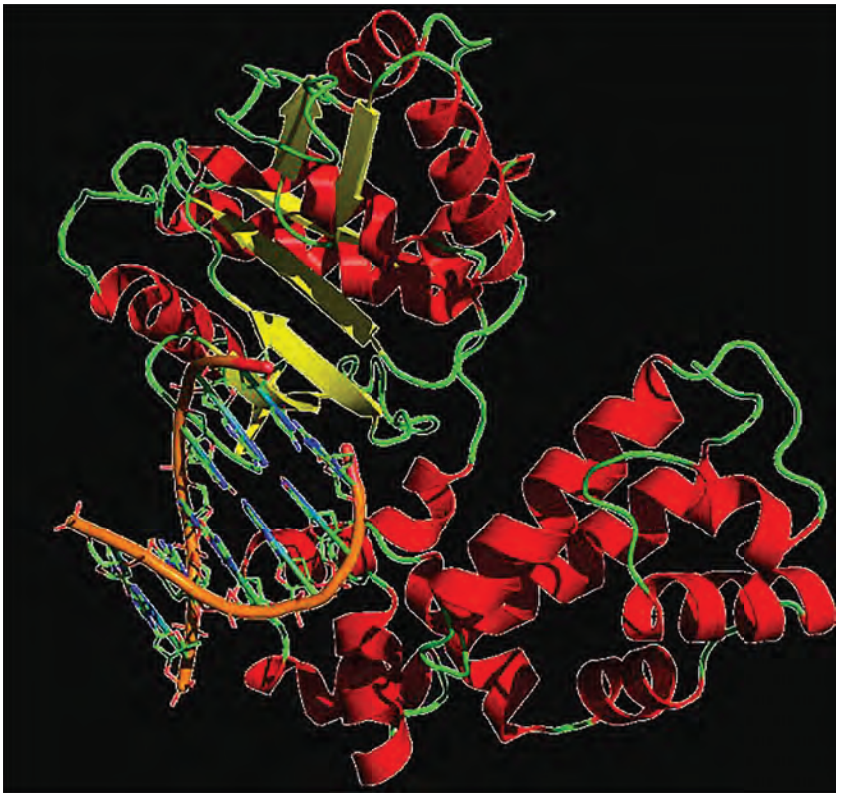
دَورُ ميكانيك الكَم في عمل الإنزيم دي إن إيه بوليميريز

Role of Quantum mechanics in Function of DNApolymerase

(١) الإنزيم DNApolymerase

هو الإنزيم (شكل ٦-١) الذي يقوم بمضاعفة جُزيئات الـ DNA الأصلية في الخلية قبل انقسامها؛ حيث تبقى نسخة من الجُزيئة في الخلية الأم وتذهب نسخةٌ مماثلة إلى الخلية الجديدة. كما يقوم الإنزيم بتصحيح الأخطاء التي تحدُث أثناء عملية تكوين النُّسَخ الجديدة. وبذلك تُحفظ المعلومات الوراثية المخزونة في جزيئات DNA بدرجةٍ عاليةٍ من الدقة وتُنقل إلى الخلايا الوليدة. هذا يحصُل في جميع الخلايا القادرة على الانقسام في الكائن الحي المتعدِّد الخلايا وكافَّة خلايا الكائنات الحية الوحيدة الخلية، وبذلك تتمُّ المحافظة على النوع.

تحتوي جميع خلايا الأحياء البدائية النواة والأحياء الحقيقية النواة على بضعة أنواعٍ من إنزيمات DNApolymerase، كما تحتوي جُسَيمات بعض الفايروسات على أنواعٍ خاصةٍ من هذه الإنزيمات. تختلف هذه الإنزيمات في التركيب والوظيفة، لكنها مع ذلك تُحافِظ على حقول تحفيزٍ متشابهةٍ تركيبيًّا ووظيفيًّا (Hingorani, 2001)؛ فبعضها يقوم بالبلمرة (المضاعفة) والبعض الآخر بالبلمرة والتصحيح من خلال امتلاكه لحقل إزالة النكليوتيدات (Exonuclease). في البكتيريا يُوجد ثلاثةُ أنواعٍ من الإنزيم DNApolymerase هي pol I وpol II وpol III، الأخير هو الإنزيم الذي يقوم بالبلمرة



شكل ٦-١: تركيب الإنزيم DNA polymerase beta ثلاثي الأبعاد في الخلايا البشرية، مع توضيحِ ارتباطِ جُزيئة DNA. عن: Yikrazuul-Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=427810.

الرئيسة. في الأحياء الحقيقية النواة ثمَّة ١٦ نوعًا من هذا الإنزيم، الرئيسة فيها هي pol α وpol δ وpol ϵ.

من أجل مضاعفة الـ DNA، يقوم الإنزيم DNApolymerase بإضافة النكليوتيدات إلى ذرة الكاربون ٣′ لشريط الـ DNA نكليويدة في كل خطوة، ما يؤدي إلى تكوين شريطَي DNA أحدهما أصلي (يُستخدَم كقالب) والآخر جديد.

تبدأ العملية بفك شريطَي الـ DNA المرتبطَين بأواصرَ هيدروجينيةٍ بين القواعد النووية المتقابلة بواسطة الإنزيم Helicase ومساعدة الإنزيم Topoisomerase. كل شريطٍ من

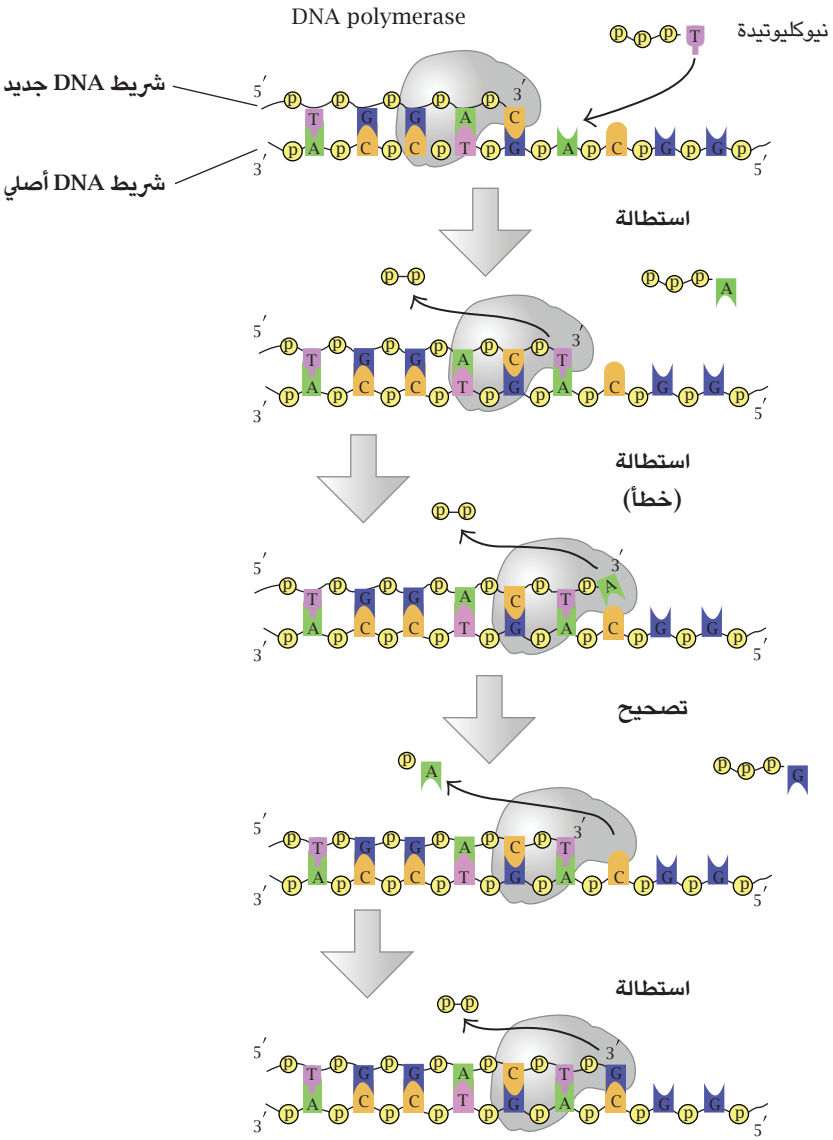
شريطَي الـ DNA الأصلية سيكون قالبًا لعمل الإنزيم. إن الإنزيم DNApolymerase يعمل بإضافة نكليويدة في كل خطوة إلى النهاية ٣′ من النكليوتيدة الأخيرة في الشريط الموجود، وبذلك سيسير باتجاه ٣′ ← ٥′ منتجًا شريطًا جديدًا باتجاه ٥′ ← ٣′ موازيًا ومعاكسًا لشريط القالب (شكل ٦-٢). الإنزيم DNApolymerase لا يتمكَّن من تكوين شريط DNA بدءًا من الصفر؛ لذلك لا بد من وجود شريط نكليوتيدات موجود أصلًا ليتمكن الإنزيم من الإضافة إليه. هذا الشريط هو البادئ (Primer) الذي يتألَّف من قواعدَ نوويةٍ لـ RNA أو DNA أو كلَيهما. القاعدتان النوويتان الأوَّليتان تكونان بشكل RNA وتُخلقان بواسطة الإنزيم Primase. النتيجة هي تكوين شريطَين متمِّمَين لبعضهما؛ أحدهما أصلي والآخر جديد.

إن دقة عمل الإنزيم DNApolymerase عاليةٌ كما سبق ذكره؛ فنسبة الخطأ؛ أي وضع قاعدةٍ نوويةٍ خطأً (غير متمِّمة لقاعدة القالب) هي بحدود واحدٍ بالمليار. تقوم بعض أنواع هذه الإنزيمات بتصحيح الخطأ بواسطة حقل Endonuclease الذي يقوم بإزالة القاعدة النووية الخطأ ويُعاوِد الإنزيم استبدالها بالصحيحة. الخطأ هنا سيؤدي إلى إحداث طفرة؛ أي تغيير في تسلسُل القواعد النووية في شريط الـ DNA الجديد، والتي يمكن أن يكون لها عواقبُ ضارةٌ بحياتية الخلية، غير أنها من ناحيةٍ أخرى تُسهِم في إحداث التغايُر الوراثي المطلوب من أجل التطوُّر.

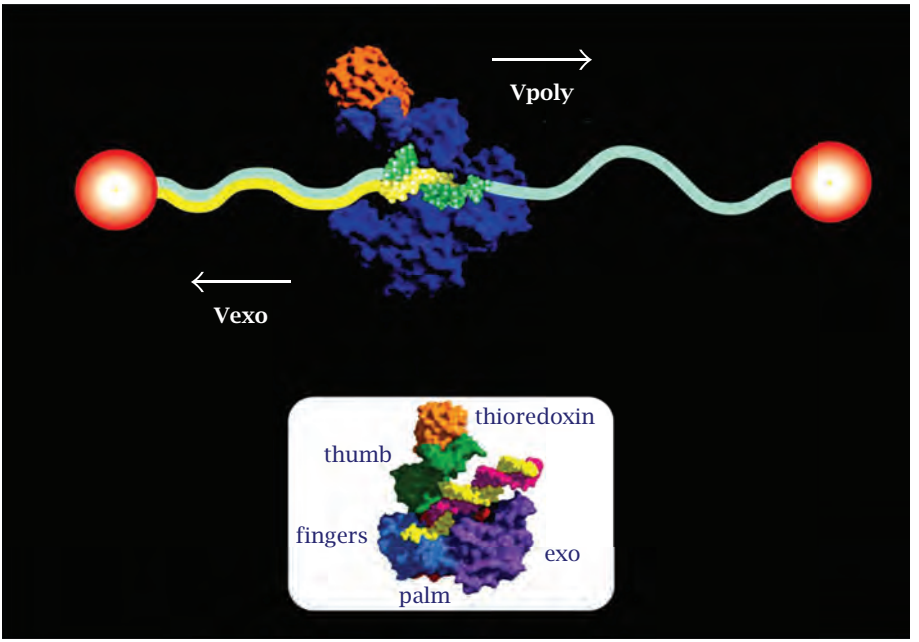
يعتمد هذا الجزء على عمل الباحثة Goel (2008) في دراستها لأهمية ميكانيك الكَم في عمل إنزيمات البوليميريز.

إنَّ إنزيمات DNApolymerase التي تُضاعِف الـ DNA وRNApolymerase التي تُنسَخ الـ DNA على شكل جُزيئات RNA من أجل تكوين البروتينات وغيرها هي محرِّكاتٌ نانوية (Nanomotor) كونها ذات أبعادٍ نانوية، وتتمكَّن من تحويل الطاقة الحرة إلى طاقةٍ ميكانيكيةٍ وهي معالجاتُ معلوماتٍ أيضًا؛ حيث تقرأ المعلومات في جُزيئة الـ DNA وتكتُبها متأثرةً بالمعلومات التي في البيئة؛ كونها منظوماتٍ معقَّدةً متكيفية مفتوحة.

البيئة هنا تشمل درجات الحرارة، وتركيز النكليوتيدات والشد الميكانيكي للجُزيئة والتفافها والإشارات الكهرومغناطيسية ... إلخ، والتي يمكن أن تؤثِّر على ديناميكية هذه المحركات النانوية؛ فالتجارب تشير إلى أن شد جُزيئة الـ DNA يمكن أن يؤثِّر على سرعة الإنزيم DNApolymerase ويمكن أن يعكس اتجاهه إذا زاد عن ٣٥ بيكونيوتن (شكل ٦-٣).



شكل ٦-٢: مخطَّط عمل الإنزيم DNApolymerase في مد شريط الـ DNA مع تصحيح الخطأ. عن: I, Madprime ميكانيك الكم وعمل الإنزيم DNApolymerase.



شكل ٦-٣: تشير تجارب الجُزيئات المفردة أن الشد الميكانيكي فوق ٣٥ بيكونيوتن على جزيئة الـ DNA يحفِّز سرعةً عكسيةً في محرك إنزيم T7 DNA polymerase (DNAp) للفايروس البكتيري. تَم مطُّ شريط DNA مُفرَد بين خرزتَين بلاستيكيتَين في الوقت الذي يحفِّز الإنزيم تحويل الشريط المُفرَد ssDNA إلى شريطٍ مزدوج dsDNA. أُشير إلى سرعة البلمرة أو تكوين dsDNA بـ Vpoly، بينما أُشير إلى القص العكسي لـ dsDNA بـ Vexo. الصورة السفلية هي التركيب البلوري لمعقد T7 والذي يُبيِّن أن نشاط محرِّك إنزيم البوليميريز والمحور يوكليز («مغيِّر سرعة» أمامي وخلفي) ينتج عن حقلَي تحفيزٍ متميزَين. عن: Goel (2008).

التقدُّم التقني الذي مكَّن من دراسةِ ديناميكيةِ هذه التراكيب على مستوى طول وزمنٍ متزايد الصغر، يُمكِّن من اختبار التأثيرات الكمومية تجريبيًّا، ولكي تتحقَّق التأثيرات الكمومية في عمل هذه الإنزيمات ينبغي أن يكون زمنُ فك التماسُك (Decoherence) لها طويلًا وزمن التماسُك (Coherence) قصيرًا كقاعدةٍ عامةٍ في تحقُّق الحالة الكمومية.

باستخدام لامتساويات وغنر (Wigner, 1957) الأولى والثانية التي توضِّح المحدِّدات التي يفرضها ميكانيك الكَم على صحة ودقة المسافات والفترات الزمنية في الساعة

الكمومية (المنظومة الكمومية) يمكن أن تُحدد أهلية أية ماكنة معالجة للمعلومات؛ فيمكن تحديد مدى صحة (Accuracy) المنظومة الكمومية زمن التشغيل الأقصى ($T_{\max}$)، ودقتها (Presision) الفترة الزمنية الصغرى ($T_{\min}$) التي يُمكِن أن تُنجِزها المنظومة الكمومية كدالَّة لكتلتها M وعدم التحديد في موقع الإنزيم على طول جُزيئة الـ DNA λ وثابت بلانك $\hbar$:

$$T_{\max} < \frac{M\lambda^2}{\hbar} \tag{6-1}$$

$$T_{\min} > \frac{\hbar}{Mc^2}\left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}}\right) \tag{6-2}$$

ويمكن استخدام لامتساويات وغنر لمعرفة الطول الأقصى $L_{\max}$ الذي يتمكن الإنزيم من قراءته بشكلٍ صحيح، وكذلك حجم الخطوة المؤثِّرة الصغرى $L_{\min}$ للإنزيم. لامتساوية وغنر الأولى تحدِّد المدى الزمني (والمدى الطولي) الذي يمكن فيه مضاعفة الـ DNA بشكلٍ صحيحٍ مع بقاء المنظومة متماسكةً كموميًّا. أما لامتساوية وغنر الثانية فتضع حدودًا لدقة عمل الإنزيم وقدرته على معالجة المعلومات.

عند اتخاذ λ كطول جُزيئة الـ DNA للبكتريوفاج لامبدا والبالغ ١٦مكم، فإن تطبيق لامتساوية وغنر الأولى سيكون $T_{\max}$ للإنزيم بوليميريز هو أقل من ٣٨٧ ثانية، وللمقارنة فإن DNApolymerase للبكتيريا *Thermus aquaticus* (TAQ) هو خطأٌ واحدٌ كل ١٠٠ ثانية. كما أن لامتساوية وغنر الثانية تُبيِّن أن $T_{\min}$ (أقل فترةٍ زمنيةٍ ممكن قياسها) هي ٥ × ١٠⁻١٤ ثانية أو ٥٠٠ فمتوثانية. إن $T_{\min}$ لا يساوي زمنَ تضمينِ قاعدةٍ نوويةٍ من قِبَل الإنزيم؛ وإنما هو زمنُ تحوُّل حالةٍ داخليةٍ للإنزيم.

ويمكن الحصول على $L_{\max}$ وهو أقصى طولٍ من الـ DNA يمكن للإنزيم قراءته بشكلٍ صحيحٍ وتبيَّن أنه ٤ × ١٠⁴ قاعدة نووية، وهو مقاربٌ لما هو معروف عن الإنزيم TAQ polymerase والمساوي إلى خطأ واحد كل ١٠⁴ قاعدة نووية يقرؤها. كما أن $L_{\min}$ الذي يعني أقل مسافةٍ يمكن فيها تسجيل معلوماتٍ بواسطة الإنزيم تساوي حوالي ٥ × ١٠⁻١٢ قاعدة نووية، وتُعادِل ٢ × ١٠⁻٢١م.

ومن خلال الحسابات ونتائج تجربة عمل الإنزيم على DNA البكتريوفاج لامبدا وطولها ١٦مكم، فإن الوقت الأقصى اللازم لقراءة الـ DNA هو ٥٠٠ ملي ثانية للشريط

المزدوج، و٣ ملي ثانية للشريط المُفرَد من الـ DNA بينما وقت فك التماسُك الأقصى لمعقد الإنزيم-DNA يتراوح بين بضع دقائق إلى بضع ساعات. وهكذا يمكن الاستنتاج أن تأثيرات ميكانيك الكَم تلعب دَورًا مسبقًا في التأثير على ديناميكية قراءة الإنزيم للـ DNA. وتُظهِر النتائج أيضًا أن كمية المعلومات أو عدد البِتات المخزونة في منظومة الإنزيم-DNA، هي أكبر بكثيرٍ مما هو مُتصوَّر (باعتباره ١ بت/قاعدة نووية). وهذه الزيادة حسب الباحثة ترجع إلى أن الإنزيم يمتلك بضع حالاتٍ مجهرية داخلية. كما يُظهِر هذا العمل أن المعلومات ليست مخزونةً في الـ DNA فقط، وإنما يُشكِّل الـ DNA والإنزيم وبيئتهما شبكةَ معالجةِ معلوماتٍ ديناميكية معقَّدة ذات مخزونِ معلومات، وقدراتِ معالجةٍ عالية جدًّا.

الفصل السابع

الإنزيمات وميكانيك الكَم

Enzymes and Quantum Mechanics

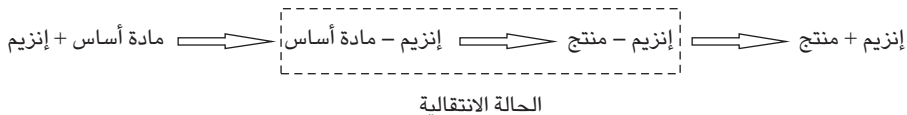
تُوجد الموادُّ في الطبيعة بشكلِ عناصرَ بهيئتها الذَّرية أو الجُزيئية، أو بشكل مركَّباتٍ تتألَّف من عنصرَين أو أكثر بهيئة جُزيئات. وتكون الموادُّ بشكل غازاتٍ أو سوائلَ أو موادَّ صلبة. وفي الغالب تكون العناصر والمركَّبات المختلفة مختلطة؛ كما في الهواء الذي يتألَّف من غازات النتروجين والأوكسجين وثاني أوكسيد الكاربون وغيرها، أو في المياه حيث تُوجد إلى جانب جُزيئات الماء العديد من الأملاح، وفي التربة يُوجد الكثير من أكاسيد المعادن ومركَّبات الكاربون والكبريت وغيرها. معظم المواد الكيميائية في البيئة تكون مستقرةً وغير فعالة؛ فهي لا تتحلَّل ولا تتفاعل تلقائيًّا مع غيرها، وهذا يفسِّر شيوعها في الوقت الحاضر. إن هذا يعود إلى قوة الأواصر الكيميائية التي تربط الذَّرات في هذه المواد؛ حيث لا تكفي الاهتزازات والاضطرابات الجُزيئية لتكسير هذه الأواصر (McFadden & Al-Khalili, 2014). لكن وبسبب زيادة حركة واهتزازات وتصادُم الذَّرات والجُزيئات ووجود فروقات في الطاقة الحرة بوجود مصادرِ طاقةٍ خارجية، تمكَّن من تجاوز عتبة طاقية تحصل التفاعُلات الكيميائية. تتضمَّن التفاعُلات الكيميائية تكوينَ أو تفكيكَ أواصرَ تربط الذَّرات ضمن الجُزيئات. وبالتالي يمكن أن تكون التفاعُلات بين عناصر و/أو مركَّباتٍ بسيطةٍ لتكوين مركَّباتٍ معقَّدة، أو تفكيك مركَّباتٍ معقدةٍ إلى مكوِّناتها من العناصر أو المركَّبات البسيطة. تختلف سرعة التفاعُلات الكيميائية باختلاف المواد المتفاعلة والمواد الناتجة وتراكيزها والعوامل البيئية المؤثِّرة؛ فهناك تفاعلاتٌ تلقائيةٌ عندما تكون الطاقة الحرة للمواد المتفاعلة أعلى من الطاقة الحرة للمواد الناتجة؛ أي إن فرق الطاقة الحرة ($-\Delta G$) للتفاعل يكون سالبًا، وتكون مبدِّدة للطاقة. بينما لا تحصل التفاعُلات

الأخرى تلقائيًّا عندما يكون فرق الطاقة الحُرة للتفاعُل موجبًا (ΔG+) وتكون ماصَّةً للطاقة، ولكي تحصل يجب توافُر مصدرٍ خارجيٍّ للطاقة. كما يمكن أن يحصل تفاعلٌ كهذا من خلال ربطه مع تفاعلٍ آخر ذي ΔG سالبة، بحيث تكون محصلة فرق الطاقة للتفاعلَين سالبة. وبصورةٍ عامةٍ زيادة الطاقة الحركية للمواد المتفاعلة، تزيد من سرعة التفاعُلات الكيميائية. ولكي يحصل التفاعل الكيميائي غير التلقائي لا بد من وصول المواد المتفاعلة إلى طاقة التنشيط اللازمة لتحقيق التفاعل. كما يمكن أن تزداد سرعة التفاعلات الكيميائية بوجود محفِّزات (Catalysts) تخفض طاقة التنشيط اللازمة للتفاعُل دون أن تتغير كيميائيًّا أو تُستهلَك هي خلال التفاعُل. وهذه المحفِّزات يمكن أن تكون متجانسةً حيث يكون المحفِّز من نفس الحالة الفيزيائية للمواد المتفاعلة؛ كأن تكون كلها غازية أو كلها سائلة، أو غير متجانسة حيث يكون المحفِّز في حالةٍ فيزيائيةٍ مختلفة عن الحالة الفيزيائية للمواد المتفاعلة؛ كأن يكون المحفِّز مادة صلبة والمواد المتفاعلة غازية أو سائلة. ويمكن أن يكون المحفِّز أحيائيًّا بشكل إنزيم.

لقد تعامل الإنسان مع الإنزيمات منذ أقدم العصور؛ حيث تُشير الآثار إلى أن السومريين والبابليين كانوا يصنعون الألبان والأجبان والخمور منذ أكثر من ٤٠٠٠ سنة (Elander & Lowe, 1994)، كما أن عمل الخبز المعتمد على الخميرة، طريقةٌ قديمة جدًّا. وهذه الأنشطة التحويلية اعتمدَت على الأحياء الدقيقة؛ كالخمائر التي وُجدَت كملوثاتٍ طبيعيةٍ للحليب والفواكه والحبوب، والتي تستخدم الإنزيمات أثناء نُموها. غير أن الأهمية التحفيزية للإنزيمات في عمليات التخمُّر لم تُعرف علميًّا إلا سنة ١٨٣٧م، من قِبَل الكيميائي السويدي Jon Jakob Berzelius. وفي خمسينيات القرن التاسع عشر بين العالِم الفرنسي المعروف Louis Pasteur أن التخمُّر يحصل بواسطة الأحياء الدقيقة، ومنها الخميرة. ثم ظهَر مصطلح الإنزيمات مشتقًّا من اللاتينية «في الخميرة enzymos». وفي سنة ١٨٩٧م عزل Edward Buchner من الخميرة الإنزيمات المخمِّرة للسكَّريات إلى كحول. في سنة ١٩٢٦م عزل James Sumner إنزيم Urease بشكلٍ بلوري من الفاصوليا وبين طبيعته البروتينية. ثم تأكَّدَت الطبيعة البروتينية للإنزيمات عند تنقية إنزيمات Pepsin وTrypsin من قِبَل John Northrop ومساعديه سنة ١٩٣٠م (Bhatia, 2018).

الإنزيمات جُزيئاتٌ ضخمةٌ بروتينية في الغالب تُنتج من قِبَل الخلايا الحية، تحفِّز واحدًا أو أكثر من التفاعُلات البيولوجية الخصوصية دون أن تتغيَّر هي كيميائيًّا أو تُستهلَك عند اكتمال التفاعل. الجُزيئات التي تعمل عليها الإنزيمات وتجري عليها

التحوُّلات تُسمَّى المواد الأساس (Substrates) لهذه الإنزيمات. عمل الإنزيمات على المادة الأساس يؤدي إلى تحويلها إلى واحدٍ أو أكثر من المواد الناتجة (Products) من خلال تكوينِ تراكيبَ وسطيةٍ غير مستقرة، تُعرف بالحالات الانتقالية (Transition states) (شكل ٧-١) من خلال ارتباطها مع المواقع الفعالة في الإنزيم، ومن ثَم تكوين وانفصال المنتج عن الإنزيم. الموضوع الأساس في عمل الإنزيمات هو تخفيض طاقة التنشيط اللازمة لتحقيقِ التفاعل (شكل ٧-٢).



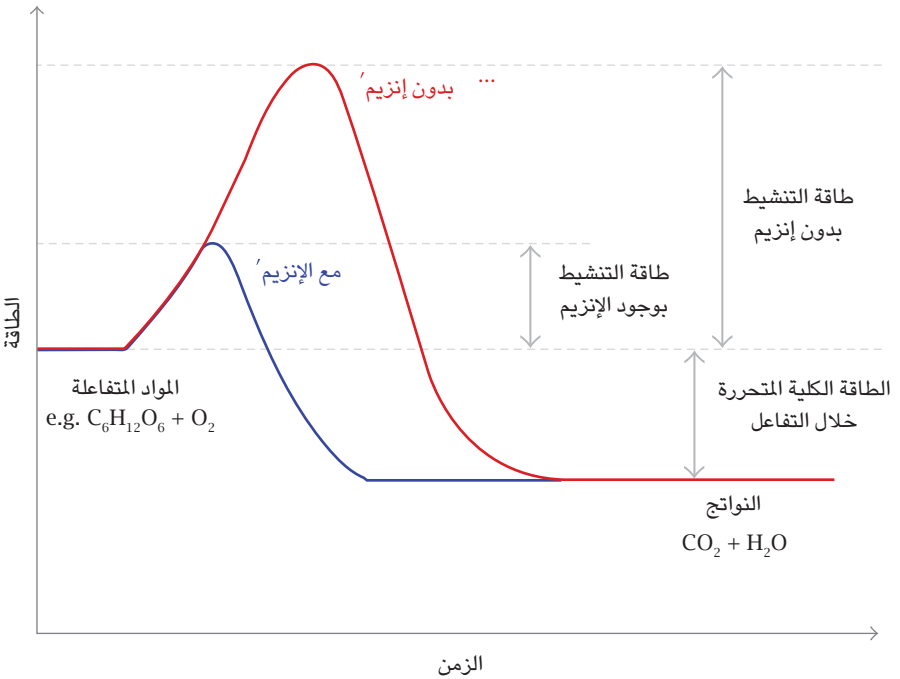
شكل ٧-١: مراحل التفاعُل الإنزيمي.

يتراوح الوزن الجُزيئي للإنزيمات بين ١٠٠٠٠ إلى ٢٠٠٠٠٠٠ دالتون. تُسرِّع الإنزيمات التفاعُلات الحيوية بدرجةٍ فائقةٍ بما لا يقل عن $^{٦}١٠$ ويمكن أن يصل إلى $^{٢٥}١٠$ مرة أو أكثر (Klinman & Kohen, 2013; Murray *et al.*, 2009).

علاوة على كفاءتها الفائقة كمحفِّزات للتفاعُلات الكيميائية في الخلية، فإن الإنزيمات غاية في الخصوصية لنوعية التفاعُل وللمادة الأساس، أو لمجموعة قليلة من المواد الأساس المترابطة كيميائيًّا. والمعروف أن الإنزيمات محفِّزات تفاعُل خصوصية الهيئة الفراغية للمواد الأساس؛ فهي تحفِّز نوعًا واحدًا فقط من الآيزوميرات الفراغية لمركَّبٍ معيَّن حيث تعمل على الشكل D- وليس L- من السكريات والشكل L- وليس D- من الأحماض الأمينية. هذه الخصوصية العالية جدًّا للإنزيمات تجعل الخلية مسرحًا لحصول التفاعُلات الإنزيمية المتنوِّعة في نفس الوقت، رغم صِغَر حجمها واكتظاظه بالجُزيئات المختلفة ووجود مئات وآلاف الإنزيمات. وحسَب Popp (1999) فإن ١٠٠٠٠٠ تفاعُلٍ كيميائيٍّ يحصُل في الخلية في الثانية الواحدة.

ومع أن الكثير من التفاعُلات الكيميائية تحصل في درجاتِ حرارة عاليةٍ جدًّا، ومستوياتِ حموضةٍ متطرِّفة، فإن الإنزيمات تمكِّن من حصول مثل هذه التفاعُلات الكيميائية ضمن درجة الحرارة والحموضة الفسلجية للكائنات الحية.

ومع التأكيد على الأهمية العظيمة للإنزيمات في أيضِ المنظومات الحية، إلا أننا يجب ألا ننسى الفعل التحفيزي للتفاعُلات غير الإنزيمية، والتي ربما تكون سبقَت نُشوء



شكل ٧-٢: المنحنيات الطاقيَّة للتفاعُل الإنزيمي وتفاعُل المحلول (اللاإنزيمي). محوَّر عن: [[en:User:|]] at the English language Wikipedia [GFDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html) or CC-BY-SA-3.0 (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)], via Wikimedia Commons.

الإنزيمات، وهي موجودة حتى الوقت الحاضر إلى جانب الإنزيمات. هذه التفاعُلات تضُم تفاعلاتٍ غيرَ خصوصية، وتفاعلاتٍ خصوصية إما حصرية لا يشاركها فيه إنزيم مثل تكوين فيتامين D3 بتحفيز الأشعة فوق البنفسجية، أو تفاعُلات يشاركها فيها إنزيمات (Keller *et al.*, 2015).

تحتاج العديد من الإنزيمات إلى مركَّباتٍ أخرى؛ هي العوامل المساعدة (Cofactors) من أجل إنجاز عملها. وهنا يكون الجزء البروتيني من الإنزيم هو الأبوإنزيم (Apoenzyme) والجزء غير البروتيني والذي يمكن أن يكون مرافقًا إنزيميًّا (Coenzyme) أو مجموعةً ملحقة (Prosthetic group) أو أيونًا معدنيًّا منشِّطًا. التركيب الكامل للإنزيم؛

أي الجزء البروتيني مع الجزء غير البروتيني، يُسمَّى الإنزيم الكلي أو الهولوإنزيم (Holoenzyme). المرافق الإنزيمي يكون مادةً عضويةً غير بروتينية قابلةً للديلزة وثابتةً حراريًّا، وغير مُحكَمة الاتصال بالجزء البروتيني من الإنزيم. المجموعة الملحقة هي مادةٌ عضويةٌ قابلةٌ للديلزة، وثابتةٌ حراريًّا، لكنها مُحكَمة الارتباط بالجزء البروتيني من الإنزيم. أما الأيون المعدني المنشِّط فيشمل أيونات K^{+} وFe^{++} وFe^{+++} وCu^{++} وCo^{++} وZn^{++} وMn^{++} وMg^{++} وCa^{++} وMo^{+++}

تُقسَّم الإنزيمات إلى ستة أصنافٍ رئيسةٍ على أساس نوعِ التفاعُل الكيميائي، وهي إنزيمات الأكسدة-اختزال (Oxidoreductases) وإنزيمات النقل (Transferases) وإنزيمات التميؤ (Hydrolases) وإنزيمات الفصل (Lyases) وإنزيمات الآيزوميريز (Isomerases) وإنزيمات الربط (Ligases).

إنزيمات Oxidoreductases تقوم بنقل الإلكترونات من المادة الأساس إلى أخرى، فتُؤكسِد الأولى وتختزل الثانية، ومنها إنزيماتُ Oxidases وPeroxidases وHydrases وDehydrogenases.

إنزيمات Transferases تقوم بنقل مجموعةٍ كيميائيةٍ من مادةٍ أساسٍ إلى أخرى؛ كنقل مجاميع الفوسفات أو الأمين وغيرها، وتشمل إنزيمات Phosphorylases وTransaminases وTransmethylases.

إنزيمات Hydrolases تقوم بتفاعلات التحلُّل المائي، والتي تتضمن تكسير بعض الأواصر مثل الأواصر الكلايكوسيدية والأسترية والببتيدية وغيرها، بإضافة جزيئات الماء. تشمل هذه المجموعة إنزيمات Sucrase وAmylases وProteases.

إنزيمات Lyases تقوم بنزع مجموعةٍ كيميائيةٍ من المادة الأساس، وإحلال رابطةٍ مزدوجةٍ بدلها دون إضافة جُزيئات ماء. تشمل هذه المجموعة إنزيمات Decarboxylases وDeaminases وAldolases.

إنزيمات Isomerases تعمل على تحويل المادة الأساس إلى آيزومير آخر، وتشمل Cis-Transferases وTransisomerases Intramolecular.

إنزيمات Ligases تعمل على ربط جُزيئتَين كبيرتَين بتكوين آصرةٍ جديدة؛ فهذه الإنزيمات تعمل على تكوينِ أواصرِ C-O وC-S وC-N وغيرها. من هذه الإنزيمات DNA ligase وRNA ligase.

(١) آلية عمل الإنزيمات Mechanism of Enzyme Action

تعتمد آلية عمل الإنزيم على التفاعُل الكيميائي الذي يكون عالي الخصوصية، وفيه يرتبط الإنزيم بالمادة الأساس مُكوِّنًا معقد الإنزيم-المادة الأساس. يحصُل التفاعُل في منطقة صغيرة من الإنزيم تُسمَّى بالموقع الفعَّال (Active site) (شكل ٧-٣) والتي ستُحدِّد خصوصية الإنزيم.

يتكون الموقع الفعال من عددٍ من الأحماض الأمينية المتفرقة على السلسلة الببتيدية، والتي تتقارب مع بعضها عن طريق الطيَّات التي تحصُل خلال التركيب الثانوي والثالثي للإنزيم. في الموقع الفعال للإنزيم، تُوفِّر السلاسل الجانبية للأحماض الأمينية مجاميعَ ترتبط بمجاميعَ خصوصيةٍ للمادة الأساس، وتكوِّن أواصرَ مع الأحماض الأمينية في حقل الارتباط للموقع الفعَّال. عملية الارتباط هذه تحفِّز تفاعُلًا بنيويًّا في الموقع الفعال، ويتكون معقد الحالة الانتقالية بين الإنزيم والمادة الأساس ثم بين الإنزيم وناتج التفاعُل. بعدها ينفصل ناتج التفاعُل ويعود الإنزيم إلى حالته الطبيعية.

ثمَّة نموذجان تقليديان لآلية عمل الإنزيمات:

(١) نموذج القفل والمفتاح (Lock and key model)

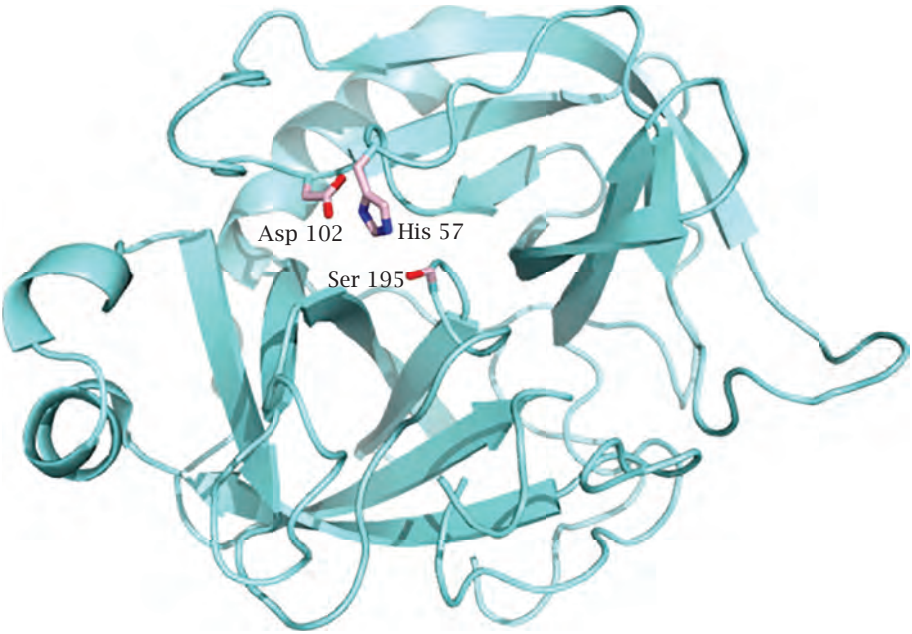
يفترض هذا النموذج وجود توافُقٍ فراغي بين المادة الأساس وموقع التفاعُل في الإنزيم؛ مثل حالة القفل والمفتاح. هذا النموذج يفترض أن يكون موقع التفاعل مُشكَّلًا أصلًا ليستقبل المادة الأساس. غير أن هذا النموذج لا يفسِّر تغيير تركيب الإنزيم بوجود تكيفاتٍ فراغيةٍ في المواقع الفعَّالة.

(٢) نموذج التوافُق المستحث (Induced fit model)

حسب هذا النموذج فإن موقع التفاعل يكون مرنًا؛ حيث تحثُّ المادة الأساس تغيراتٍ فراغيةً في موقع التفاعُل للإنزيم بحيث تستقبل المادة الأساس فيه بالطريقة المناسبة لحصول التفاعُل. ويفسِّر هذا النموذج التثبيط التنافُسي والتحكُّم الفراغي وتثبيط الإنزيم عند مسخه.

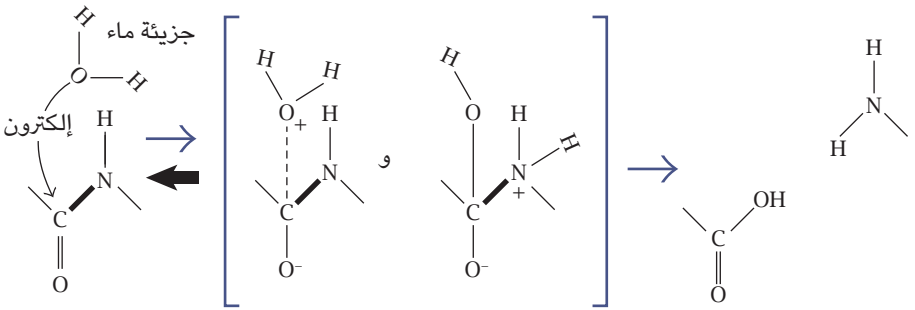
لنتابع عمل الإنزيم Collagenase في تحليل البروتين كولاجين حسَب ما عرضه McFadden & Al-Khalili (2014) كنموذجٍ لفهم آلية عمل الإنزيمات.

من المعروف أن البروتينات تتألف من سلاسل من الأحماض الأمينية، التي ترتبط مع بعضها من خلال الأواصر الببتيدية. الآصرة الببتيدية آصرةٌ قويةٌ جدًّا؛ فهي من



شكل ٧-٣: الإنزيم α-chymotrypsin يُظهِر الأحماض الأمينية المؤشرة التي تكوِّن الموقع الفعال. عن: Jcwhizz en:Image:Chymotrypsin.png.

الأواصر التساهمية حيث تشترك ذرة كاربون مجموعة الكاربوكسيل من حامضٍ أمينيٍّ مع ذرة نتروجين مجموعة الأمين من حامضٍ أمينيٍّ مجاور بزوج من الإلكترونات. هذان الإلكترونان السالبا الشحنة، سيجذبان نواتَي الذرتَين المتجاورتَين نحو بعضهما. كسر هذه الآصرة يمُر عَبْر تفاعُل التحلُّل المائي (Hydrolysis). وفي هذا النوع من التفاعُل بدون اشتراك الإنزيم، ينبغي اقتراب جُزيئة ماء من الآصرة لدرجة تمكِّن هذه الجُزيئة من منح أحد إلكتروناتها لذرة الكاربون المكوِّنة للآصرة مكونةً آصرةً ضعيفة، جديدة، تضمن بقاءَها في المكان، والمتمثِّل بخطوطٍ متقطعة في الشكل ٧-٤. هذه تمثِّل حالةً انتقاليةً ينبغي أن تعبُر مستوًى طاقيًّا عاليًا لكسر الآصرة. ويُلاحَظ من الشكل أن الإلكترون الممنوح من ذرة هيدروجين في جُزيئة الماء يجعل هذه الجزيئة موجبة الشحنة؛ حيث تتبقى نواة الهيدروجين (أي بروتون موجب الشحنة) ويصل إلى ذرة الأوكسجين المشتركة في الآصرة، والتي ستكتسب شحنةً سالبةً في الحالة الانتقالية. البروتون في جُزيئة



شكل ٧-٤: تتألَّف البروتينات (a) من سلاسلَ من الأحماض الأمينية مكوَّنة من ذرات الكاربون (C) والنتروجين (N) والأوكسجين (O) والهيدروجين (H) مرتبطة بأواصرَ ببتيدية ممثلة بالشكل كخطٍّ سميك. يمكن أن تُكسر الآصرة الببتيدية (c) بالتحلُّل المائي بواسطة جُزيئة الماء لكن يجب أن تمُر قبل ذلك بحالةٍ انتقاليةٍ غير مستقرة، تتألَّف من تركيبَين مختلفَين على الأقل قابلَين للتحوُّل بعضهما لبعض (b). مُحوَّر عن McFadden & Al-Khalili (2014).

الماء سيكون متغير الموضع بالمفهوم الكمومي؛ فهو يبقى في جُزيئة الماء معظم الوقت (التركيب في يسار الشكل ٧-٤) وأحيانًا يمكن أن يقترب من ذرة النتروجين (التركيب في يمين الشكل ٧-٤) في الجهة الأخرى من الآصرة الببتيدية. في هذا الموقع، البروتون الجوال سيلتقط أحد إلكترونات الآصرة الببتيدية من موقعه، ويكسر الآصرة. لكن هذا لا يحدث عادةً حيث إن الحالة الانتقالية قصيرةٌ جدًّا، وقلقةٌ جدًّا لدرجة أن أية قلقلةٍ بسيطةٍ يمكن أن تُنهيها؛ فالإلكترون الممنوح من ذرة الهيدروجين في جُزيئة الماء يمكن أن يُستعاد بسهولة إلى موقعه الأصلي، كما موضَّح بالسهم السميك في الشكل. هذا السيناريو (بقاء الآصرة) هو المرجَّح بقوة، مقارنةً بتقدُّم التفاعُل نحو كسر الآصرة؛ ولهذا لا تكسر الآصرة الببتيدية عادة، ففي المحلول المُتعادِل يكون الزمن اللازم لتكسر ٥٠٪ من الأواصر الببتيدية هو أكثر من ٥٠٠ سنة. دور الإنزيم بتسريع مثل هذا التفاعُل سيكون بزيادة استقرار الحالة الانتقالية، وبالتالي زيادة فرص تكوينِ ناتج التفاعُل؛ أي تكسير الأواصر الببتيدية. ذلك يمكن أن يتم من خلال وجود ذرة فلزٍّ موجبةٍ في مركز التفاعل للإنزيم قرب الآصرة الببتيدية تُعادِل ذرة الأوكسجين السالبة في الحالة الانتقالية لتثبيتها وعدم رجوع

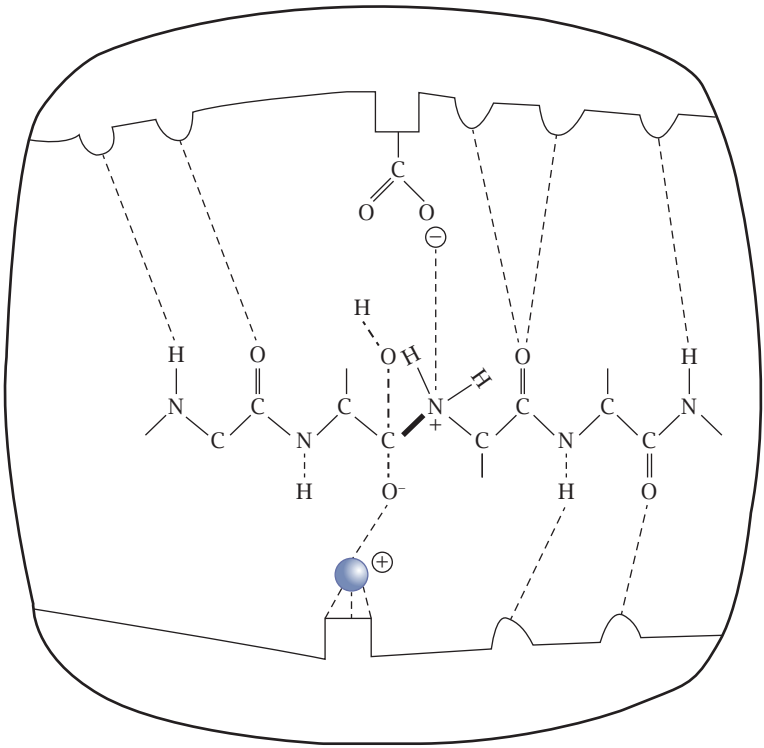
الإلكترون إلى جُزيئة الماء؛ وبالتالي تخفض طاقة التنشيط اللازمة للتفاعل؛ فالمادة الأساس تُمسك بواسطة الأواصر الكيميائية الضعيفة المؤشرة بخطوطٍ متقطعة؛ وهي إلكتروناتٌ مشتركة بين المادة الأساس والإنزيم، موفرة الترتيب المناسب لفعل القضم بواسطة الإنزيم. يقوم الأيون الموجب بنزع إلكترون من ذرة الأوكسجين في المادة الأساس لتثبيت الحالة الانتقالية، وخفض طاقة التنشيط، ثم يقوم الحامض الأميني كلوتامات في الإنزيم بتعليق ذرة الأوكسجين السالبة له على الآصرة الببتيدية، ونزع البروتون الموجب الشحنة من جُزيئة الماء، ثم ينقل هذا البروتون إلى ذرة النتروجين على إحدى نهايات الآصرة الببتيدية. وبذلك يسحب الإلكترونات من الآصرة. وكما ذكر سابقًا فإن سحب الإلكترونات بمثابة سحب الرابط الذي يحقِّق الآصرة، وبذلك تضعُف أو تُكسَر الآصرة. تكرار هذه العملية يؤدي إلى تحليل هذا البروتين خلال عددٍ من النانوثانية، في حين يستغرق ملايين السنين بدون عمل الإنزيم.

(٢) دَور ميكانيك الكَم Role of Quantum Mechanics

دَور ذَرة الزنك في الموقع الفعَّال للإنزيم (شكل ٧-٥) هو دَورٌ تحفيزيٌّ تقليدي يعتمد على الحركة الجُزيئية العشوائية.

كما أن الآليات التقليدية في تفسير عمل الإنزيم، كالاعتماد فقط على الحالة الانتقالية، يمكن أن تُسرِع التفاعُل بحدود مليون مرة، غير أن السرعة الفائقة الحاصلة في الواقع والسلوك الغريب لها في درجات الحرارة لا يمكن تفسيرها على أساس الآليات التقليدية، ونظرية الحالة الانتقالية تحتاج إلى تفسيرٍ آخر (Brookes, 2017). هذا التفسير يمكن أن ينسجم مع ما ذهب إليه شرودنجر في أن «النظام ينشأ من النظام»؛ فعملُ الإنزيم منظَّم، يؤدِّي إلى منتوجٍ متماثلٍ في كل مرة، والإنزيم تركيبٌ عضويٌّ عالي التنظيم، وأي تغيُّرٍ بسيطٍ في تركيبه كتغيُّر أحد الأحماض الأمينية البعيدة عن موقع التفاعُل، له تأثيرٌ مهم في عمله، ما يجعل الاعتماد على العشوائية والحالة الانتقالية وحدها غير كافٍ لتفسير عمل الإنزيم. كما لم تنجح محاولاتُ تكوينِ إنزيمٍ اصطناعيٍّ اعتمادًا على مبدأ الحالة الانتقالية، وما نعرفه من آليات عمل الإنزيم، ما يعني أننا هنا لم نفهم آلية عمل الإنزيم جيدًا؛ فعلى قول رتشارد فينمان: «الشيء الذي لا أتمكَّن من تكوينه يعني أنني لم أفهمه.» ما يقوم به الإنزيم هو التلاعُب بالذرات والبروتونات والإلكترونات المفردة ضمن وبين الجُزيئات.

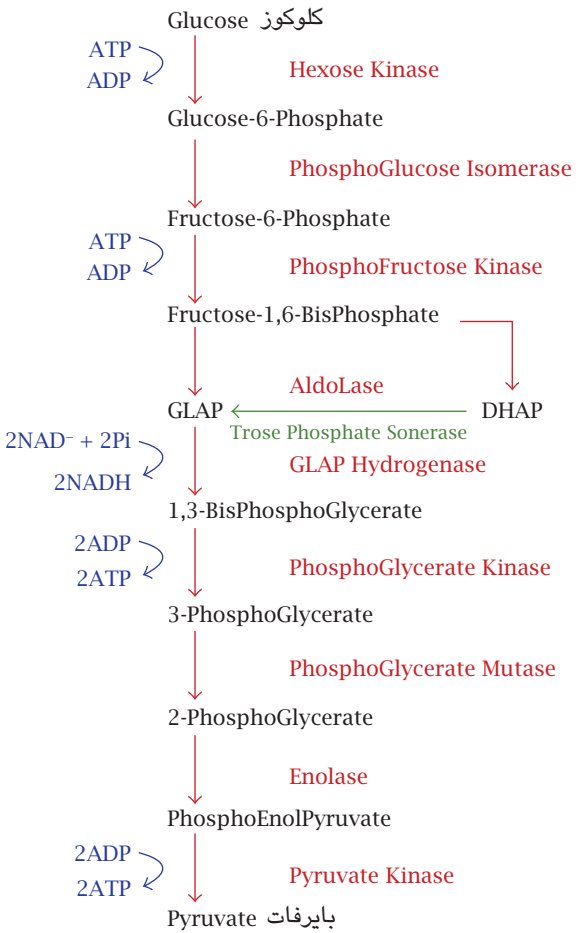
وهذا يرتبط بميكانيك الكَم الذي يعتمد على حالة التماسُك التي تُظهِر أمورًا غير عادية كالتراكُب والاختراق الكمومي وغيرها، والتي تتلاشى بفك التماسُك.



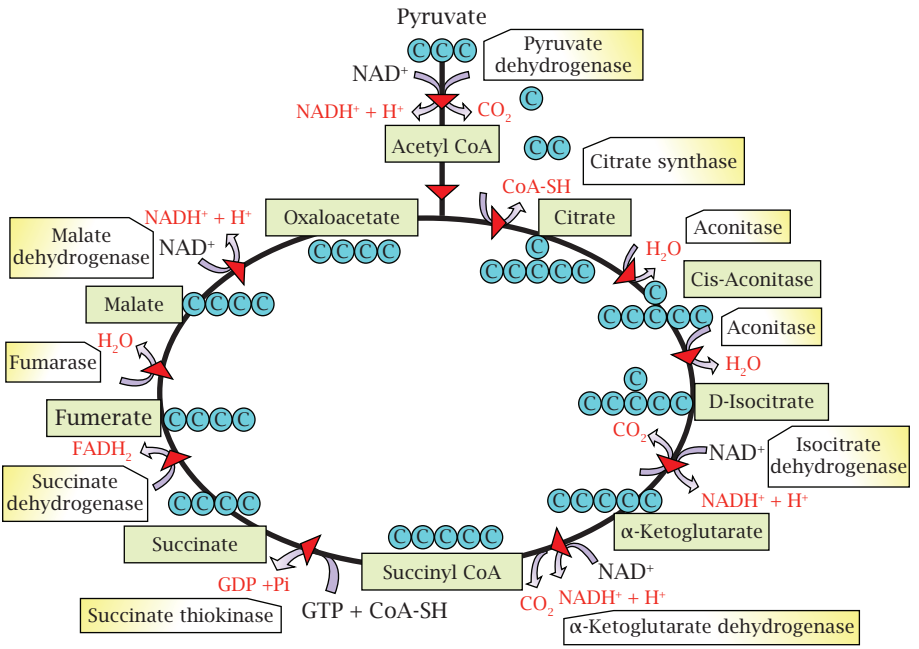
شكل ٧-٥: كسر الآصرة الببتيدية (بالخط العريض) للكولاجين في الموقع الفعَّال لإنزيم كولاجينيز. الحالة الانتقالية للمادة الأساس، موضَّحة بالخطوط المتقطِّعة. الكرة وسط أسفل الشكل تمثِّل أيون الزنك الموجب. مجموعة الكاربوكسيل (COO) في أعلى الشكل هي من الحامض الأميني كلوتامات في الموقع الفعَّال للإنزيم. مع ملاحظة أن الأبعاد الجُزيئية لا تعبِّر عن الأبعاد الحقيقية. عن McFadden & Al-Khalili (2014).

التفاعُلات الكيميائية التي تتضمَّن انتقال الإلكترونات تحدُث في تفاعُلات الأكسدة؛ فعملية حرق الفحم في الهواء مثلًا هي عملية أكسدة، يتم فيها تسخين الفحم حيث ترفع طاقة الإلكترونات، ليتم انتقالها من الفحم (كاربون) إلى ذرات الأوكسجين، لتتكوَّن أواصرُ

منخفضةُ الطاقة في جُزيئات ثاني أوكسيد الكاربون، وفرق الطاقة يتحوَّل إلى حرارة. في الخلايا الحية تحصُل تفاعُلات الأكسدة بواسطة إنزيمات الأكسدة-الاختزال خلال عملية التنفُّس وغيرها.

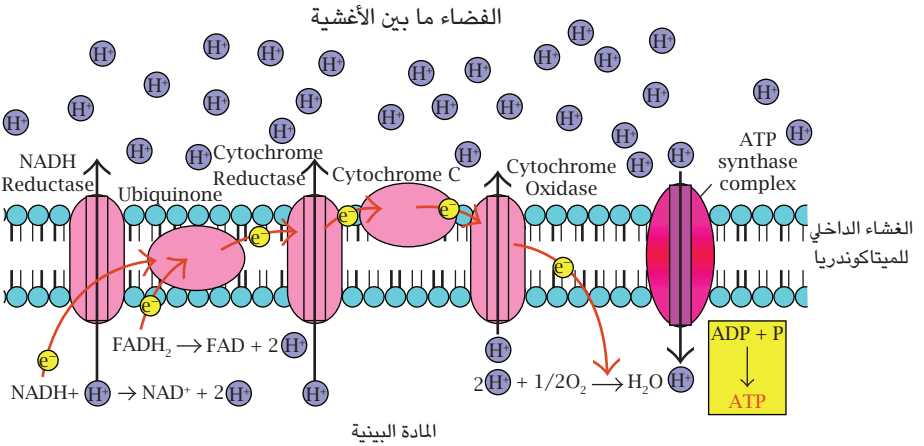


شكل ٧-٦: مسار التحلُّل السكَّري. يبدأ بجُزيئة كلوكوز سداسية الكاربون وينتهي بالبايروفات الثلاثية الكاربون.



شكل ٧-٧: دورة كريبز. تبدأ بالبايروفات، وتؤدِّي إلى تفكيكها وتكوين ٣ جُزيئات CO_2 وتكوين عددٍ من المساعدات الإنزيمية NADH و$FADH_2$.

عملية التنفُّس تحصُل في جميع الخلايا الحية والغرض منها الحصول على الطاقة التي تنتُج من تفاعُلات الأكسدة للاستفادة منها في النمو، وتسيير الفعاليات الحيوية. المواد الأساس التي تعمل عليها هذه الإنزيمات، هي المواد الغذائية خاصة السكَّريات والدهون التي تختزن الطاقة أصلًا في الأواصر التي تربط الهيدروجين بالكاربون وذرات الكاربون مع بعضها. هذه الأواصر كما مَرَّ ذِكره هي إلكتروناتٌ مشتركةٌ بين ذرتَين ضمن نفس الجُزيئة. عملية التنفس تشبه من حيث المبدأ عملية حرق الكاربون، لكنها لا تتم بتفاعُلٍ واحد، وإنما بسلسلة من التفاعُلات المتتالية، التي تُحفِّز بواسطة إنزيمات وتؤدِّي إلى انتقالٍ تدريجيٍّ للإلكترونات من مستوياتٍ طاقيَّةٍ عالية إلى مستوياتٍ طاقيَّة منخفضة؛ حيث تُستقبل من قِبَل إنزيمات. والفروق الطاقيَّة تُستغَل في تكوين مركَّباتٍ خازنة للطاقة؛ هي جُزيئات Adenosine triphosphate (ATP). كما يترافَق انتقال الإلكترونات

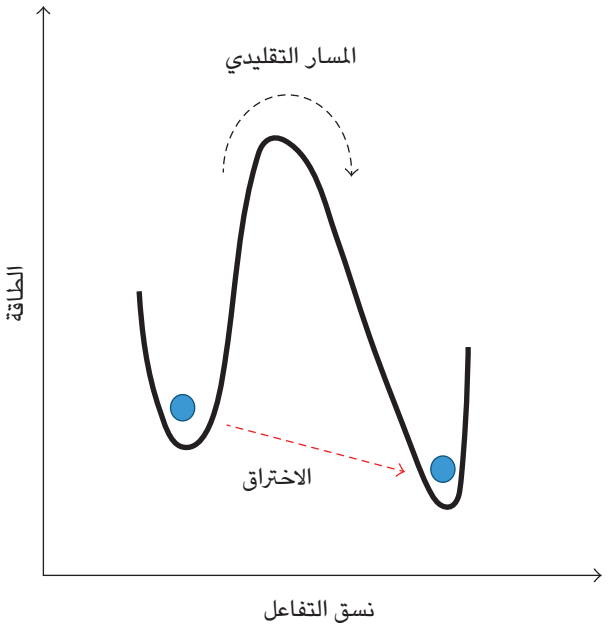


شكل ٧-٨: سلسلة نقل الإلكترون في الميتاكوندريا. مُحوَّر عن Gary E. Kaiser (1998).

مع انتقال البروتونات بواسطة المساعدات الإنزيمية المختزلة، ويكون لها دَورٌ مُهمٌّ في تكوين الجُزيئات الخازنة للطاقة.

ثمَّة عددٌ من المسارات التنفُّسية المختلفة، والتي تعمل بشكلٍ متزامنٍ من أجل الاستفادة القُصوى من الطاقة المتحرِّرة. المسار الأول ويُعرف بمسار التحلُّل السكَّري (Glycolysis) (شكل ٧-٦) ويتم في السايتوبلازم، تكون فيه المادة الأساس جُزيئات الكلوكوز؛ وهي سكَّرياتٌ بسيطةٌ سداسية الكاربون تنشط بربطها بجُزيئات فوسفات من جُزيئتَي ATP وتمُر بسلسلة تفاعُلاتٍ بضمنها تفاعلاتُ أكسدة اختزال لتنتهي بتكوين جُزيئتَي بايروفات ثلاثية الكاربون، وتكوين أربعة جُزيئات ATP فتكون المحصلةَ جزيئتا ATP وجُزيئتا NADH مختزلة. التفاعُلات المتسلسلة تسير بواسطة إنزيم في كل خطوة، وهي تحصُل بوجود أو عدم وجود الأوكسجين حيث لا يشترك في التفاعُل. لكن ناتج التفاعُل وهي جُزيئات البايروفات ستدخل مسارًا تنفسيًّا آخر؛ هو دورة كريبز (Krebs cycle) (شكل ٧-٧).

قبل الدخول في دورة كريبز، يتم إزالة ذرة كاربون من المركَّب الثلاثي الكاربون البايروفات، وتتم إزالة ذرَّتَي الكاربون الأخريَين في دورة كريبز. سلسلة التفاعلات التي تسرع كلٌّ منها بواسطة إنزيم تؤدي إلى تكوين جُزيئتَي Guanosine triphosphate (GTP) وهي مُكافِئة لجُزيئات ATP وعدد من جُزيئات NADH و$FADH_2$ المختزلة والتي



شكل ٧-٩: توضيح مسار الاختراق والمسار التقليدي لعبور الجُسيمات الذرية مثل الإلكترون لحاجز الطاقة.

ستدخل المسار التنفُّسي الثالث وهو سلسلة نقل الإلكترون (شكل ٧-٨) حيث تحصُل تفاعُلات الأكسدة-الاختزال وفيها تنقل هذه المساعدات الإنزيمية المختزلة البروتونات والإلكترونات من إنزيمٍ إلى آخر على الغشاء الداخلي للميتاكوندريا. تقوم طاقة الإلكترونات بضخ البروتونات عَبْر الغشاء إلى الخارج. تدفُّق هذه البروتونات المتراكمة عَبْر الغشاء إلى داخل الخلية من خلال معقد ATP synthase الموجود على الغشاء، سيُوفِّر الطاقة اللازمة لتكوين جُزيئات ATP من جُزيئات ADP ومجاميع الفوسفات. هذه الحالة مُشابهة لإنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة توربينات السدود. وفي آخر المسار، يتحدُ زوجٌ من البروتونات وزوج من الإلكترونات ونصف جُزيئة أوكسجين لتكوين جُزيئة ماء. وهكذا فإن معظم الطاقة الناتجة من عملية التنفُّس تنتُج في مسار سلسلة نقل الإلكترون.

حسب McFadden & Al-Khalili (2014) فإن عملية انتقال الإلكترون بين جُزيئة إنزيم وجُزيئة إنزيم مجاور على الغشاء الداخلي للميتاكوندريا تتطلَّب قطعَ مسافة بضعِ عشراتٍ من الأنكستروم (أي بطول عدة ذراتٍ حيث إن قُطر الذرة يتراوح بين ١ إلى ٥ أنكستروم). وهي مسافةٌ أكبر بكثير من أن تُفسَّر على أساس القفز الحراري الاعتيادي للإلكترون.

بقي تفسير هذه الظاهرة غامضًا لعدة عقود. لاحظ Britton Chance أن الضوء يُشجِّع نقل الإلكترونات من إنزيم السايتوكروم إلى الأوكسجين في سلسلة نقل الإلكترون. واكتشف هذا الباحث مع باحثٍ آخر هو Mitsuo Nishimura أن هذه العملية تحدُث في البكتيريا *Chromatium vinosum* حتى لو بردَت بالنتروجين السائل إلى −١٩٠م°. ثم قام DeVault وChance بتعريض البكتيريا إلى ومضة ضوءٍ أحمرَ بَرَّاقٍ من ليزر ياقوت، ولمدةٍ قصيرةٍ جدًّا هي ٣٠ نانوثانية، ووجدا أن معدل نقل الإلكترون في هذه البكتيريا يستمرُّ بالانخفاض حتى حوالي −١٧٣م° ليصل إلى ١٠٠٠ مرة أقل، مقارنةً بمعدَّله في درجة حرارة الغرفة. وهذه نتيجةٌ منطقيةٌ متوقَّعة إذا كانت عملية نقل الإلكترونات تسير أساسًا بالطاقة الحرارية. لكن المفاجأة حدثَت حين خفض الباحثان درجة الحرارة إلى أقل من −١٧٣م° حيث ارتفع معدَّل نقل الإلكترون ووصل إلى قمةٍ معينة، وبقي ثابتًا رغم الاستمرار في تخفيض درجة الحرارة إلى −٢٣٨م°. هذه النتيجة تُبيِّن أن آلية نقل الإلكترون في الإنزيم لا يمكن إرجاعُها فقط إلى عملية قفز الإلكترون التقليدية، ويمكن أن تعتمد على ميكانيك الكَم وخاصة ظاهرة التسرُّب الكمومي؛ فالتسرُّب يمكِّن الجُسَيمات الذَّرية من عبور أو اختراق حاجز طاقةٍ عالٍ (شكل ٧-٩) أو مادةٍ عازلةٍ ضيقة بين جانبَي موصلَين كهربائيَّين، أو كما في حالتنا التي نُناقِشها، فضاء بين إنزيمَين في السلسلة التنفُّسية. الشكل ٧-٩ يُظهِر الحالة التقليدية لعبور الإلكترون مثلًا حاجز الطاقة من خلال اكتسابه مزيدًا من الطاقة، لكن ثمَّة إمكانية وإن كانت باحتمالٍ صغير، أن يسلُك الإلكترون كموجةٍ ويخترق حاجز الطاقة وهو في مستوًى طاقيٍّ منخفض نسبيًّا. لكن التسرُّب كأي ظاهرةٍ كمومية، يتطلَّب أن يكون السلوك الموجي للجُسيم متماسكًا؛ أي إنه يكون في حالةِ تناغُم حيث تكون الموجات متطابقة. وفور فقدان الموجات لحالة التناغُم هذه يحصُل فك التماسُك، ويسلُك الجُسيم سلوكًا تقليديًّا كما في حالات القياس أو المراقبة أو الاتصال بالبيئة (Zurek, 2002). وهنا تبرز مشكلةٌ تتطلَّب حلًا؛ فالتفاعلات الإنزيمية تحصُل عادةً في أوضاع تعجُّ بالجُزيئات المختلفة، المتحرِّكة حركاتٍ عشوائيةً سواء داخل

الخلية أو خارجها. هذه الحالة تفرض حصولًا سريعًا جدًّا لفك التماسُك مما لا يُبقي وقتًا كافيًا للتماسُك لتحقيق انتقال الجُسيمات. الحل إذن يمكن أن يكمُن في الإنزيم نفسه؛ فداخل الإنزيم تنهمك الجسيمات بحركاتٍ متوافقةٍ وليست عشوائية. كما أن الإلكترونات خفيفةٌ جدًّا مما يسمح لها أكثر من غيرها بالاختراق، وهي بحركتها الموجية تخترق هذه الحواجز مثلما يخترق الصوت جدران الغرف، مع الفارق في آلية اختراق الصوت للجدار. وحسَب Knapp & Klinman (2002) فإن التأثيرات الكمومية في نقل الإلكترون في التفاعُلات البيولوجية، أمرٌ مُقَر منذ مدةٍ طويلةٍ بسبب عدم الدقة العالية في موقع الإلكترون. كما أن الطبيعة الكمومية لنقل الإلكترون تطلَّبَت نماذج تفاعلاتٍ جديدة تتعدَّى نظرية الحالة الانتقالية.

وأظهَرَت التجارب الحديثة أنْ ليس الإلكترونات فقط تتمكَّن من الاختراق، بل البروتونات أيضًا، وهي أثقل كثيرًا من الإلكترونات (البروتون أثقل حوالي ٢٠٠٠ مرة من الإلكترون) بل وحتى الذرات تتمكَّن من الاختراق في التفاعُلات الإنزيمية. ثمَّة سلسلةٌ من الحركات الحرارية المتوازنة التي تُسيطِر على المسافة بين مانح الهيدروجين ومستقبل الهيدروجين والكهربائية المستقرة للمركز الفعَّال في الإنزيم؛ مما يوفِّر تكيُّفاتٍ بنيويةً مناسبة لاختراق البروتون (Klinman & Kohen, 2013; Bandaria *et al.*, 2009).

وكما هو معروفٌ فإن الجُسيمات الصغيرة تتمكَّن من الاختراق بسهولة، لكن الجُسيمات الكبيرة تجد مقاومةً أكثر للاختراق ما لم تكن المسافة التي عليها اختراقُها قصيرةً جدًّا. وكما موضَّح في الشكل ٧-٥، فإن الإنزيمات ومنها إنزيم كولاجينيز تحرِّك البروتونات لتكسر الأواصر الببتيدية. لكن تفسير هذه الحركات وهي شائعة في الإنزيمات وفي درجات الحرارة التي تعمل فيها الإنزيمات في الخلايا الحية تُعتبَر عالية (بمقاييس ميكانيك الكَم) ما يمكِّنها من تحريك البروتونات على أساس الحركة العشوائية الحرارية، والتي لا تستدعي الاختراق لتفسيرها. كما أن انتقال البروتونات في معظم التفاعلات الإنزيمية في درجات حرارة عالية كهذه يتم من خلال القفز الحراري غير الكمومي بين الُجزيئات. لكن اختراق البروتونات يحصُل في عددٍ قليلٍ من التفاعُلات التي لا تكون معدَّلاتها متأثرةً بفروق درجات الحرارة كما ذُكر سابقًا.

ومن أجل إثبات اختراق البروتون في التفاعُلات الإنزيمية استخدم Cha *et al.*, (1989) التأثير الحركي للنظائر (Kinetic isotope effect) (KIE). إن KIE هي تقنية في الكيمياء الفيزيائية العضوية تعتمد على التغيُّر في معدَّل التفاعل الكيميائي نتيجة استبدال ذرة في

المواد المتفاعلة بإحدى نظيراتها (Isotopes). ويتم إيجاد KIE كنسبة في ثوابت التفاعُل بين المادة الخفيفة k_L والنظير الثقيل k_H:

$$\mathrm{KIE} = K_L / K_H$$

التغيُّر في معدل التفاعل هو تأثيرٌ كمومي ينتُج عن أن للنظير الأثقل تردُّداتٍ اهتزازية أقل من المادة الأخف. هذا يؤدي إلى الحاجة إلى طاقةٍ أكبر لوصول النظير الأثقل إلى الحالة الانتقالية، وبالتالي انخفاض معدَّل التفاعل. وهكذا يمكن استخدام هذه التقنية لاختبار اختراق البروتون من خلال مقارنة معدَّل التفاعُل له مع معدَّل التفاعُل المماثل باستخدام نظيرٍ أثقل؛ فذرة الهيدروجين مثلًا تتألَّف من بروتونٍ واحد في النواة وإلكترونٍ واحد، وهكذا فهي يمكن أن تكوِّن أيون هيدروجين H^+ متمثلًا بالنواة دون الإلكترون. ويُوجد نظيران ثقيلان للهيدروجين أقل شيوعًا هما الديتيريوم D حيث تتألَّف نواته من بروتونٍ واحد ونيترونٍ واحد، كذلك التريتيوم T حيث تتألف نواته من بروتون بالإضافة إلى اثنَين من النيوترونات. من المعروف أن النظائر تتشابه في السلوك الكيميائي؛ حيث إن مَن يلعب الدور الرئيس في التفاعُلات الكيميائية هي الإلكترونات والتي يكون عددها متماثلًا في جميع نظائر العنصر. وكما ذُكر سابقًا، فإن فرص الاختراق الكمومي تقل كلما كان الجسيم أثقل؛ وبالتالي تُستخدم KIE لإثبات انتقال البروتون مثلًا إذا أظهرت نتائج التجربة أن استخدام النظائر الثقيلة مثل الديتيريوم تخفض سرعة التفاعل. ولتعزيز النتائج ينبغي إثبات أن اختراق البروتون يحصل في درجات الحرارة المنخفضة حيث يحتفظ بقمةٍ معيَّنةٍ كما سبق الإشارة إليه. وهذا ما حصل عليه Cha *et al.*, (1989) باستخدام الإنزيم Alcohol dehydrogenase في نقله للبروتون من الكحول إلى NAD^+، لينتج NADH. وعزَّز باحثون آخرون هذه النتائج (Kohen *et al.*, 1999; Sen & Kohen, 2010). كما توضَّحَت هذه الآلية في عددٍ من الإنزيمات الأخرى مثل Methane monooxygenase (Nesheim & Lipscomb, 1996) و Galactose oxidase (Whittaker *et al.*, 1998) و(Basran *et al.*, 1999) Methylamine dehydrogenase و Sarcosine oxidase (Harris *et al.*, 2000) و Dihydrofolate reductase و Formate dehydrogenase (Sen & Kohen, 2010).

إن مؤشرات تفاعلات C–H عن طريق نقل ذرات الهيدروجين قد تبدو منسجمة مع نموذجَي «تخطي الحاجز» التقليدي أو «تصحيح اختراق شكل الجرس». غير أن كلا النموذجَين لا يتمكَّنان من تفسيرِ قيمِ فرق طاقة التنشيط ΔEa في درجات الحرارة القريبة

من الصفر المطلَق في العديد من الإنزيمات؛ والتي تزداد بفعل الاضطرابات الداخلية أو الخارجية المصدر. بينما يطرح نموذج الاختراق الكمومي التام كتفسيرٍ لاعتماد KIE على درجات الحرارة، والذي يُبرِز أهمية المسافة بين مانح الهيدروجين ومستقبل الهيدروجين لعمل تطابُق دالَّة الموجة والذي تؤكِّده تجاربُ تحديد ΔEa (Klinman & Offenbacher, 2018).

لقد تمكَّن فريق من الباحثين من تطويرِ وسيلةِ اتصالٍ بيولوجيٍّ كمومي لاختراق الإلكترون Quantum Biological Electron Tunnelling (QBET) واستخدامها في الزمن الحقيقي لكشف الاختراق الكمومي للإلكترون في سايتوكروم C للميتاكوندريا خلال حياة وموت الخلية. وبيَّنَت طريقة QBET عملية الاختراق عَبْر الجُزيئات المعيقة على مسافاتٍ مختلفةٍ لتقدِّم إثباتًا تجريبيًّا لعملية الاختراق الكمومي، وتفتح المجال لتطبيقاتٍ مهمةٍ مختلفة (Xin *et al.*, 2019).

ثمَّة طرقٌ كموميةٌ أخرى؛ كالتشابُك يمكن أن تفسِّر عمل إنزيماتٍ أخرى، كما في حالة إنزيم type II restriction endonucleases (Kurian *et al.*, 2016).

الفصل الثامن

ميكانيك الكَم والقنوات الأيونية والاتصالات الخلَوية

Quantum Mechanics, Ion Channel
and Cellular Communication

ما يُميِّز أية منظومة، ومنها الكائن الحي والخلية الحية، هو وجود عازلٍ يؤمِّن وحدتها، وينظِّم علاقتها مع الخلايا المجاورة والبيئة. خلايا معظم مجاميع الأحياء (كالبكتيريا والأركيا والفطريات والطحالب والنباتات) عدا الحيوانات تُحاط من الخارج بعازلٍ يتمثل بجدار الخلية. هذا الجدار منظومة من جُزيئات سُكَّريات معقَّدة متفرِّعة ومتشابكة تشكِّل ما يشبه الغربال؛ الذي يمكن أن يُعيق الكتل الجُزيئية الكبيرة التي تتعدَّى حجمًا معينًا لكنه يسمح بمرور جميع أنواع الجُزيئات بمختلف حجومها. وهكذا فإن هذا الحاجز تامُّ النفاذية أو غير انتخابيِّ النفاذية. يلي هذا الحاجز في الأحياء المذكورة غشاء الخلية؛ وهو الحاجز الوحيد في الخلايا الحيوانية يُحيط السايتوبلازم وعُضيَّات الخلية أيضًا. ويتألَّف أساسًا من طبقتَين من الدهون، يتوزَّع فيها عددٌ من البروتينات بضِمنها بعض البروتينات السكَّرية والبروتينات الدهنية، ويخترقها عددٌ من البروتينات التي تعمل كنواقل أو كقنواتٍ تربط الوسط خارج الخلية بداخلها (شكل ٤-٣٠). هذا الغشاء انتخابي النفاذية؛ فهو ينظِّم عبور الجُزيئات والأيونات من خلاله اعتمادًا على خواصها؛ كالذوبان بالماء أو الدهون، وجود أو غياب الشحنة الكهربائية، والحجم والوزن الجُزيئي. ومن المعروف أن غشاء الخلية والأغشية الخلَوية الأخرى تمتلك جهدًا كهربائيًّا (Electric potential) ينشأ نتيجة اختلاف تراكيز الأيونات الموجبة والأيونات السالبة على السطح الخارجي والسطح الداخلي للغشاء.

الكثير من أنواع الجزيئات غير المشحونة تنفُذ من خلال المناطق الدهنية غير البروتينية من غشاء الخلية، بطريقة الانتشار البسيط (من الوسط الأعلى إلى الوسط الأقل تركيزًا) لكن بمعدَّلاتٍ تختلف كثيرًا حسب درجة ذوبانها في الدهون أولًا وحجمها ثانيًا؛ فمعدَّل نفاذية الجُزيئات غير المستقطبة الذائبة في الدهون مثل O_2 وCO_2 يكون سريعًا. الجُزيئات المستقطبة غير المشحونة تنفُذ أيضًا بمعدلاتٍ تعتمد على حجمها أو وزنها الجُزيئي؛ فجُزيئات الماء (١٨ دالتون) والكحول الإثيلي (٤٦ دالتون) واليوريا (٦٠ دالتون) تنفُذ بسرعةٍ بينما الكليسرول (٩٢ دالتون) ينفُذ بمعدَّلٍ أبطأ في حين الكلوكوز (١٨٠ دالتون) لا ينفُذ. كما لا تنفُذ الجزيئات المشحونة مهما كانت صغيرة، ولا حتى الأيونات.

أما الجُزيئات المستقطبة أو المشحونة؛ مثل السكريات والأحماض الأمينية والنكليوتيدات وغيرها، وكذلك الأيونات، فتنفُذ من خلال بروتينات الغشاء التي تُسمَّى البروتينات الناقلة (Carrier proteins) والقنوات البروتينية (Protein channels). هذه البروتينات تكون عالية الخصوصية؛ حيث تتخصَّص بنقل السكَّريات أو الأحماض الأمينية أو الأيونات، بل بنوعٍ واحدٍ أو أنواعٍ قليلةٍ من نفس المجموعة. البروتينات الناقلة (Permeases) ترتبط بالجُزيئات المنقولة، وتعاني تغيُّراتٍ شكليةً لتتمكَّن من نقلها. كما تقوم البروتينات الناقلة بنقل الجُزيئات غير المشحونة حسب تدرُّج التركيز من الأعلى إلى الأقل بواسطة الانتشار المُيَسر. لكن نقل الجُزيئات المشحونة يتم بواسطة النقل الفعَّال الذي يتطلَّب صرف طاقةٍ ناتجةٍ من تحلُّل جُزيئات ATP ويمكن أن يكون النقل عكس تدرُّج التركيز (من التركيز الأقل إلى الأعلى).

أما القنوات البروتينية فلا ترتبط بالجُزيئات أو الأيونات المنقولة، بل تمُر هذه من خلال تجويف القناة الذي يخترق الغشاء؛ لذلك تكون القنوات البروتينية أسرع في عملية النقل من البروتينات الناقلة. كما أن عملية النقل تكون حسَب تدرُّج التركيز وبطريقة الانتشار البسيط.

(١) القنوات الأيونية Ion channels

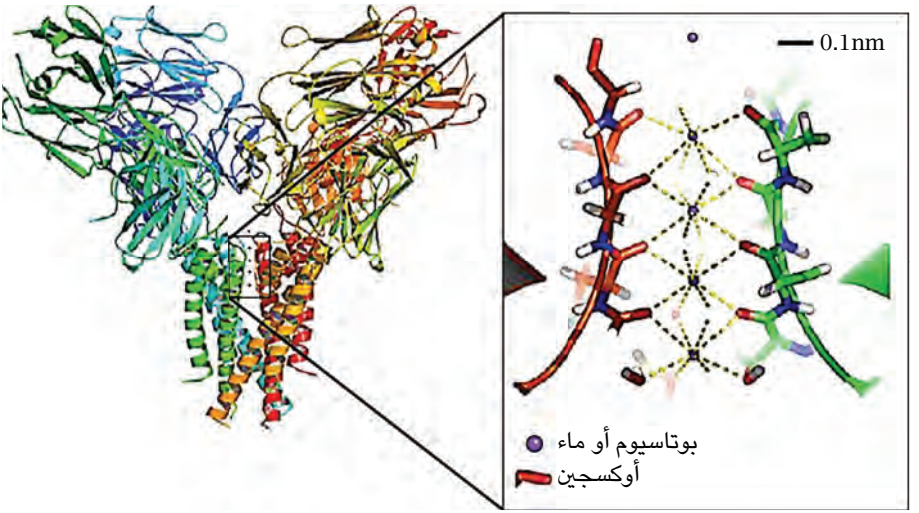
حتى الوقت الحاضر تم تشخيص أكثر من ١٠٠ نوعٍ من القنوات الأيونية. وتقوم بفعالياتٍ مختلفة حسب نوعها؛ مثل الاستثارة الكهربائية والإشارة الكهربائية وتغيير الجهد الكهربائي للغشاء والحركات الميكانيكية وغيرها. القنوات الأيونية هي بروتينات تحتضن فضاءً (قناة) خاليًا ضيقًا محبًّا للماء (Hydrophilic) بما يسمح بمرور الأيون اللاعضوي،

وتنتهي بفتحتَين كارهتَين للماء (Hydrophobic) تربط سائل الخلية (Cytosol) مع خارج الخلية ويمكن أن تُغلَق وتُفتَح بآلياتٍ مختلفة. هذه القنوات ذات خصوصيةٍ عاليةٍ جدًّا؛ فهي تتخصَّص بنوعٍ واحدٍ من الأيونات، كما أنها عالية الكفاءة؛ حيث تقوم بنقل مليون أيون في الثانية، وهي بذلك أسرع ١٠٠٠ مرة من النقل بواسطة البروتينات الناقلة (Permeases). نقل الأيونات بواسطة القنوات الأيونية يتم حسب تدرُّجها الكيموإلكتروني وينظَّم من خلال فتح وغلق القناة. القنوات الأيونية تختص بنقل الأيونات اللاعضوية خاصة Na^+ وK^+ وCa^{++} وCl^- (Alberts *et al.*, 2002).

انتخابية القنوات الأيونية تنشأ من خلال ضيق قُطر القناة، بما يسمح بمرور الأيون المختصَّة بنقله دون غيره؛ فالأيون المار سيحتكُّ بالجدران الداخلية للقناة، وبذلك سيتمكن الأيون ذو القطر والشحنة المناسبَين من العبور. من المعلوم أن الجُزيئات المستقطبة أو المشحونة والأيونات ومنها الأيونات اللاعضوية ترتبط بأواصرَ هيدروجينية مع جُزيئات الماء، مما يضيف إلى حجمها حجم جُزيئات الماء المرتبط. ولكي يتم عبور الأيون من خلال القناة الضيقة، ينبغي عليه قبل أن يدخل أن يتخلَّص من جُزيئات الماء المرتبطة به، وبذلك يدخل بطابورٍ فردي.

فتح القنوات الأيونية يتم بمؤثِّراتٍ مختلفة مثل الاختلاف في الجهد الكهربائي عَبْر الغشاء. مثل هذه القنوات الأيونية تُسمَّى قنوات ذات البوابات الفولتية (Voltage-gated channels)؛ أو التأثير الميكانيكي حيث تُسمَّى القنوات ذات البوابات الميكانيكية (Mechanically gated channels)؛ أو من خلال الارتباط بلجين (Ligand) معيَّن، وهذه القنوات تُسمَّى القنوات ذات البوابات اللجينية (Ligand-gated channels). وهذه المجموعة الأخيرة تميَّز حسب مصدر ونوع اللجين، فإذا كان اللجين من مصدَرٍ خارج الخلية خصوصًا النواقل العصبية (Neurotransmitters) تُسمَّى القنوات ذات بوابات النواقل (Transmitter-gated channels)؛ أو اللجين ذو مصدر من داخل الخلية؛ كأن يكون أيونًا فتكون القناة أيونية البوابة (Ion-gated channels)؛ أو يكون نكليوتيدًا فتُسمَّى القناة نكليوتيدية البوابة (Nucleotide-gated channels). إضافةً إلى ذلك يمكن أن ينظَّم فتح القنوات عن طريق فسفرة أو ازالةِ فسفرة البروتين (Alberts *et al.*, 2002).

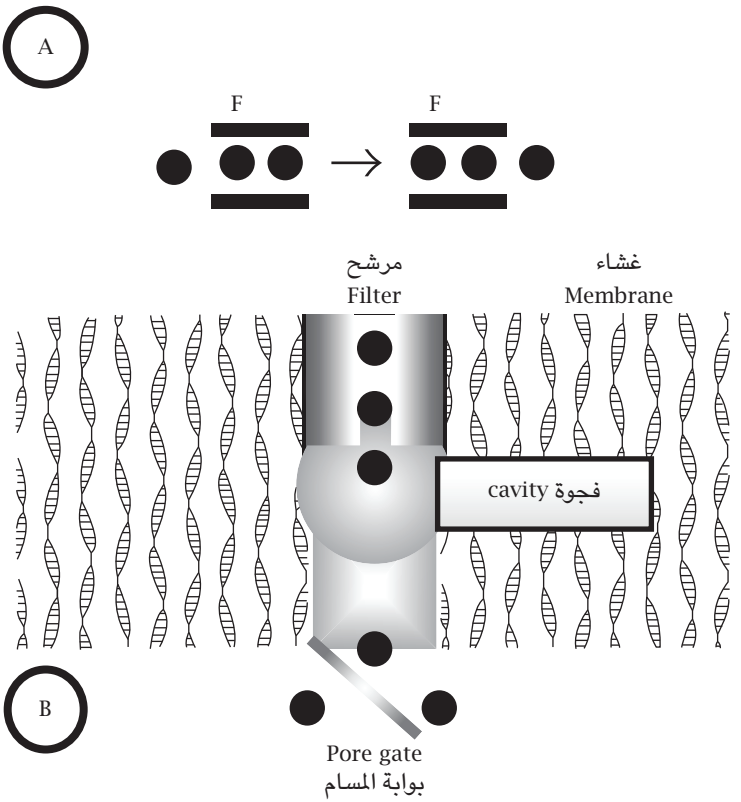
من المعروف أن العديد من التأثيرات الكمومية غير العابرة تحصُل نتيجة تعاقُب حركيات التماسُك الكمومي المستحثَّة للتأثير وفك التماسُك الكمومي اللاغية للتأثير؛ ففي



شكل ٨-١: رسم تخطيطي لقناة البوتاسيوم KcsA. يُظهِر معقد البروتين KcsA بوحداته الأربع المخترقة للغشاء (يسار) والانتخابية بواسطة أربعة مواقع اصطياد مؤلَّفة من ذرات أوكسجين الكاربونيل، والتي يمكن أن تصطاد أيونات البوتاسيوم أو جُزيئات الماء. محوَّرة عن (Vaziri & Plenio, 2010).

فعاليات نقل الطاقة في التركيب الضوئي، أشير إلى أن كفاءة نقل الطاقة تزداد بوجود الضوضاء اللاغية للطور، والناشئة عن أنماط تردُّداتٍ بيئيةٍ مقارنة بحالة التماسُك الكمومي وحدها. كما وضح أن عملية النقل للمنظومة تكون مثاليةً عندما لا تكون في حالة فك التماسُك التامة؛ أي عندما لا تكون تقليديةً تمامًا ولا متماسكةً تمامًا. هذه الملاحظة لم تقتصر على التركيب الضوئي فقط، وإنما في غيرها أيضًا (Vaziri & Plenio, 2010).

مع أن التركيب الجُزيئي للكثير من القنوات الأيونية صار معروفًا باستخدام تقنياتٍ متطورة، بما فيها التصوير البلوري بالأشعة السينية والمحاكات، فإن آليات عملها في الواقع وعلى المستوى تحت الذري لا يزال غيرَ محسوم. من بين القنواتِ الأيونيةِ التي تمَّت دراستُها جيدًا قنواتُ البوتاسيوم الأيونية. تضُم هذه القنوات مجموعةً تختلف في آليات فتحها، إلا أنَّ تتابُع الأحماض الأمينية في المرشَّح الذي يتحكَّم بانتخابية القنوات، محفوظ في جميع أنواع هذه القنوات. قناة البوتاسيوم الأيونية KcsA التي يبلغ قطرها ٠,٣ن م



شكل ٨-٢: العملية الفيزيائية الرئيسة التي يؤديها بروتين القناة الأيونية هي نقل الأيون الانتخابي (A) حيث يتم أخذ شحنةٍ واحدةٍ من الفجوة (موضَّح يسارًا)، تتعرض لإزالة جُزيئات الماء العالقة بها وتنقل إلى منطقة المُرشِّح (موضَّحة بخطَّين مزدوجَين). منطقة المرشح تحتضن أيونَين على الأقل. أخذ أيونٍ واحدٍ يؤدي إلى دفع الأيونات الموجودة في منطقة المُرشِّح. يُؤخذ أيونٌ واحدٌ من منطقة الفجوة ويُحرَّر أيونٌ آخرُ إلى داخل أو خارج الخلية (موضَّح يمينًا). (B) التنظيم الأساس للقنوات الأيونية فولتية البوابة. يتألف البروتين من ثلاثة حقول؛ المسام والفجوة ومنطقة المرشح. مُحوَّر عن: Summhammer *et al.*, (2012).

وطولها ١,٢ن م تنقل عند فتحها ٨١٠ أيون في الثانية وانتخابيتها عالية أيضًا حيث تنقل ٤١٠ أيون بوتاسيوم مقابل أيون صوديوم واحد. تتألَّف قناة البوتاسيوم الأيونية KcsA من أربعِ سلاسلَ من الأحماض الأمينية كلٌّ منها من أحد البروتينات التي تشكِّل معقد

البروتين الذي يكوِّن القناة. وكل سلسلةٍ تتألَّف من خمسة أحماضٍ أمينية، يبرُز من كلٍّ منها ذرة أوكسجين لمجموعة الكاربونيل نحو تجويف القناة (شكل ٨-١).

وعليه ينبغي لأيون البوتاسيوم التخلُّص من جُزيئات الماء الثمانية التي ترتبط به وتُغلِّفه؛ كي يمكنه العبور بطابورٍ فرديٍّ يتبادل مع طابور جُزيئات الماء (Vaziri & Plenio, 2010). وتتعرَّض الأيونات إلى تآثر قُوى الجذب مع ذرات القناة وقوى التنافُر ما بين الأيونات (قوى كولومب) (Summhammer *et al.*, 2018; Kuyucak *et al.*, 2001; Bostick & Brooks, 2007).

وحسَب Vaziri & Plenio (2010) فإن التفسيرات التقليدية للانتخابية العالية لهذه القنوات الأيونية غيرُ كافية؛ ما يتطلَّب البحث في الآليات الكمومية لتفسيرها. وبيَّن الباحثان أن النتائج تُظهِر بأن المنظومات التي تخضع بعض مؤشِّراتها لحركيات التماسُك الكمومي، ستكتسب رنينًا في كفاءة نقلها. ومثل هذا الرنين يُفتقد في معادلات النماذج التقليدية الخالصة أو في النظم الكمومية المتعرِّضة لفك التماسُك القوي؛ فوجود التيارات في القنوات الأيونية المسيَّرة دوريًّا، يوفِّر البديل ويؤكِّد وجود التماسُك الكمومي. ونتيجةً لذلك وبوجود التماسك الكمومي تكون الحركيات أكثر حساسيةً بكثير للتغيُّرات البسيطة في مؤشِّرات المنظومة ككتلة الأيون وقُطره. بينما لا يُتوقع أن تؤدي الفروقات البسيطة في قُطر أيونات البوتاسيوم والصوديوم مثلًا، إلى تغيُّراتٍ مهمة في عملية نقل الأيونات في النظم التقليدية الخالصة. أما الباحثون Summhammer *et al.*, (2012) فدَرَسوا تركيب وعمل قناة البوتاسيوم الأيونية KcsA في البكتيريا (شكل ٨-٢) وبيَّنوا أن اهتزاز الأيونات العابرة خلال القناة تفقد جزءًا من طاقتها إلى بعض مكوِّنات البروتين بشكل رنين حيث يفقد الطاقة بدوره إلى البيئة، وبذلك يعمل بروتين القناة كوسيلة تبريدٍ للأيونات، ويُحافظ على تماسُكها الكمومي في درجة الحرارة الفسلجية. كما أن هذه الخاصية تُسهِم في خصوصية القناة؛ حيث إن مرور أيون صوديوم مثلًا في قناة البوتاسيوم لا يُحدث الرنين المناسب؛ وبالتالي لا تعمل القناة إلا مع أيونات البوتاسيوم.

وبين Ganim *et al.*, (2011) بأن التأثيرات الكمومية في انتخابية المرشح يمكن أن تكون سبب الكفاءة العالية في عمل القنوات الأيونية.

ويؤكِّد Salari *et al.*, (2015) على المرشح الانتخابي لقناة البوتاسيوم الأيونية باعتباره جزءًا نانويًّا، ويلعب دورًا مفتاحيًّا في عمل القناة الأيونية. ويضيف بأن نتائجهم عن حالات التراكُب الكمومي لأيونات البوتاسيوم تدُل على أن أزمان فكِّ التماسُك الكمومي

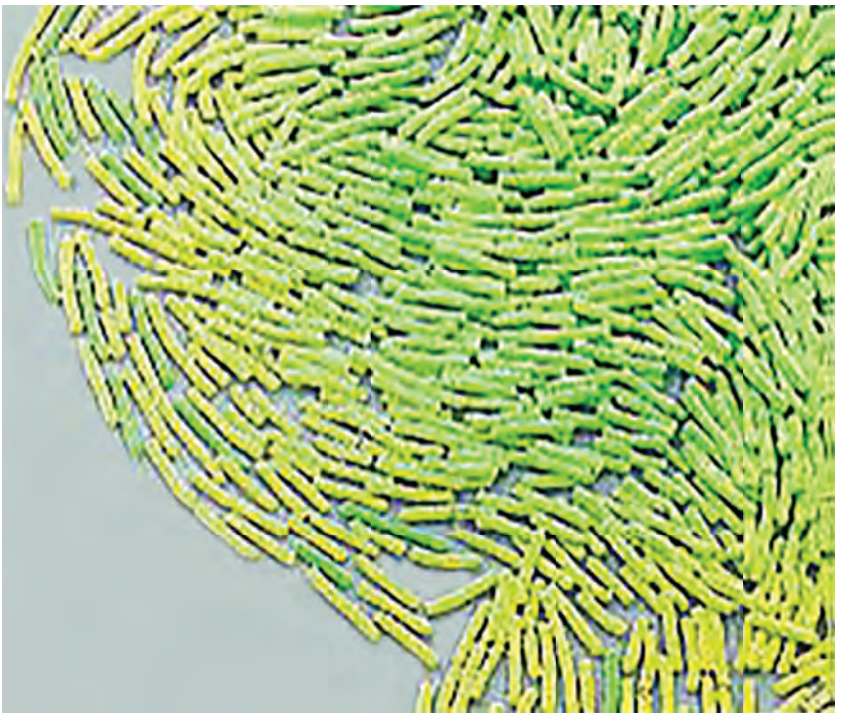
تُقدَّر بالبيكوثانية وهي مناسبةٌ لحصول حالات التراكُب الكمومي للأيونات في مرشح القناة. واستنتَج Summhammer *et al.*, (2020) أن السلوك الكُمومي الانتقالي القصير الزمن للأيونات العابرة لقناة البوتاسيوم الأيونية يمكن أن يوافق معدَّلات النقل السريع والانتخابية الأيونية لبروتينات مُرشِّح القناة.

(٢) الاتصالات الخلوية Cellular Communication

الاتصالات هي عملية تبادُل معلومات (استلام ومعالجة وإرسال) بين منظومتَين أو أكثر بضمنها البيئة. من خواص الخلايا والكائنات الحية القدرة على التحسُّس. ويُعرف هذا النوع من التحسُّس على أنه إمكانيةٌ فسلجيةٌ على استلام المعلومات وتحليلها أو إدراكها اعتمادًا على الذاكرة، وتؤدِّي إلى استجابة أو سلوكٍ مناسب. هذه المعلومات (علامات أو إشارات) يمكن أن تكون ذات طبيعةٍ فيزيائية (ضوء، إشعاع، حرارة، ضغط، جاذبية، مجال كهربائي أو مغناطيسي) أو كيميائية (غازات، مواد غذائية، سموم، هرمونات، وغيرها) من مصادرَ أحيائيةٍ أو غيرِ أحيائية. هذه الظاهرة موجودة في جميع الأحياء الخلَوية بمستوياتِ تعقيدٍ مختلفة. كما تصدُر عن الخلايا والكائنات الحية علاماتٌ وإشاراتٌ مماثلة. هذا هو أساس الاتصالات الحيوية ضمن الخلية وبين الخلايا والأنسجة والأعضاء والكائنات الحية.

تم استعراضُ الاتصالات الحيوية في البكتيريا والفطريات والنباتات من قِبَل Witzany (2010)؛ فالاتصالات الحيوية يمكن أن تكون ضمن الفرد نفسه (داخلية)، بين الأفراد ضمن النوع نفسه أو الأنواع القريبة، بين أفرادٍ تابعين لأنواعٍ غير قريبة أو تلك التي تتبع ممالكَ تصنيفيةً مختلفة.

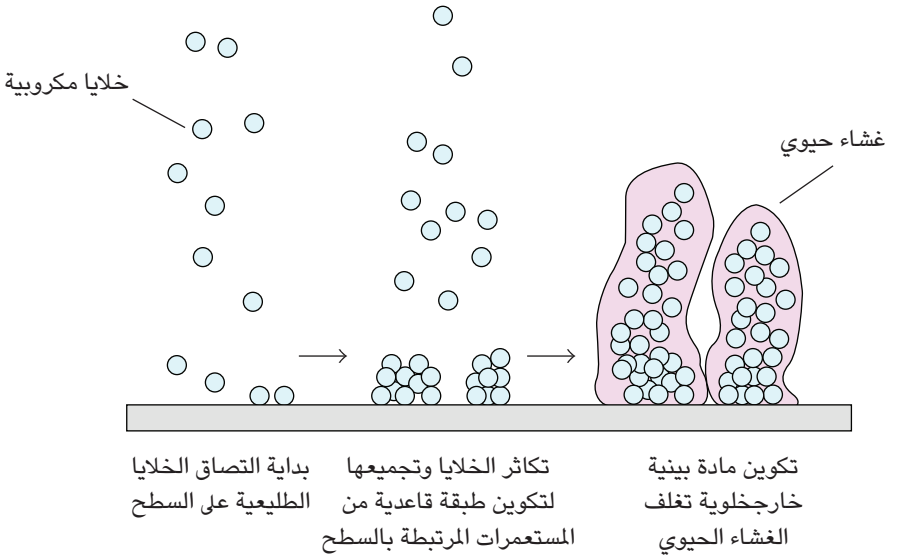
حسَب Conrad (1990) فإن الخلايا الحية لها كفاءةٌ على معالجة المعلومات أعلى من الحواسيب المبرمجة المستخدمة في نمذجتها. وتؤكِّد الدلائل العامة على أن المنظومات التي تعمل فيها الظواهر الكمومية تكونُ أكثرَ قدرةً من مشابهاتها، التي تعمل بحركيات الفيزياء التقليدية. وبيَّن الباحث باستخدام نموذجٍ افتراضيٍّ اشتمل على جُزيئاتٍ ضخمةٍ ذاتية التركيب لتوضيح كيف أن التوازي الذي تعمل به دالة الموجة الكمومية، يمكن أن يلعب دورًا في معالجة الأنماط الخلَوية؛ فالإشارات التي تصطدم بغشاء الخلية الخارجي تقدَح تحرير جُزيئاتٍ ضخمةٍ خصوصية التشكُّل. وهذه تتجمَّع بموزائيك يعكس مجاميعَ مختلفةً من أنماط الإشارات المدخلة. وهذه بدورها تقرأ وتحرِّك جُزيئاتٍ مؤثِّرة. وهكذا



شكل ٨-٣: خلايا البكتيريا Bacillus megaterium في مستعمرةٍ مصوَّرةٍ بالمِجهَر الإلكتروني الماسح. 2000x. عن Science Photo Library/Alamy Stock Photo.

فإن إشارات العالم الكبير (البيئة) تحوَّلَت إلى تمثُّلاتٍ وسطيةٍ ثم مجهريةٍ وتُعالَج مجهريًّا ثم تُكبَّر إلى فعلٍ كبير.

تتألف أجسامُ معظم الأحياء كالكثير من أنواع الطحالب والفطريات الخيطية والنباتات والحيوانات، من أعدادٍ كبيرةٍ من الخلايا المتشابهة أو المختلفة المتجاورة المرتبطة ببعضها. غير أن أجسام بعض المجاميع من الأحياء الأخرى مثل البكتيريا والأركيا والخمائر والحيوانات الابتدائية وبعض أنواع الطحالب تتألف من خلايا مُفرَدة، إلا أنها تعيش في مجموعاتٍ متقاربةٍ أو بشكل مستعمراتٍ من خلايا مزدحمة تتصل فيزيائيًّا ببعضها كما في الخمائر والأركيا والبكتيريا (شكل ٨-٣). كما أن معظم الخمائر والبكتيريا التي تعيش في البيئات السائلة تُشكِّل تراكيبَ مجتمعيةً على السطوح المعرَّضة للسائل تتألَّف من



شكل ٨-٤: رسمٌ تخطيطيٌّ لعملية بناء الغشاء الحيوي. عن: Current Biology.

خلايا متجاورةٍ مكتظةٍ وتُحيط نفسها بموادَّ تعزلها عن البيئة السائلة، وتُعرف بالغشاء الحيوي (Biofilm) (شكل ٨-٤).

يُوفِّر الغشاءُ الحيوي الحمايةَ الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للأحياء الدقيقة؛ حيث لا يسمح بمرور المواد الكيميائية الضارَّة ويُجنِّبها الافتراس. مع الوقت يزداد عدد الخلايا داخل الغشاء الحيوي، ويقوم بتصدير جزء من خلاياه إلى البيئة، وبذلك يعمل كوسيلة للبقاء. إن تكوين الغشاء الحيوي يتطلَّب وجود اتصالاتٍ خلَوية تكون بشكل جُزيئاتٍ إشاريةٍ بين الخلايا المختلفة، وهو ما يُعرف بنظام التحسُّس الجمعي (Quorum Sensing).

والمثير للدهشة فعلًا، ما كشفَته الأبحاث الحديثة لأول مرة عن استخدام الفايروسات البكتيرية phi3T وSPbeta والتي تُصيب البكتيريا العصوية، لنظام التحسُّس الجمعي الذي سُمِّي Arbitrium لغرض دخول هذه الفايروسات في الدورة التحليلية (Lytic cycle) أو الدورة التحلحُلية (Lysogenic cycle) عند إصابة الخلايا البكتيرية (Erez *et al.*, 2017). ونظام التحسُّس الجمعي هنا هو وسيلةُ اتصالٍ جُزيئية ما بين جسيمات الفايروس لغرض تنظيم دورة الحياة (Zhen *et al.*, 2019). تعتمد آلية التخاطُب

المذكورة بين جُسيمات الفايروس البكتيري على ببتيداتٍ صغيرةٍ سداسية الحامض الأميني SAIRGA وGMPRGA لتقرير أي الدورتَين سيتم اعتمادها (Dou *et al.*, 2018).

وتم الكشف عن الأُسس الجُزيئية لنظام التحسُّس الجمعي Arbitrium وآليات عمله في الفايروسات (del Sol *et al.*, 2019; Guan *et al.*, 2019).

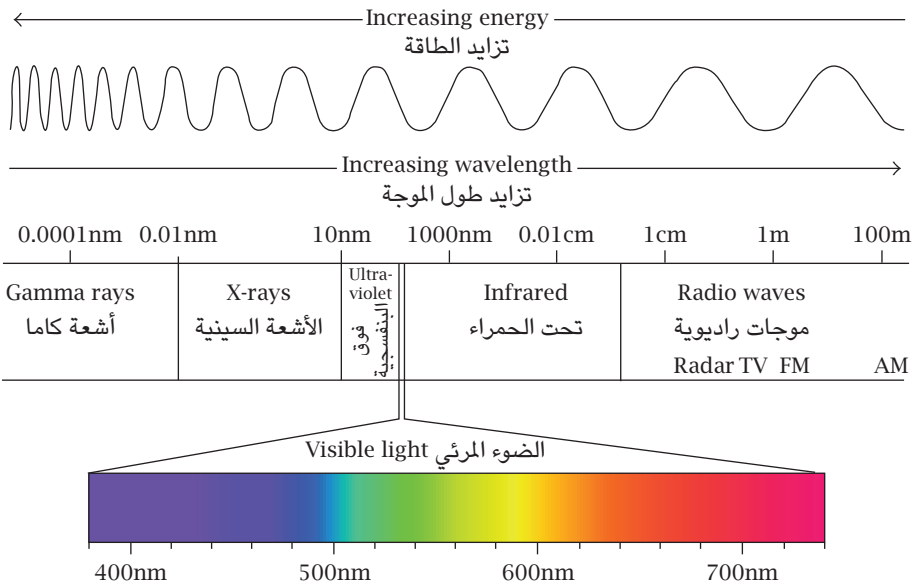
وحسب Sanders (2017) فإن الفيزياء التقليدية وميكانيك الكَم يمكن أن يعملا في الاتصالات الخلَوية. وكل خليةٍ حيةٍ «تُخاطِب» الخلايا الأخرى بدقةٍ فائقة، للحفاظ على التزامُن ووحدة الهدف والحياة. وكما ذكرنا سابقًا فإن الخلايا تتعامل مع العديد من المواد الكيميائية والعوامل الفيزيائية التي تمثِّل اتصالاتٍ حيويةً يمكن تفسيرها على أساس الفيزياء والكيمياء التقليدية، والتي تتم بسُرعٍ تُقاس بالملي ثانية (١/١٠٠٠ من الثانية) أو الثواني. وتضُم الاتصالاتُ الحيويةُ أيضًا إشاراتٍ كهرومغناطيسيةً تتسم بالسرعة والتماسُك، وتُعالَج باستخدام الظواهر الكمومية. إن تبادُل المعلومات ضمن الخلية الواحدة وبينها وبين الخلايا القريبة والبعيدة غاية في التعقيد؛ حيث تتعدَّى ملايين المرات في الثانية الواحدة. هذا يتطلَّب سرعةً فائقةً في الاتصالات تكون بسرعة الضوء كما في الفوتونات الحيوية (Bio-photons) حيث تقطع قُطر الخلية النموذجية خلال ٣٠٠ إلى ٤٠٠ فمتوثانية أو أسرع، وحتى فورية في النقل الآني الكمومي (Quantum teleportation).

حسب Bischof & Giudice (2013) حديثًا يُنظَر إلى السلوك الكلي لمجموعة الذرات والجُزيئات حسَب مفاهيمِ نظرية المجال الكمومي (Quantum Field Theory) التي تفترض أن إمكانية تكوين الحالات الفيزيائية يعتمد على جميع مكوِّنات التشكيل الذي يسير بنَسقٍ معيَّن؛ حيث تتبدَّى المجالات الكهرومغناطيسية المُحتجَزة فيه. وهكذا لا تتصرف المكوِّنات الجُزيئية للكائن الحي كلٌّ لوحده بطريقةٍ منتشرة، وإنما بحركيةٍ كليةٍ تحفظ وحدة الكائن الحي. وحسَب ميكانيك الكَم فإن كل شيء يتقلَّب تلقائيًّا بما فيه المجالات، ودون الحاجة لطاقةٍ خارجية. إن التقلُّبات الكمومية للعديد من الأشياء يمكن أن تتوافق مع أطوارها منتجةً تذبذبًا مشتركًا لكل مكوِّنات النَّسَق. وهكذا تدخُل المنظومة في حالة تماسُك. في هذه الحالة تكون طاقة المنظومة أقل من طاقتها في حالة اللاتماسُك. ذلك يرجع إلى التخلُّص من الحركات غير الضرورية التي تزيد من الإنتروبي وترُكِّز الطاقة على عددٍ أقل من درجات الحرية؛ حيث يمكن استغلال الطاقة لإنجاز شُغل. هذه الخاصية للمنظومة المتماسكة تُلبِّي متطلبات Prigogine للتراكيب المبدِّدة

للطاقة. وتلبيةً للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، يتوجَّب على المنظومة تحرير طاقة إلى الخارج، وهكذا لكي تكون المنظومة متماسكةً يجب أن تكون منظومةً مفتوحةً مبدِّدة للطاقة. المنظومة المتماسكة المكوَّنة من ذراتٍ وجزيئاتٍ سيكون لها مجالٌ بعيد المدى يحفظ تناسُق المكوِّنات، وهذا سيكون جهدَ المجال الكهرومغناطيسي الذي سيُنتِج المجال الكهرومغناطيسي، الذي يلعب دورًا في الاتصالات البيولوجية.

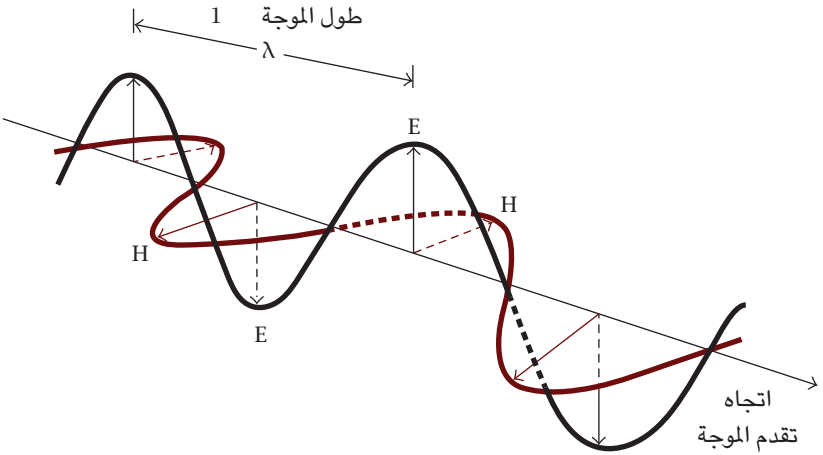
ثمَّة عددٌ من الباحثين يعتقدون بأن تعرُّف خلايا النسيجِ المتشابهة على بعضها، وكذلك تعرُّف الجُزيئات الكبيرة مثل الـ DNA والـ RNA والإنزيم والمادة الأساس والجسم المضاد والمستضد، يتم بواسطة المجال الكهرومغناطيسي.

(٣) الفوتونات الحيوية Bio-photons

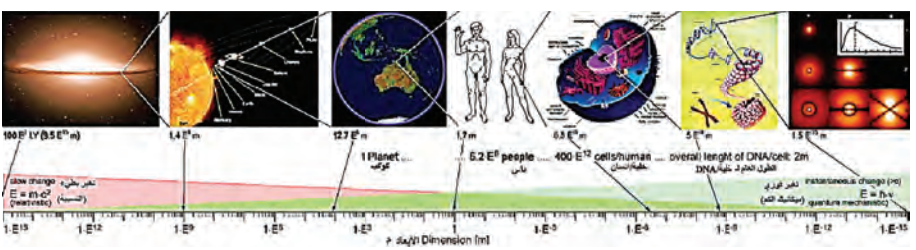


شكل ٨-٥: مخطَّط الطيف الكهرومغناطيسي للضوء.

الضوء هو جزءٌ من الطيف الكهرومغناطيسي، الذي هو قيمةٌ فيزيائيةٌ تحمل طاقة (شكل ٨-٥) ينطلق من المصدر بشكل موجاتٍ ذاتِ خواصَّ كهربائية ومغناطيسية؛



شكل ٨-٦: الطبيعة الموجية للضوء. الاتجاهات الكهربائية (E) والاتجاهات المغناطيسية (H) تتذبذب بزاوية ٩٠° بالنسبة لبعضها. مُحوَّر عن: Hopkins & Hüner (2009).



شكل ٨-٧: الشحنات المتحرِّكة من أبعاد المجرَّات حتى الأبعاد الذرية؛ حيث إن الشحنات على مستوى الأبعاد الفلكية يمكن تصوُّرها بسهولةٍ أكثر (كمثال تعرُّض الأرض الدوَّارة للرياح الشمسية) أو على المستوى الذري (القفزات الكمومية للإلكترونات)، فإن الشحنات المتحركة على المستوى الخلَوي تكون أكثر خصوصية؛ حيث إنها تعتمد أكثَر على توزُّع شحنة الإلكترونات في التراكيب الجُزيئية المتأثِّرة (LY سنة ضوئية = ٩,٥ × ١٠١٥م). مُحوَّر عن: Madl & Egot-Lemaire (2015).

فالأشعة الكهرومغناطيسية تتألَّف من موجتَين متلازمتَين إحداهما كهربائية والأخرى مغناطيسية تتذبذبان عموديًّا على بعضهما وعلى اتجاه الموجة (شكل ٨-٦). للموجة

طولٌ يُرمز له بالحرف اللاتيني لامبدا (λ) ويقاس عادة بالنانومترات إلى الأمتار، وتردُّد يُرمز له بالحرف اللاتيني نو (ν) ويُقاس بالهيرتز/ثانية، (Hz/s) والعلاقة بين التردُّد وطول الموجة هو: $\nu = c/\lambda$؛ حيث إن c هي سرعة الضوء. يتألَّف الضوء من وحداتٍ أو جُسيماتٍ منفصلةٍ تُسمَّى الفوتونات وهي تسلكُ سلوك الجُسيم والموجة. الطاقة التي يحملها الفوتون تُسمَّى الكَم (Quantum) وهي مرتبطةٌ بطول الموجة والتردُّد، وتُقاس بالإلكترون فولت (eV).

كما يتضح من الشكل ٨-٥، فإن الطيف الكهرومغناطيسي يبدأ من الجزء الأعلى طاقةً ويضُم الإشعة المؤينة: أشعة كاما (γ-radiation) بطولٍ موجي من ٠,٠٠٠١ إلى ٠,٠١ن موالأشعة السينية (X-ray) بطولٍ موجي ٠,٠١ إلى ١٠ن م. بعدهما تأتي الأشعة فوق البنفسجية (UV-radiation) بطولٍ موجي ١٠ تقريبًا إلى ٣٩٠ن م، ولها تأثيراتٌ في التفاعلات الكيموضوئية، وتأثيراتٌ بيولوجية؛ كتقطيع الـ DNA وإحداث الطفرات. ثم طيف الضوء المرئي يبدأ من الطول الموجي ٣٩٠ إلى ٧٨٠ن م. ثم الأشعة تحت الحمراء (Infrared radiation) بطول أكثر من ٧٨٠ إلى ١ملم. وعادة تكون بشكل طاقةٍ حرارية. بعدها تبدأ الموجات الصغيرة (Microwaves) بطول من ١ملم إلى ٣٠سم. والتي تُستخدَم لتوليد الحرارة في بعض الأجهزة، وكذلك نقل المعلومات عن طريق الصحون اللاقطة بدون أسلاك. ثم الموجات الراديوية (Radio waves) الأقل طاقة بأطوال موجية من ٣٠سم إلى بضعة كيلومتراتٍ، والتي تُستخدَم في بثِّ إشارات الراديو والتلفزيون والهواتف النقالة.

من المعروف أن أي تذبذُب يتضمَّن شحنات، سيعمل كمولِّد للأشعة الكهرومغناطيسية. هذه الشحنات هي أي شيءٍ يحمل شحنةً بغَض النظر عن حجمه؛ فهو يمكن أن يكون إلكترونًا، بروتونًا، نواةَ ذرة، كوكبًا أو مجرَّة (شكل ٨-٧). كما أن طول الذبذبة يختلف حسب الشيء المتذبذب. إن الذبذبة الدورية للشحنة، ستحثُّ إشارةً متذبذبة في مستقبلٍ ثابت يُعرف بالهوائي (Antenna). في الإلكترونيات، يُصنع المرسل (Transmitter) والمستقبل (Reciever) من دائرة فيها مُتَّسعة (Capacitor) C وحاثٌّ (Inductor) L تكون الشحنة المتذبذبة فيها هي الإلكترونات. وكقاعدةٍ عامة، كلما كان التردُّد عاليًا، كانت أبعاد الدائرة أصغر. في البداية كانت أبعاد المرسل والهوائي كبيرةً والتردُّدات قليلة بمديات الكيلوهرتز، لكن مع تقدُّم التكنولوجيا صَغرَت هذه الأبعاد إلى المستوى الجُزيئي وزادت التردُّدات مع استخدام الهوائيات الكسرية (Fractals)؛ لتُصبِح بالتيرا هرتز (THz) وبطَيفٍ كهرومغناطيسيٍّ أكبر.

إن حثَّ أنماط التذبذُب يحصُل في التراكيب غير الحية، وفي التراكيب الحية أيضًا. يتم ذلك من خلال تمدُّد، انحناء، التفاف واهتزاز الأواصر الجُزيئية. علمًا أن المحيط الجُزيئي والمجالات الكهربائية والمغناطيسية المحلية تُؤثِّر في مستويات الطاقة المُمتصَّة (Madl & Egot-Lemaire, 2015).

(٣-١) مفهوم الرنين وتماسُك الموجات

The concept of resonance and coherence of waves

حسب Madl & Egot-Lemaire (2015)، المتسعة تخزن الطاقة بشكل مجالٍ كهربائيٍّ، وتعتمد على الفولتية المستخدَمة (V) وهي مُكافِئة للطاقة الكامنة. أما الحاثُّ فيخزنُ الطاقة كمجالٍ كهربائي، وتعتمد على التيار (I) المارِّ عَبْر الملَف. وهي مكافئة للطاقة الحركية. وهكذا فإن دائرة الهوائي يجب أن تربط كلتا الخاصيَتين من أجل أن تعمل كوحدة رنين. وهذا يمكن تشبيهه بحركة البندول الذي يتحرَّك بفعل الطاقة الكامنة والطاقة الحركية برنينٍ ذي تردُّدٍ معيَّن. لكنْ ثمَّة عاملٌ آخر مؤثِّر هو عامل Q. هذا العامل يصف هيئة الرنين وهو النسبة بين الطاقة المخزونة ومعدَّل الطاقة المُبددة لكل دورة من الرنين؛ فالقيمة المنخفضة لعامل Q تشير إلى بطء التذبذُب، وفقدان الكثير من طاقة الرنين، وبذلك يؤدِّي إلى خفوت الرنين بسرعة باتجاه الصفر. على العكس، فإن القيمة العالية لـ Q تشير إلى عدم خفوت الرنين مع عدم فقدان الطاقة المخزونة تقريبًا، ويستمر الرنين لفترةٍ طويلة، حتى مع غياب التحفيز الدوري لمنظومة الرنين.

الرنين الجُزيئي يتضمَّن تبديدًا غيرَ مرن يستحثُّ تذبذُبات الأواصر الجُزيئية عالية Q بشكل مَط، انحناء التواء، واهتزاز.

خاصيةٌ مهمةٌ أخرى هي تماسُك الموجات الكهرومغناطيسية، ولكي تتماسك موجتان، ينبغي أن يكونا بالتردُّد نفسه أو طول الموجة نفسه.

ومن الأمثلة الواضحة على ذلك التماسُك في ضوء الليزر (شكل ٢-٤). تماسُك كهذا لا يظهر في الغازات فقط، وإنما في السوائل أيضًا.

يلعب الضوء دورًا أساسيًّا في حياتية الكائنات الحية؛ فهو المصدر الأهم والأوَّلي للطاقة، كما أنه مصدرٌ للمعلومات يعكس طبيعة البيئة، ويؤثِّر في الإيقاعات اليومية (Circadian rythms) والنمو والتشكُّل ونقل المعلومات داخل المنظومات الحية (Hopkins & Hüner, 2009) كما سنرى فيما يأتي.

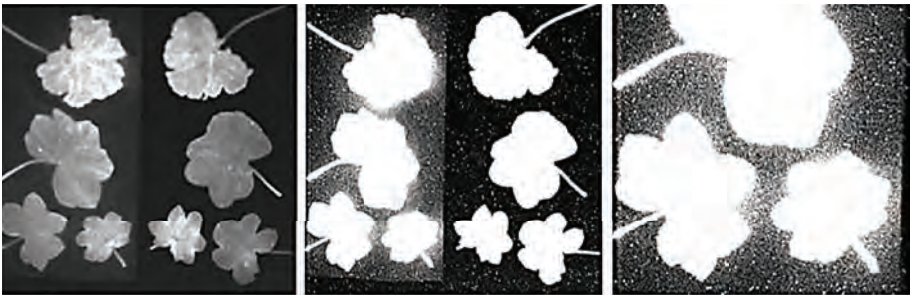
إذن، الفوتونات كمَّاتٌ شبهُ جُسيمية من الأشعة الكهرومغناطيسية تسير بسرعة الضوء ولها عزمٌ وطاقةٌ تتناسب عكسيًّا مع طول الموجة (Phillips, 2003).

حسب Fritz-Albert Popp الذي سَكَّ مصطلح الفوتونات الحيوية أنها فوتوناتٌ ذاتُ مصدرٍ غير حراري في طيف الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية والتي تنبعث من النظم الحية (Sanders, 2017). والفوتونات الحيوية هي ضوءٌ فوقُ الضعيف ينبعث تلقائيًّا من جميع المنظومات الحية (شكل ٨-٨). انبعاث الفوتونات الحيوية يمكن تَحسُّسه من جميع الخلايا الحية تقريبًا (VanWijk, 2001). ويرتبط انبعاثُ هذه الفوتونات بالتكوين الداخلي لحالات تهيج في المنظومة الحية (Van Wijk & Van Wijk, 2005).

من الحقائق المعروفة الشائعة أن الاتصالات بين أجزاء الخلية المختلفة، وبينها والخلايا المحيطة ضمن الكائن الحي تتم بواسطة جُزيئاتٍ كيميائيةٍ إشارية أو جُزيئاتٍ حاملةٍ للمعلومات. لكن ثمَّة معطيات ومعلومات متزايدة عن نقل معلومات بوسائل غير جُزيئية؛ تتمثَّل بالضوء المتماسك كموميًّا والداخلي المصدر والمعروف بالفوتونات الحيوية.

بدأ الاهتمام بهذا الموضوع مبكرًا مع ملاحظة عالِم الأجنَّة والأنسجة الروسي Alexander Gavrilovich Gurwitsch في عشرينيات القرن العشرين، انبعاثَ فوتوناتِ أشعةٍ فوق بنفسجية فوق الضعيفة من نسيجٍ حي. وقد أطلق على انبعاثات الفوتونات هذه «الأشعة المستحثَّة للانقسام الخيطي» حيث إنها تُحفِّز زيادةً في الانقسام الخيطي للخلايا. وبيَّن بالتجربة أن مُعدَّل انقسامِ خلايا طرف الجذر في البصل (وهو نباتٌ نموذجي في دراسات الانقسام الخيطي) تزداد بحوالي ٣٠٪ عند وضعها على مقربةٍ من طرف جذرٍ آخر يشهد انقسامًا نشطًا يفصلهما زجاج الكوارتز (Quartz) الذي يُمرِّر الأشعة فوق البنفسجية بطول ٢٦٠ن م، ولا يحصل تغيُّر في معدل الانقسام عند فصلهما بالزجاج العادي الذي لا يُمرِّر الأشعة فوق البنفسجية. وكان Gurwitsch أوَّل من أدخل مفهوم المجال إلى البيولوجيا سنة ١٩١٢م؛ فقد حاول حل مشكلة التشكُّل المظهري؛ حيث إن التفاعُلات الكيميائية لا تتضمن أنماطًا زمانيةً ومكانية كأولوية؛ لذا نظر إلى مجال التشكُّل المظهري كقانونٍ حركيٍّ فوق خلوي يشمل مستويات التنظيم البيولوجية الثلاثة؛ الجُزيئي والخلَوي والمظهَري (Lipkind, 2006; Tzambazakis, 2015).

واستكمالًا لأبحاث Gurwitsch قام مدير معهد الطب السريري والتجريبي في روسيا الدكتور Vlail Kaznacheyev؛ بآلاف التجارب لما يزيد عن ٢٠ سنة عن هذا



(A) (B) (C)

شكل ٨-٨: (A) صورة لانبعاث الفوتونات الحيوية من أوراق نبات الجيرانيوم بعد ساعتَين من التعريض في ظُلمةٍ تامةٍ داخل حاويةٍ محكمةٍ ضوئيًّا. الأوراق على الجانب الأيسر من الصورة موضوعةٌ على ورقٍ أبيضَ غير مومض، بينما الأوراق التي على اليمين موضوعة على ورقٍ أسود. (B) صورة الفوتونات الحيوية نفسها أُعيد مقياسها ببرنامجٍ لتوضيح المساحات بين الأوراق. (C) تكبير الجزء الأسفل يسارًا في الصورة B. عن: (Creath & Schwartz 2005).

الموضوع، ونشرها في كتاب سنة ١٩٨١م. وأكَّد فيه أن المعلومات الخلَوية يمكن أن تُنقل كهرومغناطيسيًّا إلى الخلايا المستهدفة، التي تمتص الفوتونات من خلايا متضررة؛ فقد قسَّم مزرعةً خلويةً إلى قسمَين وُضِع كلٌّ منهما في أحد وعاءَين متجاورَين ومعزولَين تمامًا عن بعضهما، وعن البيئة، لكنهما مرتبطان ضوئيًّا فقط. عند تعريض الخلايا في أحد النموذجَين لتأثير الأشعة المؤينة وموتها لم تتأثَّر الخلايا غير المعرَّضة للأشعة المؤينة في النموذج الثاني عندما يكون الحاجز بينهما من الزجاج العادي، بينما يموت ٧٠–٨٠٪ منها بعد ١٢ ساعة عندما يكون الحاجز بين النموذجَين من زجاج الكوارتز. وتم ملاحظة استجاباتٍ مماثلةٍ عند تعريض الخلايا للضرر ميكروبيًّا أو كيميائيًّا (Sanders, 2017).

ولُوحِظ امتصاصُ الحيوان القشري *Daphnia magna* للفوتونات الحيوية من الحيوانات القريبة (Galle, 1991). وتمَّت دراسةُ انبعاثاتِ الفوتونات الحيوية في المزارع السائلة لخميرة الخبز *Saccharomyces cerevisiae* ووُجد أن الانبعاث في الطور الأسي من النمو يكون في حزمةٍ عريضةٍ من الأشعة فوق البنفسجية بين ٢٠٠ و٤٢٥ن م، والضوء المرئي بين ٥٢٥ و٧٠٠ن م. أما في طَور الثبات فكان ثمَّة حزمتان ضيقتان تركَّزتا في ٢٥٠ و٦٥٠ن م، وحزمةٌ عريضةٌ امتدت بين ٣٢٥ إلى ٥٢٥ن م. وهذه الانبعاثات أظهَرَت

اتصالاتٍ خلويةً من خلال تأثيرها إيجابيًّا على نمو خلايا الخميرة الأخرى (Musumeci *et al.*, 1999; Quickenden & Que, 1976).

واستعرض Cifra *et al.*, (2010) العديد من الأبحاث التي تُبيِّن تأثير الفوتونات الحيوية بين البكتيريا الباعثة والبكتيريا المستلِمة. وكذلك بذور الفجل *Raphanus savitus* المعامَلَة بأشعة كاما وغير المعامَلَة وانتقال التأثير إلى الأخيرة بواسطة الفوتونات الحيوية. كما قدَّم أمثلةً عن معاملاتٍ شملَت خلايا حيوانيةً وبشرية تعكس نقل التأثير للخلايا المعامَلَة إلى الخلايا المستلِمة للفوتونات الحيوية من الأولى. وشملَت التجارب تأثيراتٍ مماثلةً باستخدام الحشرات أيضًا.

ودرَس Fels (2009) تأثير انبعاث الفوتونات الحيوية على تكاثُر ومعدَّل التغذية للحيوان الابتدائي *Paramecium caudatum* ووجد أنها تعتمد على وجود أو غياب مجاميعَ قريبةٍ وكثافةِ هذه المجاميع ونوعِ العازل المستخدَم بينها، فيما إذا كان زجاجًا عاديًّا أو زجاج كوارتز. وأكَّدَت النتائج بقوة وجود اتصالاتٍ خلويةٍ تعتمد على الفوتونات، ولا تعتمد على الجُزيئات الحاملة للمعلومات.

واستعرض Cifra *et al.*, (2010) تأثير المجال الكهرومغناطيسي للخلايا على أيضِ وحيويةِ وتكاثُرِ الخلايا؛ فقد بيَّنَت بعض الدراسات وجود توافُقٍ واضحٍ بين الوظائف الخلوية وانبعاثات المجال الكهرومغناطيسي الخلَوي؛ فقد لُوحِظ حصول اختلافاتٍ مهمةٍ في المجالات الكهرومغناطيسية لخلايا الخميرة عند تعرضها لسمومٍ مختلفةٍ أو ضررٍ فيزيائي، أو أثناء الانقسام الخيطي (Pohl, 1981). ولُوحِظ حصولُ قمة في الانبعاث الكهرومغناطيسي الخلَوي خلال عملية الانقسام الخلوي بالارتباط مع عملية إعادة تركيب الأُنيبيبات الدقيقة (Microtubules) لتكوين الخيوط المغزلية، وارتباط الكروماتيدات لتكوين الأُنيبيبات الدقيقة للحيِّز الحركي (kinetochore) وكذلك استطالة الخيوط المغزلية أثناء الطَّور الانفصالي. وهذا حسب الباحثين يُرجِّح دورًا حاسمًا للأُنيبيبات الدقيقة في تكوين المجالات الكهرومغناطيسية الخلَوية (Pokorný *et al.*, 2001).

أجرى Marletto *et al.*, (2018) تجاربَ عرَّض فيها بكتيريا الكبريت اللاهوائية للضوء الكمومي باستخدام نموذج Dicke. بيَّنَت النتائج حصول ارتباطٍ قويٍّ بين البكتيريا والضوء عندما يُعامَلان كموميًّا، ما يشير إلى حصول تشابُكٍ كموميٍّ بين البكتيريا باعتبارها ثنائية القطب (Dipoles) والضوء الكمومي باعتباره مذبذبًا توافقيًّا كموميًّا مفردًا (Single quantum harmonic oscillator).

(٣-٢) توليد المجالات الكهرومغناطيسية

Generation of electromagnetic fields

جميع الأشياء الحية وغير الحية تُولِّد مجالاتٍ كهرومغناطيسية بسبب الإثارة الحرارية لجُسيماتها ذات الشحنات الكهربائية. المجالات الكهربائية المتولِّدة حراريًّا تكون عشوائيةً وغيرَ متماسكة. ويبدو أن المجالات الكهرومغناطيسية المتولِّدة من قِبَل المنظومة الحية هي جزءٌ مُكمِّلٌ من المنظومة، وهي جزءٌ من العمليات الهادفة لها. إن المنظومات الحية هي منظوماتُ ديناميكا حرارية مفتوحة، وليست في حالة توازُن، وبذلك فهي تتمكَّن من تخفيض الإنتروبي (زيادة النظام)؛ ولهذا السبب، فإن الطيف الكهرومغناطيسي لها يمكن أن ينحرف عن الطيف الحراري؛ وبناءً على ذلك يكون المجال الكهرومغناطيسي للخلايا متماسكًا كموميًّا يُمكِّن من النقل الكفوء للطاقة والمعلومات من خلال أنماط التداخُل.

الفعاليات المختلفة في الخلية تترافق مع شحناتٍ تتحرَّك في المكوِّنات الخلَوية ويمكن أن تُولِّد مجالًا كهرومغناطيسيًّا؛ فقد افترض Fröhlich (1986a,b; 1969) أن المنظومات البيولوجية تُظهِر تذبذُباتٍ طوليةً متماسكة لتراكيبها المستقطبة كهربائيًّا. وحيث إن هذه التراكيب تحتوي شحناتٍ كهربائية بالضرورة، فبإمكانها تحت ظروفٍ معيَّنةٍ أن تُولِّد مجالًا كهرومغناطيسيًّا عند تذبذُبها. معظم البروتينات في الخلية تنطبق عليها هذه المواصفات. عند توافُر طاقةٍ تتعدَّى مستوًى حرجًا تتذبذب هذه التراكيب لا خطيًّا، وتختزن الطاقة بطريقةٍ عالية التنظيم، وتجعلها تسلكُ سلوك الموصلات الفائقة والموائع الفائقة، حيث تصبح الجُزيئات متماسكة. مصدر الطاقة هنا هو الأيضُ والتذبذبُ اللاخطي للمنظومة ينتج عن مجالٍ قويٍّ من الكهربائية المستقرة. وحيث إن غشاء الخلية يمتلك مجالاتٍ كهربائيةً مستقرةً عالية جدًّا، جعل Fröhlich يعتقد أن غشاء الخلية هو مصدر التذبذُبات وبالتالي مصدر المجالات الكهرومغناطيسية في الخلية، وأثرها في عمليات تنظيم أو تشويه النمو. وبعد اكتشاف الهيكل الخلَوي، توجَّهَت الأنظار نحو الأُنيبيبات الدقيقة باعتبارها تُلبِّي توصيفات Fröhlich كونها تتألَّف من وحدَتَي البروتين تيوبيولين (Tubulin) عالية الاستقطاب الكهربائي وتُشكِّل أنابيبَ طويلة، مجوَّفة بقطرٍ نانوي، تُدار من قِبَل أجسامٍ مركزيةٍ قُرب نواة الخلية. وتتميَّز هذه الأُنيبيبات بالقدرة على توالي النمو (من خلال البلمرة) أو التحلُّل (فك البلمرة). حالة اللااستقرار الديناميكية هذه تُوفِّر مصدرًا ثابتًا للطاقة من خلال تفكُّك وإعادة تركيب وحدات التيوبيولين الغنية

بِجُزيئات GTP الخازنة للطاقة، كما يمكن أن تتغذى بالطاقة المتبدِّدة من الميتاكوندريا؛ فمن المعروف أن كفاءة الميتاكوندريا في إنتاج الطاقة خلال التنفُّس بشكل جُزيئات ATP حوالي ٤٠٪. باقي الطاقة سيتبدَّد بشكل ذبذباتٍ تحت حمراء، إضافةً إلى إشعاعاتٍ تحت حمراء وأشعةٍ ضوئية (Hideg *et al.*, 1991). كما تُمثِّل الميتاكوندريا مصدرًا لمجالاتٍ كهربائيةٍ مستقرة قوية بحدود ٦١٠ فولت/م بسبب تكوُّن تدرُّج أيونات الهيدروجين. هذا المجال الكهربائي يمكن أن يخترق السائل الخلَوي حيث تُوجد الأُنيبيبات الدقيقة. ويضيف Cifra *et al.* (2010) بأنه صار من الواضح أن المنظومات البيولوجية المثارة إلكترونيًّا يمكن أن تُولِّد انبعاثَ فوتوناتٍ فوق الضعيفة في مناطق الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي. ويمكن أن يرجع ذلك إلى تكوين جذور الأوكسجين الفعالة (Reactive Oxygen Species-ROS) والتي تتكوَّن بشكلٍ كبيرٍ في الميتاكوندريا. وافترَض Popp أن الـ DNA في النواة هي المصدر الرئيس للإشعاع المحفِّز أو التلقائي المتماسك كموميًّا بسبب وجود النكليوتيدات والطاقة المنتجة من أيضِ الخلية.

ويُوضِّح Popp (1999) الدور الفعَّال للفوتونات الحيوية داخل الخلية الحية؛ فعلى الرغم من صغر حجم الخلية حيث إن قطرها في الأحياء الحقيقية النواة هو ١٠مكم، فإنها عالية الفعالية الأيضية حيث يحصُل فيها ١٠٠٠٠٠ تفاعُل في الثانية. وفي كل تفاعُل ثمَّة حاجةٌ لطاقة تنشيطٍ تُمكِّن من تحوُّل المادة أو المواد المتفاعلة إلى معقد حالةٍ انتقاليةٍ والذي يتحلَّل في النهاية إلى ناتج. طاقة التنشيط هذه تكون في مدى الموجات الميكروية إلى فوق البنفسجية (شكل ٨-٥). وبعض أو ربما كل التفاعلات الكيموحيوية تحصُل من خلال استغلال فوتون من المحيط الكهرومغناطيسي للخلية. وبعد تنشيط التفاعُل يعود الفوتون إلى حالة التوازُن للمحيط، ويُصبِح جاهزًا للتفاعُل التالي. إن فوتونًا واحدًا يكفي لإنجاز ٩١٠ تفاعلات كيميائية مختلفة في الثانية، كون معدَّل زمن التفاعل هو ١٠-٩/ثانية. وهكذا فإن شدةً واطئةً من الفوتونات قد تكون كافيةً لتسيير جميع التفاعُلات في الخلية في ظل مُسيِّرٍ يتحكم دائمًا بكل المجال وهو ليس مجالًا حراريًّا شواشيًّا. علمًا بأنه يتوفر للخلية وفي أيةٍ لحظة ما لا يقل عن ١٠١٠ إلى ١٠٤٠ من الفوتونات أكثر مما يتوفر منها في ظروف التوازُن الحراري. هذا يُفسِّر سرعة بعض التفاعُلات في الخلية، والتي تفوق كثيرًا تلك التي تحصل في ظروف التوازن الحراري. وهكذا فإن شدَّات الطيف لانبعاث الفوتونات الحيوية يجب أن تُعزى لدرجات حرارة الإثارة (التنشيط)، والتي تفوق كثيرًا درجات الحرارة الفسلجية. وبذلك فإن الفوتونات الحيوية تؤكِّد كون النظم البيولوجية

هي بعيدة جدًّا عن حالة التوازن الحراري. كما أن الفوتونات الحيوية تُوفِّر الطاقة اللازمة لتنشيط كافة التفاعلات الكيموحيوية في الخلية مكانيًّا وزمانيًّا.

وبالنسبة للتماسُك الكمومي لمجال الفوتون ودوره كمُسيِّرٍ عالي الكفاءة يمكن النظر إلى زمن تماسُك وليكن 10^{-9} ثوانٍ. في هذا الزمن تقطع الموجة الكهرومغناطيسية المنبعثة ما يزيد عن ١٠سم. هذه المسافة هي أطول ١٠٠٠٠ مرة من قُطر الخلية. وبذلك من غير الواقعي التفكير بانهيار طَور المعلومات ضمن فضاء الخلية. وفي ضوء هذا التآثُر الكهرومغناطيسي بين الإشعاع (الفوتونات الحيوية) والمادة الكثيفة ضوئيًّا في الخلية، من الصعب استبعادُ تراكُم المجال الكهرومغناطيسي الفائق التماسُك لدرجة أن كل جُزيئة في المنظومة ترتبط بكل جُزيئةٍ أخرى فيها.

ويستعرض Sanders (2017) دور الـ DNA في الاتصالات الخلَوية؛ فهو يعتبر هذه الجُزيئة كبلورة سائلٍ ذاتِ تركيبٍ شبكي، تتمكَّن من خَزنِ وبَثِّ الفوتونات الحيوية ويُمكِن أن تعمل كمجالٍ كمومي. ويبرز أهمية الجزء الأكبر (الإنترونات Introns) من الـ DNA في النقل الكمومي للمعلومات، والذي يُشكِّل ٩٥٪ منها، ولا يشترك في التشفير لبروتينات أو جُزيئات RNA. ويعتبر الـ DNA كرقاقةٍ إلكترونيةٍ بيولوجيةٍ معقدة، والتي تحقِّق الاتصالات داخل الخلية ومع الخلايا الأخرى داخل جسم الكائن الحي.

ويعتبر Sanders (2017) الضوء على أنه الوسيط الأكثر كفاءةً وسرعةً في نقل المعلومات في الطبيعة. كما أن خاصية التماسُك الكمومي للفوتونات الحيوية لها التأثير العميق على قدرتها في نقل المعلومات. من المعلوم أن موجات الضوء لها تردُّداتٌ مختلفةٌ (تصلح لأن تكون شفراتٍ مختلفة)، والتي يمكن أن تقوم بتشفير المعلومات من الـ DNA في الفوتونات الحيوية. وهكذا تُستخدَم الفوتونات الحيوية في استقبال وإرسال ومعالجة المعطيات الكهرومغناطيسية بطريقةٍ ربما تكون مشابهةً لعمل الألياف البصرية، مستشهدًا بالباحث (Popp, 2003).

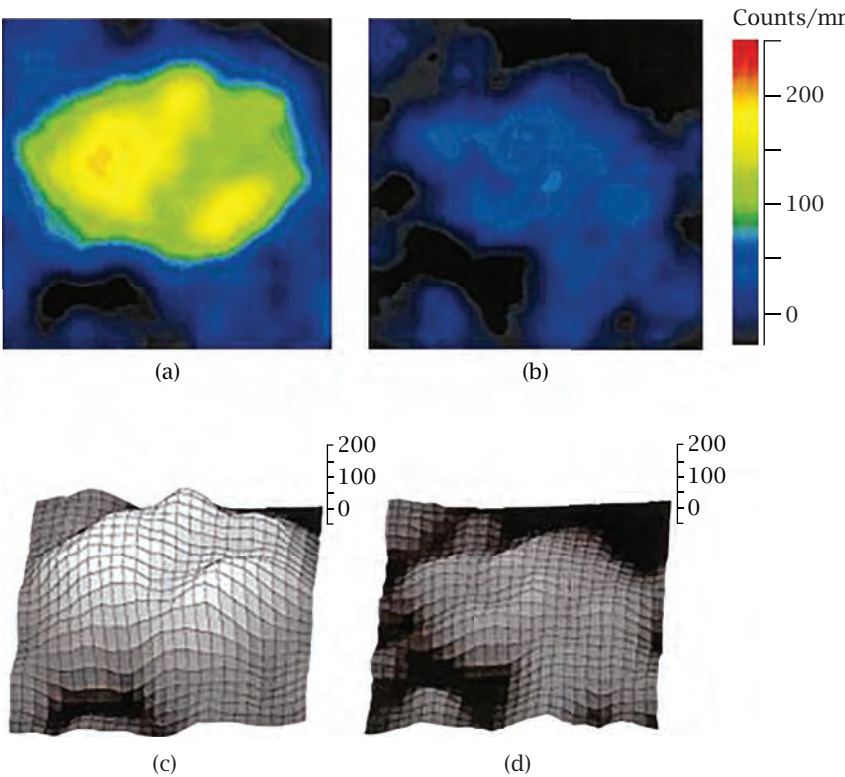
ويذكُر Sanders (2017) مستشهدًا بـ Feldman (2013) أن تضفير ثمانية شعاعاتٍ من الضوء جعلها تتخذ شكلًا لولبيًّا شبيهًا بلولب الـ DNA والذي انطلق في الفضاء. في هكذا شعاعٍ لولبيٍّ يُمكِن إرسال ٢,٦ تيرا بت/ثانية من المعلومات. ومثل هذا الشعاع اللولبي يمكن أن يمسح ويُشفِّر أجزاءً من الـ DNA ويُرسِل معلوماتٍ هائلة، ويُضيف بأن تعريضَ أنابيبِ اختبارٍ تحتوي على DNA إلى ضوءِ ليزر متماسكٍ كموميًّا تلتفُّ

أشعة الليزر حول لولب الـ DNA وكأنها تُقادُ بتركيب جُزيئة الـ DNA (Kaznacejev & Michailova, 1981; Garjajer *et al.*).

اللفافة (Fascia) هي نسيجٌ رابطٌ يُغلِّف جميع أعضاء الجسم، ما يُوفِّر استمراريةً تركيبيةً تُسهِم في تكوين الشكل وأداء الوظائف لكل نسيجٍ وعضو في الجسم. لمنظومة اللفافة وسائلُ اتصالٍ مختلفة تشمل النبضات الكهربائية بالارتباط أو بمعزلٍ عن الجهاز العصبي. كما تمتلك اللفافة وسائل اتصالٍ سائلة من خلال وجود شبكة قنوات بوغان (Bonghan ducts) التي تنقل المعلومات إلى مختلف مناطق الجسم بمعزلٍ عن اللمف والدم. ويستخدم نسيج اللفافة الجزيئاتِ الأيضيةَ في الاتصالات النسيجية. كما تستخدم اللفافة العضلية الضغطَ الميكانيكي من خلال الانبساط والتقلُّص لضبط شكل الخلايا. ولكن تبيَّن مؤخرًا أن نسيج اللفافة يستخدم وسائلَ اتصالٍ أخرى؛ تشمل الصوت الصادر عن انزلاق طبقات اللفافة على بعضها، والضوء الذي ينبعث دوريًّا من قِبَل النسيج وهو بشكل فوتوناتٍ حيوية (Bordoni *et al.*, 2018). وإن آليات الاتصالات الخلَوية تعتمد على الفسلَجة وميكانيك الكَم (Bordoni & Simonelli, 2018).

لقد أكَّد عددٌ من الباحثين تكوُّن وعمل الفوتونات الحيوية في الجهاز العصبي؛ فقد كشف Isojima *et al.*, (1995) وجود الفوتونات الحيوية في شرائح الحصين (Hippocampal) في الفئران؛ حيث تغيَّرَت كثافتها مع النشاط الأيضي للخلايا العصبية. وأظهر Kobayashi *et al.*, (1999) صورًا لانبعاث الفوتونات الحيوية في دماغ الفئران وارتباطها بالحالة الفسلَجية، ونشاط الميتاكوندريا (شكل ٨-٩). كما أكَّد Kataoka *et al.*, (2001) انبعاثَ الفوتوناتِ الحيوية في أنسجة دماغ الفئران وارتباطها بالحالة الفسلجية له. وبيَّن Salari *et al.*, (2016) مسئولية الفوتونات الحيوية عن ضوضاء العتمة في شبكية العيون.

منطلقًا من تصوير انبعاث الفوتونات الحيوية في دماغ الفئران يعتقد Tang & Dai (2014) أن الفوتونات الحيوية يمكن أن تلعب دورًا في نقل المعلومات العصبية، والتي يُمكِن أن تُسهِم في فهم الوظائف العليا في الدماغ؛ كالبصر والتعلُّم والذاكرة والإدراك والوعي. وبيَّن الباحثون الدور المحفِّز للكلوتامات؛ وهي نواقلُ عصبيةٌ رئيسة ولتفاعُلات الأكسدة في الميتاكوندريا. وأكَّد الباحثون أن نشاط الفوتونات الحيوية في الجسم الثفني (Corpus callosum) والمهاد (Thalamus) من الدماغ ينشأ من المحاور ونهاياتها، وأن زيادة الفسفرة لبروتين التيوبيولين تاو يؤدي إلى انخفاضٍ مهمٍّ في نشاط الفوتونات



شكل ٨-٩: (a) صورة لانبعاث الفوتونات الحيوية في دماغ الفأر الطبيعي خارج الجمجمة مقارنة مع (b) حيث الدماغ في حالة انخفاض مستوى الأوكسجين (Ischemia). (c) صورةٌ ثلاثيةُ الأبعاد لـ (a) و (d) صورة ثلاثية الأبعاد لـ (b) عن: Kobayashi *et al.*, (1999).

الحيوية في هذه المناطق. هذه النتائج تُرجِّح نقل الفوتونات خلال المحاور العصبية، والتي يمكن أن تكون وسيلةً جديدةً لنقل المعلومات العصبية.

اقترح Kumar *et al.*, (2016) إمكانية أن يكون للفوتونات الحيوية دورٌ في الاتصالات العصبية كإشارة، إضافةً إلى الإشارات الكهروكيميائية الأخرى. وافترضوا أن يكون غمد المايلين للمحور العصبي هو الناقل للفوتونات الحيوية، والذي يمكِّن من النقل الفائق السرعة للمعلومات العصبية، ويمكِّن من حل معضلة الترابُط العصبي. وأبرز Wang *et al.*, (2016) أهمية استخدام التقنيات الحديثة في كشف الفوتونات الحيوية كجهاز

تَصويرِ الفوتونات الحيوية (UBIS) مع جهازِ تحليلِ طيفِ الفوتونات الحيوية (BSAD) في توضيح دور الكلوتومات في تحفيزِ انبعاثِ الفوتونات الحيوية ونقلها في الدماغ. كما أشاروا إلى الحاجة العالية للطاقة في أنشطة الدماغ في الحيوانات العليا والإنسان باستغلال طاقة الفوتونات الحيوية ذاتِ الطيف الأحمر القريب من الأشعة تحت الحمراء في دماغ الإنسان المترافق مع زيادة الذكاء، والذي يُمكِن أن يُشير إلى اقتصاد الطاقة.

الفصل التاسع

الـ«دي إن إيه» والماء والمجال الكهرومغناطيسي

DNA, Water and Electromagnetic Field

«الطبيعة تُحب الإخفاء.»

هرقليطس

«نحن ننتقل من العصر الذَّري إلى عصر المعلومات.»

Gleiser (2014)

مع أن التأثيرات الكهرومغناطيسية في البيولوجيا بدأَت مع أعمال العالم الروسي Alexander Gurwitsch في عشرينيات القرن العشرين، كما سبق ذِكره، إلا أن تطوُّر التكنولوجيا قاد إلى اكتشافاتٍ مبهرة مع الباحث الفرنسي جاك بنفنيست (Jacques Benveniste) (١٩٣٥–٢٠٠٤م) المتخصِّص اللامع بعلم المناعة في بداية ثمانينيات القرن العشرين، ومدير مختبر المناعة في المعهد الوطني لأبحاث الصحة والطب في فرنسا (INSERM). واشتُهر بتخصُّصه في آليات الحساسيات والالتهابات مع اكتشافه عاملَ تنشيطِ الصفائح الدموية. وباقتراحٍ من أحد الأطباء العاملين معه، بحثوا تأثير بعض المستحضرات الطبية بتخافيفَ عاليةٍ باستخدام اختبار بنفنيست، المعروف باختبار إزالة تحبُّب كُريات الدم القاعدية (Basophil degranulation test). وبعد ٥ سنواتٍ من التجارب، لاحظوا أن التخفيف العالي جدًّا؛ حيث لم تعُد أيةُ جُزيئةٍ من المادة الفعَّالة بيولوجيا موجودةً فيه (ماء نقي) قدَح التأثير البيولوجي لتلك المادة. هذه النتائجُ الغريبة،

حملَت بنفنيست على إعادة التجارب لمدة سنتَين لغرض التأكُّد من صدقيَّتها. بعدها تم نَشْر بحثَين في مجلتَين مرموقتَين عن تأثير التخافيف العالية. بعد ذلك، قام الباحث بالاشتراك مع باحثين في عدة دولٍ بإجراء بحثٍ مماثلٍ باستخدام تخافيفَ عاليةٍ جدًّا من الأجسام المضادَّة مع الرَّج، وتسبَّبَت أيضًا في إزالة تحبُّب الكُريات القاعدية (Belon *et al.*, 2004). لكن مجلة Nature المعروفة نَشرَت البحث (Davenas *et al.*, 1988) بشرط إجراءِ التجربةِ تحت إشرافِ فريقٍ منها، لعدم وجود مادة في المحلول غير الماء تُحدِث التأثير. وبعد نقاشٍ مع هيئة تحرير المجلة، استضاف الباحثَ فريقٌ من المجلة لغرض إجراء التجربة بوجودهم، تم تكرار التجربة لكن في إحداها لم تكن النتائجُ مطابقة، فاعتبَرَت المجلة أن هذه البحوث غير مؤكَّدة. ونُشِر بحثٌ آخر بالاتجاه نفسه (Thomas *et al.*, 1999).

لقد علَّل بنفنيست نتائجه بأن التخفيفَ والرجَّ يؤدي إلى نقل المعلومات البيولوجية بواسطة التنظيم الجُزيئي الذي ينتقل عَبْر الماء، فـ «للماء ذاكرة». وهذا يمكن أن يتحقَّق من خلال اتخاذ الماء لترتيبٍ جُزيئيٍّ معين. ومع أن الظاهرة يمكن أن تعمل مع سوائلَ قريبةٍ من الماء؛ مثل الإيثانول والبروبانول، إلا أنها تفشل باستخدامِ سوائلَ أخرى مثل Dimethylsulphoxide. كما أن التسخين ٧٠–٨٠م° والذوبان بعد التجميد والتعريض للموجات فوق الصوتية يُبطِل تأثيراتِ المحاليلِ العالية التخفيف. وفي تجاربَ أخرى مع باحثين آخرين بيَّن بنفنيست التأثير السلبي للمجال المغناطيسي (٥٠ هيتز، ١٥ × ١٠$^{-٣}$ تيسلا لمدة ١٥ دقيقة) على عمل التخافيف العالية والذي لا يؤثِّر على الموادِّ الأصلية. ومع وجود ملاحظاتٍ عديدةٍ عن حساسية النظم البيولوجية أو الماء للمجالات الكهربائية والكهرومغناطيسية المنخفضة التردُّد وكذلك للدَّور المُحتمل لهذه المجالات في العمليات المعلوماتية والاتصالات الخلوية، افترض بنفنيست أن نقل التأثيرات المُلاحَظة ذو طبيعةٍ كهرومغناطيسيةٍ وأن الجُزيئات تتصل عَبْر الموجات الكهرومغناطيسية (Thomas, 2007). وهكذا أسَّس لما صار يُعرف بالبيولوجيا الرقمية (Digital biology).

الباحث والطبيب الفرنسي لوك مونتانيه Luc Montagnier أُعجِب بابحاثِ بنفنيست وقام بزيارته في مُختَبره الصغير؛ حيث كان لا يتلقى الدعم من المؤسسة الرسمية ويعمل معه الباحث العربي الأصل جمال عيسى. وبعد وفاة بنفنيست سنة ٢٠٠٤م قرَّر مونتانيه المُضيَّ في هذا الخط البحثي مع ما يعتريه من صعوبات، مُعزِّزًا بسمعته العلمية؛ كونه الحائز على جائزة نوبل في الطب سنة ٢٠٠٨م، لاكتشافه فايروس الإيدز في ثمانينيات القرن العشرين، وضم لفريقه البحثي جمال عيسى.

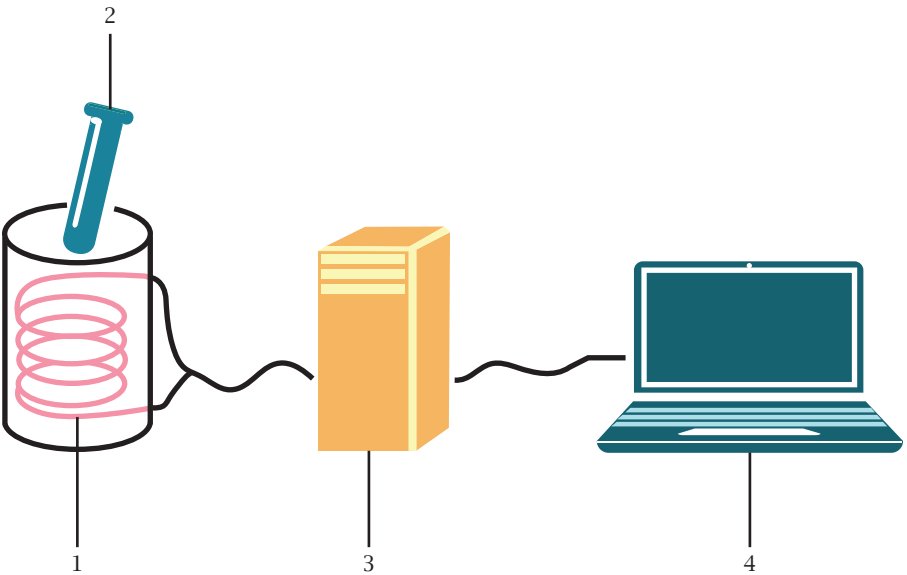
وخلال عمله في الحصول على راشحٍ معقمٍ لمزرعة أحياءٍ مجهريةٍ مرضية، لاحظ أن بعض طرق الترشيح تحت ظروفٍ معينةٍ يمكن أن تعطي في الراشح الكائن الحي المجهري الذي كان موجودًا قبل الترشيح. وهكذا فإن راشح مزرعة الخلايا اللمفية البشرية المصابة بالمايكوبلازما *Mycoplasma pirum* وخلاياها بأبعاد ٣٠٠ن م، ومُرِّر من خلال مُرشِّحاتٍ بكتيريةٍ بفتحات ١٠٠ن م أو ٢٠ن م يُفترَض أن يُعطي راشحًا معقمًا خاليًا من المايكوبلازما. لكن المفاجأة أن إضافة الراشح إلى مزرعةِ خلايا لمفيةٍ بشريةٍ خالية من المايكوبلازما، ظهَرَت المايكوبلازما من جديد خلال حضانتها لمدة ٢ إلى ٣ أسابيع. وبطريقةٍ مشابهة، راشح مزرعة الفايروس HIV والتي قُطر جُسيماتها ١٠٠ إلى ١٢٠ن م، والمار من خلال المرشح بفتحات ٢٠ن م يُفترَض ألا يحتوي على أية جُسَيمة فايروس، لكنه كوَّن الفايروس من جديد. ولاحظ الباحثون أن الراشح وبتراكيزَ مخفَّفةٍ مناسبة، يُنتِج موجاتٍ كهرومغناطيسيةً منخفضة التردُّد بطريقةٍ يُمكِن تَكرارُها.

ويرجِّح الباحثون، أن تلك الموجات تُمثِّل ظاهرة رنين تنتُج عن الإثارة بضوضاء البيئة الكهرومغناطيسية. وترتبط هذه الظاهرة بتكوُّن تراكيبَ بوليمريةٍ نانويةٍ بحجمٍ معيَّن. كما لاحظوا أن راشح الخلايا الحقيقية النواة غير المصابة التي استُخدمَت كشاهدٍ لا تُنتِج هذه الظاهرة. جاء ذلك في البحث الذي نشَره مونتانيه وجماعته Montagnier *et al.*, (2009a). ونظرًا لأهميته وغرابة النتائج المُستحصَلة منه سنُتابِعه بشيءٍ من التفصيل.

(١) رواشحُ مزارعِ المايكوبلازما

استخدَم الباحثون المايكوبلازما *M. pirum* والتي يُمكِن أن تتكاثَر على سطوح الخلايا اللمفية البشرية T وتلتصق عليها بقوةٍ بواسطةِ البروتين Adhesin الذي سبق أن شخَّص وحدَّد تتابُع الجين المسئول عن تشفيره، كما أنها من المايكوبلازما القليلة التي يُمكِن زراعتُها خارج الجسم الحي على وسطٍ زرعيٍّ غني هو SP4.

تم الحصول على سائل المزرعة المصابة بالمايكوبلازما بتركيزٍ معيَّن، ثم مُرِّر الراشح من خلال مرشِّحاتٍ تُعيق مرور المايكوبلازما (١٠٠ن م) وكذلك (٢٠ن م) من أجل الحصول على راشحٍ خالٍ من المايكوبلازما. وللتأكُّد من ذلك تم زراعةُ عيِّناتٍ من الراشح على وسط SP4 وحضانته لبضعةِ أسابيعَ حيث كانت النتيجةُ سالبة. كما تَمَّ متابعةُ وجودِ أية آثار لـ DNA المايكوبلازما باستخدام جهاز PCR وPCR المُعشعش (Nested PCR)

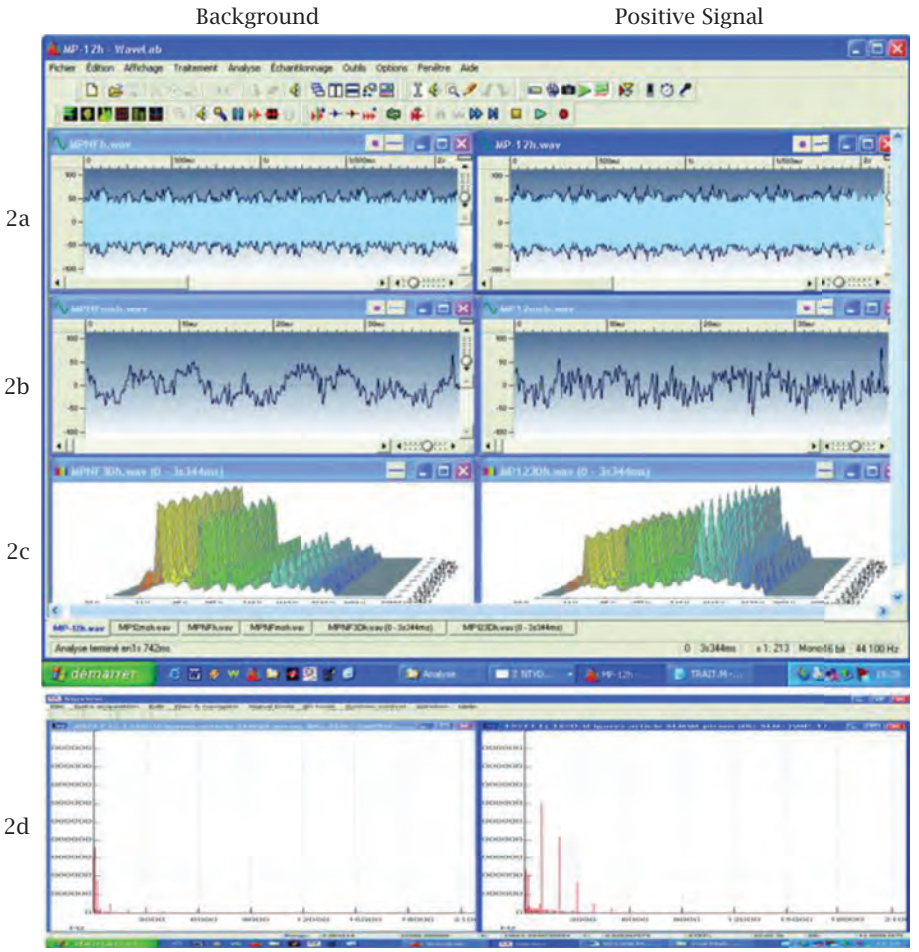


شكل ٩-١: منظومة تحسُّس وتحليل الإشارات الكهرومغناطيسية: (١) ملف سلكٍ نحاسي بمقاومة ٣٠٠ أوم. (٢) انبوب اختبارٍ بلاستيكي بسدَّادة بحجم ١مل. (٣) مُكبِّر صوت (Amplifier). (٤) حاسوب ببرامج. عن: Montagnier *et al.*, (2009a).

وباستخدامِ بوادئ (Primers) لجين Adhesin أو جين 16S الرايبوسومي وكانت النتائج سلبية دائمًا. هذا يعني أن الراشح خالٍ تمامًا من المايكوبلازما ومن DNA المايكوبلازما، أو من أي مصدرٍ آخر. لكن عند حضانة الرواشحِ المارَّة من المرشح ١٠٠ن م لمدة أسبوعَين والراشح من المرشح ٢٠ن م لمدة ٣ أسابيع على الخلايا اللمفية البشرية نوع T، ظهَرَت خلايا المايكوبلازما في الوسط من جديدٍ بكل خواصِّها الأصلية.

تم اختبارُ الرواشحِ بعد عملية الترشيحِ لتكوينِ موجاتٍ كهرومغناطيسيةٍ منخفضة التردُّد، باستخدامِ الجهازِ الموضَّح في الشكل ٩-١ والذي ابتكره Benveniste ويتحسَّس الإشارات التي تصدُر عن الجُزيئات ذات النشاط البيولوجي.

تم إعداد التخفيفات العشرية (١٥–٢٠ تخفيفًا)، وبعد وضع جُزءٍ من التخفيف في الأنبوب البلاستيكي المخصَّص لذلك، يُعرَّض النموذج للرجِّ بقوة في جهازٍ Vortex لمدة ١٥ ثانية. وُجِد أن عملية الرجِّ مهمة جدًّا لغرض تكوين الإشارات. تم تسجيل الإشارات



شكل ٩-٢: كشفُ الإشارات الكهرومغناطيسية من عالق المايكوبلازما *Mycoplasma pirum*: يسار: ضوضاء الخلفية (من عالقٍ غير مخفَّف أو تخافيفَ واطئةٍ سلبية). يمين: إشاراتٌ إيجابيةٌ (من التخفيف العالي D-7 يساوي 10^{-7}). (a) التسجيل (٢ ثانية من ٦ ثواني تسجيل) بعد معاملة WaveLab (Steinberg)؛ (b) تحليلٌ تفصيليٌّ للإشارة (المقياس بالميلي ثانية)؛ (c) تحليل تحويلات Matlab 3D Fourier؛ التردُّدات تُرى بالألوان المختلفة. (d) تحويل Sigview Fourier، لاحظ الهارموني الجديد في مدى ١٠٠٠ إلى ٣٠٠٠ هيرتز. عن: Montagnier *et al.*, (2009a).

ومعالجتها ببرامجَ مختلفةٍ وتحويلات Fourier التي تظهَر على شاشة الحاسوب. في كل تجربةٍ يتم تسجيل الضوضاء الداخلية المتولِّدة عن أجزاء الجهاز المختلفة. أظهر تحليلُ Fourier أن الضوضاء تتألَّف بالأساس من تردُّداتٍ منخفضة جدًّا، تنتُج عن التيار الكهربائي الحقيقي المحيط والبالغ ٥٠ / ٦٠ هيرتز. بطارية الكومبيوتر ١٢ فولتًا ربما تخفض الضوضاء لكنها لا تُلغيها. هذه الضوضاء وُجِد أنها ضرورية لحثِّ تكوينِ إشاراتِ الرنينِ الصادرة من التراكيب النانوية المحددة.

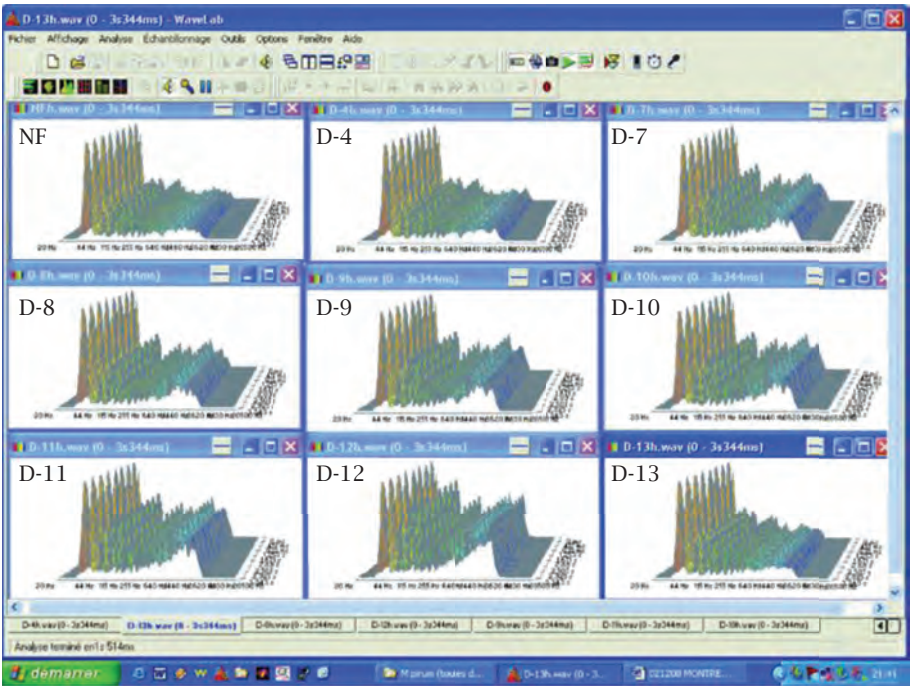
لُوحِظ زيادةٌ في السَّعَة الكلية للإشارات في بعضِ التخافيفِ على الضوضاء العامة (شكل ٩-٢a) وفي التردُّدات (شكل ٩-٢b). هذه التغيرات تختفي لو تم وضعُ الأنبوب قيد الاختبار داخل صندوقٍ مغلَّف بالنحاس والموميتال، حيث يمنع تأثير الموجات الكهرومغناطيسية الواطئة التردُّد. تحليل Fourier لإشارات المايكوبلازما يُظهِر إزاحةً نحو التردُّدات العالية القريبة من ١٠٠٠ هيرتز ومضاعفاته. هذه الهيئة كانت متماثلة في جميع التخفيفات مُظهِرةً زيادةً في السعة (شكل ٩-٢c, 2d).

عالق المايكوبلازما الأصلي غير المُرشِّح لم يُصدِر إشاراتٍ كهرومغناطيسيةً بكل تخافيفه، وهذا حصل مع كل الأحياء الدقيقة الأخرى التي تمَّت دراستها. كما أن التخفيفَين الأوَّلَين للراشح كانا سالبَين أيضًا. الإشارات الإيجابية حصلَت في التخافيف 10^{-5} إلى 10^{-8} أو 10^{-12} (شكل ٩-٣).

(١-١) مع *E. coli* والأنواع الأخرى من البكتيريا

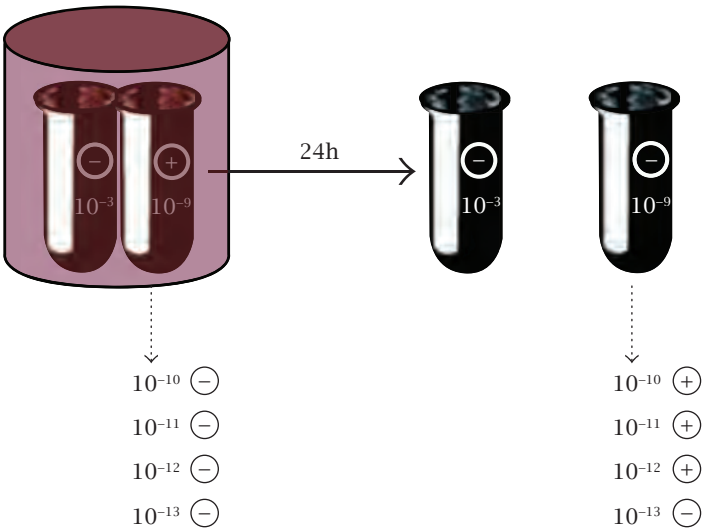
بإجراء التجارب أعلاه مع البكتيريا *E. coli* استُحصلَت النتائجُ نفسُها كما في حالة المايكوبلازما، عدا أن الراشح المارَّ من المُرشِّح ٢٠ن م أعطى نتيجةً سلبية، ما يُشير إلى أن التراكيب النانوية المصاحبة للإشارات لم تمُرَّ من هذا المُرشِّح؛ أي إن هذه التراكيب هي أصغرُ من ١٠٠ن م وأكبرُ من ٢٠ن م.

عند إضافة ٠,١ مل من التخافيف الواطئة (10^{-3} مثلًا) السلبية الإشارة إلى ٠,٩ مل من التخافيف العالية الموجبة الإشارة (10^{-8} مثلًا) جعلَت الأخيرة تفقد الإشارة. ويُفسِّر الباحثون ذلك باختلاف الإشارات وتَشوُّهها. كما يُفسِّر الباحثون عدم ظهور الإشارة في التخافيف الكبيرة جدًّا (أكبر من 10^{-12}) إلى تحوُّل التراكيب النانوية الكثيرة فيها إلى جيل (غروي) يُبطِل الرنين.



شكل ٩-٣: تسجيلٌ نموذجيٌّ للإشارات من التخافيف المائية لمزرعة المايكوبلازما *M. Pirum* (برمجيات Matlab): لاحِظ الإشارات الإيجابية في التخافيف من D-7 إلى D-12. عن: Montagnier *et al.* (2009a).

ووجد الباحثون أن التراكيب المُصدِرة للإشارة يمكن أن تنتقل من أنبوب إلى آخر بواسطة الموجات. تم ذلك من خلال تجاربَ مُتكرِّرة باستخدام البكتيريا *E. coli*؛ فعند وضع أنبوبٍ يحتوي على عالق البكتيريا بتخفيف ١٠$^{-٣}$ (صامت، لا يُصدِر إشارات) جنب أنبوبٍ من راشح المزرعة بتخفيفٍ عالٍ ١٠$^{-٩}$ مُصدِر للإشارات لمدة ٢٤ ساعة في صندوقٍ عازلٍ للموجات الكهرومعناطيسية كما سبق وصفه، وهذا يسمح للموجات الكهرومغناطيسية الصادرة من التراكيب النانوية في الأنبوبَين بالانتقال بينهما، الأنبوب المُصدِر بقي صامتًا والأنبوب المُستلِم أصبح صامتًا أيضًا. لكن بعد إجراء تخفيفات (١٠$^{-١٠}$، ١٠$^{-١١}$، ١٠$^{-١٢}$) من الأنبوب المُستلِم صارت هذه التخفيفات مُصدِرة للإشارة (شكل ٩-٤).



شكل ٩-٤: الاتصالات الإشارية بين راشح (١٠٠ن م) مزرعة البكتيريا (المانحة ١٠⁻٣) مع أيٍّ من التخافيف العالية كلٌّ على انفراد (يسار) كانت كلُّها صامتة، ثم بعد تخفيف الراشح ١٠⁻٩ إلى التخافيف الموضَّحة (يمين) صارت تُصدِر إشارات. عن: Montagnier *et al.*, (2009a).

هذه النتائج حسب الباحثين تُشير إلى أن صمت الأنبوب المُستلِم يحصل نتيجة تكوين مزيدٍ من التراكيب النانوية الجديدة حيث لا تتمكَّن من إصدار الإشارة. وتأكَّد التأثير الموجي من خلال عدم حصول هذه التأثيرات عند وضع حاجز مومنتال يمنع عبور الموجات الكهرومغناطيسية بين الأنبوبتَين المانحة والمُستلِمة خلال فترة التماسِّ (لمدة ٢٤ ساعة).

لقد تم ملاحظة إصدار إشاراتٍ كهرومغناطيسيةٍ مماثلة مع أنواعٍ أخرى من البكتيريا مثل: Streptococcus B، Staphylococcus aureus، Pseudomonas aeroginosa، Proteus mirabilis، Bacillus subtilis، Salmonella وClostridium perfringens، وكلها في نفس المدَيَات من التخافيف التي أُجريَت مع *E. coli* وفقط بعد الترشيح بمُرشِّح ١٠٠ن م وليس ٢٠ن م.

كما تجدُر الإشارة إلى أن تأثير النقل بين أنبوبَين؛ أحدهما صامت والآخر مُرسِل للإشارة، لُوحِظ فقط في حالة أن الأنبوبَين يحتويان على تخفيفاتٍ لنوع البكتيريا نفسه.

فالأنبوب الحاوي على تخفيفِ البكتيريا *P. aeroginosa* مثلًا يؤثِّر في الأنبوب الآخر المحتوي على تخفيف *P. aeroginosa* ولا يؤثِّر على الأنابيب المحتوية على تخفيفاتٍ من الأنواع *E. coli* أو غيرها والعكس صحيح؛ أي إن التأثيرات خصوصية للنوع. لم يكن للأشخاصِ القائمين بالتجربة ولا مكانِ إجراء التجربة، تأثيرٌ على النتائج.

(١-٢) تحديد طبيعة التراكيب النانوية

ولتحديد طبيعة التراكيب النانوية في المحلول، تمَّت معاملة الرواشح بالإنزيم RnaseA المحلِّل لـ RNA والإنزيم Dnase I المحلِّل لـ DNA والإنزيم المحلِّل لجدران الخلايا Lysozyme والإنزيم المحلِّل للبروتينات Protinase K ولم تؤدِّ هذه المعاملات إلى تثبيط إصدار الإشارات الكهرومغناطيسية في التخفيفات العالية، ولا إلى تنشيط التخافيف الصامتة. لكن التسخين في ٧٠م° لمدة ٣٠ دقيقة يثبِّط الفاعلية بشكلٍ لا عكسي، كذلك التجميد في −٢٠م° أو −٦٠م°، بينما لم يكن ثمَّة تأثيرٌ عند المعاملة بـ DMSO (10%) و(10%) Formamide. المعاملة بأيونات الليثيوم المعروف بتأثيره على الأواصر الهيدروجينية بين جُزيئات الماء، خفَّضَت شدة الإشارات بينما استمر مدى التخفيفات الموجبة دون تغيير.

(١-٣) التعامل مع الـ DNA

في تجاربَ أوَّلية، لاحظ الباحثون أن معاملة عالق البكتيريا *E. coli* بمحلول 1% formaldehyde لم يُعطِّل قدرتها على تحفيز إصدار الإشارات الكهرومغناطيسية. علمًا أن هذا المركَّب يقتل خلايا البكتيريا لكنه لا يهاجم الـ DNA. هذا حفَّز الباحثين على الاعتقاد بأن مُصدِر الإشارات يمكن أن يكون الـ DNA.

تم استخلاص الـ DNA من البكتيريا، وتبين أن ترشيحها بواسطة المُرشِّح ١٠٠ن م وليس٢٠ن م والتخفيفات المناسبة كما ذُكر سابقًا، تعطي إشاراتٍ كهرومغناطيسية. الترشيحُ هنا تبيَّن أنه ضروري، علمًا أن المرشِّح ١٠٠ن م يُمرِّر الـ DNA. كما أن معاملة مستخلَصات الـ DNA بالإنزيم Dnase المحلِّل لـ DNA يُبطِل النشاط الإشاري. يعتقد الباحثون أن المُرشِّح ١٠٠ن م في حالة الـ DNA يفكِّك شبكة التراكيب النانوية المنتظمة بهيئةٍ جيليةٍ في حالة التراكيز العالية، بينما يتم نشرها في التخافيف الأخرى المُظهِرة للإشارة.

ظهور الإشارة في التخفيف العالي ١٠⁻¹³ والذي لا يحتوي على جُزيئات DNA بوزنٍ جُزيئيٍّ أكبر من ١٠° يُرجِّح عدم صدور الإشارات من الـ DNA مباشرة، وإنما من التراكيب النانوية التي تتكوَّن تلقائيًّا بتحفيزٍ من الـ DNA. معاملة محلول الـ DNA بالإنزيم EcoRV المُقيِّد لـ DNA البكتيريا *E. coli* والقاطع لها في عدَّة مواقعَ لم يكبح صدور الإشارات الكهرومغناطيسية. هذا يوحي حسب الباحثين إلى أن النشاط الإشاري مرتبطٌ بتتابعاتٍ قصيرةٍ أو نادرة.

يبدو أن هذا النشاط الإشاري تشترك فيه البكتيريا المرضة بينما يُفتقَد في البكتيريا غير المرضة؛ مثل سلالة غير ممرضة من *E. coli* والبكتيريا غير المرضة *Lactobacillus*. وحيث إن البكتيريا المرضة تشترك في خاصية الالتصاق بالخلايا الطلائية بواسطة البروتين Adhesin، تم كلونة الجين الموجود بقطعتَين كلٌّ منهما في أحد بلازميدَين. تم تضخيم البلازميديَن بطُرق التحويل الوراثي وPCR ومن ثَم عزلهما على الأكاروز. اتضح أن محلول أيٍّ منهما يتمكَّن من تحفيز النشاط الإشاري الكهرومغناطيسي.

(٢) رواشح الفايروسات

وفي السياق ذاته ولكن هذه المرة مع فايروس الإيدز، بيَّن Montagnier *et al.*, (2009b) أن تخافيف المحاليل المحتوية على DNA فايروس الإيدز تُصدِر إشاراتٍ كهرومغناطيسيةً بتردُّداتٍ واطئة. مثل تلك الإشارات تَمَّ تحسُّسها داخل الجسم الحي فقط في المرضى الذين سبق أن تمَّت معالجتهم بدواء مضاد للفايروسات القهقرية (Antiretroviral therapy) حيث لا يحتوي دمهم على أية نُسَخ من الـ RNA الفايروسي. ويُفسِّر الباحثون ذلك بأن تلك المعالجة دفعَت الفايروس نحو نمطٍ جديدٍ للتضاعُف يُستخدَم فيه الـ DNA (الذي يتكوَّن مرحليًّا خلال الإصابة، والذي سيُنتِج نسخ RNA فايروسي منها) وبذلك يُكوَّن مخزونٌ لا يتأثَّر بمثبِّطات الفايروسات القهقرية. مع هذا الفايروس، وعلى خلاف ما يحصُل مع البكتيريا، فإن التراكيب النانوية المُصدِرة للإشارات الكهرومغناطيسية تعبُر من خلال المرشِّح ٢٠ن م. كما أن التخافيف الموجبة للإشارة في حالة الفايروس تكون أوطأ؛ حيث تبدأ من ١٠⁻³ إلى ١٠⁻٩. وتشير طبيعة الإشارات إلى أنها أيضًا ظاهرةُ رنين لبوليمرات الماء.

وفي تجربة أخرى، تم اختبار قدرة قطعةٍ من DNA فايروس الإيدز، والتي تم تضخيمها باستخدام جهاز PCR وحُضِّرَت تخفيفاتٌ منها وتم تحسُّس إصدارها للإشارات

الكهرومغناطيسية تحت تأثير الخلفية الكهرومغناطيسية للمحيط. بعد ذلك وُضِع أنبوبٌ يحتوي على أحد التخافيف المُصدِرة للإشارة (١٠-٦ مثلًا) في حاويةٍ معزولةٍ بميوميتال سمك ١ملم، وهو عازلٌ يمتص الموجات الكهرومغناطيسية ذات التردُّد الواطئ جدًّا. وبجوارها تم وَضْع أنبوبٍ آخر يحتوي على ماءٍ نقي وهو مُرشَّح بواسطة مُرشِّحاتٍ ذات مَسَام ٤٥٠ن م و٢٠ن م وبتخافيف ١٠-٢ إلى١٠-١٥ يُحيط بالأنابيب ملفٌّ نُحاسيٌّ يستلم تيارًا كهربائيًّا واطئ الشدة من مُولِّدٍ خارجيٍّ بتردُّد ٧ هيرتز. تَمَّ تشغيل الجهاز المُولِّد للمجال المغناطيسي لمدة ١٨ ساعةً في درجة حرارة الغرفة، كما في الشكل ٩-٥. تَمَّ تسجيلُ الإشارات الكهرومغناطيسية الصادرة من الأنابيب. وتبيَّن صدور مثل هذه الإشارات من الأنابيب المحتوية على الماء تتناسب مع تلك التي تُصدِرها التراكيز المحتوية على الـ DNA الأصلي. هذا يُبيِّن أن الموجات الكهرومغناطيسية بتردُّد ٧ هيرتز أحدثَت اهتزازاتٍ في الماء النقي لتراكيبَ نانويةٍ موجودةٍ أصلًا في الـ DNA. غير أن معاملات المقارنة التالية أبطلَت إصدار الإشارات الكهرومغناطيسية في الأنابيب المحتوية على الماء:

- وقت تعريض الأنابيب لأقل من ١٦–١٨ ساعة.
- عدم وجود الملف.
- وقف تشغيل المولد الكهربائي (لا يوجد مجال مغناطيسي).
- التردُّد المحفِّز لأقل من ٧ هيتز.
- عدم وجود الـ DNA في الأنبوب رقم ١.

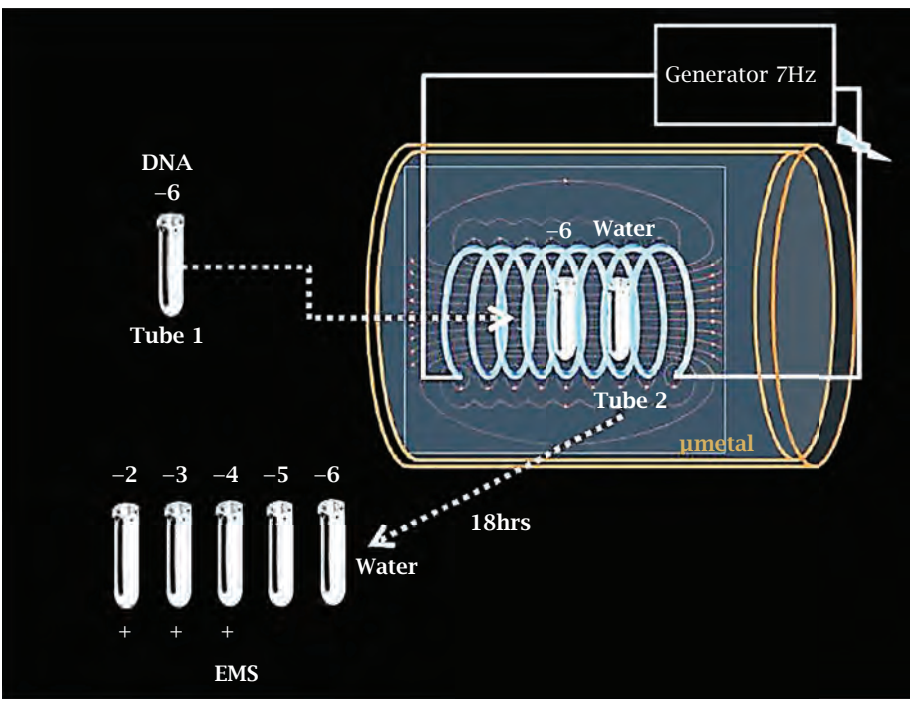
(٢-١) إعادة تكوين الـ DNA

لم يكتفِ الباحثون بهذه النتائج، بل حاولوا معرفةَ ما إذا كانت هذه التراكيب النانوية المستحثَّة في الماء يمكن أن تُعيد تكوين الـ DNA. تم إضافة جميع المكوِّنات المطلوبة لتكوين الـ DNA (القواعد النووية والبوادئ وإنزيم DNApolymerase) إلى الأنبوب المحتوي على الماء المُصدِر للإشارة، وباستخدام PCR (٣٥ دورة). بعدها تم الحصول على حزم الـ DNA باستخدام الترحيل الكهربائي على جيل الأكاروز، وكانت بنفس حجم الحزمة الأصلية لقطعة الـ DNA. ثم بيَّن كشفُ تتابُع القواعد النووية المتولِّدة مطابقةً بنسبة ٩٨٪ لتتابُع قطعة الـ DNA الأصلية. تَمَّ التحقُّق من تكرارية نتائج التجربة من خلال إعادتها لاثنتَي عشرةَ مرة. كما تَمَّ إعادة التجربة باستخدام DNA البكتيريا

Borrelia burgdorferi المسبِّبة لمرض لايم. هذه التجربة تُبيِّن أن التراكيب النانوية للماء ورنينها الكهرومغناطيسي، يمكن أن يحفظ معلومات الـ DNA ويُعزِّز نتائج التجارِب السابقة (Montagnier *et al.*, 2011).

وفي الاتجاه نفسه ولكن بوسائلَ مختلفة، لاحَظ Qing Tanga *et al.*, (2018) أن نقل معلومات الـ DNA تَمَّ من مَصدرٍ ممرضٍ ومَصدرَين غيرِ ممرضَين.

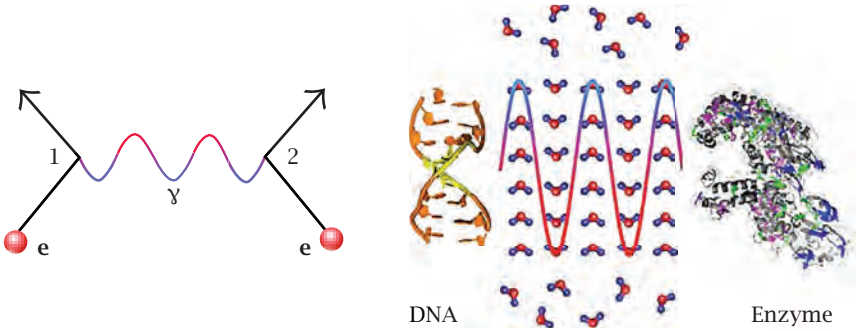
حسب Kim (2013) فإن لكل مادة موجةً مصاحبة. جزء الموجة من المادة يحتوي على المعلومات، ويعمل كما تعمل المادة. وقد أطلق de Broglie وBohm على الخواص الموجية التي تتفاعل مع البيئة الموجة المرشدة، بينما أطلَق عليها Tiller موجة المعلومات كونها تخفِّض الإنتروبي.



شكل ٩–٥: إرسال المعلومات الوراثية في الـ DNA إلى الماء بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية.
عن: Montagnier *et al.*, (2011).

في ورقةٍ بحثيةٍ يُعالِج Montagnier *et al.*, (2015) الجوانب النظرية لنقل الماء لمعلومات الـ DNA بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. ويرى الباحثون استنادًا إلى نظرية المجال الكمومي، فإن ترتيب المكوِّنات الأساسية للمنظومة يتحقَّق نتيجة كسر التناضُر التلقائي والتي تمثِّل التماسُك المُتحقِّق. وهكذا فالنظام ينتُج عن تناسُقٍّ عامٍّ متماسكٍ طويل المدى؛ وعليه فإن خواصَّ منظومة الماء–DNA تؤثِّر لحركياتِ تماسُكٍ كموميٍّ جُزيئي. ويُظهِر التحليلُ النظري (Montagnier *et al.*, 2011) أن الماء يُسلُك كوسطٍ فعَّالٍ من خلال المجالات الكهرومغناطيسية ذات التردُّد المنخفض جدًّا. تآثُرات الأواصر الهيدروجينية وثنائيات القطب (dipole–dipole) المستقرة القصيرة المدى بين جُزيئات الماء تحصُل نتيجة التآثُر الجُزيئي مع المجال الكهرومغناطيسي المعتمد على الزمن وعلى منطقةٍ واسعةٍ تُسمَّى حقل التماسُك (Coherence domain). وفوق عتبةِ كثافةٍ وتحت درجةِ حرارةٍ حرجة، تتآثَر الجُزيئات مع المجال الكهرومغناطيسي منتقلةً إلى نظامٍ حركيٍّ يتصف بحالةٍ طاقيَّةٍ صغرى، حيث تكون تذبذُبات الطَّور للجُزيئات متناسقة. مثل تلك الحالة الطاقيَّة الصغرى، تفرض ترتيبًا للمنظومة حيث تكون جميع الجُزيئات المحصورة ضمن حقل التماسُك، تتذبذب بانسجامٍ مع المجال الكهرومغناطيسي المحصور في حقل التماسُك. إن الحجم الخطي لمجال التماسُك يتحدَّد بطول الموجة λ للمجال الكهرومغناطيسي المحصور (ويكون عادة بمرتبة ١٠٠ن م). إن القوة الخارجية المتناهية الصغر القادحة لهذه الآلية، تجعل مُكوِّنات المنظومة تتفاعل بناءً على حركياتها الداخلية ضمن شروط الكثافة ودرجة الحرارة المشار إليهما.

حسب Giudice *et al.*, (2011)، فإن حقول التماسُك للماء تتمكَّن من خزن كمياتٍ كبيرة من الطاقة والتي تُجمع من البيئة وتُحوَّل إلى طاقةٍ متماسكة؛ فهي تتمكَّن من تحويل n من الكمَّات ذات تردُّد ν إلى كمٍّ واحدٍ بتردُّد n ν؛ ذلك لأن مستويات الإثارة المتماسكة لحقول التماسُك طويلةٌ جدًّا. وبذلك، فإن العديد من الإثارات التي تُحدِثها الضوضاء الخارجية، يمكن أن تتراكم في حقول التماسُك محدثةً إثاراتٍ متماسكةً أعلى فأعلى. يمكن أن تبدأ بضوضاءَ منخفضة التردُّد جدًّا، لتصل فيما بعدُ إلى طاقةِ إثارةٍ عاليةٍ قادرة على الرنين مع إلكترونات الجُزيئات وتنشيطها كيميائيًّا. هذا ما تَمَّ ملاحظتُه في التجارب أعلاه؛ حيث إن الضوضاء الخارجية الواطئة التردُّد كانت أساسيةً في نقل المعلومات من المحاليل المخفَّفة للـ DNA بشكلِ مجالاتٍ كهرومغناطيسية.



شكل ٩-٦: مجالات الموجة كوسيط في الفيزياء تحت الذرية والفيزياء البيولوجية. (A) في نظرية المجال الكمومي، تآثُرات الإلكترون-الإلكترون تتوسَّطها الفوتونات المنتقِلة بين رأس الزاوية ١ ورأس الزاوية ٢. (B) بالمقارنة، الترابط البعيد المدى بين الـ DNA والإنزيمات تتوسَّطها موجات ثنائية القطب (Dipole waves) في الماء البيني. هذا التمثيل تخطيطيٌّ غير مرسومٍ بمقياس ولا يُمثِّل الترتيباتِ الفعلية لجُزيئات الماء. عن: Montagnier *et al.*, (2017).

وعن دَورِ الماء في عملية تضخيم الإنزيم Taq لـ DNA في PCR يرى Montagnier *et al.*, (2017) أن المجال الموجي الذي يتوسَّط الـ DNA-الإنزيم، يُفترَض أن يكون محكومًا بواسطة مجالِ موجةٍ ثنائيِّ القطب المنتقل خلال الماء البيني الذي تنغمر فيه الـ DNA والإنزيمات، كما في الشكل ٩-٦. وكان Capolupo *et al.*, (2016) قد أشاروا إلى أن مثل تلك التوافُقات تنشأ من التآثُرات الكهربائية الثنائية القطب بين تراكيب الحلقات العطرية في الـ DNA والإنزيم التي تتوسَّطها المجالات الكهرومغناطيسية المحفِّزة للتنقُّل بين حالتَين لجُزيئات الماء. وإن حالة الاستقطاب لثنائيات القطب في الماء لا تتلاشى إلا إذا غابت الـ DNA أو الإنزيم أو كلاهما.

بيَّنَت نتائجُ عملياتِ تضخيم الـ DNA بالـ PCR وتآثُرات DNA-الإنزيم عمومًا، أن تكييف توزع الشحنات وتفاعُلات الارتباط والتردُّدات والسَّعة والطَّور تُشكِّل أنماط المجالات، التي تكوِّن الصورة الكهرومغناطيسية لـ DNA بطريقة؛ حيث إن ما «يراه» الإنزيم على مستوى البيولوجيا الجُزيئية كما هي الصورة الكهرومغناطيسية لـ DNA في الماء المحيط. إن الـ DNA والإنزيم «يريان» الصورة الكهرومغناطيسية بعضهما لبعض بواسطة تبادُل كمَّاتِ موجات ثنائية القطب المشعَّة والمحفِّزة بوجودهما في الماء البيني، الذي يعمل في الواقع كجسرٍ بين الاثنَين لحين أن يقتربا أكثر وأكثر، ويرتبطا بإزاحة الماء.

الفصل العاشر

الشَّم وميكانيك الكَم

Olfaction and Quantum Mechanics

جميع الأحياء تتحسَّس الإشارات البيئية التي تكون غير مباشرة؛ مثل الضوء والصوت، أو مباشرة كالروائح والطعم واللمس. لكن تحسُّس الروائح حسب Turin (1997) مثلها مثل تحسُّس الضوء والصوت يكون أيضًا من خلال اهتزاز الطيف.

القدرة على إدراك الروائح موجودةٌ في جميع الأحياء تقريبًا من الأحياء الوحيدة الخلية؛ مثل البكتيريا والأوَّليَّات إلى الحشرات والفِقاريات واللبائن بما فيها الإنسان. كما أن المواد جميعها تقريبًا تمتلكُ رائحةً باستثناءاتٍ قليلةٍ مثل الماء النقي أو الصخور (Grabe & Sachse, 2018).

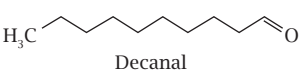
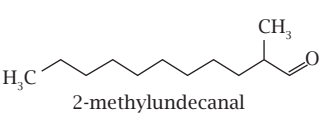
(١) طبيعة المواد العطرية Nature of Odorant Materials

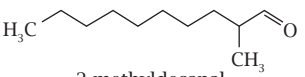
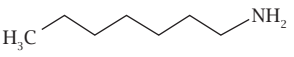
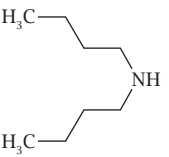
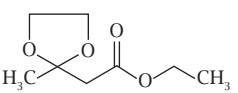
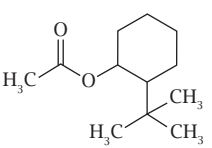
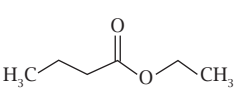
حسب Bushdid *et al.*, (2014) يتمكَّن البشر من التفريق بين بضعة ملايين من الإشارات الضوئية (الألوان) وحوالي نصف مليون إشارة (نغمة) صوتية، بينما تُشير المعلومات المنشورة سابقًا وغير المؤكَّدة تجريبيًّا إلى أن الإنسان يتمكَّن من التفريق بين ١٠٠٠٠ رائحةٍ فقط؛ فالإنسان يتمكَّن من تحسُّس الضوء بالأطوال الموجية بين ٣٩٠ و٧٠٠ن م، والنغمات بتردُّد ٢٠ إلى ٢٠٠٠٠ هيرتز. وتُشير التجارب الفيزيائية النفسية إلى أن قدرة تحسُّس الضوء تتمكَّن من التفريق بين ٢,٣ إلى ٧,٥ مليون لون وتمييز النغمات بحدود ٣٤٠٠٠٠ نغمة. وإن الدراسة التي قام بها الباحثون المُشار إليهم أعلاه وباستخدام

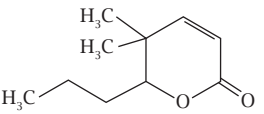
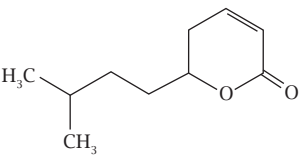
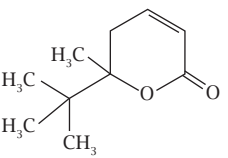
كشوفاتٍ فيزيائية نفسية بيَّنَت أن البشر يمكنهم تمييزُ واحد ترليون محفِّزٍ شمِّي. هذا الرقم أكبر بكثير مما كان معروفًا سابقًا، كما أنه يزيد كثيرًا أيضًا عن الإشارات الضوئية والصوتية التي يمكن تمييزها من قِبَل الإنسان. كما يُبرِز فاعلية مئات المستقبلات الشمية في تحسُّس هذا العدد الهائل من المحفِّزات الشمية. لكن هذا العدد الهائل للإشارات الشمية التي يتمكَّن الإنسان من تمييزها موضعُ انتقادٍ من باحثين آخرين (Gerkin & Castro, 2015; Meister, 2015) حيث يصعُب تقدير العدد الكلي للإشارات الشمية التي يتمكَّن الإنسان من تمييزها. السبب هنا يرجع إلى أن الإشارات الضوئية والسمعية يمكن تحديدها اعتمادًا على طول الموجة والشدة (الضوء) أو التردُّدات (الصوت) بينما الإشارة الشمية تقع ضمن طيفٍ من عددٍ هائلٍ من المحفِّزات (Grabe & Sachse, 2018).

القدرة على تحسُّس المركَّبات العضوية الطيارة موجودة في جميع الحيوانات من الأحادية الخلية إلى اللبائن. لهذه الظاهرة أهميةٌ كبيرةٌ في القدرة على البقاء والتكاثُر؛ فالعثور على الغذاء والابتعاد عن الخطر والتعرُّف على أفراد النوع والتزاوُج بعضٌ من المواضيع المرتبطة بتحسُّس الروائح. البعوض يعثُر على الحيوان اللبون من خلال تتبُّع غاز ثاني أوكسيد الكاربون، بينما تتحسَّس المفترساتُ الشائعةُ رائحة الدم من على بعد كيلومترات (Genva *et al.*, 2019). تعرُّف المواليد على أمهاتهم يمكن أن يتم من خلال رائحة فرمون يُفرَز من قِبل الأم (Vaglio, 2009).

جدول ١٠-١: أمثلة لموادَّ ذاتِ روائحَ مختلفة ومجاميعَ فعالةٍ مشتركة. مُحوَّر عن: Genva *et al.*, (2019) مستشهدًا بـ (Nara *et al.*, 2011)

المجموعة الفعَّالة	نوع الرائحة والمركَّب المسئول عنها	
	ليمونية	
Aldehydes	 Decanal	حلوة، ألديهايدية، شمعية، قشرة البرتقال، ليمونية، زهرية
	 2-methylundecanal	منعشة، عنبرية، ألديهايدية، طحلبية، ليمونية، مسك رومي

المجموعة الفعَّالة	نوع الرائحة والمركَّب المسئول عنها	
	 2-methyldecanal	منعشة، جافة، ليمونية، شمعية، مائية
	سمكية	
Amines	 Heptan-1-amine	سمكية، شبه أمينية
	 N-butylbutan-1-amine	أمونية، سمكية، نتنة
	فاكهي	
Esters	 Ethyl (2-methyl-1,3-dioxolan-2-yl)acetate	حبق، فاكهية، خضرواتي، استوائي، برقوقي، خشبي
	 2-tert-butylcyclohexyl acetate	فاكهية، خشبية، خضرواتية، تفاحية، عشبية
	 Ethyl butanoate	حبقة، فاكهية، توتي فروتي، تفاحية

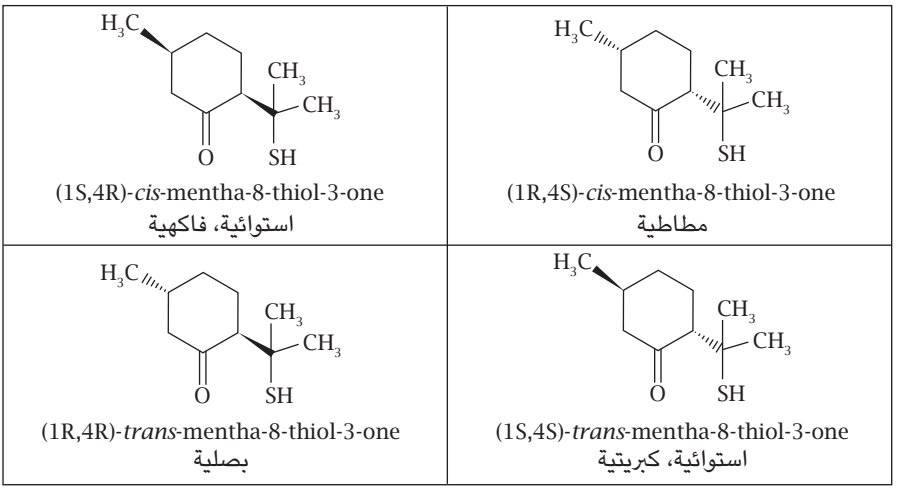
نعناعي		4,4-dimethyl-2-octeno-δ-lactone
زبداني		8-methyl-2-noneno-δ-lactone
تربيني كافوري		5,6,6-trimethyl-2-hepteno-δ-lactone

شكل ١٠-١: أمثلة بموادَّ ذاتِ مجاميعَ فعالةٍ مشتركة لكن ذات روائحَ مختلفة. مُحوَّر عن: Genva *et al.* (2019) مستشهدًا بـ (Dufossé *et al.*, 1994).

حسب Richard Axel وLinda B. Buck الحائزَين على جائزة نوبل في الطب والفسلَجة سنة ٢٠٠٤م، أن الرائحة هي محفِّزٌ كيميائي، يتألَّف من جُزيئات عطرٍ واحد أو مزيجٍ من العطور ويُحدِث استجابةً فسلَجية. عملية الاستجابة للعطر، والذي يكون بشكل مركَّباتٍ طيارة بتراكيزَ قليلة، تتمُّ في الحيوانات والإنسان من خلال حاسَّة الشم. الرائحة يمكن أن تكون محبَّبة، عطرة أو كريهة، خفيفة أو نفَّاذة، وفي الحالتَين يمكن أن تُستخدَم من قِبل الأحياء لأغراضٍ مختلفة.

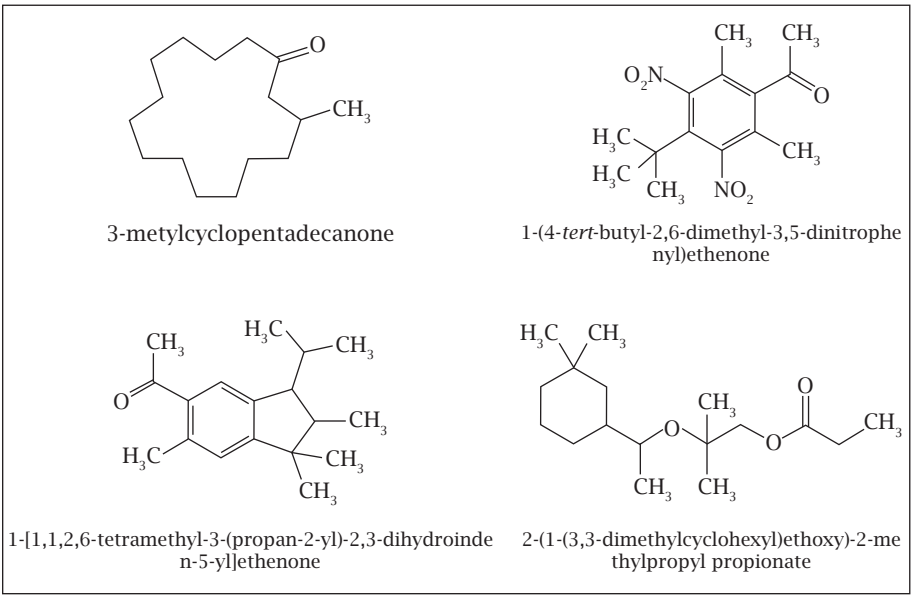
الروائح لا تقتصر على المواد العضوية فقط؛ حيث إن بعض المواد اللاعضوية تُصدِر روائحَ مختلفة؛ فللأوزون (O_3) رائحةٌ حادَّةٌ لاذعة، ولغاز الكلور (Cl_2) رائحةٌ حادَّة، والأمونيا (NH_3) تُصدِر رائحةً سمكيةً مخدشة، ولغاز كبريتيد الهيدروجين رائحةُ البيض الفاسد (Turin, 1997; Genva *et al.*, 2019).

أما المواد العضوية المحتوية على عُنصرَي الكاربون والهيدروجين فتُشكِّل مجموعةً كبيرةً ذاتَ أوزانٍ جُزيئيةٍ منخفضة (أقل من ٣٠٠ دالتون) وضغطِ بخارٍ عالٍ (مساوٍ أو أكبر من ٠,٠١ كيلو باسكال في ٢٠م°) وعاليةٍ إلى معتدلةِ الكراهية للماء.

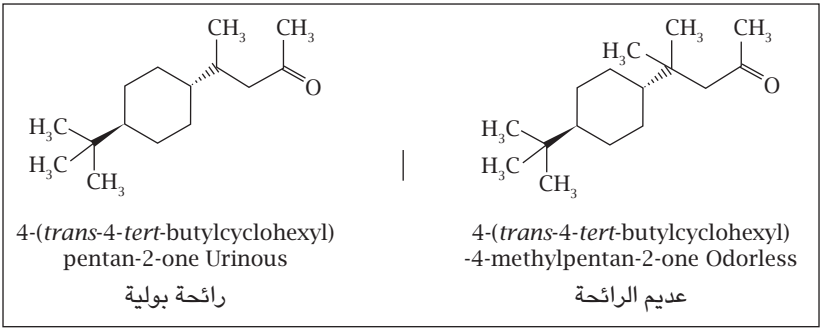


شكل ١٠-٢: مركَّباتٌ بأشكالٍ آيزوميريةٍ مرآتية وذات روائحَ مختلفة. مُحوَّر عن: Genva *et al.*, (2019) مُستشهدًا بـ (Brookes *et al.*, 2009؛ Meierhenrich *et al.*, 2005).

من المعلوم أن حاسَّة الشم البشرية تتمكَّن من تحسُّسِ وتمييزِ المجاميع الفعَّالة في المركَّبات، مقارنةً بغيرها؛ فالمركَّبات التي تحتوي جزيئاتُها على مجموعة الثيول (SH-) تكون ذات رائحةٍ كبريتية، والتي تحتوي على مجموعة الأوكسين (NOH-) تكون برائحة الكافور الأخضر، بينما التي تحتوي على مجموعة النيترو (NO_2-) تكون برائحةٍ إيثرية (Genva *et al.*, 2019). ويبدو أن المركَّبات المحتوية على المجموعة الفعَّالة نفسها تكون ذات رائحةٍ متشابهة؛ فالمركبات الإسترية (Esters) لها رائحةٌ فاكهيةٌ وزهرية واللاكتونات (Lactones) تُظهِر رائحة جوز الهند أو المشمش، والأمينات (Amines) تُعطِي رائحة الشِّواء، والثيولات (Thiols) لها رائحةٌ عفنةٌ أو ثومية. كما تعطي الأحماض الدهنية الطيَّارة رائحةً حامضة أو زنخةً، والألديهيدات (Aldehydes) تُصدِر رائحةً نباتيةً كأوراق الحشائش. في الجدول ١٠-١ عرض لبعض المجاميع الفعَّالة والروائح المصاحبة لها. لكن الاعتماد على المجاميع الفعَّالة في تحديد نوع الرائحة لا يصحُّ إلا على عددٍ قليلٍ من المواد؛ فبعض المواد تحتوي على المجاميع الفعَّالة نفسها، لكنها تُصدِر روائحَ مختلفة (شكل ١٠-١)؛ فمركَّبات اللاكتون 4,4-dimethyl-2-octeno-δ-lactone و8-methyl-2-noneno-δ-lactone و5,6,6-trimethyl-2-hepteno-δ-lactone لها تركيبٌ متقاربٌ جدًّا، إلا أنها تُصدِر روائحَ متمايزةً تمامًا. كذلك المركَّبات



شكل ١٠-٣: مركَّباتٌ ذات تراكيبَ مختلفة وروائحَ متشابهة (المسك). مُحوَّر عن: Genva *et al.*, (2019) مستشهدًا بـ (Boelens & van Gemert, 1993؛ Sell, 2006).

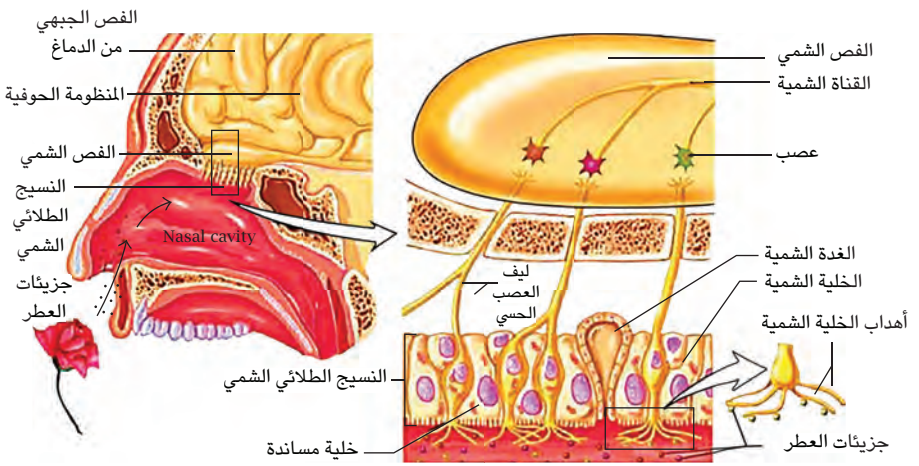


شكل ١٠-٤: مثال لتغيُّر الرائحة لمركَّب مع تغيُّر تحويرٍ طفيفٍ لتركيبه. مُحوَّر عن: Genva *et al.*, (2019).

المُصاغَة مرآتيًّا (Enantiomeres) والتي هي تركيبيًّا شديدة التقارُب فإن معظمها تكون مختلفةَ الروائح (شكل ١٠-٢). وتُوجد مركَّباتٌ مختلفةٌ تركيبيًّا، إلا أن لها رائحةً متشابهة (شكل ١٠-٣). ويمكن أن يؤدي تغييرٌ طفيفٌ في التركيب الكيميائي للمركَّب، إلى تغييرٍ كبيرٍ في نوع الرائحة، وكذلك في شدَّتها (شكل ١٠-٤) (Genva *et al.*, 2019).

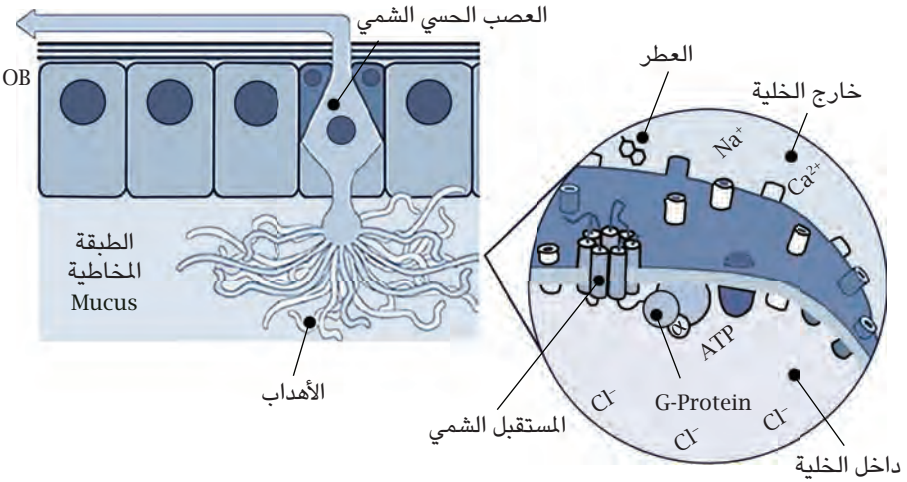
(٢) تركيب ووظيفة المنظومة الشمِّية

Structure and function of Olfactory System



شكل ١٠-٥: موقع (يسار) وتشريح منظومة الشم في الإنسان (يمين). مُحوَّر عن: (Cigoj, 2013).

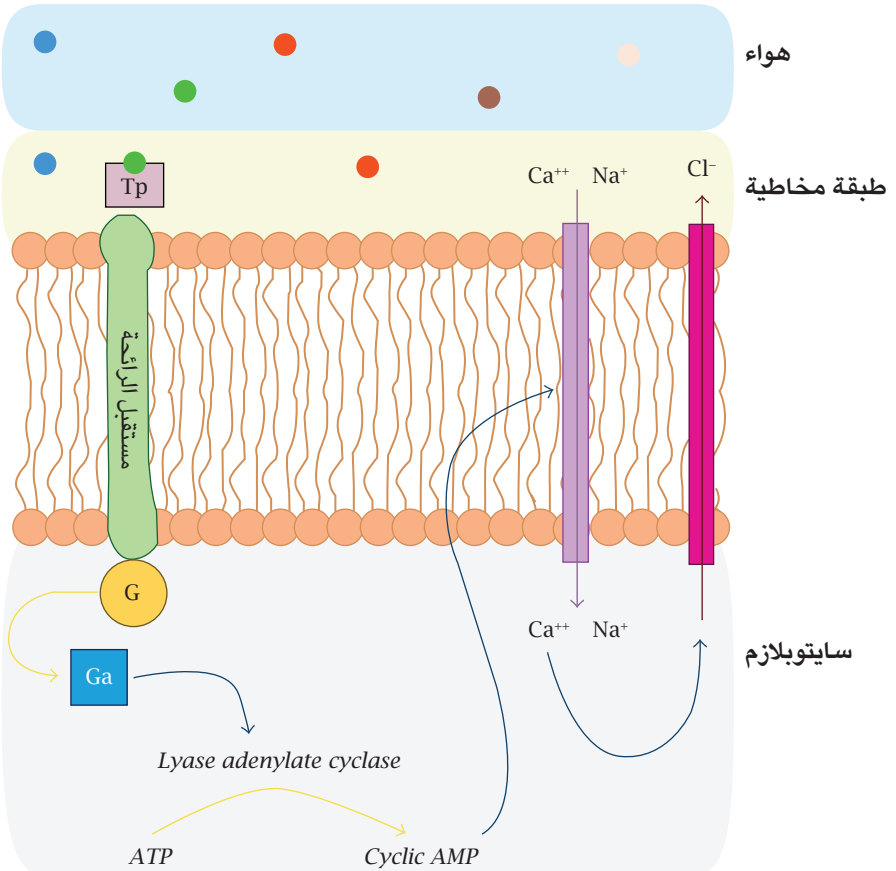
الجزء الحسِّي من المنظومة الشمِّية في الإنسان يقع في سقف التجويف الأنفي، بمساحة ٣سم^{٢} على كل جانب وحوالي ٧سم. فوق وخلف المنخرَين. النسيج الطلائي الشمي يضم خلايا مساندة، وخلايا جذعيةً قاعدية، وغدةً شمية، وخلايا شمِّية هي خلايا عصبية (Neurons) شمِّية ذات أهداب (Cilia). عدد الخلايا العصبية بحدود ٥٠ مليون خلية، وكل خلية تحتوي على ٥–٤٠ هدبًا. الأهداب تَحتضِن المُستقبِلات الشمِّية وهي المسئولة عن تحسُّس الرائحة. وتنفصل الأهداب عن التجويف الشمِّي بطبقةٍ مخاطيةٍ بسُمك ١٠–٤٠مكم. والتي يتوجَّب مرور جُزيئات الرائحة من خلالها للوصول إلى المستقبلات



شكل ١٠-٦: النسيج الطلائي الشمِّي حيث تتصل جُزيئات الرائحة مع الجهاز العصبي المركزي. المستقبِلات الشمِّية تمثِّل البوَّابين الذين يقدحون الإشارة. هذه المستقبِلات تتواجد في السطح البَيْني للأهداب الشمِّية التي تسيطر إمكانية جُزيئات الرائحة في أن تبدأ أولًا عملية نقل الإشارة، التي تؤدي إلى إزالة استقطاب نيرون الشم. الإشارة الكهربائية المتولِّدة ستُنقل إلى الفص الشمِّي. محوَّرة عن: (Brookes, 2010).

الشمِّية. الخلايا الجذعية القاعدية تستبدل الخلايا العصبية كل ٣٠–٤٥ يومًا (Cigoj, 2013) (شكل ١٠-٥).

الأنف منظومةٌ حسيةٌ كيميائية، تهدف إلى تشخيص روائح المواد. الروائح جزيئاتٌ صغيرةٌ غيرُ متفاعلة تصدُر عن المواد بشكل غازٍ عن طريق التبخُّر أو التطايُر. هذه الجُزيئات تدخُل المنظومة الشمِّية عن طريق المنخرَين أو من خلف الحنجرة، خلال تناوُل الطعام، لتصل إلى التجويف الشمي. يقوم الأخير بترشيح وتدفئة الهواء الذي يحتوي على جزيئات الرائحة بواسطة الطبقة المخاطية. تقوم الخلايا الطلائية الشمِّية بتشخيص الرائحة التي تُرسَل بواسطة العصب الشمِّي والفص الشمِّي إلى الدماغ؛ حيث تتم معالجتها وإدراكها. تصطدم جُزيئات الرائحة بواحد من عشرات آلاف الأهداب البارزة من الخلايا العصبية الشمية وتدخُل في أحد المُستقبِلات التي هي ٣٤٧ نوعًا، والتي تقع على غشاء الخلية. هذه المُستقبِلات تضبط حسب نوع الرائحة وبمساعدة الغِشاء.



شكل ١٠-٧: مسلسل التفاعُلات التي تحصُل مع دخول الجُزيئات العطرية إلى التجويف الأنفي. الجُزيئات تعبُر من خلال الطبقة المخاطية مباشرةً أو بواسطة بروتينٍ ناقل (Tp) وتصل إلى المُستقبِل الذي يُعاني تحوُّرًا تركيبيًّا وينشط بروتين G. تتحرَّر وحدة (Ga) وتُنشِّط الإنزيم lyase adenylate cyclase الذي يُحوِّل جزيئة ATP إلى cAMP التي تفتح القنوات الأيونية لتسمح لأيونات Ca^{2+} وNa^{+} بدخول الخلية، والتي تؤدي إلى إزالة استقطاب العصَب المُستقبِل لجُزيئة العِطر ونقل الإشارة إلى الدماغ. مُحوَّر عن: (Genva *et al.*, 2019).

لكل مُستقبِلٍ سبعة لوالبَ تخترق الغشاء، وهنا يتم بداية التآثُر بين البيئة الخارجية والجهاز العصبي (شكل ١٠-٦). عملية التعرف على الرائحة تبدأ بجزيئاتها التي تمثِّل

الإشارة الأُولى التي تجعل المُستقبِلات المرتبطة ببروتينات G (G-protein-coupled receptors) تُحرِّر وحد بروتين Ga التي تُبدي الإشارة الثانية التي تسبِّب تدفُّق أيونات Ca^{2+} وأيونات Na^{+} إلى داخل الخلية. تدفُّق أيونات الكالسيوم يؤدي بأيونات الكلور إلى التدفُّق، وهذه تسبِّب تشغيل العصب الحسِّي الشمِّي (شكل ١٠-٧). وهكذا تتحول إشارة الرائحة إلى إشارةٍ كهربائيةٍ تصل الدماغ لتفسيرها. هنا تلعب المُستقبِلات وبوَّاباتها دَور المقرر في بثِّ الإشارة أو لا (تحسُّس الرائحة أو لا) (Brookes, 2010).

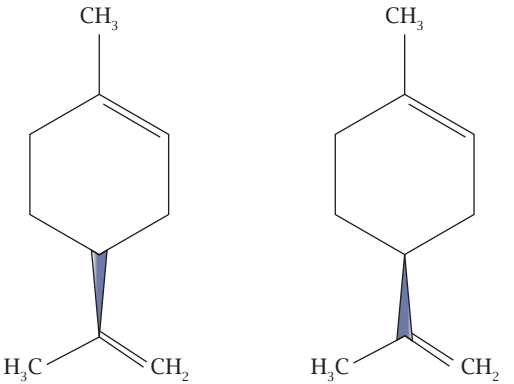
(٣) نظرياتُ الشَّم Olfaction Theories

(٣-١) نظرية القفل والمفتاح Lock and Key Theory

النظرية الأقدم التي ترجع فكرتها إلى أرسطو (٣٥٠ سنة ق. م) وطُوِّرَت من قِبل Amoore سنة ١٩٦٣م، هي نظرية القفل والمفتاح أو الكيمياء الفراغية (Stereochemical theory). هذه النظرية تفترض وجودَ توافُق أو تكامُل في الهيئة الفراغية بين جُزيئة المادة العطرية، ومُستقبِل الحاسة الشمِّية من أجل تحقيق الاتصال بينهما واستكمال عملية الشم. ومثل هذه النظرية كانت سائدةً أيضًا لتفسير عمل الإنزيمات حيث التوافُق بين المادة الأساس والمركز الفعَّال للإنزيم. ومع وجود بعض الأمثلة التي تُناسِب هذه النظرية، إلا أن تزايُد أعداد المواد العطرية التي لا تُفسِّرها قاد إلى البحث عن تفسيراتٍ أخرى؛ فهناك مَوادُّ بالأشكال الجُزيئية نفسها تُظهِر روائحَ مختلفةً وهناك مَوادُّ بأشكالٍ جزيئيةٍ مختلفة وتُظهِر روائحَ متشابهةً (شكل ٩-١ و٩-٣).

(٣-٢) نظرية الاهتزاز Vibrational Theory

حسب هذه النظرية التي افترضَها دايسون (Malcolm Dyson) أن حاسة الشم تتحسَّس تردُّدات اهتزاز جُزيئات الرائحة، وليس شكل الجُزيئة. بُنيَت هذه النظرية اعتمادًا على ملاحظة أن المجاميع الفعَّالة لجُزيئات المواد العِطرية هي العنصر الفعَّال في عملية الشم؛ فوجود مجموعة فعالة مثل الكاربونيل (C=O) في جُزيئات عطورٍ مختلفةٍ تُكسِبها الرائحة نفسها. كلك الحال بوجود مجاميع الثيول (SH) في جُزيئاتِ عطورٍ مختلفةٍ تجعلها تُصدِر الرائحة نفسها، بغَض النظر عن الشكل الفراغي للجُزيئة. وقام دايسون بقياس تردُّدات



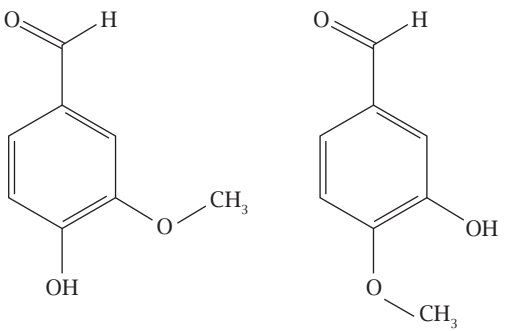
شكل ١٠-٨: الليمونين والدايبنتين آيزوميرات لها التركيب نفسُه لهما رائحتان مختلفتان ولكن بنفسِ طيفِ التردُّد. عن: McFadden & Al-Khalili (2014).

اهتزاز المركَّبات انطلاقًا من مبدأ رامان (Chandrasekhara Venkata Raman). رامان الحائز على جائزة نوبل سنة ١٩٣٠م، لعمله في مجال تشتُّت الضوء؛ فحسب مبدأ رامان، عند اصطدام الضوء بوسطٍ شفَّافٍ فإن الفوتونات يمكن أن تنعكس بصورةٍ مَرِنة؛ أي دون أن تفقد الفوتونات جزءًا من طاقتها، أو أنها تنعكس بصورةٍ غيرِ مرنة فتفقد جزءًا من طاقتها للجُزيئات التي تصطدم بها؛ وبالتالي سيكون للفوتونات تردُّداتُ اهتزازٍ مختلفةٌ حسب طبيعة الجُزيئات التي تصطدم بها، وهكذا ينشأ ما يُعرف بطيف رامان. هذا الأخير استُخدِم في أجهزة المطياف (Spectroscopy) للتعرُّف على الموادِّ المختلفةِ حسب تردُّدات الضوء المُنعكِس، والذي يمثِّل «بصمةً» خصوصية للمادة حسب طبيعة أواصر جُزيئاتها. وهكذا يمكن أن يعمل الأنف كجهاز مطيافٍ لكشف بصمة التردُّدات الاهتزازية لأواصر جُزيئات العِطر. ولاحظ دايسون وجود ارتباطٍ قويٍّ بين بعض التردُّدات في طيفِ رامان وعِطرٍ معيَّن؛ فكل المركَّبات التي لها آصرةُ ثيول طَرفية (R-S-H) يكون لها تردُّد رامان بنفس المَدَى. غير أن هذه النظرية تتطلَّب اشتراكَ الضوءِ في عملية الشم، وهو ما يصعُب إثباتُه. إضافةً إلى ذلك، هو قدرةُ الإنسانِ على تمييزِ عطورٍ لها طيفُ

رامان نفسه كما هو الحال مع عِطر الليمونين (Limonene) الذي هو آيزومير صورة مرآةٍ يُمنى وعِطر الدايبنتين (Dipentene) الذي هو آيزومير صورة مرآةٍ يُسرى للجُزيئة نفسها (Asogwa, 2019) (شكل ١٠-٨).

(٣-٣) نظريةُ الشكلِ الضعيفِ أو نموذجُ المحدد

Weak shape or Odotope model



شكل ١٠-٩: الفانيلين والآيزوفانيلين لهما التراكيبُ الجزئيةُ للجُزيئة نفسها، ولكن بمواقعَ مختلفةٍ ولهما رائحتان مختلفتان. عن: McFadden & Al-Khalili (2014).

حاوَلَ Kensaku Mori وGordon Shepherd سنة ١٩٩٤م، تفسير تحسُّس الرائحة نفسها لجُزيئاتٍ عِطريةٍ لها أشكالٌ جُزيئيةٌ مختلفة. افترض الباحثان حصولَ عمليةِ تعرُّفٍ على جُزيئات العِطر من قِبَل المُستقبِلات ليس اعتمادًا على الشكل الكُلي للجُزيئة، وإنما على شكل تراكيبَ جُزئية مفتاحية أو مُحددات (Odotopes) فيها كأن تكون مجاميع فعَّالة. شدَّدَت هذه النظرية على أهمية الذرَّات أكثر من موقع الذرَّات في الجُزيئة (Brookes, 2010). غير أن هذه النظرية تفشل في تفسيرِ وجودِ تراكيبَ جُزئيةٍ متماثلة، ولكن بمواقعَ مختلفةٍ في الجُزيئة وتُعطي روائحَ مختلفة، كمثال الفانيلين (Vanillin) وآيزوفانيلين (Isovanillin) (شكل ١٠-٩).

(٣-٤) التحليل الطيفي لاختراق الإلكترون غير المرن
(IETS) spectroscopy tunnelling electron Inelastic

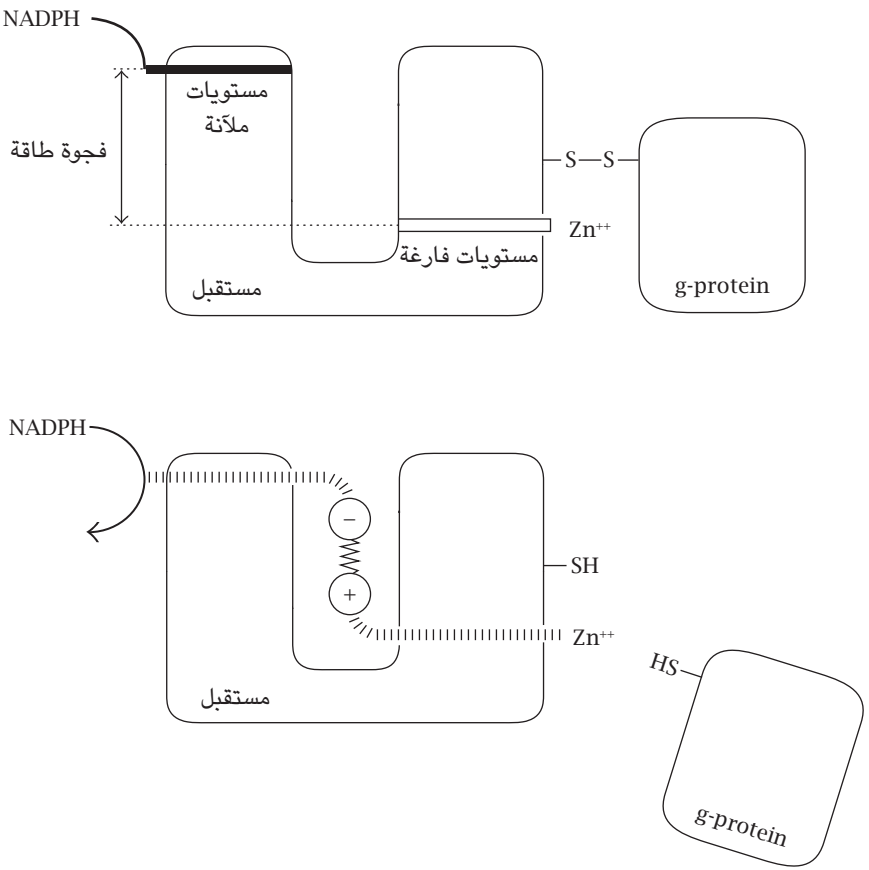
IETS هي شكلٌ غيرُ ضوئيٍّ لقياسِ الطيف الاهتزازي (Turin, 1997). وُضعَت هذه النظرية من قِبل الباحث اللبناني المَولِد Luca Turin وتنطلق من مَبدأِ أنَّ حاسة الشم تعتمد على تردُّدات الاهتزاز لجُزيئات العِطر كما ذكَرها دايسون، لكن آلية التمييز تعتمد على قُدرة الجُزيئات الحيوية على تحسُّس الاهتزازات للأواصر الكيميائية للجُزيئة العِطرية، عن طريق التسرُّب الكمومي للإلكترونات. وكما ذكرنا سابقًا فإن ظاهرة التسرُّب الكمومي تقوم بها الجُسَيمات تحت الذرية؛ مثل الفوتونات والإلكترونات والبروتونات، في اختراقِ حواجزَ لا يُمكِن اختراقُها بالسلوك التقليدي، وإنما من خلال السلوك الموجي الاحتمالي.

تعتمد فكرة IETS على وضع صفيحتَين معدنيتَين متقاربتَين جدًّا يفصلهما فضاءٌ ضيقٌ جدًّا. عند توفير فرق جهدٍ كهربائي بين الصفيحتَين، تتجمَّع الإلكترونات على أحدهما مضفيةً عليها شحنةً سالبة (المانح) وتتعرَّض إلى قوةٍ جاذبةٍ من الأخرى، والتي تكون موجبةَ الشحنة (المُستقبِل). حسب الفيزياء التقليدية، لا تمتلك الإلكترونات الطاقة اللازمة للقفز من الصفيحة إلى الصفيحة الأخرى، وعبور الفضاء الفاصل بينهما. غير أن الإلكترونات جسيماتٌ كموميةٌ كما هو معروف، وبإمكانها أن تخترق الفضاء الفاصل إن كان ضيقًا بما يكفي، وتنتقل من الصفيحة المانحة إلى الصفيحة المُستقبِلة. مثل هذه العملية كانت تُسمَّى تسرُّبًا كموميًّا مرنًا؛ حيث إن الإلكترونات لا تكتسب ولا تفقد طاقة. لكن ذلك غيرُ مُمكنٍ إلا إذا كان ثمَّة فضاءٌ خالٍ وبنفس الطاقة بالضبط. لكن إن كان مثل هذا الفضاء الخالي الأقرب للمستقبل بطاقةٍ أقل، حينها يمكن أن تفقد الإلكترونات بعضًا من طاقتها لتحقيق القفزة. مثل هذه العملية تُسمَّى تسرُّبًا كموميًّا غيرَ مَرِن. غير أن الطاقة المفقودة يجب أن تذهب إلى شيءٍ يمتصُّها، وإلا فلن يتحقق الاختراق الكمومي. وهكذا لو وُجدَت مادةٌ كيميائيةٌ في الفجوة بين الصفيحتَين ستتمكَّن الإلكترونات من الاختراق طالما أن الطاقة المفقودة ستستلمها هذه المادة الكيميائية، والتي لها أواصرُ قادرةٌ على الاهتزاز بالتردُّد الذي تُحدِثه الطاقة المفقودة بالضبط. عند ذلك، ستصل الإلكتروناتُ غيرُ المرنة التسرُّب إلى الصفيحة المُستقبِلة، وهي بطاقةٍ أقلَّ قليلًا. وهكذا تُستخدَم هذه الطريقة في قياسِ طيفِ التسرُّب غيرِ المرِن بتتبُّع فرق طاقة الإلكترونات وكشفِ طبيعةِ الأواصر الجُزيئية (McFadden & Al-Khalili, 2014). ويُشبِّه الباحثان ما يحدُث بما يحصُل عند العزف على الكيتار؛ فعند الضرب على أحد الأَوتار، سيهتَز ويُحرِّك الهواء.

وهذا بدوره سيُسبِّب اهتزازَ (رنين) الوتَر المجاوِر دون لمسه. وهكذا سيُسبِّب انتقال الإلكترون خلال التسرُّب إلى اهتزاز أواصر المادة العطرية التي تتلقَّى الطاقة التي يفقدُها الإلكترون أثناء انتقاله. وحسب Turin، فإن المُستقبِلات الشمية وهي جُزيئةٌ واحدة، تعمل بطريقةٍ مشابهةٍ لصفائح IETS والفضاء بينهما. وهكذا يُمكِن للإلكترون الموجود على موقعِ المانحِ أن يتسرَّب إلى موقع المُستقبِل بنفس الجُزيئة لكنه يمنع من ذلك بسبب فرقِ الطاقةِ بين الموقعَين. لكن عند وجود الجُزيئة العِطرية في المستقبل والتي لها آصرةٌ منغَّمة بتردُّد اهتزازٍ مناسبٍ بالضبط، عندها يتمكَّن الإلكترون من القفز من المانح إلى المُستقبِل عَبْر الاختراقِ الكمومي، وهو ينقل كمية الطاقة المناسبة بالضبط إلى الجُزيئة العِطرية مُسبِّبًا اهتزازَ إحدى أواصرها. وعندما يكون الإلكترون الآن في موقع المُستلِم، يُسبِّب تحرير وقذف جُزيئة بروتين G المشدودة مؤدية إلى قَدحِ العصَب الشمِّي، والذي يرسل إشارةً إلى الدماغ الذي يقوم بتحديد نوع الرائحة (شكل ١٠-١٠).

من المعروف أن المركَّبات التي تحتوي على آصرة H–S تُعطي رائحة البيض الفاسد بغَض النظر عن شكل الجُزيئة. وعند قيام تورين بقياس تردُّد اهتزاز هذه الآصرة، وُجِد أنها تُساوِي ٧٦ تيراهيرتز (٧٦ ترليون ذبذبة/ثانية). غير أنه لم يجد مُركَّبًا يُظهِر التردُّد نفسه، وبعد بحثٍ مطوَّلٍ في أدبياتِ قياسِ طيف التردُّدات، وجد أن مركَّبات البورونات (Boranes) والتي تمتلك آصرة بورون–هيدروجين (B–H) طرفية تُظهِر تردُّد اهتزازٍ يُساوِي ٧٨ تيراهيرتز، وهو قريبٌ من تردُّد المركَّبات الكبريتية. وهكذا لإثباتِ فرضيةِ تورين فإن هذه المركَّبات مثل ديكابورون (Decaborane) ($B_{10}H_{14}$) التي لا تحتوي على آصرة S–H ولها التردُّد نفسه ينبغي أن تُظهِر رائحة البيض الفاسد. وكانت النتيجة مطابقةً لتوقُّع تورين.

لكن ومع هذا النجاحِ بقيَت مسألة الآيزوميرات مثل الليمونين والدايبنتين؛ واللذان هما صورة مرآة لبعضهما، ولهما طيفُ تردُّد الاهتزاز نفسه. ولكن رائحتهما مختلفةٌ جدًّا، لا تُفسَّر بهذه النظرية. هذا قاد تورين إلى اعتماد طريقة تأثير النظير الحركي (Kinetic isotope effect) والتي سبق عَرضُها في إثبات التسرُّب الكمومي في الإنزيمات. تتلخَّص الطريقة باستبدالِ ذرَّاتِ الهيدروجين في مركَّبٍ عِطري بذرَّاتِ أحدِ نظائره مثل الديتيريوم الذي هو أثقلُ من الهيدروجين الاعتيادي؛ فالمفروض في مثل هذه الحالة أن يكون طيف التردُّد للجُزيئة التي تحتوي على ذرَّاتِ الهيدروجين الاعتيادية، أعلى من طيف التردُّد للجُزيئة المحتوية على الديتيريوم بدل الهيدروجين. عندها إذا حصَل تغيُّر في



شكل ١٠-١٠: مخطَّط لآلية النقل المُفترَضة. يستلم البروتين المُستقبِل إلكتروناتٍ من مانح الإلكترونات الذائب NADPH. وعندما يكون موقع الربط للمُستقبِل فارغًا (في الأعلى)، لا تتمكَّن الإلكترونات من التسرُّب الكمومي لموقع الارتباط بسبب عدم توافُر مستوياتٍ فارغةٍ بالطاقة المناسبة. وهكذا تبقى رابطة ثنائي الكبريت (-S-S-) وبروتين G المرتبط بها في حالة أكسدة، ولكن عندما تشغل المادة العَطِرة (ممثَّلة هنا بثنائي قطبٍ مَرِن) موقع الارتباط، يمكن للإلكترونات أن تفقد طاقةً خلال عملية التسرُّب بإثارة نمطها الاهتزازي. هذا يحدُث فقط إذا كانت طاقة نمط الاهتزاز مساويةً لفجوة الطاقة بين المستويات الملآنة والمستويات الفارغة. عندها تنساب الإلكترونات خلال البروتين، وتختزل رابطة ثنائي الكبريت بواسطة أيون الزنك وتُحرِّر بروتين G لاستكمال خطواتِ التوصيل التالية. مُحوَّر عن: (Turin, 1997).

الرائحة نتيجةَ ذلك، فسيكون دعمًا إضافيًّا لنظرية تورين. استخدم تورين المادةَ العِطرية أسيتوفينون (Acetophenone) ذات الرائحة العَطِرة الحادَّة التي تُشبِه رائحة الزعرور البري أو رائحة القداح (زهرة الحمضيات) الحادَّة. تحتوي هذه الجُزيئة ثمان ذراتِ هيدروجين مُرتبطة بالكاربون، وحصل على مركَّبٍ مماثلٍ لكنه يحتوي على ثمان ذرات ديتيريوم بدل ذرات الهيدروجين الاعتيادي. وعند إجراءِ تجربةِ استنشاقِ الرائحتَين من قِبل ٢٠ شخصًا لم تكن النتيجة إيجابية.

وحيث إن تقييم الرائحة من قِبل البشَر يمكن أن يكون مُشوَّشًا بسبب محدوديةِ حاسةِ الشم في الإنسان، وتأثير الحالة النفسية وغيرها، تم اللجوء إلى الحشرات لإجراء تجربة استنشاق وإمكانية التفريق بين الرائحتَين أن وُجدَت. استُخدمَت حشرات ذبابة الفاكهة (*Drosophila*) حيث يُسمَح للحشرات بالمرور من خلال ساق أنبوبٍ يتفرَّع في النهاية إلى فرعَين على شكل حرف T يمين ويسار، ويُمكِن للحشرات الخروج من أيٍّ منهما. في نهاية أحد الفرعَين تُوضَع المادة العِطرية المحتوية على ذرات الهيدروجين الاعتيادية، وفي نهاية الفرع الآخر تُوضَع المادة العِطرية التي تحتوي على الديتيريوم. وعند إطلاق الحشَرات ستتجه أعدادٌ أكبر إلى الفرع المحتوي على الرائحة المحبَّبة لها، اليمين أو اليسار إذا كانت تفرق بين الرائحتَين أو أن أعدادها لا تختلف في أيٍّ من الفرعَين إذا لم تكن تميِّز الرائحتَين. بدايةً تم تجريبُ ما إذا كانت هذه الحشرات تتحسَّس عِطر الأسيتوفينون. عند وضع مسحةٍ صغيرةٍ من هذه المادة العطرية في نهاية أحد الفرعَين وإطلاق الحشَرات من ساق الأنبوب، اتجهَت جميعها إلى الأنبوب الذي يحتوي المادةَ العطرية. في التجارب اللاحقة تم استبدالُ ثلاث أو خمس أو كل ذرات الهيدروجين لجُزيئات عِطر الأسيتوفينون بذَرَّات الديتيريوم في كل حالةٍ على حِدَة. عند استخدام المركَّب الذي يحتوي على ثلاث ذَرَّات ديتيريوم بوضعه في نهاية أحد الفرعَين، والمركَّب الذي يحتوي على ذَرَّات هيدروجين اعتيادية في نهاية الفرع الآخر، لم تتمكن الحشرات التمييز بينهما. لكن مع استخدام المركَّب الحاوي على خمس أو كل ذرات الديتيريوم بدل الهيدروجين، اتجهَت جميع الحشرات نحو المركَّب المُحتوِي على ذرات الهيدروجين الاعتيادية، وتجنَّبَت الفرع الذي به مركَّب يحتوي على ذرات الديتيريوم. تَمَّ تكرار التجربة باستخدام مركَّبَين آخرَين؛ هما الأوكتانول (Octanol) والبنزالديهايد (Benzaldehyde). مع الأوكتانول ميَّزَت الحشرات بوضوح بين المركَّب المحتوي على ذرات الهيدروجين الاعتيادية ونظيره المحتوي على ذرات الديتيريوم بدل الهيدروجين الاعتيادي، لكن الحشرات لم تُفرِّق بين النظيرَين المماثلَين في حالة البنزالديهايد. وللتأكُّد من استخدام

الحشرات لحاسَّتها الشمية في تمييزها رائحة الديتيريوم، قام الباحثون باستخدام سُلالةٍ طافرة من حشرة ذباب الفاكهة فاقدة للمُستقبِلاتِ الشمية. والنتيجة كانت فشل هذه الحشرات في التفريق بين جُزيئات العِطر المحتوي على الديتيريوم، والعطر المحتوي على الهيدروجين الاعتيادي، ما أكَّد صحة نتائجِ التجارب السابقة. إضافةً إلى ذلك تبيَّن أن حشرات ذبابة الفاكهة المدرَّبة على تجنُّب رائحة المركَّبات المحتوية على كاربون-ديتيريوم بما يتميز به من اهتزاز بتردُّد ٦٦ تيراهيرتز تتجنَّب أيضًا مركَّباتٍ مختلفةً تحتوي على كاربون-نتروجين وهي النتريلات (Nitriles)، والتي لها التردُّد نفسه (٦٦ تيراهيرتز) ما عزَّز نظرية اهتزاز أجزاءٍ من المكوِّنات الشمِّية في الحشَرات على الأقل.

وبالعودة إلى تجريب قدرة حاسة الشم في الإنسان على تمييز رائحة الأسيتوفينون الذي استُبدلَت فيه الثماني ذرات هيدروجين الاعتيادي بثمان ذرات ديتيريوم، فشِل ١١ شخصًا في التمييز بينهما. لكن باستخدام جُزيئاتٍ معقدة برائحة المسك (شكل ١٠-٣) حيث استُبدلَت جميع ذرات الهيدروجين الاعتيادي الثمانية والعشرين بذرات الديتيريوم. تمكَّن جميع الأشخاص في التجربة من التمييز بينهما بسهولة. هذا عزَّز النظرية وبيَّن وجود فروقاتٍ بين الأحياء في تحسُّس تردُّد الاهتزازات (McFadden & Al-Khalili, 2014).

(٣-٥) نموذج بطاقة المرور Swipe-card model

تستند هذه النظرية على مبدأ أن شكل المُستقبِل الشمِّي واهتزاز جُزيئة المادة العطرية، يلعبان دورًا في عملية الشم. وتفتَرض أن موقع الارتباط في المُستقبِل الشمِّي يقوم بما يشبه عمل ماكنة بطاقة المرور؛ فالمطلوب أولًا في مثل هذه الماكنة أن تكون البطاقة بشكلٍ وحجمٍ مناسبَين، يمكِّنانها من الولوج واتخاذ موضعها الصحيح، وأن تحتوي على شريطٍ مغناطيسي يمكِّن من توليد تيارٍ كهربائي، لتتمكَّن الماكنة من التعرُّف عليه. وهكذا يجب أن تشغل جُزيئة المادة العِطرية موقع الارتباط المناسب في المستقبل الشمِّي أولًا، فإذا كان لها شكلان مختلفان؛ كأن يكون لها آيزوميران صورة مرآة يمين ويسار، فإن لكل جُزيئةٍ منهما مستقبِلًا مناسبًا مختلفًا. وبعد أن تشغل الموقع المناسب ضمن المستقبل، يكون لها القدرة على تحفيز التسرُّب الكمومي للإلكترون عَبْر الاهتزاز وتشغيل العصَب المُستقبِل. وحيث إن لكل آيزومير مُستقبِلًا مختلفًا، فسيكون لكلٍّ منهما رائحتُه المميزة. وهكذا تم حل مشكلة الآيزوميرات التي لها تردُّداتُ الاهتزاز نفسها ولكن بروائحَ مختلفة.

وهكذا يُعتبَر تفسير حاسة الشم على أساس التسرُّب الكمومي غير المرن للإلكترون هو التفسير الأفضل، إلا أن الإثبات المباشر لحصول هذه الظاهرة الكمومية يتطلَّب تجاربَ دقيقةً على المستقبِلات الشمية. وحيث إن هذه المُستقبِلات هي بروتيناتٌ تُشكِّل جزءًا من غشاء الخلية العصبية، فمن الصعب عزلُها وكشفُ تركيبها بالضبط والتعامُل معها.

الفصل الحادي عشر

التحسُّس المغناطيسي والبوصلة الكمومية

Magnetoreception and Quantum Compass

(١) المجال المغناطيسي Magnetic Field

ينشأ المجال المغناطيسي عن حركة الدقائق المشحونة وتتناسب قوَّتُه مع كمية الشحنات وحركتها. والمجال المغناطيسي هو أحد أشكال القوة الكهرومغناطيسية (انظر الفصل الثامن).

على مستوى الجسيمات تحت الذرية مثل الإلكترون، ينشأ العزم المغناطيسي نتيجة البرم المغزلي (Spin). كما ينشأ المجال المغناطيسي نتيجة مرور التيار الكهربائي في مُوصِّل. وهنا يمكن أن يكون المجال المغناطيسي مستقرا (Static) إذا تولَّد عن تيارٍ كهربائيٍّ مستمر (Dierct current)؛ كالذي يتولَّد عن بطارية، أو يكون متناوبًا عندما ينشأ عن تيارٍ كهربائيٍّ متناوب (Alternative current) كما في الكهرباء المستخدمة في المنازل والمعامل وغيرها. المجال المغناطيسي المستقر أو المستمر هو الذي لا يتغير مع الزمن، على عكس المجال المغناطيسي المتناوب الذي يتغير مع الزمن. ولبعض المواد مثل الحديد خاصيةٌ مغناطيسية نتيجة احتواء ذراتها على إلكتروناتٍ مفردة غيرِ مرتبطة بلفٍّ مغزليٍّ متماثل.

تُقاس قوة المجال المغناطيسي بوحدات تيسلا (Tesla = T)، كما تُستخدَم وحداتٌ أصغر هي غاوس (Gauss = G)؛ حيث إن:

$$1T = 10^4G$$

كما تُرفق هذه القيم عادةً بقيم التردُّد للموجات المغناطيسية ووحداتها بالهيرتز (Hz).

الكرة الارضية تعمل كمغناطيسٍ نتيجة وجود صهير الحديد، وموادَّ مشحونة متحركة في مركزها. وهكذا للأرض مجالٌ مغناطيسي إلا أنه ضعيف؛ فهو يكون بقوة بين ٧٥ إلى ٢٥ ميكروتيسلا (μT) في القطبَين وخط الاستواء على التوالي. مع ذلك فهو يقي الأحياء من التأثيرات المدمرة للأشعة الكونية والأشعة فوق البنفسجية. وحيث إن الخلايا الحية تحتوي على الكثير من الأيونات والمركَّبات المشحونة وبعض المواد الممغنطة، فمن غير المستبعَد أن يكون للمجالات المغناطيسية تأثيراتٌ مختلفة عليها. وهكذا يُوجد المجال المغناطيسي أينما توافَر التيار الكهربائي أو تبادل الأيونات، ليس في الكواكب فقط، وإنما في القلب مثلًا حيث يكون بقوة ١٠$^{-١٠}$ تيسلا أو في الدماغ ١٠$^{-١٥}$ تيسلا (Tarlacı & Pregnolato, 2015).

وبسبب ضعف المجال المغناطيسي الأرضي، يلجأ الباحثون إلى استخدام مجالاتٍ مغناطيسيةٍ بقوًى مختلفة من أجل دراسة تأثيرها على الفعاليات الحيوية في مجاميع الأحياء المختلفة.

من خلال استعراض تأثير المجالات المغناطيسية على الأحياء الدقيقة والفطريات، يؤكِّد الباحثون أن الاستجابة لها واضحة، ليس في هذه المجاميع فقط، وإنما في جميع الممالك الأحيائية الخمسة، على الرغم من وجود اختلافات في آليات الاستجابة (Pazur *et al.*, 2007).

تستجيب العديد من أنواع البكتيريا الممغنطة (Magnetotactic bacteria) والأحياء الحقيقية النواة الوحيدة الخلية كالحيوانات الابتدائية الدوارة (Dinoflagellates) والهدبيات وكذلك الفطريات، للمجالات المغناطيسية. البكتيريا الممغنطة هي بكتيريا تُظهِر انجذابًا مغناطيسيًّا (Magnetotaxis) حيث تتحرك بواسطة أسواط، وتتوجَّه حركتُها بالمجال المغناطيسي المحلي الضعيف بما يصل إلى ٠٫٥ غاوس (Gauss) أو ٠٫٥ × ١٠$^{-٤}$ تيسلا (T). هذه البكتيريا تتحسَّس المجال المغناطيسي بواسطة أجسامٍ مغناطيسيةٍ (Magnetosomes) في السايتوبلازم (Blakemore, 1975). يتألَّف الجسم المغناطيسي من بلورة حديدٍ مغناطيسي (Ferrimagnetic) محاطةٍ بغشاءٍ خاص (شكل ١١-٢ و١١-٣).

(٢) تأثير المجالات المغناطيسية على الفعاليات الحيوية

Effect of Magnetic Fields on Biological Activities

المجالات المغناطيسية المستمرة المتوسطة (٠,١–١ ملي تيسلا) حفزَت نمو البكتيريا *Pseudomanas fluorescens* و*Staphylococcus albus* والفطر *Aspergillus niger*. في حين خفضَت نمو الفطرَين *Alternaria alternate* و*Curvularia inaequalis* بنسبة ١٠٪. بينما زادت عدد الكونيدات للفطرَين بنسبة ٦٨–١٣٣٪ وثبطَت تكوين الكونيدات في الفطر *Fusarium oxysporum* بنسبة ٧٩–٨٣٪ (Nagy & Fischl, 2004). كما ثُبِّط نمو البكتيريا الخضراء المزرقة *Anabaena doliolum* في ٣٠٠ ملي تيسلا. بينما خُفض النمو في *Acanthamoeba* بتأثير المجال المغناطيسي المستقر ٧١ و١٠٦ ملي تيسلا. وخفَّض المجال المغناطيسي المنخفض (٤٠٠ ميكروتيسلا) تكوين البراعم في الخميرة *Saccharomyces cerevisiae* بنسبة ٣٠٪ (Kimball, 1938; Berk *et al.*, 1997; Pazur *et al.*, 2007; Makarevich, 1999).

أدى تنمية الفطرَين المُمرِضَين للحشرات *Beauveria bassiana* و*Isaria fumosorosea* على وسطٍ زرعي يحتوي على ماءٍ مُعامَل بمغناطيسٍ دائم أو التعريض لمجالٍ مغناطيسي إلى زيادة معدل نموهما وإمراضيتِهما ضد يرقاتِ بعض أنواع الحشرات (Jaworska *et al.*, 2016).

وأظهرت الدراسات زيادة معدَّل نمو البكتيريا *Escherichia coli* و*Bacillus subtilis* تحت تأثير المجال المغناطيسي المتناوب من ٠ إلى ٢٢ ملي تيسلا (١٦ و٥٠ هيرتز) كما قَلَّ تلاصُق الخلايا في البكتيريا الأخيرة. بينما كان للتردُّدات العالية ٦٢ كيلوهيرتز تأثيرٌ قاتلٌ للبكتيريا *E. coli* (Aarholt *et al.*, 1981; Ramon *et al.*, 1987; Pazur *et al.*, 2007).

وسبَّب المجال المغناطيسي المتناوب ١,٨ ميلي تيسلا بتردُّد ٧٢ هيرتز زيادةَ معدَّل انقسام الحيوان الابتدائي *Paramecium tetraurelia* وهذا التأثير مرتبط مع أيونات الكالسيوم (Pazur *et al.*, 2007; Dihel *et al.*, 1985).

المجال المغناطيسي المُتناوِب المعتدل (٦٦٠–٢٠٠ ميكروتيسلا، ٥٠ هيرتز) أعاق معدَّل النسخ لأوبيرون لاك (lac operon) في البكتيريا *E. coli*. وسبَّب مثل هذا المجال في ١,١ ميلي تيسلا و٦٠ هيرتز زيادةً في عامل النسخ σ32 ووحدة α للإنزيم RNA polymerase في ١,٥ ميلي تيسلا. كما أحدث المجال المغناطيسي زيادةً أو تخفيضًا

في معدَّل التعبير الجيني لثلاثين نوعًا من البروتينات؛ ما يشير إلى احتمال حساسية عملية الترجمة إلى التأثير المغناطيسي. أما المجال المغناطيسي القوي (١٤,١ تيسلا) فسبَّب زيادةً في التعبير الجيني لـ ٢١ جينا، وتخفيض التعبير الجيني لـ ٤٤ جينًا في البكتيريا اللاهوائية *Shewanella oneidensis* دون التأثير على النمو. في حين لم يحصُل تأثيرٌ على التعبير الجيني في الخميرة *Saccharomyces cerevisiae* في المجال المغناطيسي بين ١٠ و٣٠٠ ميلي تيسلا، ٥٠ هيرتز. وسبَّب المجال المغناطيسي ٠,١٣–٠,٣ تيسلا زيادةً بخمسة أضعاف تخليق البورفيرين، وزيادة التعبير الجيني لإنزيم 5-aminolevulinic acid dehydratase في بكتيريا التركيب الضوئي *Rhodobacter sphaeroides* (Pazur *et al.*, 2007; Goodman *et al.*, 1994; Cairo *et al.*, 1998).

وبيَّنَت الأبحاث حساسية الإنزيمات للمجال المغناطيسي خارج الجسم الحي (*In Vitro*)؛ فالمجال المغناطيسي المستقر بقوة ٢٠ ميكرو تيسلا خفَّض نشاط الإنزيم Ca2+/calmodulin-dependent cyclic nucleotide phosphodiesterase بالاعتماد على أيونات الكالسيوم، وهذا يُشير إلى أهمية المجال المغناطيسي الأرضي في التفاعُلات المرتبطة بالكالسيوم (Liboff *et al.*, 2003; Pazur *et al.*, 2007).

كما أن الارتفاع أو الانخفاض المعتدل في قوة المجال المغناطيسي الأرضي في اختبارات خارج وداخل الجسم الحي، أثَّر في نشاط الإنزيمَين المفتاحيَّين في تخليق الميلاتونين في الغدة الصنوبرية والشبكية Hydroxyindole-O-methyltransferase وN-acetylserotonin transferase. وفي الحمام خفَّض نشاط الإنزيم الأخير بقوة عند تعرُّضها لدوران بخمسين درجة أفقيًّا للمغناطيس الأرضي لمدة ٣٠ دقيقة في منتصف الليل (Pazur *et al.*, 2007; Cremer-Bartels *et al.*, 1984).

وأدى المجال المغناطيسي القوي ٦ و٧ تيسلا إلى تخفيض نشاط الإنزيم L-glutamic dehydrogenase وتخفيض نشاط الإنزيم Carboxydismutase من السبانخ في مجالٍ مغناطيسي بقوة ٢ تيسلا. كما تأثَّر نشاط الإنزيمات Trypsin وOrnithine decarboxylase وCytochrome-C oxidase بالمجالات المغناطيسية (Cook & Smith, 1964; Haberditzl, 1967; Mullins *et al.*, 1999; Nossol *et al.*, 1993; Pazur *et al.*, 2007).

تم دراسة تأثير نبضاتِ المجال المغناطيسي القليلة التردُّد وإشعاعات الليزر القليلة الشدة، على نمو الفطريات المُحلِّلة للبوليمرات. التشعيع يمكن أن يحفِّز أو يثبِّط النمو

وتكوين السبورات، وكذلك نشاط الإنزيمات المحلِّلة Catalase وPeroxidase (Makarov *et al.*, 2019).

المجال المغناطيسي المتناوب (١٤,٦ ميلي تيسلا، ٦٠ هيرتز) حافَظ على البكتيريا *Salmonella typhimurium* من الإجهاد الحراري. كما أن التعرُّض للمجال المغناطيسي حفَّز تكوين بروتين الصدمة الحرارية HSP70 في حشرة الدروسوفيلا (Goodman & Blank, 1998; Pazur *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2006).

ويُظهِر أيضُ الأحياء المختلفة استجاباتٍ متباينةً لتأثير المجالات المغناطيسية؛ فالمجال المغناطيسي المتناوب (٠,٥ ميكرو تيسلا، ١٠٠–٢٠٠ هيرتز) يخفِّض معدَّل التنفس في الخميرة *S. cerevisiae* بمقدار ٣٠٪. بينما يرفع المجال المغناطيسي (٤,٩، ٥٠ هيرتز) مستوى ATP بمقدار ٣٠٪. وفي البكتيريا الخضراء المزرقة *Spirulina platensis* يسبِّب المجال المغناطيسي المتناوب المعتدل (١٠ ميلي تيسلا) تحفيزًا للنمو والتركيب الضوئي وتخليق الصبغة، بينما يسبِّب تثبيطًا في قوة ٧٠ ميلي تيسلا (Russel & Webb, 1981; Lei & Berg, 1998; Hirano *et al.*, 1998; Pazur *et al.*, 2007).

تم دراسة تأثير المجال المغناطيسي بقوةٍ ضعيفة ٥، ٧، ١٠، ٣٠، ٥٠ غاوس على نمو الفطر *Aspergillus flavus* وتكوين سُم الأفلاتوكسين. أظهرَت النتائج تأثير القطب المغناطيسي الجنوبي؛ حيث زاد تكوين السم ضعف معاملة السيطرة، وحوالي ٢٠ ضعفًا مقارنة بتأثير القطب المغناطيسي الشمالي (Ahmad *et al.*, 2013).

الكثير من الحيوانات تتحسَّس المغناطيس الأرضي؛ مثل الرخويات والمفصليات وأنواعٍ من كل مجاميع الحيوانات الفقارية، بينما لا يتمكن الإنسان بحواسِّه وحدها من تحسُّس هذا المجال المغناطيسي. من الحيوانات التي تستخدم المجال المغناطيسي كبوصلةٍ داخلية، الطيور المهاجرة ومنها خاصة أبو الحناء الأوروبي *Erithacus rubecula* والطيور الجواثم والحمام الزاجل *Columba livia domestica* وطيور السواحل ومعظم مجاميع الحيوانات الفقارية والقشريات والحشرات والرخويات والسلاحف البحرية (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

بعض هذه الحيوانات تستخدم البوصلة لعبور المحيطات، وأخرى تستخدمها لإيجاد طينةٍ أفضل لمسافاتٍ قصيرة، والبعض الآخر يستخدم شدة ومَيَلان المغناطيس الأرضي لتحديد موقعه الجغرافي (Johnsen & Lohmann, 2008).

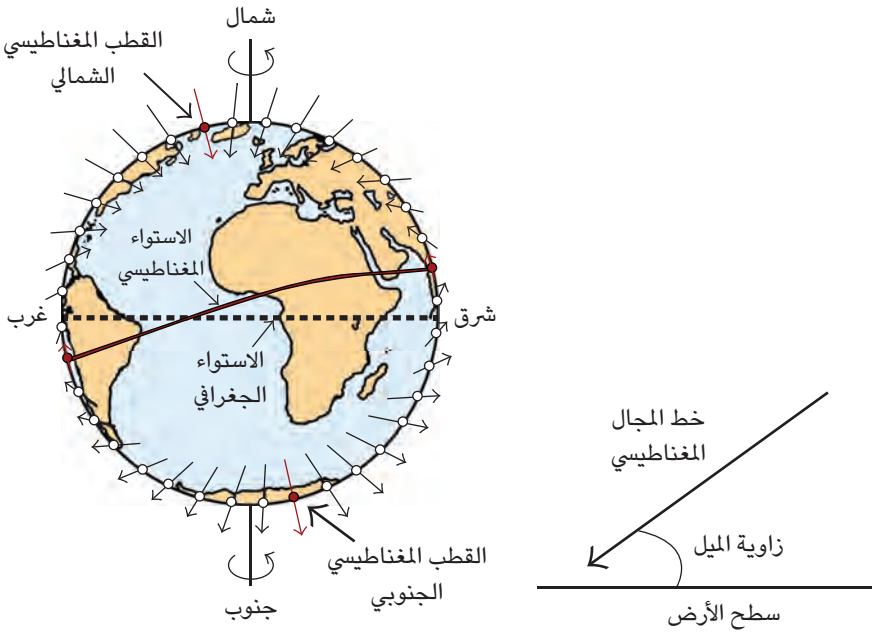
(٣) المغناطيس الأرضي Geomagnet

تمثِّل الكرة الأرضية مغناطيسًا هائلًا؛ حيث يكون قطباه قريبَين من قطبَي دورانها حول محورها. ويُعتقد أن المجال المغناطيسي الأرضي ينشأ من حركة السائل الموصل كهربائيًّا في جوفها؛ والذي يكون غنيًّا بالحديد. والمجال المغناطيسي الأرضي كميةٌ اتجاهية تتضمَّن ثلاثة مكوناتٍ هي: الاتجاه الصاعد (Inclination) والاتجاه النازل (Declination) والشدة (Intensity) (Nordmann *et al.*, 2017).

خطوط المجال المغناطيسي الأرضي تنبعث من القطب الجنوبي، وتدور حول الأرض لتدخل القطب الشمالي. وهكذا تتجه خطوط المجال المغناطيسي إلى الأعلى في نصف الكرة الجنوبي، وموازية لسطح الأرض في منطقة الاستواء المغناطيسي، ثم تتجه إلى الأسفل في نصف الكرة الشمالي. الميلان المغناطيسي الصاعد (زاوية الميل Inclination angle) هي الزاوية بين الخط المغناطيسي الموقعي والخط الأفقي، يتغير باستمرار مُظهرًا تدرُّجًا منتظمًا من زاوية −٩٠° في القطب المغناطيسي الجنوبي إلى +٩٠° في القطب المغناطيسي الشمالي، وتكون ٠° في الاستواء المغناطيسي (شكل ١١-١). أما شدة المجال المغناطيسي الأرضي الممثَّلة بطول السهام في الشكل، فتكون أعلى عند القطبَين، وأقل قرب الاستواء المغناطيسي. وبذلك تشكِّل تدرُّجًا ينطلق من القطبَين نحو الاستواء في نصفَي الكرة الأرضية. غير أن هذا الانتظام المغناطيسي يمكن أن يتشوه موضعيًّا بوجود موادَّ في القشرة العليا للكرة الأرضية، بتغيُّرٍ بسيط زيادةً أو نقصانًا في شدة المجال المغناطيسي. كما يمكن أن تتعرَّض شدة المجال المغناطيسي الأرضي إلى تغيراتٍ صغيرةٍ يومية، نتيجة الإشعاعات الكهرومغناطيسية الصادرة من الشمس. وحيث إن الميَلان الصاعد والميَلان النازل والشدة هي مؤشراتٌ جيوفيزيائية متمايزة، فيمكن لأيٍّ منها أن يُستخدَم من قِبل الحيوانات في هجراتها.

وهكذا، يوفِّر المغناطيس الأرضي مصدرًا مهمًّا للمعلومات الملاحية؛ فثمَّة معلوماتٌ اتجاهية توفِّرها اتجاهات الخطوط المغناطيسية، والتي يمكن أن تُستخدَم كبوصلة من قِبل الحيوانات، كما توفِّر الشدة المغناطيسية والميَلان معلوماتٍ تُسهِم في رسم «خارطة» ملاحية توضِّح الموقع (Wiltschko & Wiltschko, 2005; Nordmann *et al.*, 2017).

ومن أجل نجاح الطيور في هجراتها السنوية، عليها تحديد اتجاه طيرانها بدقة؛ حيث لا يكفي تمييزها للقطب الشمالي عن الجنوبي، ولا التوجُّه نحو خط الاستواء أو أحد القطبَين؛ فمثلًا المتابعة بواسطة الأقمار الصناعية لطائر البقويقة الشريطيِّ الذيل



شكل ١١-١: المجال المغناطيسي الأرضي. السهام تشير إلى الاتجاهات المغناطيسية الموقعية، وأطوالها تتناسب مع شدة المجال المغناطيسي الموقعي. القطبان المغناطيسيان والاستواء المغناطيسي مميَّز باللون الأحمر. مُحوَّر عن: Wiltschko & Wiltschko (2005) وزاوية الميل عن: McFadden & Al-Khalili (2014).

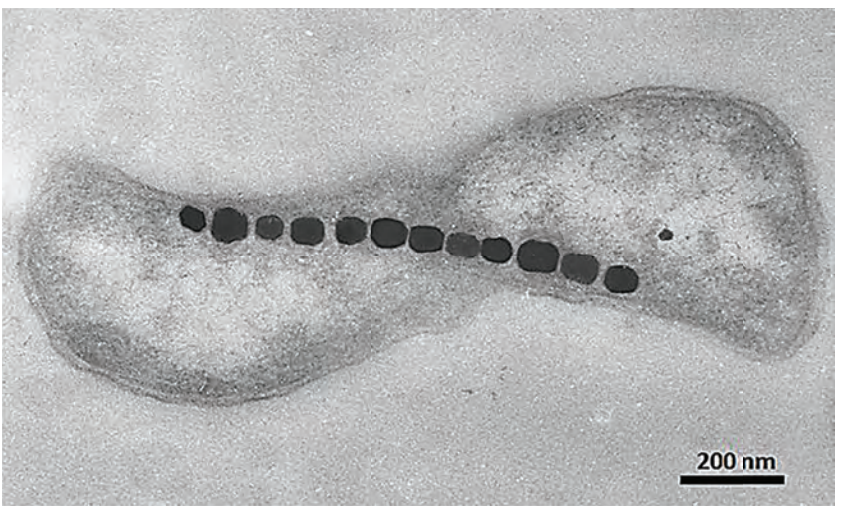
Limosa lapponica baueri في رحلته من ألاسكا إلى نيوزلاندا تبيَّن أنه يطير عَبْر المحيط الهادي مسافة ١١٠٠٠كم. دون توقُّف. وهكذا فإن الخطأ في الاتجاه بدرجاتٍ قليلة يمكن أن يكون كارثيًّا (Gill Jr *et al.*, 2009). وهكذا لا بُد من الاستعانة ببوصلةٍ مغناطيسيةٍ عالية الدقة لتحديد وتصحيح الاتجاه، تعمل في الليل أيضًا، علمًا أن الليل ليس معتمًا تمامًا. وتُشير الأبحاث إلى أن دقة هذه البوصلة في تحديد المجال المغناطيسي بحدود ٥° أو أقل (Hiscock *et al.*, 2016).

كما يرى Vacha (2019)، ثمَّة آليَّتان للتحسُّس المغناطيسي في الحيوانات البرية هما: الفيريمغناطيسية (Ferrimagnetism) التي تعتمد على وجود بلورات المغنتيت. والتفاعل الكيميائي لأزواج الجذور (Radical pairs). ويمكن أن تتواجد الآليتان جنبًا إلى جنب

لأغراضٍ مختلفة، كما يُتوقَّع عملهما في الطيور (Wiltschko *et al.*, 2006). أو أنهما تكونان منفصلتَين كلٌّ في نوعٍ مختلف من الأحياء (Thalau *et al.*, 2006). كما لا يُستبعَد احتمالُ عملهما بصورةٍ مشتركةٍ في تركيب مستقبل (Qin *et al.*, 2015).

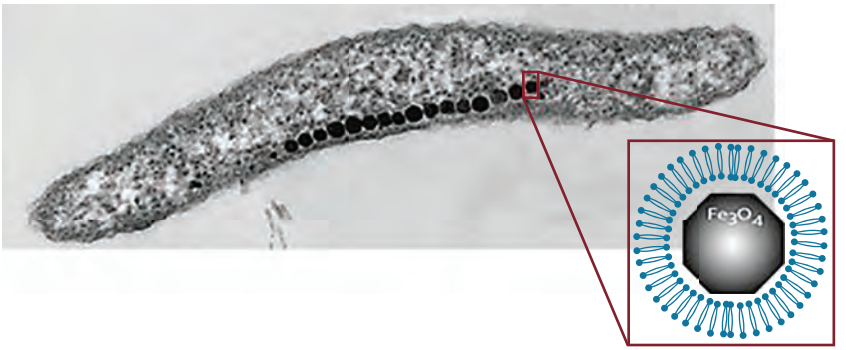
وكان Johnsen & Lohmann (2008) قد رجَّحا وجود ثلاث آلياتٍ لتحسُّس المجال المغناطيسي؛ الفيريمغناطيسية والتحفيز الإلكترومغناطيسي والتفاعل الكيميائي المكوِّن لأزواج الجذور. كلها تعتمد على أحد الأسس التالية؛ تضخيم التأثير المغناطيسي، أو استخدام مادةٍ عالية الحساسية للمغناطيسية، أو عزل المنظومة عن الحمام الحراري (Thermal bath).

أولا: الفيريمغناطيسية

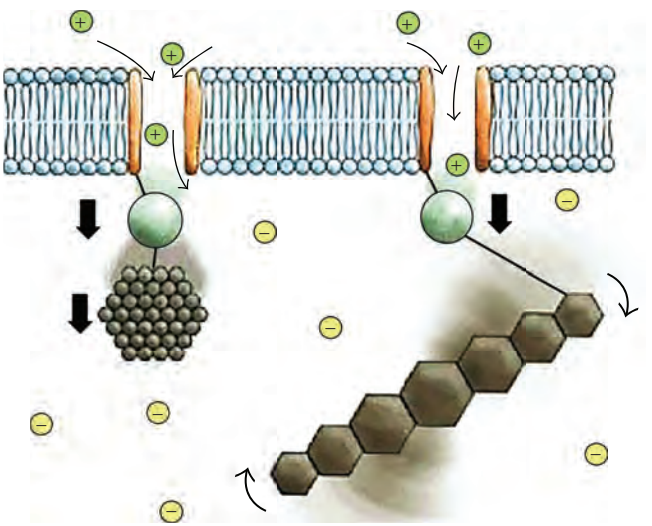


شكل ١١-٢: بكتيريا ممغنطة تحتوي على الأجسام المغناطيسية. عن: https://images.app.goo.gl/cs4J72RvcWDX59rz6..

تتضمَّن وجود المغنتيت (Magnetite) أوكسيد الحديد الأسود وغيره من مركَّبات الحديد؛ لشدة تفاعلها مع المجال المغناطيسي. هذه المنظومة تُوجد في الهائمات والبكتيريا؛ حيث تكون بهيئة سلاسلَ من بلوراتِ المواد الفريمغناطيسية بشكل مغنتيت (Fe_3O_4)



شكل ١١-٣: البكتيريا المغنطة التي تحتوي على سلسلة من الأجسام المغناطيسية. الشكل في المربع يوضِّح تفاصيل الجسم المغناطيسي. عن: (Schuler, 2008).



شكل ١١-٤: نموذجان افتراضيان لتحويل الطاقة الكهربائية إلى قوةٍ فيزيائية عن طريق فتح قناة الأيونات الموجبة في غشاء الخلية ممكنًا من الإشارات العصبية. تجمُّعات من بلورات المركَّبات المغناطيسية (يسار) مرتبطة ببوابة قناةٍ متحسِّسة للقوة بواسطة خويطٍ من الهيكل الخلَوي تتحرك على طول قوة المجال المغناطيسي الأرضي. وسلسلة من بلورات المركَّبات المغناطيسية لها عزمٌ ثابت تدور حسب المجال المغناطيسي الخارجي (يمين) ويقوم الخويطُ بنقل العزم إلى القناة الأيونية. عن: Vacha (2019).

أو غريغيت (Fe_3S_4) نانوية الأبعاد (شكل ١١-٢). كما وُجدَت هذه المواد المغناطيسية في حشرات نحل العسل والطيور وسمك السلمون وسلاحف البحر وغيرها (Shaw *et al.*, 2015). تُعتبَر هذه المواد خيارًا طبيعيًّا لعمل بوصلة؛ كونها ذاتَ قدرةٍ عاليةٍ على التفاعل مع المجالات المغناطيسية التي تُحدِث ترتيبًا للفِّ المغزلي للإلكترونات. يؤثِّر المجال المغناطيسي بقوة على هذه المنظومة بحيث يجعل الخلية تدورُ حول نفسها. كما أن للمجال المغناطيسي مركبةً عمودية تتحسَّسها الخلية؛ حيث تُحدِّد بواسطتها العمق من أجل إيجاد منطقة التركيز المناسب للأوكسجين. هذه الآلية تتضمن وجود قناةٍ حسَّاسةٍ للحركة ومرتبطة ببلورات المغنتيت التي هي أيضًا مرتبطةٌ بغشاء الخلية. تعمل سلسلة بلورات المغنتيت كإبرة البوصلة؛ حيث تتراصَف مع المجال المغناطيسي الأرضي، مسلطةً عزمًا على القناة الحساسة حركيًّا حيث تنشِّطها مؤديةً إلى تدفُّق أيوناتٍ موجبة ولا استقطابية لغشاء الخلية (Nordmann *et al.*, 2017) (شكل ١١-٣) مؤدية إلى تحسُّس المجال المغناطيسي والحركة نحو المناطق الأكثر مناسبةً للحياة.

ثانيًا: التحفيز الإلكترومغناطيسي Electromagnetic induction

انطلاقًا من عدم امكانية الفصل بين الكهربائية والمغناطيسية، فمن الممكن قيام تركيب معين بتحويل المعلومات حول المجال المغناطيسي الأرضي إلى محفز كهربائي (Nordmann *et al.*, 2017).

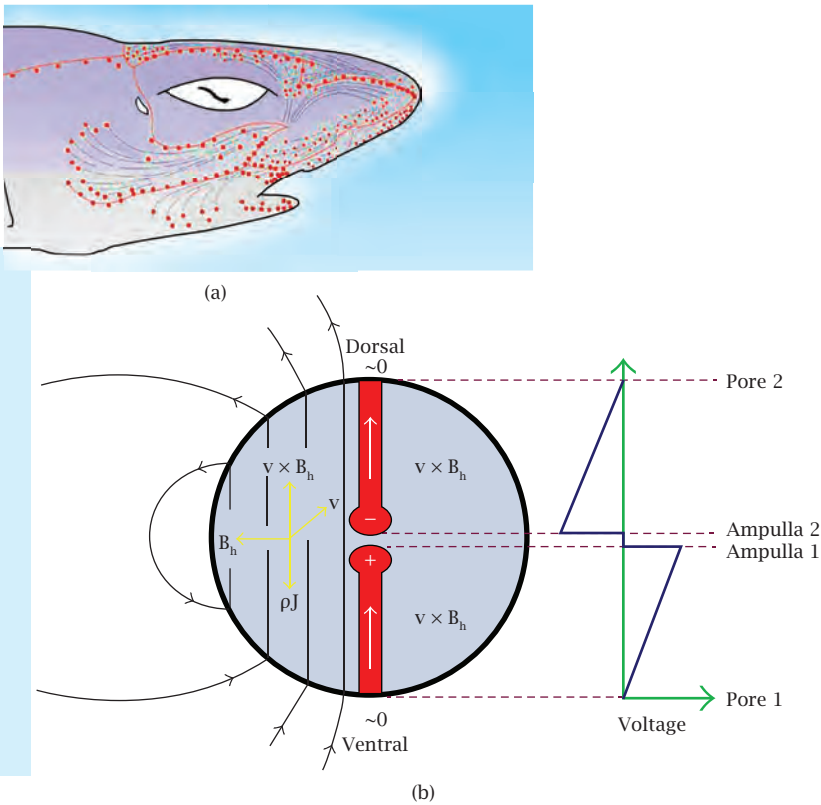
تعتمد هذه الآلية على الحساسية الفائقة لتحسُّس الكهربائية والموجودة في بعض الحيوانات البحرية؛ مثل أسماك القرش وسمك الشفنين وغيرها. وتعتمد هذه الآلية على قوة لورينز (Lorentz force) حيث إن حركة قضيبٍ موصِّل خلال مجالٍ مغناطيسيٍّ تُولِّد توزُّعًا غير منتظمٍ للشحنات؛ فلو غُمر القضيب في وسطٍ مُوصِّل حيث يكون ثابتًا بالنسبة إلى المجال، تتكوَّن دائرةٌ كهربائية. تمتلكُ هذه الحيوانات البحرية بضع مئاتٍ من قنواتٍ طويلة تبدأ من فتحاتٍ صغيرة على الجلد وتنتهي داخل الجسم. لهذه القنواتِ جدرانٌ مقاومةٌ للكهربائية بينما تكون ملآنة في الداخل بمادةٍ جيلية، عالية التوصيل للكهربائية، وهكذا تعمل كقابلوات كهربائية. في نهاية القنوات تُوجد أمبولات من مجمَّعات خلايا لورينزيني (Lorenzini) الحسَّاسة للغاية للتغيُّرات الصغيرة في الفولتية (شكل ١١-٥). هذه المنظومات لا تتمكَّن من تحسُّس التيار المستمر، لكنها تتحسَّس التيار المتناوب. قُدِّرَت عتبة التحسُّس لهذه الآلية بحدود ٢ ميكروفولت/م، علمًا أن حركة القرش في المياه

البحرية يمكن أن تُولِّد ٢٥ ميكروفولت/م. حركة رأس القرش إلى الأمام والخلف يمكن أن تساعد على موازنة التشويش المُتولِّد عن الكهربائية للتيارات المائية.

ثالثًا: أزواج الجذور Radical pairs

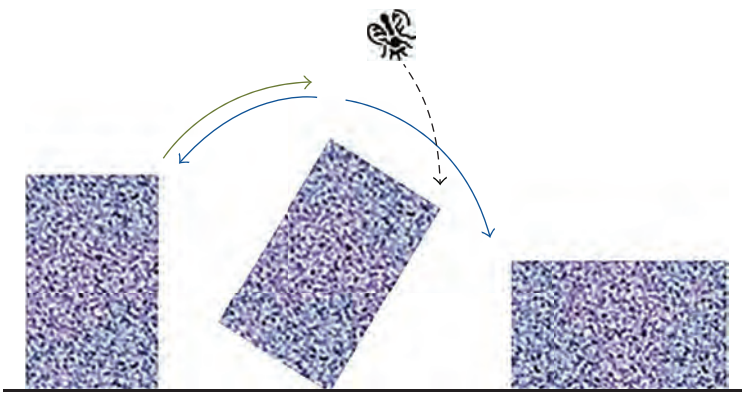
تعتمد هذه الآلية على العزل الفعَّال لعزم الإلكترون وعزم النواة عن المحيط وتتضمَّن تفاعلاتٍ كيموحيوية. التفاعلات الكيموحيوية المعتمدة على المجال المغناطيسي معروفة، غير أن تحسُّس المجال المغناطيسي المعتمد على التفاعلات الكيميائية يواجه تحدياتٍ مهمة؛ منها المجال المغناطيسي الأرضي الضعيف؛ حيث إنه يساوي ٥٠ ميكروتيسلا، فتحوُّل الحالات الجُزيئية المستندة إلى انشطارات زيمان (Zeeman splitting) هو واحد بالخمسين مليون من طاقة الحمام الحراري kT في درجة حرارة الجسم (١٠ × ١٠$^{-٢٧}$ مقابل ٥ × ١٠$^{-٢١}$ جول). وهكذا فمعدَّل معظم التفاعلات الكيميائية وتكوين النواتج سوف لا يكون حسَّاسًا للمجال المغناطيسي الأرضي. غير أن صنفًا من التفاعلات الكيميائية المتضمِّنة أزواج الجذور تُظهِر حساسيةً غير عادية لقوة ووضعية المجالات المغناطيسية. كما أن مثل هذه التفاعلات لعمل بوصلة تتطلَّب أن يكون أحد المواد المتفاعلة على الأقل، غير متحرك، وتكون له وضعيةٌ ثابتة بالنسبة للمجال المغناطيسي. علمًا بأن جميع الجُزيئات البيولوجية عدا التركيبية منها تدور باستمرار حتى بروتينات غشاء الخلية. الحل جاء على يد Klaus Schulten سنة ١٩٨٢م، وطوِّر بعد ذلك من قِبل Thorsten Ritz.

حسب Hore (2011)، فإن أحدًا لم يكن ليُصدِّق أن مجالًا مغناطيسيًّا ضعيفًا كالمغناطيس الأرضي يمكن أن يؤثر على التحول الكيميائي لجزيئةٍ ما إلى أخرى؛ فقوة المجال المغناطيسي الأرضي هو أضعف بمائة مرة من قوة مغناطيس الثلاجة. والسبب يعود إلى حقيقةٍ معروفةٍ هي أن الجزيئات في حركةٍ دائمة تصطدم الواحدة بالأخرى فتدور حول نفسها وتتذبذب. والطاقة المصاحبة لهذه الحركات العشوائية هي طاقةٌ حرارية وتُتخذ كمقياسٍ تُقارن بها الطاقات الأخرى كما سبق التطرُّق إليه؛ فالأواصر الكيميائية التي تربط الذرات في الجُزيئات، هي بحدود ١٠ إلى ١٠٠ مرة أقوى من الطاقة الحرارية وهو ما يفسِّر عدم تكسُّرها. وهكذا فإن تعريض الجُزيئات إلى مقاديرَ من الطاقة أصغرَ بكثيرٍ من الطاقة الحرارية سوف لا يحقِّق شيئًا ويكون ضمن الحركة العشوائية المستمرة. وهكذا يُفترَض أن يكون تأثير المجالات المغناطيسية؛ حيث إن الجُزيئات المفردة هي ذاتُ مغناطيسيةٍ ضعيفة، ولا تستجيب حتى لتأثير المغانط القوية المصنَّعة فما بالك



شكل ١١-٥: تحفيز التحسس المغناطيسي. (a) منظر جانبي لرأس سمك القرش يُظهِر أمبولات مُستقبِلات إلكترون لورينزيني (النقاط الحمراء) والقنوات الملآنة بالمادة الجيلية الموصِّلة للكهربائية (الخطوط الرمادية). الخطوط الحمراء التي تُسمَّى الخطوط الجانبية تُستخدَم لتحسُّس التذبذُب في الماء المحيط. (b) مخطَّط يوضِّح أنبوبتَين مع قنواتَيهما. مع سباحة القرش شرقًا بسرعة v ستُسبِّب حركتُه عَبْر البُعد الأفقي للمجال المغناطيسي الأرضي Bh قوةً دافعةً كهربائية عمودية بمقدار vBh. ولكون جسم القرش وخاصة جلده عالي المقاومة الكهربائية، يؤدي الانخفاض في الفولتية بسبب كثافة التيار ρJ إلى عدم وجود فرق جهد بين السطح الظهري والسطح البطني للحيوان. لكن التوصيل الكهربائي العالي للقنوات، يؤدِّي إلى هبوطٍ كبيرٍ في الفولتية عَبْر الأمبولات. الخطوط السميكة السوداء تُشير إلى المجال الكهربائي المحيط بالقرش والمُخترِق له. مُحوَّر عن: (Johnsen & Lohmann, 2008).

بالمغناطيس الأرضي الضعيف؟! لكن الواقع يخالف منطق أن المجال المغناطيسي الضعيف لا يغيِّر الفاعلية الكيميائية. ويُقرِّب الباحث المسألة بمثالٍ بسيط؛ فلو أخذنا كتلةً منتظمة من الغرانيت بثقل ١كغم مستقرة على الطاولة، هل ستتمكَّن قوة الذبابة الضعيفة من قلبها؟ بالتأكيد لا. لكن لو حاولنا إيقاف قطعة الغرانيت على أحد حوافها، فإنها تكاد لا تقف وتكون عرضةً للتأرجح. الآن وهي في هذه الحالة الحرِجة، لو حطَّت الذبابة على قطعة الغرانيت من جهة اليمين، فإن القطعة ستسقط على جهة اليمين كما في الشكل ١١-٦ وستكون القشَّة التي كَسرَت ظهر البعير؛ فطاقة الذبابة على ضآلتها يمكن أن تحقِّق شغلًا. أو يمكن أن يكون للطاقة القليلة تأثيراتٌ كبيرة، بشرط أن تكون المنظومة في الحالة المناسبة كونَها ليست في حالة التوازن.



شكل ١١-٦: لاحظ كيف يمكن لذبابة أن تُسقِط كتلةً ثقيلةً من الغرانيت! لفهم كيف للمغناطيس الأرضي الضعيف أن يؤثِّر على التفاعُل الكيميائي. عن: (Hore, 2011).

في الكيمياء يمكن تطبيق هذا المبدأ باستخدام جُزيئاتٍ معينة (تمثِّل كتلة الغرانيت في المثال أعلاه) تُنقل إلى حالة اللاتوازن المناسبة عَبْر تجهيزها بطاقةٍ كافية. عندها سيكون لطاقةِ المجالِ المغناطيسي الضعيفة (طاقة الذبابة في المثال) القدرةُ على إحداث التأثير المطلوب. مثل هذه الجُزيئات هي أزواج الجذور (Radical pairs) التي تكون قصيرة العمر.

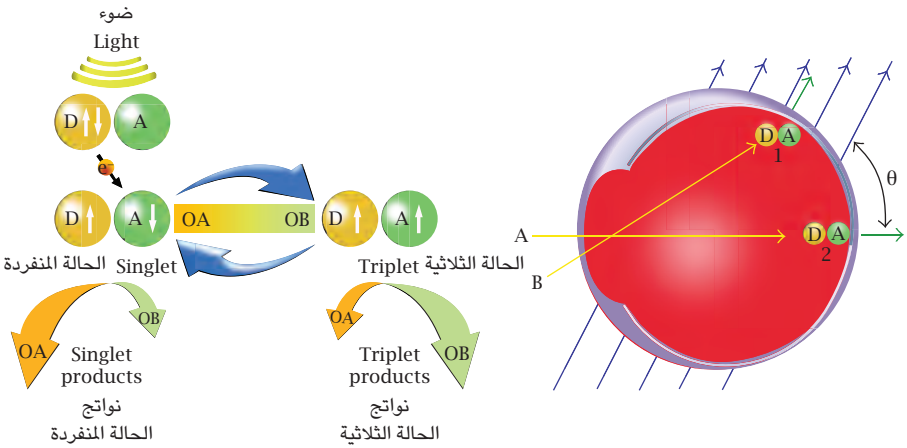
تتكون الجذور الحُرة في الخلايا خلال تفاعُلات الأكسدة خاصة في ظروف الإجهاد. من أمثلتها أنواع الأوكسجين الفعَّالة مثل H_2O_2 وOH^- و$O^{\cdot}$ وغيرها وجذور النتروجين

الفعَّالة NO^-. ويمكن أن تتكوَّن الجذور نتيجة تعرُّض الجُزيئة لفوتونات الشمس مُسبِّبةً انشطارها إلى جذور. طاقة الفوتونات تُسبِّب كسر الآصرة التي تربط ذرتَين ضمن الجُزيئة، وحيث إن الآصرة الكيميائية هي رابطةٌ من إلكترونَين؛ فعند كسرها سيكون كل إلكترون في أحد جذرَين، وبذلك سيتكوَّن زوجُ جذور في كل مرة. وحيث إن الإلكترونَين المنفصلَين نتيجة كسر الآصرة هما في حالة تشابُكٍ كمومي (Entanglement)، فإنهما سيبقيان كذلك بعد انفصالهما كلٌّ في أحد زوجَي الجذر. وهكذا يكون الجذر (Radical) هو جُزيئة بعددٍ فردي من الإلكترونات. الزوج جذر (Radical pair) لا يعني ببساطة زوجًا من الجذور الكيميائية، وإنما زوج جذرَين متشابكَين كموميًّا.

من المعروف في ميكانيك الكم أن الإلكترون كونَه جسيمًا تحت ذريٍّ يدور حول نفسه إضافة لحركاته الأخرى. هذا البَرم أو الدوران يُسمَّى البَرم المغزلي (Spin) ويمتلك عزمًا مغناطيسيًّا. البَرم المغزلي يكون عند مراقبته أو قياسه (فك التماسك Decoherence) مع اتجاه عقرب الساعة أو ما اصطُلح عليه «أعلى Up» أو أن يكون باتجاه عكس عقرب الساعة أو «أسفل Down». وعند عدم مراقبته (حالة التماسُك Coherence) فإنه يكون في حالة تراكُبٍ كمومي (Superposition) حيث يكون العزم المغزلي بالاتجاهَين في الوقت نفسه. وحيث إن كلًّا من الإلكترونَين المتشابكَين يتبعان أحد الجذرَين، سيكون لكل جذرٍ عزمٌ مغزلي؛ لذلك يمكن أن تتأثَّر حالة العزم المغزلي بالمجالات المغناطيسية. الإلكترونان المنفردان الموجودان كلٌّ في أحد الجذرَين، يمكن أن يكون لهما عزمٌ مغزليٌّ متعاكس (منفرد، غير متوافق ↑↓) أي في حالةِ عزمٍ مغزليٍّ واحدة (Singlet) كأن يكون أما أعلى أو أسفل، أو لهما العزم المغزلي نفسه (ثلاثي Triplet، متوافق ↑↑) في ثلاثِ حالاتٍ محتملةٍ أعلى أو أسفل، أو الاثنَين معًا (في حالة تراكُبٍ كمومي) (Hore & Henrik, 2016). كما أن الجذرَين يكونان في حالةِ تراكُبٍ كموميٍّ حيث يمكن أن يكونا في الحالة المنفردة والثلاثية في نفس الوقت. لتوضيح هذه المسألة فإن للإلكترون عزمًا مغزليًّا يساوي ١ / ٢، فعندما يكون لزوجِ الإلكتروناتِ عزمٌ مغزليٌّ متعاكس ↑↓، فإن ١ / ٢ − ١ / ٢ = ٠ وهذا ما يُعبَّر عنه بحالة العزم المغزلي المنفردة. لكن عندما يكون العزم المغزلي للإلكترونَين بالاتجاه نفسه ↑↑ يصبح: ١ / ٢ + ١ / ٢ = ١. يغيِّر التأثيرُ المغناطيسي البرمَ المغزلي من الحالة المنفردة $s = 0 \longrightarrow 2s + 1 = 1$ إلى الحالة الثلاثية $s = 1 \longrightarrow 2s + 1 = 3$ (Tarlacı & Pregnolato, 2015). وهكذا ستكون ثمَّة ثلاثُ حالاتٍ محتملة (McFadden & Al-Khalili, 2014). تحصُل التفاعُلات الكيميائية حسب قاعدة هوند (Hund's Rule)

بتكوين الآصرة فقط بين إلكترونَين لهما عزمٌ مغزلي متعاكس. وعندما تُكسر الآصرة بحالةٍ معيَّنة كأن تتعرَّض إلى فوتونات، يتموضع كل إلكترون في جُزيئةٍ معيَّنة، وبذا ينشأ الزوج الجذري، ويحتفظ كل إلكترونٍ بعزمه المغزلي الأصلي؛ أي كما في الحالة المنفردة؛ لذلك يمكن أن يُعاد تكوين الآصرة بسهولة. الحالة الثلاثية (التراكب) تُعجِّل تفاعُل الجذر وتكوين الناتج، بينما تكون الحالة المنفردة في وضعيةِ توازُن بين المواد المتفاعلة والناتج. غير أن تأثير المجال المغناطيسي يمكن أن يغيِّر العزم المغزلي لأحد إلكترونَي الجذر المتعاكِسَي الاتجاه، وبذلك يُحوِّل الحالة المنفردة إلى ثلاثية (تراكُب) (Hore & Maria, 2011؛ Henrik, 2016). وحسب تعبير Hore (2011) يمارس زوجُ الجذر رقصةً معقدة تتمثل بالتذبذب بين الحالة المنفردة والحالة الثلاثية وبالعكس ملايين المرات في الثانية. وهذا يحصُل نتيجةَ التماسُك الكمومي للبَرم المغزلي للإلكترونَين. وحيث إن الحالة المنفردة والحالة الثلاثية متماثلتان طاقيًّا، لكنهما غير متساويتَين احتماليًّا، فإن مجال المغناطيس الأرضي رغم ضعفه (أقل من ١٠٠ ميكروتيسلا) سيؤثِّر في توقيتات ومَدَيات هذه الرقصة، مثلما غيَّرَت الذبابة وضعيةَ كتلة الغرانيت في المثال السابق. وهكذا سيعمل المجال المغناطيسي على ترجيحِ احتمالاتِ ناتج هذا التفاعُل أو ذاك. وإذا كان ذلك يعتمد على وضعية زوج الجذر؛ فسيكون ذلك تحسُّسًا للاتجاه من خلال تحسُّس التغيُّر في كميةِ أحدِ نواتجِ التفاعُل (شكل ١١-٧).

للبحث عن موقعِ وجودِ تفاعُل هذه الجذور الحرة التي تتحسَّس المجال المغناطيسي الأرضي، استعرض McFadden & Al-Khalili (2014) محاولاتِ العلماء لتحديده؛ فقد اعتقد Klaus Schulten وهو منطقي في ذلك أن يكون هذا الموقع هو الدماغ. وفي محاضرة ألقاها Schulten سنة ١٩٧٨م، بيَّن أن فريقه تمكَّن من تكوين زوج جذورٍ متشابكةٍ باستخدام أشعة الليزر. ومن الحاضرين كان حائز جائزة نوبل في الكيمياء فيما بعدُ Dudley Herschbach الذي سأل عن موضع الليزر في الطيور، فكان الجواب المنطقي هو عين الطير باعتبارها المسئولة عن تحسُّس الإشارات الضوئية. وقبل ذلك اقترح Mike Leask سنة ١٩٧٧م، أن مصدَر التحسُّس المغناطيسي يقع في المُستقبِلات الضوئية في العين. متأثِّرًا بهذه النتائج، أجرى Wolfgang Wiltschko تجاربَ على الحمام الزاجل *Columba livia domestica* حيث بيَّن أن تشويش المجال المغناطيسي أدى إلى عدم قدرة هذه الطيور في الاهتداء إلى مواقعها الأصلية. كما أن نقل هذه الطيور في صندوقٍ مظلمٍ دون تشويش المجال المغناطيسي، أدى أيضًا إلى صعوباتٍ في عودة الطيور عند



شكل ١١-٧: رسمٌ تخطيطيٌّ لآلية زوج الجذور للتحسُّس المغناطيسي. (a) في الجُزيئات المتخصِّصة باستلام الفوتونات (الكربتوكرومات) يقوم الضوء بعملية نقل إلكترون بين الجُزيئات المانحة (D) والجُزيئات المستقبِلة (A) مُولدًا زوجَ جذرٍ في الحالة المنفردة (سهام ↑↓) أو الحالة الثلاثية (سهام ↑↑). التحوُّل المتبادَل بين الحالة المنفردة والحالة الثلاثية (السهام الزُّرق) تتغيَّر تحت ظروف المجال المغناطيسي المختلفة (كمثال، وضعية A) (OA) أو B (OB) والتي بدورها تُغيِّر نسبةَ نواتجِ الحالة المنفردة إلى نواتج الحالة الثلاثية (معبَّر عنها بحجم السهام السفلية). (b) الضوء الداخل إلى العين (مثلًا الشعاعَين A وB) يسير تكوين زوج جذور في جُزيئات الكربتوكروم موجَّهةً طبيعيًّا على سطح الشبكية (سهام خضر) في الموقعَين ١ و٢ واللذَان هما موجَّهان بزوايا مختلفة (u) نسبةً إلى المجال المغناطيسي الخارجي (الخطوط الزُّرق). عدم التجانُس في تكوين زوج الجذور عَبْر سطح الشبكية يُمكِن أن يؤدِّي إلى إسباغ انطباعٍ إضافيٍّ للمجال المغناطيسي لنظَر الحيوان. مُحوَّر عن: Shaw *et al.*, (2015).

إطلاقها إلى المواقع الأصلية؛ ما يعني أن الضوء ضروريٌّ لرسم الخارطة المغناطيسية لها.

سنة ١٩٩٨م، تم اكتشاف البروتين الصبغي كربتوكروم (Cryptochrome) في عيون حشرات ذباب الفاكهة *Drosophila* ودَورَه في الإيقاع اليومي (Circadian rhythm) المعتمد على الضوء. الكربتوكرومات (Cryptochromes) هي بروتيناتٌ فلافينية تعمل كمستقبِلاتٍ ضوئية، شُخِّصَت أولا في النبات النموذجي الخردل *Arabidopsis thaliana*

حيث تلعب أدوارًا مهمةً في النمو والتميُّز، ثم تم تشخيصها في الأحياء البدائية النواة، والعديد من الأحياء الحقيقية النواة. وتعمل هذه المركَّبات في الإيقاع اليومي للحيوانات، والتحسُّس المغناطيسي في الطيور المهاجرة. والكربتوكرومات شديدة القرب من الإنزيمات المُحللة ضوئيًّا Photolyases التي هي تطوُّر بروتيناتٍ فلافينية قديمة تحفِّز تصليح الـ DNA المعتمد على الضوء (Chaves *et al.*, 2011). وكان Henbest *et al.*, (2008) قد أشاروا إلى أن المجال المغناطيسي يؤثِّر على زوج الجذور المتكوِّن ضوئيًّا من الفلافين–تربتوفان في الـ Photolyases في البكتيريا *Escherichia coli*.

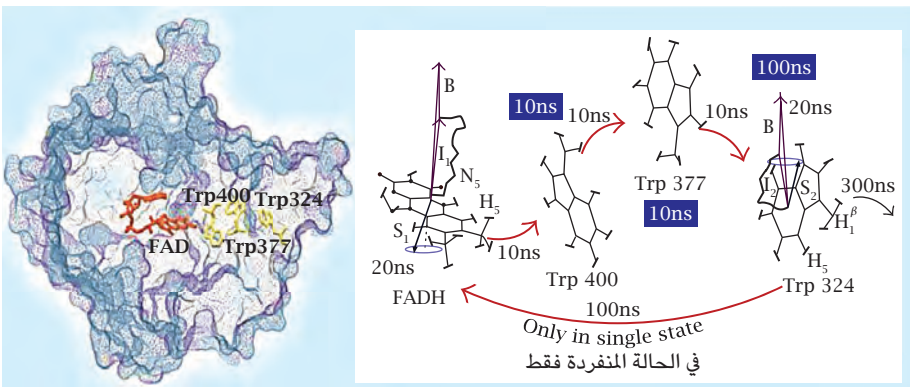
وُجدَت أربعةُ أنواعٍ من الكربتوكرومات في عيون الطيور هي: Cry1a وCry1b وCry2 وCry4. وتشير المُعطَيات إلى أن Cry1a هو الجُزيئة المستقبِلة للضوء والمحدِّدة للاتجاه Wiltschko & Wiltschko, (2019).

أثبت الباحثون Zeng *et al.*, (2018) الاستجابة المغناطيسية لكربتوكروم ١ المثبَّت على قطبٍ كهربائيٍّ من الذهب عند تعريضه للضوء الأزرق. وباستخدام جهاز قياس الفولتية، قدَّموا الدلائل على تحفيز المجال المغناطيسي لنقل الإلكترون المُحفز ضوئيًّا من الكربتوكروم ١ إلى القطب المغناطيسي مظهرًا معدَّلَ استجابةٍ مغناطيسيًّا ثابتًا وتيارًا كهربائيًّا متغيرًا. كما أن آلية نقل الإلكترون المتضمِّنة تكوين جذورٍ مُحفزة ضوئيًّا في الكربتوكروم تكون حسَّاسة للمجال المغناطيسي الضعيف. وإن الجذر الحر الطويل البقاء $FAD^{\bullet-}$ هو المسئول عن تيار فاراداي الإلكتروكيميائي الذي تم كشفُه. وكمُستقبِل للضوء، فإن كشف وجود معدَّلٍ ثابتٍ تغيَّر بنسبة ٥,٧٪ بنقل الإلكترون مقابل مجالٍ مغناطيسيٍّ ٥٠ ميكروتيسلا له معنًى مهمٌّ في إشارات المجال المغناطيسي، وعملية الإيقاع اليومي تحت تأثير المجال المغناطيسي.

ومعروف أن الكربتوكروم يمكن أن يُكوِّن جذورًا حرة عند تفاعله مع الضوء. سنة ٢٠٠٠م، نشَر فريق Schulten بضمنهم Thorsten Ritz (Ritz *et al.*, 2000) بحثًا مهمًّا حدَّدوا فيه الكربتوكروم على أنه المُستقبِل الذي يعمل في البوصلة المغناطيسية للطيور. كما أن تحديد موقع الطيور في مجال المغناطيس الأرضي يعتمد على الرؤية.

يعتمد عملُ هذه المنظومة على امتصاصِ فوتون من الضوء الأزرق من قِبل جُزيئة الصبغة الحسَّاسة للضوء FAD الموجودة في جُزيئة البروتين كربتوكروم حيث يعاني تفاعلاتِ أكسدة–اختزال. تُستخدَم طاقة الفوتون لإطلاق إلكترونٍ من إحدى ذراتِ جُزيئة FAD مخلِّفة فراغًا إلكترونيًّا ليتكوَّن شبه الكينون $FADH^{\circ}$ مُكوِّنًا الجذر الأول. هذا الفراغ

يمكن أن يُملأ بإلكترونٍ آخر يُمنَح من زوجٍ من الإلكترونات المتشابكة كموميًّا في جُزيئة الحامض الأميني تربتوفان (Tryptophan) ضمن جُزيئة الكربتوكروم حيث يعاني مزيدًا من الاختزال الضوئي مُكوِّنًا FADH– والذي ستُعاد أكسدتُه بمعزلٍ عن الضوء. وخلال هذه العملية يتكوَّن الجذر الثاني Wiltschko & Wiltschko, (2019). مع التشديد على أن الإلكترونَين يبقيان متشابكَين كموميًّا (شكل ١١-٨). وهكذا يمكن لهذَين الإلكترونَين أن يُكوِّنا حالاتِ تراكُبٍ منفردة (Singlet)/ثلاثية (Triplet) والتي هي المنظومة الكيميائية الفائقة الحساسية للمجال المغناطيسي، والتي سبق الحديث عنها والتي يتمكَّن الطير بواسطتها من تحديد موقع القطب المغناطيسي الأقرب.

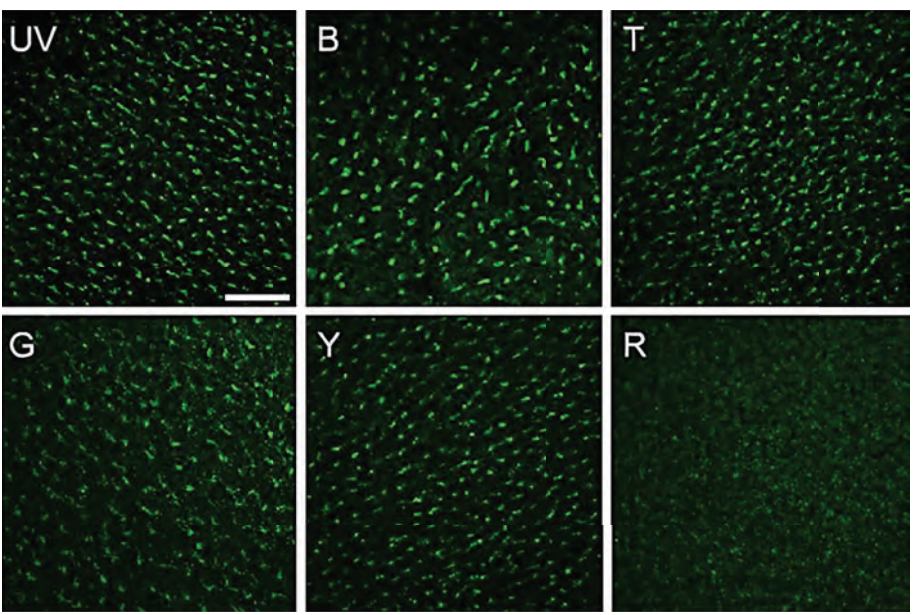


(a) (b)

شكل ١١-٨: الكربتوكروم (Cryptochrome) هو المستقبِل المغناطيسي المعتمد على زوج الجذور. (a) المكوِّنات الرئيسة لهذه الصورة المظهرة للكثافة الإلكترونية هي حامل الصبغة فلافين أدنين ثنائي النيوكليتيدات Flavin adenine dinucleotide (FAD) وثلاث جُزيئات من الحامض الأميني تربتوفان (Tryptophan) المشتركة في اختزال حامل الصبغة المذكور إلى FADH. (b) بعد إثارة الكربتوكروم بواسطة فوتون الضوء الأزرق، ينتقل الفراغ من FADH عَبْر سلسلة وحدات الحامض الأميني تربتوفان (خطوات التفاعُل موسمة بثوابت الزمن، والتربتوفان بزمن بقاء حالة جذورها). البَرم المغزلي للإلكترون S1 وS2 يسبق المجال المغناطيسي الموضعي المتكوِّن بفعل المجال المغناطيسي الخارجي B ومساهمة I1 وI2 من البرم المغزلي النووي على الجذرَين. إرجاع الفراغ من تربتوفان ٣٢٤ إلى FADH يُخمِد الحالة الفعَّالة للكربتوكروم لكن ذلك يحدُث فقط عندما يكون البرم المغزلي لإلكترونَي الجذرَين في الحالة المنفردة (singlet). عن: Johnsen & Lohmann (2008).

تمكَّن Liedvoge *et al.*, (2007) من عزل الكربتوكروم (Cryptochrome 1a) من شبكية طائر الدخلة *Sylvia borin* بطُرقٍ جُزيئيةٍ وأثبتوا أن هذه الفلافوبروتينات تُستثار فعلًا بواسطة الضوء في الطيف الأزرق مؤديةً إلى تكوين الجذور الحرة وفترةُ بقائها بحدود الملي ثانية (ms)، ومؤكِّدين أن هذه الخواص البيوفيزيائية تُرشِّح هذا البروتين كوسيطٍ ضوئيٍّ أساسي نموذجي، وكمُستقبلِ بوصلةٍ مغناطيسيةٍ تعتمد أزواج الجذور.

ويُشير Wiltschko & Wiltschko (2014) إلى أن Cry1a في عين الدجاج وطيور أبو الحناء الأوروبي، يُوجَد في أغشية الأقراص في الأجزاء الخارجية لمخاريط UV–. وتُبيِّن الدراسات النسيجية المناعية أنها تنشَط بالأطوال الموجية من الضوء، التي تسمح بتوجيه البوصلة المغناطيسية في الطيور. ويُظهِر الشكل ١١-٩ وجودَ هذا البروتين في الشبكية واستجابتَه للأطوال الموجية المختلفة من الضوء.



شكل ١١-٩: كمية كربتوكروم Cry1a المُنشط والموسم بمصلٍ مضادٍّ معيَّن في شبكية عين الدجاج بعد تعريضه للضوء بأطوالٍ موجيةٍ مختلفة. UV: ٣٧٣ن م UV, B: ٤٢٤ن م ضوء أزرق، T: ٥٠٢ن م ضوء تركواز، G: ٥٦٥ن م ضوء أخضر، Y: ٥٩٠ن م ضوء أصفر، R: ٦٣٥ن م ضوء أحمر. عن Wiltschko & Wiltschko (2014).

علاوةً على تأكيد Stapput *et al.*, (2010) على اعتماد البوصلة المغناطيسية للطيور في تحديد اتجاهات طيرانها على الضوء؛ فإنهم بيَّنوا أن معلومات تحديد الاتجاه التي يحصل عليها الطير، تتم بواسطة العين اليمنى؛ فباستخدام ورقٍ لتغطية العين حيث تُستخدم أوراقٌ لا تشوِّش الرؤية، أو أوراقٌ تشوِّشها بنسبة ٧٠٪، تبيَّن أن تغطية العين اليسرى بورقٍ يشوِّش الرؤية لا يؤثِّر على تحديد طيور أبو الحناء الأوروبي *Erithacus rubecula* لاتجاهات طيرانها، لكن تغطية العين اليمنى بورقٍ يشوِّش الرؤية يؤدي إلى تشويش قدرتها على تحديد الاتجاه.

انتبه باحثون إلى طبيعة الضوء الذي تتحسَّسه أزواج الجذور في البوصلة الكيميائية؛ فالأبحاث السابقة في هذا المجال تعتبر أن الضوء الذي ينشِّط أزواج الجذور، وبالتالي عمل البوصلة الكيميائية وتحسُّس المجال المغناطيسي، هو غير اتجاهي وغير مُستقطب، وأن امتصاص الضوء يكون متجانس الاتجاه (Isotropic)؛ فقد بيَّن Muheima *et al.*, (2016) أن ضوء السماء الطبيعي يدخل شبكية عيون الطيور باتجاهٍ أُحاديٍّ عَبْر القرنية والعدسات، ويكون مُستقطبًا جزئيًّا. كما أن جُزيئات الكربتوكروم تمتص الضوء المُستقطب باتجاهٍ محدَّدٍ ما يوحي أن البوصلة المعتمدة على الضوء هي صميميًّا حسَّاسة للاستقطاب. وتَم إثبات هذه الفرضية بتجاربِ سلوكِ طيور الفنجز *Taeniopygia guttata* وتحسُّسها للضوء المُستقطب وغير المُستقطب المسلَّط من أعلى؛ فقد توجَّهَت الطيور جيدًا عند تسليط الضوء المُستقطب حيث يكون محوره موازيًا للمجال المغناطيسي الأرضي. غير أن توجُّه الطيور يُشوَّش عند تسليط الضوء المُستقطب بمحورٍ عمودي على المجال المغناطيسي الأرضي.

وتُظهِر التجارب حول سلوك الطيور ثلاثَ خصائصَ لبوصلتها المغناطيسية:

(١) تعمل تلقائيًّا ضمن نافذةٍ وظيفيةٍ ضيقة حول شدة المجال المغناطيسي المحيط، لكنها يمكن أن تتكيَّف مع الشدَّات الأخرى.

(٢) أنها بوصلة ميل (Inclination compass) لا تعتمد على قطبية المجال المغناطيسي، وإنما على الطبيعة المحورية لخطوط المجال.

(٣) تحتاج إلى ضوء بموجاتٍ قصيرة من الأشعة فوق البنفسجية إلى اللون الأخضر ٥٦٥ن م (Wiltschko & Wiltschko, 2014).

البوصلة المغناطيسية والبوصلة الكيميائية المعتمدة على أزواج الجذور

Magnetic compass and radical pairs chemical compass

حسب McFadden & Al-Khalili (2014) فإن البوصلة المغناطيسية يمكن أن تشوَّش بالمجال المغناطيسي المستقر، وهو ما يحصُل عند تقريب قضيبٍ مغناطيسي، وكذلك بالمجال المغناطيسي المتناوب، عند تعريضها إلى قضيبٍ مغناطيسيٍّ يدور بسرعةٍ بطيئةٍ معيَّنة؛ أي بتردُّد واطئ تتمكَّن البوصلة من متابعته، بينما يتلاشى التأثير في التردُّدات العالية.

أما البوصلة الكيميائية فهي تعتمد، كما سبق شرحه، على حالة التراكُب الكمومي للحالة المنفردة، والحالة الثلاثية لزوج الجذر؛ والتي ترتبط بتغيُّر الطاقة وبالتالي بالتردُّد. هذا التغيُّر بين الحالتَين الذي يحصل بتردُّدٍ يمكن أن يكون بملايين المرَّات في الثانية. وهكذا يُمكِن أن تتأثَّر هذه المنظومة بتردُّد المجال المغناطيسي عن طريق الرنين فقط، عندما يكون تردُّد المجال المغناطيسي بنفس تردُّد زوج الجذر؛ أي أن يكونا متوافقَين. في هذه الحالة يقوم الرنين بضخ الطاقة في المنظومة، والتي ستؤدي إلى تغيُّر التوازُن الحرِج بين الحالة المنفردة والحالة الثلاثية. وهذا ما تبيَّن من تجربة فريق Ritz-Wiltschko حيث إن تعريض الطيور إلى مجالٍ مغناطيسي بتردُّد ١,٣ ميغاهيرتز سبَّب تشويشًا لقدرتها على التوجُّه، بينما التردُّدات الأعلى أو الأقل من ذلك كان تأثيرها أقل. وهكذا يبدو أن المجال يتوافق رنينه مع شيء يتذبذب بتردُّدٍ عالٍ جدًّا في البوصلة الكيميائية للطيور. وهكذا صار من الجلي أن هذه البوصلة ليست بوصلةً مغناطيسيةً عادية، وإنما مع زوج جذور متشابكة كموميًّا في حالاتِ تراكُبٍ منفردة وثلاثية. وعزِّزَت هذه النظرية بالعديد من التجارب اللاحقة (Kerpal *et al.*, 2019).

ومن أجل تحقُّق هذه الظاهرة الكمومية لا بد من بقاء حالة التشابك لميكرو ثانية على الأقل، لإتمام عمليات التقلب لتذبذبات المجال المغناطيسي، ومن أجل تفادي فك التماسُك. وكان Liedvoge *et al.*, (2007) قد أشاروا إلى فترة بقاء الجذور الحُرة في شبكية طائر الدخلة بالميلي ثانية؛ أي ألف مرة أكثر من الحد الأدنى. وبيَّنَت الحسابات المعتمدة على نظرية المعلومات الكمومية لمعطَيات التجارب الخاصة ببوصلة زوج الجذور، أن ظواهر التراكُب الكمومي والتشابُك الكمومي فيها تستمر لعشرات الميكروثانية على الأقل، وهو وقتٌ يكفي للحيوان أن يستغلها في تحسُّس المجال المغناطيسي الأرضي، ويحدِّد اتجاه طيرانه. كما يؤكِّد عمل ميكانيك الكم في تحسُّس المجال المغناطيسي في الحيوانات

(Gauger *et al.*, 2011). وأكَّد Fay *et al.*, (2020) أن المقاربات شبه التقليدية لحركيات البَرم المغزلي لأزواج الجذور، يمكن أن توفِّر فقط وصفًا كافيًا لتكوين نواتج التفاعل غير المتناظر، حينما لا يكون ثمَّة ارتباطُ لفٍّ مغزليٍّ إلكتروني. وهذه الحالة من غير المرجَّح أن تتماشى مع وظيفة تحسُّس المجال المغناطيسي. ومع أن الطرق شبه التقليدية يمكن أن تعمل جيدًا مع أزواج الجذور القصيرة البقاء مع ارتباط لفٍّ مغزليٍّ أقوى، والتي يمكن معها معاملة التآثُرات الفائقة الدقة كاضطرابات، يبدو أن المحاكاة الصحيحة لتأثيرات المجال المغناطيسي غير المتناظر المناسبة للتحسُّس المغناطيسي، تحتاج إلى حسابات ميكانيكا الكم الكاملة؛ لذلك يستنتج الباحثون أن التحسُّس المغناطيسي للطيور بأزواج الجذور، له مكانٌ حقيقيٌّ في البيولوجيا الكمومية.

هذه النتائج حفَّزَت البحث في هذا الموضوع، وتم الكشف عن التحسُّس المغناطيسي في أنواعٍ كثيرةٍ من الطيور بما فيها غير المهاجرة؛ مثل الفنجز *Taeniopygia guttata* (Pinzon-Rodriguez & Muheim, 2017) والحمام الزاجل *Columba livia domestica* (Wiltschko and Wiltschko, 1981; 1998) والكركند الشوكي والراي اللسَّاع وأسماك القرش والحيتان والدلافين والدجاج *Gallus gallus* وحشرات النحل والصراصر والميكروبات. هذه النتائج تشير إلى أن وجود نظام كهذا في هذا الطيف الواسع من الحيوانات؛ يعني أنه نتاجٌ تطوُّريٌّ لمئات الملايين من السنين وربما أكثر. إنه مثالٌ رائع لاكتشاف وتطبيق الأحياء لأهم ظواهر ميكانيك الكم (McFadden & Al-Khalili, 2014; Hiscock *et al.*, 2016).

الفصل الثاني عشر

دور البيولوجيا الكمومية في عملية الرؤية

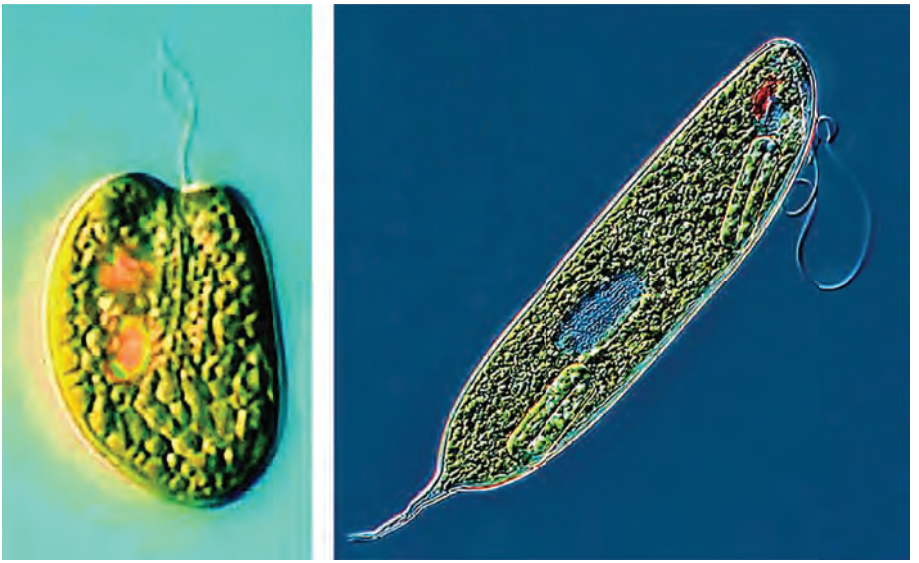
Quantum Biology in Vision

(١) منظومات الرؤية في الأحياء

Vision System In Living Organisms

الضوء كما هو معروف، هو المصدر الأساس للطاقة، وفي الوقت نفسه يوفِّر معلوماتٍ مهمة عن البيئة، تشمل تفاصيلَ عن المكان والزمان. في الحيوانات والنباتات والفطريات يتحكَّم الضوء بالإيقاعات اليومية (Circadian rythms) لهذه الأحياء؛ حيث تُضبط فعالياتها الأيضية على أساسه. وفي البكتيريا ينظِّم الضوء استجابات الإجهاد والحركة والاتصال وتكوين الأيضات الثانوية أو المضادات الحيوية. لاحظ Maresca *et al.*, (2019) أن البكتيريا المائية Actinobacteria وهي رمِّيَّة التغذية، تنمو أسرع في الضوء حيث تربط هذا النشاط الأيضي بنشاط أحياءِ التركيب الضوئي، الذي يكون مُنتِجًا للموادِّ العضوية أثناء النهار. ووجدوا أن هذه البكتيريا تتحسَّس الضوء بواسطة الكريبتوكروم من نوع CryB.

وفي بعض الأوَّليَّات؛ مثل اليوغلينا والكلاميدوموناس، وهي أحياء وحيدة الخلية، تُوجد نقطةٌ عينية برتقالية اللون (شكل ١٢-١). الانتحاء الضوئي الإيجابي باتجاه مصدر الضوء أو الانتحاء الضوئي السلبي بعيدًا عن مصدر الضوء، مهمٌّ جدًّا لحياتية هذه الأحياء؛ فالنقطة العينية ليست هي مستقبل الضوء، لكنها كتلة من صبغة الكاروتين تُغطِّي مستقبِل الضوء من جهةٍ واحدة.



شكل ١٢-١: الكلاميدوموناس *Chlamydomonas rheinhartii* (يسار) واليوغلينا *Euglea gracilis* (يمين). عن: Williams (2016).

في اليوغلينا المستقبِل الضوئي هو كتلةٌ مضغوطة جيدًا من بروتينٍ شبيه بالرودوبسين يقع بعد النقطة العينية، ويمتص الضوء في طيف ٥٠٠–٥٢٥ن م.

تتألَّف النقطة العينية في الكلاميدوموناس من أغشية ثالاكويد وطبقاتٍ غنية بكرياتٍ غنية بالكاروتين. ولهذا الكائن الحي حاملُ صبغةٍ مرافق للفلافين حسَّاس إلى اللون الأزرق بطيف ٤٤٠ن م (Williams, 2016).

في الحيوانات المتطورة تمثِّل العين منظومةً ضوئيةً معقدة جدًّا، تجمع الفوتونات من البيئة المحيطة، تنظِّم كثافتها بواسطة الحجاب (Diaphragm) وتركِّز الفوتونات بواسطة مجمع عدساتٍ قابلة للتحكُّم، ثم تُوصلُها إلى الشبكية التي تحوِّلها إلى إشاراتٍ كهربائية. هذه الإشارات الكهربائية تُرسل عَبْر مسارٍ معقَّد يربط العين بالقشرة المسئولة عن الرؤية وغيرها من المناطق في الدماغ، وأخيرًا تقدح ما يعرف بـ «الرؤية الواعية». الشبكية التي تقع في مؤخرة العين هي طبقةٌ حسَّاسة للضوء، وتحتوي على نوعَين من مُستقبِلات الضوء؛ المخاريط (Cones) والقضبان (Rods). المخاريط وهي خلايا تكون حسَّاسة للألوان، وعددها يبلغ حوالي ٦ مليون مخروط، ويمكن تمييزها إلى

«حمراء» ٦٤٪ و«خضراء» ٣٢٪ و«زرقاء» ٢٪. هذه التراكيب تكون مسئولةً عن الرؤية العالية التفريق. القضبان عددُها أعلى بكثيرٍ من المخاريط؛ حيث تكون في عين الإنسان بحدود ١٢٥ مليونًا، كما أنها أعلى حساسيةً للضوء من المخاريط بحدود ١٠٠٠ مرة، لكنها أقلُّ حساسيةً للألوان. القضبان تكون مسئولةً عن الرؤية المتكيِّفة مع الظلام بعد ٣٠ دقيقة من التعرُّض للظلام، والتي يمكن أن تتحسَّس الفوتونات المفردة (Pizzi *et al.*, 2016).

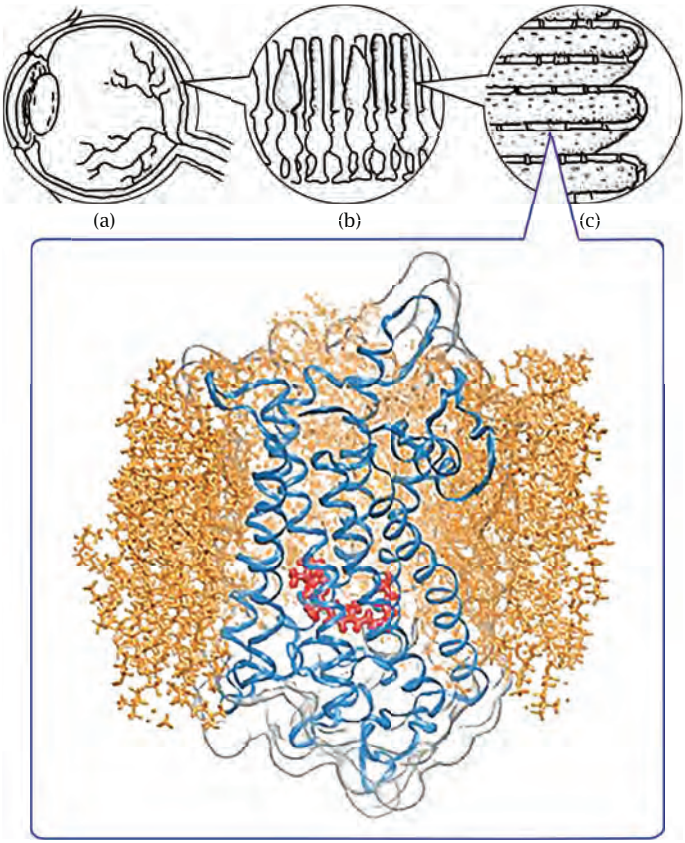
(٢) تأثير الفوتون المفرد في الأحياء

Effect of single photon in living organisms

الجسيمات المفردة كالفوتونات لها تأثيراتٌ مباشرة في تركيب الجُزيئات البيولوجية المفردة، كما يحصل في جُزيئات الشبكية حيث تغيِّر هذه الجُزيئات ترتيبها عند امتصاصها لعددٍ قليلٍ من الفوتونات، وما يترتَّب على ذلك من حساسيةٍ كبيرةٍ للضوء، كما في بروتينات الرودوبسين؛ ما يجعل العين من أفضل العدسات على الإطلاق. بعض الباحثين عَدَّ العين كآلة قياسٍ كمومية (Rieke & Baylor; Chakravarthi *et al.*, 2008; Devi *et al.*, 2008; Khoshbin-e-Khoshnazar, 2014).

من المعروف الدور الذي يلعبه البروتين رودوبسين الموجود في الشبكية في المراحل الأولى من عملية الرؤية باعتباره مادةً فعالةً ضوئيًّا.

يعمل الرودوبسين عند تفاعله مع الفوتونات في تحويلِ المجاميعِ الملحقة به من وضعيةِ cis إلى وضعيةِ trans، وهذه تُحدِث تأثيرًا في العصب البصري الذي ينقل الإشارة إلى الدماغ، ومعالجتها لتتشكَّل الصورة. بيَّن الباحثون Schoenlein *et al.*, 1991 أن عملية التحوُّل هذه تحصُل خلال ٢٠٠ فمتوثانية فقط؛ ما يجعلها ضمن فترة التماسُك الكمومي؛ حيث تكون فتراتُ فك التماسك الكمومي بمدَيَات البيكو أو النانوثانية. كما أكَّد Wang *et al.* (1994) المبدأ ذاته في تجاربَ مماثلة. وبيَّن Johnson *et al.* (2017) أن التفاعلات الكيموضوئية الفائقة السرعة في الرودوبسين تبدأ بتحوُّلاتٍ اهتزازيةٍ من الحالة القاعية للمواد المتفاعلة إلى الحالة المُحفزة بالأنماط الاهتزازية؛ فالتفاعلات الكيموضوئية الأوَّلية في الرؤية هي أزمرة بروتين الشبكية الرودوبسين وتكون تفاعلاتٍ اهتزازيةً متماسكة، لكن عوامل Franck-Condon المسئولة عن بدء التفاعُل التي يصعُب حلُّها باستخدام الطرق المعتادة، أمكن حلُّها باستخدامِ مطيافِ الفوتون الثنائي الأبعاد.



شكل ١٢-٢: مستقبلات الرؤية. (a) مقطعٌ عرضي في العين يُظهِر العدسة والقزحية والخلايا العصبية على اليمين. (b) تحتوي الشبكية في الحيوانات على ملايين الخلايا المستقبِلة القضبانية والمخاريط. يُظهِر الشكل أشكالَ وترتيبَ الخلايا القضبانية والمخاريط. (c) الأقراص في الخلايا المخروطية والقضبانية. هذه الأقراص تكون مجوَّفة وتتألَّف من أغشيةٍ مشبعةٍ بالبروتين المُستقبِل للضوء رودوبسين في حالة الخلايا القضبانية، وبضع أنواعٍ من بروتينات إيودوبسين (Iodopsin) في حالة المخاريط. تم إبراز الرودوبسين في الشكل. (d) يمتص الضوء بواسطة الراتينال (أحمر) الجُزيئة الحاملة للصبغة تقع داخل الرودوبسين (الأنبوبة الزرقاء والسطح الرمادي)، والتي بدورها تقع في الغشاء الدهني (بني). الراتينال المثار بالضوء يعاني تفاعُل أزمرة قادحًا إشارة رؤية. عن: Schulten & Hayashi (2014).

حسب Tinsley *et al.*, (2016) فإن التجارب التي أُجريَت في أربعينيات القرن العشرين، أثبتَت قدرة الناس المدرَّبين على الظلمة تحسُّس الإشارات الضوئية لحد عددٍ قليلٍ من الفوتونات. غير أن قدرة الإنسان على تحسُّس الفوتون المفرد بقيَت غير معروفة، بسبب الضوضاء التي تُرافِق عملية الرؤية في جميع مراحلها، وكذلك التقنيات المستخدمة خاصةً الضوء من مصادرَ تقليدية. لكن استخدام ضوءٍ منخفض التغيُّرات الإحصائية سيُزيل تلك الضوضاء المحدِّدة لتحسُّس المستويات المنخفضة من الضوء. وباستخدام فوتوناتٍ مفردة بطاقة ٤ × ١٠$^{-١٩}$ جول، وهي تمثِّل أضعف إشارةٍ ضوئيةٍ كمومية، تَم إثباتُ قدرة العين البشرية على تحسُّس الفوتونات المفردة باحتماليةٍ مهمةٍ أعلى من الصدفة. كما بيَّنَت التجربة أن امتصاص الضوء تحت هذه الظروف يُحدِث تغييرًا في عملية الاكتساب لنظام الرؤية يتصف بتطورٍ زمنيٍّ يستمر لثوانٍ. وأكَّد Holmes *et al.*, (2018) أن ملايين الخلايا القضبانية يتمكَّن كلٌّ منها على تحسُّس الفوتون المفرد.

استعرض Schulten & Hayashi (2014) البيولوجيا الكمومية للراتينال (Retinal) باعتباره حاملَ صبغةٍ بيولوجية، معروفًا دوره كمُستقبِل للضوء في الأشكال العليا للحياة، كما أنه يعمل كهوائي في تحويل طاقة الضوء والانتحاءات الضوئية في البكتيريا. يُوجد حامل الصبغة في بروتينات الشبكية المختلفة أهمها مُستقبِل الضوء الرودوبسين (Rhodopsin) ومضخَّة البروتون المسيرة ضوئيًّا الرودوبسين البكتيري (Bacteriorhodopsin). يُظهِر الراتينال قدرةً عالية على تكييف خواص امتصاصه الطيفية، والاختيار الدقيق لنواتجه الضوئية، والتي تُوجَّه بواسطة بروتينات الشبكية.

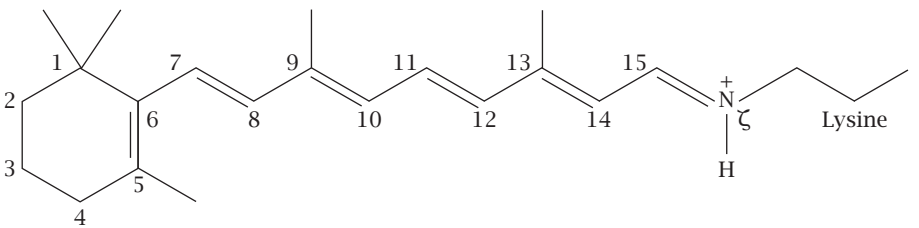
الرودوبسين بروتينٌ غشائي (مرتبط بغشاء الخلية) في الخلايا القضبانية في شبكية عيون الحيوانات، ويحتوي على جُزيئة راتينال كحاملةِ صبغةٍ محاطةٍ بسبعة لوالبَ غشائيةٍ للبروتين (شكل ١٢-٢).

يعمل الرودوبسين كبروتينٍ مُستقبِلٍ للرؤية الأُحادية اللون خاصة في الظُّلمة. أما بروتينات الشبكية المناظرة الأخرى وهي الأيودوبسينات، فتُوجد في خلايا المخاريط، وتعمل كمستقبِلاتٍ لرؤية اللون في ضوء النهار. تعمل بروتينات راتينال أيضًا في بعض أنواع البكتيريا كمضخَّات بروتون، مسيرة ضوئيًّا، والتي تحافظ على الجهد الكهربائي لغشاء الخلية كما في حالة الرودوبسين البكتيري، أو كمتحسِّساتٍ ضوئيةٍ في الانتحاءات الضوئية البكتيرية.

كل بروتينات راتينال متشابهة تركيبيًّا؛ حيث تتألَّف من سبعة لوالب، وحامل الصبغة يرتبط مع الحامض الأميني لايسين كمجموعةٍ جانبية. آليات التنشيط الضوئي لوحدات بروتين الراتينال تتضمَّن تفاعُل أزمرة ضوئيًّا وعملياتٍ كمومية.

(٣) الراتينال في الرودوبسين والرودوبسين البكتيري

Ratinal in Rhodopsin and bacteriorhodopsin



شكل ١٢-٣: التركيب الكيميائي لحامل الصبغة راتينال المرتبط بالحامض الأميني لايسين بواسطة قاعدةِ شيف بروتونيةٍ لبروتون التحسُّس رودوبسين. ذرة النتروجين في الآصرة تكون بروتونية. هيكل البوليين للراتينال ينتهي في جهة اليمين بقاعدة شيف البروتونية وفي الجهة اليسرى بحلقة β-ionone. الأواصر المزدوجة مرسومة بشكل خطَّين مزدوجَين، مثل آصرة ١١-١٢ تُظهِر حاجز طاقةِ التواء عاليًا جدًّا تمنع التحوُّل التلقائي ٠° ⟷ ١٨٠°. أما الأواصر الأحادية فتُظهِر حاجزَ طاقةِ التواءٍ منخفضًا. عن: Schulten & Hayashi (2014).

يُظهِر الشكل ١٢-٣ التركيب الكيميائي لحامل الصبغة راتينال، وهو بشكل سلسلة بوليين بستة أواصرَ مزدوجةٍ وإحدى نهايتَيها ترتبط تساهميًّا مع وحدة الحامض الأميني لايسين من خلال قاعدة شيف (Schiff base) بروتونية والنهاية الأخرى بحلقة β-ionone. مع امتصاص الضوء يعاني جزء البوليين من تحوُّل إلى آيزومير مختلف، من خلال دوران إحدى الأواصر المزدوجة ١٨٠°. هذا التغير سريع جدًّا؛ يحصل خلال ٥٠٠–٥٠ فمتوثانية، ويُجبر الراتينال على التكيُّف مع هذا التغيُّر، وفي حالة الرودوبسين ينشط شلَّالٌ من التفاعُلات الإشارية تشمل البروتينات الأخرى. أخيرًا، تُضخَّم إشاراتُ الرودوبسين بما يكفي لتغيير الجهد الكهربائي الداخلي للخلية القضبانية، وإطلاق الخلايا العصبية التي تربط الشبكية بمنطقة الدماغ المسئولة عن الرؤية.

في حالة الرودوبسين البكتيري، التغير في داخل البروتين الناتج عن الأزمرة الضوئية للراتينال، يحفِّز انتقال البروتون من داخل إلى خارج غشاء الخلية البكتيرية؛ حيث يُوجد الرودوبسين البكتيري مؤديًا إلى شحن الخلية البكتيرية طاقيًّا.

ويقدِّم الباحثان Schulten & Hayashi (2014) تفاصيل الآليات والعمليات الكمومية لعمل البروتينات المتحسِّسة للضوء، ويخلُصان إلى أن بساطة تركيب الرودوبسين وحركيات تفاعُلات التنشيط الضوئي، جعلَت الرودوبسين من أكثر النُّظم المدروسة لكشف التأثيرات الكمومية في الوظائف البيولوجية.

أطياف امتصاص الضوء للرودوبسين وللأنواع الثلاثة من الأيدوبسين تغطِّي مدًى واسعًا من الضوء المرئي؛ فالامتصاص الأقصى للرودوبسين يكون في ٥٠٠ن م، وهو الطول الموجي ذو الشدة الأقصى على سطح الأرض. أما الأيدوبسينات البشرية الثلاثة فتغطِّي ٤٠٠–٥٠٠ن م، ٤٥٠–٦٣٠ن م و٥٠٠–٧٠٠ن م. وهكذا فإن خواص امتصاص الأيدوبسينات تسمح لها بالتفريق الجيد بين الدرجات اللونية.

إن أطياف امتصاص الرودوبسينات البكتيرية متكيفة مع بيئتها؛ فالرودوبسينات sRI وsRII تعمل كمتحسِّسات للانتحاءات الضوئية، ولها أطيافُ امتصاصٍ مختلفة؛ كونهما يؤديان وظيفتَين متعاكستَين؛ فالامتصاص الأقصى للرودوبسين sRI هو ٥٧٨ن م، وهو قريب جدًّا من قمة امتصاص الرودوبسين البكتيري الذي يعمل كمضخةٍ أيونية، ويُحدِث انتحاءً ضوئيًّا موجبًا باتجاه الضوء. بينما الرودوبسين sRII بقمة امتصاص ٤٩٨ن م، فيقود إلى الانتحاء الضوئي السلبي حاميًا البكتيريا من التأثيرات الضارة للضوء. وحسب Sia *et al.*, (2014) فإن قدرة النُّظم البيولوجية ومنها الشبكية على تحسُّس الفوتون المفرد هي بذاتها حالةٌ كمومية. وأشار الباحثون إلى أن التجارب السابقة تُظهِر أن الخلايا القضبانية تستجيب بشكلٍ مختلفٍ لمصادر الضوء ما إذا كانت متماسكةً كموميًّا، أو مصادر ضوءٍ حرارية. وإن هذه الخلايا لها القدرة على استخلاص المعلومات عن الإحصاء الكمومي لمصدر الضوء.

وبيَّن الباحثون أن الأزمرة الضوئية تحصل بسرعةٍ فائقةٍ تقل عن ٢٠٠ فمتوثانية وبكفاءةٍ عالية. هذه العملية تشمل تحوَّل الطاقة بين حالاتٍ إلكترونيةٍ مختلفة لجزيئة الراتينال. وعند امتصاص الفوتونات تعاني جُزيئة الراتينال تحوُّلًا إلكترونيًّا من حالة الاستقرار القاعية إلى الحالة المثارة العالية الطاقة. ويؤدِّي المزيد من نقل الطاقة إلى تغيُّراتٍ شكليةٍ للرودوبسين وما يتبعه من نقل الإشارة. يعتقد بعض الباحثين أن هذه السرعة

والكفاءة العالية للأزمرة الضوئية تعتمد على تأثيراتٍ كموميةٍ عابرة. لكن حسب Sia *et al.*, (2014) فإن التأثيرات الكمومية، خصوصًا التماسك الكمومي، يمكن أن تلعب دورًا في عملية توصيل الضوء. وتُظهِر التجارب الحديثة إمكانية حصول التراكُب الكمومي في الرودوبسين البكتيري باستخدام الليزر للتحكُّم الضوئي لجُزيئة الراتينال في الرودوبسين البكتيري، وتحويله من حالة الكل-ترانس (all-trans) إلى آيزوميرات ١٣-سيز (13-cis) تحت ظروفِ شدةٍ ضعيفةٍ وعالية.

الفصل الثالث عشر

تجلِّي دَور ميكانيك الكَم في التركيب الضوئي

Obvious Role of Quantum Mechanics in Photosynthesis

«إن التركيب الضوئي عمليةٌ عالية الاكتمال، يمكن تعلُّم دروسٍ مهمةٍ منها عن المبادئ العاملة في الطبيعة.»

Cao *et al.*, (2020)

(١) الطاقة في التركيب الضوئي Energy In photosynthesis

الحياة ظاهرةٌ تنتُج عن منظومةٍ من الجزيئات العضوية العالية التنظيم والتعقيد، وجزيئات لا عضوية، وتتبادل المواد والطاقة والمعلومات مع البيئة، وهي جزءٌ منها. وحيث إن التكاثُر والنمو، والتي تؤدي إلى الزيادة في العدَد والكتلة على التوالي، من الخواص الأساسية للمنظومة الحية، فهي تأخذ من المواد والطاقة والمعلومات أكثر مما تفقد. وهكذا فهي ليست في حالةِ توازنٍ مع البيئة. وبسبب التفاعل ما بين الكائنات الحية وبينها والبيئة، فإن المادة بضمنها العناصر المعدنية تتحرك بدورات. وحيث إن كمية المادة في المحيط الأحيائي (Biosphere) ثابتة، فلا بد من الطاقة لتفعيل دورات المادة، وإلا فإن انسياب المادة في النهاية سيتوقف بسبب زيادة الإنتروبي. والإنتروبي هو مقياسٌ للعشوائية واللانظام أو الشواش، وهو في تزايدٍ مستمرٍّ حسب القانون الثاني للديناميكا الحرارية؛ أي إن الأشياء تتجه عمومًا نحو التفكُّك والتبسيط؛ وعليه فإن الحفاظ على حالة النظام والتعقيد للمنظومة الحية يقتضي بالضرورة تخفيض الإنتروبي بتصديره إلى البيئة؛ عن طريق التزوُّد المستمر بالطاقة. وما الموت إلا انقطاعُ سيلِ الطاقة والمواد والمعلومات إلى

المنظومة الحية، وبالتالي تحولُها إلى جزءٍ مماثلٍ لأجزاء البيئة المحيطة غير الحية، وبدء التفسُّخ والتحلُّل ووصولها إلى حالة التوازُن معها. وهكذا يصبح التعريف الأبسط للحياة هو القدرة على استغلال الطاقة والسيطرة عليها (Olson & Straub, 2016).

كل فرد من المحيط الحيوي بحاجة إلى مصدرٍ للطاقة؛ فالحيوانات العليا تستخدم المواد العضوية الجاهزة من سلسلةٍ من حيواناتٍ أخرى تنتهي بحيواناتٍ تتغذَّى على النباتات أو الطحالب أو بعض أنواع البكتيريا. والحيوانات الدنيا والفطريات والكثير من أنواع البكتيريا، تعتمد على تلك الأحياء أيضًا. الأحياء التي تعتمد على أحياءٍ أخرى في الحصول على الطاقة، هي أحياءٌ غيريةُ التغذية (Heterotrophic). والأحياء التي تكون مصدرًا أوليًّا للطاقة لنفسها، ومن ثَم لغيرها، هي أحياءٌ ذاتية التغذية (Autotrophic) وهي تعتمد مباشرةً على الطاقة الشمسية، وعلى الطاقة الكيميائية المخزونة في بعض المواد.

يصل إلى كوكب الأرض من الطاقة الشمسية ما قَدْرُه ١٦٦ بيتا واط ($1\ PW = 10^{15}$ W). يعكس الكوكب إلى الفضاء ٣٠٪ منها، وتمتص الغيوم ١٩٪ ويتبقَّى ٨٥ بيتا واط قابلة للاستغلال على الكوكب. ما يُستخدَم في التركيب الضوئي من الطاقة الشمسية جزءٌ صغير فقط، هو ٧٥ تيرا واط ($1\ TW = 10^{12}$ W). للمقارنة، فإن متوسط الاستهلاك البشري من الطاقة سنة ٢٠١٠م هو ١٦ تيرا واط (Mirkovic *et al.*, 2016).

الأحياء الذاتية التغذية تُميَّز إلى أحياءٍ تعتمد على طاقة ضوء الشمس كمصدرٍ أوَّليٍّ للطاقة، وتُسمَّى ذاتية التغذية الضوئية (Photoautotrophic) وتشمل النباتات الخضراء والطحالب والسيانوبكتيريا (Cyanobacteria البكتيريا الخضراء المزرقة) والبكتيريا الأرجوانية وبكتيريا الكبريت الخضراء. وأحياءٍ تعتمد على الطاقة الكيميائية في بعض المواد اللاعضوية، وتُسمَّى ذاتية التغذية الكيميائية (Chemoautotrophic). هذه الأحياء تشمل البكتيريا المؤكسِدة للكبريت Protobacteria وAquafica والأركيا المكوِّنة للميثان والبكتيريا المؤكسِدة للحديد.

المجموعة الأخيرة تعتمد على أكسدة الهيدروجين أو كبريتيد الهيدروجين أو الميثان أو أيونات الحديدوز أو الأمونيا للحصول على الطاقة الأوَّلية لتحويل ثاني أوكسيد الكاربون أو الميثان إلى مركَّبات سكَّرية.

$$12H_2S + 6CO_2 \longrightarrow C_6H_{12}O_6(\text{carbohydrate}) + 6H_2O + 12S$$

ومن المرجَّح أن هذه الأحياء مثَّلت الطريق الأقدَم تطوريًّا في التغذية الذاتية؛ حيث لا يتوفر الضوء الكافي في أعماق المحيطات، ولم يكن الأوكسجين الغازي الحر مُتوفرًا.

تُشير التقديرات إلى أن حوالي ٢٠٠ مليار طن من غاز ثاني أوكسيد الكاربون يتم تحويلُه إلى كتلةٍ حيوية. حوالي ٤٠٪ من الكتلة الحيوية يتم إنتاجُها بواسطة العوالق النباتية البحرية. ومعظم الكاربون يُضمن بشكل موادَّ عضويةٍ عن طريق اختزاله في عملية التركيب الضوئي (Taiz & Zeiger, 2002).

الأركيا تستخدم مساراتٍ غيرَ دورة كالفن من أجل تكوين Acetyl-CoA كوسيلة لتثبيت الكاربون من CO_2 (Berg *et al.*, 2010).

الأحياء الذاتية التغذية الضوئية والتي تستخدم آلية التركيب الضوئي تُميَّز إلى مجموعتَين:

الأحياء الأوكسجينية التركيب الضوئي: وهي الأحياء التي تُنتِج الأوكسجين في التركيب الضوئي، وتشمل النباتات الخضراء والطحالب والسيانوبكتيريا، وهي مصدر الكاربون العضوي والأوكسجين الغازي في كوكب الأرض. تعتمد الأحياء الأوكسجينية على صبغات كلوروفيل a والمنظومة الضوئية I والمنظومة الضوئية II في الحصول على طاقة الضوء، واستغلالها في أكسدة جُزيئات الماء.

الأحياء اللاأوكسجينية التركيب الضوئي: وهي أنواعٌ من البكتيريا لا تُنتِج الأوكسجين في عملية التركيب الضوئي والذي يُعرف بالتركيب الضوئي اللاأوكسجيني (Anoxygenic photosynthesis). هذه البكتيريا لا تتمكَّن من استخدام جُزيئات الماء كمانحاتٍ للإلكترونات، وإنما تستخدم الكبريتيد والهيدروجين أو المواد العضوية. وهكذا فهي لا تُسهِم في تكوين الأوكسجين في الطبيعة، لكنها تُسهِم في تكوين المواد العضوية. البكتيريا اللاأوكسجينية تستخدم صبغة الكلوروفيل البكتيري (Bacteriochlorophyll) ومنظومةً ضوئية واحدة؛ هي أما النظام الضوئي I في بعض الأنواع أو النظام الضوئي II في أنواعٍ أخرى.

أحياء التركيب الضوئي اللاأوكسجينية تشمل البكتيريا الأرجوانية (Purple bacteria) مثل أنواع *Rhodospirillum* التي تعود إلى شعبة *Proteobacteria*، وبكتيريا الكبريت الخضراء (Green sulfur bacteria) مثل أنواع *Chlorobium* العائدة إلى شعبة *Chlorobi* وأنواع *Heliobacterium* تعود إلى شعبة *Firmicutes* و*Chloracidobacterium thermophilum* تعود إلى شعبة *Acidobacteria* و*Gem-matimonas phototrophica* تعود إلى شعبة *Gemmatimonadetes* وغيرها (Hanada, 2016).

يُعتبر التركيب الضوئي من بين أهم المواضيع في علوم الحياة، واستقطب جهود آلاف العلماء في سبيل دراسته وفهم آلياته عَبْر عددٍ هائلٍ من الأبحاث. وكدلالةٍ على ذلك فإنه أفضى إلى حصول باحثيه على جائزتَي نوبل في الكيمياء؛ الأولى سنة ١٩٦١م؛ حيث حصل عليها Melvin Calvin باكتشافه دورةَ تثبيت الكاربون والمعروفة باسمه، والثانية سنة ١٩٨٨م، وحصل عليها سوية Johann Deisenhofer وRobert Huber وHartmut Michel لاكتشافهم التركيب الثلاثي الأبعاد لمركز التفاعُل في التركيب الضوئي.

يختلف ميكانيك الكَم عن الميكانيك التقليدي في النظر إلى العالَم عند التعامل مع الأبعاد الصغيرة جدًّا والأحداث السريعة جدًّا. وهكذا، وعلى خلاف الميكانيك التقليدي، لا تتماشى التأثيراتُ الكمومية مع خبرتنا اليومية بسهولة، بل غالبًا ما تكون مناقضةً للبديهة التي اعتدنا عليها. وهكذا تضعنا الأبعاد والأزمنة التي تحصُل فيها عمليات التركيب الضوئي قرب حدود ميكانيك الكَم والميكانيك التقليدي وفي مدَيات التأثيرات الكمومية القابلة للقياس (Keren & Paltiel, 2018).

ولغرضِ فَهم عملية التركيب الضوئي ودَور ميكانيك الكَم فيه لا بد من استعراض العناصر التي تلعب الأدوار الرئيسة فيه، وهي الضوء والصبغات ونُظُم استقبال ومعالجة الطاقة.

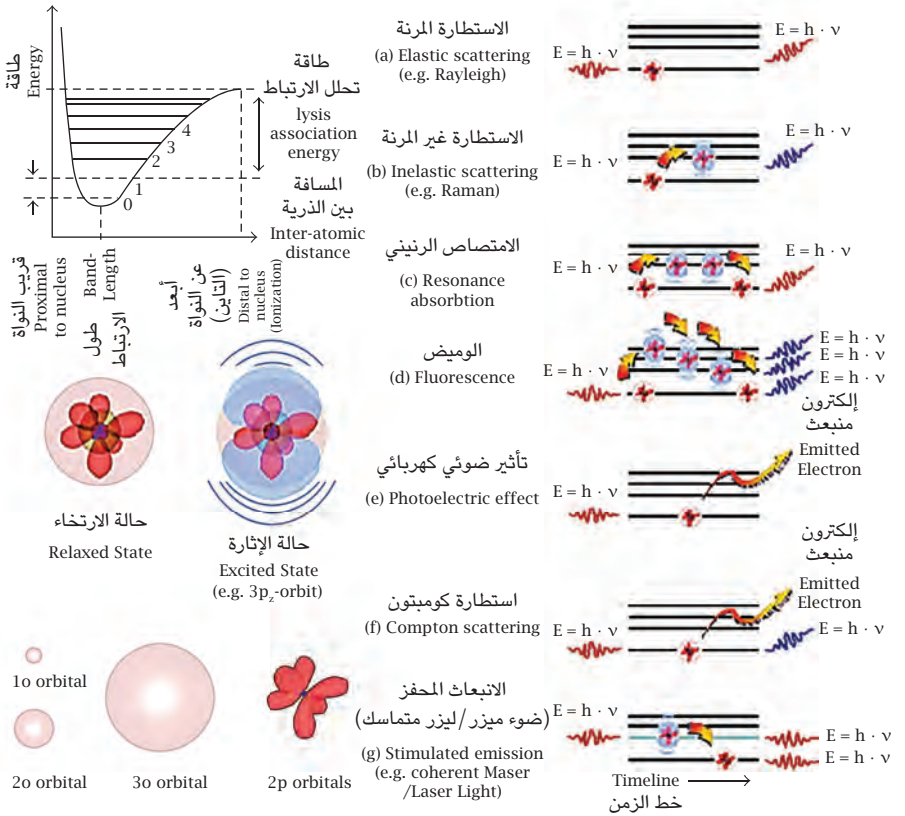
(٢) الضوء Light

الضوء المرئي هو جزءٌ ضيق من الأشعة الكهرومغناطيسية في أطوالٍ موجيةٍ محصورة بين ٤٠٠ (الضوء البنفسجي) إلى حوالي ٧٠٠ن م (اللون الأحمر) (شكل ٨-٥). يمثِّل الضوءُ مصدرًا أوليًّا للطاقة والمعلومات، كما تم الإشارة إليه سابقًا. وتلعب الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء أدوارًا بيولوجيةً مهمة أيضًا.

يتألَّف الضوء من فوتونات وهي جسيماتٌ تحت ذرية تسير بموجاتٍ ذات طول يُرمز له بالحرف اللاتيني λ وتردُّد يُرمز له بالحرف ν والعلاقة بينهما حسب المعادلة:

$$\nu = c/\lambda$$

حيث تمثِّل c سرعةَ الضوء.



شكل ١٣-١: الطبيعة الكهرومغناطيسية للمادة وأنماط إثارتها الفردانية (يسار). الجزء العلوي يوضِّح مخطَّط متطلَّبات طاقة الذرة الداخلية لتحفيز الإثارة حتى الوصول إلى التأيُّن. الجزء السفلي يكشف عن مدارات الذرة القابلة للإثارة في ترتيبها المكاني. عن: Madl & Egot-Lemaire (2015).

ويحمل الفوتون طاقةً غير قابلةٍ للتجزئة هي الكَم (Quantum) تتناسب قيمتُها (Eq) مع طول الموجة وتردُّدها حسب المعادلة:

$$Eq = hc/\lambda = h\nu$$

حيث يمثِّل h ثابت بلانك (= ٦,٦٢ × ١٠$^{-٣٤}$ جول ثانية/فوتون).

في الجدول ١٣-١ عرضٌ للأطوال الموجية والطاقة لمكوِّنات الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء.

الخاصية شبه الجُسيمية للفوتون تتوضَّح في تآثُره مع التراكيب الأساسية وامتصاصه، ولكي يتم امتصاص الفوتون، يجب أن تتوافَق طاقته تمامًا مع فَرقِ الطاقة بين الحالة القاعية (Ground state) وإحدى الحالات العالية الطاقة لذلك التركيب الأساسي. وفي مثل هذه الحالة يمكن أن تنتقل طاقة الفوتون إلى ذرة أو أيون أو جُزيئة (استطارة غير مرنة) محوِّلًا إياها إلى حالةٍ طاقيةٍ أعلى تُسمَّى طاقة الإثارة (Excited state).

الاستطارة غير المرنة يمكن أن تغيِّر كثيرًا الإشعاع الإلكترومغناطيسي؛ حيث يمكن أن يحصُل إعادة إشعاع بأطوالٍ موجيةٍ أطول أو أقصر (شكل ١٣-١ b). مثل هذه الظاهرة غالبًا ما تحصُل عندما يُعاد إشعاع الضوء الأزرق، الساقط بشكل ضوءٍ أحمر (كما في الوميض شكل ١٣-١ d). يُظهِر النصف الأيمن من الشكل ١٣-١ أنماطًا مختلفة من التآثُر. (a) عندما تكون طاقة الفوتون الداخل صغيرة، أو الطول الموجي λ كبير مقارنة بالذرة، يبقى الهدف بحالته القاعية والفوتون الخارج يُستطار وهو محافظ على طاقته. (b) الفوتون الأكثر طاقةً يؤدي إلى حالة إثارة للذرة، ويُحرِّر فوتونًا أقل طاقةً نوعًا ما. (c) توافُق طاقة الفوتون الساقط وفرق الطاقة المؤدي إلى الحالة المثارة للذرة، يُتبع بالارتخاء إلى الحالة القاعية وينتج فوتونًا مماثلًا للفوتون الساقط. (d) الإثارة الأقوى لرفع الذرة إلى حالة الإثارة جدًّا، تؤدي إلى ارتخاءٍ تدريجي منتجةً فوتوناتٍ بطاقةٍ أقلَّ لحين أن تفقد الذرة الإثارة تمامًا. (e) الفوتون العالي الطاقة يُحرِّر إلكترونًا مُسببًا تأين الذرة. (f) الفوتون يحفِّز التأين زائدًا تحرير فوتون بطاقةٍ أقل. (g) عندما تُضرب الذرة المثارة أصلًا بفوتون، يحصل ارتخاءٌ للذرة؛ حيث يتحرَّر فوتون يكون مرتبطًا تماسكيًّا مع الفوتون الساقط كما في الليزر (Madl & Egot-Lemaire, 2015).

جدول ١٣-١: الإشعاعات المهمة بيولوجيا. عن: Hopkins & Hüner (2009)

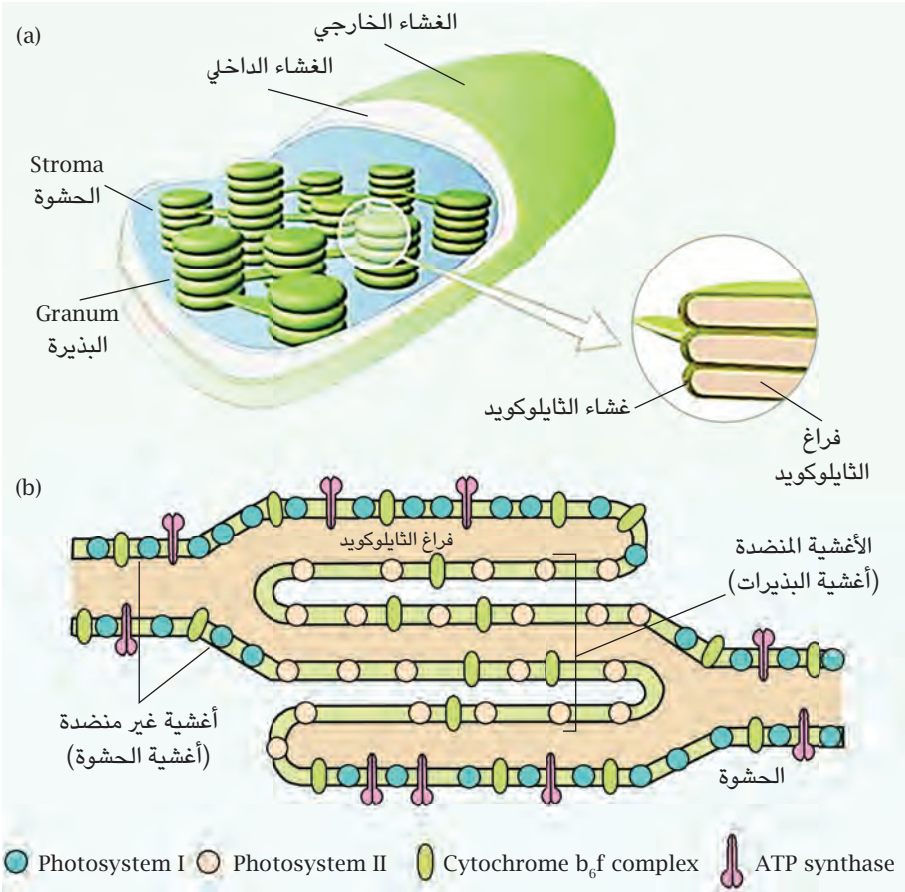
اللون	الطول الموجي ن م	معدل الطاقة كيلوجول/مول فوتون
الأشعة فوق البنفسجية UV	١٠٠–٤٠٠	
UV-C	١٠٠–٢٨٠	٤٧١

اللون	الطول الموجي ن م	معدل الطاقة كيلوجول/مول فوتون
UV-B	٣٢٠–٢٨٠	٣٩٩
UV-A	٤٠٠–٣٢٠	٣٣٢
الضوء المرئي	٧٤٠–٤٠٠	
البنفسجي	٤٢٥–٤٠٠	٢٩٠
الأزرق	٤٩٠–٤٢٥	٢٧٤
الأخضر	٥٥٠–٤٩٠	٢٣٠
الأصفر	٥٨٥–٥٥٠	٢١٢
البرتقالي	٦٤٠–٥٨٥	١٩٦
الأحمر	٧٠٠–٦٤٠	١٨١
الأحمر البعيد	٧٤٠–٧٠٠	١٦٦
الأشعة تحت الحمراء	٧٤٠	٨٥

من المواد العالية القدرة على التفاعُل مع الضوء هي الصبغات؛ حيث تمتص الضوء بأطوالٍ موجيةٍ معيَّنة.

(٣) البلاستيدة الخضراء Chloroplast

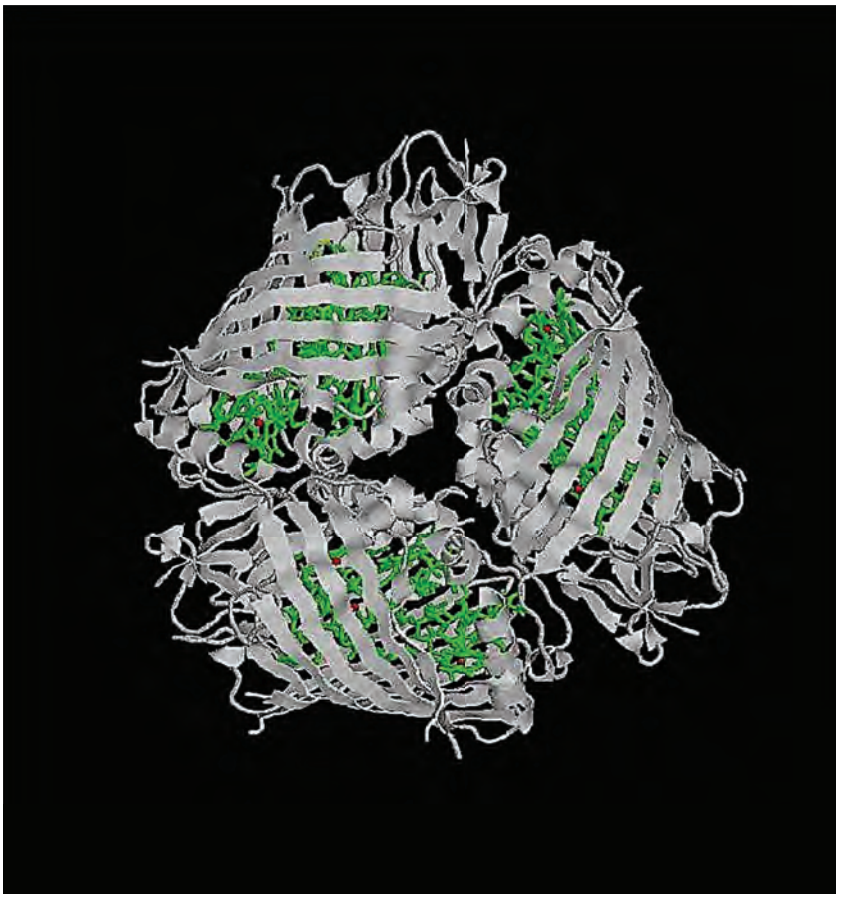
وهي عُضَيٌّ خلَوي في الأحياء الحقيقية النواة القادرة على التركيب الضوئي. قطرها في النباتات حوالي ٤–٦مكم وسمكها ١–٢مكم. تتألَّف من غشاءٍ مزدوجٍ خارجي وداخلي يحيط بالحشوة (Stroma) والتي تتألف من سائل يحتوي على الإنزيمات الذائبة، وكذلك DNA وRNA ورايبوزومات البلاستيدة التي تمكِّنها من تكوين بروتيناتها الخاصة، وتمكِّن من انقسامها. وتضُم البلاستيدة أغشيةً تُسمَّى الثايلوكويدات (Thylakoids) وهي أغشيةٌ مزدوجةٌ تحتوي على فراغٍ بينها. تحمل هذه الأغشية الصبغات والنُّظم الضوئية وإنزيمات السايتوكروم والـ ATPase. تُوجد هذه الأغشية بشكلِ نضائدَ تُسمَّى البذَيرات (Grana)، وتمتد أغشيةٌ مفردةٌ منها هي أغشية الحَشْوة (Stroma lamellae) لتُشكِّل شبكةً متصلة (شكل ١٢-٢). في السيانوبكتيريا تُوجَد أغشية ثايلوكويد لكنها غير متميِّزة إلى بذَيرات وحَشْوة.



شكل ١٣-٢: (a) رسمٌ تخطيطيٌّ للبلاستيدة الخضراء حيث تتنضَّد الثايلوكويدات المفلطَحة بشكل بذَيرات. (b) التوزُّع المكاني للمُعقدات المطمورة في غشاء الثايلوكويد. مُحوَّر عن: Mirkovic *et al.*, (2016).

(٤) الكلوروسوم (Chlorosome) ومعقد Fenna-Matthews-Olson (FMO)

الكلوروسوم هو معقد امتصاص الضوء في بكتيريا الكبريت الخضراء، ويتميَّز بكبر حجمه، وعدم وجود بروتيناتٍ تسند صبغات التركيب الضوئي. معقد الصبغة-البروتين FMO (شكل ١٣-٣) في البكتيريا *Chlorobium tepidum* يحتوي على بروتيناتٍ حاملةٍ



شكل ١٣-٣: بروتين FMO ثلاثي الوحدات. جُزيئات الكلوروفيل البكتيري a باللون الأخضر، وذرة المغنسيوم المركزية باللون الأحمر والبروتين باللون الرمادي. عن: Julian Adolphs prepared using 4bcl.pdb (from protein data bank) and software "ras-mol" (http://www.openrasmol.org).

لصبغة الكلوروفيل البكتيري a بطريقةٍ غيرِ متناظرة وانحدارية؛ حيث يمكن أن تُوصل الإكسيتونات (Exitons) والتي سنتطرق إليها لاحقًا، إلى مركز التفاعل بطريقٍ تقليدي، أو كحركةٍ موجية تتجنَّب العوائق الحركية، وتزيد من كفاءته ما جعله يُستخدَم كمنظومةٍ نموذجية.

لعمليات نقل الطاقة في التركيب الضوئي (Panitchayangkoona *et al.*, 2010). اتجاه طاقة الإثارة في الكلوروسوم يكون من الصبغات في الكلوروسوم إلى بروتين CsmA في الصحن القاعدي إلى معقد بروتين FMO إلى مركز التفاعُل (Oostergetel *et al.*, 2010).

(٥) الصبغات Pigments

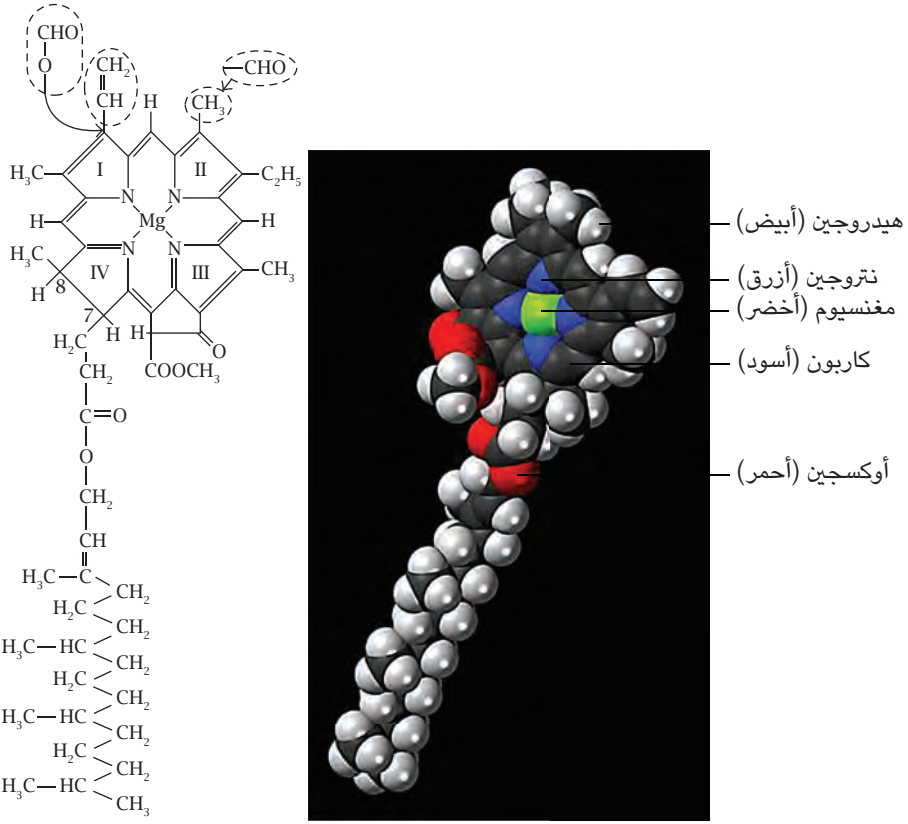
الصبغة هي مادةٌ حساسة ضوئيًّا؛ حيث تُغيِّر لون الضوء المنعكس عنها، أو النافذ منها، حسب الطول الموجي الخاص الذي تمتصه منه. يتم امتصاص الفوتون بسرعةٍ كبيرةٍ جدًّا، تبلغ فيمتوثانية (١ × ١٠$^{-١٥}$ ثانية) حيث يتلقاه الإلكترون الخارجي في جُزيئة الصبغة، والتي تمكِّنها من الانتقال من الحالة القاعية إلى حالة الإثارة (أو الحالة المنفردة Singlet) التي تجعلها قادرةً على التفاعل الكيميائي الضوئي. جُزيئة الصبغة المعقدة تمتلك إلكتروناتٍ يمكن أن تمتص فوتونات بمستوياتٍ طاقيةٍ مختلفة، وبالتالي بأطوالٍ موجيةٍ مختلفة.

الجُزيئة المثارة تبقى كذلك لفترةٍ قصيرةٍ جدًّا، بحدود النانوثانية (١ × ١٠$^{-٩}$ ثانية) وفي حالة عدم تآثُرها مع جُزيئةٍ أخرى، عليها التخلُّص من الطاقة الزائدة، والعودة إلى الحالة القاعية. تبديد هذه الطاقة يتم بطُرقٍ متعدِّدة منها:

- الفقدان بشكل طاقةٍ حرارية.
- الوميض بإطلاق فوتونات باللون الأحمر.
- الرنين المحفِّز أو النقل غير الإشعاعي؛ حيث تُنقل الطاقة إلى جزيئاتِ صبغةٍ مجاورة جدًّا، وهو ما يحصُل في صبغات التركيب الضوئي في البلاستيدة الخضراء.
- الانتقال من الحالة المنفردة إلى الحالة الثلاثية (Triplet) الأكثر استقرارًا، والتي تتسبَّب عن اختلاف حالات البرم المغزلي للإلكترون (راجع الفصل الحادي عشر). هذه الحالة لطول فترة بقائها، تُمكِّن من التفاعُل الكيميائي الضوئي (Hopkins & Hüner, 2009).

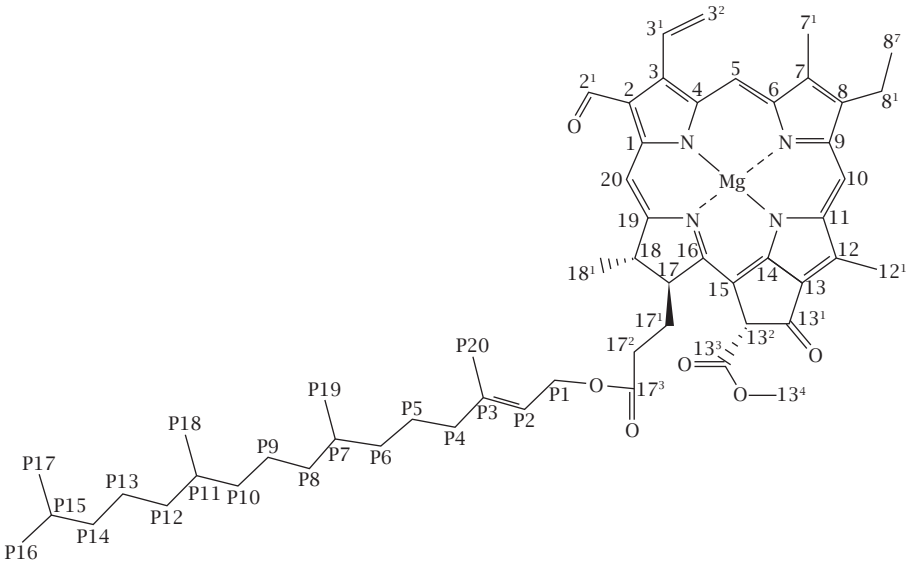
إن التفاعُلات الكيموضوئية في التركيب الضوئي، هي من بين التفاعُلات الكيميائية الأسرع. وهذه السرعة الفائقة ضروريةٌ للتفاعُلات الكيموضوئية، كي تنافس التفاعُلات الثلاثة الأخرى المحتملة للحالة المستثارة (Taiz & Zeiger, 2002).

(٥-١) صبغة الكلوروفيل Chlorophyll pigment



شكل ١٣-٤: التركيب الكيميائي لجُزيئة كلوروفيل a (يسار). كلوروفيل b يشبه كلوروفيل a لكن تُستبدل مجموعة المثيل بمجموعة فورمايل في الحلقة II. كلوروفيل c يشبه كلوروفيل a عدا أنه يفتقد السلسلة الكاربونية الطويلة (الذيل). كلوروفيل d يشبه كلوروفيل a لكن تعوض مجموعة —O—CHO على الحلقة I كما موضَّحة في الشكل. شكل مجسَّم لجُزيئة كلوروفيل a (يمين). عن: Hopkins & Hüner (2009) و.Jyntohttps://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15955515

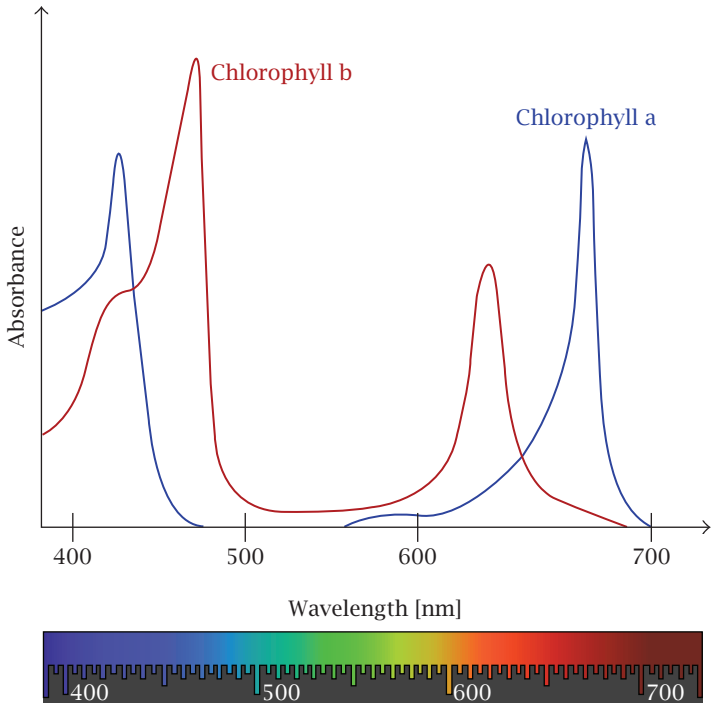
وهي الصبغة الأساسية المسئولة عن امتصاص طاقة الفوتونات التي تعمل في عملية التركيب الضوئي. تتألَّف جُزيئة الكلوروفيل من جزأَين هما: رأس بورفيرين (Porphyrin)



شكل ١٣-٥: تركيب جُزيئة كلوروفيل f. عن: Willows *et al.*, (2013).

وذيل هيدروكاربوني طويل متمثلًا بـ «فايتول» (Phytol). البورفيرين يتألَّف من أربع حلقاتِ بايرول محتويةٍ على النتروجين، وهو المسئول أساسًا عن امتصاص الضوء. ومعروف أن البورفيرينات موجودةٌ في الهيموغلوبين، وكذلك في السايتوكرومات. أما الفايتول فهو كحول مؤلَّف من ٢٠ ذرة كاربون، وهو يذوب في الدهون، وبالتالي يمكن الجُزيئة من التموضُع في غشاء البلاستيدة. في مركز الرأس بين ذرات النتروجين الأربعة يُوجد أيون المغنسيوم، فقدانه يؤدي إلى فقدان اللون الأخضر من جُزيئة الكلوروفيل. كما يلعب دورًا أساسيًّا في تكوين الإكسيتون (Exciton) نتيجة تعرُّضه للفوتون. جُزيئات الكلوروفيل ترتبط لا تساهميًّا مع بروتينات الغشاء، وهذا سيجعل طيف امتصاصها للضوء يختلفُ عما هو عندما تكون الصبغة في المحلول (خارج الجسم الحي).

لأكثر من ٦٠ سنة كان يُعرف ٤ أنواع من الكلوروفيل في النباتات والطحالب والسيانوبكتيريا؛ كلوروفيل a وكلوروفيل b وكلوروفيل c وكلوروفيل d. واكتُشف نوعٌ خامس في السيانوبكتيريا هو كلوروفيل f. تم عزلُ كلوروفيل f من السيانوبكتيريا *Halomicronema hongdechloris* سنة ٢٠١٠م، من قِبل Chen *et al.*, (2010). وتم



شكل ١٣-٦: أطياف امتصاص كلوروفيل a وكلوروفيل b من الضوء المرئي في المحلول. عن: © Wikimedia Commons/Daniele Pugliesi, M0tty.

عزلُه من أنواعٍ أخرى من السيانوبكتيريا (Kato *et al.*, 2020). ويُوجد الكلوروفيل البكتيري a (Bacteriochlorophyll a) في البكتيريا.

يُوجد كلوروفيل a في النباتات والطحالب والبكتيريا. كلوروفيل b يُوجد في النباتات الراقية والطحالب الخضراء. كلوروفيل c يُوجد في الطحالب (الدياتومات والطحالب المسوطة والبنية). أما كلوروفيل d فيُوجد في الطحالب الحمراء فقط. تركيب الكلوروفيلات b وc وd وf مشابه لتركيب كلوروفيل a مع تحويراتٍ موضَّحة في الشكلَين ١٣-٤ و١٣-٥.

تتشابه الكلوروفيلات في الشكل العام لأطياف امتصاصها للضوء، لكنها تختلف في قمم امتصاصها له (شكل ١٣-٦). من الشكل يتوضَّح أن قمم امتصاص الكلوروفيلات تتركَّز حول الضوءَين الأزرق والأحمر.

ولكون الاختلافات التركيبية بين أنواع الكلوروفيلات، تتركَّز في الجزء البورفيريني من الجُزيئة، فإنه يؤكِّد أهميته في امتصاص الضوء وليس الذيل الكحولي لها.

كلوروفيل f يمتص الضوء في الطيف الأحمر (الأشعة تحت الحمراء) أكثر من صبغات الكلوروفيل الأخرى في أحياء التركيب الضوئي الأوكسجينية. هذا سيضيف إلى الأحياء التي تمتلكه إمكاناتٍ تنافسيةً في البيئة (Chen *et al.*, 2010; Willows *et al.*, 2013). وتبيَّن أن جُزيئات كلوروفيل f هي جزء من النظام الضوئي I وليس في سلسلة نقل الإلكترون (Kato *et al.*, 2020).

(٥-٢) الفايكوبولينات Phycobilins

وهي صبغاتٌ مُكمِّلةٌ لامتصاص الضوء في الطحالب والسيانوبكتيريا. تضُم هذه المجموعة الفايكوارثرين (Phycoerythrin) والفايكوسيانين (Phycocyanin) والوفايكوسيانين (Allophycocyanin). هذه الصبغات تمتص الضوء في الطيف الأخضر من الضوء.

(٥-٣) الكاروتينات Carotenoids

تؤلِّف مجموعة من الصبغات البرتقالية والصفراء، وتُوجد في جميع الأحياء القادرة على التركيب الضوئي. تضُم الجُزيئة وهي تربينويدية ٤٠ ذرة كاربون وهي ذائبة في الدهون، وتكون على نوعَين؛ كاروتينات (α- وβ- وγ- كاروتين) وزانثينات (Xanthins). تمتص كاروتينات β الضوء الأزرق، ولها دَورٌ في حماية الكلوروفيل من تأثيرات الأكسدة (Cupellini *et al.*, 2020)، كما تُسهِم مع الكلوروفيل في حماية منظومة التركيب الضوئي عَبْر مسار تبديد الطاقة الزائدة (Son *et al.*, 2020).

الصبغة المحتوية على بروتين تُسمَّى بروتين صبغي (Chromoprotein)، وهكذا فالبروتينات الصبغية تعمل كمُستقبِلات للضوء. والجزء من البروتين الصبغي المسئول عن امتصاص الضوء فعلًا هو حامل الصبغة (Chromophore).

(٦) تفاعُلات الأكسدة الاختزال في التركيب الضوئي

Oxidation-reduction reactions in photosynthesis

تعتمد تفاعُلات التركيب الضوئي الأوكسجينية على اختزال الكاربون، ومصدره غاز ثاني أوكسيد الكاربون من الهواء؛ حيث يؤكسِد الأخير الماء لتتحرَّر إلكترونات وأيونات

هيدروجين تربط مع الكاربون رغم عدم ميلها لذلك؛ حيث إن فرقَ الطاقة موجب ($\Delta G+$). وبذلك سيكون ثمَّة حاجةٌ للطاقة لأكسدة جُزيئات الماء، وكذلك ربط الهيدروجين مع الكربون. والطاقة المطلوبة مصدرُها ضوء الشمس.

يمكن تلخيصُ محصلة تفاعُلات التركيب الضوئي بالمعادلة التالية:

$$6CO_2 + 12H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

ويمكن أن تُختصر المعادلة إلى:

$$CO_2 + 2H_2O \longrightarrow (CH_2O) + O_2 + H_2O$$

حيث إن (CH_2O) تمثِّل وحدة الكاربوهيدرات التي تُضاف إلى السكَّر الخماسي ريبيولوز ليتكوَّن كلوكوز في كل مرة.

في النباتات تحصُل تفاعُلات التركيب الضوئي في البلاستيدات الخضراء، وتحديدًا في أغشية الثايلوكويدات. يقع مركز تفاعُل النظام الضوئي II (شكل ١٣-٧) مع كلوروفيلات الهوائي والبروتينات الناقلة للإلكترون المرافقة في أغشية البذَيرات. بينما يقع مركز تفاعُل النظام الضوئي I (شكل ١٣-٨) مع صبغات الهوائي التابع له، وبروتينات نقل الإلكترون أيضًا والإنزيم المكوِّن لجُزيئات ATP في أغشية الحشوة حصرًا وعلى حواف أغشية البذَيرات. في حين يقع معقد السايتوكروم *b6f* لسلسلة نقل الإلكترون، والذي يربط النظامَين الضوئيَّين بين الحشوة والبذَيرات بالتساوي. وهكذا فإن حاملات الإلكترون التي تعمل بين النظامَين تتوجَّه من غشاء البذَيرة إلى منطقة الحشوة، حيث تنقل الإلكترونات إلى النظام الضوئي I.

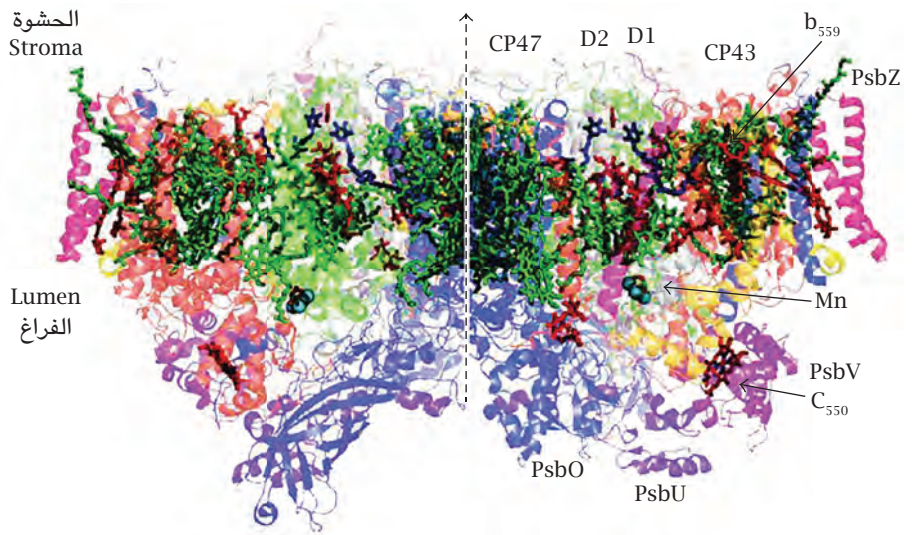
يتألَّف النظام الضوئي I من ١٨ وحدة جُزئية والنظام الضوئي II من ٣١ وحدةً جزئية ويضُمَّان بروتينات وجزيئات كلوروفيل وكاروتينات تمتَص الضوء (شكل ١٣-٧ و١٣-٨).

معظم جُزيئات الكلوروفيل تعمل كهوائيٍّ لاقطٍ للفوتونات مع النظام الضوئي II والنظام الضوئي I وتُميَّز إلى هوائي كلوروفيل أساسي (Core antenna) مجاور لمراكز التفاعُل، وهوائي محيطي أو طَرفي. تنتقل فوتونات الضوء الممتصة من قِبل الهوائيات الكلوروفيلية إلى مركز التفاعُل II ومركز التفاعُل I.

تركيب الهوائيات الحاصدة للضوء يتراوح بين تجمُّعاتٍ تلقائيةٍ شبه مبعثرة إلى هيئاتٍ عالية التناظر مرتبطةٍ بسقالاتٍ بروتينية، تُشكِّل معقداتٍ ترتبط بمراكز التفاعُل (Marais *et al.*, 2018).

شكل ١٣-٧: تركيب النظام الضوئي I في النبات من جانب الحشوة. جُزيئات الكلوروفيل (أخضر) الكاروتينات والدهون (أحمر) مع وجود الهيكل البروتيني المؤلَّف من ١٦ وحدة. موقع البروتينات PsaG وPsaH وPsaK وLHCa1-4 موضَّحة بالشكل. Nelson & Yocum (2006).

يُولِّد النظام الضوئي II مؤكسِدًا ذا قدرةِ أكسدة-اختزال قويةٍ جدًّا بما يكفي لأكسدة جُزيئات الماء. وحيث إن الماء من الوفرة بحيث يؤمِّن مصدرًا غير محدودٍ للإلكترونات اللازمة لإدامة الحياة على الأرض. أما النظام الضوئي I فيُولِّد قدرة أكسدة-اختزال سالبة



شكل ١٣-٨: منظرٌ جانبيٌّ لتركيب النظام الضوئي II في السيانوبكتيريا. أُشِّرَت مواقع الببتيدات المتعددة الخارجية سوية مع الوحدات الداخلية PsbA-D والوحدة الداخلية الملحقة. PsbZ كلوروفيل a (أخضر) والكاروتينات (أحمر) والبلاستوكيونينات (أزرق). الهيمات c550 وb559 (أحمر) وتجمُّع Mn (أزرق). والخط الوهمي الفاصل بين الوحدتَين مؤشَّر بالسهم المنقَّط. عن: Nelson & Yocum (2006).

هي الأقوى في الطبيعة، وهي التي تُحدِّد كمية الطاقة الكلية في النُّظم الحية (Nilson & Yocum, 2006).

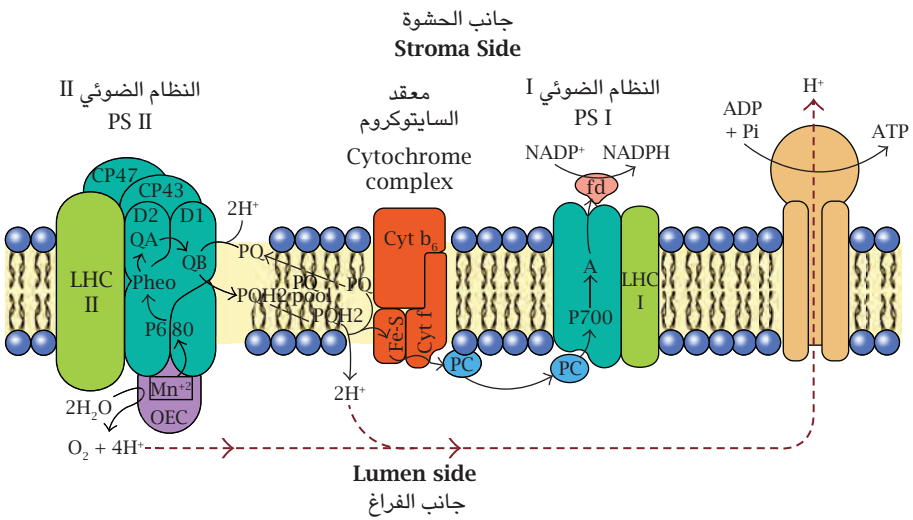
في النظام الضوئي II تتم أكسدة ٢ من جُزيئات الماء لينتج ٤ إلكترونات و٤ بروتونات وجُزيئة أوكسجين:

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$$

البروتونات يجب أن تصل إلى منطقة الحشوة حيث تتكوَّن جُزيئات ATP (شكل ١٣-٩).

تعمل منظومةُ الهوائي المجمِّع للضوء على امتصاص الضوء، والحماية الضوئية؛ فمن المعروف أن أغلب الأحياء غير القادرة على التركيب الضوئي، لا تتمكَّن من التعامُل

المباشر مع الطاقة الشمسية للتأثيرات المدمِّرة على المواد الحية بتكوين أنواع الأوكسجين الفعَّالة الشديدة القدرة التأكسُدية. غير أن منظومة الهوائي المجمِّع للضوء تتمكَّن من حماية مركز التفاعل I بتقليلها تكوين أنواع الأوكسجين الفعالة؛ حيث تعمل كفواصل (Switches) في الشدَّات العالية للضوء (Alboresi *et al.*, 2009).

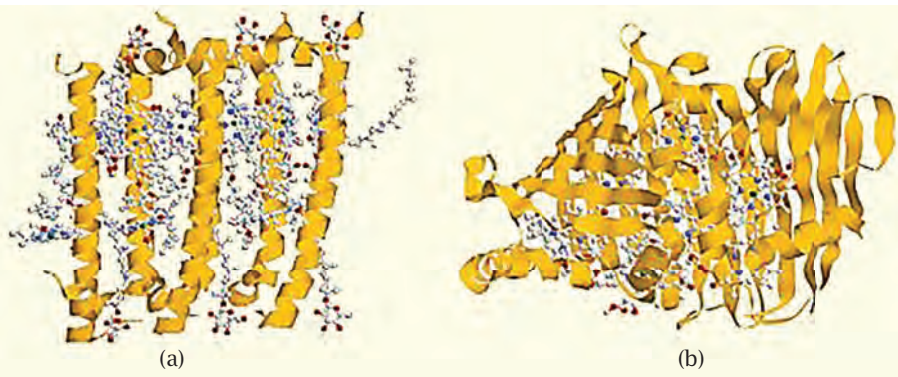


شكل ١٣-٩: ترتيب منظومة نقل الإلكترون في التركيب الضوئي في غشاء الثاليكويد. مُحوَّر عن: Hopkins & Hüner (2009).

وتعمل منظومة الهوائي الخارجية في النظام الضوئي II على امتصاص ونقل الفوتونات إلى مركز التفاعل، وتتحول بسرعة إلى حالة تبديد الطاقة عند زيادة شدة الضوء عن الحاجة فتُحوِّلها إلى حرارة (Ioannidis *et al.*, 2016). وحسب Magdaong & Blankenship (2018) تؤدِّي معقدات حصاد الضوء عملًا مزدوجًا في التركيب الضوئي، اعتمادًا على ظروف الإضاءة السائدة. في ظروف الإضاءة المنخفضة تؤمِّن كفاءةً عالية في التركيب الضوئي عن طريق تعظيم سعة امتصاص الضوء، وخزن الطاقة. وفي ظروف الإضاءة الزائدة، تقوم بوظيفةٍ إخماديةً للحيلولة دون تكوين حالاتٍ ضارة، مثل الكلوروفيل الثلاثي والأوكسجين المنفرد، التي تؤذي منظومة التركيب الضوئي.

يتألَّف كل مركز تفاعُل من جُزيئة كلوروفيل a. ويمثِّل مركز التفاعُل كمصبٍّ للطاقة الواردة من الهوائيات الكلوروفيلية، حيث تحصُل تفاعلات الأكسدة-الاختزال الضوئية. ويُسمَّى كلوروفيل مركز التفاعُل II بـ P700 وكلوروفيل مركز التفاعُل I بـ P680 والتي هي إشارة إلى قمة امتصاصهما للضوء بتلك الأطوال الموجية.

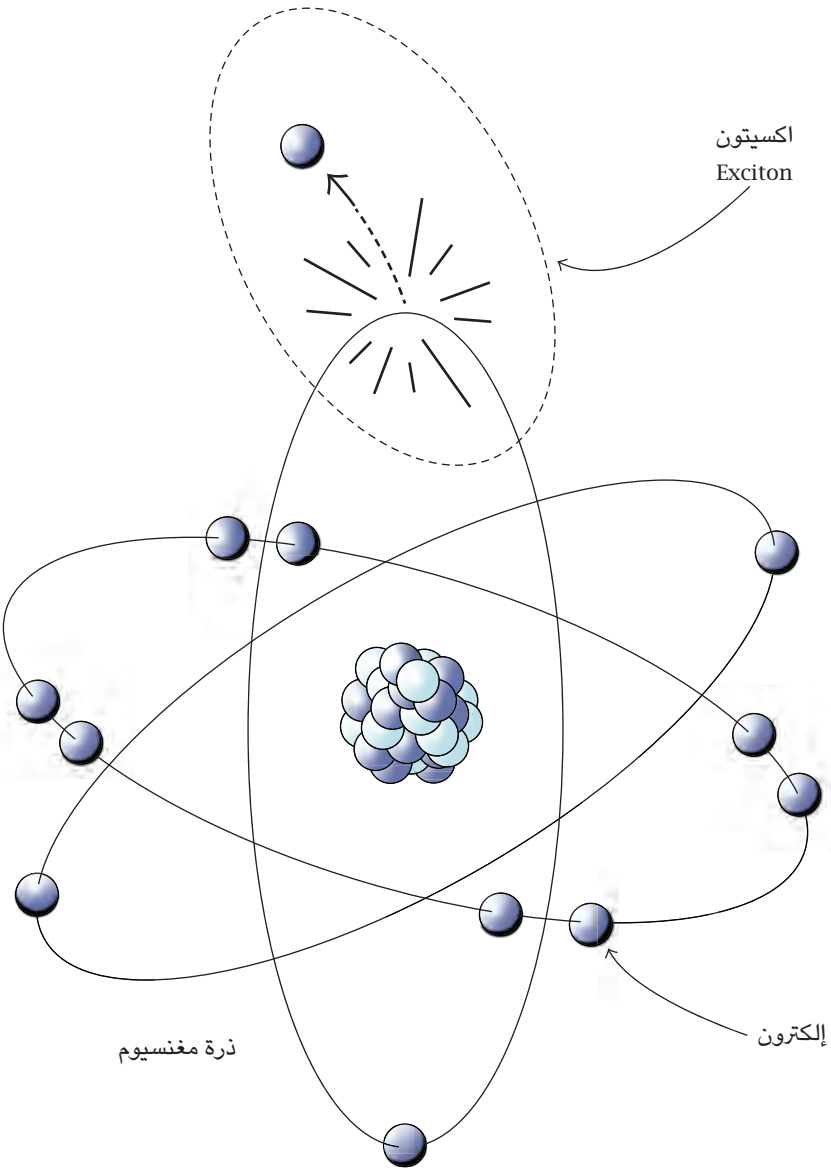
إلى جانب المكوِّنات الأخرى، ثمَّة معقدي كلوروفيل بروتين هما: معقد اكتساب الضوء II (LHCII) يُصاحِب مركز التفاعُل II ومعقد اكتساب الضوء I (LHCI) المُصاحِب لمركز التفاعُل I (شكل ١٣-١٠). هذان المعقدان يمثِّلان امتدادَين لنُظُم الهوائي الكلوروفيلي، ويحتويان على ٧٠٪ من الكلوروفيل الكلي بضمنها كلُّ كلوروفيل b.



شكل ١٣-١٠: (a) معقد حصاد الضوء II في البكتيريا الأرجوانية و(b) معقد FMO في بكتيريا الكبريت الخضراء. اللون الأصفر يشير إلى البروتين واللون الأبيض إلى الحوامل الصبغية. عن: Sension (2007).

عند امتصاص جُزيئة الكلوروفيل للفوتون فإنه يؤدي إلى دفع الإلكترون الخارجي في ذرة المغنسيوم داخل الجُزيئة، تاركًا فراغًا موجب الشحنة. الإلكترون القافز السالب الشحنة والفراغ الموجب الشحنة يُشكِّلان ما يُعرف بالإكسيتون (Exciton) ويعمل كبطاريةٍ دقيقةٍ لها قطبانِ سالب وموجب، ويمكنه خزن الطاقة لاستخدامها لاحقًا (شكل ١٣-١١).

وحيث إن الإكسيتون غير مستقر، فهو إما أن ينهار باتحاد الإلكترون السالب مع الفراغ الموجب، فتتحوَّل طاقة الفوتون الممتص إلى حرارة تتبدَّد، أو أن ينقل الإكسيتون بسرعة فائقة إلى ذرة المغنسيوم في جُزيئة الكلوروفيل الشديدة القرب ليتكون إكسيتون،



شكل ١٣-١١: يتألَّف الإكسيتون من إلكترون أُخرج من ذرته، والفراغ الذي يتركُه خلفه. مُحوَّر عن: McFadden & Al-Khalili (2014).

ومنها إلى الأخرى والأخرى. وهكذا إلى أن يصل إلى مركز التفاعل حيث تحصُل عملية فصل الشحنة؛ فحسب Fassioli *et al.*, (2014) حالة الإثارة في جُزيئة الكلوروفيل تكون قصيرةً مقارنةً بالفعاليات البيولوجية الأخرى؛ فهي تعود إلى الحالة الطاقية القاعية بعد ٦ نانوثانية خارج الجسم الحي و٤ نانوثانية داخل الجسم الحي. كما تكون الحالة المستثارة المنفردة (Singlet) أقصر من حالة التبديد التي تُنتِج الحالة المستثارة الثلاثية (Triplet) ويكون ثابتُ الزمن لهذه العملية ١٠ نانوثانية. يجب أن «تُلتقط» الإثارة الإلكترونية قبل هذا التحول لتُنقل إلى مركز التفاعل. في هذه العملية يتم فصلُ إلكترونٍ عالي الطاقة عن ذرَّته واستلامُه من قِبل المساعد الإنزيمي NADPH؛ الذي سيُستخدم في تفاعلات التركيب الضوئي اللاحقة. الاعتقاد الذي كان سائدًا سابقًا أن انتقال طاقة الفوتونات بين مئات جُزيئات الكلوروفيل التي تشكِّل الهوائي ومعقداتِ حصادِ الفوتونات II وI وصولًا إلى مركز التفاعُل الذي يبعُد عنها مساقة نانومترات، تتم بصورةٍ عشوائية. غير أن الانتقال العشوائي يُطيل زمن وصول طاقة الفوتونات إلى مركز التفاعل؛ وبالتالي يتبدَّد جزءٌ منها بشكل حرارة، فحسب McFadden & Al-Khalili (2014) المسافة المقطوعة في السير العشوائي تساوي الجذر التربيعي للزمن المُستغرَق فيها؛ وبالتالي إذا كانت سرعة الجسم هي ١م/ثانية، فستكون المسافة المقطوعة في ثانية هي ١م، وفي ثانيتَين ستكون ١م أيضًا، وتكون ٢م في ٤ ثوانٍ و٣م في ٩ ثوانٍ وهكذا. لكن في السير الموجَّه أو غير العشوائي ستكون المسافة المقطوعة ١م و٢م و٤م و٩م على التوالي؛ أي إن الوصول للهدف يكون أسرعَ كثيرًا.

ظاهرة نقل الطاقة في الأبعاد النانوية تتضمن السلوك الكمومي والسلوك التقليدي (Rebentrost *et al.*, 2009). وحيث إن نتائج التجارب تشير إلى كفاءةٍ عاليةٍ جدًّا؛ تصل إلى ١٠٠٪ في نقل الطاقة من جُزيئات الكلوروفيل إلى مركز التفاعُل في التركيب الضوئي، فلا بد من سلوك الإكسيتونات الطُّرقَ الأسرعَ للوصول إلى مركزِ التفاعُل. هذا النمط تبيَّن أنه يعود إلى حالة التراكُب الكمومي (Quantum superposition) حيث تسلُك الإكسيتونات كل الطرق في الوقت نفسه وليس القفز الانتشاري التقليدي من جُزيئة كلوروفيل إلى أخرى.

إن نقل الاستثارة الطاقية خلال المنظومات المتآثِرة يلعب دورًا مهمًّا في العديد من المجالات في الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا. غير أن التآثُر غير المنضبط لشبكات النقل أو البث في بيئةٍ ضوضائيةٍ تُعطي تصوُّر أنها تفسدُ قدرتها على النقل، خاصة عندما تكون

المنظومة كمومية (Caruso *et al.*, 2009). وحسب Sarovar *et al.*, (2010) فإن منشأ التماسُك الكمومي في معقدات حصاد الضوء في التركيب الضوئي يرجع إلى التراصُف الكثيف لجزيئات الصبغة؛ حيث يكون معدَّل الفواصل بينها بحدود ١٥ أنكستروم (١,٥ن م). في فواصل كهذه يكون الارتباط الثنائي القطب (Dipole coupling) لهذه الجزيئات مهمًّا، ويؤدي إلى تآثُرات التماسُك الكمومي في فتراتٍ زمنيةٍ ملحوظة. وحيث إن معقدات حصاد الضوء هذه منظوماتٌ متعددةُ الأجزاء ومترابطةٌ ومتماسكةٌ إلكترونيًّا، فمن الراجح حصول التشابُك الكمومي (Entanglement). وفي دراستهم لمنظومة FMO في الظروف الطبيعية، بيَّن الباحثون أن هذه المنظومة تتضمَّن حُصول التشابُك الكُمومي على نطاقٍ كبيرٍ بين حوامل الصبغات الثنائية الوحدات، كما يحصُل التشابُك الكمومي المتعدِّد الأجزاء الطويل المدى بمستوياتٍ صغيرةٍ حتى في درجات الحرارة الفسلجية. واعتبر هؤلاء الباحثون أن هذا الكشف يمثِّل أوَّل توثيقٍ كمِّي مُحكَم لحصولِ التشابُك الكمومي في المنظومات البيولوجية. ودرَس Ishizaki & Fleming (2010) التشابُك الكمومي في جُزيئات الكلوروفيل في معقد حصاد الضوء II وبيَّنا حصول تشابُكٍ كموميٍّ قوي في الاستثارات المفردة. كما سبق أن بيَّن Thorwart *et al.*, (2009) حصول التشابُك الكمومي بين زوجَي الإكسيتونات المترابطة في ظروف تبادُل حالاتِ تبديدِ الطاقة القوي والضعيف. غير أن حصول الظواهر الكمومية (التراكُب والتشابُك وغيرها) كما هو معروفٌ يجب أن تحصُل في فتراتٍ زمنيةٍ قصيرة جدًّا قبل حصول فك التماسُك (Decoherence). وحيث إن تجارب دراسة الظواهر الكمومية في النماذج غير الحية في المختبرات الفيزيائية تتم في درجات حرارة تقترب من الصفر المطلَق، وفي حيِّزٍ مفرَّغ من الهواء لتجنُّب التشويش، فإن حصولها في المواد الحية والكائنات الحية المكتظَّة بالجُزيئات أمرٌ لم يكن متوقعًا إطلاقًا. لكن Engel *et al.*, (2007) أثبتَ حصولَ التماسُك الكُمومي في التركيب الضوئي من خلال ملاحظة إشارات النبض الكمومي في الإكسيتونات في معقد Fenna–Matthews–Olson (FMO) التي يُوصِّلها إلى مركز التفاعُل في بكتيريا الكبريت الخضراء تحت ظروف درجة حرارةٍ واطئةٍ (−١٧٠م°). وحسب Castro *et al.*, (2008) فإن التراكُب والتشابُك الكموميَّين في معقد امتصاص الضوء–مركز التفاعل يقومان بدَورَين مهمَّين هما: زيادة كفاءة التركيب الضوئي، وحماية ماكنة التركيب الضوئي من الاحتراق، عن طريق التحكُّم بهذه الكفاءة.

ويؤكِّد Whaley *et al.*, (2011) تحقُّق التشابُك الكمومي غير العابر في الوضعيات البيولوجية والتي هي ليست في حالة توازُن مع البيئة؛ فقد تَم دراسة حركيات الإكسيتون

في معقد FMO والتشابُك الكمومي الإلكتروني في تراكيب البروتين-الصبغات. وناقش الباحثون المعطيات المتحقِّقة في التشابُك الكمومي في معقد حصاد الضوء II (LHCII) الأكثر تعقيدًا وحساسية.

وبيَّنَت التجارب اللاحقة أن النقل الكمومي في التركيب الضوئي، لا يقتصر على ظروف درجات الحرارة الواطئة جدًّا كما ذُكر أعلاه؛ فقد أكَّد Panitchayangkoona *et al.*, (2010) أن اقتناص وتركيز الطاقة الشمسية بنقل الإكسيتونات إلى مركز التفاعل، يحصل بكفاءةٍ كموميةٍ تقترب من الكمال. وباستخدام معقد FMO تُشير الدراسات النظرية المتضمِّنة نقل الطاقة المتماسك وغير المتماسك كموميًّا (النقل التقليدي) وفك التماسك الحراري إلى أن البيئة تساعد على حصول تصعيد في كفاءة النقل الكمومي في درجاتِ حرارة قريبةٍ من درجات الحرارة الفسلجية، وأن التماسك الكمومي في معقد FMO في درجات الحرارة الفسلجية يستمر لمدة ٣٠٠ فمتوثانية، وهي مدةٌ كافيةٌ لإتمام نقل الطاقة في التركيب الضوئي. وأرجع الباحثون هذا الزمن (الطويل) لبقاء التماسُك إلى الحركات المتناسقة ضمن البروتين المحيط بحاملات الصبغة ودرجة الحماية التي يوفِّرها البروتين تكون ثابتةً على مدًى من درجات الحرارة بين ٧٧ كالفن (−١٧٠م°) و٢٧٧ كالفن (٤م°)؛ فالبروتين يمهِّد الوضع الطاقي، ويُسهِّل عملية نقل الطاقة رغم التقلُّبات الحرارية، والمسألة المهمة هو أن يستمر خلال عملية نقل الطاقة في درجات الحرارة الفسلجية. مع زيادة درجات الحرارة، تقود أنماط اهتزاز البروتين المستثار حراريًّا التقلُّبات الحرارية الكبيرة، فتُعجِّل بفك التماسُك الكمومي. إن تحطيم الطور الموجي هذا يبدو غير ملائم، إلا أن Mohseni *et al.*, (2008) وكذلك Plenio & Huelga (2008) بيَّنوا أن تبادُل الأدوار الحساس بين التماسُك الكمومي وفك التماسُك الكمومي، يخلُق مساراتِ نقلٍ سريعةً وأحادية الاتجاه ضمن هذه المعقدات تؤدِّي إلى عمليةِ نقلِ طاقةٍ إلكترونيٍّ عالية الكفاءة. هذا السيناريو يُبيِّن أن التماسُك الكمومي يتخطَّى حاجز طاقة، لكن كسر الطور الموجي يُبقي الإثارة في الموقع الهدف؛ لذا يمكن القول إن النقل الكفوء يتطلَّب كلا الأمرَين؛ نقل الطاقة بالتماسُك الكمومي وكسر الطور الموجي. وكان Lee *et al.*, (2007) قد بيَّنوا أن بيئات البروتين المتناسقة تحفظ التماسُك الإلكتروني في معقدات التركيب الضوئي، وتسمح للطاقة المستثارة بالحركة المتماسكة كموميًّا عَبْر المكان، ممكِّنة بذلك من اقتناصٍ كفوءٍ للطاقة في التركيب الضوئي. وفي الاتجاه نفسه، شخَّص Caruso *et al.*, (2009) آلياتٍ رئيسةً تعمل بواسطتها الضوضاء، فيما يبدو مناقضًا للبديهة، ككاسرٍ للطَّور الموجي

على المساعدة في عملية النقل عَبْر شبكة تبديد الطاقة، وفتح مساراتٍ إضافية لنقل طاقة الإثارة. وعمومًا يكون تبادُل الأدوار بين الخواص الكمومية وضوضاء البيئة التي لا يُمكِن تفاديها، هو الذي يؤدي إلى الوضع المثالي للمنظومة. وحسب Rebentrost *et al.*, (2009) فإن النقل الكمومي بمساعدة البيئة يحصُل في أنواعٍ مختلفةٍ من نُظم النقل. وهو مشابهٌ نوعًا ما للرنين العشوائي؛ فإضافة ضوضاء لمنظومةٍ متماسكةٍ كموميًّا، يشجِّع على حصول معدَّل تحوُّلٍ مناسب.

كما تم إبراز دَور التشابُك الكمومي (Entanglement) في نقل طاقة الاستثارة؛ حيث أُشير إلى تبادُل الأدوار بين نشوء التشابُك الكمومي لمسافات وفتراتٍ زمنيةٍ قصيرة (من خلال تآثُر التماسُك الكمومي) المتبوع بانهيار التشابُك الكمومي على المسافات والأزمنة الأطول (من خلال الضوضاء الكاسرة للطَّور الموجي) يبدو ضروريًّا للنقل الأفضل للطاقة في التركيب الضوئي (Carus *et al.*, 2010). وبيَّن Hildner *et al.*, (2013) في تجاربهم على معقدات حصاد الطاقة المنفردة في البكتيريا الأرجوانية *Rhodopseudomonas acidophila* حصولَ نقلِ طاقة متماسكٍ كموميًّا فائق السرعة تحت الظروف الفسلجية. ووجدوا أن التماسُك الكمومي الطويل الأمد (٤٠٠ فمتوثانية)، يجعل نقل الطاقة في منظومات التركيب الضوئي فعَّالًا بوجود حالة اللانظام، وهو متطلب لعملية حصاد الطاقة الكَفُوءَة.

باستخدام التحليل الموجي لمركز تفاعُل النظام الضوئي II بواسطة المطيافية الإلكترونية الثنائية الأبعاد (Two-dimensional electronic spectroscopy) تمكَّن Romero *et al.*, (2017) من توضيح أن التماسُك بين الإكسيتونات، المحفِّز لمسارَي تفاعُل فصل الشحنة، يكون فعَّالًا لمدة تزيد عن ٥٠٠ فمتوثانية. وأورَد Marais *et al.*, (2018) حصول التماسُك الكمومي الإلكتروني خلال نقل الإكسيتونات إلى ٦٠٠ فمتوثانية أو أكثر. وإن التماسك بين حالات الإكسيتون ونقل الشحنة؛ أي المواد المتفاعلة والنواتج لتفاعُل فصل الشحنة على التوالي، تكون فعَّالة لمدة ١ بيكوثانية على الأقل. هذه النتائج تستدعي أن يوظَّف مركز تفاعُل النظام الضوئي II التماسُك الكمومي في مقايسة مسارات نقل الإلكترون المتنافسة، وإنجاز عملية نقل إلكترون موجَّهة وفائقة السرعة. وتشير القياسات المتعددة الأبعاد الفائقة السرعة لمعقدات حصاد الضوء في التركيب الضوئي إلى حصول تماسكاتٍ كموميةٍ بأبعادٍ زمنيةٍ تُقارَن بعمليات نقل الطاقة (Wang *et al.*, 2019).

(٧) اختزال الكاربون في التركيب الضوئي
Reduction of carbon in photosynthesis

في هذه العملية يتم استخدام نواتجِ نقلِ الإلكترونات في التركيب الضوئي، وهي جُزيئات ATP الخازنة للطاقة وجُزيئات NADPH المختزلة لغرض اختزال الكاربون من غاز ثاني أوكسيد الكاربون الذي مصدَره الهواء.

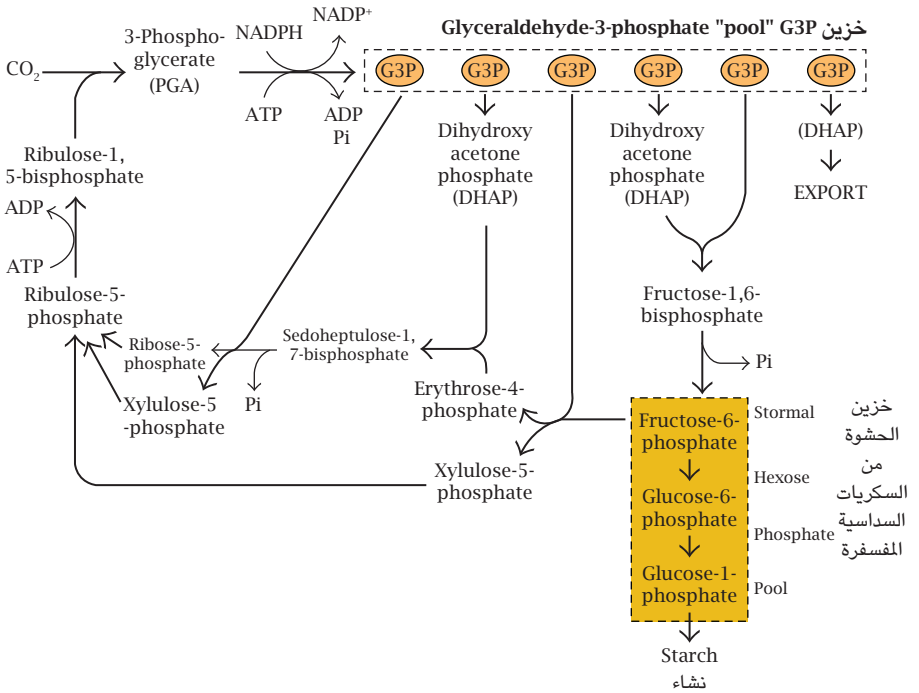
تحصُل هذه العملية عَبْر سلاسل من التفاعلات الكيميائية التي يشترك بها أحد عشر إنزيمًا على الأقل بضمنها دورة كالفن (شكل ١٣-١٢). تشمل الأخيرة ثلاثَ مراحل متتالية هي:

(١) إضافة الكاربون (Carboxylation) من CO_2 إلى السكَّر الخماسي ريبيولوز الثنائي الفوسفات Ribulose bisphosphate (RuBP) وتحويله إلى جُزيئتَين من الحامض الثلاثي الكاربون المفسفر كليسرالديهايد-٣-فوسفات Glyceraldehyde-3-phosphate (G3P). هذه العملية تسير بواسطة الإنزيم RuBisCO الذي ربما يكون أكثر البروتينات وفرةً في الطبيعة؛ كونه المصدر للكتلة الحيوية على الأرض حسب McFadden & Al-Khalili (2014).

(٢) الاختزال وهو تحويلُ الحامض الثلاثي الكاربون المفسفَر G3P إلى سكرٍ ثلاثيٍّ مفسفَر باستخدام جُزيئتَي ATP وNADPH الناتجتَين من عملية نقل الإلكترون في التركيب الضوئي.

(٣) إعادة التكوين (Regeneration) ويتم فيها تحويلُ بعض جُزيئات السكَّر الثلاثي المفسفَر إلى السكر الخماسي المفسفَر RuBP باستخدام جُزيئة ATP إضافية، لتأمين استمرار عملية تثبيت CO_2.

في ثلاث دورات من دورة كالفن يتم أخذ ٣ جزيئات CO_2 من الهواء، وتُستهلك خلالها ٦ جُزيئات NADPH و٩ جُزيئات ATP. وهكذا في تثبيت جُزيئة CO_2 واحدة، تُستهلك ٢ جزيئة NADPH و٣ جُزيئات ATP. وحيث إن كل جزيئة NADPH تخزن ٢ إلكترون، فيكون المطلوب ٤ إلكترونات لتثبيت جُزيئة CO_2 واحدة. هذا يقابل إدخال ٥٢٩ كيلوجول/مول CO_2. وإن أكسدة ١ مول من السكَّر السداسي يعطي حوالي ٢٨١٧ كيلوجول أو ٤٦٩ كيلوجول/مول CO_2. وهكذا تمثِّل عملية الاختزال في التركيب الضوئي خزنَ طاقةٍ بكفاءة ٨٨٪. وإذا احتسبنا الطاقة المفقودة من ٣ جُزيئات ATP لإعادة تكوين RuBP، فإن خزن الطاقة يكون بكفاءة ٥٨٪ (Hopkins & Hüner, 2009).



شكل ١٣-١٢: دورة اختزال الكاربون (دورة كالفن). محوَّرة عن: Hopkins & Hüner (2009).

السكَّريات الثلاثية المتكوِّنة في دورة كالفن تكون مصدرًا لتكوين كل السكَّريات والمواد العضوية المختلفة عَبْر مساراتٍ أيضيةٍ متعدِّدة. كما تكون مصدرًا رئيسًا للطاقة لكل الأحياء الغيرية التغذية الأخرى؛ كالكثير من أنواع البكتيريا، وكل أنواع الفطريات والحيوانات والإنسان بالطبع.

إن عمل الظواهر الكمومية في التركيب الضوئي في البكتيريا والطحالب (Chenu & Scholes, 2015; Jedlicka, 2017) والنباتات يشير إلى أن التطوُّر انتخب واستثمر الظواهر الكمومية في نمذجةِ عملية التركيب الضوئي في ثلاثِ ممالكَ أحيائيةٍ مختلفة، وهذا يُعطي زخمًا لأبحاث البيولوجيا الكمومية في كونها ظواهرَ غيرَ عابرة في حياتية الكائنات الحية.

وهكذا ما كانت الأحياء لتتطوَّر وتُظهِر هذا التنوُّع العظيم الذي نشهده لولا عملية التركيب الضوئي التي وفَّرَت مصدر طاقةٍ هائلًا، لا ينضبُ إلا بانطفاء الشمس. وبيَّنَت لنا أن الحياة بكل تنوُّعها وتفاصيلها ما هي إلا نتاجُ الصراع الجدلي بين عمليات التماسُك الكمومي الخاطفة وفك التماسُك الكمومي الممتد والتي تعجز البديهة البشرية عن تصوُّرها.

الفصل الرابع عشر

الوعي وميكانيك الكَم

Consciousness and Quantum Mechanics

«لا يمكن التعبير عن الوعي بالمصطلحات الفيزيائية؛ فالوعي أساسيٌّ على نحوٍ مطلَقٍ لا يمكن التعبير عنه بأي مصطلحٍ آخر.»

أروين شرودنجر

(١) الوعي Conciousness

لقد نشأَت علاقةٌ وثيقةٌ بين ميكانيك الكَم منذ نشأته والوعي من خلال موضوعة «تأثير المراقب» على تطوُّر الحالة الكمومية (Li *et al.*, 2019; Theise & Kafatos, 2013; Stapp, 1991). الوعي يتضمَّن الإدراك وهو الخبرة الموضوعية للعالم الداخلي والخارجي. وهذا يشمل الإحساس بالنفس والمشاعر والاختيار والسيطرة على السلوك الإرادي والذاكرة والتفكير واللغة والتأمُّل وتكوين الصور والأنماط المجسمة. وهكذا تتأسَّس نظرتنا إلى حقيقة الكون، ووجودنا على الوعي، لكن حقيقة الوعي وآليات عمله تبقى غير معروفة (Hameroff & Penrose, 2014).

يُعتبر الوعي من بين أهم المواضيع التي شغلَت وما زالت تشغل الفلاسفة والعلماء بمختلف التخصصات والناس العاديين جميعًا، والذي لم يتم فهمه بشكلٍ دقيق (Smit, 2018). واعتبر الفيزيائي المعروف، ميشيو كوكو، أن العقل والكون هما أعظم سِرَّين من أسرار الطبيعة كلها (Kaku, 2014).

الفلاسفة المثاليون يعتبرون الوعي هو الذي يحدِّد الواقع، بينما يرى الماديون أن الواقع موجود بغض النظر عن وجود الوعي به. مع ذلك يعتبر الفيلسوف عمانوئيل كانْت (Immanuel Kant) أن وعينا محدَّد بحواسنا، والتي قد لا تنقل لنا الواقع كما هو بالضبط، وإنما بالقَدْر الذي تتمكَّن من توصيله. وهكذا اختط ما يُعرف بفلسفة الشك. في حين يرى الماديون الجدليون أن التجربة هي الحكم الفاصل في صدقية وعينا، أو كما يقول غوته على لسان فاوست: أن شجرة الفلسفة رماديةٌ لكن شجرة الحياة هي الخضراء؛ فنجاح العلماء في إرسال المركبة الفضائية أبولُّو١١ سنة ١٩٦٩م إلى القمر، ونزول رُوَّاد الفضاء عليه، ورجوعهم إلى أرض الوطن سالمين، يؤكِّد أن قوانينَ نيوتن في الحركة وحسابات العلماء والمهندسين صحيحة. واكتشاف جُسيمات بوزونات هيغز (Higgs Bosons) سنة ٢٠١٢م، في مختبرات سيرن والموجات الثقالية سنة ٢٠١٦م، يؤكِّد صدقية نظرية بيتر هيغز والنسبية العامة لآينشتاين وهكذا. لكن الحيوانات سبقَت الإنسان في إدراك هذه العلاقة؛ فنجاح الكلب في التقاط العظم قبل وصوله الأرض بدقةٍ نقطوية، دليلٌ على إدراكه لعلاقات الكتلة والجاذبية والحركة. وما كانت الأسود والحيوانات المُفترِسة تعيش لولا وعيُها بالسرعة والخطوط والزوايا. واطَّلعنا في الفصل التاسع على استخدام الطيور للبوصلة الكمومية في الهجرة عَبْر البحار.

ما الذي جعل النباتات تَفرِد أوراقها لتستقبل أكبر كمية من ضوء الشمس وتُزيِّن أزهارها بالألوان والعطور؟ وكيف تمكَّن النبات الطُّفيلي دغل الساحرة (*Striga asiatica*) من ابتكار تقنية الرادار الجُزيئي لتحديد موقع أقرب الجذور للنبات العائل لغرض إصابته؟ (شريف، ٢٠١٢م). وما هو وراء سلوك الفطر المُمرِض للإنسان المشهور *Candid albicans* الذي يمتلك كل الجينات اللازمة لتكوين أبواغٍ جنسية لكنه لا يفعل تفاديًا لاكتشافه من قِبل جهاز المناعة؟ (شريف، Forche *et al.*, 2008; 2012 a). وكيف يتمكَّن فطر الصدأ *Puccinia graminis* من العثور بأقصرِ الطرق على الثغور في سطح ورقة النبات النجيلي من خلال تلمس الخيوط الفطرية لبروزات جدران الخلايا لسطوح الأوراق؟ (شريف، Deacon, 2003; 2012 b). وهل غَير إدراك الواقع خلف قدرة الفطر الهلامي *polycephalum Physarum* على الوصول الذكي للمادة الغذائية في متاهةٍ معقدة؟ (شريف، Nakagaki *et al.*, 2004a; 2004b; 2012 c). وكيف تتمكَّن الأحياء الوحيدة الخلية مثل البراميسيوم واليوغلينا من إيجاد شريكها في التزاوُج والتقاط المواد الغذائية والابتعاد عن الحواجز بعددٍ قليلٍ من المحاولات؟ كما أن البكتيريا المُتحرِّكة تتوجَّه

إلى المواد الغذائية وتنفرُ من المناطقِ الضارة، وثمَّة الكثير ما يمكن قولُه في هذا المجال عن البكتيريا. المثير للدهشة أن بعض الفايروسات على الأقل تستخدم نظام التحسُّس الجمعي، مع أن الفايروسات هي أشكالٌ حيةٌ غير خلوية؛ فجُسيمة الفايروس تتألَّف من علبةٍ بروتينيةٍ تحتضن بداخلها جينات الفايروس، والتي تكون بهيئة RNA أو DNA وبعضها يحصُل على غلاف من الخلية العائلة، كما أن البعض من أنواع الفايروسات يمكن أن يحتوي على عددٍ قليلٍ من البروتينات أو الإنزيمات. لاحظ هنا أن الفايروس لا يمتلك مئات آلاف الإنزيمات والبروتينات والتراكيب المعقدة وسلاسل التفاعُلات المحرِّرة والمحوِّلة للطاقة، إنها مادةٌ عضويةٌ معقدة لا فعالية حيوية لها أبدًا، وهي خارج الخلايا. ويمكن أن تفقد حيويتها وقدرتها على الإصابة على السطوح خارج الخلايا بعد أيامٍ أو أسابيع (Firquet *et al.*, 2015). لكنها تُظهِر الفعاليات الحيوية عندما تكون بتماسٍ مع الخلية الحية وبداخلها؛ أي إننا هنا مع كائنٍ يُظهِر شيئًا من «الوعي» وهو على حواف المواد الحية وغير الحية.

بل أعتقد أنني قد لا أبتعد كثيرًا عن الحقيقة حين أُبرِز ما قاله أحد الباحثين من أن الذرة تُخاطِب العالم بواسطة الفوتونات. حيث إن تعرُّض الذرة لفوتون يؤدي إلى تهيُّج إلكترون، لينطلق إلى مدارٍ أبعدَ عن النواة، وعندما تقل طاقة الإلكترون ينزل إلى مدارٍ أقرب للنواة، ويُطلِق فوتونًا إلى العالم. ويمكن أن أُضيف بأن الذرة تتعامل أيضًا من خلال الإلكترونات في مداراتها الخارجية مع تأثيرٍ معين لبروتونات النواة، فتنشأ الأواصر مع ذراتٍ أخرى لتُشكِّل الجُزيئات. وهكذا ثمَّة مُدخَلات إلى منظومة الذرة ومعالجة (تغيُّرات داخلية) ومُخرجات تُمثِّل تأثيراتها في العالم المحيط. وعلى حد تعبير Lloyd (2006) فإنك إن فهمتَ لغة الذرات وجُسيماتها، فإنك ستتمكَّن من التعامل معها في بناء الكومبيوتر الكمومي. الفكرة التي أريد أن أُبرِزها هنا، أن «بذرة» الوعي نبعَت من الذرة، وكبرَت عَبْر الجُزيئات وتعقدَت وتنوعَت مع الأحياء البدائية، لتتطور بتصاعُد في الأحياء المعقدة وصولًا إلى الحيوان، وبلغَت قمتها في الإنسان حيث نتجَت عنها أنماطٌ غاية في التعقيد. هذا الرأي يستند إلى مبدأ أن موضوعات الوعي الأساسية هي المعلومات (Information)، والمعلومة هي ناتج التقابُل بين حالتَين مختلفتَين؛ مشحون-غير مشحون، شحنة سالبة-شحنة موجبة، برم مغزلي (Spin) أعلى-برم مغزلي أسفل، جسيم-موجة، طاقة عالية-طاقة منخفضة، جسيم موجود-جسيم مفقود وهكذا، كل هذا موجود في الذرات. ألا يكفي لأن تكون بذرة «الوعي» في الكون؟ الذي فاجأني، وبعد كتابة هذه السطور، علمتُ أن

ثمَّة من سبقَني إلى هذا الاستنتاج بأن الوعي خاصية جميع المواد؛ الذرات والجسيمات الذرية تمتلك عناصر الوعي. هذا ما قاله الفيلسوف باروخ اسبينوزا في القرن السابع عشر Spinoza (1677) والعالم رينج في أواسط القرن العشرين Rensch (1960) (Hameroff, 1994). وحسب تعبير Tarlaci (2010) لا يمكن فصل الوعي والعقل عن المادة. ويذهب Scaruffi (2001) إلى أن الوعي صفةٌ فيزيائيةٌ جوهرية وليس ناتجًا عن فعل مكوِّناتٍ فيزيائيةٍ أخرى. ويُعزِّز رأيه بنظرة أحد مؤسِّسي نظرية الكَم نيلز بور من أن دالَّة الموجة الكمومية للمادة تُمثِّل ملمحَ وعيها؛ حيث إن موجة الإلكترون تُكافئ عقل المادة. كما يمكن اعتبار ازدواجية الموجة-الجسيم، يمكن أن تُفسِّر ازدواجية العقل والمادة.

إن انبثاقَ الوعي في الدماغ والخلايا الحية يمكن أن يرجعَ إلى تراكُم التراكيب الجُزيئية خلال التطوُّر والناشئة عن خواصَّ جديدةٍ يمكن أن تُظهِرها الموادُّ وهي في الحالة المجهرية أو خلال أحداثٍ على المستوى الكمومي؛ ومن ثَم تُبدِيها بالشكل العياني التقليدي؛ فخواص التوصيل الفائق (Superconductivity) حيث تكون المقاومة لمرور التيار صفرًا، والميوعة الفائقة (Superfluidity) حيث تصبح اللزوجة صفرًا، تنشأ نتيجة وصول ذرات هذه المواد إلى مستوًى عالٍ من التماسُك الكمومي في درجات الحرارة الواطئة التي تقترب من الصفر المطلَق. كما أن وجود المواد بحجومٍ نانوية يُكسِبها خواصَّ عيانيةً تقليدية متميزة عديدة. ويرى بعض الباحثين مثل Hunt & Schooler (2019) أن الاشتراك برنينٍ متزامنٍ هو مفتاح الوعي، وأن السرعة العالية لتبادل المعلومات والتي تتم بواسطة انتقالات أطوار مسالك الطاقة المختلفة في النُّظم البيولوجية، تمكِّن الحياة من تحقيقِ تراكيب رنينٍ على المستوى الكبير؛ وبالتالي تراكيب وعيٍ كبيرة لا تتمكَّن من تحقيقها التراكيب أو المنظومات غير الحية.

هذه أمثلةٌ قليلة جدًّا عن قدرة الأحياء على الإدراك والوعي بدءًا من الفايروس والبكتيريا وصولًا إلى الإنسان. إن المنظومات البيولوجية تحتاج إلى تحسُّس ومعالجة المعلومات من البيئة من أجل اتخاذ القرار الحيوي لنموها وبقائها (Lan & Tu, 2016).

لكن من الواضح أيضًا أن مجال الوعي وقدرته تختلف مع درجة تعقيد الأحياء التي يتربَّع على قمتها الوعي البشري. إن قمة الوعي المستندة إلى جهازٍ عصبي متزايد التعقيد امتلكَتْها الحيوانات. وهذا الجهاز يتألف من خلايا عصبيةٍ متخصصةٍ كثيرة العدد ومترابطة مُكوِّنة ما يُعرف بالشبكة العصبية. غير أن الأحياء الأخرى غير الحيوانية لا تمتلك خلايا عصبية؛ وعليه يمكننا تمييز وعيٍ يستند إلى جهازٍ عصبي متصاعد التعقيد

وآلياتٍ غير عصبية بسيطة التركيب نسبيًّا. هذا ينسجم مع مقولة جارلس دارون «إن الوظائف البيولوجية تختلف جوهريًّا في الشكل وليس في النوع» (Lyon, 2015)؛ وعليه فإن دراسة الوعي في مستوياته المختلفة، يمكن أن تُساعد في فهمه.

تعيش الأحياء عادةً في بيئاتٍ معقدة متغيرة تعجُّ بالأحياء الأخرى المُفترِسة أو المنافسة. وهي مُجبَرة على تبادل المواد والطاقة والمعلومات مع البيئة والتعامل مع الأحياء الأخرى باعتبارها جزءًا من البيئة. وهكذا فهي حسب Baluška & Levin (2016) عليها اتخاذ الكثير من القرارات عند القيام بفعالياتها المختلفة. مع النمو التطوُّري، دفع الضغط الانتخابي إلى نمذجة اتخاذ القرار بطريقةٍ لا فرار منها، وإلى ابتداع وتطوير آليات تحسُّس المؤشرات البيئية؛ كدرجات الحرارة والرطوبة والضوء والمواد الغذائية وغيرها. وهذا ربما تأسَّس على خواصِّ الجسيمات والذرات والجُزيئات التي تتكوَّن منها الخلايا الحية؛ فالتنافر أو التجاذب بين الجسيمات المشحونة، والميل إلى أو النفور من جُزيئات الماء أو الدهون، والتفاعل بين الذرات والجُزيئات، وتغيُّر مستويات الطاقة، وتأثيرات المجالات الكهرومغناطيسية، أوجد العلاقة بين المؤثِّرات والاستجابات وقاد إلى القدرة على التعرُّف (Recognition) ومن ثَم التمييز بين الذات (Self) وغير الذات (Non-self) الذي تكلَّل بتكوين البروتينات السكَّرية على أغشية الخلايا والمستقبلات. ومن خلال تجارب الخطأ والصواب دُفعَت الأحياء إلى استثمار تأريخِ تجاربها، فكان نشوء الذاكرة، والذي مهَّد إلى معالجة المعلومات فيما يُشكِّل الحوسبة من أجل تلبية الاحتياجات والتنبُّؤ بالظروف المستقبلية اعتمادًا على قضيةٍ مركزيةٍ هي المحافظة على حالة التوازُن الداخلي (Homeostasis). وهكذا، يمكن التعبير عن كل هذه الآليات وغيرها من اكتساب المعلومات وخزنها ومعالجتها واستخدامها على مختلف مستويات التنظيم البيولوجي بالوعي.

تلعب الذاكرة دورًا مركزيًّا في عملية الوعي والإدراك؛ فبدون الذاكرة، يكون الإحساس بالتغيير مستحيلًا. وبدون القدرة على تحسُّس التغيير يكون قرار تغيير السلوك عشوائيًّا. وفي غياب الذاكرة، يصبح التعلُّم أيًّا كان مستحيلًا (Lyon, 2015).

ويمكن تعريف الذاكرة حسب Baluška & Levin (2016) على أنها تحويرٌ في البناء الداخلي المُعتمِد على التجربة بطريقة خصوصية المحفز، والتي تغيِّر الطريقة التي تستجيب بها المنظومة للمحفِّزات في المستقبل كدالةٍ للماضي. وللحفاظ على معلومات الذاكرة، لا بد من أن تُخزَّن على موادَّ حساسةٍ لكنها مستقرة مثلما تُخزَّن المعلومات في الكومبيوتر على قرصٍ صلب (Disc). وهنا يمكن أن يلعب الهيكل الخلَوي المؤلَّف من الأُنيبيبات الدقيقة

(Microtubules) والتي تتألَّف بدورها من سلاسل بروتين التيوبيولين (Tubulin) والتي تتخلَّل فضاء الخلية دورًا أساسيًّا في حفظ واسترداد المعلومات. الهيكل الخلَوي يُعتبر من عُضَيَّات الخلية؛ وبالتالي يكون وجوده مقتصرًا على الخلايا الحقيقية النواة. ومع أن وجوده لم يؤكَّد فعلًا في البكتيريا، إلا أن وجود الجين ftsZ (الخويط الحساس للحرارة Z) في البكتيريا *Escherichia coli* الذي يشفر لبروتين له طيَّة تيوبيولين (Bermudes *et al.*, 1994). وإن الإنزيم FtsZ GTPase يُكوِّن أُنيبيباتٍ بقُطر ١٤–٢٠ن م تتألَّف من ١٢–١٣ من اللُّيَيفات كثير الشبه بأُنَيبيبات التيوبيولين في الأحياء الحقيقية النواة (Thompson, Bramhill & 1994). ويؤكِّد الباحثون وجود جميع مكوِّنات الهيكل الخلَوي في الخلايا البكتيرية؛ بما فيها التيوبيولين البكتيري FtsZ والأكتين البكتيري MreB وبروتينات الخويطات الوسطية IF والتي يمكن أن تكون المصدر التطوُّري للتيوبيولين في الأحياء الحقيقية النواة (Graumann, 2007; Cabeen & Jacobs-Wagner, 2010; Pilhofer *et al.*, 2011). إن تحديث أوضاع المنظومة على أساس تكوُّن الذاكرة الحسية يُعبَّر عنه بالحوسبة.

يمكن تعريف الإدراك البيولوجي على أنه الآلياتُ الحسية وغيرُها من آليات معالجة المعلومات التي يتعود عليها الكائن الحي مستقبلًا؛ كالتقييم والتآثُر مع البيئة لتلبية حاجاته الوجودية، وعلى رأسها النمو والتكاثر من أجل البقاء (Lyon, 2014). ولتحقيق هذه الإمكانية، لا بد من امتلاك الأحياء لمجموعاتِ وسائلَ (Toolkits) تتمثَّل بالآتي:

التحسُّس/الفهم (Sensing/Perception): القدرة على تحسُّس وتمييز الخواص الوجودية البارزة في البيئة المحيطة.

التقييم (Valence): القدرة على تقدير قيمة للمخَّص المعلومات عن الأشياء المحيطة في لحظةٍ معيَّنة نسبة إلى حالته الحاضرة.

السلوك (Behavior): قدرة الكائن الحي على التكيُّف مع بيئته الداخلية أو الخارجية من خلال تغيير العلاقات التركيبية والوظيفية والمكانية له.

الذاكرة (Memory): القدرة على حفظ المعلومات حول الماضي المباشر أو ربما البعيد، وتضبيط الإحساس الذاتي بناءً على هذه المعلومات من خلال تضخيم الإشارة مثلًا.

التعلُّم (Learning): القدرة على تكييف السلوك حسب التجربة الماضية؛ ما يمكِّن من الاستجابة الأسرع.

الحَدْس أو التوقُّع (Anticipation): القدرة على التنبؤ بما يرجَّح أن يحدُث تاليًا أثَر محفِّز حصل.

التكامُل الإشاري أو اتخاذ القرار (Signal integration–Decision making): القدرة على ربط المعلومات من مصادرَ متعددة؛ حيث إن جميع الأحياء كما يبدو تتمكَّن من تحسُّس أكثر من شيءٍ في اللحظة المعيَّنة. ويبدو أن بعض أنواع البكتيريا مؤهَّلة لتحسُّس دزائن من الحالات المختلفة معًا.

الاتصالات (Communication): القدرة على التفاعل المُثمِر مع أفراد النوع (وبعض الأنواع الأخرى) بما في ذلك القيام بفعلٍ جماعي يمكن أن يتضمَّن أو لا يتضمَّن طريقةً لتمييز «نحن» من «هم» (Lyon, 2015).

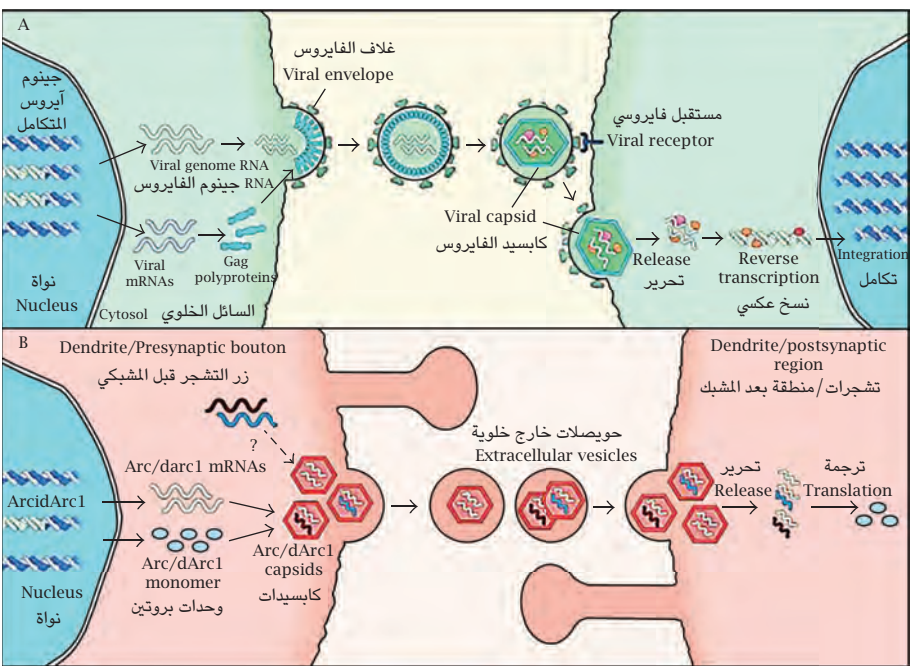
هذه الخواصُّ والفعاليات موجودة في البكتيريا وهي موجودةٌ على نحوٍ أكثر تعقيدًا وتطورًا في الأحياء الأخرى الحقيقية النواة، والتي تشير إلى أن الوعي قد تطوَّر مع تطوُّر الكائنات الحية. والتطوُّر يفضي بالضرورة إلى التعقيد وما ينتج عنها من توسيع وتعميق الإمكانات.

صحيح أن التطوُّر ينتُج عن تعرُّض الكائن الحي بغَض النظر عن درجة تعقيده إلى تحدياتٍ مرجعها تغيُّر العوامل البيئية، وكذلك الممكنات الداخلية، إلا أن هذا لا يتم بشكل آليٍّ بحت وسلبيةٍ من قِبل الكائن الحي وإنما بتفاعُل الكائن الحي مع الحدث. وهذا الرأي ينطلق من حقيقة أن الكائن الحي وبغَض النظر عن درجة تطوُّره، هو منظومةٌ معقَّدة متكيِّفة مفتوحة لها هدف (انظر الفصل الأول). ولتحقيق الهدف لا بد من الإدراك والوعي.

اعتبر بعض الباحثين أن السلوك يُعتبر على العموم ذكاءً عندما يتمكَّن الفردُ من الكائنات الحية الذي يعيش في ظروفٍ شديدة المنافسة ومهدِّدة، من تغيير سلوكه لتحسين فُرص بقائه. مثل هذه الظروف تعانيها النباتات وجميع الكائنات الحية الأخرى التي تعيش في بيئاتٍ بَرِّية حقيقيةٍ حيث يكون فيها تهديد البقاء شائعًا جدًّا (Calvo *et al.*, 2019; Gilbert, 2001; Trewavas, 2003).

أورَد Baluška (2010) عددًا من الخواص الخلوية المشتركة بين الخلايا العصبية والخلايا النباتية بضمنها عدم ارتباط عمل جهاز كولجي بالجسم المركزي والنمو الطرفي للخلية العصبية والخلية النباتية ومحور جهد الفعل الكهربائي وغيرها. وأبرز قولُ جارلس دارون وفرانسيس دارون من أن أطراف جذور النباتات تمثل القطب الأمامي العصبي

لأجسام النباتات. كما تشارك الخلايا العصبية الخيوط الفطرية في النمو الطرفي كما في الأوكسونات وطريقة التفرُّع للنتوءات والتشجُّرات. وفي دراسة مقارنة، بيَّن Etxebeste & Espeso (2016) وجود ارتباطاتٍ مدهشة في آليات الاتصالات الخلوية على مسافاتٍ بعيدةٍ بين النواة وطرف الخيط الفطري والنواة وطرف المحور (Axon) في الخلية العصبية.



شكل ١٤-١: بروتينات Gag Arc/dArc1 الشبيهة بـ Gypsy تتجمَّع بشكلٍ يشبه الكابسيد الفايروسي لتنقل mRNAsarc/darc1 إلى مواقع بعد المشبك (A). بروتينات Gag الرتروفايروسية تمكِّن من تكوين الكابسيد لرزم ونقل جينومات الفايروس إلى سايتوبلازم الخلايا الحديثة الإصابة. (B) تتجمَّع بوليمرات بروتينات Arc الفأر وArc1 (dArc1) الدروسوفيلا بشكلٍ مشابهٍ للكابسيد الفايروسي. تتحرَّر كابسيدات Arc/dArc1 من الخلايا العصبية في حويصلات خارج خلوية وتنقل قريباتها من جُزيئات mRNA (الخضراء) وممكن غيرها من جزيئات RNA (الحمراء، الزرقاء) في المشبك أو الروابط العصبية العضلية. مُحوَّر عن: Parrish & Tomonaga (2018).

المعروف أن الجينَ *Arc* يلعب دورًا أساسيًّا في خزن المعلومات الطويلة الأمد في دماغ اللبائن، ويسير مختلف أشكال المرونة المشبكية وله دَور في اضطرابات النمو العصبي. لقد بيَّن عددٌ من الباحثين Pastuzyn *et al.*, (2018) وAshley *et al.*, (2018) وParrish & Tomonaga (2018) أن بروتينات Arc تتشكل تلقائيًّا بهيئةٍ شبيهةٍ بعلب (كابسيدات) جُسيمات الفايروس، والتي تغلِّف جُزيئات RNA. بروتينات Arc الداخلية تُحرَّر من الخلايا العصبية في حويصلات خارج خلوية من أجل نقل جُزيئات mRNA لبروتين Arc إلى خلايا مستهدفةٍ جديدة، والتي يمكن أن تقوم بالترجمة المرتبطة بالفاعلية (شكل ١٤-١). هذه النتائجُ تبيِّن أن بروتينات Arc تُظهِر خواصَّ جُزيئيةً مشابهة لبروتينات Gag الرتروفايروسية. ويشير التحليل التطوري، إلى أن الجين *Arc* كان قد نشأ من خط فقاريات للجينات القافزة القهقرية (Retrotransposons) *Ty3/gypsy* والتي هي بدَورها جَدٌّ للفايروسات القهقرية (Retroviruses). وهكذا يبدو أن بروتينات Gag قد كُيِّفَت خلال التطور لتسيير الاتصالات ما بين الخلايا في الجهاز العصبي.

ويستعرض Baluška *et al.*, (2016) أهمية عملية التخدير (Anesthesia) في عموم الأحياء، بدءًا من البكتيريا، مرورًا بالطحالب والفطريات والحيوانات الابتدائية والنباتات والحيوانات، وصولًا إلى الإنسان. كما أن عُضيَّات الخلية، مثل الميتاكوندريا والبلاستيدات والهيكل الخلوي، حساسة أيضًا للتخدير. هذا قاد العالم Claude Bernard ومن خلال تجاربه الكثيرة إلى القول «إن الحياة تُعرف بحساسيتها للتخدير». ومنذ اكتشاف التخدير في الإنسان من قِبل William T. Morton سنة ١٨٤٦م، باستخدام الإيثر (Ether)، ظهرَت ثلاثُ نظرياتٍ لتفسير آليةِ عملِ مواد التخدير آخرها تقول بوجود مُستقبِلاتٍ بروتينية لمادة التخدير. وكان Sonner & Cantor (2013) قد اقترحا وجود موادٍّ مخدِّرة داخلية المصدر تكيِّف وعي الكائن الحي؛ فثمَّة عددٌ من المركَّبات الأيضية التي تسبِّب فقدان الوعي إن وُجدَت بتراكيزَ كافية؛ مثل الأمونيا والأسيتون وβ-hydroxybutyric acid وPropionic acid.

تُنتِج الطحالب والنباتات تحت ظروف الإجهاد الكثير من المواد الطيارة ذات الفعل التخديري العام؛ مثل الكلوروفورم والإثيلين والكحول وغيرها، كما تُنتِج موادَّ ذات تأثيرٍ تخديريٍّ موضعي؛ مثل الكوكائين والثايمول واليوجينول (Tsuchiya, 2017). وتستخدم النباتات مثل هذه المواد لكسر سُبات البذور. كما تُنتِج البكتيريا والفطرياتُ الإثيلين تحت ظروف الإجهاد. وبيَّن Barodka *et al.* (2006) التأثير المثبِّط لمادة التخدير آيزوفلوران على نمو وتكاثر الفطر المُمرِض للإنسان *Candida albicans*. وتتوفَّر عددٌ من المعطَيات

عن تكوين مواد تخدير داخليًّا في الحيوانات والإنسان؛ ففي الأمراض الفسلجية في الإنسان يتراكم عددٌ من الأيضات ذات التأثير التخديري بتراكيزَ يمكن أن تُحدِث فقدان وعيٍ مؤقتًا أو دائميًّا كما في حالات الإغماء أو الغشاوة الناتجة عن حالات الإجهاد بسبب التعرُّض للجروح العميقة أو لإجهادٍ عاطفيٍّ قوي. ويبدو أن فقدان الوعي المؤقَّت يُخفِّف من المبالغات الحسية ويساعد على البقاء كآليةٍ دفاعية. وليس بعيدًا عن ذلك لجوء الإنسان منذ عهودٍ قديمةٍ إلى تناول المشروبات الكحولية ذات المصدر النباتي أو الميكروبي من أجل التخفيف من الإجهادات النفسية.

مما سبق نخلُص إلى أن الوعي والإدراك صفةٌ بيولوجيةٌ عامة، لها دورٌ أساسي في البقاء ولا تقتصر على الإنسان والحيوانات. من هنا تعدَّدَت النظريات التي تفسِّر طبيعة وآليات الوعي والإدراك؛ فثمَّة النظرية القديمة والشائعة والتي تعتمد مبدأ تفسير الوعي على أساسِ عملِ الخلايا العصبية من خلال تناوُب جهد الفعل الكهربائي ودَور بعض القنوات الأيونية والمواد الكيميائية التي تعمل كنواقل عصبية عَبْر شبكةٍ عصبيةٍ مترابطة من خلال قوانين الفيزياء التقليدية. أنهم ينظرون إلى الجهاز العصبي على أنه منظومةٌ خطية شبيهة بالحاسبة الاعتيادية تُعالِج المُدخَلات والمُخرَجات، المؤثِّرات والاستجابات بطريقةٍ حتمية.

وحيث إن معظم الدراسات المتعلقة بالوعي ستُركِّز على دماغ الحيوانات المتطورة والإنسان، لا بد من عرض مُكوِّنات الدماغ وآليات عمله كما تَعرِضه الكتب المتخصِّصة.

يبدأ عمل الدماغ بتلقي الإشارات (المعلومات) البيئية المؤثِّرة في حياتية الحيوان أو الإنسان عَبْر حواسِّه المتعدِّدة التي تتألَّف أساسًا من خلايا عصبية، ثم الاستجابة لها بعد معالجة المعلومات في الدماغ من خلال خلايا عصبيةٍ حركية تتصل بالعضلات والغُدد.

يتألَّف الجهاز العصبي من خلايا عصبية (Neurons) وخلايا مساعدة (Supporting cells). تقوم الخلايا العصبية الحسية (الموردة Afferent) بحمل الإشارات (النبضات) العصبية من المستقبِلات الحسية إلى الجهاز العصبي المركزي (CNS) (Central Nervous System). تقوم الخلايا العصبية الحركية (المصدرة Efferent) بنقل النبضات من الجهاز العصبي المركزي إلى العضلات والغُدد. ثمَّة نوعٌ ثالث من الخلايا العصبية تُسمَّى المشاركة تشترك في عمل الدماغ والحبل الشوكي في التعلم والذاكرة. الخلايا العصبية الحسية والخلايا العصبية الحركية تُشكِّل الجهاز العصبي المحيطي (PNS) (Peripheral Nervous System). الخلايا العصبية الحركية التي تحفِّز تقلُّص العضلات الهيكلية

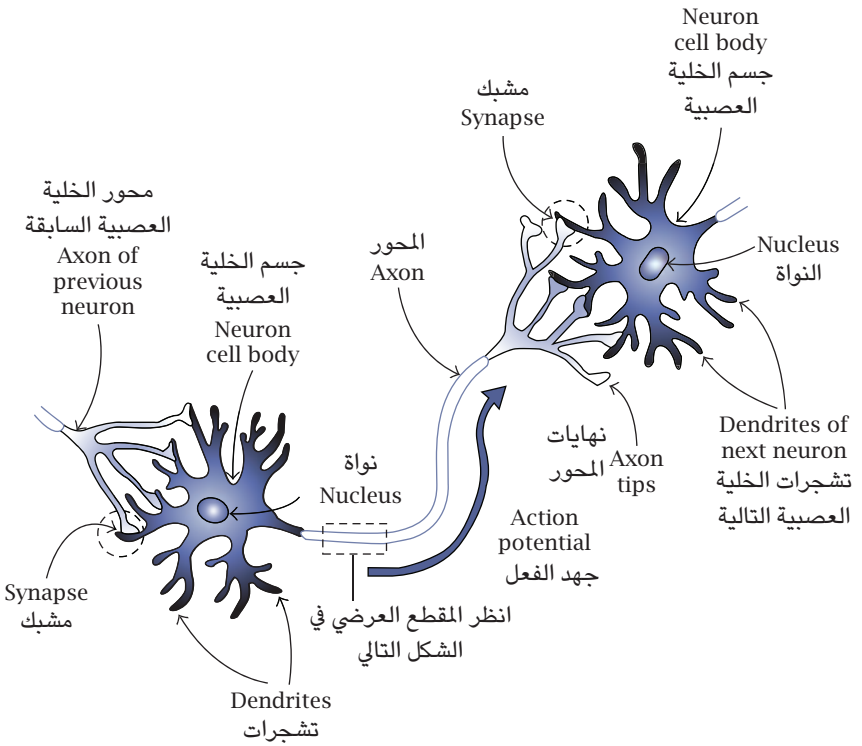
تُسمَّى خلايا عصبيةً حركيةً جسمية، بينما تلك التي تحفِّز العضلات الملساء وعضلات القلب والغُدد فتُسمَّى الخلايا العصبية الحركية الذاتية.

تشترك الخلايا العصبية المختلفة بالتركيب الوظيفي نفسه؛ فهي تتألف من جسمٍ شبه كروي يحتوي على السايتوبلازم والنواة والعُضيَّات الخلوية الأخرى، ولها امتداداتٌ تُسمَّى التشجُّرات (Dendrites). كما يخرج من الخلية العصبية امتدادٌ طويلٌ يُسمَّى المحور (Axon) ويمكن أن يحتوي المحور في نهايته على تفرُّعاتٍ لتحفيز خلايا عصبيةٍ أخرى. يقوم غشاء الخلية العصبية بمكاملة المعلومات المتكوِّنة على التشجُّرات وعند تعدِّيها عتبةً معيَّنة تُنقل عَبْر المحور. ثمَّة خلايا مساندةٌ للخلايا العصبية تُسمَّى الخلايا الدبقية (Neuroglia) والتي تزيد عن عدد الخلايا العصبية بعشرة أضعاف، وتقوم بتوفير المواد الغذائية وتصريف المواد الضارة وغيرها.

(٢) كيف يعمل الجهاز العصبي How Nervous System Works

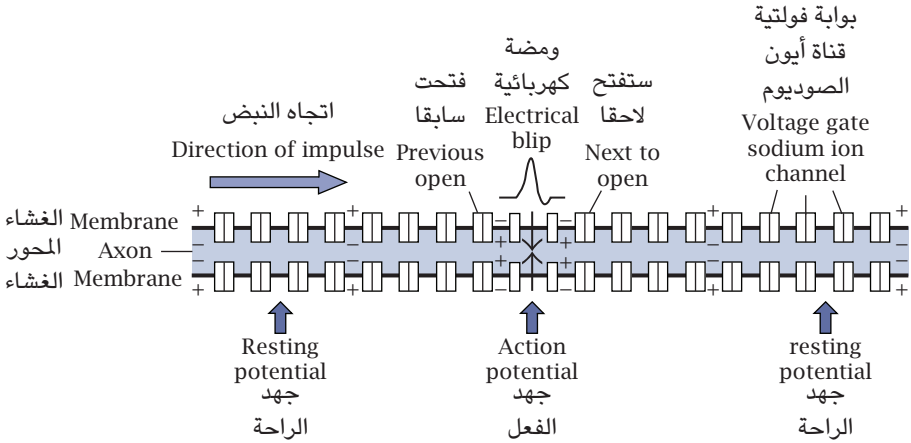
كما في الخلايا الأخرى والميتاكوندريا يكون تركيز الأيونات الموجبة (أيونات الصوديوم) على السطح الخارجي لغشاء الخلية أعلى من تركيزها على السطح الداخلي للغشاء عن طريق مضخَّاتٍ تضُخ الأيونات. هذا سيخلُق فرقَ جهدٍ كهربائي يجعل الخلية تعمل كبطارية. يكون فرقُ جهد الخلية العصبية حوالي ٠,٠١ فولت. وهذا الرقم يُعتبر كبيرًا حيث إن سُمك الغشاء حوالي ١٠ن م، وعند تسوية الوحدات فإنه يساوي مليون فولت/م، أو ما يساوي ١٠٠٠٠ فولت/سم، هذا يقارب فرق الجهد للقادح الذي يولِّد الشرارة التي تحرقُ الوقود في محرِّك السيارة.

لنتابع عمل الخلايا العصبية كما في الشكل ١٤-٢. لا يُظهِر الشكل العمليات الأولى في تكوين وانتقال الإشارات العصبية. تبدأ الخطوات الأولى بتلقي الخلايا العصبية الحسية في الحواس الخمسة للإشارات البيئية؛ كالضوء والصوت ... إلخ. وتنتقل بالتتابع إلى الدماغ حيث تتم معالجتها باستخدام الذاكرة ونقل الإشارة منه إلى الخلايا العصبية الحركية بالتتابُع حيث ترتبط تشجُّرات الخلية العصبية الحركية مع نهايات محور الخلية العصبية التي قبلها في مناطق المشبك كما في الشكل ١٤-٢. وعلى أثَر جهد الفعل (Action potential) في الخلية العصبية العليا ستُحرر جُزيئات ناقلٍ عصبي في منطقة المشبك. هذا سيؤدي إلى فتح عددٍ من القنوات الأيونية في غشاء جسم الخلية العصبية الحركية. هذا يُنتِج تدفُّق الأيونات الموجبة من خارج الخلية إلى داخلها مسببًا هبوطًا حادًّا



شكل ١٤-٢: ترسل الأعصاب إشاراتٍ كهربائيةً من جسم الخلية العصبية عَبْر المحور إلى نهاية العصب؛ حيث يسبِّب تحرير ناقلٍ عصبيٍّ في المشبك. يُلتقط الناقل العصبي من قِبل جسم الخلية العصبية التالية محفزةً إياها على الإطلاق، وبذلك تُنقل الإشارة العصبية من خليةٍ عصبيةٍ إلى أخرى. محوَّر عن: Johnjoe & Al-Khalili (2014).

في جهد الغشاء. مستوى الهبوط في فرق الجهد يتناسب مع تركيز الناقل العصبي الذي تُحرِّره الخلية السابقة لها الذي يؤدي إلى فتح المزيد من القنوات الأيونية لغشاء الخلية العصبية؛ حيث يمكن أن يهبط فرق الجهد إلى −٠,٠٤ فولت. عند هذا المستوى ستنفتح القنوات الأيونية الفولتية البوابات. هذه القنوات لا تكون حسَّاسة للنواقل العصبية وإنما لفرق الفولتية عَبْر غشاء الخلية. وستدخل المزيد من الأيونات الموجبة إلى داخل الخلية، وتفتح المزيد من القنوات الفولتية البوابات، وينتج عن ذلك حالة إزالة الاستقطاب؛ حيث يصبح داخل الخلية موجب الشحنة، عكس حالة الراحة قبل تأثير النواقل العصبية. إزالة



شكل ١٤-٣: انتقال جهود الفعل على طول محور العصب عَبْر فعل القنوات الفولتية البوابات في أغشية الخلية العصبية. خلال حالة الراحة للغشاء يكون عدد الأيونات الموجبة على سطحه الخارجي أكثر من عددها على سطحه الداخلي. لكن تغير في الفولتينة ينتُج عن جهد فعل أعلى التيار (قبله) سيقدح فتح القنوات الأيونية واندفاع أيونات الصوديوم الموجبة الشحنة (جهد فعل) إلى الداخل ويعكس مؤقتًا فولتية الغشاء. هذه النبضة الكهربائية ستقدح فتح القنوات الأيونية والنبضات الكهربائية أسفل التيار بطريقةٍ مشابهةٍ للتساقُط المتتالي لأحجار الدومينو، والتي ستنتقل حتى تصل إلى نهاية العصب حيث تقدح تحرير ناقلٍ عصبي. وبعد مرور جهد الفعل تُرجِع القنوات الأيونية الغشاء إلى حالة الراحة الاعتيادية له. مُحوَّر عن: Johnjoe & Al-Khalili (2014).

الاستقطاب هذه تُحفِّز عددًا من القنوات الأيونية الفولتية البوابات القريبة على المحور على الفتح وتُدخل الأيونات الموجبة، وهكذا تسري ما يشبه الموجات من النبضات على طول المحور، كما في الشكل ١٤-٣. وتُحرِّر نهايات المحور نواقلَ عصبية في المشبك لتحفِّز حصول جهد الفعل في الخلايا العصبية التالية، وهكذا لحين وصول التحفيز إلى الخلايا العصبية المتشابكة مع الخلايا العضلية أو الغُدية، والتي تؤدي إلى الحركة أو إفراز الغدة. أن الخلية العصبية الحركية ترتبط بمئات وآلاف الخلايا العصبية، والتي تؤدي إلى فتح القنوات الأيونية أو غلقها. وهكذا فإن الخلية العصبية تعمل كبوابةٍ منطقيةٍ (Logic gate) كما في الحاسوب، وحيث إن الدماغ يتألَّف من مليارات الخلايا العصبية المترابطة فإنه يمكن أن يعمل كحاسوب (Johnjoe & Al-Khalili, 2014).

ومريدو هذه النظرية لا يرون وجود حاجة لعمل الظواهر الكمومية، ويستبعدون دورها بسبب الفكرة الشائعة أيضًا من أن هذه الظواهر لا يمكن أن تحدث في منظوماتٍ معقدةٍ مكتظة بالجُزيئات المختلفة وبدرجاتِ حرارةٍ عالية (درجات الحرارة الفسلجية) وبارتباطٍ وثيقٍ مع البيئة. وحتى عند حصول مثل هذه الأحداث، فتكون عابرةً ويتم تلاشيها.

غير أن المعطَيات الحديثة والمتزايدة بيَّنَت أن الجهاز العصبي هو منظومةٌ ديناميكيةٌ معقدة لا خطية. وهكذا قد تكون تلك النظرة غير صائبة في المنظومات المعقدة غير الخطية، كما هو الحال في النُّظم البيولوجية؛ فهذه النُّظم تكون حسَّاسة للغاية للشروط الأولية حيث يمكنها تضخيم التقلُّبات المجهرية لتُؤثِّر في المنظومة كلها (انظر الفصل الأول). وهكذا يمكن للتقلبات الكمومية أن تُؤثِّر في الحوسبة العصبية. ومن خلال تراكُم المعطيات عن المنظومات غير العصبية، يبدو أن التطوُّر قادر على توظيف الاحتمالات الكمومية، كما تم عرضُه، بخصوص عمل الإنزيمات والـ DNA وعمل القنوات الأيونية والاتصالات الخلوية وحاسَّة الشم، وتحسُّس المغناطيس الأرضي في هجرة الحيوانات والتركيب الضوئي وغيرها. وبذلك يمكن أن يلعب ميكانيك الكَم دورًا غير عابرٍ في واحدة من أهم الظواهر البيولوجية (Jedlicka, 2017). كما يرى الباحث Stapp (1995) أن الميكانيك التقليدي ليس مناسبًا لفهم الوعي.

إن مُجمَل الفعاليات الحيوية في الكائنات الحية، تستند إلى توليد وتوصيل الطاقة، والتي يكون مصدرها الأيض الخلوي. توظيف الأيض للآليات الكمومية يعظِّم من كفاءته، ويفسِّر القدرات غير العادية في فسلجة الخلايا ومنها الخلايا العصبية.

(٣) الأيض الكمومي Quantum Metabolism

حسب Demetrius (2008) فإن معدَّل الأيض الأساس للكائن الحي هو معدَّل الحالة المستقرة لإنتاج الحرارة تحت مجموعة من الظروف القياسية. ثمَّة ارتباطٌ بين خواصِّ فسلجة الكائن الحي وحجم (كتلة) جسمه. الآليات الجُزيئية التي تعتمد عليها هذه القواعد، يمكن فهمُها بلغة الأيض الكمومي، والتي تنطلق من حركيات نقل الطاقة ضمن أغشية العُضيَّات الخلوية المُوصلَة للطاقة.

العلاقة التي تربط معدل الأيض مع حجم الجسم تتمثل في العلاقة التالية:

$$P = \alpha W^{\beta}$$

حيث إن P هو معدَّل الأيض القياسي، وW هو حجم الجسم. β التي تمثِّل التغير الجزئي في معدل الأيض نسبة إلى التغير في حجم الجسم، وتساوي ٢ / ٣ في الحيوانات الصغيرة، و٣ / ٤ في الحيوانات الكبيرة، و١ في النباتات. أما α فتمثِّل معدَّل صرف الطاقة لوحدة الكتلة. قيمة α تختلف كثيرًا بين الأنواع، حيث تكون أعلى بكثيرٍ في الحيوانات ذوات الدم الحار مقارنةً مع الحيوانات ذوات الدم البارد.

إن معدل الأيض تحكمه آلياتٌ جُزيئية على المستوى الخلوي؛ حيث إن النشاط الأيضي داخل الكائن الحي ينشأ من عمليات توصيل الطاقة في الأغشية الخلوية؛ الغشاء البلازمي في الأحياء الأحادية الخلية، الغشاء الداخلي للميتاكوندريا في الحيوانات، وغشاء الثالوكويد في النباتات. توصيل الطاقة في الأغشية الحيوية يتم من خلال الربط الكيموأزموزي بين محرِّكين جُزيئيَّين هما: سلسلة نقل الإلكترون بين مراكز الأكسدة-الاختزال في الغشاء الحيوي ومحرك ATP-ase الذي يعمل في فسفرة ADP إلى ATP. ويعتمد نموذج الحركيات الجُزيئية على ربط توصيل الطاقة الكيموأزموزي مع فرضية Fröhlich (1968b) التي تقول بأن الطاقة المتولِّدة عن تفاعُلات الأكسدة-اختزال يمكن أن تُختزن بشكل أنماطِ تذبذُبٍ متماسكةٍ للمذبذبات الجُزيئية الموجودة في الأغشية الحيوية. هذا ما يُسمِّيه Demetrius (2008) بالأيض الكمومي؛ حيث إن أنماط التذبذُب للمذبذبات الجُزيئية تكون كمومية (Quantized). ويوازي الباحث بين الأيض الكمومي والطرق المستخدمة في النظرية الكمومية للمواد الصلبة، لاشتقاق مجموعة العلاقات بين معدَّل الأيض الخلوي وزمن الدورة؛ أي متوسِّط زمن تفاعُلات الأكسدة-الاختزال في الخلية. وهكذا يمكن تحديد زمن الدورة τ مع حجم الخلية Wc، ليحصل على:

$$\tau = \alpha \mathrm{W} \beta c$$

كما بيَّنَّا أعلاه، يتم إنتاج الجُزيئات الخازنة للطاقة ATP من خلال ربط مسارَين جزيئيَّين هما: سلسلة الأكسدة الاختزال (Redox chain) حيث تنتقل الإلكترونات بين مُستقبِلات الإلكترون في سلسلة نقل الإلكترون، ومحرِّك ATP-ase الذي يتضمن فسفرة

جُزيئات ADP إلى جُزيئات ATP. هذان المساران يرتبطان من خلال آليتَين هما: الفسفرة التأكسدية، وهي عمليةٌ كهربائيةٌ وفسفرة المادة الأساس وهي عمليةٌ كيميائيةٌ صِرفة. الزمن الانتقالي في هذه العملية الدورية يُحدِّد الدفق الأيضي الكلي؛ أي عدد شحنات البروتونات المتحرِّرة من تفاعلات الأكسدة-الاختزال. هذا الزمن الانتقالي الذي يُرمز له بالحرف T يلعب دورًا أساسيًّا؛ ففي الفسفرة التأكسُدية التي تحدُث في الميتاكوندريا، يتم ربط انتقال الإلكترون بين المستقبِلات مع ضخ البروتونات إلى الخارج عَبْر غشاء الميتاكوندريا؛ حيث يتولَّد تدرُّجٌ كيموكهربائي؛ والذي يُسمَّى القوة الدافعة للبروتون Δp. أما فسفرة المادة الأساس، التي تتم في السائل الخلوي فتسير بواسطة مجموعة من الإنزيمات، والتي تربط فسفرة جُزيئات ADP مع سلسلة نقل الإلكترون. النموذج الجُزيئي الديناميكي الذي يبحث هذا الربط الكهربائي الكيميائي، يفترض أن الطاقة المتحرِّرة من تفاعُلات الأكسدة-الاختزال يمكن أن تُخزنَ بشكل أنماطٍ تذبذبيةٍ متماسكة لمذبذبات الإنزيمات المرتبطة بعُضيَّات الخلية. الأيض الكمومي يستند إلى فكرة أن الذبذبات الإنزيمية في عُضيَّات الخلية والمذبذبات المادية في المواد الصلبة البلورية يمكن أن تُعالَج بالشكل الرياضي نفسه؛ الذي استخدمه Debye في النظرية الكمومية للمواد الصلبة. المتغيِّرات الرئيسة في هذه النظرية هي الحرارة النوعية وإنتروبي جبز-بولتزمان (Gibbs–Boltzmann) ودرجة الحرارة المطلَقة T. وتكون الوحدة الأساسية للطاقة E 1/4 kBT، وهي الطاقة الحرارية النموذجية لكل جُزيئة. المتغيِّرات الفعَّالة في نظرية الأيض الكمومي هي المعدَّل الأيضي، ومعدل تكوين الإنتروبي ومتوسط الزمن الدوري. وهكذا، تكون الوحدة الأساسية للطاقة: $E(T) = gT$. هنا تعتمد قيمة g على ما إذا كانت آلية ربط سلسلة نقل الإلكترون مع فسفرة ADP تكون كهربائيةً أو كيميائية. وحيث إن التعامل مع المنظومة الفيزيائية هنا في حالة التوازُن الديناميكي الحراري، فإنها تتضمَّن متغيراتٍ ديناميكيةً حرارية. أما المنظومات البيولوجية فهي بعيدة عن حالة التوازُن الديناميكي الحراري كما هو معلوم؛ لهذا ستتضمَّن المتغيِّرات الطاقية التدفُّقات؛ أي معدَّلات التغيُّر في القيم الطاقية.

كمومية الطاقة الأيضية ترجع إلى الأعداد الصحيحة لل ATP المتكوِّنة في الميتاكوندريا، وإلى محتواها المنخفض نسبيًّا من الطاقة مقارنةً بعمليات فيزياء الكم. أن تخليق جُزيئات ATP في الميتاكوندريا أو البلاستيدات الخضراء يحتاج إلى ٦٠ك ج/مول من الطاقة، والتي تنتُج من تفاعلات نقل الإلكترون أو امتصاص الفوتونات، على التوالي.

أما تحلُّل ATP فيُنتِج ٣٠٫٥ك ج/مول من الطاقة الحرة، والتي يمكن اعتبارها كَم (quantum) طاقة بيولوجية. إن مبدأ ثنائية الجسيم-الموجة يشير إلى أن طول الموجة للطاقة الكهرومغناطيسية المكافئة لـ كم الطاقة البيولوجية E يمكن تقديره كما يلي:

$$\lambda = hc/\Delta E = 9 \times 10^{-6} m$$

اللافت أن طول الموجة هذا قريبٌ جدًّا من معدَّل أبعاد الخلية الحية؛ أي بحدود ٩مك. ومن المثير أيضًا تقدير درجة حرارة Debye لكَم الطاقة البيولوجية مفترضين أن التفاعُلات الإنزيمية المتضمِّنة تكوين ATP، تحصُل بطريقةٍ دوريةٍ لكن متناسقة في شبكةٍ مشابهةٍ للمواد الصلبة لـ Debye. وجد الباحثون أن:

$$T_D = \Delta E/K_B = 3 \times 10^3 K$$

وحيث إن درجة الحرارة الفسلجية هي: $T_0 = 300K$، يظهر أن $T_0/T_D < 1$ وهذا يعني من الناحية الإحصائية أن الأيض الخلوي يعمل بالنظام الكُمومي. ومن المعلوم أن الفعاليات الحيوية المختلفة، بما فيها عمل الدماغ، تعتمد على الأيض وبالتالي على الآليات الكمومية. اللافت، أن هذا الموضوع يتوضَّح من خلال قابلية الدماغ الهائلة في معالجة المعلومات التي تصل إلى $^{٢٠}١٠$ تقلبات (Flop) مع استهلاكٍ منخفضٍ للقدرة الكهربائية حيث تكون بحدود ٢٥ واط، مقارنة مع الحاسوب الفائق الذي يعالج $^{١٥}١٠$ تقلبًا بينما يستهلك مليون واط. ويتساءل الباحثون ألا تفسِّر هذه المقارنة عمل الدماغ البشري بالحوسبة الكمومية بدل الحوسبة الرقمية أو التناظُرية التقليدية (Hameroff *et al.*, 2014).

في الواقع وكما ذكر Meijer & Raggett (2014) لا تُوجد نظريةٌ واحدة عن الدماغ أو العقل الكمومي، لكن ثمَّة عددٌ من النماذج المطروحة التي لكلٍّ منها قوَّتُها ونقاطُ ضعفِها.

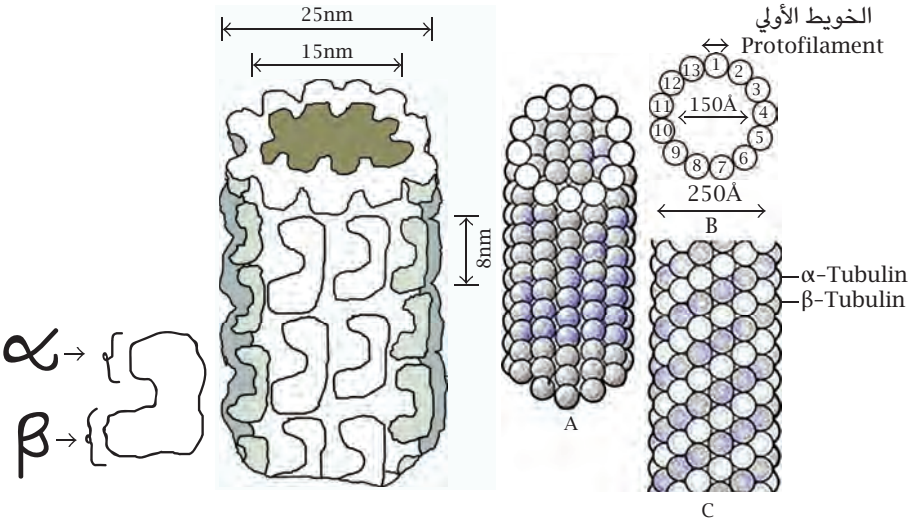
يمكن استعراض ثلاثِ نظرياتٍ في تفسير الوعي بالآليات الكمومية؛ الأولى تتمحور حول دور الهيكل الخلوي والأُنيبيبات الدقيقة، والثانية تُبرز دَور البرم المغزلي النووي لذرات النتروجين في عمل الخلايا العصبية، والثالثة تؤكِّد دَور المجال الكهرومغناطيسي في ضبط التماسُك الكمومي في عمل الشبكة العصبية.

(٣-١) دَور الأُنيبيبات الدقيقة Role of Microtubules

تؤلِّف الأُنيبيبات الدقيقة الهيكلَ الخلَوي لخلايا الأحياء الحقيقية النواة، وتكون بشكل شبكة مع بروتيناتٍ مرافقة. الأُنيبيبات تتألَّف من جُزيئات بروتين التيوبيولين (Tubulin) وكل جزيئةٍ تتشكَّل من وحدتَين كلٌّ منها بشكل حبَّة الفول السوداني، ويُشار إليهما تيوبيولين ألفا وتيوبيولين بيتا ثنائية القطب (Dipole) مضفية على الأُنيبيبات خاصية عفوية الاستقطاب (Ferroelectric). تتركب هذه الجزيئات تلقائيًّا، لتُشكِّل أسطواناتٍ مجوَّفة، قطرها الخارجي ٢٥ن م، وقطرها الداخلي ١٥ن م، وبأطوالٍ مختلفةٍ تتراوح بين مئاتٍ قليلة من النانومترات إلى أمتارٍ كما في إكسونات الخلايا العصبية. تترتَّب وحدات التيوبيولين في الأُنيبيبة في خويطاتٍ أولية، من ١٣ وحدة؛ حيث تكون اتصالاتها الجانبية نوعَين من التركيب الشبكي هما شبكة-A وشبكة-B. تنحرف الخويطات نسبةً إلى جوارها مؤديةً إلى علاقاتٍ مختلفة بين كل جُزيئة تيوبيولين وجوارها الستة الأقرب. وتلتف الخويطات بشكلٍ لولبيٍّ محقِّقة تعاقُب Fibonacci: ٣، ٥، ٨، ١٣ (تعاقُب Fibonacci يتمثَّل بسلسلة من الأرقام المتتالية؛ حيث إن كل رقمٍ هو حاصل جمعِ الرقمَين السابقَين له، وهي ظاهرةٌ رياضية موجودة في الطبيعة؛ كما في عدد بتلات الأزهار، وترتيب حبوب عبَّاد الشمس، وغيرها كثير) (شكل ١٤-٤).

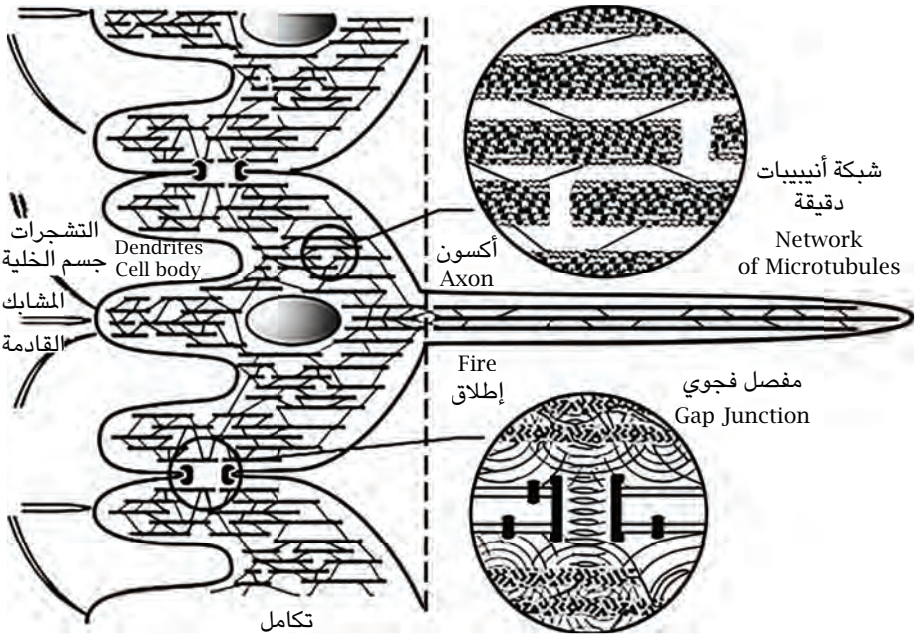
حسب Cantero *et al.*, (2018) تُشكِّل الأُنيبيبات الدقيقة حزمًا تتوضَّح خصوصًا في الخلايا العصبية؛ حيث تميِّز المحاور (Axons) والتشجُّرات (Dentrites). وهي بمثابة ترانزستراتٍ (Transistors) كهروكيميائيةٍ حيوية تكون خطوطَ نقلٍ كهربائية لا خطية. وبين الباحثون أن حزَم الأُنيبيبات الدقيقة في الدماغ تولِّد تلقائيًّا ذبذباتٍ كهربائية واندفاعاتٍ لنشاطٍ كهربائي مشابهٍ لجهد الفعل. وتحت ظروفٍ مشابهة لداخل الخلية، أظهرَت حزَم الأُنيبيبات الدقيقة المثبتة للجهد ذبذباتٍ كهربائية بتردُّدٍ أساسيٍّ بارز، قيمته ٣٩ هيرتز سارت خلال أنظمةٍ دوريةٍ مختلفة. تمثِّل الذبذبات الكهربائية في المتوسط تغيُّر ٢٥٨٪ في التوصيل الأيوني لتراكيب الأُنيبيبات الدقيقة. ومن المثير أن البروزات العصبية المثبتة للفولتية للخلايا العصبية تحت المهاد المزروعة من الفئران، تتمكَّن أيضًا من توليد الذبذبات الكهربائية، وتوصيل الإشارات الكهربائية على طول التركيب. وهذا قاد الباحثين إلى الاستنتاج أن الذبذبات الكهربائية خاصيةٌ جوهرية في حزَم الأُنيبيبات الدقيقة للدماغ، والتي قد يكون لها استخداماتٌ مهمةٌ في مختلف الوظائف العصبية، بضمنها فتحُ وتنظيمُ

القنوات الأيونية المرتبطة بالهيكل الخلوي، وكذلك النشاط الكهربائي الذي يساعد ويمتد إلى وظائف الدماغ العليا؛ مثل الذاكرة، والوعي.



شكل ١٤-٤: تركيب الأُنيبيبة الدقيقة. يمين: A. ثلاثي الأبعاد. B. مقطع عرضي في الأُنيبيبة يبيِّن الخويط ذا ١٣ وحدة والذي يكون جدار الأُنيبيب. C. منظرٌ سطحيٌّ للأُنيبيب يُظهِر الترتيب المحتمل لوحدات البروتين. يسار: رسمٌ تخطيطيٌّ لتموضع وحدات البروتين في الأُنيبيبة وتركيب جُزيئة بروتين التيوبيولين المؤلَّف من وحدتَي α وβ. عن Henry *et al.*, (2011).

حسب Henry *et al.*, (2011) تقوم الأُنيبيبات الدقيقة (MT) بنقل إشارة الجهد البيولوجي بشكل تياراتٍ أيونية، بواسطة التسرُّب من حدةٍ بروتينيةٍ إلى أخرى. يعمل التركيب الثنائي الوحدة كثنائي القطب (دايود Diode). وحسب Cantero *et al.*, (2019) فإن ترتيب وحدات التيوبيولين في MT يكون بشكل موزائيك بزوايا تُشكِّل قنواتٍ نانويةً مميزة، يمكن أن تعمل بما يشبه القنوات تدعم حركةً لا خطية للأيونات. كما أن التركيب الصفائحي الثنائي الأبعاد والحزم لل MT تولِّد ذبذباتٍ كهربائية، يعتمد مقدارها على المجال المغناطيسي خلال السطح والقوة الأيونية للوسط. وهي تعمل كمقاومةٍ ذاكرية (Memristor) والتي تتمثَّل بوجود عنصرٍ له طرفان، تتغيَّر مقاومته مع تغيُّر الجهد،



شكل ١٤-٥: تكامل وإطلاق الخلية العصبية للدماغ، وأجزاء من خلايا عصبيةٍ أخرى مع الأُنيبيبات الدقيقة موضَّحة بشكلٍ تخطيطي. في التشجُّرات (Dendrites) وجسم الخلية (يسار) المشتركَين في التكامل، تكون الأُنيبيبات الدقيقة متقطعةً وذات قطبيةٍ مختلطة ومترابطة بواسطة بروتيناتٍ مرافقةٍ للأُنيبيبات الدقيقة (MAPs) في شبكاتٍ دورية (الدائرة العلوية، يمين). تكامُل التشجُّرات-جسم الخلية (مع مساهمة عمليات الأُنيبيبات الدقيقة) يمكن أن يقدح إطلاقات المحور إلى المشبك التالي. الأُنيبيبات الدقيقة في المحورات تكون أحاديةَ القطب ومستمرة. المفاصل الخلوية (Gap junctions) تُزامِن أغشية التشجُّرات ويمكن أن تمكِّن من التشابُك الكمومي والتكامُل الشامل بين الأُنيبيبات الدقيقة في الخلايا العصبية المتجاورة (الدائرة السفلية، يمين). حسب نظرية Orch OR تحصُل الحوسبة الكمومية في الأُنيبيبات الدقيقة خلال تكامُل التشجُّرات/جسم الخلية، والنتائج المنتخبة تنظِّم إطلاقاتِ المحور والتي تحكُم السلوك. مُحوَّر عن: Hameroff & Penrose (2014).

لكنه يحتفظ بمقاومته الأخيرة بعد انقطاع التيار الكهربائي ما يعطيه صفة الذاكرة. وهذا يجعلها مناظرةً للوصلة العصبية في الدماغ. وتثبت تجريبيًّا إطلاق المقاومة الذاكرية لموجةٍ كهربائيةٍ مماثلة لما يحصُل في الخلايا العصبية.

ترتبط في مواقعَ معيَّنة من شبكة الأُنيبيبات بروتيناتٌ تُسمَّى البروتينات المرتبطة بالأُنيبيبات MAPs وتربطها بالأُنيبيبات الأخرى لتُشكِّل الهيكل الخلوي. من بين MAPs بروتين تاو (Tau) حيث إن فقدانه يسبِّب مرض ألزهايمر. ومن أنواع MAPs أيضًا، البروتينات المحركة داينين (Dynein) وكاينسين (Kinesin) والتي تتحرَّك بسرعة على طول الأُنيبيبات الدقيقة ناقلةً شحنات الجزيئات؛ حيث تقوم بروتينات تاو بتوجيهها إلى مواقع نقل الشحنات.

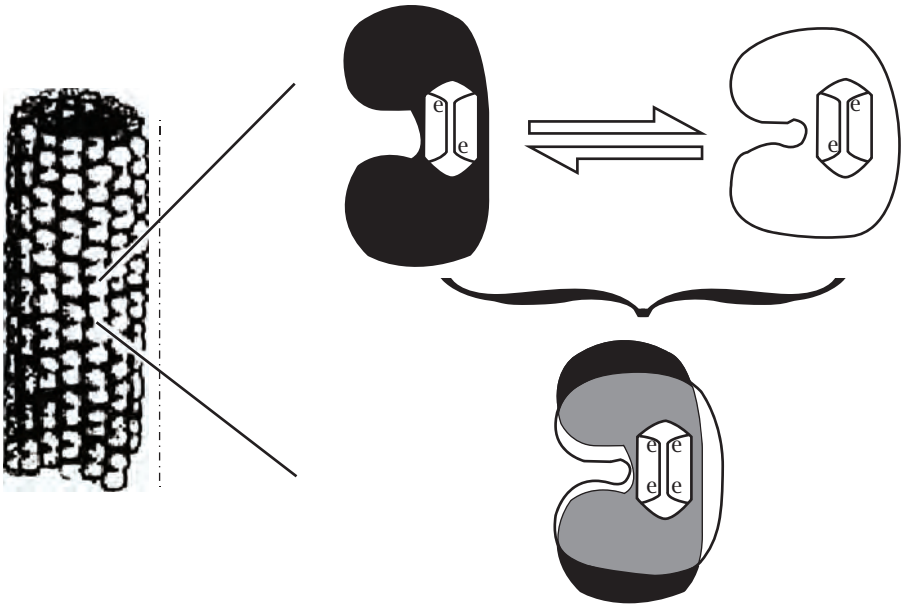
في كل خليةٍ عصبيةٍ وبشكلٍ دائمٍ يُوجد ٩١٠ أُنيبيبات، بينما في الخلايا الأخرى التي تعاني انقساماتٍ خلويةً يتم بشكلٍ دوريٍّ تجميعُ الأُنيبيبات؛ لغرضِ تكوين الخيوط المغزلية التي تُسهِم في فصل الكروموسومات أثناء الانقسام، وتُحدِّد استقطابية الخلية ومعماريتها، ثم تفكيكها لغرض استغلال البروتينات في وظائف الخلية المختلفة.

(٣-٢) نظرية الاختزال الموضوعي المنسق Orchestrated Objective Reduction

وحسب Hameroff & Penrose (2014) فإن ترتيب الأُنيبيبات الدقيقة في الأوكسونات والخلايا غير العصبية يكون بشكلٍ شعاعي متصل، بينما ترتيبها في جسم الخلية العصبية والتشجُّرات يكون بشكل تجمعاتٍ متقطِّعة، وبقطبيةٍ مختلطةٍ تُشكِّل شبكاتٍ دورية مناسبة للتعلم ومعالجة المعلومات. كما أن وجود MAPs يحول دون تفكُّكها ويمكِّنها من العمل كمشفِّر للمعلومات وتكوين الذاكرة الطويلة الأمد (شكل ١٤-٥).

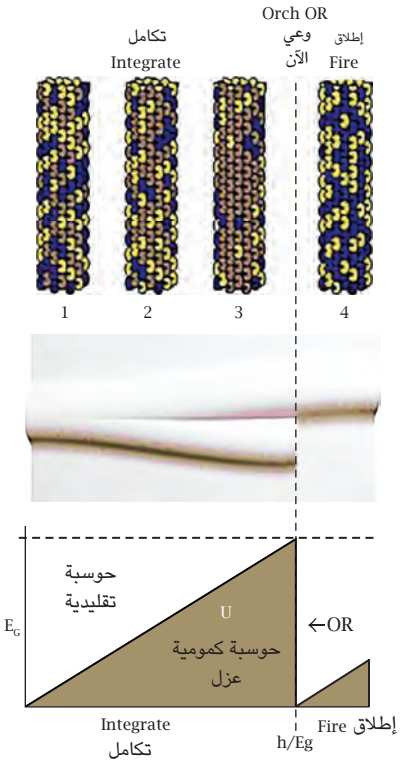
حسب تفسير عالم الرياضيات الإنكليزي روجر بنروز Penrose (1989, 1994) فإن فك التماسُك يُنتِج أحداث الوعي مستخدمًا مفهوم الاختزال الموضوعي (Objective Reduction OR). واقتَرح أن الأُنيبيبات الدقيقة في الخلايا العصبية توفِّر للدماغ التراكيب القادرة على تنسيق انهيار دالَّة الموجة من خلال معالجة المعلومات الكمومية. وقد تكاملَت هذه الفكرة مع أفكار عالم التخدير الأمريكي، ستيوارت هاميروف (S. Hameroff) ليُنتِجا نظرية «الاختزال الموضوعي المنسق» Orchestrated Objective Reduction (Orch OR) (Hameroff & Penrose, 2014).

تعتمد النظرية على فكرة عمل الأُنيبيبات الدقيقة كحواسيبَ كموميةٍ في الخلايا العصبية للدماغ؛ حيث تكون وحدات البروتين المكوِّن للأُنيبيب «تيوبيولين Tubulin» في



شكل ١٤-٦: الأُنيبيبة الدقيقة وهي شبكةٌ من بروتينات التيوبيولين ومؤشَّر فيها زوجٌ من وحدات التيوبيولين (يسار). كل وحدة تيوبيولين المرتبطة بزوجٍ من الإلكترونات المترابطة كموميًّا في جيبٍ كاره للماء يمكن أن تتخذ اثنتَين من الوضعيات التقليدية (أعلى يمين)، أو تكون في حالة تراكُبٍ كموميٍّ لكلتا الوضعيتَين (أسفل). وهكذا يُمكِن للتيوبيولين أن يعمل كـ بت تقليدي (أعلى) أو كـ بت كمومي «كيوبت». مُحوَّر عن: Hameroff *et al.*, (2002).

حالة تراكُبٍ كموميٍّ لاثنين أو أكثر من الحالات (أي بشكل كيوبتات qubits) (شكل ١٤-٦). وحسب نظرية Orch OR فإن كيوبتات التيوبيولين وهي في حالة التراكُب الكمومي تتآثَر/تحوسب مع التيوبيولينات الأخرى المتراكبة كموميًّا في شبكات الأُنيبيبات الدقيقة، بواسطة التشابك الكمومي، تُختزل («تنهار») إلى حالاتٍ تقليديةٍ معينة بعد ٢٥ ميلي ثانية أو نحو ذلك (في ٤٠ هيرتز مثلًا). اختزالاتُ الحالة الكمومية تُنتِج الإحساسات الواعية والاختيارات الإرادية، والتي ستحكُم الأفعال العصبية. وحسب الباحثين، فهذه النظرية تتضمن نفس الفكرة التي تستند إليها تقنية معالجة المعلومات الكمومية، عدا كون الكيوبتات المفترضة في Orch OR هي هيئات بروتين التيبيولين وأن الاختزال/الانهيار يحصل بسبب عتبةٍ موضوعيةٍ خصوصية (اختزال موضوعي) وليس بسبب التآثُر مع



شكل ١٤-٧: أعلى: صورةٌ مبدئية مفترضة لحدث وعي بواسطة الحوسبة الكمومية في واحدةٍ من عددٍ هائل من الأُنيبيبات الدقيقة تعمل كلها بصورةٍ متماسكة بحيث يكون ثمَّة إزاحةٌ كافية لتحقق Orch OR. بروتينات التيوبيولين في الحالة التقليدية (صفراء أو زرقاء)، أو في حالة تراكُبٍ كموميٍّ لكل ثنائي القطب (رمادي). يتطوَّر التراكُب الكمومي/الحوسبة الكمومية خلال أطوار التكامل (١–٣) في التكامل والإطلاق للخلايا العصبية مؤدية إلى زيادة التراكُب الكمومي EG (تيوبيولينات رمادية) لحين بلوغ عتبة في زمن $\tau \approx h/E_G$ حيث تتحقَّق لحظة الوعي وتنتخب حالات التيوبيولين التي تنظِّم الإطلاق، وتضبط السلوك الواعي. الوسط: منحنياتُ الزمكان المتراكبة المناسبة تصل إلى العتبة في لحظة OR وينتخب منحنى زمكانٍ واحد. الأسفل: مخطَّط حدث Orch OR يُظهِر تطوُّر التراكُب الكمومي بما يشبه حرف U ويزيد EG حتى الوصول إلى عتبة OR وتحصُل لحظة الوعي في زمن $\tau \approx h/E_G$. مُحوَّر عن: Hameroff & Penrose (2014).

البيئة (شكل ١٤-٧). الفرضية المركزية التي تستند عليها نظرية Orch OR حسب مُطلِقيها، هي أن موضع الوعي هو الأُنيبيبات الدقيقة في الدماغ، والتي تعمل في خط تلاقي الفسلجة العصبية التقليدية وقوى الجاذبية الكمومية (Hameroff, 1998).

من العوامل التي تدعم نظرية Orch OR في تفسير الوعي، هو الدور الذي يلعبه الهيكل الخلوي والأُنيبيبات الدقيقة في الوعي غير العصبي الذي تُظهِره جميع الأحياء الحقيقية النواة غير الحيوانية وحتى البكتيريا؛ فقد اعتَبَر عددٌ من الباحثين (Albrecht-Buehler, 1985; Craddock *et al.*, 2010; Sahu *et al.*, 2013; Baluška & Levin, 2016) أن أفضل آليةٍ مرشَّحةٍ لمعالجة المعلومات في الأحياء الأحادية الخلية هو الهيكل الخلوي؛ فهذا يُلبِّي كل متطلبات ذلك، من خلال تركيبه المعقَّد والكبير وقابليته للتحوير بمختلف المسالك الجُزيئية (تسجيل المعطيات) والتفسير بواسطة الكثير من المحرِّكات البروتينية وغيرها (قراءة المعطيات) وتوظيف مجموعةٍ كبيرة من الحالات الانتقالية المفردة ما يوفِّر عمليات الحوسبة.

حظِيَت نظرية Och OR بقبول الكثير من الباحثين ونشر العديد من الأبحاث التي تُعالِج الكثير من مواضيعها، والتي تم التطرُّق إلى بعضها خلال ما سبق عرضُه. لكن ثمَّة الكثير من المنتقدين لهذه النظرية، ومن بينهم Tegmark (2000) و& Baars Edelman (2012) و(2014) McFadden & Al-Khalili وتتركَّز انتقاداتهم على الحجم الكبير للأنابيب الدقيقة ودرجات الحرارة العالية والاكتظاظ الجُزيئي، وهي عواملُ كما يعتقد الكثير من الباحثين أنها لا تسمح بالوقت الكافي لحصول التماسُك الكمومي والظواهر الكمومية، بسبب سرعة فك التماسك. لكن عدا الحجم الكبير، فإن الحُجج الأخرى لا تستقيم مع ما تم إثباته من حصول التماسُك الكمومي في العديد من الظواهر البيولوجية، التي تم عرضها والتي تحصل في درجات الحرارة الفسلجية والجُزيئات المكتظَّة. كمثال فإن حسابات Tegmark (2000) لفك التماسُك في Orc OR هي ١٠$^{-١٣}$–١٠$^{-٢٠}$ ثانية، وهي فترةٌ قصيرة جدًّا لا تمكِّن من التماسُك الكمومي. لكن Meijer & Raggett (2014) يعرضان رأي Georgiev الذي يرى أن ما يُسجِّله علماء الأعصاب من حصول العمليات العصبية في مديات الميلي ثانية، هو في الواقع زمن العمليات العصبية بين تلقِّي الإشارات ومعالجتها وتوصيل الإيعازات إلى الخلايا العضلية، بينما يمكن أن تتم المعالجة العصبية في مدَيَات البيكوثانية. هنا ينطلق Georgiev من حالة مرضى عمَى الزمن (Time agnosia) حيث يقومون بعددٍ من العمليات الذهنية بإحساس حصولها

في زمنٍ تلقائي. كما يُشبِّه الباحث المسألة بالحاسوب الشخصي؛ حيث تكون فعاليات الشاشة (إعادة التنشيط Refresh) خلال ١٠ ملي ثانية، بينما المعالجة الحاسوبية تحصل في مدَيَات البيكوثانية. إضافةً إلى ذلك، فإن إعادة حساب فك التماسُك من قِبل Hagan *et al.*, (2001) لتكون ١٠^-٤^–١٠^-٥^ ثوانٍ يفنِّد انتقاد Tegmark (& Adams Petruccione, 2019). يرى بعض الباحثين مثل Georgiev (2002) أن ثمَّة تماسُكًا كموميًّا عيانيًّا (Macroscopic quantum coherence) وهو الحالة الكمومية التي تسير بدالةِ مَوجةٍ عيانية (Macroscopic wavefunction)، والتي تشترك بها العديد من الجُزيئات. هذه الحالة تشمل التنظيمَ الزمكاني للمنظومة المتعددة الجسيمات، وهي شديدة القرب مما يُعرف بتكاثُف بوز-آينشتاين (Bose-Einstein condensation). ومن أمثلة ذلك التماسُك الكمومي في المنظومات العيانية العديدة الجُسيمات كالميوعة الفائقة والتوصيل الفائق والليزر (Laser). المنظومتان الأولى والثانية تمثِّلان منظوماتٍ في حالة توازُن، بينما منظومة الليزر تمثِّل منظومةً مفتوحةً تحقِّق التماسُك الكمومي بواسطة ضخ الطاقة، وهي تعمل في درجة حرارة الغرفة كما النُّظُم البيولوجية.

حسب Craddock *et al.*, (2014) فإن التجارب الحديثة والتحليلات النظرية تُظهِر أن الطاقة الحرارية يمكن أن تُساعِد على التماسُك الكمومي بدلا من أن تُبطِله، خاصة في دواخل الجُزيئات الحيوية «الجافة» الكارهة للماء؛ فوحدات بروتين التيوبيولين المكوِّنة للأُنيبيبات الدقيقة كما هي معقدات التركيب الضوئي تُظهِر معمارية الحوامل الصبغية، وبالتحديد الأحماض الأمينية العطرية، بضمنها التربتوفان، قدرةً على دعم التماسُك الكمومي في نقل الطاقة. وبيَّن الباحثون عَبْر دِراسةٍ حوسبية، تقل الطاقة بين الأحماض الأمينية لحاملات الصبغة للتيبيولين، من خلال إثارات ثنائية القطب المرتبطة مع البيئة الحرارية المحيطة ودَور ميكانيك الكَم فيها. وكما يرى Hameroff *et al.* (2014) يمكن أن تكون المنظومات البيولوجية تعمل بنُظُمٍ تقليدية ما عدا بعض نماذج السلوك الخصوصية الهندسة التي تتفادى فك التماسُك الكمومي بسبب البيئة. ويطرح Vattay *et al.*, (2014) نظرية لتفسير زمن التماسك الكمومي الطويل في النظم البيولوجية، على أساس المستوى المناسب من التعقيد بين الفوضى والنظام، يمكن أن يزيد من زمَن التماسُك الكمومي بعدة مرات. وحسب هؤلاء الباحثين فإن النظم التي هي قرب فوضى كمومية حرجة أو انتقالية المعدن-العازل يمكن أن يكون لها زمنُ تماسكٍ طويلٌ وانتقالٌ متماسكٌ في الوقت نفسه.

(٤) البرم المغزلي النووي والوعي Nuclear Spin and consciousness

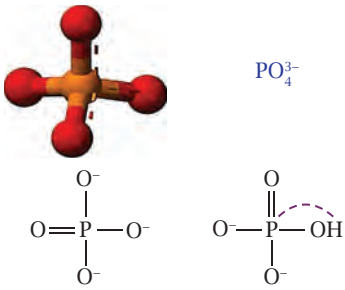
أطلق فكرة دَور البرم المغزلي النووي في الوعي، الباحثان Hu & Wu (2004)؛ حيث اقترحا أن البرم المغزلي النووي للهيدروجين والنتروجين والفسفور في مكوِّنات الخلايا العصبية، وكذلك البرم المغزلي للإلكترونات لجُزيئات الأوكسجين وأوكسيد النتريك في الدماغ يمكن أن تُسيِّر الوعي.

وطوَّر Fisher (2015) فكرة البرم المغزلي النووي كركيزة تفسر عمِّل الدماغ، بخزن ومعالجة المعلومات الكمومية بتحفيز من آلية عمل الليثيوم كمادةٍ فعالة في معالجة بعض الأمراض النفسية، والتي أظهرَت التجارب السلوكية على الفئران تأثيراتٍ عصبيةً له، وتعتمد حسب تحليله على البَرم المغزلي النووي (Fisher, 2017). كما انطلَق الباحث من دَور الظواهر الكمومية في التطبيقات المعروفة في علم الأعصاب، كالتصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) (Magnetic Resonance Imaging)، والتي تعتمد على البَرم المغزلي النووي. علمًا بأن هذه التقنية تعتمد أساسًا على البرم المغزلي لنواة الهيدروجين H^1 وهو العنصر الأكثر وجودًا في الدماغ وعموم الجسم في جُزيئات الماء وغيرها من الجُزيئات. كما يُوجد في الدماغ أيضًا عنصر الفسفور الذي له لفٌّ مغزليٌّ نووي وتُستخدم معه تقنياتُ طيف الرنين المغناطيسي (MRS) (Magnetic Resonance Spectroscopy)، وتصوير طيف الرنين المغناطيسي (MRSI). ويعتمد نموذج Fisher على البَرم المغزلي النووي لعنصر الفسفور.

وحيث إن البرم المغزلي النووي بأنواعه يمكن أن يُستخدم كبتاتٍ كمومية (Vandersypen *et al.*, 2001) بما فيها البرم النووي المغناطيسي للجُزيئات المُفرَدة في المحلول المائي. وهكذا يُستخدم في هذا النموذج من المعالجة الكمومية في الدماغ البرم المغزلي النووي للفسفور؛ حيث يعمل ك كيوبت أو كيوبت عصبي بينما يكون أيون الفوسفات PO_4^{--} هو الناقل المُحتمل للكيوبت (شكل ١٤-٨).

يُوجد الفسفور في جميع أنواع الخلايا؛ بما فيها الخلايا العصبية بشكل فوسفات لا عضوي والجُزيئات الخازنة والمحرِّرة للطاقة الواسعة الانتشار ATP وADP وAMP وفي الشحوم الفوسفاتية المكوِّنة لأغشية الخلايا والعُضيَّات الخلوية.

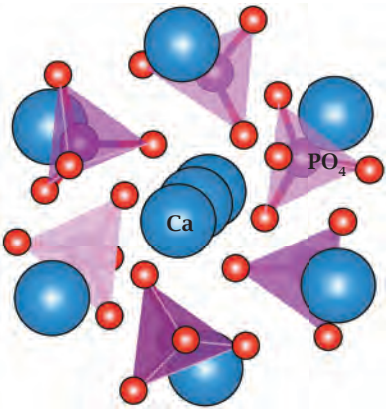
تلعب جُزيئات الفوسفات والبايروفوسفات $P_2O_7^{-4}$ أدوارًا مهمة. تتحلَّل البايروفوسفات مائيًّا لتعطي اثنتَين من جُزيئات الفوسفات؛ حيث يكون البرم المغزلي لنواة ذرة الفسفور في الجزيئتَين متشابكًا كموميًّا بالحالة المنفردة (Singlet) بغَض النظر عن المسافة بينهما (شكل ١٤-٩).



شكل ١٤-٨: في جزيئة الفوسفات $PO4^{-3}$ ترتبط ذرة P مع ٤ أيونات أوكسجين بشكل هرمٍ رباعي. في درجة الحموضة الفسلجية pH=7 يرتبط بروتونٌ واحد أو اثنان مع أيون الفوسفات. يتآثَر البَرم المغزلي النووي للبروتون المرتبط مع البرم المغزلي النووي لذرة ^{31}P ويفك تماسُكه. عن: Fisher (2017).

شكل ١٤-٩: البايروفوسفات (PPi) هي فوسفات ثنائي الوحدة تحتوي على ذرة ^{31}P ذات لفٍّ مغزلي نووي في حالتَي المفردة (Singlet) والثلاثية (Triplet) (مشابهة لحالتَي para/ortho في ذرة الهيدروجين). يقوم الإنزيم Pyrophosphatase (PPA) بالتحليل المائي للبايروفوسفات حيث يشطرها إلى أيونَي فوسفات. يبقى البرم المغزلي لهذَين الأيونَين متشابكًا كموميًّا حتى عند انفصالهما. مُحوَّر عن: Fisher (2017).

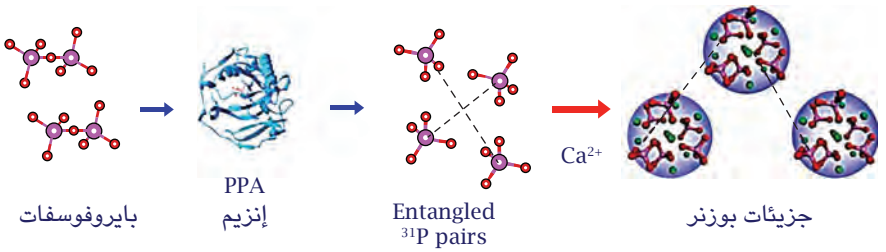
كما تم تشخيص $Ca_9(PO_4)_6$ (جُزيئة بوزنر) (شكل ١٤-١٠) كجُزيئةٍ وحيدةٍ يمكنها حماية كيوبتات الخلية العصبية لفتراتٍ زمنيةٍ طويلة جدًّا، وبذلك تعمل كذاكرةٍ كُمومية تشغيلية. جُزيئات بوزنر المتكوِّنة من ارتباط أزواج الفوسفات مع أيونات الكالسيوم الخارج خلوية ستَرِثُ تشابُك البرم النووي.



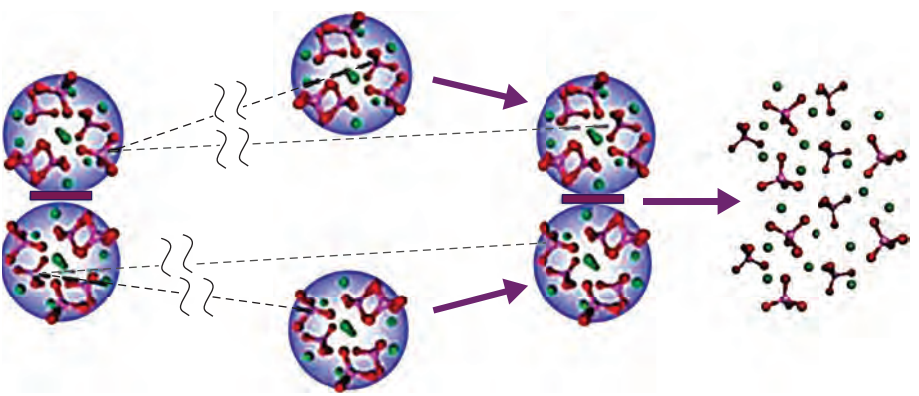
شكل ١٤-١٠: في جُزيئة بوزنر $Ca_9(PO_4)_6$، تقع ٨ من أيونات الكالسيوم (الأزرق) على حواف المكعَّب والتاسع في المركز، بينما تقع ٦ من أيونات الفوسفات (ذرات الفسفور باللون البنفسجي محاطة بأربع من ذرات الأوكسجين باللون الأحمر) على الوجوه الستة للمكعَّب. عن: Fisher (2017).

وحيث إن التشابُك الكمومي هو متطلَّبٌ مركزيٌّ في عملية المعالجة الكمومية، فقد اعتقد الباحث أن الإنزيم الذي يحفِّز التفاعل الكيميائي الذي يشطر أيون البايروفوسفات (Pyrophosphate) إلى أيونَي فوسفات يمكن أن يُشابِك كموميًّا زوجًا من الكيوبتات (شكل ١٤-١١).

ومن أجل أن تعمل أيونات الفوسفات في المعالجة الكمومية للخلايا العصبية، يجب أن تُنقل إلى تلك الخلايا؛ لتُسهِم في التفاعلات الكيموحيوية التي ترتبط بتحرير النواقل العصبية، مثل الحامض الأميني الكلوتاميك وما ينتُج عنه من إطلاقاتِ ما بعد التشابُك في مجموعةٍ من الخلايا العصبية. العوامل التي تقوم بنقل أيوناتِ الفوسفاتِ هذه هي جُزيئات بوزنر؛ فأيونات الفوسفات المتشابكة كموميًّا والمتضمَّنة في جُزيئات بوزنر، ستُشابك هذه الجُزيئات وتُستخدم في خزن ومعالجة المعلومات الكمومية في الخلايا العصبية. حسب Weingarten *et al.*, (2016) تُحافِظ جزيئاتُ بوزنر على التشابُك الكمومي لأيونات الفوسفات لكون المكوِّنات الأخرى للجزيئة؛ كأيونات الكالسيوم والأوكسجين، لا تمتلك لفًّا مغزليًّا نوويًّا، ولحركتها السريعة في المحلول. وهكذا يبقى التشابُك الكمومي لأيونات الفوسفات ليومٍ واحدٍ أو أكثر، وبذلك تكون جُزيئات بوزنر قادرةً على العمل كذاكرةٍ كمومية (شكل ١٤-١٢).

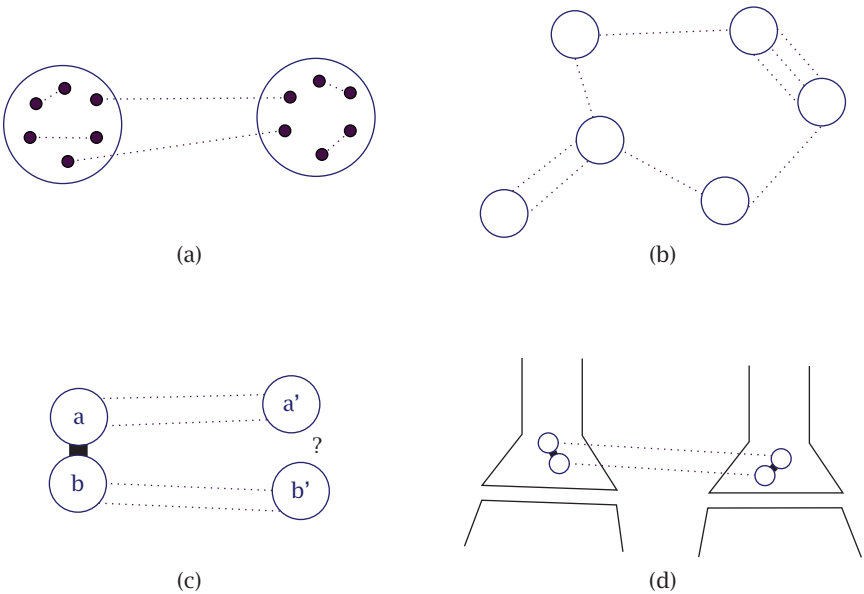


شكل ١٤-١١: بعد التحلُّل المائي لجُزيئات البايروفوسفات، يمكن لأيونات الفوسفات (بالبرم المغزلي النووي المتشابك لأزواجها) أن تتحد مع أيونات الكالسيوم لتكوين جُزيئات بوزنر. هذا يمكن أن يُوجِد لفًّا مغزليًّا نوويًّا متشابكًا كموميًّا ضمن وما بين الجُزيئات. مُحوَّر عن: Fisher (2017).



شكل ١٤-١٢: مع بطء الدوران، ينفك زوج جُزيئتَي بوزنر المرتبطتَين بسهولة أكثر (في بيئةٍ حامضيةٍ قليلًا) من الجُزيئات المفردة، وهكذا يتحلَّل زوج بوزنر إلى مكوِّناته من أيونات الكالسيوم والفوسفات. أيونات الكالسيوم المتحرِّرة يمكن أن تقدح عملياتٍ كيموحيويةً لتوصيل الوضع الكمومي إلى كيموحيوي. عن: Fisher (2017).

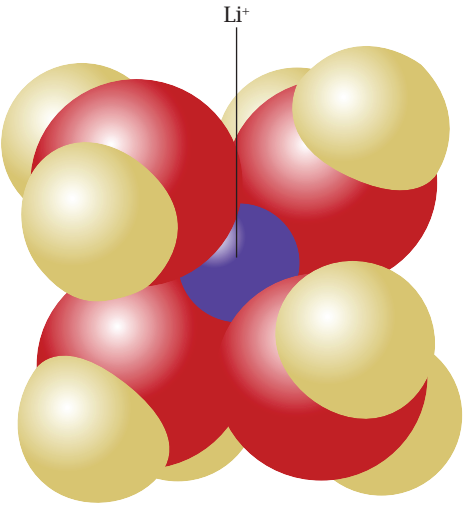
الارتباط الكيميائي بين جُزيئتَي بوزنر يعتمد على البَرم المغزلي النووي، مؤديًا إلى حالة التشابُك بينهما، وهذا سيكون بمثابة «قياس» لحالات البَرم المغزلي. مع استمرار زوج جُزيئات بوزنر المرتبطان بالدوران حول بعضهما تتعزَّز حالة تشابُك البرم المغزلي



شكل ١٤-١٣: زوج من جُزيئات بوزنر المتشابكة في (a). الخطوط المتقطِّعة البنفسجية تمثِّل الحالة المنفردة (Singlet) للفِّ المغزليِّ النووي المتشابك للفسفور. معقدٌ من جُزيئات بوزنر عالي التشابك في (b). مع زوجَين من جُزيئات بوزنر المتشابكة موسمة (a, a') و(b, b') كما في (c) ارتباطٌ كيميائيٌّ بين واحد من كل زوجٍ مع الآخر — المستطيل الأسود الذي يربط (a, b) — يمكن أن يغيِّر احتمالية الارتباط التالي لفردَي الزوج الآخرين (a', b'). إذا ارتبطَت جُزيئات بوزنر كيميائيًّا بعد انتقالها إلى اثنَين من الخلايا العصبية قبل المشبك كما في (d) فستكونان عُرضةً للتفكُّك محرِّرتَين أيوناتِ الكالسيوم المصاحبة لهما في السايتوبلازم، وهذا يحفِّز تحرُّر ناقلٍ عصبي، وبذلك تُحفِّز إطلاق متشابكٍ كموميًّا للخلية العصبية بعد المشبك. عن: Fisher (2015).

النووي بينهما، لكن عند توقُّف الدوران يحصُل المزيد من «قياس» حالة البَرم المغزلي. وهنا تكون أزواج جُزيئات بوزنر عُرضةً لـ «هجوم البروتون» وتُعاني تحلُّلًا محرِّرةً أيونات الكالسيوم إلى السايتوبلازم (شكل ١٤-١٢). هذا سيغيِّر تركيز أيونات الكالسيوم ويحفِّز تحرير حامض الكلوتاميك من الخلايا العصبية قبل المشبك (شكل ١٤-١٣).

يتم نقل جُزيئات بوزنر المتشابكة بواسطة الحُويصلات الناقلة لحامض الكلوتاميك (Vesicular Glutamate Transporter) (VGLUT) من خارج الخلايا حيث تكوَّنَت إلى



شكل ١٤-١٤: يكون أيون الليثيوم في المحلول المائي معقدًا رباعي السطوح $Li^+(H_2O)_4$. يقع أيون الليثيوم (بنفسجي) في المركز ويُحاط بأربعة جُزيئات ماء. الأوكسجين (أحمر) والهيدروجين (أبيض). مُحوَّر عن: https://chem.libretexts.org McCoss (2917).

سايتوبلازم الخلايا العصبية المختلفة قبل المشبك. هذا يحصُل عن طريق الإدخال الخلَوي ثم تفكُّك الجُزيئات وإعادة تكوينها. في المحصِّلة، ستُوجد جُزيئات بوزنر المتشابكة كموميًّا في سايتوبلازم العديد من الخلايا العصبية قبل المشبك، والتي يمكن أن تؤدِّي إلى إطلاقٍ متناسقٍ كموميًّا خلال هذه الخلايا العصبية بعد المشبك.

حسب Fisher (2015) فإن اثنَين من أيونات الليثيوم ^6Li يمكن أن تعوِّض ذرة الكالسيوم في جُزيئة بوزنر. هذا يمكن أن يغيِّر من البرم المغزلي النووي للفسفور في الجُزيئة، ويُحوِّر المعالجة الكمومية العصبية، وقد يقدِّم تفسيرًا لآلية عمل الليثيوم (والفرق مع نظيره الآخر ^7Li) في علاج بعض الاعتلالات العصبية.

ثمَّن Gambini & Pullin (2019) نموذج Fisher في وصف مبادئ وآلياتِ عمل الدماغ كموميًّا اعتمادًا على البرم المغزلي النووي للفسفور ودَور جُزيئات بوزنر. كما أشارا إلى إشادة Halpern & Crosson (2019) بنموذج Fisher باعتباره يُلبِّي معظم متطلَّبات

مواصفات DiVincenzo (2000) للحوسبة الكمومية. بينما يقلِّل Player & Hore (2018) من زمن التماسُك والتشابُك الكمومي لجُزيئات بوزنر التي يعرضها نموذجُ Fisher إلى أقل من ٣٧ دقيقة أو حتى أقل من ذلك، وبالتالي يُشكِّك في قدرة هذا النموذج على تفسير الوعي الكمومي.

وتأثُّرًا بنموذج Fisher ونموذج Penrose & Hameroff قدَّم McCoss (2017) نموج البرم المغزلي النووي لأيونات الليثيوم ^{6}Li والحوسبة الكمومية الثلاثية حيث تستخدم الكيوترت (qutrit) بدل الكيوبت.

الكيوترت هو وحدةُ معلوماتٍ كمومية تتحقَّق بواسطة المنظومة الكمومية متمثلة بالتراكُب الكمومي لثلاث حالاتٍ كموميةٍ متعامدة تلقائيًّا. كما أبرز الوقت الطويل لتماسُك البرم المغزلي النووي لأيونات الليثيوم في المحلول المائي حيث تُحاط بأربعة جُزيئات من الماء توفِّر له العزل الكافي عن المحيط (شكل ١٤-١٤).

(٥) الوعي: المجال الكهرومغناطيسي وميكانيك الكم

Consciousness: Electromagnetic Field and Quantum Mechanics

يتألَّف الحاسوب الرقمي من عدة ملايين من المفاتيح الكهربائية التي عند غلقها (توصيل) ستُمرِّر وعند فتحها (قطع التوصيل) ستُوقِف التيار الكهربائي، وبالتالي ستُوجِد بتًا (bit) واحدًا يمثل حالة تقابُل بين نعم/لا أو ٠ / ١. مجاميع من مثل هذه المفاتيح ترتَّب بطريقةٍ معينةٍ لتُشكِّل بواباتٍ منطقية ودوائرَ منطقية وتمكِّن من تنفيذ التعليمات التي يُزوَّد بها الجهاز بشكل برامج من خلال وحدة المعالجة المركزية (CPU) (Central Processing Unit) والذاكرة. وتتمكَّن الحواسيب الرقمية المتطورة من القيام بمئات مليارات العمليات الحسابية والمنطقية خلال ثوانٍ قليلة. وبذلك فهي تتفوق على الدماغ البشري في هذا المجال. لكن هذه الحواسيب لا تتمكن من الإدراك الذي يتمتع به الدماغ. صحيحٌ ثمَّة تشابُه بين المنظومتَين؛ فالجهاز العصبي يتألف من مليارات الخلايا العصبية التي تقابل الترانسترات في الحاسوب؛ باعتبارهما يمثِّلان بواباتٍ منطقية، وفي الحالتَين تتصل هذه البوابات المنطقية عَبْر شبكةٍ معقدةٍ تضُم الكثير جدًّا من الدوائر المنطقية. كما يمكن اعتبار الدماغ بمثابة وحدة المعالجة المركزية، ويضم الذاكرة أيضًا. وحتى عند ربط حوالي مليار حاسوب عَبْر العالم من خلال الإنترنت، لا ينتُج عنها ما يكافئ الوعي البشري، فهل الفرق ناجمٌ عن زيادة تعقيد الجهاز العصبي الذي يضم ١٠٠ مليار خلية عصبية؟ أم أن

عاملًا آخرا وراء هذا الفرق المهم، يتساءل Johnjoe & Al-Khalili (2014). كأن يكون الدماغ أقرب إلى الحاسوب الكمومي وليس الحاسوب التقليدي. وكان عالم الرياضيات الإنكليزي روجر بنروز قد قال سنة ١٩٨٩م، بفكرة أن العقل البشري هو حاسوبٌ كمومي. ما الفرق بين الحاسوب التقليدي والحاسوب الكمومي؟ الحاسوب التقليدي يعتمد البت كوحدة معلومات وينتج عن حالة من حالتين مترابطتين هما: ٠ و١، وكلما زاد عدد البِتات في الجهاز، زادت قدرتُه الحاسوبية بصورةٍ خطية. فمثلًا زيادة ١ بت إلى ١٠ بِتات الموجودة في الحاسوب، ستزيد من قدرته الحاسوبية بمقدار ١ / ١٠، ومضاعفة عدد البِتات من ١٠ إلى ٢٠ ستضاعف القدرة الحاسوبية للجهاز. أما الحاسوب الكمومي فإنه يعتمد البت الكمومي أو ما يُعرف بـ كيوبت (qubit). وحيث إن الكيوبت ناتج عن حالةٍ كموميةٍ لجسيم أو ذرة مثلًا، فهو يُظهِر الخواص الكمومية المتمثِّلة بالتراكُب الكمومي. وبالتالي فإنه مقارنةً بالبِت التقليدي سيكون ٠ و١ و٠١ بنفس الوقت. كما يُظهِر خاصية التشابُك الكمومي؛ حيث تكون جميع الكيوبتات مترابطة، وإن تغيير حالة أحدها سيُغيِّر حالة الجميع؛ بناءً على ذلك فإن القدرة الحاسوبية للحاسوب الكمومي تكون أُسية، وهي زيادة انفجارية؛ وبالتالي فإن زيادة كيوبت واحد سيُضاعِف من القدرة الحاسوبية له. ويشبه Johnjoe & Al-Khalili (2014) هذه الحالة بحالة القصة المعروفة عن رغبة الإمبراطور الصيني مكافأة مخترع الشطرنج؛ حيث عرض عليه مكافأة يحدِّدها المخترع. هذا الأخير طلب أن تُوضع في المربع الأول لرقعة الشطرنج حبةٌ واحدة من حبَّات الرز، وفي المربع الثاني يُوضع ضعف العدد الأول (٢) وفي الثالث (٤) وهكذا وصولًا إلى المربع الأخير رقم ٦٤. وقد استخفَّ الإمبراطور بهذا الطلب واعتَبره استهانةً به. لكنه صُعق عندما عرف أن الرقم سيصل إلى (٢٦٤–١) أي ٩,٢٢٣,٣٧٢,٠٣٦,٨٥٤,٧٧٥,٨٠٨ حبة رز أو ما يساوي ٢٣٠,٥٨٤,٣٠٠,٩٢١ طن من الرز وهذا يكافئ تقريبًا مجموع وزن الرز الذي أنتجه البشر طيلة تاريخهم. سنة ٢٠١٩م، قامت شركة Google ببناء حاسوبٍ كمومي Quantum supremacy يوظِّف ٥٣ كيوبت (سعة حاسوبية = ٢^٥٣ أو حوالي ١٠^١٦) حيث يقوم بمعالجه مهمةٍ خلال ٢٠٠ ثانية يحتاج الحاسوب التقليدي الفائق لتحقيقها إلى ١٠٠٠٠ سنة (Arute *et al.*, 2019). وفي حال نجح العلماء في بناء حاسوب كمومي يوظِّف ٣٠٠ كيوبت، فستكون سعة ذاكرته تعادل ١٠^٨٠ والذي لا يمكن للحاسوب التقليدي الفائق أن يضاهيه إلا إذا صار حجمه بقَدْر حجم الكون كله. ويتوقَّع الفيزيائي Shai Machnes من معهد الفيزياء النظرية في جامعة Ulm ومن العاملين في بناء الحاسوب أن يتم إنتاج مثل هذا الحاسوب بعد ١٠ سنوات.

تنطلق أفكار Johnjoe & Al-Khalili (2014) عن دَور ميكانيك الكَم في الوعي من عمل القنوات الأيونية التي سبق التطرُّق إليها في عمل الخلايا العصبية؛ فهذه القنوات مسئولة عن تكوين جهد الفعل (Action potential) الذي يمثِّل الإشارة العصبية التي تنقل المعلومات في الدماغ، وبذلك لها دَورٌ مركزيٌّ في معالجة المعلومات. وتتميَّز القنوات الأيونية بحجمها الصغير جدًّا؛ فهي حوالي ١,٢ × ٠,٣ن م. صغر الحجم هذا وتعامُلها مع الأيونات المفردة، وخصوصيتها وسرعة نقلها للأيونات حيث تمرِّر حوالي ١٠٠ مليون أيون في الثانية يؤهِّلها للعمل كمنظومةٍ كمومية. وقد بين Summhammer *et al.*, (2012) أن عمل قناة البوتاسيوم الأيونية KcsA في البكتيريا يتم عبر التماسك الكمومي في درجات الحرارة الفسلجية كما تم ذكره في الفصل الثامن. واستنتج الباحثون أن التماسُك الكمومي يلعب دورًا لا غنى عنه في نقل الأيونات عَبْر القنوات الأيونية للخلايا العصبية، وبذلك يكون جزءًا من عمل الدماغ، وأن حالات بوابة القناة يمكن أن تفسَّر على أساس حالاتٍ تقليديةٍ تستند إلى عملياتٍ كموميةٍ تحتية في الدماع. وحسب Johnjoe & Al-Khalili (2014) فإن القنوات الأيونية يمكن أن تلعب دورًا في حوسبة الخلايا العصبية؛ حيث إنها وراء أحداث جهود الفعل، فحالاتها تعكس حالات الخلايا العصبية؛ فعمل القنوات الأيونية مرتبط بحالة الإطلاق (Firing) أو الراحة للخلية العصبية؛ فعند حدوث الإطلاق تنفتح القناة الأيونية وتمر الأيونات، بينما عندما تكون الخلية العصبية في حالة الراحة، لا تتحرك الأيونات عَبْر القنوات الأيونية. وحيث إن مجموع عمليات الإطلاق واللاإطلاق للخلايا العصبية في الدماغ تؤسِّس لأنشطة الدماغ، فإن مجموع عمليات تدفق الأيونات الكمومي إلى داخل الخلية أو خارجها (عمل القنوات الأيونية) يمكن أن يشترك في عمل الدماغ. لكن عمل القنوات الأيونية بشكلٍ منفرد لا يمكن أن يفسِّر تكوين العملية الدماغية المترابطة. ولتحقيق ذلك لا بد من ترابُط عمل القنوات الأيونية من خلال التشابُك الكمومي للأيونات فيها، وتلك الموجودة في الخلايا العصبية القريبة. لكن هذا برأي الباحثَين غير ممكنٍ بسبب حدوث فكِّ التماسك في ظروف الحرارة الفسلجية والرطوبة والأنشطة المرتبطة مع البيئة. التماسُك والتشابُك المطلوبان حسب هذَين الباحثَين يتأتى من خلال القنوات الأيونية الفولتية البوابة، والتي تنفتح وتنغلق بفرق الفولتية أو المجال الكهربائي. والدماغ يسوده مجالٌ كهربائيٌّ ناتج عن النشاط الكهربائي لمجموع الخلايا العصبية، وهو ما يتم تحسُّسه وتسجيله في تقنيات مسح الدماغ الروتينية؛ مثل التخطيط الكهربائي للدماغ Electroencephalography (EEG) أو التخطيط المغناطيسي للدماغ Magnetoencephalography (MEG). هذا المجال

الكهربائي يمكن أن يحل مشكلة الترابط المعروفة في تكوين الوعي. والمجال أي مجال مثل المجال الكهربائي أو المجال المغناطيسي يكون حالةً من الطاقة مستمرة في الفضاء، ويمكن أن تحقِّق شغلًا؛ فمجال الجاذبية يحرِّك الكتل، والمجال الكهربائي أو المغناطيسي يحرِّك الجُسيمات المشحونة؛ مثل الأيونات في القنوات الأيونية. وحيث إن الكهربائية والمغناطيسية هما خاصيتان لظاهرةٍ واحدة؛ يولِّدان المجال الكهرومغناطيسي، كما أن المادة والطاقة قابلان للتحوُّل؛ أحدهما إلى الأخرى حسب معادلة آينشتاين الشهيرة $E = mc^2$ ينتُج عن ذلك أن طاقة المجال الكهرومغناطيسي للدماغ مرتبطة بمادة الدماغ (الخلايا العصبية) وهي تنتُج عن عمليات الإطلاق للخلايا العصبية؛ لذا فهي ستُشفِّر معلوماتٍ مماثلة بالضبط لما تشفِّره الخلايا العصبية من أنماط إطلاق. لكن بينما تبقى الومضات العصبية ضمن الخلايا العصبية، تُوحِّد جميع الأنشطة الكهربائية المتولِّدة عن كل الومضات كافة المعلومات ضمن المجال الكهرومغناطيسي للدماغ، والذي يرتبط مع الأيونات المتماسكة كموميًّا في القنوات الأيونية الفولتية البوابة. وهكذا يبدو أن المجال الكهرومغناطيسي الذي ينتُج عن نشاط الخلايا العصبية كما مر ذكره، ينسِّق إطلاق الخلايا العصبية حيث يُزامِن إطلاق مجاميع منها سوية مكوِّنًا ما يشبه الحلقة الدورية ذاتية المرجعية، والتي يعتقد أنها مكوِّنٌ أساسيٌّ في الوعي.

وحسب الباحثين Johnjoe & Al-Khalili (2014) فإن حالات عدم التركيز أو اللاوعي تتضمَّن أيضًا إطلاقات الخلايا العصبية كما في حالات الوعي، لكن الحالات الأولى تنتُج عن إطلاقاتٍ عصبيةٍ غير متزامنة، بينما حالات الوعي تنتج عن إطلاقاتٍ عصبيةٍ متزامنة بفعل المجال الكهرومغناطيسي. وهكذا يبدو أن الوعي ينتُج عن عمليات تتضمن بصمات ميكانيك الكم من خلال عمل القنوات الأيونية، وفعل المجال الكهرومغناطيسي التقليدي.

وحيثُ إن جميع الخلايا بما فيها خلايا البكتيريا تمتلك قنواتٍ أيونيةً في أغشيتها، فيمكن لهذه الآلية أن تفسِّر الوعي الذي تُظهِره جميع الأحياء.

الفصل الخامس عشر

ميكانيك الكم ونشوء الحياة

Quantum Mechanics and Origin of Life

«لا يُوجد سببٌ مُقنِعٌ يجعلنا نعتقد بنشوء الحياة لأسبابٍ غير طبيعية.»

Robert Hazen (2012)

نشوء الحياة ونشوء الكون من أهم المواضيع التي شغلَت الإنسانية منذ تبلور الوعي، وارتبطَت بحالة تطوُّره. نسجَت آلاف الأساطير التي كانت محاولاتٍ مضنية لإيجاد إجاباتٍ مقنعة ومطمئنة، كما قدَّمَت الأديان إجاباتها التي ارتكزَت إلى قدرة الخالق التي تقول للشيء كن فيكون. وحاولَت الفلسفة إيجاد الإجابات من خلال البرهنة العقلية الخالصة، وقدَّمَت تصوراتٍ مختلفة عن نشوء الكون والحياة. حصل ذلك على امتداد آلاف السنين في أزمانٍ لم تكن العلوم قد وُلدَت بعدُ. وقبل أن نخطو في طريق البحث عن نشوء الحياة لا بد أن نعرف عن ماذا نبحث بالضبط (Hordijk, 2013).

(١) ما هي الحياة؟ What Is Life?

يعرض Domingo (2020) عددًا من التعاريف للحياة: فالحياة حسب Schrödinger (1944) هي صفة المنظومة التي تنتزع إنتروبي سالبًا من البيئة، وتصدِّر لها الإنتروبي (لتُحافِظ على الترتيب أو النظام وتؤخِّر التحلُّل إلى التوازُن الديناميكي الحراري). وحسب Kauffman (1993) فإن الحياة صفةٌ متوقَّعة ذاتية التنظيم لبوليمرات محفِّزة. وحسب

Yarus (2010) فإن الحياة تورَث مع تغيير، وإن التضاعُف هو استراتيجية البقاء الفيزيائية الكيميائية الأخيرة. بينما يعتبر المعهد الفلكي لناسا (NASA Astrobiology Institute) الحياة كمنظومةٍ كيميائيةٍ محفوظة ذاتيًّا، وتتمَّكن من التطوُّر الداروني. ويعرِّف Demetrius (2013) الكائنات الحية على أنها منظوماتٌ أيضيةٌ قادرة على التضاعُف، مؤلَّفة من جُزيئات وخلايا معرَّضة للتغيُّرات التلقائية في التركيب والوظيفة بسبب الطفرات. وحسب Breaker (2015) أن الحياة عمليةٌ كيميائيةٌ ذاتية الديمومة تتمكَّن من التضاعُف والتطوُّر.

والتعريف الذي نقدِّمه هنا يمكن أن يشمل جوهر التعاريف المذكورة: الحياة ظاهرةٌ منبثقةٌ عن منظوماتٍ عضويةٍ معقَّدة عاليةِ التنظيم مفتوحة، ومتكيِّفة تتمكَّن من استغلال وتحويل وتبادُل الطاقة والمادة، والمعلومات مع البيئة بطريقةٍ تخفض فيها الإنتروبي من خلال تصديره إلى البيئة، ومعالجة المعلومات وتحقيق التوازن الداخلي بعيدًا عن حالة التوازن مع البيئة وتحقيق التكاثُر والتطور. هذه المنظومات التي تُسمَّى بالكائنات الحية تُظهِر تركيبًا فريدًا يتميز بكونه يتألَّف بالأساس من موادَّ عضويةٍ كمركَّبات كربونيَّة، هي الأكثر تعقيدًا في الطبيعة التي نعرفها وبتنظيمٍ خاصٍّ وتُظهِر فعاليات معينة؛ كالاستجابة للمؤثِّرات والنمو والتكاثُر والتغايُر وحفظ النوع. يمكن أن تُوجد بعض هذه الفعاليات بصورةٍ منعزلة في بعض المنظومات غير الحية، لكن لا يمكن أن تظهر بشكلٍ متكامل في أية منظومةٍ غير حية.

تُظهِر المنظوماتُ الحية تنوعًا هائلًا مقارنةً بالأشياء أو المنظومات غير الحية؛ فالمعادن على الأرض والتي تتشكَّل من تفاعُل بعض العناصر حوالي ٥٤٠٠ نوعٍ فقط، بينما يبلغ عدد المركبات العضوية حسب Beilstein database ٩,٨ ملايين وحسب Ruddigkeit *et al.*, (2012) يُوجد ١٦٦ مليارًا من الجُزيئات العضوية الصغيرة. أما عدد أنواع الحيوانات فيبلغ ١٢٧٠٧٨٥ والنباتات ٣٦٦٤٦٥ والفطريات ١٤٦١٦٧ والطحالب ٢١٢٣٦ والحيوانات الابتدائية ٢٥٦٥ والبكتيريا ٩٩٨٣ والأركيا ٣٧٧ والفايروسات ٣١٨٦ (Catalogue of Life, 2020). هذه هي الأنواع المدروسة فقط. ويقدِّر بعض الباحثين عدد أنواع الأحياء بأكثر من ترليون نوع، ويُسجَّل سنويًّا ١٧٠٠٠ نوعٍ جديد. كما أن عدد أنواع الكائنات الحية الحالية لا يتجاوز ٠,١٪ فقط من عدد الأنواع المنقرضة.

(٢) التنوُّع الأحيائي Biodivesity

يمكن أن يكون الأساس الذي تستند إليه ظاهرة التنوُّع في الأحياء إلى عواملَ من أهمها عنصر الكاربون، الذي يشكِّل معظم الجُزيئات (مع استثناء الماء) التي يتكوَّن منها جسم الكائن الحي ويُظهِر مميزاتٍ سنأتي على ذكرها، ووجود الماء كوسطٍ للتفاعلات وكمادةٍ متفاعلة، ويتمتَّع الماء أيضًا بمزايا فريدة، وتنوُّع البروتينات غير المحدود تقريبًا وتغايُر الأحماض النووية وعمل الإنزيمات، إضافةً إلى عمل ميكانيك الكَم في معالجة كل الاحتمالات سوية.

(٢-١) عنصر الكاربون

هذا العنصر رباعيُّ التكافؤ، ذرَّتُه تمتلك ٤ إلكتروناتٍ غير مشدودة بقوة وتتمكَّن من التفاعُل عَبْر تكوين أواصرَ تساهميةٍ مع إلكترونات العناصر الأخرى؛ كالهيدروجين والأوكسجين والنتروجين وغيرها لتكوين المركبات العضوية. كما تتمكَّن ذرة الكاربون من تكوين أواصرَ مع ذرات كاربونٍ أخرى (C–C) وكذلك تكوين أواصرَ مزدوجةٍ كما في الكاربونايل (C=O) وثلاثية كما في النايترايل (C≡N)؛ ما يمكِّن من تكوين مركَّباتٍ ذات سلاسلَ مختلفةِ الطول والتشكُّل. على عكس ذلك فإن عنصر السيلكون (Si) الذي هو رباعي التكافؤ أيضًا لا يتمكَّن من تكوين أواصر Si–Si. السيلكون يتمكَّن من التفاعل مع عددٍ قليلٍ من العناصر؛ مثل الأوكسجين؛ حيث تتكون السيليكات التي يتألَّف منها الرمل. هذا يفسِّر عدم إمكانية أن يعوِّض السيلكون عنصر الكاربون في تكوين مركبات الكائنات الحية، علمًا أنه يُوجد بكمياتٍ تفوق عنصر الكاربون بـ «٢٠٠» ضعف في قشرة الأرض. كذلك يُماثِله في هذا السلوك التفاعُلي عنصر الجرمانيوم (Ge) الذي هو رباعي التكافؤ أيضًا لكنه يُوجد بكمياتٍ أقل بكثير من عُنصرَي السيليكون والكاربون (Whittet, 2017).

(٢-٢) الماء

الماء أوفَر المركَّبات على كوكب الأرض، ويشكِّل النسبة الأكبر من الوزن الطري لجميع الأحياء. وإن الحياة التي نعرفُها مرتبطة بالماء ارتباطًا وثيقًا. ترجع الصفات العديدة والمتفردة للماء إلى طبيعة جُزيئة الماء وتركيبها الفراغي، وتوزُّع الشحنات عليها؛ فجُزيئات

الماء مُستقطِبة ما يعظِّم قدرتها العالية على إذابة الكثير من المواد الكيميائية. وينشأ عن ذلك ظواهر التماسُك والتلاصُق لجُزيئات الماء؛ ما يمكِّن من جريان السوائل في أجسام الكائنات الحية. كما أن جُزيئات الماء تدمص على الجزيئات الكبيرة غير الذائبة وتحوطُها؛ ما يجعلها تشكِّل محاليلَ غرويةً، كما هو حال سايتوبلازم الخلايا الحية، وتُمكِّن من نقل الكثير من الجُزيئات. كما أنها تُحيط الأيونات أيضًا. ويمكِّن ماء التميؤ على البروتينات والأحماض النووية من اتخاذها للأشكال الثلاثية الأبعاد اللازمة لفعاليتها. وإن وجود الماء المرتبط بالجُزيئات الأخرى يجعلها على اتصالٍ مع غيرها عَبْر جُزيئات الماء. كما أن قدرة جُزيئات الماء على تكوين أواصرَ هيدروجينية فيما بينها يجعلها في وضعيةٍ سائلةٍ على مدًى واسعٍ من درجات الحرارة، ليكون وسطًا مستمرًّا للتفاعلات الكيميائية. وهذه الصفة أيضًا تجعل الماء ذا حرارةٍ نوعيةٍ عالية، تلعب دورًا مهمًّا في الحفاظ على درجة حرارة الكائن الحي؛ حيث يعمل الماء كمُلطِّفٍ حراري. ويدخل الماء كمادةٍ متفاعلةٍ في الكثير من التفاعُلات الكيميائية؛ كتفاعلات التحلُّل المائي والتحلُّل بواسطة الفوتونات لتحرير الإلكترونات والبروتونات في التركيب الضوئي وفي تفاعلات التنفُّس وغيرها. وللخاصية الفريدة لانخفاض كثافة الجليد عن الماء السائل دَورٌ غاية في الأهمية؛ حيث تعمل طبقة الجليد كعازلٍ حراريٍّ للمياه تحتها، وتمكِّن من بقاء الأحياء المائية في البيئات الشديدة البرودة. ويمكِّن الوجود الكبير للماء في الخلايا من اتخاذها للشكل الفعَّال المناسب، ويمكِّن من التوزُّع الفراغي والتموضُع المناسب لأجزائها المختلفة. كما أن الوجود الكبير للماء يمكِّن من حصول الحركة البراونية والأزموزية وتبادل الجُزيئات المختلفة بين الخلايا وبينها والبيئة. وتعمل جزيئات الماء كمُحوِّل طاقة. ومع أن الماء يمكن أن يمتَص الطاقة ويبُث معظمها كحرارة، إلا أن قسمًا مهمًّا منها يكون بشكلٍ يُمكِن استغلالُه لإنجاز شغل. وحسب مفهوم الإنتروبي السالب، هذا النوع من الشغل يُفضِي إلى خلق النظام وفصل الشحنات (Madl & Egot-Lemaire, 2015). وحسب Chaplin (2001) فإن الماء يلعب دورًا مركزيًّا في تنوُّع العمليات البيولوجية.

(٢-٣) البروتينات

عدَد البروتينات المحتَمل تكوُّنها نظريًّا إذا كان أيُّ تشكيلٍ من الأحماض الأمينية العشرين في الطبيعة متساويَ التحقُّق، سيساوي ٢٠^١٠٠ أو ١٫٣ × ١٠^١٣٠ في بروتيناتٍ تتألف من

١٠٠ حامضٍ أميني، وهذا رقم يفوق كثيرًا عدد الذرات في الكون. وعدَد البروتينات المؤلَّفة من ٧ أحماضٍ أمينية يبلُغ (= ٧٢٠) أو ١,٣ × ٩١٠ (Otaki *et al.*, 2005). وحيث إن الخلية تكون نتيجة التشفير الجيني ١٠٠٠٠٠ نوعٍ من البروتينات، فإن التحوير ما بعد الترجمة يرفع العدد إلى ١٠٠٠٠٠٠ نوع. وتدخُل البروتينات في علاقاتٍ تركيبيةٍ ووظيفية مع العناصر المعدنية والسكَّريات والدهون والأحماض النووية. هذه الأرقام والفعاليات تُبيِّن جانبًا من الأسس التي تفسِّر التنوُّع الهائل في المواد العضوية، وأنواع الأحياء.

(٢-٤) الإنزيمات

الإنزيمات تختصر زمن التفاعلات الكيميائية من ساعاتٍ أو أيامٍ أو سنين أو آلاف السنين، إلى أجزاءٍ صغيرة جدًّا من الثانية أو ثوانٍ ودقائق، وفي درجات الحرارة الفسلجية، والتي بدونها تتطلَّب درجاتِ حرارةٍ عالية جدًّا. هذا سيُمكِّن من حصول الكثير من التفاعلات الكيميائية والتي توفِّر إمكانات بناء مركَّباتٍ جديدةٍ ومتنوعة جدًّا، والتي يتطلَّبها التنوُّع الأحيائي.

(٢-٥) تغايُر الأحماض النووية

في الفرد الواحد وفي الآهلة والنوع يتعرَّض الحامض النووي DNA للعديد من التغيُّرات التي تشمل الطفرات المختلفة، وتغيُّر الكروماتين، وتغيُّر عدد أو تركيب الكروموسومات، وفقدان جينات أو اكتساب جيناتٍ جديدة، ومضاعفة أجزاءٍ من الـ DNA وغيرها. هذه التغيُّرات التي تحدُث بسبب عوامل البيئة أو عواملَ بيولوجيةٍ تؤدي إلى حصول تغايُراتٍ وراثيةٍ تخضع للانتخاب الطبيعي، وهي مصدرٌ مهمٌّ للتغايُر في الأحياء.

(٢-٦) ميكانيك الكَم

ويمكِّن ميكانيك الكم من عمل الإنزيمات وحصول الطفرات بواسطة الاختراق الكمومي، واستحصال الطاقة، كما تم ذكره في موضوع التركيب الضوئي والتنفس بواسطة التراكُب والتشابُك، ويمكِّن من كل الاحتمالات المُمكِنة للتفاعُلات الكيميائية.

(٣) نظريات نشوء الحياة Theories of Origin of Life

الكائنات الحية تخضع كما هو كل شيء في الكون، إلى مبدأ الوحدة والتبايُن (انظر الفصل الأول)؛ فعلى الرغم من التبايُن أو التنوُّع الهائل للكائنات الحية من حيث الحجم والكتلة والشكل واللون ودرجة التعقيد، فإنها تشترك جميعا بخواصَّ تركيبيةٍ ووظيفيةٍ معينة. وكما أن المجرَّات والنجوم والكواكب التي يتكوَّن منها الكونُ المرئي متنوِّعة، تُظهِر التبايُن من حيث الحجم والكتلة والتشكُّلات، إلا أنها تُظهِر وحدةً في أساس التركيب والنشوء والتحوُّل. وحيث إن ملاحظة تباعُد المجرات المتسارع الذي اكتشفه إدوين هابل (Edwin Hubble) سنة ١٩٢٩م، قاد إلى الإجابة على السؤال الكبير عن نشوء الكون وتبلوُر نظرية الانفجار العظيم. لكن الجواب عن السؤال الكبير الآخر عن نشوء الأحياء، ما زال لم يكتمل بعدُ. مع ذلك ثمَّة مشتركٌ أساس بين الحالتَين، وهو التغيُّر مع الزمن أو التطوُّر، والذي نجده في تباعُد الأنواع وراثيًّا عن بعضها هو المفتاح المشترك الذي يمكن أن يقود إلى الحل عَبْر البحث عن الأصل المشترك أو أصل الحياة مثلما أوصل اكتشاف هابل لأصل نشوء الكون من النقطة المنفردة.

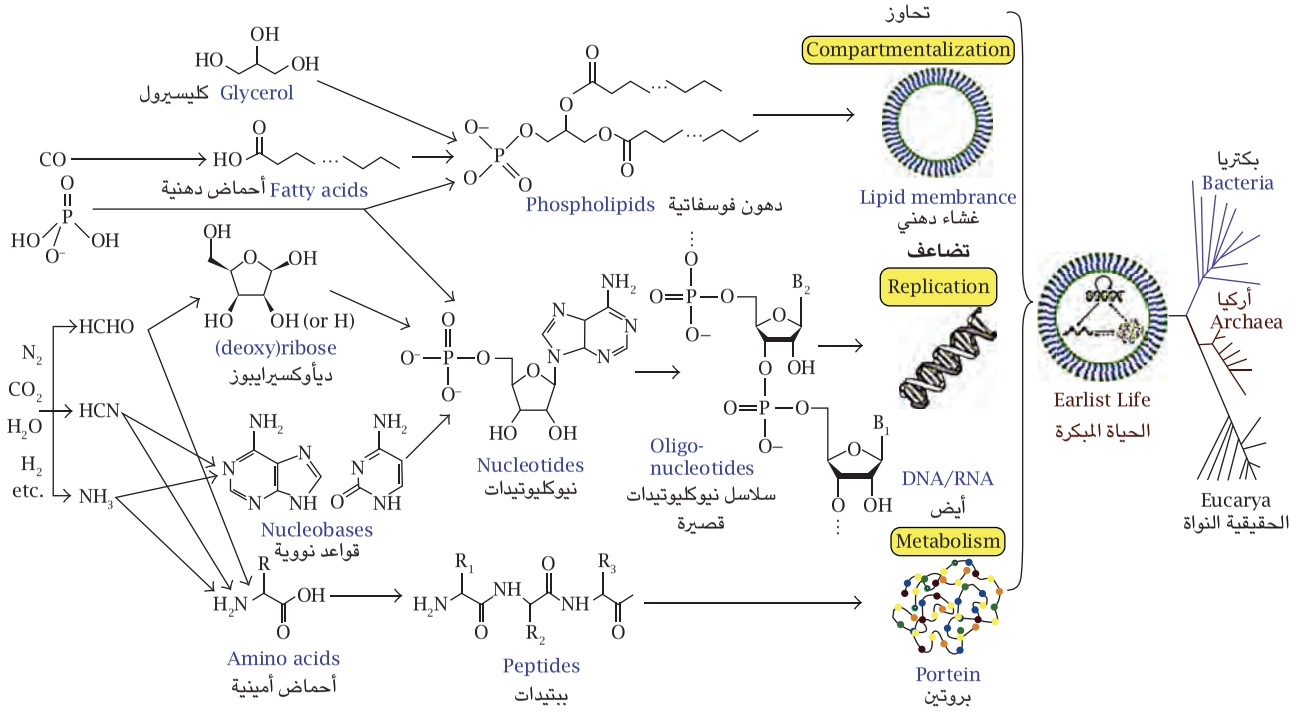
النظرة المتفحِّصة إلى الأحياء تُظهِر وجود مشتركٍ تركيبيٍّ بين جميع الأحياء؛ كونها تتألَّف من منظومةٍ متكاملةٍ هي الخلية، وثمَّة تدرُّج في درجة التعقيد؛ فثمَّة مجاميعُ من الأحياء تتألَّف من خلايا مفردةٍ بسيطة التركيب؛ حيث لا تمتلك عُضيَّاتٍ خلوية؛ مثل النواة والميتاكوندريا وأجسام كولجي والبلاستيدات وغيرها. هذه الأحياء تتمثَّل بالأحياء البدائية النواة؛ البكتيريا والأركيا. والمجاميع الأخرى من الأحياء والتي تُسمَّى بالأحياء الحقيقية النواة خلاياها أكثر تعقيدًا وتطورًا؛ حيث تمتلك عُضيَّاتٍ خلويةً ويُمكِن أن تكون أحاديةَ الخلية أو بمجاميعَ متشابهةٍ من الخلايا المتجمِّعة، أو عديدةَ الخلايا صغيرةً لا تُرى بالعين المجرَّدة ولا تمتلك أنسجة، إلى الكبيرة المؤلَّفة من أنسجة وتزن مئات الكيلوغرامات أو الأطنان؛ كالنخيل والأشجار والحيتان. لكن حين البحث عن أزمان ظهور هذه المجاميع المختلفة من الأحياء نجد تفاوتًا كبيرًا؛ فحسب المعطيات الجيولوجية وتحليل الافتراق الجُزيئي للنمو التطوُّري للأركيا، يمكن أن تكون الحياة قد بدأَت قبل ٤,١–٤,٢ مليار سنة (Kitadai & Maruyama, 2018).

وحسب الباحثين فإن الحياة تتضمَّن الوظائف الثلاثة التالية: (١) التحاوز (Com-partmentalization) ويتضمَّن تجميع المكوِّنات وتمييزها عن البيئة. (٢) التضاعُف

ويتمثَّل في معالجة ونقل المعلومات الوراثية إلى الذرية. (٣) الأيض ويشتمل على الحصول على الطاقة والمواد والبقاء بعيدًا عن حالة التوازن الحراري. هذه الوظائف تتم بواسطة بوليمراتٍ حيوية؛ فالتحاوز يتم بواسطة الشحوم الفوسفاتية، وهي تتألَّف من أحماضٍ دهنيةٍ مؤسترة بجُزيئةِ فوسفات الكليسرول. والتضاعُف يتم بواسطة جُزيئات DNA وRNA المؤلَّفة من نكليوتيداتٍ مترابطة، والتي بدَورها تتألَّف من جُزيئة سكَّرٍ خماسيٍّ مع جُزيئة فوسفات وقاعدةٍ نووية. والأيض يُنجز بواسطة البروتينات، وهي بوليمرات من جُزيئات الأحماض الأمينية (شكل ١٥-١). إن هذه المكوِّنات يُفترَض أن تكون قد تكوَّنَت وتبلمرَت بدايتها بطرقٍ غير أحيائية.

إن أول محاولةٍ علميةٍ زائفة لتفسير نشوء الحياة، كانت نظرية النشوء التلقائي (Spontanous generation) التي قالت بنشوء المادة الحية والكائنات الحية بصورةٍ تلقائيةٍ ومفاجئة من موادَّ غيرِ حية. ومن تجاربها «العلمية» هي نشوء الديدان والحشرات من عصير المواد السكَّرية أثناء عمل الخل، أو ظهور فأر في غرفة لم يكن فيها سوى خبز مثلًا وغير ذلك. سادت هذه النظرية لمئات السنين.

ومع ولادة العلوم الحديثة في أواسط القرن السادس عشر عمل العديد من الباحثين وعلى مدى عشرات السنين، إلى تفنيدِ ودحضِ نظرية النشوء التلقائي ومن بين أبرزهم Francesco Redi سنة ١٦٦٨م، وLazzaro Spallanzani سنة ١٧٦٥م. وفي سنة ١٨٠٦م عمل Berzelius ببلورة علم الكيمياء العضوية وإطلاقه ما عُرف بالمبدأ المركزي في الكيمياء والقائل «إن تكوين المركَّبات العضوية من المركبات اللاعضوية لا يمكن أن يتم خارج الكائنات الحية.» وتكلَّلَت أعمال هؤلاء العلماء بتجاربِ لويس باستور سنة ١٨٦١م، التي لا تقبل الشك بتسخين (تعقيم) مرقٍ مُغذٍّ في دورق غليان ذي نهايةٍ مُعوجَّة يسمح بخروج الغازات دون دخولها من الخارج، ولم تتكوَّن أية أحياءٍ داخل الدورق مهما ترُكَت بعد غليانها. تجاربُ باستور صارت تقنيةً تُستخدم حتى الوقت الحاضر في تعقيم المواد الغذائية؛ والتي تُعرف بالبسترة التي اشتُق مصطلحها من اسم هذا العالم الفذ. قادت تجارب باستور إلى ظهور المبدأ المركزي في البيولوجيا وهو «أن الحياة تنشأ من الحياة» والتي طُوِّرَت واستمرَّت حتى الوقت الحاضر فيما يُعرف بنظرية الخلية، والتي تقول بنشوء الخلية من خليةٍ سابقةٍ لها.



شكل ١٥-١: التراكيب، المكوِّنات والمسارات التخليقية غير الأحيائية للجُزيئات البيولوجية الضخمة والتي تقوم بوظائف الحياة الأساسية الثلاثة (التضاعُف والتحاوُز والأيض). عن: Kitadai & Maruyama (2018).

(٣-١) نشوء المواد العضوية Origin of Organic Matter

تجارب الكيميائي الفرنسي المعروف لوفازيه، والتي دفع حياته ثمنًا لها، أثبتَت أن أجسام الأحياء تتألَّف من العناصر الكيميائية ذاتها التي تتشكَّل منها المواد غير الحية. ونجاح عددٍ من الباحثين في تكوين مركَّباتٍ عضويةٍ من مركَّباتٍ لا عضوية مهَّد لبحث مسألة نشوء المادة الحية من موادَّ غيرِ حية؛ فقد حضَّر F. Wöhler سنة ١٨٢٨م، اليوريا $CO(NH_2)_2$ من سيانايت الأمونيوم NH_4OCN دون الحاجة إلى كُلْية الحيوان حسب تعبيره. كان عمل Wöhler أوَّل تحضيرٍ لمركَّبٍ عضويٍّ من مركَّبات لا عضوية، وأشَّر للتقدُّم الكبير في الكيمياء العضوية التي لعبَت دورًا مفتاحيًّا في فهم البيولوجيا. وحُضِّر حامضُ الخليك Ch_3COOH من ثاني كبريتيد الكاربون CS_2 من قِبل H. Kolbe سنة ١٨٤٥م. وفي سنة ١٨٥٠م تمكَّن Adolph Strecker من تخليق الحامض الأميني Alanine من مزيج الأستالديهايد والأمونيا وسيانيد الهيدروجين. وتم تحضير عددٍ من الهيدروكاربونات من قِبل D. Mendeleev سنة ١٨٧٧م، والعديد من المركَّبات العضوية من قِبل M. Berthelot في النصف الثاني من القرن العشرين. كما قام عددٌ من الباحثين؛ مثل Walther Löb وOskar Baudish بتخليق أحماضٍ أمينيةٍ بتعريض فورمامايد ($CHO-NH_2$) رطب للتفريغ الكهربائي والأشعة فوق البنفسجية (Lazcano, 2010). قاد ذلك إلى بروزِ أفكارٍ لا ترى فرقًا جوهريًّا في التركيب الكيميائي بين المواد العضوية والمواد اللاعضوية، وأن المواد العضوية يمكن أن تنشأ من تفاعل مواد لا عضوية، كما أن الكائنات الحية تتكوَّن من العناصر الكيميائية نفسها التي تتكوَّن منها المواد غير الحية. وهكذا صارت الكيمياء العضوية تُعرف بكيمياء مركَّبات الكاربون (Domingo, 2020).

تلك الجهود كانت بمثابة ضياءِ فجرِ ما صار يُعرف اليوم بكيمياءِ ما قبل الحياة (Prebiotic chemistry). غير أن الباحثين حينها لم يكونوا مهتمين بكيفية بدء الحياة على الأرض أو تخليق المركَّبات العضوية في ظروف المناخ البدائية؛ فقد كانوا يعتقدون أن الأحياء الأوائل كانت ذاتيةَ التغذية شبيهةً بالنباتات، ولم يكن تكوين المركَّبات العضوية من المركَّبات اللاعضوية متطلبًا أساسيًّا لظهور الحياة.

سنة ١٨٥٩م، ظهر كتاب أصل الأنواع (On the origin of species) أو بصيغته الكاملة: «حول أصل الأنواع بواسطة الانتخاب الطبيعي أو حفظ السلالات المفضَّلة في الصراع من أجل البقاء» لجارلس دارون، وكان أول أطروحةٍ علميةٍ مستندة إلى الملاحظات والقياسات والتجارب تفسِّر التنوع الأحيائي على أساس التغيُّر ودور الطبيعة في انتخاب

الأنواع الأكثر أهليةً للتكيُّف مع البيئة المتغيِّرة. ورجَّح دارون أن تكون الحياة قد نشأَت في بركةٍ صغيرةٍ حارة. كما أوضح أن الأحياء نشأَت من أصلٍ مشترك، وحصلَت الاختلافات عَبْر عملية تفرُّعٍ تطوري. هذه الفكرة الخلَّاقة لدارون ستكون الحجَر الأساس لعلم الحياة، بل ستكون منهج تفكيرٍ لتفسير تطوُّر الكون من خلال الدارونية العامة (Universal Darwinism) والدارونية الكمومية (Quantum Darwinism).

وفي سنة ١٨٧١م، تبنَّى Lord Kelvin فكرةَ ورود الحياة إلى الأرض من الفضاء بهيئةِ حيوةٍ كونية (Cozmozoa) والتي طُوِّرَت فيما بعدُ إلى ما صار يُعرف بالبذرة الكونية (Pansperma). وهذه الفكرة مبنيةٌ على عدم قدرة ملاحظة نشوء الحياة على الأرض؛ وبالتالي إمكانية نشوئها في مكانٍ آخرَ في الكون، ووصولها إلى الأرض بواسطة نيزك، وتمكُّنها من التكاثُر على الأرض. إن هذه النظرية حتى وإن لم تكن مستحيلةً فإنها لا تفسِّر كيفية نشوء الحياة من عناصرَ غيرِ حية.

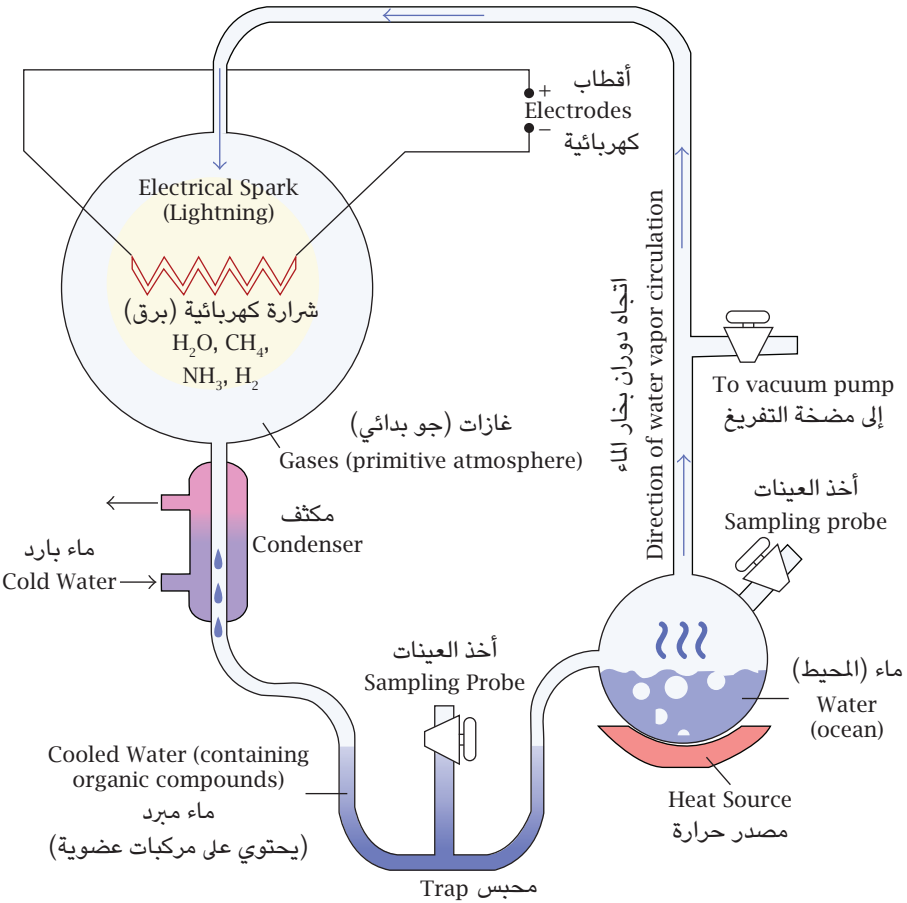
توالت محاولاتُ تحديد الأشكال الأولى للحياة على الأرض، فتم اقتراح البروتوبلازم الأوَّلي ثم الإنزيم وكذلك الجين. سنة ١٩١٧م اكتشَف Felix D'Herelle «مادة» تتضاعف ذاتيًّا وتمر عَبْر المرشِّحات وتتمكَّن من مهاجمة وتحليل البكتيريا العصوية. فيما بعدُ شُخِّصَت هذه على أنها فايروساتٌ بكتيرية (Bacteriophages) وافتُرِضَت على أنها جسيماتٌ تحت مجهرية يمكن أن تكون كائناتٍ بدائية. لكن أنضج فرضيةٍ كانت قد بُلوِرَت من قِبل الباحث الروسي أوبارين Alexander Ivanovich Oparin والباحث الإنكليزي هالدن J. B. S. Haldane كلٌّ على انفراد. هذه الفرضية انطلقَت من نظرية التطوُّر لدارون؛ حيث افترضا أن جو الأرض البدائي كان غنيًّا بالهيدروجين والميثان وبخار الماء، وعند تعرُّضه للبرق وللإشعاع الشمسي أو حرارة البراكين تكوَّنَت مركَّباتٌ كاربونيةٌ بسيطة. مع الزمن تراكمَت هذه المركَّبات في المحيط القديم لتكون حَساءً عضويًا مخففًا ظل يُرجُّ في الماء على ملايين السنين لحين تكوُّن تشكيلاتٍ من جزيئاتٍ قادرةٍ على مضاعفة نفسها، وتطوَّرَت عَبْر الانتخاب الطبيعي. إن أفكار أوبارين عرضَها في كتابٍ عنوانه أصل الحياة سنة ١٩٢٣م، وتبنَّى سنة ١٩٢٤م فكرة نشوء الحياة من بروتوبلازم أوَّلي، لكنه افترض حصولَ عملياتِ تكوينِ مركَّباتٍ عضويةٍ من موادَّ لا عضوية بتكرارٍ وعلى مدةٍ زمنيةٍ طويلة أدَّت إلى تراكُم ما صار يُعرف بالحَساء البدائي (Primitive soup). وحسب أوبارين فإن الكائنات الحية البدائية نشأَت في بيئةٍ لا هوائية (خالية من الأوكسجين) حيث كانت تسود الأرض ولا بد أن تكون بكتيريا غيرية التغذية (تعتمد على

المواد العضوية). ومن العوامل التي يمكن أن تدعَم فرضية أوبارين هو امكانية تراكُم المواد العضوية، بسبب الجو المختزل الذي لا يفكّك هذه المواد وغياب الأحياء التي يمكن أن تُحلِّلها. وكان أوبارين من المتحمسين لفكرة التطوُّر الداروني. واعتقد J. B. S. Haldane (١٩٢٩م) أن الفايروسات ربما تكون مثَّلت مرحلةً وسطيةً في الانتقال من الحَساء البدائي إلى الخلايا الغيرية التغذية الأولى. هذه العملية برأيه ربما استغرقَت ملايين السنين. وأصدر أوبارين كتابًا ثانيًا عن أصل الحياة سنة ١٩٣٨م، برؤيةٍ أكثر تكاملًا، مُشدِّدًا على دور القُطيرات الصغيرة في الحَساء البدائي، والتي تحمل شحناتٍ مختلفة ويمكن أن تحتجز مركَّباتٍ عضوية.

بعد ١٠ سنوات من ظهور كتاب أوبارين الثاني، حاول Melvin Calvin محاكاة الطبيعة الأولية للأرض في تخليق المركَّبات العضوية باستخدام مصادر إشعاعٍ عالية الطاقة لمحاليل ثاني أوكسيد الكاربون، وتمكَّن من الحصول على حامض الفورميك فقط، وإن كان بتراكيزَ عالية. في تلك الأوقات ظهر Harold C. Urey الحائز على جائزة نوبل في الكيمياء لاكتشافه الديتيريوم نظير الهيدروجين وذي النظرة الإنسانية اليسارية، والذي كان يعتقد أن جو الأرض البدائي كان يتألَّف من الميثان والأمونيا بدل ثاني أوكسيد الكاربون والنتروجين. وسنة ١٩٥١م ألقى Urey سيمنارًا عن نشوء النظام الشمسي، مشيرًا إلى أن الجو عالي الاختزالية للأرض كان مهمًّا لنشوء الحياة. وفي كتابه الكواكب (The Planets) الصادر سنة ١٩٥٢م، أورَد افتراضًا بأن لو كان نصف الكاربون السطحي الحالي متوفرًا بشكل مركباتٍ عضويةٍ ذائبة و١٠٪ فقط من ماء المحيطات الحالية موجود على سطح الأرض البدائية، حينها ستكون المحيطات محتوية على ١٠٪ تقريبًا محلول مركَّباتٍ عضوية، وسيكون ظرفًا مناسبًا لنشوء الحياة.

لقد حفَّزَت أفكار Urey الخرِّيج الحديث Stanley L. Miller، وبعد فترة ليست بعيدةً اقترح على أستاذه Urey أن يُجري تجربةً لاختبار فرضية أوبارين باستخدام جهازٍ يحاكي فيه جو الأرض البدائي، وطاقة البرق (شكل ١٥-٢). تضمَّنَت التجربة مزيجًا من عناصر الهيدروجين والأوكسجين والنتروجين والكاربون بشكل غاز الهيدروجين والأمونيا والميثان والماء الذي يمثل المحيط، وهي تشكِّل مزيجًا مختزلًا، وزوَّدها بمصدر طاقةٍ بما يُحاكي البرقَ عن طريق التفريغ الكهربائي، كما أوصل الماء في البداية إلى درجة الغليان لينتج بخار الماء. بعد أسبوعٍ تكوَّن مزيجٌ من بعض الأحماض الأمينية؛ مثل الكلايسين بنسبة ٢٪، والألينين بنسبة ١٪ من كاربون الميثان، إضافة إلى كميات قليلة

من حوالي ٢٥ حامضًا أمينيًّا، وعددٍ من الأحماض العضوية. وتكوَّنَت الكثير من المركَّبات الكاربونية المعقَّدة بشكل موادَّ قطرانية ما يمكن أن يعرقل تكوين الببتيدات والبروتينات من الأحماض الأمينية والسكَّريات والأحماض النووية تحت ظروف التجربة.



شكل ١٥-٢: رسمٌ تخطيطيٌّ لتجربة Miller–Urey حيث تم تحضير أحماضٍ أمينيةٍ وغيرها من المركَّبات العضوية بطريقةٍ غيرِ أحيائية (بغياب كائناتٍ حية). تمَّ تعريض مزيجٍ من غازات الهيدروجين والأمونيا والميثان مع الماء في جهازٍ مغلَق، وعرَّضَه لمدة أسبوع للتفريغ الكهربائي الممثِّل للبَرق. عن: YassineMrabet, Wikimedia Commons.

إن تجربة Miller–Urey كانت رائدة، وأول محاولةٍ علميةٍ رصينة لاختبار فرضية أوبارين عن إمكانية نشوء الحياة عَبْر تكوين المواد العضوية وتعقُّدها، ونشوء المنظومات الأولية القادرة على الأيض والتكاثر، وإن لم تنتُج مثل هذه المنظومات في التجربة. بالتأكيد زمن التجربة يمثِّل لحظةً خاطفةً مقارنةً مع الزمن الطويل الذي ربما استغرق ملايين السنين في عملية النشوء الطبيعي، كما أن محاكاة ظروف نشوء الحياة الطبيعية مختزلة جدًّا؛ حيث لم يكن بالإمكان توفير تفاصيلَ كثيرة قد تكون ضرورية لتفاعلات نشوء الحياة. مع ذلك، ألهمَت التجربةُ الكثيرَ من الباحثين، لاختبار موادَّ وظروفٍ مختلفة، واستمرَّت المحاولات حتى الوقت الحاضر بكشف أدوار موادَّ وظروفٍ جديدة دون الوصول إلى منظومة أوبارين (Miller, 1984; Kalson *et al.*, 2017; Glavin *et al.*, 2020; Ghoshal *et al.*, 2020).

(٣-٢) نشوء الجُزيئات الحيوية Origin of Biomolecules

لكن ما هي الإمكانات المتوفِّرة في الأرض وجوِّها البدائي لنشوء المركَّبات والجُزيئات الداعمة للحياة بطريقةٍ لا أحيائية؟ أي دون وجود أحياءٍ تكوِّنها. يستعرض الباحثان Kitadai & Maruyama (2018) أهميةَ وخواصَّ وطُرقَ تكوُّن العناصر والمركَّبات الكيميائية الأساسية لتكوين الأشكال الأولى للحياة في المختبر، وفي أجواء الأرض البدائية ومصادرها الفضائية.

(أ) النتروجين

النتروجين من العناصر الرئيسة التي تدخُل في تركيب الجُزيئات ذات النشاط البيولوجي، وتشمل البروتينات والأحماض النووية. ويمثِّل النتروجين العنصر الأكبر في مكوِّنات الهواء كما يُوجد في المياه. لكن هذا العنصر بصيغته الشائعة الغازية N_2، عنصرٌ خاملٌ كيميائيًّا، بسبب الآصرة الثلاثية القوية التي تربط ذرَّتَيه في الجُزيئة $N{\equiv}N$. ومن أجل أن يكون له دورٌ بيولوجيٌّ يتوجَّب تنشيطه من خلال تحويله إلى أيونات أمونيوم NH_4^+ أو نترات NO_3^-. هذا يعتمد على حالة الأكسدة للجو، فإذا كان الجو معتدل الأكسدة، مؤلَّفًا أساسًا من ثاني أوكسيد الكاربون والنتروجين، فإن العوامل الجيوكيميائية ستكون غاز أول أكسيد النتروجين؛ والذي يتحوَّل فيما بعدُ إلى نترات NO_3^- ونتريت NO_2^- ومن ثم تُختزل إلى أمونيوم NH_4^+. إضافةً إلى ذلك يمكن أن تتكوَّن أشكال النتروجين المختزلة بفعل

عواملَ جيولوجيةٍ وكيميائيةٍ مختلفة. كما يمكن أن تكون المصادر الفضائية موردًا لمثل هذه المركَّبات. لكن Ebisuzaki & Maruyama (2017) وMaruyama *et al.*, (2019) يعتقدون أن كسر الآصرة الثلاثية بين ذرَّتَي النتروجين، يمكن أن يكون قد تم بواسطة الأشعة المؤيِّنة غير الحرارية، والتي كانت تصدُر عن المفاعل النووي الطبيعي المكوَّن من عنصر اليورانيوم المشعِّ خلال العهد الجهنَّمي (Hadean Eon) قُبيل نشوء الحياة. هذا الإشعاع النووي يؤدي إلى تفكيك جُزيئة النتروجين والماء وثاني أوكسيد الكاربون؛ ما يسمح بتكوين المركَّبات العضوية المختلفة التي تكوِّن اللبنات الأساسية للحياة.

(ب) الفسفور

الفسفور عنصرٌ أساسيٌّ في تركيب وعمل الجزيئات الحيوية؛ كالأحماض النووية والشحوم الفوسفاتية والمساعدات الإنزيمية مثل NADPH والجُزيئات الخازنة للطاقة مثل ATP وغيرها. الفسفور هو العنصر الحادي عشر من حيث الوفرة في الأرض ويُوجد في الصخور بشكلٍ أساسٍ بهيئة أورثوفوسفات PO_4^{3-} تام الأكسدة. يُعتبَر الفسفور من العناصر المحدِّدة لنمو الأحياء بسبب أن الأورثوفوسفات قليلةُ الذوبان. بينما الفوسفايت يكون أكثر ذوبانًا، وأكثر نشاطًا كيميائيًّا، وتكوين مركَّباتٍ عضويةٍ فوسفاتية. إن آلية تكوين الفوسفايت تتم من خلال اختزال الفوسفات بتأثير البَرْق، وتعرية المعادن الفوسفايدية. وتُورِّد الكويكباتُ والنيازكُ هذه المعادن لسطح الأرض. وفي أجواء الأرض البدائية حيث وفرة الميثان والهيدروجين، يمكن أن تكون قد تكوَّنَت كمياتٌ مهمةٌ من الأشكال المختزلة من الفسفور.

(ج) الأحماض الأمينية

الأحماض الأمينية هي الوحدات البنائية للبروتينات، وعدد من الببتيدات ذات الأهمية البيولوجية الكبرى. والصيغة الفعَّالة بيولوجيًّا هي الأحماض الأمينية $L-\alpha-$.

في المُختبَر وفي جوٍّ عالي الاختزالية كما ذُكِر أعلاه في تجربة Miller-Urey تم تكوينُ عددٍ قليلٍ من الأحماض الأمينية، لكن في تجاربَ حديثةٍ لإعادة تحليل مستخلَص التجربة تم كشفُ وجود ٢٣ حامضًا أمينيًّا. التخليق الأفضل للأحماض الأمينية يتم من خلال تحوير تفاعُل Strecker الذي يبدأ من تكوين HCN والألديهايد من الطَّور الغازي ثم

تكثيفهما مع الأمونيا لتكوين a-aminonitriles في المحلول المائي. بعد ذلك يتم التحليل المائي لمجموعة النايترايل إلى مجموعة الكاربوكسيل لتكوين الأحماض الأمينية. تم كشف وجود أكثر من ٨٠ نوعًا من الأحماض الأمينية في متبقِّيات الشهب والنيازك الساقطة على الأرض من الفضاء. من بين هذه، ثمَّة ١٢ من الأحماض الأمينية المكوِّنة للبروتينات. إن احتمالية تكوين الأحماض الأمينية في المنظومات المائية الحرارية القديمة بتراكيزَ مهمةٍ تدعَم تطوُّر أشكال الحياة الأولى ضعيفة.

(د) الببتيدات

تكوين الببتيدات من الأحماض الأمينية يتطلَّب إزالة جُزيئات الماء من مجاميع الأمين والكاربوكسيل للأحماض الأمينية المتفاعلة:

$$-\mathrm{NH_3^+} + -\mathrm{OOC}- \longrightarrow -\mathrm{NHOC}- + \mathrm{H_2O}$$

وهكذا فإن تخليق الببتيدات في الماء غير مناسبٍ من حيث الحركية والديناميكا الحرارية.

أفضل نتائجَ لتكوينِ الببتيدات الطويلة كانت في تجاربِ محاكاة البراكين المائية الحرارية. يلعب المركَّب كاربونيل سلفايد COS والذي ينتُج من تفاعل أول أوكسيد الكاربون CO وكبريتيد الهيدروجين H_2S دورًا مهمًّا. يتفاعل COS مع مجموعة الأمين لحامضٍ أميني ليُكوِّن ثيوكاربونات، وهذا سيُنتِج α-amino acid Ncarboxyanhydride وهذا يتفاعل مع حامضٍ أمينيٍّ آخر ليُكوِّن ببتيدًا ثنائيًّا. كما يلعب COS دورًا مهمًّا في تكوين القواعد النووية. وهكذا يبدو أن العلاقة المعروفة في الوقت الحاضر بين الإنزيمات البروتينية وتضاعُف DNA/RNA ربما تعود إلى التطوُّر المتوازي في تكوين هذه المركَّبات عند نشوء الحياة.

درس Rousseau *et al.*, (2020) تكوينُ الأواصرِ الببتيدية بين جُزيئات الحامض الأميني β-alanine في ظروف الفضاء الخارجي؛ فقد تم تعريض تجمُّعاتٍ جُزيئيةٍ من الحامض الأميني لصدماتٍ بأيونات الهيليوم He^{2+} (جسيمات ألفَا) واطئة الطاقة بما يحاكي الرياح الشمسية، وتكوَّنَت ببتيدات بإزاحة جُزيئات الماء بضمنها ببتيداتٌ رباعية.

(هـ) سكَّر الرايبوز

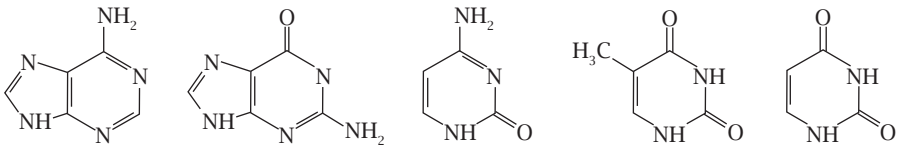
هذا السكَّر هو الجُزيئة المركزية في النكليوتيدة التي تؤلِّف جُزيئات RNA والرايبوز منقوص الأوكسجين يؤلِّف نكليوتيدات DNA. وهو سكَّرٌ خماسيُّ الكاربون يحتوي على مجموعة ألديهايد، ويُوجد في المحلول المائي بعدة صيغ؛ أهمها بيولوجيًّا β-D-furanose.

تكوين سكَّر الرايبوز لا أحيائيًّا يمكن أن يكون من خلال تفاعُلات بلمرة للفورمالديهايد Formaldehyde (H_2CO). لكن ثمَّة العديد من المشكلات تتعرَّض لها هذه العملية، مما يقلِّل من فُرص كونها هي المصدر لسكَّر الرايبوز في نشوء الحياة. وهكذا اتجهَت الأنظار إلى دور المحفِّزات في تكوين هذا السكَّر في ظروف الأرض البدائية، وكان المرشَّح الأقوى هو البورات BO_3^{-3}. ويمكن أن تلعب الببتيدات دورًا في ترجيح شكل D- على شكل L-. كما يمكن أن تكون بلورات بعض المعادن فعَّالةً في هذه المسألة، كما سيرِد ذِكره فيما بعدُ.

(و) القواعد النووية

القواعد النووية الأساسية تضم مجموعتَين هما: البيورينات (Purines) وتتألَّف الجُزيئة من حلقتَين مزدوجتَين، ومنها الأدنين (A)، والكوانين (G)، وكذلك البريميدينات (Pyrimidines) التي تتألَّف من حلقةٍ واحدة، ومنها السايتوسين (C)، والثيامين (T)، وكذلك اليوراسيل (U) (شكل ١٥-٣). القاعدتان النوويتان الأخيرتان شديدتا الشبه من بعضهما؛ حيث يكون الاختلاف فقط في أن U يفتقد مجموعة 5'methyl. القواعد النووية A وT وG وC تُوجد في الـ DNA، أما في الـ RNA فتُوجد ذات القواعد النووية عدا T حيث يُستبدل بـ U. يمكن أن تحتوي جزيئة الـ DNA بالإضافة إلى القواعد النووية الأربعة المذكورة على عشرات القواعد النووية المحوَّرة.

أول تحضير للأدنين تم سنة ١٩٦٠م، من قِبل Oro عن طريق تسخين NH_4CN المركَّز في ١٠٠م° لبضعة أيام وبتركيز ٠٫٥٪ من تركيز NH_4CN. وفي تجربة مماثلة تم تحضير G من المركَّب ذاته وبتسخين لدرجة ٨٠م° لمدة ٢٤ ساعة، ولكن بتركيزٍ أقل بكثيرٍ من تركيز A. هذه العملية تبدأ ببلمرة HCN. لكن هذه التفاعلات لا تُنتِج بريميدينات؛ بينما يمكن أن تنتج البريميدينات من منظومة Cyanoacetaldehyd-guanidine. ويمكن أن تتكون البيورينات والبريميدينات بتسخين الفورمامايد بدرجة ١٠٠–١٦٠م° بوجود



شكل ١٥-٣: تركيب القاعد النووية الأولية في جُزيئات DNA وRNA.

محفِّزاتٍ معدنية. تراكُم وبقاء هذه المركَّبات يتطلَّب بيئةً مختزلةً وذاتَ تركيزٍ عالٍ من HCN ومشتقاته. المصادر الفضائية تُظهِر وجود A وG وU ولكن بتراكيزَ ضئيلة، وهكذا لا تُرجِّح أن تكون مصدر هذه المركَّبات عند ظهور الحياة، مع ذلك فإنها تشير إلى إمكانية تكوُّنها تحت ظروفٍ جيوكيميائيةٍ معينة.

(ز) الأحماض الدهنية

الخلية الحية تُحاط بغشاءٍ دهنيٍّ يعمل كإطارٍ فاصلٍ بين الخلية والوسط الذي تعيش فيه، وهو غشاءٌ انتخابيُّ النفاذية حيث يسمح بمرور الجُزيئات الصغيرة غير المشحونة، ويُعيق مرور الجُزيئات الأخرى. كما يمكِّن من انقسام الخلية عند نموها، ويكوِّن جهد غشاءٍ كهربائي يُسهِم في تكوين جُزيئات ATP. الخلايا الحالية غشاؤها يتألف من طبقتَين من الدهون الفوسفاتية، والتي تُظهِر جهةً خارجيةً مستقطبةً محبةً للماء، وجهةً داخليةً غير مستقطبةٍ كارهةً للماء. لكنها تحتوي على العديد من البروتينات التي تنظِّم دخول وخروج الأيونات وجُزيئات الماء والجُزيئات المشحونة. هذه التركيبة لغشاء الخلية بتعقيدها الكبير، لا تصلح أن تكون الغشاء الدهني الذي أحاط بالخلايا البدائية، وإنما يمكن أن يكون مؤلَّفًا من أحماضٍ دهنيةٍ مزدوجة الحب للماء والكراهية للماء. ويمكن لهذه الأحماض الدهنية تحت ظروفٍ معينة، أن تتفاعل مع الكليسرول والفوسفات، لتتطور إلى دهونٍ فوسفاتية. من غير الواضح كيفية تُكوَّن هذه الأحماض الدهنية، لكنها يمكن أن تكون من مصادرَ أرضيةٍ أو فضائية.

في تجربةِ محاكاةِ ظروفِ تكوُّن جليد الغيوم الجزيئية لغازاتٍ ما بين النجوم أثناء تكوُّن الكواكب وسقوطها على الأرض بشكل مذنَّباتٍ ونيازكَ ثلجية، وباستخدام غازات بخار الماء، الكحول المثيلي، الأمونيا، وأول أوكسيد الكاربون بنسبة ١٠٠:٥٠:١:١ باستخدام

التبريد والأشعة فوق البنفسجية على التوالي وجد Dworkin *et al.*, (2001) تكوُّن مركَّباتٍ معقَّدة تمتلك حب وكراهية الماء مناسبة لنشوء الحياة، بما فيها القدرة على التنظيم الذاتي بشكل تراكيبَ حوصلية. استخدم Brea *et al.*, (2014) الربط الكيميائي المحلي Native chemical (ligation) المستخدم في تخليق الأحماض النووية والبروتينات، للتكوين السريع للدهون الفوسفاتية من أسترات الثيول. هذه الدهون الفوسفاتية تتشكَّل تلقائيًّا بهيئة حوصلات يمكن أن تنمو إلى قُطر بضعة ميكرومترات. وتمكَّن Hardy *et al.* (2015) من تصميم وتخليق أغشيةٍ اصطناعية؛ تتكوَّن من طبقتَين من الدهون الفوسفاتية تحتوي على محفِّزاتٍ ذاتية التضاعُف، مخلَّقة تتمكَّن من إدامة تكوين الغشاء. المحفِّزات تتمكَّن من تكوين الدهون الفوسفاتية التريوزولية ومحفِّزات التريوزول القصيرة السلسلة المرتبطة بالغشاء من موادَّ أوليةٍ بسيطة. هذه الأغشية المكوِّنة للحوصلات تُمكِّن من نمو الحوصلات.

(ح) النكليوتيدات

إن تكوين النكليوتيدات التي تكوِّن جُزيئات DNA وRNA، ربما يكون الأصعب في كيمياء ما قبل الحياة. وترجع الصعوبة في التكوين غير الأحيائي لهذه المركَّبات إلى أن الوحدات البنائية لها، وهي الرايبوز أو الرايبوز المنقوص الأوكسجين والقواعد النووية والفوسفات يجب أن تكون في المواقع المناسبة من حيث الترتيب الفراغي في تشكيل النكليوتيدة؛ فأولًا ينبغي أن يكون الرايبوز في الوسط المائي بصيغة β-D-furanose وهي أصلًا تكون بنسبةٍ قليلةٍ من بين الصيغ الحلقية والمفتوحة الأخرى. والقواعد النووية البيورينية يجب أن تستخدم ذرة النتروجين رقم ٩ في الجُزيئة، بينما البريميدينات يجب أن تستخدم ذرة النتروجين رقم ١ في الجُزيئة لتكوين أصرة C–N مع ذرة الكاربون رقم ١ في الرايبوز. كما أن التسخين البسيط للرايبوز والقواعد النووية يؤدي إلى تكوين العديد من الآيزوميرات.

ومع نجاح العديد من التجارب المختلفة في محاكاة تخليق النكليوتيدات، إلا أن الحصول عليها يؤدي إلى تكوين مزائجَ معقَّدة يكون فيها المركَّب المطلوب، جزءًا صغيرًا فقط. إلا إذا كانت الظروف المختلفة البدائية وتقلُّباتها قد تمكَّنَت من التغلُّب على العديد من المشاكل التي تعتري تكوينها، كما تُظهِر تجاربُ المحاكاة المختَبرية. وفي تجاربَ متأخرةٍ تمكَّن باحثون من تخليق نكليوتيدات بريميدينية ليس من الرايبوز والقواعد النووية، وإنما من مركَّباتٍ أبسط؛ مثل Glycolaldehyde وGlyceraldehyde وCyanamide وCyanoacetylene والفوسفات. هذه الطريقة يمكن أن تتخلَّص من العديد من المشاكل التي تعترض تكوين النكليوتيدات مباشرةً من الرايبوز والقواعد النووية.

(ط) سلاسل النكليوتيدات الصغيرة

إن بلمرة النكليوتيدات في الماء غير مناسبةٍ من الناحية الحركية والديناميكا الحرارية. وهكذا صار البديل هو البلمرة من خلال التسخين الجاف للنكليوتيدات في درجاتِ حرارةٍ عاليةٍ أكثر من ١٠٠م° والمزج مع عواملَ عضويةٍ منشِّطة؛ مثل السيانامايد والكاربودايامايد الذائبة في الماء. لكن هذه المحاولات لم تفلح إلا في تكوين نكليوتيداتٍ ثنائيةٍ بكمياتٍ مقبولة.

تم تحقيق نجاحٍ جيدٍ باستخدام النيوكليوسيد 50-phosporimidazolides بوجود الأيونات Pb^{+2} وUO_2^{+2} حيث تم الحصول على نكليوتيدات في المحلول المائي مؤلَّفة من ١٦ وحدة و١٧ وحدة وبنسبة ٩٠٪. يمكن الحصول على المركَّب النيوكليوسيد 50-phosporimidazolides من الأميدازولات ونيوكليوسيد ٥٠ متعدد الفوسفات في ظروفٍ جافة، والتي يُعتقَد بوجودها في ظروف الأرض البدائية. البوليمرات المكوَّنة من وحداتٍ منشطة، تُنتِج مزيجًا عشوائيًّا من ٢٠–٥٠، ٣٠–٥٠ و٥٠–٥٠ آصرة منها البوليمرات ٣٠–٥٠ آصرة ذات أهميةٍ بيولوجية. وجد بعض الباحثين طبقات من الدهون تُعجِّل بقوة بلمرة 50-mononucleoside phosphates (AMP وUMP) خلال دوراتٍ من إضافة الماء وإزالة الماء. تم تحضير بوليمرات مؤلَّفة من ٢٥–١٠٠ نكليويدة مع ٣٠–٥٠ و٢٠–٥٠ آصرةً عشوائية. إن تكوين حُويصلات من الأحماض الدهنية يُحفز بواسطة Montmorillonite وتتمكَّن الحُويصلات من الإحاطة بدقائقَ طينيةٍ مدمصة لسلاسلَ نيوكليوتيدية. حيث إن هذه الحالة يمكن أن تكون ٣٠–٥٠ من الأواصر الفوسفاتية الثنائية الأسترة، فإن البلمرة على Montmorillonite ومن ثَم حصرها ضمن حويصلاتٍ غشائية يمكن أن توفِّر سلاسلَ قصيرةً من النكليوتيدات بأطوال وترتيبٍ جُزيئيٍّ مناسب لبدء منظومةٍ قادرةٍ على التضاعُف.

(٣-٣) دَور الديناميكا الحرارية في نشوء الأشكال الأولى للحياة

Role of Thermodynamics in Origin of Primitive Living Forms

الحياة نشأَت على الأرض بعد حوالي مليار سنة من تكوُّن الكوكب؛ حين برَدَ ووصلَت درجة الحرارة حوالي ١٠٠م°. والبيئات المرشَّحة لنشوء الحياة هي البُحيرات الضحلة الحارة حسب تصوُّر جارلس دارون، أو البرك الطينية البركانية على السطح أو الدخانيات المائية الحرارية في أعماق المحيطات حسب الكثير من الباحثين. في جميع الحالات العوامل

الفاعلة في هذه البيئات تتمثَّل بالرواسب الطينية والصخور وما تحتويه من معادن والماء والحرارة وضوء الشمس وغازات النتروجين وأكاسيد الكاربون والميثان على السطح، بينما يُوجد إضافةً إلى ذلك الضغطُ العالي في أعماق المحيطات.

وحسب England (2013) فإن الديناميكا الحرارية تدفع باتجاه نشوء وديمومة الأشكال الحية من حيث قدرة بعض التجمُّعات الجُزيئية العضوية وتحت ظروفٍ مناسبةٍ على قنص الطاقة بفاعليةٍ أكبر وتبديد جزءٍ منها بشكل حرارة تماشيًا مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية؛ فهناك طرقٌ كثيرةٌ يمكن فيها للطاقة أن تتبدَّد، لكن طرق تركُّزها أقل كثيرًا. وهكذا ينشأ التعقيد في المادة الحية عن طريق تخفيض الإنتروبي فيها وتصديره إلى البيئة. إنها تفعل ذلك كونَها منظوماتٍ معقَّدةً مفتوحةً بعيدة عن حالة التوازن، ولو كانت منظوماتٍ مغلقةً فإن نشوء جُزيئاتٍ معقَّدةٍ لا يلبث أن يتفكَّك بتفاعُلاتٍ عكسية، لتحصُل حالة التوازن ويزداد الإنتروبي. وباشتقاق معادلاتٍ رياضيةٍ بيَّن الباحث أن تضاعُف الجُزيئات الوراثية مثل الـ DNA وكذلك انقسام الخلايا (خلايا البكتيريا)، هو جزءٌ مهمٌّ من عملية تخفيض الإنتروبي. إن هاتَين العمليتَين غير عكسيتَين؛ فالخلية يمكن أن تنقسم إلى خليتَين لكن لا يمكن للخليتَين الوليدتَين من أن تتحدا لتكوين خليةٍ واحدة. وقد بيَّن باحثون حصول حالة التضاعُف في المنظومات غير الحية أيضًا؛ فقد ذكَر Marcus *et al.*, (2013) تكاثُر الدوَّامات في السوائل المضطربة تلقائيًّا، وبصورٍ دائميةٍ بتأثير الطاقة من السائل المحيط الهائج. وكذلك قدَّم Zeravcica & Brenner (2014) نماذجَ نظرية ومحاكاة لكراتٍ مجهريةٍ موسمة بلواصقَ تتمكَّن من التضاعُف الذاتي عن طريق تبديد الطاقة بربط الكرات القريبة؛ حيث تكوِّن تجمُّعاتٍ متماثلة ثمانية الأوجه بمساعدة محفِّز من كرتَين. هذه الحالات في النماذج غير الحية تدعم نظرية England في تفسير تضاعُف الخلايا الحية؛ فعملية تخفيض الإنتروبي يمكن أن تتم بفقدان الحرارة والمواد الزائدة من ناحية وتكوين موادَّ معقَّدةٍ جديدةٍ منخفضة الإنتروبي، والتي تؤدي إلى النمو وكذلك انقسام الخلية الذي يمكن أن يكون عاملًا مهمًّا في تخفيض الإنتروبي. وينبغي ملاحظة أن نمو المنظومة الحية (الخلية) يؤدي إلى زيادة الجهد الأزموزي ودخول مزيد من جُزيئات الماء، وحصول ضغط امتلاءٍ يُنتِج زيادة الحجم الذي يحفِّز على الانقسام. وهكذا فإن تخفيض الإنتروبي بتكوين موادَّ جديدةٍ (حصول النمو) وانقسام الخلية يتم بفعل الديناميكا الحرارية ومحافظة الخلية على حالة البقاء بعيدًا عن حالة التوازن. وفي تقديري، فإن هذه الفكرة تقدِّم تفسيرًا فيزيائيًّا أساسيًّا لعملية تضاعُف منظومات

التفاعُل والخلايا. وحسب Adamski *et al.*, (2020)، فإن المنظومات الحية تُعاني عمليات التضاعُف والتحلُّل المتكرِّرة وغير المتعاكسة كونَها منظوماتٍ بعيدةً عن حالة التوازن. هذه العمليات تسير بواسطة الإدخال المستمر للمواد والطاقة؛ ما يؤدي إلى حصول حالةٍ حركيةٍ مستمرة بعيدة عن حالة التوازن.

تتميَّز المنظومة المفتوحة البعيدة عن حالة التوازن، بقدرتها على تصحيح الأخطاء. والأخطاء هنا يُقصَد بها كل ما يمكن أن يسبِّب ضررًا في ديمومة الفعاليات الحيوية للمنظومة البيولوجية؛ كزيادة الإنتروبي وضوضاء البيئة التي يمكن أن تسبِّب فك التماسُك الكمومي لبعض العمليات الحيوية. هذه الخاصية التي تُميِّز المنظومات الحية تتوضَّح عند موت المنظومة حيث تفشل في التخلُّص من الإنتروبي، ويبدأ التحلُّل خلال ساعات (Briegel & Popescu, 2014).

إن نشوء الأشكال الأولى للحياة تطلَّب حسب Hazen (2012) إنجاز أربعِ مراحلِ انبثاقٍ متتالية؛ انبثاق الجُزيئات الحيوية، وانبثاق منظومات الجُزيئات الحيوية بترتيبٍ خاص، وانبثاق منظوماتٍ جُزيئيةٍ متضاعفة، وانبثاق الانتخاب الطبيعي.

(أ) انبثاق الجزيئات الحيوية

لكي تتكوَّن جزيئاتٌ حيوية (Biomolecules) مثل السكَّريات البسيطة التي تكوِّن الكاربوهيدرات المعقَّدة أو تدخُل في بناء وحدات الأحماض النووية والأحماض الأمينية، وهي الوحدات المكوِّنة للبروتينات والأحماض الدهنية التي تكوِّن الشحوم، والقواعد النووية التي تدخُل في بناء الأحماض النووية وغيرها، لا بُد من حصول التعقيد؛ أي تكوين مثل هذه المركَّبات التي هي بدرجاتِ تعقيدٍ مختلفةٍ نشأَت من مركَّباتٍ أبسط؛ مثل H_2، Co_2، Co، H_2o، N_2 إلخ. التعقيد يعني زيادة المعلومات التي تمتلكها الجُزيئات. لا يمكن تكوين التعقيد (الغنى في المعلومات) في منظومةٍ صغيرةٍ جدًّا (وحدة الخلية البدائية) حيث تتجمَّع فيها معلوماتٌ هائلةٌ من البيئة، ما لم تكن البيئة المحيطة معقدة؛ حيث ستُولِّد ضغطًا انتخابيًّا لتحقيق ذلك. كيف يتبدى التعقيد في البيئة: التدرج (في درجات الحرارة والمكوِّنات والتراكيز) وتوالي الدورات (حار-بارد، رطب-جاف، ضوء-ظلمة، مد-جزر) والتدفُّقات (تدفُّق السوائل من مكان من البيئة إلى آخر وتدوير المواد) والسطوح البينية (سطوح معدنية ملامسة للماء، سطوح الماء الملامسة للهواء وسطوح دقائق الغبار الملامسة للهواء

الجوي)، ثم التعقيد الكيميائي الذي تكون قد وفَّرَته كيمياء التربة، الذي يتضمن مئات العناصر المعدنية الكبرى والصغرى. تكوين المركَّبات الكيميائية في ظروف كهذه سهلة، وتكون بأعدادٍ هائلةٍ لكنها غير مميزة. والتجارب المختبرية المحاكية لظروف نشوء الحياة، بيَّنَت كم من المركَّبات العضوية الممكن تكوُّنها.

إن أبسط المنظومات البيولوجية الأولية التي تتميَّز بالقدرة على التضاعُف تتألَّف كما هو متصوَّر، من وسطٍ مائيٍّ يحتوي على موادَّ قابلةٍ للتفاعُل، وتفاعُلاتٍ كيميائية ذاتية التضاعُف محاطةٍ بغشاء يفصلها عن الوسط المحيط. لكن كيف يمكن أن تنشأ مركَّباتٌ متزايدةُ التعقيد في المحلول المحتوي على الكثير من المركَّبات الكيميائية المختلفة. المعروف أن المنظومة المعزولة المحتوية على جزيئاتٍ مختلفةٍ وهي تخضع لقوانين الديناميكا الحرارية، لن تسمح بتكوينِ أيةِ تراكيبَ معقَّدة مستقرة؛ بسبب التصادم المتواصل من الجُزيئات المختلفة؛ حيث تنتهي المنظومة إلى حالة التوازن الذي يترافق مع إنتروبي أقصى. لكن لو حصلَت هذه المنظومة على مصدرٍ خارجي للطاقة يُبقيها بعيدًا عن حالة التوازُن، يُمكِن للمركَّبات الأعقد أن تتشكَّل وتبقى دون أن تتفتَّت بفعل التصادُمات الناتجة عن الحركة العشوائية لجُزيئات الوسط (Kaplan, 2016). وتتصف المنظومة الحية بالتحولات المستمرة لمكوِّناتها المِجهَرية الفيزيائية والكيميائية، وبذلك فإن المنظومات البيولوجية هي في الغالب الأعم ذات طبيعةٍ بعيدةٍ عن حالة التوازن مع البيئة (Viand *et al.*, 2020; Adamski *et al.*, 2020).

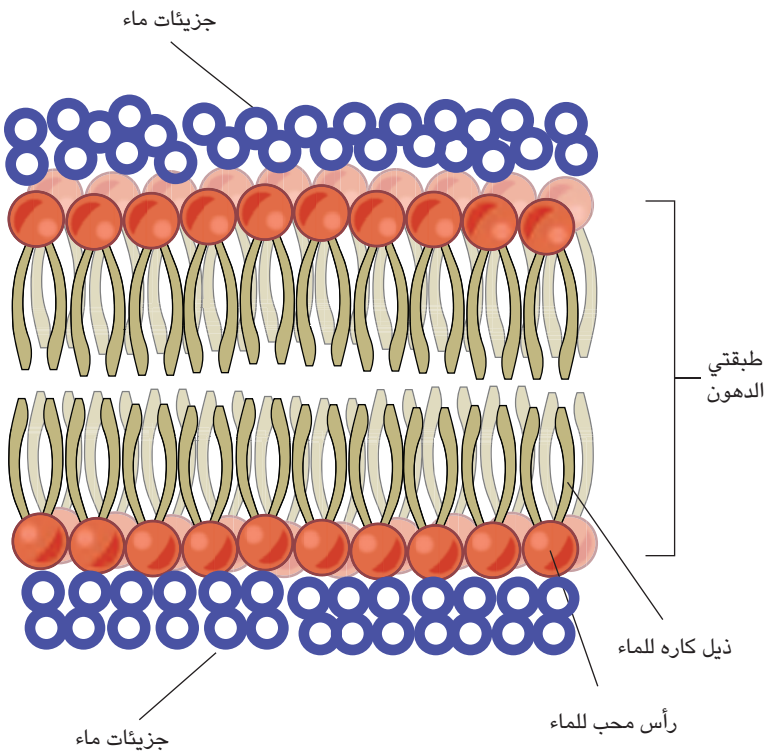
في المنظومات البيولوجية المتطورة الحالية، تحفِّز التفاعلات الكيميائية التي تشكِّل الأيض بواسطة إنزيماتٍ عاليةِ التطور. والإنزيم كما أشرنا في الفصل السابع، يتألَّف من بروتين وعاملٍ مساعد (Cofactor). لكن العديد من التفاعُلات البيولوجية يمكن أن تحفَّز بواسطة عناصر لا عضوية بمفردها. كما أن العديد من الإنزيمات الحديثة ما زالت تستخدم العناصر اللاعضوية كعواملَ مساعدة. وهكذا يمكن القول إن هذه العناصر اللاعضوية قد لعبَت دَور المحفِّز للتفاعلات الكيميائية في بداية نشوء الحياة وهي متوفرةٌ في تلك الظروف. ومع الإقرار بأن القدرة التحفيزية لهذه العناصر اللاعضوية، هي أقل بكثيرٍ مما تقوم به الإنزيمات، لكنها بالتأكيد كانت أفضل من حصول التفاعلات تلقائيًّا ببطء دون تحفيز. إضافةً إلى ذلك، فإن العناصر المعدنية يمكن أن تحفِّز عدة تفاعلات مختلفة؛ فهي أقل خصوصية مقارنة بالإنزيمات. وهكذا فإن مجموعات التحفيز الذاتي الأولية يمكن أن تكون قد نشأَت باستخدام العناصر المعدنية كمحفِّزاتٍ لتفاعُلاتها

الكيميائية. هذا ربما فتح المجال أمام تكوين مركَّباتٍ عضويةٍ معقدة أكثر قدرةً تحفيزية أو أن بعضها استخدم العناصر المعدنية كعوامل مساعدة زاد من كفاءتها وخصوصيتها، وهكذا مرَّت العملية بسلسلةٍ من التعقيد والتطوُّر وصولًا إلى ما يُشبِه شبكات الأيض الحديثة (Hordijk & Steel, 2018).

يرى باحثون ثمَّة ثلاثةَ خطوطٍ بحثيةٍ تشير إلى أن الضغط العالي يمكن أن يكون قد لعب دَورًا مؤثِّرًا في نشوء الحياة؛ اكتشاف الحياة الكثيفة في بيئات الضغوط العالية؛ بما فيها أعماق المحيطات، والدخانيات المائية الحرارية، والصخور القشرية، وزراعة الأحياء الدقيقة تحت ظروف الضغوط العالية، تبين وجود أحياء متحملة للضغط (Barotolerent) وأخرى محبة للضغط (Barophilic)، وتجارب تحضير المركَّبات العضوية تحت الظروف المائية الحرارية والضغط العالي، تكشف عن آليات تفاعلاتٍ غزيرةٍ غير متوقَّعة تتكوَّن عنها الكثير من الجُزيئات الحيوية المهمة. هذا ما تم كشفه في تجارب Hazen *et al.*, (2002) في المختبر في درجات حرارة بين ١٥٠–٣٠٠م° وضغط بين ٥٠ إلى ٥٠٠ ميغا باسكال، وهي الظروف الشائعة للبيئات المذكورة أعلاه. يعزي الباحثون ذلك من بين أمورٍ أخرى إلى أن النقطة الحرجة للماء هي ٣٧٤م° وضغط ٢٢,١ ميغا باسكال، وفي مثل الظروف التي أُجريَت التجارب فيها ينخفض كثيرًا ثابت العزل الكهربائي للماء، بينما تزداد النواتج الأيونية. هذا يؤدي إلى تغيير الخواص الفيزيائية للماء ويؤثر كثيرًا على خواصه الكيميائية أيضًا. وفي سيناريو نشوء الحياة في الدخانيات المائية الحرارية، والتي يتبناها العديد من الباحثين، تلعب الغازات CO_2 وN_2 وH_2 دورًا أساسيًّا، والتي استمرت الأحياء ذاتية التغذية اللاهوائية باستخدامها حتى الآن. في تلك الظروف يوفر تفاعل الأكسدة–الاختزال لجزيئات H_2–CO_2 مصدرًا ثابتًا للطاقة، ومدخلاتٍ بنائيةً كون حالة التوازن تقع على جانبِ مركَّبات الكاربون المختزلة. وهكذا وفَّرَت وتوفِّر هذه البيئات الظروف التي تشجِّع تخطي حالة التوازن على مدى حقبٍ جيولوجية، والاقتراب من حالة التوازن يؤدي إلى إنتاج مركَّباتٍ كاربونيةٍ مختزلة. هذه التفاعُلات تحصُل تلقائيًّا طالما توفَّرَت المحفِّزات والظروف الاختزالية. المشترك في هذه التفاعُلات أنها تتم حتى في المختبَر دون الحاجة إلى إنزيمات؛ ما يرشِّحها لتكون من بدايات نشوء الأيض الأحيائي. هذه التفاعُلات تشكِّل لبَّ أيض الكاربون والطاقة في البكتيريا والأركيا المولِّدة للخلات (Acetogens) والمولِّدة للميثان (Methanogens) (Preiner *et al.*, 2019).

(ب) انبثاق منظومات الجُزيئات الحيوية بترتيبٍ خاص

على الرغم من إمكانية تكوُّن عشرات آلاف الأنواع من المركَّبات الكيميائية، فإن الحياة غاية في الانتخابية والحساسية. في حين تُوجد في الطبيعة ملايين أنواع المركَّبات العضوية الصغيرة، فإن الكائنات الحية ومنها البكتيريا *E. coli* تستخدم ٥٠٠ نوعٍ فقط من المركَّبات العضوية الصغيرة. كيف تتم هذه الانتخابية؟ حسب Hazen (2012) ذلك يتم من خلال آليتَين؛ التنظيم الذاتي (Self organization) والتحفيز بواسطة المعادن.



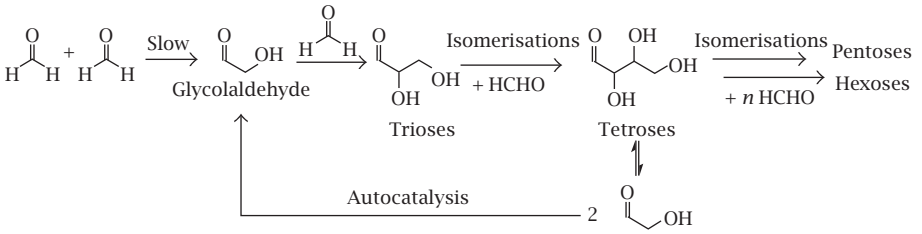
شكل ١٥-٤: رسمٌ تخطيطيٌّ للتكوُّن التلقائي لغشاءٍ دهنيٍّ بطبقتَين من خلال تجاذب رءوس جُزيئات المواد الدهنية للماء بتوجُّهها نحو الخارج (الوسط المائي) ونفور ذيول الجُزيئات الكارهة للماء وتوجُّهها نحو الداخل.

التنظيم الذاتي (راجع الفصل الأول) هو النمط أو الأنماط أو التراكيب التي تنشأ نتيجة تآثُر مكوِّنات المنظومة. يتبدَّى التنظيم الذاتي مثلًا في ترتيب جُزيئات الدهون التي هي ثنائية الميل للماء والكراهية للماء وبذلك ستتنظم ذاتيًّا، لتُشكِّل غشاءً دهنيًّا من طبقتَين (شكل ١٥-٤) والذي سيحتضن مكوِّنات الخلية البدائية.

التحفيز بواسطة المعادن يتم من خلال تمكين وتسريع التفاعلات الكيميائية، وكذلك حل مشكلة الآيزوميرية المرآتية للمركَّبات الكيميائية (انظر الفصل العاشر)؛ فثمَّة مركَّبات مثل السكَّريات والأحماض الأمينية وغيرها تتكوَّن من نوعَين من الآيزوميرات للمركَّب، والتي هي صورةُ مرآةٍ للأخرى ويُرمز لها بـ L- وD- وتكون ذات خواصَّ وسلوكٍ تفاعليٍّ مختلف. والأحياء تستخدم السكَّريات بالشكل الآيزوميري D- فقط، بينما تستخدم الأحماض الأمينية التي هي بالشكل الآيزوميري L- فقط. هناك العديد من المعادن التي تحفِّز التفاعُلات الكيميائية مثل الزنك والنحاس والمنغنيز وغيرها. كما تلعب بلورات بعض المعادن مثل الكلسايت (كاربونات الكالسيوم) وبلورات الكوارتز دور المجمِّع لنوعٍ معيَّن من الآيزوميرات كأن تكون سكريات D- مثل D-Ribose أو L- مثل L-amino acids عن طريق التركيب اللولبي لسطوح مختلفة للبلوراتِ بطريقةٍ معينة يسمح بادمصاص مركَّبات L- دون D- أو بالعكس. وهكذا يمكِن أن تتوفَّر في مواقعَ معيَّنةٍ بلوراتٌ معدنيةٌ تسمح بمراكمة الآيزومير D- وفي مواقع أخرى بلورات تسمح بمراكمة الآيزومير L-. هذا يُساهِم مساهمةً كبرى في توفير أنواعٍ معينة من الآيزومرات المطلوبة بيولوجيًّا دون غيرها، وهو أمرٌ مهمٌّ جدًّا في تمكين انتخابية التراكيب البيولوجية، وأيض السكَّريات والأحماض الأمينية خاصة.

(ج) انبثاق الدورات الجُزيئية المتضاعفة

يفترض Wächtershäuser (1988) أن الأشكال الأولى للحياة لم تكن خلويةً وتفتقد الانقسام، لكنها تنمو. وهذه الأشكال البدائية للحياة لا تمتلك إنزيمات، ولا آلية ترجمة (تكوين بروتينات) لكنها تمتلك أيضًا محفزًا ذاتيًّا، وقدرةً على التطور. هذه الأشكال الحية ذاتية التغذية؛ حيث تعتمد على الطاقة الاختزالية لتثبيت الكاربون، بتحويل أيونات الحديدوز (Fe^{++}) وكبريتيد الهيدروجين (H_2S) إلى معدن بايرايت (FeS_2). وهذه تنمو بشكل طبقةٍ مفردةٍ من مادةٍ عضويةٍ سالبة الشحنة على سطوحٍ معدنية موجبة الشحنة، مثل البايرايت التي تشكِّل سطحًا بينيًّا مع الماء الحار. وحسب الباحث فإن قوانين



شكل ١٥-٥: الآلية المبسطة لتفاعل formose في تكوين السكَّريات. عن: Kopetzki & Antonietti (2011).

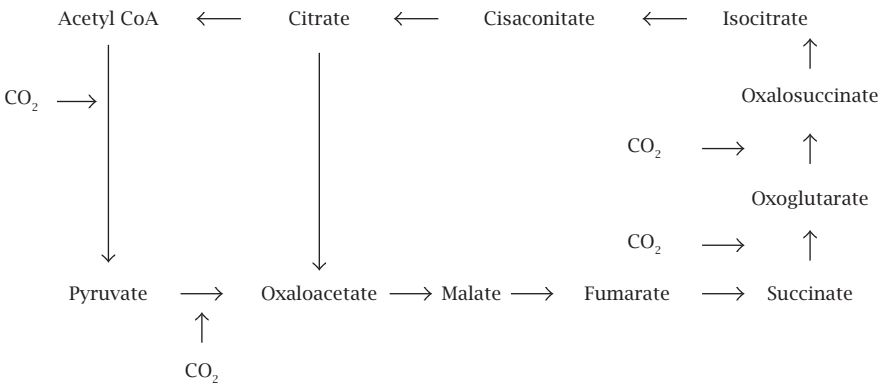
الديناميكا الحرارية، تشجِّع على مزيدٍ من تعقيد المواد العضوية على السطوح بخلاف التفاعُلات في المحاليل المائية.

ويؤكِّد E. Szathmáry على دَور تفاعُل formose في تكوين السكَّريات المختلفة من الفورمالديهايد، باعتباره متضاعفًا ذاتي التحفيز، ذا طابعٍ وراثيٍّ محدود، ساهم في تكوين الأشكال الأولى للحياة. بينما يُقِر Kopetzki & Antonietti (2011) بعمل تفاعُل formose في تكوين السكَّريات المختلفة من الفورمالديهايد (شكل ١٥-٥) تحت الظروف المائية الحرارية (٢٠٠م°) كالتي سادت في العهد الجهنَّمي قبل نشوء الحياة، إلا أنه يقلِّل من دَوره في نشوء الحياة بسبب سرعة تحلُّل السكريات الناتجة. غير أن هذه النقيصة ربما وجدَت حلًّا من خلال عملية الادمصاص على السطوح المعدنية.

ويُبرِز Morowitz *et al.*, (2000) أهمية دَورة حامض الستريك (دورة TCA أو دورة كريبز) الاختزالية (شكل ١٥-٦) كونَها تمثِّل لُبَّ شبكات الأيض الحيوي غير المحفَّزة بإنزيمات في جميع الأحياء، بما فيها الأشكال الأولى للحياة. مصدر الكاربون هنا هو جُزيئات CO_2 ومصدر الطاقة هو تفاعلات الأكسدة-الاختزال بين جُزيئات الدورة الإحدى عشرة. هذه الشبكة الأيضية ذاتية التحفيز؛ حيث يمكن لكل مركَّبٍ فيها أن يكوِّن ذاته، كما في ملخص التفاعل التالي:

$$\text{citrate} + 6CO_2 + 9H_2 \longrightarrow 2\text{citrate} + 5H_2O$$

يعتبر الكثير من الباحثين أن مسار Acetyl CoA هو من أقدم المسارات الأيضية؛ حيث يتم فيه تثبيت الكاربون اعتمادًا على إلكترونات الهيدروجين بوجود الخليط المعدني



شكل ١٥-٦: دورة حامض الستريك الاختزالية (reductive Citric Acid Cycle). عن: Morowitz *et al.* (2000).

أواريت (Ni_3Fe) في الدخانيات المائية الحرارية دون الحاجة إلى إنزيمات. ينتج عن المسار تكوين الفورمات والخلات والبايروفات من جُزيئات ثاني أوكسيد الكاربون والهيدروجين. هذا المسار ما زال مستخدمًا من قِبل الأركيا الذاتية التغذية؛ مثل مولِّدات الخلات (Acetogens) ومولِّدات الميثان (Methanogens) لكن بوساطة ١٠ إنزيمات ومساعداتٍ إنزيمية. هذا المسار يتألَّف من تفاعُلات محرِّرة للطاقة (Exergonic) لذا فهو يجري تلقائيًّا بتحفيز العوامل المعدنية، التي تنشِّط الهيدروجين وثاني أوكسيد الكاربون. والخاصية المهمة التي يتميَّز بها هذا المسار أيضًا، هو أنه المسار الوحيد من بين المسارات الستة المثبتة لثاني أوكسيد الكاربون الموجودة في الأحياء، الذي يولِّد جُزيئات ATP بينما المسارات الخمسة الأخرى تحتاج إلى ضخ جُزيئات ATP. وحيث إن التفاعلات الكيموحيوية البدائية يُفتَرَض أن تكون محرِّرة للطاقة، فهذا يعزِّز بقوة فكرة أن مسار Acetyl CoA هو مسارٌ بدائي. وفي هذا المسار، حيث يتفرد بوجود مركَّبٍ وسطي هو أول أوكسيد الكاربون؛ حيث تتكوَّن أحماض كاربوكسيلية (الخلات) من الكاربونيلات (أسيتيل)، بينما المسارات الخمسة الأخرى تختزل ثاني أوكسيد الكاربون إلى كاربونيلات، لتحصُل على أحماضٍ كاربوكسيلية باستهلاك طاقةٍ مضافة (Martin, 2020).

الذاتي الحركة الكيميائي (Chemoton) الأبسط المُفترَض من قِبل Gánti (2003) يتألف من ثلاث تحت-نظم كيميائيةٍ مترابطة؛ هي أيضٌ ذاتي التحفيز، وجُزيئةٌ حاملة

للمعلومات الوراثية، وغشاء. وهذه المنظومة حسب الباحث قابلة للتضاعُف الذاتي، وتبدو كأنها منظومةٌ حيةٌ صغرى.

ثمَّة ما يُعرف بنظرية التحفيز الذاتي الانعكاسي، والناتج عن غذاء (Reflexively Autocatalytic and Food-generated)، اختصارًا RAF. وتفترض أن مجموعةً من التفاعلات الكيميائية تُشكِّل RAF إذا كان (١) كل تفاعل في المجموعة يحفَّز بواسطة جُزيئةٍ واحدةٍ على الأقل متضمَّنة في المجموعة. (٢) كل جزيئة ضمن هذه المجموعة يمكن أن تنتُج من مجموعة جزيئاتٍ غذائيةٍ صغيرة. وهكذا فإن مجاميع RAF يمكن أن تنبثق بسهولةٍ من مجموعة من التفاعلات الكيميائية، وهي تتألَّف دائمًا من مجاميعَ RAF أصغر ما يُشير إلى قابليتها على التطوُّر (Liua & Sumpter, 2018; Hordijk *et al.*, 2019).

الذي تم عرضه هو مجموعة من مساراتٍ أيضية، ذاتية التحفيز، غير إنزيمية متضاعفة، يمكن أن تكون قد ساهمَت في نشوء الأشكال الحية الأولى.

(د) انبثاق الانتخاب الطبيعي

حينما تنشأ منظومة تفاعلات كيميائية أو مسارات أيضية ذاتية التحفيز، متضاعفة، أو جزيئات معلومات وراثية مثل: RNA أو DNA، فيما بعدُ سيعمل الانتخاب الطبيعي بصورةٍ تلقائيةٍ على ترجيح الصيغ الأكثر أهلية. هذا يحصُل بسبب التغيُّرات التي تطرأ على المنظومات أو المسارات الأيضية أو الجُزيئات الوراثية نتيجة الأخطاء، وحينها ينتخب المسار أو الجُزيئة الأكفأ لإتمام المسار الأيضي.

وهكذا تكون قوانين الديناميكا الحرارية، خاصة القانون الثاني للديناميكا الحرارية، قد لعبَت دورًا أساسيًّا في تشكُّل الجُزيئات الحية، وتسيير التفاعلات الكيميائية وتضاعُف المنظومات الحيوية وديمومتها.

وحسب Hazen (2012) فإن أفضل فهمٍ لنشوء الحياة على الأرض يتم من خلال تتابُع انبثاق أحداثٍ كيميائية، كل واحدٍ منها يضيف درجةً من التركيب والتعقيد للحالة البيولوجية البدائية. ومع عدم امتلاكنا لكل التفاصيل، إلا أنه لا يُوجد سببٌ مقنعٌ يجعلنا نعتقد أن تكون الحياة قد نشأَت لأسبابٍ غيرِ طبيعية.

(٣-٤) عالم الـ RNA World RNA

الخلية الحالية باعتبارها منظومةً معقدةً قادرة على التضاعُف، تعتمد في ذلك بالأساس على جُزيئات DNA التي تحفَظ وتنقلُ المعلومات الوراثية وجُزيئات RNA التي تُترجِم تلك المعلومات إلى بروتينات، والأخيرة تدخُل في تركيب معظم مكوِّنات الخلية ووظائفها، بما فيها تكوين المركَّبات المختلفة وتحوُّلات الطاقة. ومن البعيد عن الواقع أن تكون منظومة DNA/RNA بروتين قد ظهرَت بصورةٍ عشوائيةٍ من مزيج من الأحماض الأمينية والنكليوتيدات التي تكوَّنَت لا أحيائيًّا في ظروف الأرض البدائية، وهذا ما أشار به العديد من الباحثين (Kitadai & Maruyama, 2018; McFadden & Al-Khalili, 2014).

في أجواء كَشْف تركيب الـ DNA سنة ١٩٥٣م، من قِبل واتسن وكريك وآلية عملها، توجَّه التركيز على الجين باعتباره التركيب الأساس لعمل المتضاعف البدائي، خاصةً من قِبل Hermann J. Muller. وصار الجدل ما إذا كان الأيض أولًا أو الحامض النووي أولًا. وانتبه عددٌ من العلماء إلى أهمية الـ RNA الجزيئة الشديدة القرب من الـ DNA؛ حيث إن الخلايا الحية تحتوي على جُزيئات RNA أكثر بكثير من جُزيئات DNA، كما كشفَت آليات تكوين البروتينات الدَّور الكبير الذي تلعبه جُزيئاتُ RNA فيها.

سنة ١٩٨٢م، أثبَت Kruger *et al.* الفاعلية الإنزيمية لجُزيئات RNA من خلايا الحيوان الابتدائي المهدَّب *Tetrahymena*. وافترض Woese (1967) وOrgel (1968) وCrick (1968) كلٌّ على انفرادٍ أن الـ RNA تعمل كإنزيم وحاملٍ للمعلومات الوراثية. واعتمد Woese & Fox (1977) وحدات RNA الرايبوسومي الصغيرة (rRNA) كمَعلمٍ لتحديد المجاميع التطوُّرية الثلاثة؛ البكتيريا والأركيا والأحياء الحقيقية النواة. وحيث إن تلك الجزيئات ليست إنزيماتٍ لكنها تمتلك نشاطًا إنزيميًّا حيث يمكنُها كسرُ وتكوينُ أواصرَ تساهمية، فقد أطلقوا عليها اسم رايبوزايم (Ribozyme).

يُورِد Kun *et al.*, (2015) أهمية جُزيئات RNA كما نعرفها في الوقت الحاضر، ليس فقط كنشاطٍ إنزيمي ونقل المعلومات الوراثية، وإنما دورها في التعبير الجيني من خلال mRNA وtRNA وrRNA حيث يمكن اعتبار الرايبوسوم كـ «جُزيئة RNA ضخمة». وهناك العديد من جُزيئات RNA المنظِّمة للتعبير الجيني؛ مثل.

RNA الميكروي (microRNA) وRNA الصغير (sRNA) وRNA غير المُشفر الطويل (lncRNA) والكثير من الأنواع الأخرى التي تُعرف بالمفاتيح الرايبوية (Riboswitches)، وهي جُزيئات RNA رابطة لبعض الجُزيئات الفعَّالة؛ مثل ATP

وFMN وغيرها (Cochrane & Strobel, 2008). كما أن العديد من المساعدات الإنزيمية (Coenzymes)؛ مثل NAD وNADP وFAD وcoenzyme A وS-adenozyl-methionin و3'-Phosphoadenosine-5'-phosphosulfate وATP تحتوي على جزءٍ نكليوتيدي. وحسب هؤلاء الباحثين فإن نشاط هذه المساعدات الإنزيمية لا يعتمد على الأدنين، لكن الأخير يُستخدَم كـ «مقبض» للرايبوزايم قبل ظهور عالَم الإنزيمات. وبيَّن Lorsch & Szostak (1994) ظهور أو تطوُّر رايبوزاياماتٍ جديدة في جُزيئات RNA خارج الجسم الحي ذات نشاط Polynucleotide kinase. واستنادًا إلى القدرة الإنزيمية لجُزيئات RNA فقد رأى Gilbert (1986) إمكانية أن يقوم الرايبوزايم بنسخ نفسه من المصادر الجُزيئية وجُزيئة RNA تُستخدم كقالب، وبذلك لا تكون ثمَّة حاجةٌ للإنزيم الناسخ في بداية التطوُّر. وإن قدرة الإنترونات (Introns) وهي تتابُع نكليوتيدات غير مشفر للبروتين على الاندماج في شريط RNA والانفصال عنه ذاتيًّا، مكَّنَت هذه الإنترونات على حمل إكسون (Exon) وهو تتابُع نكليوتيدات مشفر للبروتين بين اثنَين منها حين انفصالهما معًا من شريط RNA، ثم عند اندماجهما مع شريط RNA آخر فإنهما يقومان بحشر الإكسون الذي بينهما. وبذلك تقوم الإنترونات بإيجاد ينقولٍ أو جينٍ قافز (Transposon) من الإكسونات المنقولة بواسطتها. هذه الخاصية زوَّدَت الـ RNA بوسيلةٍ تطوُّرية رئيسة؛ هي بمثابة إعادة اختلاطٍ وراثي (Genetic recombination) لتكوين تشكيلاتٍ جينيةٍ جديدة. وعن طريق الأخطاء أثناء تضاعُف الـ RNA تحصُل الطفرات التي تُسهِم بإيجاد متغيراتٍ تقود إلى التطوُّر الداروني. إن الجينات القافزة تقوم بما يقوم به الجنس حين تنتقل من كيانٍ متضاعفٍ إلى آخر، إضافةً إلى إعادة الاختلاط الوراثي الذي يؤمِّن التطور، ثم باستخدام الرايبوزايم للمساعدات الإنزيمية NAD وFMN تم تطوير الكفاءة الإنزيمية للرايبوزايم. وفي مرحلةٍ لاحقة، بدأَت جُزيئات RNA بتخليق البروتينات عن طريق استخدام بعض جُزيئات RNA كوسيطٍ يربط الأحماض الأمينية المنشطة على جُزيئات RNA كقالب، كما هي تعمل في لب الرايبوسوم. البروتينات المُنتَجة بواسطة الرايبوسومات صارت تقوم بتسيير التفاعلات الكيميائية كما تفعل الرايبوزايمات ولكن بكفاءةٍ أفضلَ وأسرع؛ وبالتالي سادت في مجال التفاعلات الكيميائية لاحقًا. وفي زمنٍ لاحقٍ ظهرَت إلى الوجود جُزيئات DNA كحاملٍ وناقلٍ للمعلومات الوراثية من جُزيئات RNA الوراثية، ربما عن طريق النسخ العكسي (Reverse transcription). وبعد نشوء جُزيئة الـ DNA الثنائية الشريط وهي كيميائيًّا أكثر

استقرارًا من RNA وبالتالي أكثر حفظًا للمعلومات الوراثية بشكلٍ خطِّي، وتُوفِّر قدرةً على تصحيح الأخطاء من خلال وجود الشريط الثاني للمقارنة، بقيَت مسألة حصول الطفرات وإعادة الاختلاط الوراثي محفوظة. وهكذا صارت واستمرَّت جُزيئات RNA تلعب دور الوسيط المهم للغاية في التعبير الجيني حتى الوقت الحاضر، وإن احتفظَت ببعض الأنشطة الإنزيمية؛ كما في جُزيئات الرايبوزايمات وجُزيئات RNA الرايبوسومي (rRNA). إن أثَر هذه العملية الباقي حتى الوقت الحاضر يتمثَّل بوجود الإنترونات والإكسونات في شريط الـ DNA الموروث عن الـ RNA القديم. ومن الأمور الداعمة لفرضية عالم الـ RNA هو اكتشاف أعدادٍ متزايدةٍ من الرايبوزايمات في الأحياء المنقرضة. وإن مركز Peptidyl transferase الرايبوسومي وهو الموقع النشط لتكوين الآصرة الببتيدية في الرايبوسوم يتألَّف بالكامل من RNA. كذلك تكوَّن مدًى واسعٌ من الرايبوزايمات الجديدة خارج الجسم الحي بضمنها جُزيئاتُ RNA فعَّالة محضَّرة، وبعض النسخ المحسَّنة من الرايبوزايمات الطبيعية. كذلك فإن ظهور جُزيئات RNA قبل جُزيئات DNA يكون مُقنِعًا من خلال تخليق النكليوتيدات deoxyribonucleotides (الوحدات البنائية للـ DNA) من ribonucleotides (الوحدات البنائية للـ RNA) القريبة باختزال ذرة الكاربون رقم ٢ في جُزيئة السكَّر بدل التخليق من جديدٍ لمصدرٍ يحتوي على الرايبوز اللاأوكسجيني (Kitadai & Maruyama, 2018).

إن اعتبار عالَم الـ RNA هو الحالة الكيموحيوية الأولية على الأرض، يفترض حسب Ogel (2004) تقسيم مسألة نشوء الحياة إلى عددٍ من المسائل الفرعية: (١) التخليق غير الإنزيمي للنكليوتيدات. (٢) البلمرة غير الإنزيمية للنكليوتيدات لتكوين تتابُعات RNA عشوائية. (٣) النسخ أو التضاعُف غير الإنزيمي أو كليهما للـ RNA. (٤) انبثاق مجموعة محفِّزات RNA فعَّالة من خلال الانتخاب الطبيعي، والتي يمكن أن تؤمِّن نموًّا أُسيًّا في بيئةِ ما قبل الحياة. ويعتقد الباحث أن المعادن الطينية حفَّزَت تكوين أشرطة الـ RNA وتكوين الشريط المزدوج للـ RNA لا إنزيميًّا، تم من خلال النسخ القالبي للشريط المُفرَد.

مسألة تخليق النكليوتيدات بدرجةٍ كافيةٍ من النقاوة لتمكين تخليق RNA في حقبةِ ما قبل الحياة، لا يمكن تحقيقُها باستخدام الكيمياء المعروفة حاليًّا. هذا دفَع بعض الباحثين لاستكشاف إمكانية تكوُّن بوليمراتٍ وراثيةٍ بديلة. ويتوفَّر عددٌ كبيرٌ من التراكيب الثنائية الشريط بهياكل تختلف كثيرًا عن RNA، لكن قواعدها ترتبط حسب قاعدة واتسن- كريك.

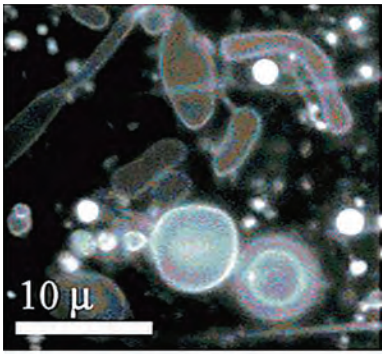
ويمكن أن تكون مُكوِّناتها سهلةَ التخليق مقارنةً بنكليوتيدات الـ RNA. كما أن من الممكن أن تكون ثمَّة تراكيبُ ازدواج أبسط بكثيرٍ من RNA من حيث إن وحداتها المكوِّنة يمكن أن تُخلَّق بسهولةٍ أكبر بكثير. من هذه جُزيئة TNA (Threose Nucleic Acid). بينما يفترض Kim *et al.*, (2020) أن البوليمرات الوراثية البدائية كانت تتابُعاتٍ عشوائيةً غير اعتيادية من النكليوتيدات الصغيرة تكوَّنَت بدون قالب بلمرة، وهذا قاد إلى تكوين RNA.

(٤) الخلية الأوَّلية The Protocell

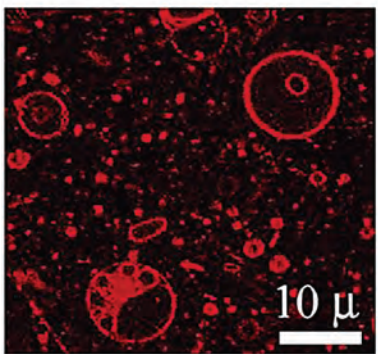
«ما إن امتلكَت الحياةُ الأوليةُ القدرةَ على التضاعُف والتغايُر، حتى خرجَت الجنِّية من الزجاجة.»

Lloyd (2009)

نشوء الخلايا الأولى من عناصر الأرض المبكِّرة، والذي تم قبل حوالي ٤ مليارات سنة، لا بد أن يكون قد تم تدريجيًّا (Xavier *et al.*, 2020). إن نشوء جُزيئات الـ RNA القادرة على حمل المعلومات الوراثية والنشاط الإنزيمي بصيغة الرايبوزايم لا يقدِّم حلًّا كاملًا لمنظومةٍ متضاعفة (Replicon) إلا إذا أُحيطَت هذه الجُزيئات بغشاءٍ يُحافِظ على المحتويات، ويمكِّن من عملية تبادُل المواد مع المحيط والتكاثُر، وبالتالي التطوُّر الداروِني. بيَّن Chen *et al.*, (2004) أن إحاطة جُزيئات RNA بأغشيةِ أحماضٍ دهنيةٍ تمثِّل خلايا أولية؛ فهذه التشكيلة ستُوجِد ضغطًا أزموزيًّا من خلال التركيز العالي لجُزيئات RNA ما يؤدِّي إلى أخذ مزيدٍ من الأحماض الدهنية إلى الغشاء المشدود، ونمو الحوصلة أو الخلية الأولية على حساب الحوصلات المجاورة المحتوية على RNA وضغطٍ أزموزيٍّ أقل. غير أن الحوصلات المنتفخة أزموزيًّا تنحو لتكوين كراتٍ مستقرَّة يصعُب انقسامها. وللتغلُّب على هذه المشكلة قام Chen *et al.*, (2005) باستخدام مزيجٍ من Myristoleic acid وأسترة من الكليسرول لتكوين الحوصلات حيث تتحمل أيونات المغنسيوم. وهكذا صار رايبوزايم رأس المطرقة (Hammerhead ribozyme) في الحوصلات المحتوية على أيونات المغنسيوم نشطًا ومنقسمًا ذاتيًّا (شكل ١٥-٧). بعد ذلك بيَّن باحثون وبعيدًا عن الضغط الأزموزي، أن وجود كمياتٍ قليلةٍ من الشحوم الفوسفاتية أو ببتيداتٍ ثنائيةٍ محفِّزة كارهة للماء، يمكن أن يؤدي إلى نموٍّ تنافُسيٍّ لحوصلات الأحماض الدهنية.



(a)



(b)

شكل ١٥-٧: صورة بالمِجهر المؤلِّق (Fluorescence microscope) لحوصلاتٍ مكوَّنةٍ من myristoleic acid (MA) وglycerol monomyristoleate (GMM) وdodecane بنسبة ٢: ١: ٠,٣ تحتوي على رايبوزايم رأس المطرقة (Hammerhead ribozyme) بوجود ٣ مليمول $MgCl_2$ قبل البثق. تم صبغ الأغشية بـ Rhodamine 6G لرؤيتها في (A) epifluorescence أو laser scanning confocal microscopy (B). تظهر الصور من مناظيرَ مختلفة. عن: Chen *et al.*, (2005).

كما أن تخليق الببتيدات المحفِّزة يجري بكفاءةٍ أكثر في الحوصلات مما في المحلول؛ ما يشجِّع المنافسة (Adamala & Szostak, 2013a; Budin & Szostak, 2011). المشكلة مع نموذج الأحماض الدهنية كمكوِّن للخلية الأولية هي عدم ثبات الأحماض الدهنية بوجود الوضعية الأيونية الضرورية لتضاعُف الـ RNA؛ فتضاعُف الـ RNA يتطلَّب تراكيزَ

عاليةً من أيونات المغنسيوم، في حين أن هذه الأيونات تؤدِّي إلى تكتُّل وترسيب حوصلات الأحماض الدهنية. تم التغلُّب على هذه المشكلة بتوفيرِ حامضِ الستريك الذي يخلبُ أيونات المغنسيوم بحيث يخفض كثيرًا ترسيبَ الأحماضِ الدهنية، بينما لا يتأثَّر تضاعُف الـ RNA إلا قليلًا (Adamala & Szostak, 2013b). ومن المعروف الدَّور الذي يلعبه حامض الستريك في أيض الكاربون (دورة كريبز) في الخلايا الحديثة، والذي ربما نشأ عن مثل هذا التآزُر في الأدوار المبكِّرة لنشوء الحياة كما سبق ذكره. مثل هذا النموذج يمكن أن يكون إحدى الحالات التي أدَّت إلى تكوُّن الخلايا الأولية، والتي طُوِّرَت عَبْر الطفرات في جُزيئات RNA وقدرتها على تكوين الببتيدات والأحماض الدهنية الخاصة بها، وكذلك القدرة الإنزيمية لخوض طريق المنافسة والتطوُّر.

وفي محاكاةٍ لظروف الشقوق المائية الحرارية في مياه بركٍ بركانية، والتي يمكن أن تكون قد شَهدَت تكوُّن المركَّبات الدهنية التي أدَّت إلى نشوء الحوصلات أو الأغشية للخلايا البدائية، قام Milshteyn *et al.*, (2018) ببحث إمكانية تكوُّن حوصلاتٍ مستقرة من مركَّباتٍ مزدوجةِ الميل للماء والدهون متمثلة بأحماضٍ دهنيةٍ أحادية مجموعة الكاربوكسيل ذات ١٠ و١٢ ذرة كاربون لوحدها أو ممزوجة مع كليسيريداتٍ أحادية. تَم استخدام ماء البِرَك البركانية وماء البحر للمقارنة. أظهَرَت النتائجُ أن الأحماض الدهنية النقية يمكن أن تكون حوصلاتٍ غشائية في مياه البِرَك، لكن مع حامض الدوديكونيك وglycerol monododecanoate كانت أقل حساسيةً للحرارة وتجمَّعَت في أغشيةٍ مستقرة نسبيًّا في ظروف pH حامضية وقاعدية. كما تمكَّنَت هذه الحوصلات من احتواء أحماضٍ نووية وصبغة البايرانين. لكن لم يتمكَّن أيٌّ من الأحماض الدهنية المزدوجة الميل للماء والدهون من تكوين الحوصلات في ماء البحر بسبب الأيونية العالية، التي تمزِّق الأغشية. مؤخرًا، بيَّن Cornell *et al.* (2019) أن ارتباط الأحماضِ الأمينيةِ الموجودة قبل الحياة وغير المعدَّلة؛ مثل السيرين والكلايسين بالأغشية الدهنية، حفظَت ثبات هذه الأغشية بحوصلاتٍ بقطر ١٠مكم وبوجود الأيونات الثنائية؛ مثل Mg^{++} وكذلك ملح الطعام. هذا يحُل مسألةَ ثباتِ أغشيةِ الخلايا البدائية بوجود الأيونات، والتي هي مطلوبة لعمل جُزيئات RNA. كما أن ترافُق الأحماض الأمينية مع أغشية هذه الخلايا يُمكِن أن يكون مصدرًا لتكوين الببتيدات والبروتينات.

(٥) نشوء الفايروسات ودورها في التطوُّر

Origin of Viruses And Their Role In Evolution

حسب Domingo (2020) يُمكِن وضع النظريات التي تبحث في أصل الفايروسات في مجموعتَين؛ الأولى تقول بنشوء الفايروسات قبل وجود الخلايا، والثانية ترى أنها نشأَت عن الخلايا الحية. ويمكن عرضُ النظريات المختلفة كما يلي:

(٥-١) الفايروسات كمُتبقِّياتٍ لموادَّ وراثيةٍ بدائية

حسب هذه النظرية فإن فايروسات أو تحت-فايروسات RNA وبسبب محدودية تعقيدها الوراثي، يمكن أن تكون قد انحدرَت من متضاعفات RNA (RNA replicons) سبقَت نشوء الخلايا البدائية، واعتُبرَت من قِبل بعض الباحثين أشكالًا أوليةً للحياة (Moelling & Broecker, 2019). النشوء المستقل للفايروسات عن الخلايا يمكن أن ينطلِق من وجود بروتيناتٍ فايروسية لا تُوجد شبيهاتها في خلايا الوقت الحاضر. كما تُوجد التفافاتٌ بروتينيةٌ خاصة في بعض فايروسات DNA الكبيرة، وفايروسات RNA أحادية وثنائية الشريط، التي تصيب الأحياء الحقيقية النواة، بالإضافة إلى حجم الجينوم الفايروسي وتركيبه (حيث لا يُوجد غير الفايروسات كائنات حية جينومها يتألَّف من RNA) يمكن أن تشكِّل ذاتًا فايروسية أصيلة. وهكذا يرى عددٌ من الباحثين أن الفايروسات هي من بقايا عالم الـ RNA. إن عناصر RNA الوراثية في الوقت الحاضر كالرايبوزايمات والفايرويدات ونوكليوتيدات RNA بأطوال ١٦٥–٤٣٠ نكليوتيد الذاتية التضاعف، والفايروسات التابعة من نوع hepatitis delta virus (HDV) المعاقة والمعتمدة على فايروس التهاب الكبد الفايروسي hepatitis B virus (HBV) في إكمال دورة حياتها يمكن أن تكون من (الآثار) الحية للعناصر الوراثية البدائية؛ فهي تشفر لمستضدٍّ واحدٍ وتُظهِر نشاطًا رايبوزايميًّا (Flores *et al.*, 2012; Fallot *et al.*, 2012; Durzyńska & Goździcka-Józefiak, 2015). ويبدو أن HDV ناتجة عن الربط بين RNA شبيهة بالفايرويد ومنطقة mRNA مشفرة، وبذلك فقد تكون المصادر لتقسيم جينوم الأحياء الحقيقية النواة الحديثة إلى تتابُعاتٍ مشفرة (إكسونات) وتتابُعاتٍ بينية غير مشفرة (إنترونات). وهكذا فإنها تعكس العمليات التي حصلَت مع RNA القديمة حيث انتُخبَت لقابليتها على التضاعُف وتضمينها جزءًا مشفرًا للبروتين بالارتباط مع جُزيئات RNA أخرى. وهذا ربما مثَّل خطوةً تطوريةً

باتجاه تكوين جينوم RNA أو DNA أكثر تعقيدًا. وهنا يمكن أن يأتي دور الإنزيم الذي نسخ عكسيًّا الـ RNA إلى DNA ونشوء فايروسات DNA وجينوم الـ DNA الأكثر تعقيدًا.

(٥-٢) الفايروسات نتيجة لتطوُّرٍ ميكروبيٍّ ارتدادي

هذه النظرية على عكس سابقتها تفترض أن عالم الخلايا هو مصدر الفايروسات. الخلايا المُنشِئة للفايروسات يمكن أن تكون خلايا ذاتيةَ التغذية، أو خلايا بسيطةً متطفلة على خلايا أكثر تطورًا، ومرَّت بتغيُّراتٍ اختزالية حوَّلَتها إلى فايروسات. هذا ربما تَم من خلال فقدان جيناتٍ جعلها تمتلك جينات تمكِّن من التضاعُف، بينما تفتقد للجينات المسئولة عن تكوين البروتينات واستخراج الطاقة. ويمكن أن تكون الفايروسات الضخمة من عائلة *Mimiviridae* مثالًا للحالة الوسطية بين الخلايا والفايروسات؛ فهذه الفايروسات مثل *Tupanvirus* بحجمها الكبير الذي يقع ضمن أبعاد حجوم البكتيريا (١,٢–٢,٥مكم) وجينوم كبير من DNA مزدوج الشريط يبلغ ١,٤٤–١,٥١ ميغا ق يشفر لـ ١٢٧٦–١٤٢٥ بروتين وتمتلك جهاز ترجمة يتألَّف من ٧٠ tRNA و٢٠ aminoacyl-tRNA synthetases (aaRS) و١١ بروتينًا مساعدًا لكل خطوات الترجمة وبروتينات مرتبطة بتنضيج tRNA/mRNA وتحويرات بروتين الرايبوسوم، إضافة إلى شبهٍ كبيرٍ بمناطق الإنترونات في جينات 18 S rRNA. في مثل هذه المجموعة من جينات الترجمة للفايروس، يبقى الرايبوسوم هو الوحيد المفقود (Abrahão *et al.*, 2018). وتَم كشفُ وجود جينَين يشتركان في عمليات التخمُّر في أحد فايروسات *Mimivirus*؛ التي تصيب الطحالب يشفران لإنزيمات Pyruvate formate-lyase وPyruvate formase-lyase (Steward & Schvarcz, 2018). كما تحتوي فايروسات *tupanvirus* على إنزيم Citrate synthase وهو من إنزيمات دورة كريبز الأساسية في تفاعُلات التنفس (Rodrigues *et al.*, 2019).

القدرة العالية على الانتشار الذي تتميَّز به الفايروسات، ربما كانت صفةً إيجابيةً تَم انتخابها خلال التطوُّر، وهذه الصفة لا تقتصر على الفايروسات فقط؛ فثمَّة بكتيريا وطفيليات وفطريات يمكن أن تنتشر بوسائلَ مختلفةٍ بما فيها الحشرات. إن احتمالية نشوء فايروسات RNA من خلايا عَبْر الاختزال يواجه مشكلة ندرة تخليق RNA بالاعتماد على.RNAو هنا يمكن أن يكون فايروس كهذا نشأ من «أحياء RNA خلوية» منقرضة، أو أن تضاعُف هذه الفايروسات اشتُق من DNApolymerase خلوي.

(٥-٣) تحرير الفايروسات كوحداتٍ ذات استقلالٍ ذاتي

حسب هذا السيناريو، تكون الفايروسات قد نشأَت من خلايا DNA أو RNA لها القدرة على التضاعُف مع مرحلة خارج الخلايا. هذا يمكن أن يكون قد تحقَّق من خلال هروب جزء من جينوم الخلية، والتضاعُف كطفيلي في خلايا حية. والقدرة على التضاعُف قد تكون من خلية المنشأ أو تَم اكتسابها خارجيًّا. ويمكن أن يكون انتخاب هذه الآلية لفائدتها للخلايا في النقل الأفقي للجينات، وتأمين تضاعُف الفايروس.

(٥-٤) الفايروسات كعناصر لتطوُّر متوازٍ طويل

حسب هذه النظرية تكون الفايروسات بقِدم الخلايا، وتطوَّرا جنبًا إلى جنب وربما مع الأشكال ما قبل الخلايا، واشتركًا في بعض التراكيب؛ فالمادة الوراثية وعموم البروتينات وطريقة عملها فيها الكثير من التشابه. كما أن التخصُّص العوائلي والاستقطابية في إصابة أنواعٍ معيَّنة من الخلايا دون غيرها، تشي بوجود هذا التطوُّر المتوازي. وقد تمثِّل الفايروسات الضخمة من مجموعات *Mimiviridae* والتي تم ذكرها أعلاه، وهي تقترب تركيبيًّا من الخلايا، ووجود فايروساتٍ صغيرة هي العاثيات الفايروسية (Virophage) متطفِّلة على وحدات تضاعُف الفايروس (معامل الفايروس Viral factories) داخل الخلية العائلة والتي اعتبَرها Oliveira *et al.*, (2019) صراعًا على السيادة جانبًا من حالة التطوُّر المتوازي.

ويعتقد الباحثان Broecker & Moelling (2019a)، أن الحياة الأولى التي بدأَت على الأرض بشكلِ أصغرِ كائنٍ متضاعفٍ ذاتيًّا، ذي نشاطٍ تحفيزي، وهو الرايبوزايم، والذي يتألَّف من RNA حلقي غير مشفَّر ومعلوماته تستند إلى التركيب فقط. وتؤشِّر الرايبوسومات إلى أنها سبقَت الأحياء البدائية النواة؛ كونها ماكنة صناعة البروتين في جميع الأحياء ومحفوظًا نادر الطفرات. ويمكن أن تكون الفايروسات وبالأخص ما يشبه الفايرويدات هي الأشكال الأولى للحياة، كما اقترح بعض الباحثين (Moelling & Broecker 2019b)؛ فهذه يمكن أن تكون قد بدأَت كتراكيبَ بسيطةٍ متضاعفة ذاتيًّا، ومع نشوء الأشكال الخلوية الأولى فقدَت جيناتٍ لتصبح طفيلياتٍ خلويةً مجبرة؛ ففقدان الجينات حالةٌ شائعة، وتم توضيحه خارج الجسم الحي بما يُعرف بـ «عفريت سبيجلمان Spiegelman's Monster» حيث تم فقدان فاجٍ بكتيري طويل التشفير لجيناته متحولًا إلى RNA غير مشفَّر (ncRNA) صغير جدًّا، سريع التضاعُف بوجود RNA polymerase

ونكليوتيداتٍ حرة وأملاحٍ خلال ٧٤ جيلًا (Spiegelman *et al.*, 1965). وهكذا تم مبادلة الجينات بسرعة التضاعُف. كما أن الركتسيا والميتاكوندريا والبلاستيدات هي أمثلةٌ حية لمثل هذه الحالات. إن أنواع RNA غير المشفَّرة والعديد منها فايروسية المنشأ تمثِّل ٩٨٪ من جينوم اللبائن، بينما تمثِّل الجينات المشفَّرة ٢٪ فقط من الجينوم، وهذا يشير إلى أهمية الفايروسات في نشوء وتطوُّر الحياة.

(٥-٥) نشوء الفايروسات من حوصلات

يمكن تصوُّر أن مجاميع الخلايا الأولية كانت تفتقد لجدار أو غشاءٍ خلوي، مما يسمح بانتقال المواد الوراثية والأيضية والسوائل بينها والمحيط. ويُعتقَد أن أول أشكال حدود الخلايا الأولية تركيبٌ دهني بشكل حوصلةٍ يفصل بين داخل وخارج الخلية الأوَّلية، يحتوي على جزيئاتٍ ضخمةٍ قابلة للتضاعُف. تطوَّر غشاء الحوصلة باتجاه احتوائه على مركَّباتٍ مزدوجة الألفة، يزيد من استقراره الحراري ونفاذيَّته وتحمُّله للأيونات الثنائية التكافؤ. وهكذا صارت تنتخب الحوصلات التي لها قدرة على التبرعُم، والتي تحتوي المادة الوراثية القادرة على التضاعُف مع الجُزيئات الأيضية. أما حوصلات الفايروسات الأولية فأصبحَت مع الوقت غيرَ ضرورية للخلايا الأولية، بل صارت الفايروسات الأولية طفيلياتٍ تستنزف الخلايا الأولية. ومع نشوء خلايا أوليةٍ ذات أغشيةٍ دهنية صارت الفايروسات الأولية تدفَع باتجاه انتخاب خلايا أوَّلية تحتوي على مركَّبات الببتيدوكلايكان على أغشيتها، لتمنع دخول الفايروسات الأوَّلية. وهكذا بدأ «سباق التسلح» بين الخلايا الأولية والفايروسات الأولية الذي استمر حتى الوقت الحاضر. والفائدة الرئيسة التي استمرَّت الفايروسات الأوَّلية وحتى فايروسات اليوم في توفيرها، هي النقل الأفقي للجينات بين الأحياء، والذي ساهم في زيادة تنوُّعها بشكلٍ كبير.

(٦) دور ميكانيك الكَم في نشوء الحياة

Role of quantum mechanics in origin of life

مما تقدَّم يمكننا الخروج بالاستنتاجات التالية:

(١) ربما تكون الفايروسات هي الكائنات الحية الأبسط تركيبًا ووظيفة، لكنها لا تتمكَّن من إظهار خواصِّها الحية إلا داخل خلايا حية؛ وعليه فهي لا تصلُح أن تكون الشكل الأوَّل للحياة القادر على التكاثُر الذاتي.

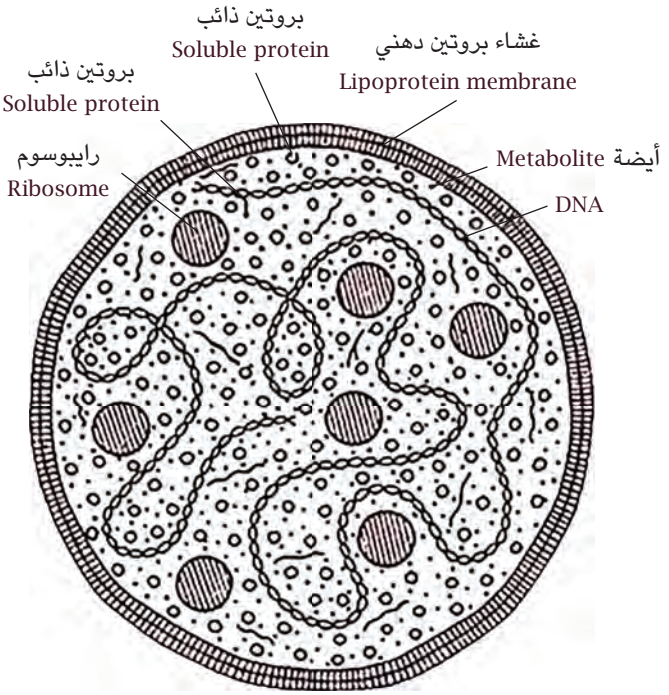
(٢) أبسط كائنٍ حي معروف في الوقت الحاضر يتألَّف من خليةٍ واحدة وهي خلية البكتيريا. وبساطة خلية البكتيريا تأتي من خلال مقارنتها مع الأحياء الأخرى المتعدِّدة الخلايا والغاية في التعقيد، مع ذلك فإن خلية البكتيريا ذاتها عالية التعقيد أيضًا؛ فهي تمتلك جدارَ خلية متعدِّد المكوِّنات وغشاءً خلويًّا يتألف من طبقتَي دهون وبروتينات، وتحتوي على كروموسوم بآلاف الجينات، كما تحتوي على آلاف الرايبوسومات والإنزيمات. والأنواع الأبسط من البكتيريا هي المايكوبلازما التي تكون أصغر حجمًا (بقطر ٠٫٣مكم) وتفتقد لجدار الخلية (شكل ١٥-٨) وتعيش طفيليةً داخل خلايا حية لحاجتها إلى الكوليسترول وبعض البروتينات الضرورية للنمو، كما أن بعضها يفتقد للإنزيمات اللازمة في المسارات التنفُّسية. مع ذلك فهي تمتلك جُزيئة DNA بعدد جيناتٍ يصل إلى ٥٠٠ تُشفر لمثلها من البروتينات. وبذلك فهي أيضًا يصعُب أن تكون الخلية البدائية التي أظهَرَت الحياة.

(٣) ربما تكون المسارات الأيضية الذاتية التحفيز المتضاعفة؛ مثل مسار Acetyl CoA وFormos وCitric Acid Cycle وكيماتون وRAF قد مثَّلَت الأشكال الأكثر بدائيةً لنشوء الحياة قبل الخلوية. كما يتوجَّب الأخذ بعين الاعتبار أن سِر الحياة لا يكمُن في تعقيد المادة البيولوجية، وإنما في قُدرتها على معالجة المعلومات والتضاعُف (Davis, 2008).

(٤) يبقى نموذج الخلية البدائية التي سبق تقديمه Chen *et al.*, 2004; 2005; Adamala & Szostak, (2013a; Budin & Szostak, 2011) والمؤلَّف من جزيئة رايبوزايم مع مكوِّناتٍ محاطةٍ بغشاءٍ دهنيٍّ يحتوي على ببتيدات يمكن أن يكون الأقربَ إلى المُتضاعف الأوَّلي عند نشوء الحياة.

الآن يبرز السؤال الأكبر: هل أن نشوء المتضاعف الأوَّلي الذي تطوَّر إلى الخلية الأولية تَم بالصدفة؟ الجواب سيظهر من خلال المناقشة التالية، إذا استبعدنا بالطبع البديل المنطقي المستند إلى التفكير الميكانيكي التقليدي وهو وجود صانع لهذه الأحداث؛ لأنه بكل بساطة يقع خارج نطاق العلم.

إذن ما هي الصدفة؟ إنها موضوعٌ شغل الفلاسفة واحتار العقل البشري باستيعابه وهو موضوعٌ أساسي في الرياضيات. وكان المفكر المصري المعروف محمود أمين العالم، قد نشَر كتاب «فلسفة المصادفة» سنة ١٩٦٩م، وهو أطروحة الماجستير له، ناقش فيه الموضوع من جوانبه المختلفة بما فيها دور ميكانيك الكم. خلاصة رأيه أن المصادفة هي



شكل ١٥-٨: رسمٌ تخطيطيٌّ لتركيب خلية المايكوبلازما.

أحد الاحتمالات المتحقِّقة، أو التي يمكن أن تتحقَّق من بين عددٍ كبيرٍ من الاحتمالات الأكثر ترجيحًا للتحقُّق في الواقع؛ أي إن احتمالية تحقُّق «الصدفة» نادر أو نادرٌ جدًّا عادة، مع ذلك فإنه ممكن الوقوع. وكما نعرف من تجربة الشق المزدوج أن الجُسيم العابر من الشق يمكن أن يقع على نقاطٍ عديدةٍ على الشاشة لكن وقوعه سيكون متناسبًا مع أرجحية الاحتمال. لكن دور الديناميكا الحرارية في تسييرِ التفاعلات الكيميائية البدائية، ودفعِ المنظومة البيولوجية إلى التضاعُف أو الانقسام يُبعِد عامل الصدفة تمامًا. وعندما يختبر عددًا هائلًا من الاحتمالات وفي بيئاتٍ مختلفة وعلى مدى ملايين السنين، فإن تحقُّق الحالة النادرة لا تكون صدفة؛ فقد تم تجريب (كل) الاحتمالات كما سنرى فيما يأتي.

لنأخذ مثال البِركة أو البِركة الطينية أو الشقوق الصخرية المائية الحرارية في الينابيع البركانية، وقيعان المحيطات (أشكال ١٥-٩ و١٥-١٠ و١٥-١١) والتي غالبًا ما ترشَّح

على أنها يمكن أن تكون موطن نشوء الأشكال الأولى للحياة، وهي منظوماتٌ من ماء وعناصرَ عديدةٍ ومركباتٍ مختلفة لا عضوية وعضوية لا أحيائية.

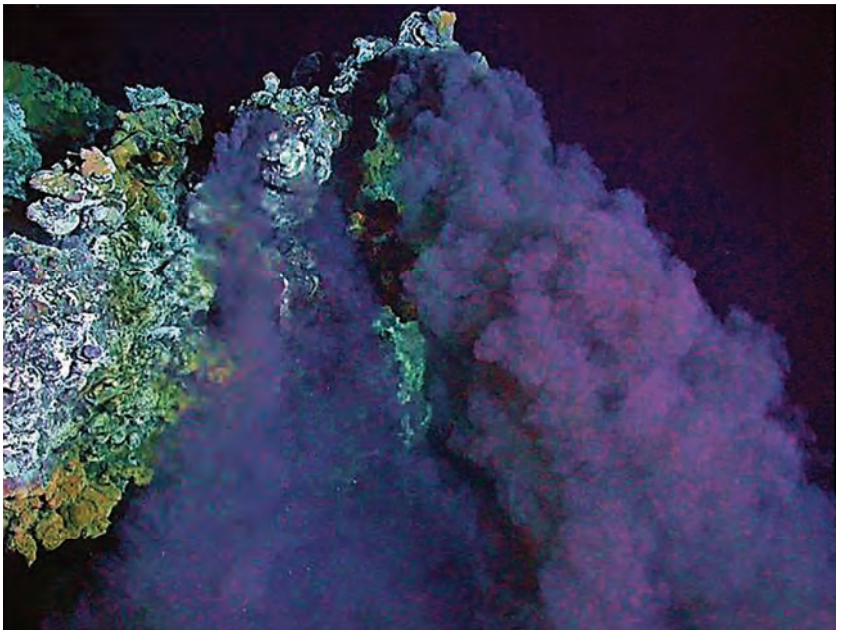
شكل ١٥-٩: من أقدَم شكلٍ للحياة المشخصة في الطبقات الصخرية لبُحيرة Thetis في غرب أستراليا، وهي نمواتٌ طحلبية تعود إلى ٣,٥ مليارات سنة. عن: Bernhard Richter/Dreamstime.

العديد من الدراسات تُرجِّح أن تكون الحياة الأولى قد نشأَت في مثل هذه البيئات التي بعضها أعلى من مستوى سطح البحر، والتي نشأَت قبل ٤ مليارات سنة نتيجة الانفجارات البركانية؛ فمياه هذه البيئات تكوَّنَت نتيجة الأمطار؛ مما يجعلها ذات تراكيزَ ملحيةٍ أقل من مياه المحيطات. كما أنها تتميَّز بمحدودية كميات المياه فيها؛ مما يجعلها مؤهلةً لأن تجمع وتركِّز المركَّبات العضوية التي تُخفف جدًّا في مياه المحيطات، وتحول دون تراكُمها (Milshteyn *et al.*, 2018). وهكذا ففي أية منظومةٍ متعددة المكوِّنات وهذه المكوِّنات تتحرك بصورةٍ عشوائية، فثمَّة احتمالاتٌ قائمة أن يصطدم أي مكوِّنٍ فيها بأي مكوِّنٍ آخر في زمنٍ مفتوح. ومع الزمن تتغيَّر تشكيلات الظروف البيئية من درجات الحرارة والرطوبة والضغط وتراكيز المواد. وكذلك التأثيرات الكونية المتمثلة بالمذنَّبات

والنيازك، والتي كانت تسقط على الأرض بمعدَّلاتٍ وكمياتٍ أعلى بكثير مما يحصل الآن، مع ما تحمله من موادَّ بما فيها المواد العضوية والحرارة الهائلة التي تُحدِثها، وكذلك الإشعاعات الكونية بما فيها الأشعة فوق البنفسجية. كما تدخُل في صُلب العمليات طبيعةُ التركيب الذري والجُزيئي للعناصر، والجُزيئات، والشحنات، والاستقطابية، والطاقة الحرة، وعامل التنظيم الذاتي (Self organization)؛ كل هذا وغيره سيُنتِج المركَّبات المختلفة، التي تَم استعراض العديد منها في تجارب المحاكاة التي تم ذِكْرها. وأعقد مركَّب له أهميةٌ كبرى في تشكيل الخلية الأولية، هي جُزيئات RNA القادرة على حفظ المعلومات الوراثية، والنشاط الإنزيمي؛ أي جزيئات الرايبوزايم. الملاحظة المؤكَّدة أن جميع تجارب محاكاة ظروف الأرض البدائية في المُختبَر منذ تجربة Miller–Urey في بداية خمسينيات القرن العشرين حتى الوقت الحاضر، لم تنجح في تكوين منظومةٍ متضاعفةٍ أولية. وإن نجحَت بعض التجارب في تكوين أحماضٍ أمينية، وقواعدَ نووية، وسكَّريات بما فيها سكر الرايبوز، وأحماضٍ دهنية تتمكَّن من التشكُّل الذاتي بشكل غشاءٍ دهني، إلا أن هذه التجارب تتم عادةً بتهيئة ظروفٍ مناسبةٍ مع تخليص النواتج المرغوبة من المركَّبات العَرَضية التي لولا ذلك لأعاقت تكوينها. إن تكوين مركَّباتٍ معقَّدة ذات ترتيبٍ خاص مثل جُزيئات RNA يتطلب ربط إحدى القواعد النووية وهي أربعة؛ الأدنين والسايتوسين والكوانين واليوراسيل مع جُزيئة سكر الرايبوز، وربط الرايبوز من الناحية الأخرى مع مجموعة فوسفات لتشكيل النكليوتيدة، وهي اللبنة الأساسية التي يجب أن تتكرَّر مع تغيُّر القاعدة النووية لبناء جُزيئة الـ RNA. كما أن ارتباط القاعدة النووية البيورينية (أدنين أو كوانين) يجب أن يكون بين الذرة ٩ من القاعدة النووية مع ذرة الكاربون رقم واحد في جُزيئة السكر، وأن ترتبط مجموعة الفوسفات مع ذرة الكاربون رقم خمسة في جُزيئة السكر. والنكليوتيدة التالية يجب أن ترتبط مع النكليوتيدة السابقة مع ذرة الكاربون الثالثة. هذا من ناحية، ومن ناحيةٍ أخرى ولغرض تضاعُف جُزيئة الـ RNA المؤلَّفة من عددٍ غيرِ قليل من النكليوتيدات يتوجَّب استخدامُ شريط RNA كقالب وانتخاب النكليوتيدات الصحيحة بالضبط لبناء الشريط الجديد. هذه المحدِّدات العديدة تجري عَبْر انتخاب المكوِّنات المذكورة من وسط الحَسَاء البدائي والذي يعجُّ كما هو متوقَّع بمثل المواد المطلوبة والكثير غيرها. من الصعب جدًّا أن تحصُل مثل هذه العملية من خلال الصدفة؛ فهذه مثل أن تطلب من مجموعةٍ كبيرة من القرود التي كل واحدٍ منها مجهَّز بطابعة، ويضغَط على أزرارها بشكلٍ عشوائيٍّ طبعًا، أن ينجح أحدهم في كتابة مسرحية هاملت لشكسبير مهما استمروا في ذلك، كما ذكر Lloyd (2006) في حالةٍ مماثلة.

شكل ١٥-١٠: بركانٌ طينيٌّ حديث في تايلاند يمكن أن تكون أشكال الحياة الأولى قد نشأَت في مثل هذه البيئة. عن: Michael C. Rygel via Wikipedia Commons.

قام McFadden & Al-Khalili (2014) بتتبُّع الاحتمالات اللازمة لتخليق جُزيئات RNA في وسط الحَسَاء البدائي؛ فحسب الكيميائي الاسكتلندي Graham Cairns-Smith ثمَّة ١٤٠ خطوةً تلزم لتحضير قاعدةٍ نووية من مركَّباتٍ عضويةٍ يرجَّح أن تكون موجودة في الحَسَاء البدائي. وفي كل خطوة ثمَّة ٦ تفاعلاتٍ محتملة يتوجَّب تجنُّبها. وهكذا يمكن تصوُّر أن التفاعُل الكيميائي المطلوب يمثِّل أحد وجوه زهر الطاولة الستة، الذي سيُحقِّق التفاعل المطلوب في كل خطوة؛ وعليه يتوجَّب رمي الزهر للحصول على الوجه المطلوب ١٤٠ مرة. وبذلك ستكون الاحتمالية الصحيحة ١ من $^{١٤٠}٦$ أو ^{١٠٩١٠} تقريبًا. هذا يستدعي أن يكون في الحَسَاء البدائي في بداية التفاعل هذا العدد من الجزيئات، لتحصُل على جُزيئة RNA بطريق الصدفة. غير أن هذا العدد يتجاوز بكثير عدد الذرات في الكون البالغة $^{٨٠}١٠$. إذن من غير الممكن بناءُ قاعدةٍ نوويةٍ بهذا الكَم المهول من الجُزيئات. ولو تَم بناء



شكل ١٥-١١: الشقوق الصخرية في أعماق المحيطات والمُولِّدة لتدفُّق غازاتٍ حارة. عن: Universal History Archive/UIG, via Getty Images.

قواعدَ نوويةٍ بطريقةٍ غيرِ معروفة، ينبغي أن تكون هذه القواعدُ بترتيبٍ معيَّن في شريط الـ RNA الذي هو بطول ما لا يقل عن ١٠٠ قاعدة نووية، لتتكوَّن جُزيئة رايبوزايم؛ وعليه في كل موقع قاعدةٍ نوويةٍ ينبغي الاختيار بين واحدة من أربعِ قواعد (A,U,G,C). وهكذا سيكون $١٠٠^{٤}$ طرقٍ محتملةٍ لربط القواعد النووية المضبوطة في جُزيئة الرايبوزايم. هذا يعني استخدام $١٠^{٥٠}$كغم من المادة، وهذا يفوق كتلة مجرَّتنا؛ درب التبانة، التي تبلغ $١٠^{٤٢}$كغم؛ وبناءً على ما تقدَّم لا يمكن الاعتماد على الصُّدفة وحدها كتفسيرٍ لتكوُّن الرايبوزايم. وحسب الباحثين McFadden & Al-Khalili (2014) قد تكون ثمَّة ترليونات المُتضاعِفات المحتملَة الممكن تكوُّنها لشريط RNA من ١٠٠ قاعدة نووية. وقد تكون الـ RNA المتضاعفة شائعةً وقتها؛ حيث وجود مليون جُزيئة كان كافيًا لتكوُّنها. لكن رغم كل الجهود العلمية لتكوين جُزيئة RNA قادرة على التضاعُف لم تُفلِح. ولم يتمَّ العثور في الطبيعة خارج الخلايا على مثلها. لكن هل تم ذلك بواسطة متضاعفٍ أوَّليٍّ أبسط بكثيرٍ

من الخلية في ذلك الزمن السحيق؟ يجيب الباحثان بالتأكيد نعم، ولكن من غير الواضح كيف. وعلى الرغم من التقدُّم الصناعي والعلمي، لم يتم إنتاجُ أية ماكنةٍ تتمكَّن من نسخ نفسها، علمًا أن هذا كان الهدف الأسمى الذي وضعه مؤسس التقنية النانوية K. Eric Drexler سنة ١٩٨٦م، منطلقًا من أفكار الفيزيائي الفذ Richard Feynman ومقولته الشهيرة: «الشيء الذي لا أستطيع عملَه فإنني لم أفهمه.» لكنِ الباحثان McFadden & Al-Khalili (2014) يطرحان مسألة نشوء الفايروسات الرقمية، وهي برامجُ قصيرةٌ نسبيًّا، وتتمكَّن من التضاعُف. ولماذا لم يتم نشوءُها تلقائيًّا من كَمٍّ المعلومات الهائل في الإنترنت، والذي يبلغ زليونات المليارات من البِتات في الثانية، وهي بحدودٍ معيَّنة مشابهةٌ لنشوء متضاعفٍ جُزيئي في كمٍّ كبيرٍ من جُزيئات الحَسَاء البدائي؛ فإلى الآن لم ينشأ أي فايروس رقمي تلقائيًّا، بينما يتم ذلك من قِبل أفراد ذوي مهارةٍ جيدةٍ ببرامج الحواسيب الرقمية. وكمثال الفايروس الرقمي المعروف Tinba مؤلَّف من ٢٠٠٠٠ بايت أو ١٦٠٠٠٠ بت، هذا يعني وجود احتمال ١ من $٢^{١٦٠٠٠٠}$ أن ينشأ هذا الفايروس بالصدفة. وهذا احتمال كما هو واضحٌ غاية في الندرة، ويفسِّر عدم إمكانية نشوئه بالصدفة وحدها. وهكذا يظهر أن نشوء المتضاعف الأوَّلي بالصدفة، أمرٌ مستَبعَد جدًّا، ولكن هذه الحسابات والاستنتاجات تدور في إطار العالَم التقليدي. ماذا لو بحثنا المسألة من واقع ميكانيك الكَم الذي يحكُم حركة الجُسيمات والذرات والجُزيئات وهو على حال المتضاعف الأوَّلي المفترض بشكل جُزيئات الرايبوزايم. وجُزيئة الـ RNA هذه تتألَّف من ذراتٍ مترابطةٍ من خلال الأواصر الكيميائية التي تعتمد على الإلكترونات والبروتونات. بعض هذه البروتونات والإلكترونات غير شديدة الارتباط، ويمكن أن تنتقل بين الذرَّات المرتبطة كما تطرَّقنا إلى ذلك في عمل الإنزيمات، وتركيب جُزيئات الحامض النووي. هذه الجُسيمات على خلاف الحالة التقليدية يمكن أن تعبُر حاجز الطاقة، وتنتقل من ذرة إلى أخرى مؤديةً إلى تغيُّراتٍ تركيبيةٍ ووظيفية في الجُزيئة، وهي في الحالة الكمومية. لكن هذه الحالة تتطلَّب أن تكون الجُسيمات في حالة تماسُكٍ كمومي، والذي سرعان ما تنهار إلى الحالة التقليدية (حيث تصبح جزءًا من الواقع) عند فك التماسُك الكمومي، ولكن في هذه الحالة تكون قد صارت في وضعيةٍ مختلفةٍ عن حالتها الأصلية. وتبدأ عمليةُ تماسكٍ جديدة وقدرة على الانتقال للجُسيمات ومن ثَم انهيارها لحالةٍ تقليديةٍ جديدة وهكذا. في كل حالة فكِّ تماسُك، يمكن أن تكون الذرات قد ترتَّبَت على نحوٍ مختلف. وهكذا يمكن أن تتمكَّن الجُزيئة من البحث عن احتمالاتٍ مختلفة قد يكون أحدها هو القدرة على التضاعُف. مع ذلك، فهذا يتطلب كما

رأينا أعلاه، البحث في احتمالاتٍ هائلة، والتي من بينها احتمالٌ نادر؛ هو أن تكون بترتيبٍ ذريٍّ يُكسِبها القدرة على التضاعُف. مثلًا يفترض الباحثان McFadden & Al-Khalili (2014) وجود ٦٤ إلكترونًا وبروتونًا قابلين لتغيير مواقعهم بين الذرات عَبْر عملية التسرُّب الكمومي؛ كأن يكون الواحد منهم على هذا الجانب أو ذاك من حاجز الطاقة. هذا يعني أن الاحتمال المطلوب وهو التركيب الذري الذي يمكِّن الجُزيئة من التضاعُف، سيُساوي ١ من ٢٦٤ وهو احتمالٌ نادرٌ جدًّا يذكِّرنا بمثال الأمير الصيني مع مخترع لعبة الشطرنج. لكننا هنا لا نعامل المسألة بمفهومٍ تقليدي، وإنما بمفهومٍ كمومي. يعني وكأننا نتعامل مع حاسوبٍ كمومي بـ ٦٤ كيوبت (انظر الفصل الرابع عشر). هذا سيمكِّن من بحث كل الاحتمالات في نفس الوقت، وبالتالي سيُسرِّع جدًّا من العثور على ذلك الاحتمال الضئيل مع الوقت، الذي كان قد امتد ملايين السنين وأماكن ومكوِّنات وظروفٍ شديدة التغايُر. وعند الانهيار على تلك الحالة، والتي ستتحوَّل إلى الحالة التقليدية (العادية) بفَك التماسُك، تكون قد تكوَّنَت الجُزيئة القادرة على التضاعُف. وما إن يكون المتضاعف الأوَّلي قد تكوَّن، حتى يبدأ عمل التطوُّر الداروِني نتيجة التغيُّرات التي ستنشأ أثناء التضاعُف، ويبدأ مسلسل التطوُّر ونشوء الحياة.

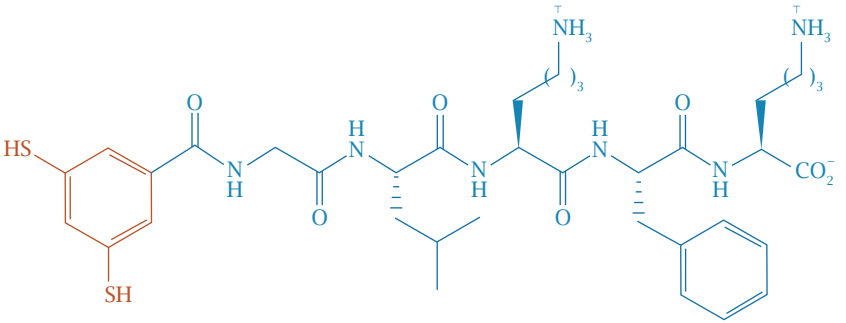
وبطريقةٍ مماثلةٍ فإن نشوء الإنزيمات لا بد أن مر بسلسلةٍ طويلةٍ من التعقيد بدءًا من تكوين ببتيد ثنائي إلى ببتيد ثلاثي وهكذا. بالتأكيد كلما زاد عدد الأحماض الأمينية في الببتيد المتعدد، زادت خياراتُ أو احتمالاتُ ارتباطاتها المختلفة. لكن عمل ميكانيك الكَم وبخاصة ظاهرةُ التراكُب ستُمكِّن من تجريب كل الاحتمالات في وقتٍ واحد، مما يختزل كثيرًا الزمن اللازم للوصول إلى تشكيلة الببتيد المتعدِّد، الذي يُظهِر نشاطًا إنزيميًّا. غير أن تحقُّق الظاهرة الكمومية كما سبق ذكره في مواقعَ عديدة، يتطلَّب حصول التماسُك الكمومي والذي يشترط عدم الاتصال مع البيئة. هذا الشرط يمكن أن يتحقَّق من خلال الحجم الصغير جدًّا للمتضاعف الأوَّلي أو الخلية البدائية التي تستضيف الببتيد المتعدِّد. وعند إضافة حامضٍ أميني إلى سلسلة الببتيد المتعدد ستنهار الحالة الكمومية في هذه التشكيلة. وطالما بقيَت سلسلة الببتيد المتعدِّد كجُزيئةٍ مفردة، يمكن أن تدخُل في حالة التماسك الكمومي من جديد، وتنهار الحالة الكمومية بعد اتصالها بحامضٍ أمينيٍّ جديد وربطه بالجُزيئة وهكذا. كما أن الببتيدات في أطوالٍ مختلفة (قبل أن تصبح بروتينًا) يمكن أن يُظهِر بعضها نشاطًا إنزيميًّا ليصبح إنزيمًا أوليًّا (Protoenzyme). هذا ما يعمله الباحثون روتينيًّا من خلال تجريب ملايين التشكيلات من الببتيدات في البحث عن

ببتيدٍ ذي نشاطٍ إنزيمي، والذي يمكن أن يُوجَد في بعضها ضمن مليون ببتيد. حالة إضافات الأحماض الأمينية الجديدة يمكن أن تستمر لحين الوصول إلى حالةٍ غيرِ قابلةٍ للانعكاس، وتُصبِح حالةً تقليديةً بهيئة إنزيمٍ أوَّلي أو إنزيم. هذه الحالة تكون عندما يتمكَّن هذا الإنزيم من مضاعفة نفسه؛ ومن ثم يخضع للتطوُّر الداروِني (McFadden, 2000).

هكذا يكون ميكانيك الكم ومن خلال ظواهر التماسُك والتراكُب والتسرُّب والتشابُك قد سرَّع بمقاييسَ هائلةٍ من البحث عن كل الاحتمالات، كما لاحظنا ذلك في عمل الإنزيمات وتضاعُف الـ DNA وانتقال الفوتونات في التركيب الضوئي وغيرها. وحسب Lloyd (2006) فإن كل التعقيد الذي نراه في أنفسنا وما حولنا من مجرَّات ونجوم وأحياء، هو نتاجُ البحث الكمومي للجُسيمات والذرات والجُزيئات في كونٍ هو حاسوبٌ كمومي. السؤال الملح الذي يمكن أن يبرُز هنا: لماذا لم تُفلِح التجارب المختبرية العديدة جدًّا والجارية منذ خمسينيات القرن العشرين في إيجاد متضاعفٍ أوَّلي مع أن ميكانيك الكم يبقى هو الحاكم للجُسيمات والذرات والجُزيئات المتفاعلة؟ الجواب هو أن ذلك يعود إلى عدم توافُق المكوِّنات والظروف والزمن الكافي للحصول على النتيجة المطلوبة، وأعتقد أن مزيدًا من المعرفة والتجارب وتجارب المحاكاة باستخدام الحاسوب الكمومي المرتقَب، يمكن أن تُقرِّب المسافة باستمرار نحو ذلك الهدف.

يعتقد Davies (2004) أن من غير الممكن صناعة الحياة من بعض الوصفات الكيميائية في أنبوبة الاختبار. لكن سيتم أخيرًا صنع الحياة اصطناعيًّا كناتجٍ عَرَضي لمعالجات المعلومات الكمومية والتقنية النانوية، وليس الكيمياء العضوية.

مع ذلك، تمكَّن فريق من الباحثين Ottelé *et al.*, (2020) من العثور على متضاعفٍ ذاتي (شكل ١٥-١٢) ويظهر نشاط أيضي بتفاعل أدول قَهقَرى (retro-aldol reaction) وشطر مجاميع fluorenylmethoxycarbonyl والتحول الأخير يسلِّط تغذيةً عكسيةً موجبة على التضاعُف (أيض أول Protometabolism)؛ فهذا المتضاعف الذاتي والذاتي التنظيم، لا يتمكَّن من تحفيز تكوين ذاته فحسب، وإنما تحويلات كيميائية أخرى تختلف طبيعتُها عن تفاعُل تضاعُفه. إن المتضاعف الذاتي يتمكَّن من تكوين جُزيئات تقود إلى تكوين وحدات بناء المتضاعف، وبذلك يُسرِّع عملية التضاعُف. وهذه العملية تؤشِّر إلى بداية الأيض. وهكذا يخلُص الباحثون إلى أن التضاعُف والأيض وهما عمليتان مفتاحيتان في نشوء الحياة، يمكن أن تتكاملا ذاتيًّا، وتؤشِّرا إلى إمكانية خلق شكلٍ مختزلٍ من الحياة.



شكل ١٥-١٢: التركيب الجُزيئي للوحدات البنائية للمتضاعف الذاتي المتكوِّن من لب جُزيئة بنزين ثنائية الثيول (benzene-1,3-dithiol) (اللون البرتقالي) وسلسلة ببتيدية (اللون الأزرق). عن: Ottelé *et al.*, (2020).

كلمةٌ أخيرة: إن التاريخ الطويل جدًّا لنشوء الكون وتطوُّر الحياة، تؤكِّد حقيقةً أساسيةً هي أن ما نُشاهِده من نجوم وكواكب وكائناتٍ حيةٍ غاية في التعقيد والتنوُّع، نتج عن فعل الطبيعة الذي شَهِد أعدادًا هائلةً من سلاسل التجريب بكل الاحتمالات الممكنة، الذي من سماته العميقة عدم الدقة في أحداثٍ كبرى أدَّت إلى كسر التناضُر (نشوء المادة من الطاقة والتغاير الوراثي بواسطة الطفرات). وكذلك البطء الشديد؛ فبعد مئات آلاف السنين تكوَّنَت الذرات الخفيفة وبعد ملايين السنين تكوَّنَت الجُزيئات، وبعد مليارات السنين أنتجَت الحياة، وانتظرت مليارات أخرى ليظهر الإنسان.

الفصل السادس عشر

من البيولوجيا الكمومية إلى الهندسة

From Quantum Biology To Engineering

«التعلُّم من الطبيعة يمكن أن يُعجِّل في تطوير تقنياتٍ جديدة.»

Y. Zhang (2016)

«إن تلاقي علم الفيزياء والهندسة في القرن العشرين، غيَّر العالم بالكامل، والآن تلاقي علم الحياة والهندسة، سيُحقِّق هذا في المستقبل.»

Susan Hochfeild (2019)

طوَّرَت الأحياء على مدى ملايين السنين جُزيئات وتراكيبَ جزيئيةً معقدة، تتمكن من استغلال الطاقة بكافة مستوياتها، وكذلك المواد وتحويلها عَبْر عملياتٍ فيزيائيةٍ كيميائيةٍ متنوعة جدًّا. إن دراسة علم الحياة يكشف التفاصيل والفعاليات البيولوجية على المستوى الجُزيئي والذري ويُبرِز القدرات غير العادية للمواد البيولوجية. ومكَّن علم الحياة من كشف الكثير من الظواهر الطبيعية، وفسَح المجال أمام استغلال هذه المعرفة في فهم العالم وتطوير المواد والآليات لإشباع حاجات الإنسان الغذائية، ومكافحة الأمراض وإدامة حياة الإنسان. هذا دفع الكثير من الباحثين إلى محاكاة التراكيب والعمليات البيولوجية عَبْر التقنية النانوية البيولوجية، من أجل زيادة المعرفة وتطوير موادَّ جديدة. استعرض Xiea *et al.*, (2019) الأبحاث العلمية والتقنية في مجال علم الحياة التخليقي ومحاكاة التراكيب والعمليات البيولوجية في مجالات المعدنة البيولوجية، وإنتاج الطاقة، وإنشاء

التراكيب البيولوجية والصناعية المختلطة، واستخدام البروتينات والأحماض النووية كسقالات لبناء أجهزةٍ نانويةٍ جديدة والكثير غيرها خلال العقدَين الأخيرَين. كما قدَّمَت Hochfeild (2019) عرضًا لعدد من منجزات الهندسة الأحيائية؛ كاستخدام الفايروسات في إنتاج بطاريات خزن الطاقة الكهربائية مع تصغير الحجم، وتنوُّع الشكل، وتخفيض الكُلف الطاقية والتلوُّث. كذلك استخدام بروتينات القنوات المائية في أغشية الخلايا في إنتاج مرشِّحات تنقية المياه العالية الكفاءة وغيرها. غير أننا سنعرض فيما يأتي جهود المحاكاة البيولوجية المستندة إلى ظواهر ميكانيك الكَم فقط، والتي هي في مجال علم الحياة الكمومي.

إن عمل الظواهر الكمومية في الكائنات الحية، والذي كشفَته البيولوجيا الكمومية، فتح آفاقًا جديدةً من خلال عمل ميكانيك الكَم في البيئات المكتظَّة بالجُزيئات ودرجات الحرارة العالية والتي كان يُعتقَد بعدم إمكانيتها. كما أظهَرَت البيولوجيا الكمومية دور الأحماض النووية والبروتينات والجُزيئات الحيوية وترتيبها الذي يمكِّن من استغلال موارد البيئة بما فيها مصادر الطاقة والمجالات الكهرومغناطيسية، وتحقيق عمل الظواهر الكمومية. هذا حفَّز على استلهام التراكيب الجُزيئية وآليات عمل المنظومات البيولوجية العالية الكفاءة، في بناء منظوماتٍ نانويةٍ ومواد بفاعلياتٍ كمومية، ضمن مجال التقنية النانوية. وحسب Cai (2011) فإن الأهمية العملية لدراسة البيولوجيا الكمومية، هو التعلُّم من الطبيعة وتصميم أجهزةٍ عاليةِ التأثير تُحاكي النظم البيولوجية، لغرض إنجاز أهدافٍ هامة؛ مثل تجميع الطاقة وتحسُّس المجالات المغناطيسية الضعيفة وتحسُّس الروائح وغيرها. من القدرات البيولوجية الملهمة والتي يمكن أن تجد تطبيقاتٍ تقنيةً لها تحسُّس الجُسيمات أو الجُزيئات المفردة؛ كقدرة الصبغات العينية أو نُظم التركيب الضوئي على تحسُّس الفوتونات المفردة، وكذلك تحسُّس المجال المغناطيسي الضعيف جدًّا، والنقل الكفوء للطاقة ونقل الإلكترونات بواسطة البروتينات والتنظيم الذاتي للبروتينات والفايروسات وغيرها.

(١) تحسُّس وتجميع الطاقة الضوئية

Sensing and collecting light energy

شَهدَت العقود الأخيرة أبحاثًا مكثَّفة، ركَّزَت على قدرات العمليات الحيوية في التركيب الضوئي من أجل توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، بعد أن كانت مركَّزة على تقنيات فيزياء المواد الصُّلبة والبصريات (Pankratov *et al.*, 2020; Sarovar *et al.*, 2014).

(١-١) التراكيب الحاملة للصبغات لاقتناص الضوء

Light harvesting chromophores assemblies

كما تم شرحه في الفصل الثالث عشر، فإن جوهر التراكيب القانصة للضوء في التركيب الضوئي هو الصبغات الممتصة للضوء. إنها صبغات الكلوروفيل والكاروتين أو البورفورينات مع وجود البروتينات التي تعمل كسقالات. والمُلِفت هو قدرة هذه المنظومات على تعظيم قدرات امتصاص الضوء وكفاءة في نقل الطاقة إلى منطقة فصل الشحنة التي تنتهي بتحرير الأكستون، وكفاءة في فصل الإلكترون في مركز التفاعُل يصلان إلى ١٠٠٪، مع وجود الوقاية الضوئية لمنع أضرار الأكسدة. غير أن هذه المنظومات الضوئية الطبيعية معقَّدة التركيب وحسَّاسة؛ حيث إنها نتاجٌ تطوريٌّ لملايين السنين يصعب إنتاج مثلها صناعيًّا؛ لذلك لجأ العديد من الباحثين إلى اعتماد مبادئ التركيب الضوئي الطبيعية، واستخدام بعض النظم الضوئية الطبيعية مع تقنيات تستخدم موادَّ مصنَّعة للحصول على الإلكترونات من موادَّ كيميائيةٍ بتأثير الطاقة الضوئية.

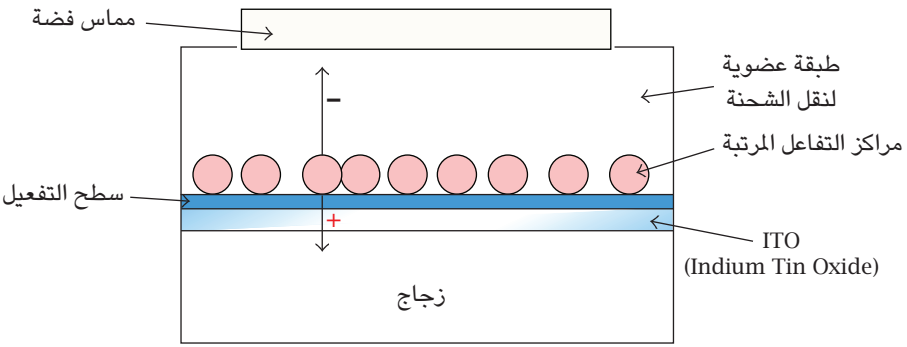
يستعرض Sarovar *et al.*, (2014) الأبحاث في مجال التقنيات الصناعية لبناء هوائيات اقتناص الضوء تُحاكي النُّظم البيولوجية تُستخدم في تطبيقات الفولتية الضوئية والتحسُّس الضوئي، وكذلك تقنيات تحسُّس المجالات المغناطيسية.

(١-٢) التكامُل المباشر لهوائيات تجميع الضوء الطبيعية مع بيئات المواد الصلبة

Direct integration of natural antennas into solid-state environments

هنا يتم ربط الهوائيات الجامعة للضوء الطبيعية مباشرةً مع آلة جمع الشحنات التي تستخلص الإلكترونات الناتجة عن فصل الشحنة. هذه الإلكترونات ستمثِّل إشارة تحسُّس للمتحسِّسات الضوئية أو تيارًا كهربائيًّا في الخلية الفولتوضوئية. في هذه التقنية ثمَّة إمكانيةٌ لحفظ كل الخواص الكمومية للهوائيات الجامعة للضوء الطبيعية، على ألا تتضرَّر من عملية الربط ببيئة فيزياء المواد الصلبة الغريبة عليها.

حسب نموذج Das *et al.*, (2004) تم مكاملة معقدي جمع الضوء؛ مركز التفاعل من البكتيريا الأرجوانية *Rhodobacter sphaeroides* والنظام الضوئي I من نبات السبانخ في آلة إلكترونيات فيزياء المواد الصلبة، كما موضَّح في الشكل ١٦-١. تم ترتيب هذه المعقدات الضوئية، حيث وُضعَت وتجمَّعَت تلقائيًّا على سطحٍ مطليٍّ بالذهب، وثُبِّتَت بواسطة راتنج.



شكل ١٦-١: مقطعٌ عَرضي لجهاز مكاملة مراكز التفاعُل الطبيعية. مُحوَّر عن: Sarovar *et al.*, (2014).

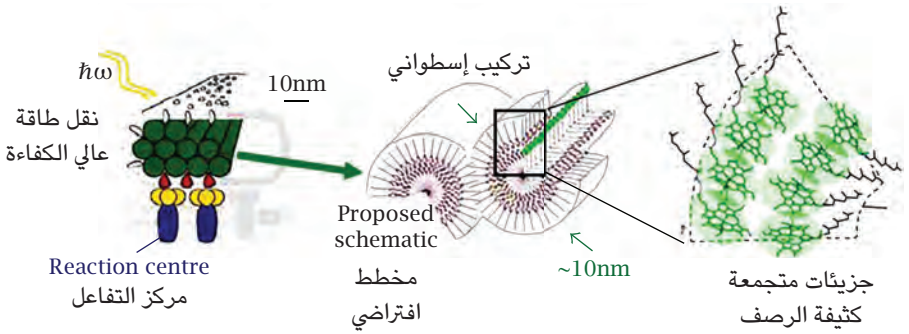
وتم تغطية طبقة المعقدات الضوئية بمادةٍ عضويةٍ شبه موصلة غير متبلورة، وأخيرًا وضع ملامسٍ معدني، لجمع الشحنات المتولِّدة. تَم تقدير الكفاءة الكُمومية الداخلية لهذه المنظومة بحوالي ١٢٪.

(١-٣) التجمُّعات الجُزيئية Molecular aggregates

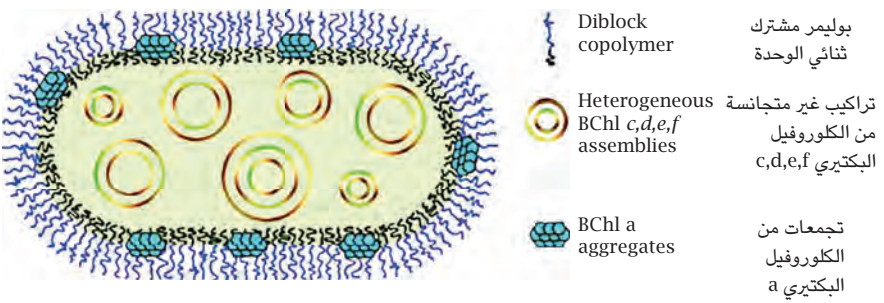
التجمُّعات الجُزيئية هي تراكيبُ لجُزيئاتٍ كثيفة الرصف، تنشأ عن تآثُراتٍ جُزيئيةٍ بينية لا تساهمية، مثل: تنضيد π-π، الأواصر الهيدروجينية وتنسيقات الأيونات المعدنية. مثل هذه التآثُرات تؤدي إلى مكوِّناتٍ جُزيئيةٍ غاية في التنظيم وكأنها بلوراتٌ جُزيئية، وكذلك تجمُّعات جزيئية أقل تنظيمًا أو مبعثرة.

في الطبيعة، يُعتبَر الكلوروسوم (Chlorosome) وهو هوائي تجميع الضوء في بكتيريا الكبريت الخضراء، مؤلَّفًا من تجمُّع لجزيئات صبغات الكلوروفيلات البكتيرية c وd وe وf ذي غلافٍ دهنيٍّ أحادي الطبقة، ومن دون سقالةٍ بروتينية. هذا التجمُّع كفوء في امتصاص الضوء بنسبة ١٠٠٪، ويتألف من تجمُّعاتٍ أسطوانية بقطر ١٠ن م، بأطوالٍ يمكن أن تصل إلى بضع مئات النانومترات، وتحتوي على مئات آلاف جُزيئات الكلوروفيل البكتيري (شكل ١٦-٢).

وبسبب الحجم الكبير والتعقيد المختزل للكلوروسوم، فقد استُخدِم في تقنيَّات استلهام الأنساق البيولوجية الجامعة للضوء.



شكل ١٦-٢: رسمٌ تخطيطيٌّ لتركيب منظومة تجميع الضوء في بكتيريا الكبريت الخضراء. اليسار، نموذج الكلوروسوم (الأخضر) يجلس فوق معقد FMO (الأصفر) والذي يربط الكلوروسوم بالغشاء السايتوبلازمي، الحاوي على مراكز التفاعل (الأزرق). الوسط، توضيح للتركيب الأسطواني للكلوروسوم. اليمين، يظهر التجمُّع الجُزيئي الكثيف لجُزيئات الكلوروفيل البكتيري في الكلوروسوم. مُحوَّر عن: Sarovar *et al.*, (2014).



شكل ١٦-٣: التركيب النانوي المحاكي للكلوروسوم. عن: Orf *et al.*, (2017).

في محاكاة للكلوروسوم البكتيري، قام Orf *et al.*, (2017) بتكوين منظومةٍ نانويةٍ هجينة من صبغات الكلوروفيل البكتيري c وd وe وf المستخلَصة من بكتيريا الكبريت الخضراء، محاطةٍ بغشاء بوليمر ثنائي الوحدة، مزدوجِ الألفة للماء مع تجمُّعات من كلوروفيل a البكتيري حيث تشكلت تلقائيًّا بفعل الانتقال من حالتها العضوية إلى الطَّور المائي، كما في الشكل ١٦-٣.

بيَّن هذا التركيب أن الأنواع المختلفة من الصبغات، تشتركُ في النقل الفائق السرعة للطاقة، متخطيةً النوع الأُحادي لحامل الصبغة في الكلوروسوم الطبيعي. كما بيَّنَت أهمية البوليمر المشترك القصير الوحدات في بناء أنساقِ جمعِ الضوء القابلة للتحكُّم.

(١-٤) صبغات السيانين ومشتقَّاتها المزدوجة الأُلفة للماء

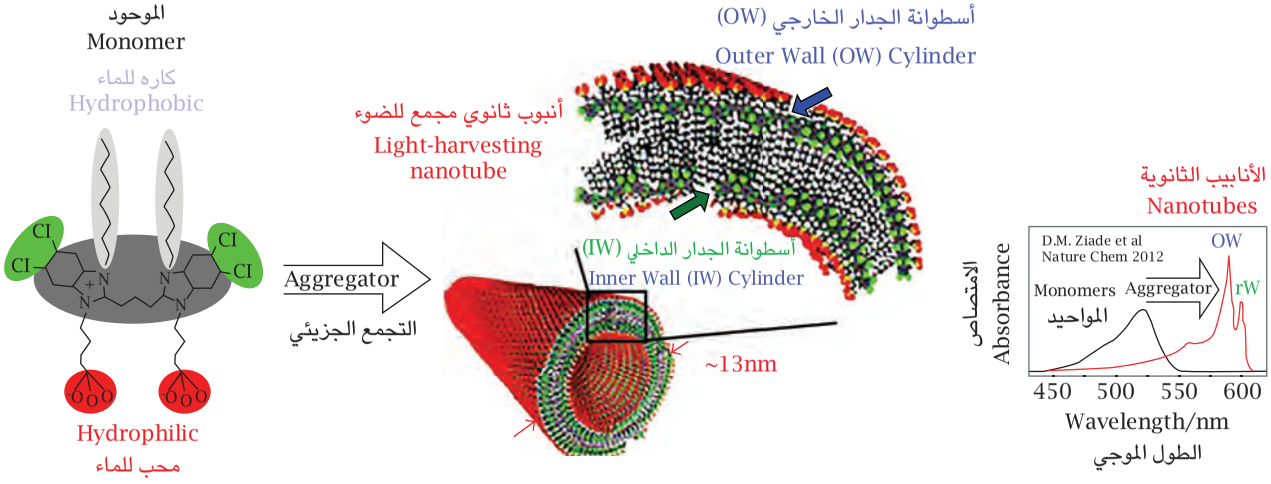
Cyanine dyes and amphiphilic derivatives

استُخدمَت مشتقَّات صبغة السيانين المزدوجة الأُلفة للماء (أجزاء مُحبة وأجزاء كارهة للماء) لتكوين تجمُّعاتٍ جُزيئية تُشكِّل تراكيبَ أسطوانيةً مُحاكيةً لكلورسوم بكتيريا الكبريت الخضراء. أحد تلك التراكيب والمعروف اختصارًا C8S3 عند إذابته في مذيبٍ مُستقطِب، يتجمَّع تلقائيًّا، بسبب تراكُب القوى الكارهة للماء وتنضيد π–π للجُزيئات بشكل أنبوبٍ نانويٍّ مزدوج الجدار، يتألَّف من تجمُّعاتٍ جُزيئيةٍ تعمل كجهازٍ اصطناعيٍّ جامع للضوء، كما في الشكل ١٦-٤. هذا مكَّن أن يكون نموذجًا ممتازًا لبحث نقل الإكسيتون في الأنابيب النانوية شبه المنفردة، وكذلك جمع الضوء وغيرها من تطبيقات الفيزياء الصلبة. إن مباعدة الأنبوبَين بمسافة حوالي ٤ن م، جعلهما يعملان كنظامَين إكسيتونيَّين باستجاباتٍ طيفيةٍ متمايزة.

(١-٥) كلور الزنك ومشتقَّاته Zinc chlorin and its derivatives

كلور الزنك (ZnChl) مشابهٌ جدًّا للكلوروفيل البكتيري c في الشكل؛ حيث يكون الزنك بدل المغنسيوم الموجود في الكلوروفيل البكتيري c. ويمكن تحضير كلور الزنك من خلال اشتقاقٍ تدريجيٍّ لكلوروفيل a (Röger *et al.*, 2008). إن جُزيئات مشتقات كلور الزنك تتجمع تلقائيًّا؛ لتُشكِّل قضبانًا نانويةً مشابهةً للكلوروسوم البكتيري. التجارب المطيافية بيَّنَت أن الإكسيتونات تنتقل عَبْر ١٠ إلى ١٥ جُزيئة على الأقل في زمن ١ إلى ١٠ بيكوثانية؛ ما يشير إلى خواصِّها الكمومية.

ومن أجل زيادة قدرات هذه التراكيب تم تجميعها مع الكلوروفيل البكتيري المرتبط تساهميًّا مع جُزيئة كاربون ٦٠. هذا التركيب التلقائي التشكُّل والمعزز، صار يعمل كوحدةٍ جامعةٍ للضوء حيث يعمل تجمُّع جُزيئات كلور الزنك كهوائيٍّ مجمِّعٍ للضوء، والكاربون ٦٠ كمركز تفاعُلٍ اصطناعيٍّ يمكِّن من فصل الشحنة، بينما يعمل الكلوروفيل البكتيري



شكل ١٦-٤: أنبوبٌ نانويٌّ اصطناعيٌّ مجمِّع للضوء متركِّب ذاتيًّا من جُزيئات صبغة السيانين، مزدوجة الحب والكراهية للماء (a) الموحود monomer 3,3'-bis (2-sulphopropyl)-5,5',6,6'-tetrachloro-1,1'-dioctylbenzimidacarbocyanine (C8S3). (b) مخطَّط للأنبوب النانوي المتركِّب ذاتيًّا والمجمِّع للضوء (ولزيادة الوضوح تم استخدام جُزيئةٍ واحدةٍ لكل وحدة خلية)؛ تركيبٌ مزدوج الجدار ذو مجاميع سلفونات مُحبة للماء (حمراء) على الخارج، سلاسل الألكايل (رمادي فاتح) الكارهة للماء داخل الطبقتَين، وحامل صبغة السيانين (رمادي غامق). قُطر الأنبوب النانوي حوالي ١٣ن م والمسافة بين الأسطوانتَين المتراكزتَين حوالي ٤ن م. (c) طيف الامتصاص. الأسود: موحودات الصبغة مذابة في الميثانول (لا تجمع). الأحمر: التجمُّعات الأنبوبية النانوية للصبغة محضَّرة في ماء/ميثانول؛ حزمتا J الاثنتَان الرئيستَان يمكن أن تُعزيا إلى الأسطوانة الداخلية والأسطوانة الخارجية على التوالي. مُحوَّر عن: Sarovar *et al.*, (2014).

كقانصِ طاقةٍ للهوائي الجامع للضوء ZnChl وفي الوقت نفسه كمانحِ إلكترونٍ لمركز التفاعُل كاربون ٦٠. هذه التشكيلة المركَّبة تحقِّق نقل طاقة، وفصل شحنةٍ سريعة جدًّا بكفاءةٍ كموميةٍ كُلية تصل إلى ٩٠٪.

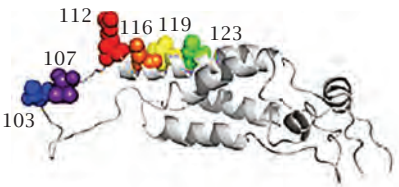
(١-٦) تجميع حوامل الصبغة على قالب الفايروس

Assemble of chromophores on viral templetes

من نواقص التجميع التلقائي للجُزيئات كمجمِّعاتٍ ضوئيةٍ دون روابط بأواصرَ تساهميةٍ هو عدم ضبط المسافات الفاصلة، ومظهر التركيب الذي يؤثِّر سلبًا في كفاءتها في نقل الإلكترونات وفصل الشحنات. وللتغلُّب هذه المُشكِلة تم اللجوء إلى التجمُّع الذاتي للبروتينات التي تتخذ عدة أشكال؛ كالتراكيب الخيطية أو الصفائحية أو اللولبية. ومن النماذج البيولوجية الأبسط والمعروفة التركيب جيدًا، هو عُلبة (Capsid) الفايروس الذي يتجمَّع تلقائيًّا، ويمكن أن يعمل كسقالة لترتيب الجُزيئات أو التراكيب المراد تشكيلُها. لقد استُخدمَت الفايروسات كقوالبَ في بناء البطاريات، وكُرياتٍ لنقل الأدوية الموجَّهة وفي تقنيات الطاقة الشمسية. ومن الفايروسات الشائعة والسهلة التحضير هو فايروس موزائيك التبغ (Tobacco Mosaic Virus-TMV). عُلبة هذا الفايروس تتألَّف من وحدات بروتينٍ شديدة الرصف، تتجمَّع تلقائيًّا بهيئةٍ أنبوبيةٍ أو تراكيبَ قُرصية تحيط بالحامض النووي RNA للفايروس. كل قُرصٍ يتكوَّن من ١٧ وحدة بروتين، وهذه الأقراص تتنضَّد أو تكون بهيئة لولبٍ يحتوي على ١٦ وثلث وحدةٍ لكل دورة، ونصف القُطر الداخلي للحلقة المركزية حوالي ٢٠ أنكستروم. وبذلك فهو يشبه كلورسوم بكتيريا الكبريت الخضراء.

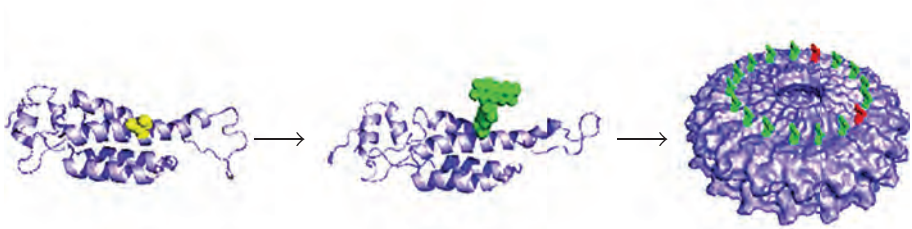
يتم استخدامُ بروتين الفايروس كسقالة لتجميعِ حواملِ الصبغات. ويمكن ربط حوامل الصبغة بأواصرَ تساهُمية، من خلال إدخال الحامض الأميني سيستئين (Cysteine) غير الموجود طبيعيًّا ضمن بروتينات الفايروس، كما يمكن التحكُّم بمواقع ربط حوامل الصبغة من خلال الحامض الأميني سيستئين في طافرات مختلفة من الفايروس، كما في الشكل ١٦-٥. غير أن هذه التشكيلات أفضت إلى عمليات نقل للشحنات بطريقةٍ تقليدية أو غيرِ كمومية. مع ذلك يمكن الوصول إلى رصفٍ أفضلَ لحوامل الصبغاتِ من أجل الحصول على تراكيبَ تتمكَّن من النقل الكمومي للشحنات (Sarovar *et al.*, 2014).

استخدَم Miller *et al.*, (2010) بروتينَ غلافِ فايروس موزائيك التبغ (TMV) للتجميع الذاتي لحوامل الصبغة العضوية لتكوين منظومة جمع الضوء. وجد الباحثون أن كفاءة نقل الطاقة في المنظومات التي تحتوي على نسبةٍ عاليةٍ من الجُزيئات المانحة مقارنةً بالجُزيئات المستقبِلة للإلكترون، تعتمد كثيرًا على حالة تركيب بروتين الفايروس. وتبيَّن أن التراكيب القُضبانية لبروتين الفايروس أكفأ كثيرًا في نقل الطاقة من التراكيب القُرصية. هذا يعود حسب الباحثين إلى أن كفاءة التراكيب القضبانية، تعتمد خطيًّا على نسبة الحوامل الصبغية المثبِّطة؛ ما يشير إلى وجود غنًى في مسارات نقل الطاقة؛ ما يمكِّن من تخطي المواقع المعطِّلة، وهو ما لا يحصُل في التراكيب القُرصية.



مواقع مختلفة على وحدة بروتين TMV والتي يمكن إحداث طفرات فيها لتسهيل ربط حوامل الصبغة بأواصر تساهمية عليها

(a)



وحدة بروتين TMV مع طفرة في الموقع 123

وحدة بروتين TMV مع حامل صبغة مرتبط في الموقع 123

قرص TMV متجمع ذاتيًا ويعمل كقالب دائري لحوامل الصبغة

مثال على تركيب حوامل الصبغة على قالب TMV

(b)

شكل ١٦-٥: مواقع إحداث الطفرات على وحدة بروتين الفايروس TMV وربط حامل الصبغة وتكوين مجمع الصبغات في قالب بروتين الفايروس. محوَّر عن: Sarovar *et al.*, (2014).

درس Sarovar & Whaley (2013) تراكيب الحوامل الصبغية الأسطوانية باستخدام تقنيات الجُزيئات الكبيرة. هذه التراكيب تمَّت بمساعدة بروتين عُلبة فايروس موزائيك التبغ (TMV) كقالب للتجميع لمعرفة محدِّدات تجميع الضوء في مثل هذه التراكيب، بوجود وغياب الترتيب (الفوضى). اكتشف الباحثون وجود مبادلة بين تعظيم كفاءة نقل الطاقة وعرض حزَم امتصاص الضوء في هذه التراكيب. كما وجدوا أن استراتيجيات التصميم الملائمة تعتمد على كمية الفوضى الطاقية والتركيبية في المنظومة. الهدف النهائي للعمل هو إقامة برنامجٍ معقولٍ بفعلٍ كموميٍّ لتكوين تراكيبَ عضويةٍ نانوية تُحاكي منظومات التركيب الضوئي الطبيعية.

استخدَم Mao *et al.*, (2004; 2003) بروتين عُلبة الفايروس البكتيري M13 كقالبٍ لغرض الترتيب الموجه لبلورات ZnS وCdS بهدف تكوين أسلاكٍ نانويةٍ مغناطيسية وشبهِ موصلة. هذا الفايروس يحيط جينومه المؤلَّف من جُزيئة DNA بعلبة (كابسيد) لولبيةٍ طوليةٍ طولُها حوالي ٨٨٠ن م وعرضها حوالي ٦,٥ن م، مكوَّن من حوالي ٢٧٠٠ وحدة بروتين pVIII. هذا البروتين كما بروتينات العلبة في بقية الفايروسات قابلٌ للتجميع التلقائي.

تم استخدام الفايروس البكتيري M13 كقالبٍ لتنصيبِ جُزيئات الصبغة بشكلٍ هوائيٍّ جامع للضوء من خلال الأواصر الكيميائية. يبدو أن الفوتونات الممتصة بواسطة الصبغات المركَّبة على الفايروس تنتقل خلال مدًى طويلٍ من تآثُرات ثنائيات القطب، وتخمدُ في المواضع الناشئة عن اقتران الإلكترون للصبغات. هذا يشير إلى أن نقل الطاقة بواسطة الصبغات المثبتة، قابل للتحكُّم من خلال حشر أو حذف الأحماض الأمينية وراثيًّا على بروتين كابسيد الفايروس pVIII وبالتالي تحوير طاقة المواضع والمسافة بين الصبغات (Nam *et al.*, 2010).

قام Park *et al.*, (2014) بتكوين منظومةٍ جامعةٍ للضوء قابلةٍ للتحكُّم باستخدام الفايروس البكتيري M13 القابل للتحوير الوراثي كقالبٍ ذاتي التجميع. تم برمجةُ جينات الفايروس للتحكُّم بموضَعة مواقع الارتباط لحوامل الصبغات من أجل مضاعفةِ إمكانيةِ إيجاد شبكاتٍ دقيقة لها لضبط نقل الطاقة. وبذلك تمكَّن الباحثون من تجريب ترتيباتِ شبكةِ حوامل الصبغة على امتداد طيفٍ بين النقل المتماسِك للإكسيتون ونقل Förster غير المتماسِك. وتم إيجاد ترتيباتٍ وسطيةٍ تبيِّن نقل الإكسيتون المحسَّن مقارنةً بالنقل غير المتماسِك. وهكذا تم توضيحُ أن ما بعد نقل Förster تزداد كفاءة النقل. وكما تُشير

الأبحاث النظرية أن في مثل هذا النظام يتآثَر التماسُك الكمومي وآليات اللاتماسُك لتسريع نقل الإكسيتون. هذا يماثل ما يحصُل في عملية التركيب الضوئي الحقيقي حيث تُسهِم الاهتزازات البيئية المصدَر أو عمليات التبديد، في ترشيد نقل الطاقة؛ وعليه تم زيادةُ طول انتشار الإكسيتون ٦٨٪ في هذا النظام الوسطي بين النظام الكمومي والنظام التقليدي.

(٢) تحسُّس البروتينات الخضراء التألُّق

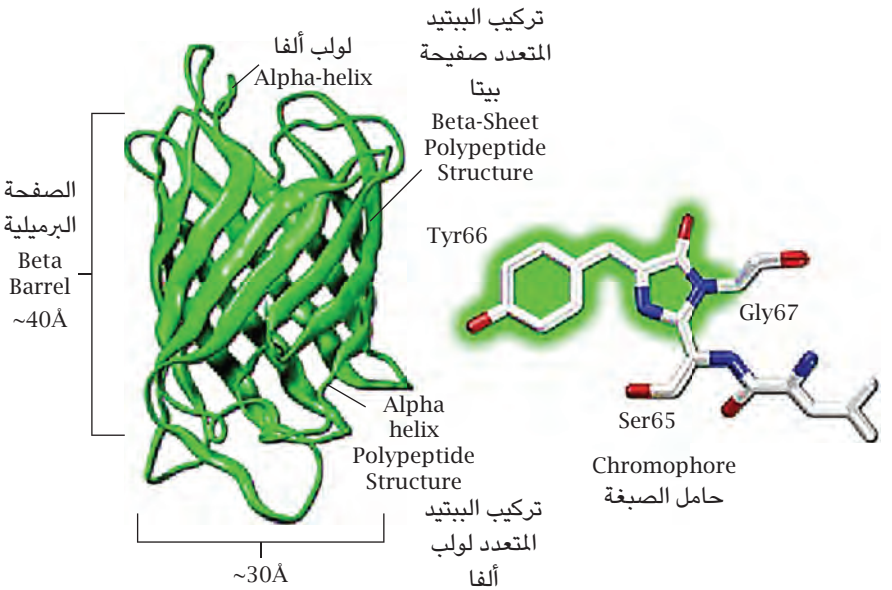
Sensing of Green Fluorescent Proteins

(٢-١) المطيافية الكمومية للبروتينات الخضراء التألُّق

Quantum Spectroscopy of Green Fluorescent Proteins

تم ملاحظة ظاهرة التألُّق، وهي عمليةُ إصدار ضوءٍ من قِبلِ بعض الأحياء كالحشرات وعددٍ من الأحياء المائية منذ القرن الأول الميلادي. إصدار هذا التألُّق الأحيائي يُستخدَم من قِبل الأحياء لأغراضٍ دفاعيةٍ وهجومية، وكوسيلة اتصالات. تم اكتشافُ البروتين الأخضر التألُّق وتنقيتُه من قِبل Shimomura سنة ١٩٦٢م، في قنديل البحر. عُزل البروتين Aequorin الذي يُصدِر تألقًا أزرق اللون، وبروتينٌ آخر هو البروتين الأخضر التألُّق Greenfluorescent protein (GFP). هذان البروتينان يعملان سويةً في الأعضاء الضوئية لقنديل البحر؛ حيث يقومان بتحويل الإشارات الوميضية المحفزة بأيونات الكالسيوم (Ca^{++}) إلى وميضٍ أخضر. البروتين Aequorin الذي ينقلُ الطاقة إلى البروتين الثاني، وهو البروتين الأخضر التألُّق، الذي يُصدِر الضوء الأخضر. يحتوي البروتين الأخضر التألُّق على حامل صبغة (Chromophore) مؤلَّف من عددٍ من ببتيدات الأحماض الأمينية؛ الكلايسين والتيروسين والسيرين، كما في الشكل ١٥-٦.

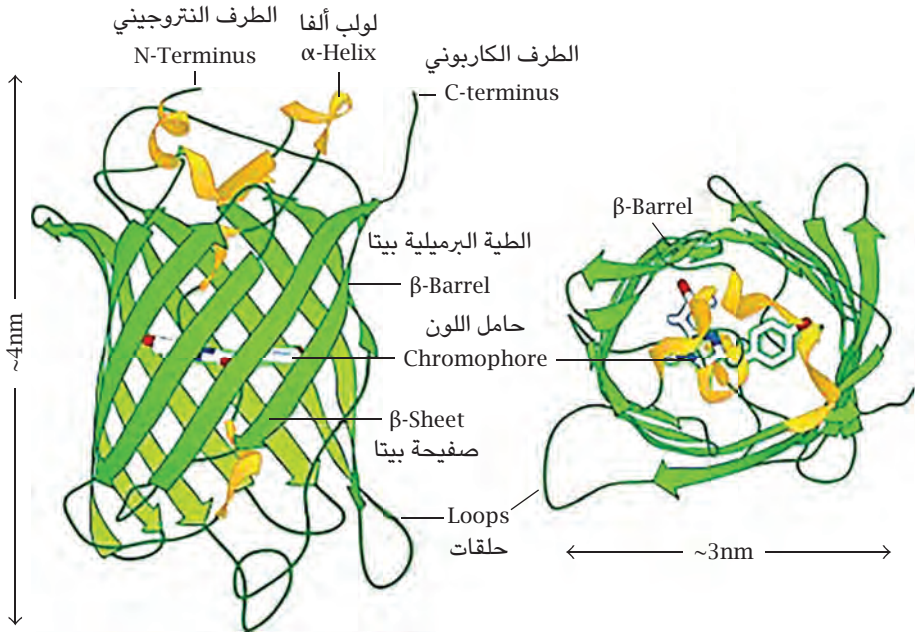
جميع البروتينات المتألِّقة تكون بحجومٍ حوالي ٢٥ك د، وهي أكبر من حجوم حوامل اللون العضوية التي تكون بحدود ١ك د. إن تألُّق هذه البروتينات يعتمد على التركيب الكامل لها، والذي يتألف من ١١ صفيحة β مطويةً بشكلٍ برميليٍّ β تُحيط بلولب α مركزي. حامل اللون في هذه البروتينات يتألَّف من عددٍ قليلٍ من الأحماض الأمينية، والتي تقع قرب مركز الصفيحة البرميلية. هذه الأحماض الأمينية تكون مشحونة أو مستقطبة وتحتجز العديد من جُزيئات الماء، وتتفاعل لتكوِّن حلقة أميدازول مع ارتباطاتٍ ممتدة (شكل ١٦-٧) (Kremers *et al.*, 2011).



شكل ١٦-٦: تركيب البروتين الأخضر الوميض لقنديل البحر *Aequorea victoria*. عن:
Piston, D. W., R. E. Campbell, R. N. Day and M. W. Davidson. Ziess, Education in microscopy and digital imaging.

وبعد كَلونَة الجين المشفر للبروتين الأخضر التألَّق سنة ١٩٩٢م، استُخدم البروتين لتتبُّع التعبير الجيني في البكتيريا والنيماتودا *Caenorhabditis elegans*. إن استخدام البكتيريا كمنتجٍ للبروتينات المتألِّقة من خلال نقل الجين المسئول عن تشفير البروتين المتألِّق إليها، سَهَّل على نحوٍ كبيرٍ جدًّا، الحصول على الكميات المطلوبة من هذه البروتينات، بعد أن كان الباحثون الأوائل يبذلون جهودًا مُضنِيةً بجمع مئات الآلاف من قناديل البحر، للحصول على ملغراماتٍ قليلة (شكل ١٦-٨).

فيما بعدُ تَمَّ هندسة GFP من قنديل البحر عَبْر التطفير لتكوين عددٍ كبيرٍ من البروتينات بالألوان الأزرق والسمائي والأصفر، وكذلك من أنواعٍ أخرى تَمَّ الحصول على بروتيناتٍ بتألُّق ألوان البرتقالي والأحمر والأحمر القاني (Kremers *et al.*, 2011; Hung, 2012) (شكل ١٦-٩).



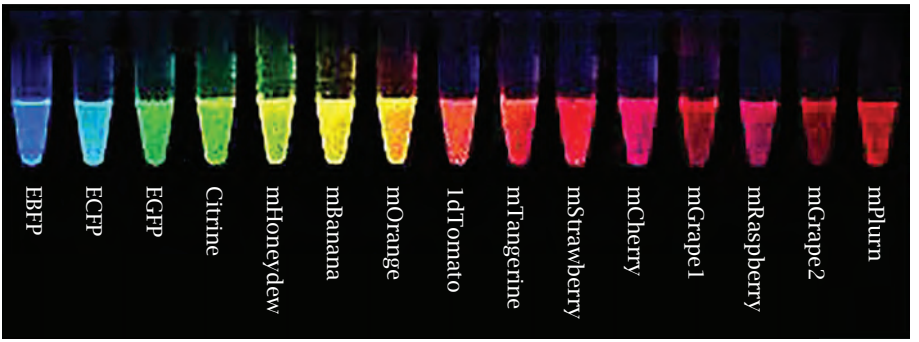
شكل ١٦-٧: معمارية البروتين الأخضر التألُّق GFP من قنديل البحر *Aequorea victoria*. عن: (Kremers *et al.* 2011).

لقد توسَّع استخدامُ البروتينِ الأخضرِ التألُّق في البيولوجي الجُزيئي والطب وبيولوجيا الخلية كموسمٍ أحيائيٍّ لمتابعة البروتينات والتعبير الجيني (Zimmer, 2002).

وتُستخدَم البروتينات المتألِّقة كموسماتٍ وراثية، وبذلك يمكن إدماجها باستخدام تقنيات التعديلات الوراثية والاستغناء عن الصبغات الخارجية وعمليات التثبيت وغيرها. ويُمكِن دمجُ البروتينات المتألِّقة مع البروتينات الهدف قيد الدراسة وبنسبة ١:١، وبذلك تمكِّن من التصوير الكمي. وهناك استخدامات المجهر الوميضي، قياس الانتشار الجُزيئي وتتبُّعه، وتطبيقات مجهر الجُزيئة المفردة، وعمل متحسِّساتٍ حيويةٍ لكشف الأيونات والجُزيئات الإشارية داخل الخلايا وقياس جهد غشاء الخلية، تنشيط المستقبِلات وغيرها من الوظائف الفسلجية. كذلك تُستخدَم البروتينات المتألِّقة في دراسة تآثُرات البروتين-البروتين.

شكل ١٦-٨: مستعمراتٌ بكتيريةٌ ملوَّنة بالبروتين الأخضر التألُّق GFP والبروتينات المشابهة ناميةٌ على الوسط الزرعي في طبقٍ بتري. عن: Roger Tsien (Tsien Lab Web site).

إن تطوُّر التقنيات الطيفية على أساس الحالات الكمومية للضوء، مكَّن من ملاحظة والتحكُّم بتآثُرات الضوء والمادة في المواد البيولوجية على المستوى الكمومي. وهكذا فإن تحقيق الضوء المتشابك في البروتينات المومضة، يمكن أن يكون تقنيةً واعدةً لتعدُّد المهمَّات التي يمكن أن تنجزها. وهكذا قام الباحثون Shi *et al.*, (2017) بتكوين حالة فوتونَين مُستقطِبَين متشابكَين من خلال المزج التلقائي الرباعي الموجة في البروتين الأخضر التألُّق المنشط aGFP. وتشير إعادة بناء ماتركس الكثافة أن حالة التشابُك تكون معرَّضةً لفك



شكل ١٦-٩: عددٌ من البروتينات المتألِّقة بألوانٍ مختلفة. عن: Roger Tsien (Tsien Lab Web site).

التماسُك الناشئة عن امتصاص الفوتونَين. غير أن الحالة المحضَّرة تكون أقلَّ حساسيةً لفك التماسُك البيئي بسبب الحماية التي يُوفِّرها تركيب صفيحة بيتا البرميلية، التي تحمي حامل الصبغة في البروتين. إن هذه التقنية الكمومية تمثِّل آليةً واعدةً لتطوير تقنيةٍ مطيافيةٍ كمومية ووسيلةِ قياسٍ كموميةٍ في المواد البيولوجية.

تم تطوير تقنية نقل طاقة رنين التألُّق الأحيائي Bioluminescence resonance energy transfer (BRET) بتحوير تقنية نقل طاقة رنين التألُّق Fluorescence resonance energy transfer والتي تستخدم مصدرَ ضوءٍ خارجي لتحفيز نقل التألُّق.

تُوفِّر تقنية BRET حساسيةً عالية وسهولةَ استخدامٍ لتحسُّس الجُزيئات الحيوية. هذه التقنية تعتمد على المسافة الفاصلة وتتضمَّن نقل طاقةٍ غيرِ إشعاعية؛ حيث تستخدم التألق الأحيائي للبروتين لإثارة المستقبِل بواسطة طاقة الرنين. حسَّاس BRET يتمكَّن من التحسُّس السريع للجُزيئة الهدف كميًّا دون استخدام مجالٍ كهرومغناطيسيٍّ خارجي، مثل الأشعة فوق البنفسجية، والتي يمكن أن تؤذي النسيج. ثمَّة العديد من البروتينات المتألِّقة أحيائيًّا، والتي يمكن استخدامها، إضافةً إلى استخدام النقاط الكمومية (Quantum dots). وحيث إن استخدام النقاط الكمومية يعتمد على الحجم، جعل استخدام BRET ممكنةً لمراقبة التغيُّرات في الجُزيئات المرصودة تتمُّ في الزمن الحقيقي (Real time) والتصوير داخل الجسمِ الحي (*In Vivo*).

هذه التقنية تُمكِّن من رصد تآثُرات بروتين-بروتين، وكذلك كشف الجُزيئات الحيوية واستخداماتٍ واسعةٍ في التصوير والتقنية النانوية الطبية (Hwang *et al.*, 2019).

استعرض Kim *et al.*, (2021) وقدَّموا تحديثًا للأبحاث المنشورة في البيولوجيا الكمومية، بما فيها البروتينات المتألِّقة، واعتبروها مجالًا جديدًا في البيولوجيا الكمومية.

إن عمل الظواهر الكمومية كالتشابُك في هذا الحقل، يؤكِّد حقيقة اعتماد الفعاليات الحيوية المختلفة على الظواهر الكمومية، ويؤكِّد دَور التركيب الخاص للجُزيئات الحيوية في الحفاظ على التماسُك الكمومي في درجات الحرارة الفسلجية، ومقاومة تأثير ضوضاء البيئة.

(٣) التحسُّس المغناطيسي Magnetosensing

(٣-١) آلية زوج الجذر في التحسُّس المغناطيسي

Radical pair mechanism for megnatosensing

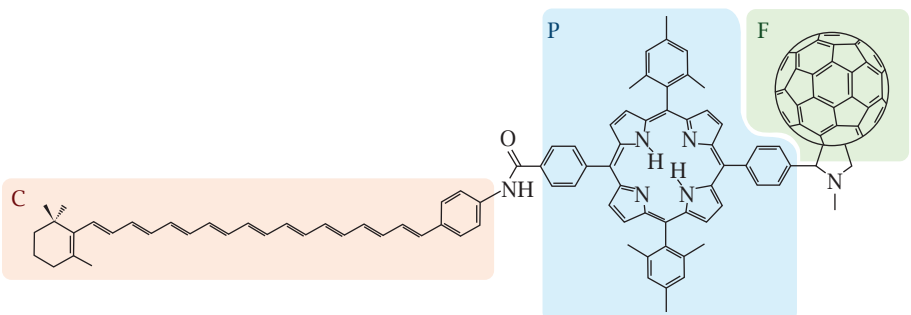
تم عرضُ موضوعِ التحسُّس المغناطيسي وتحديد الاتجاهات من قِبل الأحياء في الفصل الحادي عشر.

ثمَّة ثلاثُ آلياتٍ لتحسُّس المجال المغناطيسي؛ الفيريمغناطيسية والتحفيز الإلكترومغناطيسي والتفاعل الكيميائي المكوِّن لأزواج الجذور. كلها تعتمد على أحد الأسس التالية: تضخيم التأثير المغناطيسي، أو استخدام مادةٍ عالية الحساسية للمغناطيسية، أو عزل المنظومة عن الحمام الحراري (Thermal bath).

إحدى هذه الآليات، وهي والتفاعل الكيميائي المكوِّن لأزواج الجذور، تمثِّل بوصلةً كيميائيةً كُمومية. وحَظيَت باهتمامٍ كبير. يعتمد عمل هذه المنظومة على امتصاص فوتون من الضوء الأزرق من قِبل جُزيئة الصبغة الحسَّاسة للضوء FAD الموجودة في جُزيئة البروتين كربتوكروم؛ حيث يعاني تفاعُلات أكسدة-اختزال. تُستخدَم طاقة الفوتون لإطلاق إلكترون من إحدى ذرات جُزيئة FAD مُخلِّفةً فراغًا إلكترونيًّا ليتكون شبه الكينون $FADH^{\circ}$ مُكوِّنًا الجذر الأول. هذا الفراغ يمكن أن يُملأ بإلكترونٍ آخر يُمنح من زوجٍ من الإلكترونات المتشابكة كموميًّا في جُزيئة الحامض الأميني تربتوفان (Tryptophan) ضمن جُزيئة الكربتوكروم؛ حيث يعاني مزيدًا من الاختزال الضوئي مُكوِّنًا $FADH^-$ والذي ستُعاد أكسدتُه بمعزلٍ عن الضوء. وخلال هذه العملية يتكون الجذر الثاني، بينما

الإلكترونان يبقيان متشابكَين كُموميًّا، ويُكوِّنان حالاتِ تراكُب منفردة (Singlet)/ثلاثية (Triplet) والتي هي المنظومة الكيميائية الفائقة الحساسية للمجال المغناطيسي، والتي يتمكَّن الكائن الحي بواسطتها من تحديد موقع القطب المغناطيسي الأقرب.

كان Kodis *et al.*, (2004) قد حضَّروا مركزَ تفاعُل تركيبٍ ضوئيٍّ اصطناعي محاكي ثلاثي الجُزيئات، يتألَّف من ارتباط الكاروتين (C) مع البورفيرين (P) والفوليرين (F): C–P–F. يعمل البورفيرين كرابط وناقل شحنة، بينما يعمل الكاروتين كمانحِ إلكترونٍ ثانوي والفوليرين (Fullerene) كمستقبِل إلكترون. إن إثارة البورفيرين تُتبَع بنقل الإلكترون المحفَّز ضوئيًّا إلى الفوليرين (T = ٣٢ بيكوثانية)، ليعطي $C - P^{\bullet+} - C_{60}^{\bullet-}$. نقل الإلكترون من الكاروتين إلى الأيون الموجب البورفيرين (T = ١٢٥ بيكوثانية) يعطي حالةً نهائية $C^{\bullet+} - P - C_{60}^{\bullet-}$ بكفاءة إجمالية ٠,٩٥.



شكل ١٦-١٠: تركيب الثلاثي المكون C–P–F لتوضيح مبدأ عمل البوصلة الكيميائية. التحوُّل المتبادَل بين حالتَي المنفردة (S) والثلاثية (T) لزوج الجذر $[C^{\bullet+} - P - F^{\bullet-}]$ يتم بواسطة التأثُّر المغناطيسي الفائق الدقة، ويُكيَّف بتأثُّرات زيمان بالمجال المغناطيسي الخارجي. عن: Maeda *et al.* (2008).

استخدم Maeda *et al.*, (2008) المنظومة الاصطناعية الثلاثية المُكوِّنات المؤلَّفة من جُزيئات كاروتين – بورفيرين – فوليرين للباحثين Kodis *et al.*, (2004) كما في الشكل ١٦-١٠ كبوصلةٍ كيميائيةٍ كُمومية. وعند تعريض المنظومة للضوء الأخضر، تتمكَّن من فصل الإلكترونات على امتداد الجُزيئة، وتستجيب للمجال المغناطيسي الضعيف جدًّا (٥٠ ميكروتيسلا) كالمغناطيس الأرضي، وهي تعتمد أيضًا على الحالة المنفردة والثلاثية لزوج الجذر $[C^{\bullet+} - P - F^{\bullet-}]$ ولكن في درجة حرارة ١١٣ كالفن (–١٦٠م°).

حسب Cai (2011) فإن تدريج المجال المغناطيسي يُحسِّن كثيرًا من أداء البوصلة الكيميائية المعتمدة على التشابُك الكُمومي بين أزواج الجذور. وقد حسَّن الباحث من أداء البوصلة الكمومية خاصةً تحسُّس الاتجاه باستخدام التدرُّج المغناطيسي، ويُمكِن حسَب الباحث تحسُّس المجال المغناطيسي في منظومة البوصلة الهجينة المكوَّنة من جُسيماتٍ معدنية، مغناطيسية، نانوية، وأزواج جذور لجُزيئاتٍ عضوية. والجهاز يستلهم النموذج البيولوجي لمتحسِّس المجال المغناطيسي الضعيف، وفي درجة حرارة الغرفة.

وأكَّد Kerpal *et al.*, (2019) وباستخدام النموذج الثلاثي الجُزيئة على صحة عمل آلية زوج الجذور في تحسُّس الطيور للمغناطيس الأرضي، وقدَّموا اقتراحاتٍ لتطوير تصميم وعمل نُظم البوصلة الكيميائية.

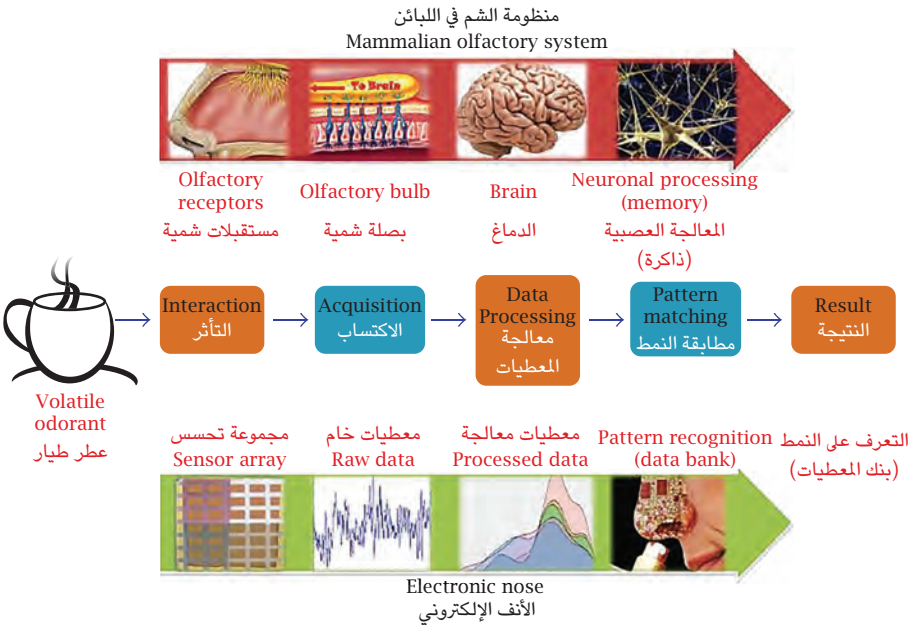
(٤) تقنيات تحسُّس الروائح Odor sensing technologies

يستعرض الفصلُ العاشرُ نظرياتِ تفسير حاسة الشم في الإنسان والحيوانات. ثمَّة النظرية التقليدية المعروفة بنظرية القفل والمفتاح، ونظرية الاهتزاز، ونظرية بطاقة المرور التي تعتمد على شكل جُزيئة العطر، ونظرية الاهتزاز غير المرن لجُزيئةٍ مستقبِلة تمكِّن من تسرُّب الإلكترون بقدرتها على الاهتزاز بنفس التردُّد، والذي يُفضي إلى نقل الإشارة من المستقبِل الشمي إلى الدماغ وتمييزها.

وانطلاقًا من كون المواد العطرية هي مواد كيميائية طيَّارة، يمكن أن تتفاعَل مع موادَّ كيميائيةٍ أخرى، اكتشفَت عددًا من المتحسِّسات الكيميائية للروائح. ومع صعود التقنية النانوية، صار بالإمكان تطوير آلاتٍ دقيقةٍ تُساعِد في كشف الروائح لبعض الأغراض العلمية أو الصناعية أو الأمنية وصولًا إلى الأنف الإلكتروني.

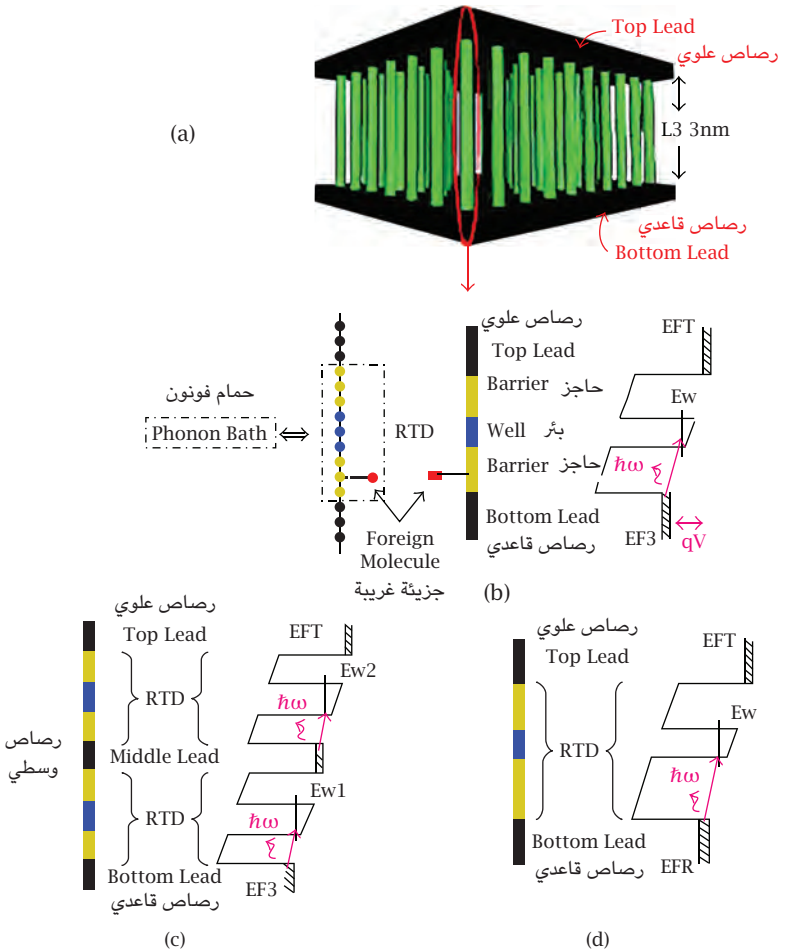
أوَّل من سَكَّ مصطلح الأنف الإلكتروني J. W. Gardner وP. N. Bartlett سنة ١٩٨٨م، وعرَّفا الأنف الإلكتروني على أنه جهازٌ يتضمَّن مجموعة من المتحسِّسات الكيميائية الإلكترونية ذات خصوصيةٍ جُزيئيةٍ ومنظومة، تُعرِّف على أنماطٍ مناسبةٍ قادرة على التعرُّف على الروائح البسيطة أو المعقَّدة. وحيث إن هذه الأجهزة لا تتحسَّس الروائح فقط، فقد اقترح Ramgir (2013) تعريف الأنف الإلكتروني على أنه: منظومةٌ تحسُّسٍ كيميائيةٌ ذكية، تُحاكي المنظومة الشمِّية في اللبائن. ومع أن كفاءة الأنف الإلكتروني أقل كثيرًا من منظومة الشم في اللبائن، إلا أنها يمكن أن تُستخدَم لأغراضٍ تتفوَّق بها على المنظومة الطبيعية.

يتألَّف الأنف الإلكتروني من مجموعة من المتحسِّسات الكيميائية، دوائر إلكترونية وبرامج تحليلِ معلومات. كما يمكن أن يحتوي أيضًا على أخذ العينات، الترشيح، ومنظومة تكييف (لتكرارية جمع المزيج)، كما في الشكل ١٦-١١.



شكل ١٦-١١: رسمٌ تخطيطيٌّ لمقارنة الأنف الإلكتروني مع منظومة الشم في اللبائن. مُحوَّر عن: Ramgir (2013).

وتماشيًا مع نظرية الاهتزاز في تحسُّس الروائح بيولوجيًّا، صمَّم Patil *et al.*, (2018) أنفًا إلكترونيًّا وهو دايود تسرُّب اهتزازي Resonant tunneling diode (RTD) ثُنائي الحاجز، أُحادي البُعد، مستندين على مبدأ مطيافية التسرُّب الإلكتروني غير المرن Inelastic electron tunneling spectroscopy (IETS) المحفَّز بالفونونات. وفي الوقت الذي يتطلَّب نظام IETS القياسي العمل في درجات الحرارة الواطئة لتفادي التوسيع الحراري للقمم المطيافية، فإن الاحتواء الكمومي في بئر RTD يُوفِّر ترشيح الطاقة الإلكترونية، وبذلك يسمح بعمل المنظومة في درجة حرارة الغرفة. كما وجد الباحثون أن قمم IETS المقابلة



شكل ١٦-١٢: (a) شبكةٌ ثلاثيةُ الأبعاد من الأسلاك النانوية. (b) من اليسار إلى اليمين- ترتيب جزيئي، تركيب تخطيطي ومخطَّط بياني للحزمة (متضمنًا توضيحًا للتسرُّب المحفَّز بالفونونات) لسلك دايود التسرب الاهتزازي RTD النانوي. (c) من اليسار إلى اليمين سلك نانوي مع RTD متناظرة مربوطة على التوالي وتقابل مخطَّطًا بيانيًّا للحزمة. (d) من اليسار إلى اليمين سلك نانوي مع RTD غير متناظر ويقابل مخطَّطًا بيانيًّا للحزمة. محوَّرة عن: Patil *et al.*, (2018).

للجُزيئات الغريبة المدمصة التي تنحرف بنغمةٍ أحاديةٍ على طول نسق الفولتية مع طاقاتها الاهتزازية، تمكِّن من التحسُّس الانتخابي (شكل ١٦-١٢).

لاحظ الباحثون أن حاجزًا واحدًا من حواجز RTD التي هي على جانب المرسل، يكون فعَّالًا لتحسُّس الجُزيئات الغريبة. إن تصميم RTD المعروض في هذا البحث، يمكن أن يتحسَّس جُزيئات ذات طاقةِ اهتزازٍ بحدود ٠,٠٩ إلى ٠,١٥ إلكترون فولت. علمًا أن جُزيئات المواد المتفجِّرة مثل: Nitramine (RDX) وTNT وأستر النترات (PETN) لها طاقات اهتزازٍ تقع ضمن هذا المدى. ولغرضِ كشفِ روائحِ أنواعٍ أخرى من الجُزيئات يمكن تحوير ارتفاع وعرض الـ RTD لتغيير مدى طاقة التحسُّس، واستخدام أعدادٍ مضاعفة من RTD مرتبطةٍ لقياس كل طيف الاهتزاز.

إن وسيلة التحسُّس هذه تُقرِّب الباحثين أكثر من محاكاةِ آليةِ الشم في الحيوانات، والتمكُّن من تحقيق الأنف الإلكتروني الفعَّال.

مراجع

هوكنج ستيفن، ٢٠٠٦م، تاريخ موجز للزمان، من الانفجار الكبير حتى الثقوب السوداء، ترجمة مصطفى إبراهيم فهمي، الهيئة المصرية العامة للكتاب، ص١٦٥.

تايسون، نيل ديجراس ودونالد جولد سميث، ٢٠١٢م، البدايات: ١٤ مليار عام من تطور الكون، ترجمة محمد خضر فتحي، القاهرة، كلمات عربية للترجمة والنشر، ص٣١٥.

غليك، جيمس، ١٩٨٧م، نظرية الفوضى، علم اللامتوقع، ترجمة أحمد مغربي، ص٣٩٥.

فراس السواح، ٢٠٠٢م، لغز عشتار، الألوهة المؤنثة وأصل الدين والأسطورة، دار علاء الدين، ص٤٣٦.

شريف، فياض محمد، a ٢٠١٢م، مدخل إلى وراثة الفطريات، الذاكرة للنشر والتوزيع، ص٢٧٧.

شريف، فياض محمد، b ٢٠١٢م، أمراض النبات والأسس الجزيئية للإصابة والمقاومة، الذاكرة للنشر والتوزيع، ص٦٨٥.

شريف، فياض محمد، c ٢٠١٢م، تصنيف وتقسيم الفطريات، الذاكرة للنشر والتوزيع، ص٧٨٤.

Aarholt, E., E. A. Flinn and C. W. Smith. 1981. Effects of low-frequency magnetic fields on bacterial growth rate. *Phys. Med. Biol.*, 26: 613–621.

Abbott, D., P. C. W. Davies and A. K. Pati. 2008. Quantum Aspects of Life. Imperial College Press. Pdf, 469 pp.

Abrahão, J., L. Silva, L. S. Silva, J. Y. B. Khalil *et al.* 2018. Tailed giant Tupanvirus possesses the most complete translational apparatus of the known virosphere. *Nat. Commun.*, 9, 749. Pdf 12 pp.

Adamala, K. and J. W. Szostak. 2013a. Competition between model protocells driven by an encapsulated catalyst. *Nature Chemistry*, 5: 495–501.

Adamala, K. and J. W. Szostak. 2013b. Nonenzymatic template–directed RNA synthesis inside model protocells. *Science*, 342: 1098–1100.

Adamatzkya, A., J. Tuszynski, J. Pieper, D. V. Nicolaud, R. Rinalndi, G. Sirakoulis, V. Erokhing J. Schnaußh and D. M. Smith. 2018. Towards cytoskeleton computers. A proposal. *arXiv*: 1810.04981v1 [cs.ET] 11 Oct 2018.

Adams, B. and F. Petruccione. 2019. Quantum effects in the brain: A review. arXiv: 1910.08423v1 [q–bio.NC]. pdf, 42 pp.

Adamski, P., M. Eleveld, A. Sood, A. Kun, A. Szilagyi, T. Czaran, E. Szathmary and S. Otto. 2020. From self–replication to replicator systems en route to de novo life. *Nature Reviews Chemistry*, pdf, 8 pp. DOI: 10.1038/s41570–020–0196–x.

Aerts, D., J. Broekaert, L. Gabora and S. Sozzo. 2013. Quantum structure and human thought. *Behav. Brain. Sci.*, 36: 274–276.

Ahmad, A. M., I. A. G. Yahya and A. W. Sh. Jabir. 2013. Effect of Magnetic Field Energy on Growth of Aspergillus flavus and Aflatoxins production. *Journal of Al–Nahrain University*, 16 (2): 180–187.

Alberts, B., A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts and P. Walter. 2002. Molecular biology of the cell, 4th edition. New York: Garland Science.

Alboresi, A., M. Ballottari, R. Hienerwadel, G. M. Giacometti and T. Morosinotto. 2009. Antenna complexes protect Photosystem I from Photoinhibition. *BMC Plant Biology*, 9: 71. Pdf 14 pp.

Albrecht–Buehler, G. 1985. Is cytoplasm intelligent too? *Cell Muscl Motil.*, 6: 1–21. https://doi.org/10.1007/978–1–4757–4723–2_1

Allison, L. A. 2007. Fundamental molecular biology. Blackwell Publishing. 748 pp.

Arndt, M., T. Juffmann and V. Vedral. 2009. Quantum physics meets biology. *HFSP Journal*, 3 (6): 386–400.

Arute, F., K. Arya, R. Babbush, *et al.* 2019. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574: 505–510. https://doi.org/10.1038/s41586–019–1666–5

Ashley, J., B. Cordy, D. Lucia, L. G. Fradkin, V. Budnik and T. Thomson. 2018. Retrovirus–like Gag protein Arc1 binds RNA and traffics across synaptic boutons. *Cell*, 172: 262–274.

Asogwa, C. 2019. Quantum Biology: Can we explain olfaction using quantum phenomenon? *arXiv*: 1911.02529v1 [physics.bio–ph] 3 Nov 2019. Pdf, 16 pp.

Baars, B. J. & D. B. Edelman. 2012. Consciousness, biology and quantum hypotheses. *Phys Life Rev*, 9: 285–294.

Baluška, F. 2010. Recent surprising similarities between plant cells and neurons. *Plant Signaling & Behavior* 5: 2, 87–89.

Baluška, F. and M. Levin. 2016. On Having No Head: Cognition throughout Biological Systems. *Front. Psychol.* 7: 902. Pdf, 19 pp.

Baluška, F., K. Yokawaa, S. Mancusob and K. Baverstock. 2016. Understanding of anesthesia – Why consciousness is essential for life and not based on genes. *Communicative & Integrative Biology*, 9 (6), e1238118 (12 pages).

Bandaria, J. N., C. M. Cheatum, and A. Kohen. 2009. Examination of enzymatic H–tunneling through kinetics and dynamics. *J Am Chem Soc.*, 131 (29): 10151–10155.

Barodka, V. M., E. Acheampong, G. Powell, L. Lobach, D. A Logan, Z. Parveen, V. Armstead and M. Mukhtar. 2006. Antimicrobial effects of liquid anesthetic isoflurane on *Candida albicans*. *J Transl Med*., 4: 46. pdf, 8 pp.

Bar–Yam, Y. 1997. Dynamics of complex systems. Westview Press. 865 pp.

Basran, J., M. J. Sutcliffe and N. S. Scrutton. 1999. Enzymatic H–transfer requires vibration–driven extreme tunneling. *Biochemistry*, 38: 3218–3222.

Bateson, G. 1972. Steps to an ecology of mind: collected essays in anthropology, psychiatry, evolution, and epistemology. University of Chicago Press.

Beamish, C. and E. Kutter. 2001. Viroids. Encyclopedia of Genetics. 2001, Page 2107 https://doi.org/10.1006/rwgn.2001.1367

Belon P, J. Cumps, M. Ennis, P. F. Mannaioni and M. Roberfroid. 2004. Histamine dilutions modulate basophil activation. *Inflammation Research*, 53: 181–188.

Berg, I. A., D. Kockelkorn, W. H. Ramos–Vera, R. F. Say, J. Zarzycki, M. Hügler, B. E. Alber and G. Fuchs. 2010. Autotrophic carbon fixation in archaea. *Nature Reviews*, 8: 447–460.

Berk, S. G., S. Srikanth, S. M. Mahajan and C. A. Ventrice. 1997. Static uniform magnetic fields and amoebae. *Bioelectromagnetics*, 18: 81–84.

Bermudes, D., G. Hinkle and L. Margulis. 1994. Do prokaryotes contain microtubules?. *Microbiological Reviews*, 58 (3): 387–400.

Bertalanffy, Ludwig Von. 1972. The History and Status of General Systems. *The Academy of Management Journal*, 15 (4): 407–426.

Bhatia, S. 2018. Introduction to enzymes and their applications. Chapter One In: Introduction to Pharmaceutical Biotechnology, Volume 2 Enzymes, proteins and bioinformatics. IOP Publishing. Pdf, 31 pp.

Bischof, M. and E. Del Giudice. 2013. Communication and the emergence of collective behavior in living organisms: A quantum approach. *Mol Biol Int*. [Epub ahead of print]. Pdf, 20 pp. doi 10.1155/2013/987549.

Blakemore, R. P. 1975. Magnetotactic bacteria. *Science,* 190: 377–379.

Blackmore, S. 1995. The Meme Machine. Oxford: Oxford University Press.

Boelens, M. H. and L. J. van Gemert. 1993. Volatile character–impact sulfur compounds and their sensory properties. *Perfum. Flavorist*, 18: 29–39. Cited by Genva *et al*. (2019)

Bordonado, M. and V. Ogryzko. 2013. Quantum biology at the cellular level – elements of the research program. *Biosystems*, 112: 11–30.

Bordoni, B. and M. Simonelli. 2018. The Awareness of the Fascial System. *Cureus*, 10 (10): e3397.
DOI 10.7759/cureus.3397.

Bordoni, B., F. Marelli, B. Morabito and B. Sacconi. 2018. Emission of bio–photons and adjustable sounds by the fascial system: Review and re–flections for manual therapy. *Journal of Evidence–Based Integrative Medicine,* 23: 1–6.

Bostick, D. L. and Brooks, C. L. III. 2007. Selectivity in K+ channels is due to topological control of the permeant ion's coordination state. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104: 9260–9265.

Bramhill, D. and C. M. Thompson. 1994. GTP–dependent polymerization of Escherichia coli FtsZ protein to form tubules. *Proc Natl Acad Sci U S A*., 91 (13): 5813–5817.

Brea, R. J., C. M. Cole and N. K. Devaraj. 2014. In Situ vesicle formation by native chemical ligation. Angew Chem Int Ed Engl., 53 (51): 14102–14105. doi: 10.1002/anie.201408538.

Braker, R. 2015. The RNA world. A lecture at Yale University on August 21, 2015.

Brenner D. J., J. T. Staley and N. R. Krieg. 2001. Classification of Procaryotic Organisms and the Concept of Bacterial Speciation. In: Boone D. R., Castenholz R. W., Garrity G. M. (eds) Bergey's Manual ® of Systematic Bacteriology. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978–0–387–21609–6_4

Briegel, H. J. and S. Popescu. 2014. A perspective on possible manifestations of entanglement in biological systems. Chapter 14, In Masoud Mohseni, Yasser Omar, Greg Engel, and Martin B. Plenio, editors, *Quantum Effects in Biology*, pp. 295–328. Cambridge University Press.

Broecker, F. and K. Moelling. 2019. What viruses tell us about evolution and immunity: beyond Darwin? *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1447: 53–68. doi: 10.1111/nyas.14097.

Brookes, J. C. 2010. Science is perception: what can our sense of smell tell us about ourselves and the world around us? *Phil. Trans. R. Soc.*, A 368: 3491–3502.

Brookes, J. C. 2017 Quantum effects in biology: golden rule in enzymes, olfaction, photosynthesis and magnetodetection. *Proc. R. Soc. A* 473: 20160822. http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0822

Brookes, J. C., A. P. Horsfield and A. M. Stoneham. 2009. Odour character differences for enantiomers correlate with molecular flexibility. *J. R. Soc. Interface*, 6: 75–86. Cited by Genva *et al.* (2019)

Budin, I., Szostak, J. W., 2011. Physical effects underlying the transition from primitive to modern cell membranes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108: 5249–5254.

Bushdid, C., M. O. Magnasco, L. B. Vosshall and A. Keller. 2014. Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli. *Science*, 343: 1370–1380.

Cabeen, M. T and C. Jacobs–Wagner. 2010. The bacterial cytoskeleton. *Annu Rev Genet.*, 44: 365–392.

Cabrera, Derek Anthony. 2006. Systems Thinking. A dissertation presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Pdf. 303 pp.

Cai, J. 2011. Quantum probe and design for a chemical compass with magnetic nanostructures. *Physical Review Letters*, 106 (10), pdf, 4 pp.

Cairns, J., J. Overbaugh and S. Miller. 1988. The origin of mutants. *Nature*, 8, 335 (6186): 142–145.

Cairo, P., B. Greenebaum and E. Goodman. 1998. Magnetic field exposure enhances mRNA expression of σ32 in *E. coli* . *J. Cell Biochem.*, 68: 1–7.

Calvo, P., M. Gagliano, G. M. Souza and A. Trewavas. 2019. Plants are intelligent, here's how. Article in *Annals of Botany* · October 2019 DOI: 10.1093/aob/mcz155/5575979. Pdf, 70 pp.

Calladine, C. R., H. R. Drew, B. F. Luisi and A. A. Travers. 2004. Understanding DNA the molecule and how it works. 3rd. Ed. Published by Elsevier Ltd. Pdf, 349 pp.

Cantero, M. dR., C. V. Etchegoyen, P. L. Perez, N. Scarinci1 and H. F. Cantiello. 2018. Bundles of brain microtubules generate electrical oscillations. *Scientific Reports*, 8: 11899 DOI: 10.1038/s41598–018–30453–2. Pdf, 10 pp.

Cantero, M. dR., P. L. Perez, N. Scarinci and H. F. Cantiello. 2019. Two–dimensional brain microtubule structures behave as memristive devices. *Scientific Reports*, 9: 12398 https://doi.org/10.1038/s41598–019–48677–1. Pdf, 10 pp.

Cao, J., R. J. Cogdell, D. F. Coker, H–G Duan, *et al.* 2020. Quantum biology revisited. *Sci. Adv.*, 6: eaaz4888.

Capolupo, A., T. J. A. Craddock, P. Kurian and G. Vitiello. 2016. Water–mediated correlations in DNA–enzyme interactions. *arXiv* 2016, rXiv: 1608.08097. pdf, 18 pp.

Caruso, F., A. W. Chin, A. Datta, S. F. Huelga and M. B. Plenio. 2009. Highly efficient energy excitation transfer in light–harvesting complexes: The fundamental role of noise–assisted transport. *arXiv*: 0901.4454v2 [quant–ph] 19 Jun 2009. Pdf, 16 pp.

Caruso, F., A. W. Chin, A. Datta, S. F. Huelga and M. B. Plenio. 2010. Entanglement and entangling power of the dynamics in light–harvesting complexes. *arXiv*: 0912.0122v2 [quant–ph] 14 Jun 2010. Pdf, 8 pp.

Castro, A. O., F. F. Olsen, C. F. Lee and N. F. Johnson. 2008. Ultrafast quantum dynamics in photosynthesis. Chapter 4 pages 51–69 In: Quantum aspects of life. Editors, Derek Abbott, Paul C. W. Davies, Arun K. Pati, Paul C. W. Davies. Imperial College Press. Pdf, 469 pp.

Cavalier–Smith, T. 1981. Eukaryote kingdoms: seven or nine? *Biosystems*, 14: 461–481.

Cavalier–Smith, T. 2018. Kingdom Chromista and its eight phyla: a new synthesis emphasising periplastid protein targeting, cytoskeletal and periplastid evolution, and ancient divergences. *Protoplasma*, 255: 297–357 DOI 10.1007/s00709–017–1147–3.

Cha, Y., C. J. Murray and J. Klinman. 1989. Hydrogen tunneling in enzyme reactions. *Science*, 243 (3896): 1325–1330.

Cha, Y., Murray, C. J. and Klinman J. P. 1989 Hydrogen tunnelling in enzyme–reactions. *Science*, 243 (3896): 1325–1330.

Chaplin, M. F. 2001. Water: its importance to life. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 29: 54–59.

Chaves, I., R. Pokorny, M. Byrdin, N. Hoang, T. Ritz, K. Brettle, L. O. Essen, G. T. J. van der Horst, A. Batschauer and M. Ahmad. 2011. The cryptochromes: blue light photoreceptors in plants and animals. *Annual Review of Plant Biology*, 62: 335–364.

Chen, I. A., Roberts, R. W., Szostak, J. W., 2004. The emergence of competition between model protocells. *Science*, 305: 1474–1476.

Chen, I. A., K. Salehi–Ashtiani and J. W. Szostak. 2005. RNA catalysis in model protocell vesicles. *J. Am. Chem. Soc.*, 127: 13213–13219.

Chen, M, M. Schliep, R. D. Willows, Z–L. Cai, B. A. Neilan and H. Scheer. 2010. A Red–Shifted Chlorophyll. *Science*, 329 (5997): 1318–1319.

Chenu, A. and G. D. Scholes. 2015. Coherence in energy transfer and photosynthesis. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 66: 69–96.

Cho H, Jönsson H, Campbell K, Melke P, Williams JW, *et al.* 2007. Self–organization in high–density bacterial colonies: efficient crowd control. *PLoS Biol*, 5 (11): e302. doi: 10.1371/journal.pbio.0050302.

Cifra, M., J. Z. Fields and A. Farhadi. 2010. Electromagnetic cellular interactions. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, xxx: 1–24. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2010.07.003.

Cigoj, A. 2013. Physics of smell. Seminar Cigoj. Ljubljana. Pdf, 14 pp. http://www–f1.ijs.si/~rudi/sola/Physicsofsmell.pdf

Cleveland, John. 1994. Complexity theory basic concepts and application to systems thinking. Innovation Network for Communities.

Cockell, C. S. 2017. The laws of life. *Physics Today*, 70 (3): 42–48.

Cochrane, J. C. and S. A. Strobel. 2008. Riboswitch effectors as protein enzyme cofactors. *RNA*, 14: 993–1002.

Cook, E. S. and M. J. Smith. 1964. Increase of trypsin activity. In: M. F. Barnothy (Ed.): Biological effects of magnetic fields. Plenum Press, New York London, pp. 246–254. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Conrad, M. 1990. Quantum mechanics and cellular information processing: The self–assembly Paradigm. *Biomed Biochim Acta*, 49 (8–9): 743–755.

Cooper, G. M. 2000. The Cell: A Molecular Approach. 2nd edition. Sunderland (MA): Sinauer Associates; Lysosomes. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK9953/

Corliss, J. O. 2000. Biodiversity, classification, and numbers of species of protists. In: Raven PH (ed) Nature and human society: the quest for a sustainable world. National Academy, Washington, DC, pp 130–155.

Cornell, C. E., R. A. Blacka, M. Xuea, H. E. Litz, A. Ramsay, M. Gordon, A. Mileant, Z. R. Cohen, J. A. Williams, K. K. Lee, G. P. Drobny, and S. L. Keller. 2019. Prebiotic amino acids bind to and stabilize prebiotic fatty acid membranes. *PNAS*, 116 (35): 17239–17244.

Craddock, T. J., J. A. Tuszynski, A. Priel and H. Freedman. 2010. Microtubule ionic conduction and its implications for higher cognitive functions. *J. Integr. Neurosci.*, 9: 103–122. doi: 10.1142/S0219635210002421475 7–4723–2_1.

Craddock, T. J. A., D. Friesen, J. Mane, S. Hameroff and J. A. Tuszynski. 2014. The feasibility of coherent energy transfer in microtubules. *J. R. Soc. Interface*, 11: 20140677. Pdf, 9 pp. http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2014.0677

Creath, K. and G. E. Schwartz. 2005. Biophoton interaction in biological systems: evidence of photonic info–energy transfer? The Nature of Light: What Is a Photon?, edited by Chandrasekhar Roychoudhuri, Katherine Creath, Al F. Kracklauer, Proceedings of SPIE Vol. 5866 (SPIE, Bellingham, WA, 2005)

Cremer–Bartels, G., K. Krause, G. Mitoskas and D. Brodersen. 1984. Magnetic fields of the earth as additional Zeitgeber for endogenous rhythms?, *Naturwiss.*, 71: 567–574. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Cresser, J. D. 2011. Quantum Physics Notes. Department of Physics, Macquarie University. pdf, 238 pp.

Crick, F. H. C. 1968. The origin of the genetic code. *J. Mol. Biol.* 38: 367–379.

Cupellini, L., D. Calvani, D. Jacquemin and B. Mennucci. 2020. Charge transfer from the carotenoid can quench chlorophyll excitation in antenna complexes of plants. *Nature Communications*, 11: 662. Pdf, 8 pp.

Dannenberg, O. 2008. Coherence theory and coherence phenomena in a closed spin-1/2 system. *Annalen der Physik*, 17 (6): 355–373.

Davenas, E., F Beauvais, J Amara, M Oberbaum, B Robinzon, A Miadonna, A Tedeschi, B Pomeranz, P Fortner, P Belon, J. Sente–Laudy, B. Poetivin anf J. Benveniste. 1988. Human basophil degranulation triggered by very dilute antiserum against IgE. *Nature*, 30; 333 (6176): 816–8. doi: 10.1038/333816a0.

Davies, P. 2004. Quantum mechanics and the origin of life. Bioastronomy 2002: Life Among the Stars fA U Symposium, Vol. 213, 2004 R. P. Norris and F. H. Stootman (eds.)

Davies, P. C. W. 2008. A Quantum Origin of Life. Chapter One In: Quantum aspects of life. Editors, Derek Abbott, Paul C. W. Davies, Arun K. Pati, Paul C. W. Davies. Imperial College Press. Pdf, 469 pp.

Dawkins, R. 1976. The Selfish Gene. Oxford: Oxford University Press.

Dawkins, R. 1996. River out of Eden. A Darwinian view of life. Basic Books.

Deacon. J. 2003. The microbial world. Fungal tip growth and hyphal tropism. http://archive.bio.ed.ac.uk/jdeacon/microbes/apical.htm

Demetrius, L. A. 2008. Quantum metabolism and allometric scaling relations in biology. Chapter 8, pages 127–146 In: Quantum aspects of life. Editors, Derek Abbott, Paul C. W. Davies, Arun K. Pati, Paul C. W. Davies. 2008. Quantum aspects of life. Imperial College Press. Pdf, 469 pp.

Demetrius, L. A. 2013. Boltzmann, Darwin and directionality theory. *Phys. Rep.*, 530: 1e85.

Dennett, D. 1995. Darwin's Dangerous Idea. New York: Touchstone Publishing.

del Sol, F. G., J. R. Penade's and A. Marina. 2019. Deciphering the molecular mechanism underpinning phage arbitrium communication systems. *Molecular Cell*, 74: 59–72.

DeVault, D. and Chance, B. 1966 Studies of photosynthesis using a pulsed laser: temperature dependence of cytochrome oxidation rate in chromatium. Evidence for tunneling. *Biophys. J.* 6, 825–847. (doi: 10.1016/S0006-3495 (66: 86698-5). Cited by McFadden & Al-Khalili (2018)

De Wolf, Tom and Tom Holvoet. 2005. Emergence Versus Self-Organisation: Different Concepts but Promising When Combined. S. Brueckner *et al.* (Eds.): ESOA 2004, LNCS 3464 pp. 1–15, 2005. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.

Dihel, L. E., J. Smith-Sonneborn C. R.Middaugh. 1985. Effects of extremely low frequency electromagnetic field on the cell division rate and plasma membrane of *Paramecium tetraurelia*. Biolelectromagnetics, 6: 61–71. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

DiVincenzo, D. 2000. The physical implementation of quantum computation. *Fort. Phys.*, 48: 771.

Domingo, E. 2020. Introduction to virus origins and their role in biological evolution. Chapter 1 In: Virus as Populations. 2020: 1–33. doi: 10.1016/B978-0-12-816331-3.00001-5.

Dou, C., J. Xiong, Y. Gu, K. Yin, J. Wang, Y. Hu, D. Zhou, X. Fu, S. Qi, X. Zhu,.S. Yao, H. Xu, C. Nie, Z. Liang, S. Yang, Y. Wei and W. Cheng. 2018. Structural and functional insights into the regulation of the lysis–lysogeny decision in viral communities. *Nature Microbiology*, 3: 1285–1294.

Drexler, E. 1986. Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology. 272 pp.

Dufossé, L., A. Latrasse and H-E Spinnler. 1994. Importance des lactones dans les arômes alimentaires. *Sci des Aliment.*, 14: 17–50. Cited by Genva *et al.* (2019)

Dumond, Mathilde. 2012. Two main ways to model the self–organization of cortical microtubules. Master BioSciences, Département de Biologie, Ecole Normale Supérieure de Lyon. Pdf 7 pp.

Durzyńska, J. and A. Goździcka–Józefiak. 2015. Viruses and cells intertwined since the dawn of evolution. *Virology Journal*, 12: 169. Pdf, 10 pp.

Dworkin, J. P., D. W. Deamer, S. A. Sandford and L. J. Allamandola. 2001. Self–assembling amphiphilic molecules: Synthesis in simulated interstellar/precometary ices. *PNAS*, 98 (3): 815–819.

Ebisuzaki, T. S. Maruyama. 2017. Nuclear geyser model of the origin of life: Driving force to promote the synthesis of building blocks of life. *Geoscience Frontiers*, 8: 275–298.

Elander, R. P. and D. A. Lowe. 1994. Fungal biotechnology: An overview. In Handbook of applied mycology (pp. 1–34). New York, NY: Marcel Dekker.

Emlen, S. T., Wiltschko, W., Demong, N. J., Wiltschko, R. and Bergman, B. 1976 Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings. *Science* 193, 505–508. (doi: 10.1126/science.193.4252.505). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Engel, G. S., T. R. Calhoun, E. L. Read, T. K. Ahn, T. Mancal, Y. C. Cheng, R. E. Blankenship and G. R. Fleming. 2007. Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 12, 446 (7137): 782–786.

England, J. L. 2013. Statistical physics of self–replication. *J. Chem. Phys.*, 139: 121923. Pdf, 9 pp. doi: 10.1063/1.4818538.

Erez, Z., I. Steinberger–Levy, M. Shamir, S. Doron, A. Stokar–Avihail, Y. Peleg, S. Melamed, A. Leavitt, A. Savidor, S. Albeck, *et al.* 2017. Communication between viruses guides lysis–lysogeny decisions. *Nature*, 541: 488–493.

Etxebeste, O. and E. A. Espeso. 2016. Neurons show the path: tip–to–nucleus communication in filamentous fungal development and pathogenesis. *FEMS Microbiology Reviews*, fuw021, 40: 610–624.

Fallot, G., C. Neuveut and M. A. Buendia. 2012. Diverse roles of hepatitis B virus in liver cancer. *Curr Opin Virol.*, 2: 467–73.

Fassioli, F., R. Dinshaw, P. C. Arpin and G. D. Scholes. 2014. Photosynthetic light harvesting: excitons and coherence. *J. R. Soc. Interface*, 11: 20130901.pdf, 22 pp.

Fay, T. P., L. P. Lindoy, D. E. Manolopoulos and P. J. Hore. 2020. How quantum is radical pair magnetoreception? *Faraday Discuss.*, 2020, 221, 77–91.

Feldman M. 2013. Twisted light sends data through optical fiber for first time. IEEE Spectrum, July 2. Available at: spectrum–ieee.org/tech–talk/semiconductors/design/twisted–light–sends–datathrough–optical–fiber–for–first–time. Cited by Sanders (2017)

Fels, D. 2009. Cellular communication through light. *PLoS ONE*, 4 (4): e5086. doi: 10.1371/journal.pone.0005086.

Feynman, R. P., R. B. Leighton and M. Sands. 1965. The Feynman Lectures on Physics, Vol III. Boston: Addison–Wesley.

Firquet, S., S. Beaujard, P–E Lobert, F. Sané, D. Caloone, D. Izard and D. Hober. 2015. Survival of enveloped and non–enveloped viruses on inanimate surfaces. *Microbes Environ.*, 30 (2): 140–144.

Fisher, M. P. A. 2015. Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain. *Annals of Physics*, 362: 593–602.

Fisher, M. P. A. 2017. Are We Quantum Computers, or Merely Clever Robots? *International Journal of Modern Physics* B, 31 (2017) 1743001. DOI: 10.1142/S0217979217430019.

Flint, J., V. R. Racaniello, G. F. Rall, A. M. Skalka and L. W. Enquist. 2015. Principles of virology. 4th. Ed. ASM Press. 1060 pp.

Flores, R., S. Ruiz–Ruiz and P. Serra. Viroids and hepatitis delta virus. *Semin Liver Dis.*, 32: 201– 210.

Forche, A., K. Alby, D. Schaefer, A. D. Johnson, J. Berman, *et al.* 2008. The parasexual cycle in Candida albicans provides an alternative pathway to meiosis for the formation of recombinant strains. *Plos Biol.*, 6 (5): e110. Doi: 10.1371/journal.pbio.0060110.

Fröhlich, H., 1968a. Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes. *Physical Letters*, A 26: 402–403.

Fröhlich, H., 1968b. Long–range coherence and energy storage in biological systems. *International Journal of Quantum Chemistry* 2, 641–649.

Fröhlich, H., 1969. Quantum mechanical concepts in biology. In: Marois, M. (Ed.), Proceedings of First International Conference on Theoretical Physics and Biology 1967, pp. 13–22.

Galle, M., R. Neurohr, G. Altmann, F. A. Popp and W. Nagl. 1991. Bio–photon emission from *Daphnia magna*: A possible factor in the self–regulation of swarming. *Experientia* (Basel), 47: 457–460.

Gambini, R. and J. Pullin. 2019. Physical requirements for models of con–sciousness. [Preprint] URL: http://philsci–archive.pitt.edu/id/eprint/16405 (accessed 2020–05–12)

Ganim, Z., A. Tokmakoff, and A. Vaziri. 2011. Vibrational excitons in ionophores: experimental probes for quantum coherence–assisted ion transport and selectivity in ion channels. *New J. Phys.*, 13: 113030. Pdf, 29 pp.

Gánti, T. 2003. The principles of life. (Oxford University Press, Oxford, UK).

Garjajer, BI Birshtein, AM Iarochenko *et al.* The DBA–wave biocomputer (http://www.rialian.com/rnboyd/dna–wave.doc). Cited by Sanders (2017)

Gauger, E. M., E. Rieper, J. L. Morton, S. C. Benjamin and V. Vedral. 2011. Sustained quantum coherence and entanglement in the avian compass. *Phys. Rev. Lett.*, 106, 040503.

Genva, M., T. K. Kemene, M. Deleu, L. Lins and M.–L. Fauconnier. 2019. Is it possible to predict the odor of a molecule on the basis of its structure? *Int. J. Mol. Sci.*, 20: 3018; doi: 10.3390/ijms20123018. Pdf, 16 pp.

Georgiev, D. 2002. The beta–neurexin–neuroligin–1 interneuronal intrasynaptic adhesion is essential for quantum brain dynamics. http://arxiv.org/abs/quantph/0207093. Pdf, 30 pp.

Gerkin, R. C. and J. B. Castro. 2015. The number of olfactory stimuli that humans can discriminate is still unknown. *eLife*, 4: e08127.

Ghoshal, S., A. Pramanik and P. Sarkar. 2020. Theoretical Investigations on the Possibility of Prebiotic HCN Formation via O–Addition Reactions. *The Journal of Physical Chemistry* A, 124 (23): 4782–4792. https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c02538.

Gilbert, W. 1986. Origin of life: the RNA world. *Nature*, 319: 618.

Gilbert SF. 2001. Ecological development biology: developmental biology meets the real world. *Developmental Biology* 233: 1–12.

Gill, Jr, R. E., T. L. Tibbitts, D. C. Douglas, C. M. Handel, D. M. Mulcahy, J. C. Gottschalck, N. Warnock, B. J. McCaffery, P. F. Battley and T. Piersma. 2009. Extreme endurance flights by landbirds crossing the Pacific Ocean: ecological corridor rather than barrier? *Proc Biol Sci.*, 7, 276 (1656): 447–457.

Giudice, E. D., P. Stefanini, A. Tedeschi, G. Vitiello. 2011. The interplay of biomolecules and water at the origin of the active behavior of living organisms. *Journal of Physics: Conference Series*, 329: 012001. Pdf, 8 pp. doi: 10.1088/1742–6596/329/1/012001.

Glavin, D. P., A. S. Burton, J. E. Elsila, J. C. Aponte and J. P. Dworkin. 2020. The Search for Chiral Asymmetry as a Potential Biosignature in our Solar System. *Chemical Reviews*, 120 (11): 4660–4689. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00474.

Gleiser, M. 2014. The island of knowledge. The limits of science and the search for meaning. Basic Books. 313 pp.

Goel, A. 2008. Molecular evolution: A role for quantum mechanics in the dynamics of molecular machines that read and write DNA. Chapter 6, Pages 97–108 In: Quantum aspects of life. Editors, Derek Abbott, Paul C. W. Davies, Arun K. Pati Paul C. W. Davies. Imperial College Press. Pdf, 469 pp.

Göhler, B, V. Hamelbeck, T. Markus, M. Kettner, G. Hanne, Z. Vager, R. Naaman and H. Zacharias. 2011. Spin selectivity in electron transmission through self–assembled monolayers of double–stranded DNA. *Science*, 331: 894–897.

Goodman, E. M., B. Greenebaum and M. T. Marron. 1994. Magnetic fields alter translation in *Escherichia coli. Bioelectromagnetics*, 15: 77–83.

Goodman, R. and M. Blank. 1998. Magnetic field stress induces expression of hsp70. Cell Stress Chaperon., 3: 79–88. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Grabe, V. and S. Sachse. 2018. Fundamental principles of the olfactory code. *Biosystems*, 164: 94–101.

Graumann, P. L. 2007. Cytoskeletal elements in bacteria. *Annu Rev Microbiol.*, 61: 589–618.

Gregory, T. R. 2005. Synergy between sequence and size in Large–scale genomics. *Nature Reviews Genetics*, 6 (9): 699–708.

Grisogono, A–M. 2017. (How) Did Information Emerge? Chapter 4 In: From Matter to Life. Information and Causality. Edited by Sara Imari Walker, Paul C. W. Davies, George F. R. Ellis and Anne–Marie Grisogono. Cambridge University Press. 516 pp.

Guan, Z., K. Pei, J. Wang, Y. Cui, X. Zhu, X. Su, Y. Zhou, D. Zhang, C. Tang, P. Yin, Z. Liu and T. Zou. 2019. Structural insights into DNA recognition by AimR of the arbitrium communication system in the SPbeta phage. *Cell Discovery*, 5: 29. Pdf, 14 pp.

Haberditzl, W. 1967. Enzyme activity in high magnetic fields. *Nature*, 213: 72–73. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Hagan, S., S. Hameroff, J. Tuszynski. Quantum computation in brain microtubules: Decoherence and biological feasibility. *Phys Rev*, E 65, 061901.

Halley, J., Winkler, D. A., *et al.* 2008. Consistent concepts of self–organization and selfassembly. *Complexity*, 14 (2): 10–17.

Halpern, N. Y. and E. Crosson. 2019. Quantum information in the Posner model of quantum cognition. *Annals of Physics*, 407: 92–147.

Hameroff, S. R. 1994. Quantumm coherence in microtubule: A neural basis for emergent consciousness? *Journal of Consciousness Studies*, 1 (1): 91ñ118. Pdf, 28 pp.

Hameroff, S. 1998. Quantum computation in brain microtubules? The Penrose–Hameroff 'Orch OR' model of consciousness. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A, 356: 1869–1896.

Hameroff, S. and R. Penrose. 2014. Consciousness in the universe. A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11: 39–78.

Hameroff, S., A. Nip, M. Porter and J. Tuszynski. 2002. Conduction pathways in microtubules, biological quantum computation, and consciousness. *BioSystems*, 64: 149–168.

Hameroff, S. R., J. A. T. Craddock and J. A. Tuszynski. 2014. Quantum effects in the understanding of consciousness. *Journal of Integrative Neuroscience*, 13 (3): 1–24.

Hanada, S. 2016. Anoxygenic photosynthesis—a photochemical reaction that does not contribute to oxygen reproduction. *Microbes Environ.*, 31 (1): 1–3.

Hardy, M. D., J. Yanga, J. Selimkhanov, C. M. Cole, L. S. Tsimring and N. K. Devaraj. 2015. Self–reproducing catalyst drives repeated phospho–lipid synthesis and membrane growth. PNAS, 112 (27): 8187–8192. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1506704112.

Harris, R., R. Meskys, M. J. Sutcliffe. and N. S. Scrutton. 2000. Kinetic studies of the mechanism of carbon–hydrogen bond breakage by the heterotetrameric sarcosine oxidase of Arthrobacter sp. 1–IN. *Biochemistry*, 39: 1189–1198.

Hazen, R. M. 2009. The emergence of patterning in life's origin and evolution. *Int. J. Dev. Biol.*, 53: 683–692. doi: 10.1387/ijdb.092936rh.

Hazen, R. M. 2012. The emergence of life on Earth. Lecture video. UCTVSeminars.

Hazen, R. M., N. Boctor, J. A. Brandes, G. D. Cody, R. J. Hemley, A. Sharma and H. S. Yoder Jr. 2002. High pressure and the origin of life. *J. Phys. Condens. Matter*, 14: 11489–11494.

Henbest, K. B., K. Maeda, P. J. Hore, M. Joshi, A. Bacher, R. Bittl, S. Weber,

C. R. Timmel and E. Schleicher. 2008. Magnetic–field effect on the pho–toactivation reaction of Escherichia coli DNA photolyase. *PNAS*, 105 (38): 14395–14399.

Henry, R., K. Durai, S. Net, A. Balraj and W. S. Priya. 2011. Modeling a micro tubule as a diode. *J Biosens Bioelectron*, 2: 106. doi: 10.4172/2155–6210.1000106.

Heylighen, F., P. Cilliers and C. Gershenson. 2007. Complexity and phi–losophy. In: J. Bogg and R. Geyer (editors), Complexity, Science and Society, (Radcliffe, Oxford).

Heylighen, F. 2008. Complexity and Self–organization. prepared for the *Encyclopedia of Library and Information Sciences*, edited by Marcia J. Bates and Mary Niles Maack (Taylor & Francis, 2008). Pdf, 20 pp.

Heylighen, F. 2018. Complexity and Evolution. Fundamental concepts of a new scientific world view. Lecture notes. 2017–2018. Pdf 167 pp.

Hideg, É., M. Kobayash and H. Inaba. 1991. Spontaneous ultraweak light emission from respiring spinach leaf mitochondria. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)–Bioenergetics*, 1098 (1): 27–31.

Hildner, R., D. Brinks, J. B. Nieder, R. J. Cogdell and N. F. van Hulst. 2013. Quantum coherent energy transfer over varying pathways in single light–harvesting complexes. *Science*, 340: 1448–1451.

Hingorani, M. M. 2001. Polymerase. In Encyclopedia of Genetics, Pages 1497–1499. Editors–in–Chief: Sydney Brenner and Jefferey H. Miller.

Hirano, M., A. Ohta and K. Abe. 1998. Magnetic field effects on photo–synthesis and growth of the cyanobacterium *Spirulina platensis*. *J. Ferment. Bioeng.*, 86: 313–316. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Hiscock, H. G., S. Worstera, D. R. Kattnig, C. Steers, Y. Jin, D. E. Manolopou–los, H. Mouritsen and P. J. Hore. 2016. The quantum needle of the avian magnetic compass. *PNAS*, 113 (17): 4634–4639.

Hochfield, S. 2019. The age of living machines. How biology will build the next technology revolution. Published by W. W. Norton & Company. 206 pp.

Hogg, S. 2005. Essential microbiology. Published by John Wiley & Sons Ltd, pdf, 481 pp.

Holmes, R. M., M. M. Victora, R. F. Wang and P. G. Kwiat. 2018. Testing the limits of human vision with quantum states of light: past, present, and future experiments. *arXiv*: 1806.08430v1 [quant–ph] 21 Jun 2018.

Hopfield, J. J. 1974 Electron transfer between biological molecules by ther–mally activated tunneling. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 71, 3640–3644. (doi: 10.1073/pnas.71.9.3640). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Hopkins, W. G. and N. P. A. Hüner. 2009. Introduction to Plant Physiology. 4th. Ed. Published by John Wiley & Sons, Inc. pdf, 523 pp.

Hordijk. W. 2013. Autocatalytic sets: From the origin of life to the economy. *BioScience*, 63 (11): 877–881.

Hordijk, W. and M. Steel. 2018. Autocatalytic networks at the basis of life's origin and organization. *Life*, 8, 62, pdf, 12 pp.; doi: 10.3390/life8040062.

Hordijk, W., M. Steel and S. A. Kauffman. 2019. Molecular diversity required for the formation of autocatalytic sets. *Life,* 9, 23; pdf, 14 pp. doi: 10.3390/life9010023.

Hore, P. 2011. The quantum robin. *Navigation News*: 15–17 pdf.

Hore, P. J. and M. Henrik. 2016. The radical–pair mechanism of magnetoreception. *Annual Review of Biophysics*, 45 (1): 299–344.

Howard, J. 2010. Self–organization in biology. MPG. pdf 6 pp.

Hu, H. and M. Wu. 2004. Action potential modulation of neural spin networks suggests possible role of spin. *NeuroQuantology*, 4: 309–317.

Hubač, I., M. Švec and S. Wilson. 2017. Quantum entanglement and quantum information in biological systems (DNA). Proceedings of RAGtime 17–19, 17–19/23–26 Oct., 1–5 Nov., 2015/2016/2017, Opava, Czech Republic 61 Z. Stuchlîk, G. Török and V. Karas, editors, Silesian University in Opava, 2017, pp. 61–84.

Huelga, S. F. and M. B. Plenio. 2013. Vibrations, quanta and biology. *arXiv*: 1307.3530v1 [physics.bio–ph] 27 Jun 2013. Pdf, 26 pp.

Jung, G. 2012. Fluorescent proteins I from understanding to design. Springer Ed. 272 pp.

Hunt, T. and J. W. Schooler. 2019. The easy part of the hard problem: A resonance theory of consciousness. *Front. Hum. Neurosci.*, 13: 378. doi: 10.3389/fnhum.2019.00378 Consciousness. Pdf, 16 pp.

Hwang, E., J. Song and J. Zhang. 2019. Integration of nanomaterials and bioluminescence resonance energy transfer techniques for sensing biomolecules. *Biosensors*, 9, 42; doi: 10.3390/bios9010042.

Ioannidis, N. E., S. Papadatos and V. Daskalakis. 2016. Energizing the light harvesting antenna: Insight from CP29. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1857: 1643–1650.

Ishizaki, A. and G. R. Fleming. 2010. Quantum superpositions in photosynthetic light harvesting: delocalization and entanglement. *New Journal of Physics*, 12: 055004 (13pp)

Isojima, Y., Isoshima, T., Nagai, K., Kikuchi, K., & Nakagawa, H. 1995. Ultraweak biochemiluminescence detected from rat hippocampal slices. *NeuroReport*, 6 (4): 658–660.

Jaworska, M., J. Domanski, P. Tomasik and K. Znoj. 2016. Stimulation of pathogenicity and growth of entomopathogenic fungi with static magnetic field., *J Plant Dis Prot*, 123: 295–300. https://doi.org/10.1007/s41348-016-0035-y.

Jedlicka, P. 2017. Revisiting the Quantum Brain Hypothesis: Toward Quantum (Neuro)biology? *Front. Mol. Neurosci.*, 10: 366. Pdf, 8 pp.

Johnjoe, McFadden and J. Al-Khalili. 2014. Life on the edge. The coming age of quantum biology. Crown Publishers. 334 pp.

Johnsen, S. and K. J. Lohmann. 2008. Magnetoreception in animals. *Physics Today*, 61 (3): 29–35.

Johnson IV, J. John, A. Tolkb, and A. Sousa-Pozac. 2013. A Theory of Emergence and Entropy in Systems of Systems. *Procedia Computer Science*, 20: 283–289.

Johnson, P. J. M., M. H Farag, A. Halpin, T. Morizumi, V. Prokhorenko, J. Knoester, T. L. C. Jansen, O. P. Ernst and R. J. D. Miller. 2017. The Primary Photochemistry of Vision Occurs at the Molecular Speed Limit. *J Phys Chem* B, 121 (16): 4040–4047. doi: 10.1021/acs.jpcb.7b02329. Epub.

Jordan, P. 1932. Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie. *Naturwissenschaften* 20, 815–821. (doi: 10.1007/BF01494844). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Jordan, P. 1941. Die Physik und das Geheimnis des organischen Lebens. Braunschweig, Germany: Friedrich Vieweg & Sohn. Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Jordan, S. F., H. Rammu, I. N. Zheludev, A. M. Hartley, A. Maréchal and N. Lane. 2019. Promotion of protocell self–assembly from mixed amphiphiles at the origin of life. *Nat Ecol Evol*, 3 (12): 1705–1714. doi: 10.1038/s41559–019–1015–y.

Kaisler, S. H. and Gregory Madey. 2009. Complex Adaptive Systems: Emergence and Self–Organization Tutorial Presented at HICSS–42, Big Island, HI. University of Notre Dame. PPT 115 pp.

Kaku, M. 2014. The future of the mind the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. Doubleday Publisher. 400 pp.

Kalckar, J. 2013 Foundations of quantum physics II (1933–1958). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Kalson, N–H, D. Furman and Y. Zeiri. 2017. Cavitation–Induced Synthesis of Biogenic Molecules on Primordial Earth. ACS Central *Science*, 3 (9): 1041–1049. https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00325.

Kalson, N–H, D. Furman and Y. Zeiri. 2017. Cavitation–Induced Synthesis of Biogenic Molecules on Primordial Earth. *ACS Central Science*, 3 (9): 1041–1049. https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00325.

Kaplan, D. 2016. How life comes from randomness. Lecture video. *Quanta Magazine*. June 30, 2016.

Kataoka, Y., Y. Cui, A. Yamagata, M. Niigaki, T. Hirohata, N. Oishi and Y. Watanabe. 2001. Activity–dependent neural tissue oxidation emits intrinsic ultraweak photons. *Biochem Biophys Res Commun*, 285 (4): 1007–10011. doi: 10.1006/bbrc.2001.5285.

Kato, K., T. Shinoda, R. Nagao, S. Akimoto, T. Suzuki, N. Dohmae, M. Chen, S. I. Allakhverdiev, J–R. Shen, F. Akita, N. Miyazaki and T. Tomo. 2020. tructurals basis for the adaptation and function of chlorophyll f in photosystem I. *Nature Communications*, 11: 238. Pdf, 10 pp. https://doi.org/10.1038/s41467–019–13898–5 www.nature.com/naturecommunications.

Kauffman, S. A. 1993. The origins of order. Self–organization and selection in evolution. Oxford University Press, New York, Oxford. 1st. Ed. 734 pp.

Kauffman, S. A. 2019. A world beyond physics. The emergence and evolution of life. Oxford University Press. 169 pp.

Kaznacejev, V. P. and L. P. Michailova. 1981. Ultraschwache Luminiszenz in interzellularen Interaktionen. Novosibirsk, Nauka (Quoted in: Gar–jajer, BI Birshtein, AM Iarochenko *et al*). The DBA–wave biocomputer. (http://www.rialian.com/rnboyd/dna–wave.doc). Cited by Sanders (2017)

Keller, M. A., G. Piedrafita and M. Ralser. 2015. The widespread role of non–enzymatic reactions in cellular metabolism. *Current Opinion in Biotechnology*, 34: 153–161.

Keren, N. and Y. Paltiel. 2018. Photosynthetic energy transfer at the quantum/classical border. *Trends Plant Sci.*, 23 (6): 497–506.

Kerpal, C., S. Richert, J. G. Storey, S. Pillai, P. A. Liddell, D. Gust, S. R. Mackenzie, P. J. Hore and C. R. Timme. 2019. Chemical compass behaviour at microtesla magnetic fields strengthens the radical pair hypothesis of avian magnetoreception. *Nature Communications*, 10: 3707. Pdf, 7 pp.

Khoshbin, M. R.–e–Khoshnazar. 2014. Quantum superposition in the retina: Evidences and proposals. *NeuroQuantology*, 12 (1): 97–101.

Kim, W. H. 2013. New approach controlling cancer: Water memory. *J Vortex Sci Technol*, 1: 104. Pdf, 5 pp. doi: 10.4172/2090–8369.1000104.

Kim, S. C., L. Zhou, W. Zhang, D. K. O'Flaherty, V. Rondo–Brovetto and J. W. Szostak. 2020. A model for the emergence of RNA from a prebiotically plausible mixture of ribonucleotides, arabinonucleotides, and 2'– deoxynucleotides. *J. Am. Chem. Soc.*, 142: 2317–2326.

Kim, Y., F. D. Bertagna, E. M. D'Souza, D. J. Heyes, L. O. Johannissen, E. T. Nery, A. Pantelias, A. S.–P Jimenez, L. Slocombe, M. G. Spencer, *et al.* 2021. Quantum Biology: An Update and Perspective. Quantum Rep., 3: 1–48. https://doi.org/10.3390/quantum3010006

Kimball, G. C. 1938. The growth of yeast in a magnetic field. *J. Bacteriol.*, 35: 109–122.

Kitadai, N. and S. Maruyama. 2018. Origins of building blocks of life: *A review. Geoscience Frontiers*, 9: 1117–1153.

Klinman, J. P. and A. Kohen. 2013. Hydrogen tunneling links protein dynamics to enzyme catalysis. *Annu Rev Biochem.*, 82: 471–496.

Klinman, J. P. and A. R. Offenbacher. 2018. Understanding biological hydrogen transfer through the lens of temperature dependent kinetic isotope effects. *Acc Chem Res.*, 51 (9): 1966–1974.

Knapp, M. J. and J. P. Klinman. 2002. Environmentally coupled hydrogen tunneling Linking catalysis to dynamics. *Eur. J. Biochem.*, 269: 3113–3121.

Kobayashi, M., M. Takeda, T. Sato, Y. Yamazaki, K. Kaneko, K. I Ito, … and Inaba, H. 1999. *In vivo* imaging of spontaneous ultraweak photon emission from a rat's brain correlated with cerebral energy metabolism and oxidative stress. *Neuroscience research*, 34 (2): 103–113.

Kodis, G., P. A. Liddell, A. L. Moore, T. A. Moore and D. Gust. 2004. Synthesis and photochemistry of a carotene–porphyrin–fullerene model photosynthetic reaction center. *J. Phys. Org. Chem.*, 17: 724–734.

Kohen, A., Cannio, R., Bartolucci, S., Klinman, J. P., 1999. Enzyme dynamics and hydrogen tunneling in a thermophilic alcohol dehydrogenase. *Nature*, 399: 496–499.

Kopetzki, D. and M. Antonietti. 2011. Hydrothermal formose reaction. *New J. Chem.*, 35: 1787–1794.

Kremers, G–J., S. G. Gilbert, P. J. Cranfill, M. W. Davidson and D. W. Piston. 2011. Fluorescent proteins at a glance. *Journal of Cell Science*, 124 (2): 157–160.

Kruger, K., P. J. Grabowski, A. J. Zaug, J. Sands, D. E. Gottschling and T. R. Cech. 1982. Self–splicing RNA: Autoexcision and autocyclization of the ribosomal RNA intervening sequence of Tetrahymena. *Cell*, 31: 147–l57.

Kumar, S., K. Boone, J. Tuszyński, P. Barclay and C. Simon. 2016. Possible existence of optical communication channels in the brain. *Scientific Reports*, 6: 36508. Pdf, 13 pp. DOI: 10.1038/srep36508.

Kun, A., A. Szilágyi, Balázs Könnyű, G. Boza, I. Zachar and Eörs Szathmáry. 2015. The dynamics of the RNA world: insights and challenges: The dynamics of the RNA world. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, xxxx (2015) 1–21. doi: 10.1111/nyas.12700.

Kurian, P., A. G. Dunston and J. Lindesay. 2016. How quantum entanglement in DNA synchronizes double–strand breakage by type II restriction endonucleases. *J Theor Biol.* 2016 February 21; 391: 102–112. doi: 10.1016/j.jtbi.2015.11.018.

Kuyucak, S.; Andersen, O. S.; Chung, S. H. 2001. Models of permeation in ion channels. *Rep. Prog. Phys.*, 64: 1427–1471.

Lan, G. and Y. Tu. 2016. Information processing in bacteria: Memory, computation, and statistical physics: a Key Issues Review. *Rep Prog Phys.*, 79 (5): 052601. doi: 10.1088/0034–4885/79/5/052601.

La Scola, B., S. Audic, C. Robert, L. Jungang, X. de Lamballerie, M. Drancourt, R. Birtles, J.–M. Claverie and D. Raoult. 2003. A giant virus in Amoebae. *Science,* 299: 2032–2033. www.sciencemag.org.

Lazcano, A. 2010. Historical development of origins research. *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 2010; 2: a002089.

Lee, H., Y.–C. Cheng and G. R. Fleming. 2007. Coherence dynamics in photosynthesis: protein protection of excitonic coherence. *Science,* 316: 1462–1465.

Lei C. and H. Berg. 1998. Electromagnetic window effects on proliferation rate of *Corynebacterium glutamicum. Bioelectrochem. Bioenerg.*, 45: 261–265. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Li, T., H. Tang, J. Zhu and J. H. Zhang. 2019. The finer scale of consciousness: quantum theory. *Ann Transl Med*, 7 (20): 585–596.

Liboff, A. R., S. Cherng, K. A. Jenrow and A. Bull. 2003. Calmodulin–dependent cyclic nucleotide phosphodiesterase activity is altered by 20. μT magnetostatic fields. *Bioelectromagnetics*, 24: 2–38.

Liedvogel, M., Maeda K, Henbest K, Schleicher E, Simon T, Christiane R. Timmel, P. J. Hore and H. Mouritsen. 2007. Chemical magnetoreception: bird cryptochrome 1a is excited by blue light and forms long–lived radical–pairs. *PLoS ONE*, 2 (10): e1106. doi: 10.1371/journal.pone.0001106.

Lipkind, M. 2006. Free will and violation of physical laws, in: Biophotonics and coherent systems in biology Beloussov, Voeikov, Martynyuk (eds), Springer, p. 236.

Liu, K. and S. R. Wessler. 2017. Transposition of Mutator–like transposable elements (MULEs) resembles hAT and Transib elements and V(D)J recombination. *Nucleic Acids Research*, 45 (11): 6644–665.5.

Liua, Y. and D. Sumpter. 2018. Spontaneous emergence of self–replication in chemical reaction systems. *arXiv*: 1801.05872v2 [nlin.AO] 19 Jan 2018. Pdf, 7 pp.

Lloyd, S. 2006. Programing the universe. A quantum computer scientist takes on the cosmos. Alfred A. Knopf. New York. pdf, 152 pp.

Lloyd, S. 2008. Quantum mechanics and emergence. Chapter two In: Quantum aspects of life. Editors, Derek Abbott, Paul C. W. Davies, Arun K. Pati, Paul C. W. Davies. Imperial College Press. Pages 19–30.

Lloyd, S. A quantum of natural selection. *Nature Physics*, 5: 164–166.

Lloyd, S. 2011. Quantum coherence in biological systems. *Journal of Physics*: Conference Series 302, 012037. pdf, 6 pp.

Lodish, H, A. Berk, P. Matsudaira, C. A. Kaiser, M. K. Matthew P. Scott and L. Zipursky. 2003. Molecular cell biology. Fifth Edition. Publisher: W H Freeman & Co. pdf 973 pp.

Löwdin, P. O. 1963 Proton tunneling in DNA and its biological implications. *Rev. Mod. Phys.* 35, 724–732. (doi: 10.1103/RevModPhys.35.724). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Lorsch, J. R. and J. W. Szostak. 1994. *In Vitro* evolution of new ribozymes with polynucleotide kinase activity. *Nature*, 371: 31–36.

Lyon, P. 2014. Stress in Mind: A Stress Response Hypothesis of Cognitive Evolution. In: Developing Scaffolds in Evolution, Culture, and Cogni–tion, eds L. R. Caporael, J. R. Griesemer, and W. C. Wimsatt. Cambridge: MIT Press, pages 171–190.

Lyon, P. 2015. The cognitive cell: bacterial behavior reconsidered. *Front. Microbiol.*, 6: 264. Pdf, 18 pp.

MacKay, R. S. 2008. Nonlinearity in Complexity Science. Mathematics Institute and Centre for Complexity Science University of Warwick, Coventry CV4 7AL, U. K. pdf, pp 10.

Madl, P. and S. Egot–Lemaire. 2015. The field and the photon from a physical point of view. Chapter 2 In D. Fels, M. Cifra and F. Scholkmann (Editors), *Fields of the Cell*, 2015, ISBN: 978–81–308–0544–3, p. 29–53.

Maeda, K., K. B. Henbest, F. Cintolesi, I. Kuprov, C. T., Rodgers, P. A. Liddell, D. Gust, C. R. Timmel and P. J. Hore. 2008. Chemical compass model of avian magnetoreception. *Nature*, 453: 387–390.

Magdaong, N. C. M. and R. E. Blankenship. 2018. Photoprotective, excited–state quenching mechanisms in diverse photosynthetic organisms. *J. Biol. Chem.*, 293 (14): 5018–5025.

Makarevich, A. V. 1999. Effect of magnetic fields of magnetoplastics on the growth of microorganisms. *Biofizika*, 44: 70–74.

Makarov, I. O., Klyuev, D. A., Smirnov, V. F. *et al.* 2019. Effect of Low–Frequency Pulsed Magnetic Field and Low–Level Laser Radiation on Oxidoreductase Activity and Growth of Fungi—Active Destructors of Polymer Materials. *Microbiology*, 88: 72–78 https://doi.org/10.1134/S0026261719010053.

Maldonadoa, C. E. and N. A. Gómez–Cruzb. 2014. Synchronicity among biological and computational levels of an organism: Quantum Biology and Complexity. *Procedia Computer Science*, 36: 177–184.

Mao, C., D. J. Solis, B. D. Reiss, S. T. Kottmann, R. Y. Sweeney, A. Hayhurst, G. Georgiou, B. Iverson and A. M. Belcher. 2004. Virus–based toolkit for the directed synthesis of magnetic and semiconducting nanowires. *Science*, 303 (5655): 213–217. doi: 10.1126/science.1092740.

Mao, C., C. E. Flynn, A. Hayhurst, R. Sweeney, J. Qi, G. Georgiou, B. Iverson and A. M. Belcher. 2003. Viral assembly of oriented quantum dot nanowires. *PNAS*, 100 (12): 6946–6951 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0832310100.

Marais, A., B. Adams, A. K. Ringsmuth, M. Ferretti *et al.* 2018. The future of quantum biology. *J. R. Soc. Interface*, 15: 20180640. Pdf, 14 pp.

Marcus, P. S., S. Pei, C.–H. Jiang and P. Hassanzadeh. 2013. Three–dimensional vortices generated by self–replication in stably stratified rotating shear flows. *Phys. Rev. Lett.*, 111 (8) 084501. Pdf 5 pp.

Maresca, J. A., J. L. Keffer, P. P. Hempel, S. W. Polson, O. Shevchenko, J. Bhavsar, D. Powell, K. J. Miller, A. Singh and M. W. Hahn. 2019. Light modulates the physiology of nonphototrophic *Actinobacteria. J Bacteriol*, 201: e00740–18. https://doi.org/10.1128/JB.00740–18

Marletto, C., D. MColes, T. Farrow and V. Vedral. 2018. Entanglement be–tween living bacteria and quantized light witnessed by Rabi splitting. *J. Phys. Commun.*, 2 (2018) 101001 https://doi.org/10.1088/2399–6528/aae224

Martin, W. F. 2020. Older than genes; the Acetyl CoA pathway and origins. *Front. Microbiol.* 11: 817. Pdf, 21 pp. doi: 10.3389/fmicb.2020.00817.

Maruyama, S., K. Kurokawa, T. Ebisuzaki, Y. Sawaki, K. Suda and M. San–tosh. 2019. Nine requirements for the origin of Earth's life: Not at the hydrothermal vent, but in a nuclear geyser system. *Geoscience Frontiers*, 10: 1337–1357.

Mason, K. A., J. B. Losos, S. R. Ringer, P. H. Raven and G. B. Johnson. 2011. Biology, 9th Edition. © (McGraw–Hill). 1242 pp.

Mayer, C. 2020. Life in the context of order and complexity. *Life* (Basel), 10 (1): 5. Pdf, 8 pp.

McCoss, A. 2017. Lithium quantum consciousness. *Journal of Quantum Information Science*, 7: 125–139 http://www.scirp.org/journal/jqis.

McCutcheon, J. P. and C. D. Von Dohlen. 2011. An Interdependent Meta–bolic Patchwork in the Nested Symbiosis of Mealybugs. *Current Biology*. 21 (16): 1366–1372.

McFadden, J. 2000. Quantum evolution. The new science of life. W. W. Norton & Company. New York. London. 331 pp.

McFadden, J., and J. Al–Khalili. 1999. A quantum mechanical model of adaptive mutation. *Biosystems*, 50: 203–211.

McFadden, J. and J. Al–Khalili, 2014. Life on the edge. The coming of age of quantum biology. Crown Publisher. New York.

McFadden, J. and J. Al–Khalili. 2018. The origins of quantum biology. *Proc. R. Soc. A* 474: 20180674. http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2018.0674

Meierhenrich, U. J., J. Golebiowski, X. Fernandez and D. Cabrol–Bass. 2005. De la molécule à l'odeur: Les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction. *L. Actual. Chim.*, 2005: 29–40. Cited by Genva *et al.* (2019).

Meijer, D. K. F. and S. Raggett. 2014. Quantum Physics in Consciousness Studies. Review/Literature compilation: The Quantum Mind Extended. Pdf, 177 pp.

Meister, M. 2015. On the dimensionality of odor space. *eLife*, 4: p. e07865.

Messori, C. 2019. The super–coherent state of biological water. *Open Access Library Journal,* 6: e5236. Pdf, 17 pp. https://doi.org/10.4236/oalib.1105236

Mihelic, F. M., 2013. "Model of biological quantum logic in DNA", *Life*, 3 (3): 474–481.

Mihelic, F. M. 2019. Experimental evidence supportive of the quantum DNA model. *Proc. SPIE, 10984, Quantum Information Science, Sensing, and Computation* XI, 1098404 (13 May 2019); doi: 10.1117/12.2517348.

Miller, S. L. 1984. The prebiotic synthesis of organic–molecules and polymers. *Advances in Chemical Physics,* 55: 85–107.

Miller, R. A., N. Stephanopoulos, J. M. McFarland, A. S. Rosko, P. L. Geissler and M. B. Francis. 2010. Impact of assembly state on the defect tolerance of TMV–based light harvesting arrays. *Journal of the American Chemical Society,* 132, 6068.

Miller Jr., W. B. 2016. Cognition, information fields and hologenomic entanglement: Evolution in light and shadow. *Biology,* 5: 21. Pdf, 38 pp. doi: 10.3390/biology5020021.

Milo, R. and R. Fillips. 2015. Cell biology by the numbers. Garland Science. Pdf 395 pp.

Milshteyn, D., B. Damer, J. Havig and D. Deamer. 2018. Amphiphilic Compounds Assemble into Membranous Vesicles in Hydrothermal Hot Spring Water but Not in Seawater. *Life,* 8: 11; doi: 10.3390/life8020011. Pdf, 15 pp.

Mirkovic, T., E. E. Ostroumov, J. M. Anna, R. K. van Grondelle, Govindjee and G. D. Scholes. 2016. Light absorption and energy transfer in the antenna complexes of photosynthetic organisms. *Chem. Rev*. XXXX, XXX, XXX–XXX. Special Issue. Light Harvesting. Pdf, 45 pp.

Moelling, K. and F. Broecker. 2019a. Viruses and evolution – viruses first? A personal perspective. *Front. Microbiol.*, 10: 523. doi: 10.3389/fmicb.2019.00523.

Moelling, K. and F. Broecker. 2019b. Viroids–First—A model for life on Earth, Mars and Exoplanets. *Geosciences*, 9, 241; doi:–10.3390/geosciences9050241.

Mohseni M, P. Rebentrost, S. Lloyd and A. Aspuru–Guzik. 2008. Environment–assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer. *J Chem Phys*, 129: 174106.

Mohseni, M., Y. Omar, G. Engel and M. B. Plenio Eds. 2014. Quantum effects in biology. Cambridge University Press. 438 pp.

Montagnier, L., J. A'íssa, S. Ferris, J.–L. Montagnier and C. Lavallèe. 2009a. Electromagnetic Signals Are Produced by Aqueous Nanostructures Derived from Bacterial DNA Sequences. *Interdiscip Sci Comput Life Sci*, 1: 81–90. DOI: 10.1007/s12539–009–0036–7.

Montagnier, L., J. A'íssa, C. Lavallèe, M. Mbamy, J. Varon and H. Chenal. 2009b. Electromagnetic detection of HIV DNA in the blood of AIDS patients treated by antiretroviral therapy. *Interdiscip Sci Comput Life Sci*, 1: 245–253 DOI: 10.1007/s12539-009-0059-0.

Montagnier, L., J. Aïssa., E. Del Giudice, C. Lavallee, A. Tedeschi and G. Vitiello. 2011. DNA waves and water. *J. Phys. Conf. Ser.*, 306: 012007.

Montagnier, L., E. Del Giudice, J. Aïssa, C. Lavallee, S. Motschwiller, A. Capolupo, A. Polcari, P. Romano, A. Tedeschi and G. Vitiello. 2015. Transduction of DNA information through water and electromagnetic waves. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 34 (2): 106–112. DOI: 10.3109/15368378.2015.1036072.

Montagnier, L., J. Aïssa, A. Capolupo, T. J. A. Craddock, P. Kurian, C. Lavallee, A. Polcari, P. Romano, A. Tedeschi and G. Vitiello. 2017. Water bridging dynamics of Polymerase Chain Reaction in the Gauge theory paradigm of quantum fields. *Water*, 9, 339. pdf, 18 pp. doi: 10.3390/w9050339.

Mora, C., D. P. Tittensor, S. Adl, A. G. B. Simpson and B. Worm. 2011. How many species are there on Earth and in the ocean? *PLoS Biol*, 9 (8): e1001127. doi: 10.1371/journal.pbio.1001127.

Morowitz, H. J., J. D. Kostelnik, J. Yang and G. D. Cody. 2000. The origin of intermediary metabolism. *PNAS*, 97 (14): 7704–7708.

Muheima, R., S. Sjöberga and A. Pinzon-Rodrigueza. 2016. Polarized light modulates light-dependent magnetic compass orientation in birds. *PNAS*, 113 (6): 1654–1659.

Mullins, J. M., L. M. Penafiel, J. Juutilainen and T. A. Litovitz. 1999. Dose-response of electromagnetic field-enhanced ornithine decarboxylase activity. *Bioelectrochem. Bioenerg.*, 48: 193–199. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Muñoz–López, M. and J. L. García–Pérez. 2010. DNA transposons: Nature and applications in genomics. *Current Genomics*, 11: 115–128.

Murray, R. K., D. A. Bender, K. M. Botham, P. J. Kennelly, V. W. Rodwell and P. A. Weil. 2009. Harper's Illustrated Biochemistry, 28th. Ed. McGraw Hill Lange. Pdf, 1269 pp.

Musumeci, F., A. Scordino, A. Triglia, G. Blandino and I. Milazzo. 1999. Intercellular communication during yeast cell growth. *Europhysics Letters*, 47: 736–742.

Nagy, P. and G. Fischl. 2004. Effect of static magnetic field on growth and sporulation of some plant pathogenic fungi. *Bioelectromagnetics*, 25: 316–318.

Nakagaki, T., R. Kobayashi, Y. Nishiura and T. Ueda. 2004a. Obtaining multiple separate food sources: behavioural intelligence in the *Physarum* plasmodium. *Proc Biol Sci.*, 271 (1554): 2305–2310.

Nakagaki, T., H. Yamada and M. Hara. 2004b. Smart network solutions in an amoeboid organism. *Biophys Chem.*, 107 (107): 1–5.

Nam, Y. S., T. Shin, H. Park, A. P. Magyar, K. Choi, G. Fantner, K. A. Nelso and A. M. Belcher. 2010. Virus–templated assembly of porphyrins into light–harvesting nanoantennae. *Journal of the American Chemical Society*, 132 (5): 1462–1463.

Maria, V. 2011. Basic principles and applications of spin chemistry (a brief review). *Notre Dame Radiation Laboratory*. Pdf, 37 pp.

Nara, K.; L. R. Saraiva, X. Ye and L. Buck. 2011. A large–scale analysis of odor coding in the olfactory epithelium. *J. Neurosci.*, 31: 9179–9191. Cited by Genva *et al.* (2019)

Nelson, N. and C., F. Yocum. 2006. Structure and function of photosystems I and II. Annu. *Rev. Plant Biol.*, 57: 521–565.

Nesheim, J. C. and J. D. Lipscomb. 1996, Large kinetic isotope effects in methane oxidation catalyzed by methane monooxygenase: evidence

for C–H bond cleavage in a reaction cycle intermediate. *Biochemistry*, 35: 10240–10247.

Nordmann, G. C., T. Hochstoeger and D. A. Keays. 2017. Magnetoreception sense without a receptor. *PLoS Biol*, 15 (10): e2003234. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003234

Nossol, B., G. Buse and J. Silny: 1993. Influence of weak static and 50 Hz magnetic fields on the redox activity of Cytochrome–C oxidase. *Bioelectromagnetics*, 1: 4 361–372.

Ogryzko, V. 2009. Quantum information processing at the cellular level. Euclidean approach. Institute Gustave Roussy Villejuif, France. first workshop on 'Quantum Technology in Biological Systems' (11–16 January, 2009) @ the Sentosa Resort, Singapore. (http://beta.quantumlah.org/content/view/223). Pdf, 83 pp.

Oliveira, G., B. La Scola and J. Abrahão. 2019. Giant virus vs amoeba: fight for supremacy. *Virology Journal*, 16: 126–138 https://doi.org/10.1186/s12985–019–1244–3

Ollivier, H., D. Poulin and W. H. Zurek. 2004. Objective properties from subjective quantum states: Environment as a witness. *arXiv:* quant–ph/0307229v2 19 Aug 2004. Pdf, 5 pp.

Olson, K. R. and K. D. Straub. 2016. The role of hydrogen sulfide in evolution and the evolution of hydrogen sulfide in metabolism and signaling. *Physiology*, 31: 60–72.

Oostergetel, G. T., H. van Amerongen and E. J. Boekema. 2010. The chlorosome: a prototype for efficient light harvesting in photosynthesis. *Photosynth Res*, 104: 245–255.

Orf, G. S., A. M. Collins, D. M. Niedzwiedzki, M. Tank, V. Thiel, A. Kell, D. A. Bryant, G. A. Montano and R. E. Blankenship. 2017. Polymer–Chlorosome Nanocomposites Consisting of Non–Native Combinations

of Self–Assembling Bacteriochlorophylls. *Langmuir*, 33 (25): 6427–6438.

Orgel, L. E. 1968. Evolution of the genetic apparatus. *J. Mol. Biol.* 38: 381–393.

Orgel, L. E. 2004. Prebiotic Chemistry and the Origin of the RNA World. Crit. *Rev. Biochem. Mol. Biol.*, 39: 99–123.

Otaki, J. M., S. Ienaka, T. Gotoh and H. Yamamoto. 2005. Availability of short amino acid sequences in proteins. *Protein Sci.*, 14 (3): 617–625. doi: 10.1110/ps.041092605.

Ottelé, J., A. S. Hussain, C. Mayer and S. Otto. 2020. Chance emergence of catalytic activity and promiscuity in a self–replicator. *Nat Catal* , 3: 547–553. DOI: 10.1038/s41929–020–0463–8.

Ozhigov, Y. I. 2015. Quantum mechanical biology. Moscow State University of M. V. Lomonosov, VMK Faculty. Pdf, 18 pp.

Panitchayangkoona, G., D. Hayesa, K. A. Fransteda, J. R. Carama, E. Harela, J. Wenb, R. E. Blankenshipb and G. S. Engela. 2010. Long–lived quantum coherence in photosynthetic complexes at physiological temperature. *PNAS*, 107, (29): 12766–12770.

Pankratov, D., G. Pankratova and L. Gorton. 2020. Current trends in development of photosynthetic bioelectrochemical systems for light energy conversion. 123–146. 2020 American Chemical Society Downloaded via MURDOCH UNIV on February 3, 2020 at 10: 15: 33 (UTC). ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 2020. https://doi.org/10.1021/bk–2020–1342.ch006

Park, H., N. Heldman, P. Rebentrost, L. Abbondanza, A. Iagatti, A. Alessi, B. Patrizi, M. Salvalaggio, L. Bussotti, M. Mohseni, F. Caruso, H. C. Johnsen, R. Fusco, P. Foggi, P. F. Scudo, S. Lloyd and A. M. Belcher.

2015. Enhanced energy transport in genetically engineered excitonic networks. Nature Materials, 15 (2): 211–216. Advance Online Publication www.nature.com/naturematerials

Parrish, N. F. and K. Tomonaga. 2018. A Viral (Arc)hive for Metazoan Memory. *Cell*, 172: 8–11.

Pastuzyn, E. D., C. E. Day, R. B. Kearns, M. Kyrke–Smith, A. V. Taibi, J. McCormick, N. Yoder, D. Belnap, S. Erlendsson, D. R. Morado, J. A. G. Briggs, C. Feschotte and J. D. Shepherd. 2018. The Neuronal Gene Arc Encodes a Repurposed Retrotransposon Gag Protein that Mediates Intercellular RNA Transfer. *Cell*, 172 (1–2): 275–288.e18.

Patil, A., D. Saha and S. Ganguly. 2018. A quantum biomimetic electronic nose sensor. Scientific Reports: 8: 128.pdf, 8 pp. DOI: 10.1038/s41598–017–18346–2.

Pazur, A., C. Schimek and P. Galland. 2007. Magnetoreception in microorganisms and fungi. *CEJB*, 2 (4): 597–659.

Penrose, R. 1989. The emperor's mind: concerning computers, and the laws of physics. Oxford University Press.

Penrose, R. 1994. Shadows of Shadows of the mind: an approach to the missing science of consciousness. Oxford: Oxford University Press.

Perez–Mercader, J. 2020. Mimicking simple life without biochemistry. Video lecture. Harvard University.

Phillips, A. C. 2003. Introduction to quantum mechanics. John Wiley & Sons Ltd, 284 pp.

Pilhofer, M., M. S. Ladinsky, A. W. McDowall, G. Petroni and G. J. Jensen. 2011. Microtubules in *Bacteria*: Ancient Tubulins Build a Five–Protofilament Homolog of the Eukaryotic Cytoskeleton. *PLoS Biol.*, 9 (12): e1001213.

Pinzon–Rodriguez, A. and R. Muheim. 2017. Zebra finches have a light–dependent magnetic compass similar to migratory birds. *Journal of Experimental Biology*, 220: 1202–1209.

Pizzi, R. and R. Wang and D. Rossetti. 2016. Human visual system as a double–slit single photon interference sensor: A comparison between modellistic and biophysical tests. *PLoS ONE*, 11 (1): e0147464. Doi: 10.1371/journal.pone.0147464.

Player, T. C. and P. J. Hore. 2018 Posner qubits: spin dynamics of entangled Ca_9 $(PO_4)_6$ molecules and their role in neural processing. *J. R. Soc. Interface*, 15: 20180494. http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2018.0494

Plenio, M. B. and S. F. Huelga. 2008. Dephasing–assisted transport: Quantum networks and biomolecules. *New J Phys*, 10: 113019.

Pohl, H. A., 1981. Electrical oscillation and contact inhibition of reproduction in cells. *Journal of Biological Physics*, 9 (4): 191–200.

Pokorný, J., S. J. Ha, F. Jelínek, J. Saroch, and B. Palán. 2001. Electromagnetic activity of yeast cells in the M phase. *Electro– and Magnetobiology*, 20 (1): 371–396.

Polin, R. A., S. H. Abman, D. H. Rowitch, W. E. Benitz and W. W. Fox. 2017. Fetal and neonatal physiology. Publisher: Elsevier.

Pollard, T. D., W. C. Earnshaw, J. Lippincott–Schwartz and G. T. Johnson. 2017. Mitochondria, Chloroplasts, Peroxisomes In Cell Biology. Third Edition. Elsevier Publication.

Popp, F. A. 1999. About the coherence of biophotons. Published in: "Macroscopic Quantum Coherence", Proceedings of an International Conference on the Boston University, edited by Boston University and MIT, World Scientific 1999. Pdf, 12 pp.

Popp, F. A. 2003. Properties of bio–photons and their theoretical implications. *Indian J Exp Biol*, 41: 391. Cited by Sanders (2017)

Preiner, M., J. C. Xavier, N. D. A. Vieira, K. Kleinermanns, J. F. Allen and W. F. Martin. 2019. Catalysts, autocatalysis and the origin of metabolism. *Interface Focus,* 9: 20190072. Pdf, 8 pp. http://dx.doi.org/10.1098/rsfs.2019.0072

Pryor, P. R. 2012. Analyzing Lysosomes in Live Cells. *Methods in Enzymology*. Chapter eight, 505: 145–157.

Qin, S., H. Yin, C. Yang, Y. Dou, Z. Liu, P. Zhang, C. Xie. 2015. A magnetic protein biocompass. *Nature Materials*, 15: 217–226.

Qing Tanga, B., T. Lia, X. Baia, M. Zhaoa, *et al.* 2018. Rate limiting factors for DNA transduction induced by weak electromagnetic field. Electromagnetic Biology and Medicine.pdf 12 pp. https://doi.org/10.1080/15368378.2018.1558064

Quickenden, T. I. and S. S. H. Que. 1976. The spectral distribution of the luminescence emitted during growth of the yeast Saccharomyces cerevisiae and its relationship to mitogenetic radiation. *Photochemistry and Photobiology*, 23: 201–204.

Ramgir, N. S. 2013. Electronic nose based on nanomaterials: Issues, challenges, and prospects. Hindawi Publishing Corporation. ISRN Nanomaterials Volume 2013, Article ID 941581, 21 pages http://dx.doi.org/10.1155/2013/941581

Ramon, C., J. T. Martin and M. R. Powell. 1987. Low–level, magnetic–field–induced growth modification on *Bacillus subtilis. Biolelectromagnetics*, 8: 275–282.

Rebek, J. 1991. Molecular recognition and the development of self–replicating systems. *Experientia*, 47: 1096–1104. https://doi.org/10.1007/BF01918373

Rebentrost, P., M. Mohseni, I. Kassal, S. Lloyd and A. Aspuru–Guzik.2009. Environment–assisted quantum transport. *New Journal of Physics*, 11 033003 (12 pp.)

Raven, P. H., G. B. Johnson, K. A. Mason, J. Losos and S. Singer. 2014. Biology. 10e, AP Student Edition (AP BIOLOGY RAVEN) 10th Edition. McGraw–Hill. pdf. 1283 pp.

Rensch, B. (1960), Evolution Above the Species Level (New York: Columbia University Press). Cited by: Hameroff, S. 1994.

Rieper, E., J. Anders and V. Vedral. 2010. The relevance of continuous variable entanglement in DNA. arXiv: 1006.4053V1 [quant–ph] 21 Jun 2010.

Ritz, T., Adem, S. and Schulten, K. 2000 A model for photoreceptor–based magnetoreception in birds. *Biophys. J.* 78, 707–718. (doi: 10.1016/S0006–3495 (00: 76629–X). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Rodrigues, R. A. L., T. S. Arantes, G. P. Oliveira, L. K. dos Santos Silva and J. S. Abrahão. 2019. The complex nature of Tupanviruses. Advances in Virus Research. Pdf, 32 pp. https://doi.org/10.1016/bs.aivir.2018.09.001

Romero, E., J. Prior, A. W. Chin, S. E. Morgan, V. Novoderezhkin, M. B. Plenio and R. van Grondelle. 2017. Quantum – coherent dynamics in photosynthetic charge separation revealed by wavelet analysis. *Scientific Reports*, 7: 2890. Pdf, 8 pp.

Rousseau, P., G. D. Piekarski, M. Capron, A. Domaracka, L. Adoui, F. Martín, M. Alcamí, S. Díaz–Tendero and B. A. Huber. 2020. Polypeptide formation in clusters of β–alanine amino acids by single ion impact. *Nature Communications*, 11: 3818, pdf, 8 pp. https://doi.org/10.1038/s41467–020–17653–z www.nature.com/naturecommunications

Röger, C., Y. Miloslavina, D. Brunner, A. R. Holzwarth and F. Wűrthner. 2008. Self–Assembled Zinc Chlorin Rod Antennae Powered by Peripheral Light–Harvesting Chromophores. *Journal of the American Chemical Society*, 130, 5929.

Ruddigkeit, L., R. van Deursen, L. C. Blum and J.–L. Reymond. 2012. Enumeration of 166 Billion Organic Small Molecules in the Chemical Universe Database GDB–17. *J. Chem. Inf. Model.*, 52: 2864–2875 dx.doi.org/10.1021/ci300415d.

Ruggiero, M. A., D. P. Gordon, T. M. Orrell, N. Bailly, T. Bourgoin, R. C. Brusca, T. Cavalier–Smith, M. D. Guiry and P. M. Kirk. 2015. A Higher Level Classification of All Living Organisms. *PLoS ONE*, 10 (4): e0119248. doi: 10.1371/journal.pone.0119248.

Russel D. N. and S. J. Webb. 1981. Metabolic response of *Danäus archippus* and *Saccharomyces cerevisiae* to weak oscillatory magnetic fields. *Int. J. Biometereol.*, 25: 257–262. Cited by Pazur *et al.*, 2007.

Sahu, S., S. Ghosh, K. Hirata, D. Fujita and A. Bandyopadhyay. 2013. Multilevel memory–switching properties of a single brain microtubule. *Appl. Phys. Lett.*, 102: 123701. doi: 10.1063/1.4793995.

Salari, V., N. Moradi, M. Sajadi, F. Fazileh and F. Shahbazi. 2015. Quantum decoherence time scales for ionic superposition states in ion channels. *Pysical Review*, 91: 032704. Pdf, 7 pp.

Salari, V., F. Scholkmann, I. Bokkon, F. Shahbazi and J. Tuszynski. 2016. The physical mechanism for retinal discrete dark noise: Thermal activation or cellular ultraweak photon emission? PLoS ONE 11 (3): e0148336. doi: 10.1371/journal.pone.0148336.

Sanders, C. L. 2017. Heuiristic view on quantum biophotons cellular communication. Chapter eight In: Radiobiology and radiation hormesis: New evidence and its implications for medicine and society. Springer Nature, Springer International Publishing AG. Cham, Switzerland. Pdf, 28 pp.

Sarovar, M., A. Ishizaki, G. R. Fleming and K. B. Whaley. 2010. Quantum entanglement in photosynthetic light harvesting complexes. *arXiv*: 0905.3787v2 [quant–ph] 7 Jun 2010. Pdf, 15 pp.

Sarovar, M., and Whaley, K. B. 2013. Design principles and fundamental trade–offs in biomimetic light harvesting. *New Journal of Physics*, 15, 013030.

Sarovar, M., D. M. Eisele and K. B. Whaley. 2014. Design and applications of bio–inspired quantum materials., Chapter 15 In Masoud Mohseni, Yasser Omar, Greg Engel, and Martin B. Plenio, editors, *Quantum Effects in Biology*, pp. 229–352. Cambridge University Press.

Scaruffi, P. 2001. A simple theory of consciousness. http://www.Scaruffi .com/science/Sweden/html

Schiller, Christoph. 2011. Motion Mountain. The Adventure of Physics Volume I. Twenty–fourth edition. Copyright © 2011 by Christoph Schiller. pdf 466 pp.

Schiller, Christoph. 2016. Motion Mountain. The Adventure of Physics Volume IV. Twenty–ninth edition. Copyright © 2016 by Christoph Schiller. pdf 286 pp.

Schrődinger E. 1944. What is life? The Physical Aspect of the Living Cell.

Schuberth, Christian E., Carolina Tängemo, Cvetalina Coneva, Christian Tischer and Rainer Pepperkok. 2015. Self–organization of core Golgi material is independent of COPII–mediated endoplasmic reticulum export. *Journal of Cell Science*, 128: 1279–1293.

Schvarcz, C. R. and G. F. Steward. 2018. A giant virus infecting green algae encodes key fermentation genes. *Virologym*, 518: 423–433.

Schuler D. 2008. Genetics and cell biology of magnetosome formation in magnetotactic bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 32 (4): 654–672.

Schulten, K. and Weller, A. 1978. Exploring fast electron transfer processes by magnetic fields. *Biophys. J.* 24, 295–305. (doi: 10.1016/S0006–3495 (78: 85378–8). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Schulten, K. and S. Hayashi. 2014. Quantum biology of retinal. Chap–ter 11 In Masoud Mohseni, Yasser Omar, Greg Engel, and Martin B.

Plenio, editors, *Quantum Effects in Biology*, pp. 237–263. Cambridge University Press.

Schulten, K., Staerk, H., Weller, A., Werner, H–J. and Nickel, B. 1976 Magnetic field dependence of the geminate recombination of radical ion pairs in polar solvents. *Z. Phys. Chem.* NF101, 371–390. (doi: 10.1524/zpch.1976.101.1–6.371). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Sell, C. S. 2006. On the unpredictability of odor. Angew. Chemie Int. Ed., 45: 6254–6261. Cited by Genva *et al.* (2019)

Sen, A. and A. Kohen. 2010, Enzymatic tunneling and kinetic isotope effects: chemistry at the crossroads. *J. Phys. Org. Chem.*, 23: 613–619.

Sension, R. J. 2007. Quantum path to photosynthesis. *Nature*, 446: 740–741.

Sergi, A. 2009. Quantum biology. Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti – Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Pdf, 17 pp.

Shahbazi, M. N., A. Jedrusik, S. Vuoristo, G. Recher, A. Hupalowska, V. Bolton, N. N. M. Fogarty, A. Campbell, L. Devito, D. Ilic, Y. Khalaf, K. K. Niakan, S. Fishel, and M. Zernicka–Goetz. 2016. Self–organisation of the human embryo in the absence of maternal tissues. *Nat Cell Biol.*, 18 (6): 700–708.

Sharif, F. M. 2019. General mycology. Published by Bilad Al–Rafidain University Cllege, Baquba, Iraq. 486 pp.

Shaw, J., A. Boyd, M. House, R. Woodward, F. Mathes, G. Cowin, M. Saunders and B. Baer. 2015. Magnetic particle–mediated magnetoreception. *J. R. Soc. Interface*, 12: 20150499. Pdf, 15 pp. http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2015.0499.

Shi, S., P. Kumar and K. F. Lee. 2017. Generation of photonic entanglement in green fluorescent proteins. *Nature Communications*, 8: 1934 DOI: 10.1038/s41467–017–02027–9.

Sia, P. I., A. N. Luiten, T. M. Stace, J. PM. Wood and R. J. Casson. 2014. Quantum biology of the retina. *Clinical and Experimental Ophthalmology*, 42: 582–589.

Simpson, D. 2018. At the beating heart of biology. Quantum 2.0. University of Melbourne. https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/quantum-2-0-at-the-beating-heart-of-biology

Slocombe, L., J. S. Al-Khalilib and M. Sacchi. 2021. Quantum and classical effects in DNA point mutations: Watson–Crick tautomerism in AT and GC base pairs. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 23: 4141–4150.

Smit, H. 2018. Inclusive Fitness Theory and the Evolution of Mind and Language. *Erkenn* (2018) 83: 287–314 https://doi.org/10.1007/s10670-017-9890-6. Pdf, 28 pp.

Spinoza, B. 1677. Ethica in Opera quotque reperta sunt. 3rd edition, eds. J. van Vloten and J. P. N. Land (Netherlands: Den Haag). Cited by: Hameroff, S. 1994.

Son, M., A. Pinnola, S. C. Gordon, R. Bassi and G. S. Schlau-Cohen. 2020. Observation of dissipative chlorophyll-tocarotenoid energy transfer in light-harvesting complex II in membrane nanodiscs. *Nature Communications*, 11: 1295. Pdf, 8 pp.

Sonner, J. M. and R. S. Cantor. 2013. Molecular mechanisms of drug action: an emerging view. *Ann Rev Biophys*, 42: 143–67.

Spiegelman, S., I. Haruna, I. B. Holland, G. Beaudreau and D. Mills. 1965. The synthesis of a self-propagating and infectious nucleic acid with a purified enzyme. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 54: 919–927.

Stapp, H. P. 1991. Quantum propensities and the brain-mind connection. *Found. Phys.*, 21: 1451–1477. doi: 10.1007/BF01889652.

Stapp, H. 1995. Why classical mechanics cannot naturally accommodate consciousness but quantum mechanics can. *Psyche*, 2: 1–23.

Stapput, K., O. Güntürkün, K.–P. Hoffmann, R. Wiltschko and W. Wiltschko. 2010. Magnetoreception of directional information in birds requires nondegraded vision. *Current Biology*, 20: 1259–1262.

Strauss, J. S. and E. G. Strauss. 2008. Viruses and human diseases. 2nd. Ed.

Summhammer, J., V. Salari and G. Bernroider. 2012. A Quantum–mechanical description of ion motion within the confining potentials of voltage gated ion channels. *Journal of Integrative Neuroscience*, 11 (2), arXiv: 1206.0637v1 [q–bio.NC] 4 Jun 2012. Pdf, 13 pp.

Summhammer, J. G. Sulyok and G. Bernroider. 2018. Quantum dynamics and non–local effects behind ion transition states during permeation in membrane channel proteins. *Entropy,* 20: 558.

Summhammer, J., G. Sulyok and G. Bernroider. 2020. Quantum Mechanical Coherence of K^+ Ion Wave Packets Increases Conduction in the KcsA Ion Channel. *Appl. Sci.*, 10: 4250; doi: 10.3390/app10124250.

Taiz, L. and E. Zeiger. 2002. Plant physiology, 3rd ed. Publisher: Sinauer Associates. Pdf, 690 pp.

Tang, R. and J. Dai. 2014. Spatiotemporal imaging of glutamate–induced biophotonic activities and transmission in neural circuits. *PLoS ONE*, 9 (1): e85643. doi: 10.1371/journal.pone.0085643.

Tarlacı, S. and M. Pregnolato. 2015. Quantum neurophysics: From non–living matter to quantum neurobiology and psychpathology. *Journal of Psychophysiology*, (2015), doi: 10.1016/j.ijpsycho.2015.02.01.Pdf, 38 pp.

Tegmark, M., 2000. The importance of quantum decoherence in brain processes. *Phys. Rev. E.*, 61: 4194.

Tegmark, M. 2007. The Mathematical Universe. *arXiv*: 0704.0646v2 [gr–qc] 8 Oct 2007.

Tegmark, M. 2014. Consciousness is a mathematical pattern. Lecture TEDx Cambridge. https://www.youtube.com/watch?v=GzCvlFRISIM

Tegmark, M. 2017. Life 3.0: being human in the age of artificial intelligence. Published by Alfred A. Knopf. pdf, 367 pp.

Thalau, P., T. Ritz, H. Burda, R. E. Wegner and R. Wiltschko. 2006. The magnetic compass mechanisms of birds and rodents are based on different physical principles. *Journal of the Royal Society Interface*, 3 (9): 583–587.

Theise, N. D., and M. C. Kafatos. 2013. Complementarity in biological systems: a complexity view. *Complexity*, 18: 11–20. doi: 10.1002/cplx.21453.

Thomas, Y. 2007. The history of the memory of water. *Homeopathy*, 96: 151–157.

Thomas, Y., M. Schiff, L. Belkadi, P. Jurgens, L. Kahhak and J. Benveniste. 1999. Activation of human neutrophils by electronically transmitted phorbol–myristate acetate. *Medical Hypotheses*, 54 (1): 33–39.

Thorwart, M., J. Eckel, J. H. Rina, P. Nalbach and S. Weiss. 2009. Enhanced quantum entanglement in the non–Markovian dynamics of biomolecular excitons. *Chemical Physics Letters*, 478 (4–6): 234–237.

Tinsley, J. N., M. I. Molodtsov, R. Prevedel, D. Wartmann, J. Espigule'–Pons, M. Lauwers and A. Vaziri. 2016. Direct detection of a single photon by humans. *Nature Communications*, 7: 12172.
DOI: 10.1038/ncomms12172 www.nature.com/naturecommunications.

Trewavas AJ. 2003. Aspects of plant intelligence. *Annals of Botany*, 9: 1–20.

Tsuchiya, H. 2017. Anesthetic Agents of Plant Origin: A Review of Phytochemicals with Anesthetic Activity. *Molecules*, 22, 1369; doi: 10.3390/molecules22081369.

Turin, L. 1997. A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception. *Chemical Senses*, 21 (6): 773–791.

Turing A. 1952. The chemical basis for morphogenesis. *Phil Trans Roy Soc London*, 237: 37–72.

Turok, Neil. 2015. The Astonishing Simplicity of Everything. Public Lecture https://www.youtube.com/watch?v=f1x9lgX8GaE

Turok, Neil. 2018. We Are Innovators –on the Power of Ideas. Public Lecture. Perimeter Institute. https://www.youtube.com/watch?v=B0OIbRUvdU4

Tyson, Neil de Grasse, Charles Tsun–Chu Liu and Robert Irion 2000. The universe: at home in the cosmos. Washington, DC: National Academy Press.

Tzambazakis, A. 2015. The evolution of the biological field concept. Chapter 1 In: D. Fels, M. Cifra and F. Scholkmann (Editors), *Fields of the Cell*, pages: 1–27.

Vacha, M. 2019. Magnetoreception of Invertebrates. The Oxford Handbook of Invertebrate Neurobiology. Edited by John H. Byrne. Pdf, 40 pp. Print Publication Date: Apr 2019 Subject: Neuroscience, Invertebrate Neurobiology. Online Publication Date: May 2017 DOI: 10.1093/oxfordhb/9780190456757.013.16.

Vaglio, S. 2009. Chemical communication and mother–infant recognition. Communicative & Integrative Biology, 2: 3, 279–281, DOI: 10.4161/cib.2.3.8227.

VanWijk, R. 2001. Bio–photons and bio–communication. Journal of Scientific Exploration, 15 (2): 183–197.

VanWijka, R. and E. d. P. A. VanWijkb. 2005. An introduction to human biophoton emission. *Forsch Komplementärmed Klass Naturheilkd*, 12: 77–83.

Van Leuven, J. T., R. C. Meister, C. Simon and J. P. McCutcheon. 2014. Sympatric speciation in a bacterial endosymbiont results in two genomes with the functionality of one. *Cell*. 158 (6): 1270–80.

Vattay, G., S. Kauffman and S. Niiranen. 2014. Quantum biology on the edge of quantum chaos. *PLoS ONE*, 9 (3): e89017. doi: 10.1371/journal.pone.0089017.

Vaziri, A. and M. B. Plenio. 2010. Quantum coherence in ion channels: resonances, transport and verification. *New J. Phys.*, 12: 085001.pdf, 19 pp.

Viand, R. E., F. Höfling, R. Klein and L. D. Site. 2020. Open systems out of equilibrium: Theory and simulation. *arXiv*: 2005.07481v1 [cond-mat.stat-mech] 15 May 2020. Pdf, 12 pp.

Wächtershäuser, G. 1988. Before enzymes and templates: theory of surface metabolism. *Microbiological Reviews,* 52 (4): 452–484.

Walker *et al.* 2017. Introduction. Chapter One In: From matter to life, information and causality. Ed. Walker *et al.* Cambridge University Press. 516 pp.

Wang, L., M. A. Allodi and G. S. Engel. 2019. Quantum coherences reveal excited-state dynamics in biophysical systems. *Nature Reviews Chemistry*, 3: 477–490.

Wang, T., J. Zeng, C. B. Lowe, R. G. Sellers, S. R. Salama, M. Yang, S. M. Burgess, R. K Brachmann and D. Haussler. 2007. Species-specific endogenous retroviruses shape the transcriptional network of the human tumor suppressor protein. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104: 18613–18618.

Wang, W., H. W. Hellinga and L. S. Beese, 2011. Structural evidence for the rare tautomer hypothesis of spontaneous mutagenesis," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (43): 17644–17648.

Wang, Z., N. Wang, Z. Li, F. Xiao and J. Dai. 2016. Human high intelligence is involved in spectral redshift of biophotonic activities in the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (31): 8753-8758. Tarlaci, S. 2010. Why we need quantum physics for cognitive neuroscience. *NeuroQuantology*, 8 (1: 66-76).

Watson, J. D and Crick, F. H. C. 1953 Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 171, 964–967. (doi: 10.1038/171964b0). Cited by McFadden & Al-Khalili (2018)

Weingarten, C. P., P. M. Doraiswamy and M. P. A. Fisher. 2016. A new spin on neural processing: Quantum cognition. *Front. Hum. Neurosci.*, 10: 541. doi: 10.3389/fnhum.2016.00541.

Welsh, J. E., P. Steenhuis, K. R. de Moraes, J. van der Meer, D. W. Thieltges and C. P. D. Brussaard. 2020. Marine virus predation by non-host organisms. *Scientific Reports*, 10: 5221. Pdf, 9 pp. https://doi.org/10.1038/s41598-020-61691-y

Whaley, K. B., M. Sarovar and A. Ishizaki. 2011. Quantum entanglement phenomena in photosynthetic light harvesting complexes. *Procedia Chemistry*, 3: 152–164.

Whittaker, M. M., D. P. Ballou and J. W. Whittaker. 1998. Kinetic isotope effects as probes of the mechanism of galactose oxidase. *Biochemistry*, 37: 8426–8436.

Whittet, D. 2017. Origins of life a cosmic perspective (Iop Concise Physics). Chapter 1 Introduction. Morgan & Claypool Publishers. 154 pp. doi: 10.1088/978-1-6817-4676-0ch1.

Wilczek, F. 2005. The Universe is a Strange Place–Ford/MIT Nobel Laureate Lecture Series 3/7/2005.

Williams, D. L. 2016. Light and the evolution of vision. *Eye*, 30: 173–178.

Williams, P. A., R. J. Ingebretsen and R. J. Dawson. 2006. 14.6 mT ELF magnetic field exposure yields no DNA breaks in model system *Salmonella*, but provides evidence of heat stress protection. *Bioelectromagnetics*, 27: 445–450.

Willows, R. D., Y. Li., H. Scheer and M. Chen. 2013. Structure of chlorophyll *f*. *Org. Lett.*, 15 (7): 1588–1590.

Wiltschko, W. and Wiltschko, R. 1972. The magnetic compass of European robins. Science, 176, 62–64. (doi: 10.1126/science.176.4030.62). Cited by McFadden & Al–Khalili (2018)

Wiltschko, W. and R. Wiltschko. 1981. Disorientation of inexperienced young pigeons after transportation in total darkness. *Nature*, 291: 433–434.

Wiltschko, R. and W. Wiltschko. 1998. Pigeon homing: effect of various wavelengths of light during displacement. *Naturwissenschaften*, 85: 164–167.

Wiltschko, W. and R. Wiltschko. 2005. Magnetic orientation and mag–netoreception in birds and other animals. *J Comp Physiol* A, 191: 675–693.

Wiltschko, R. and W. Wiltschko. 2014. Sensing magnetic directions in birds: radical pair processes involving cryptochrome. *Biosensors,* 4: 221–242.

Wiltschko, R. and W. Wiltschko. 2019. Magnetoreception in birds. *J. R. Soc. Interface*, 16: 20190295. Pdf, 10 pp. http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2019.0295

Wiltschko, W., U. Munro, H. Ford and R. Wiltschko. 2006. Bird navigation: What type of information does the magnetite–based receptor provide? *Proceedings of the Royal Society* B, 273 (1603): 2815–2820.

Woese, C. R. 1967. The Genetic Code. New York: Harper & Row. Cited by Kun *et al.* (2015)

Woese, C. R. 1994. There must be a procaryote somewhere microbiology's search for itself. *Microbiol. Rev.*, 58: 1–9.

Woese, C. R. and G. E. Fox. 1977. The concept of cellular evolution. *J Mol Evol*, 10: 1–6.

Xavier, J. C., W. Hordijk, S. Kauffman, M. Steel and W. F. Martin. 2020 Autocatalytic chemical networks at the origin of metabolism. *Proc.*

R. Soc. B, 287: 20192377. Pdf, 10 pp. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2019.2377

Zhen, X., H. Zhou, W. Ding, B. Zhou, X. Xu, V. Perčulija, C.–J Chen, M.–X. Chang, M. I. Choudhary and S. Ouyang. 2019. Structural basis of AimP signaling molecule recognition by AimR in Spbeta group of bacteriophages. *Protein Cell*, 10 (2): 131–136.

Xiea, J., H. Pinga, T. Tana, L. Leia, H. Xieb, X–Y. Yanga and Zhengyi Fua. Bioprocess–inspired fabrication of materials with new structures and functions. *Progress in Materials Science,* 105: 100571.

Xin, H., W. J. Sim, B. Namgung, Y. Choi, B. Li and L. P. Lee. 2019. Quantum biological tunnel junction for electron transfer imaging in live cells. *Nature Communications*, 10: 3245. Pdf, 11 pp.

Yarus, M. 2011. Life from an RNA World: The Ancestor Within. Harvard University Press. 208 pp.

Yufik, Y. M., Sengupta, B., Friston, K., eds. 2017. Self–Organization in the Nervous System. Lausanne: *Frontiers Media*. doi: 10.3389/978–2–88945–340–5.

Zeng, Z., J. Wei, Y. Liu, W. Zhang and T. Mabe. 2018. Magnetoreception of photoactivated cryptochrome 1 in electrochemistry and electron transfer. *ACS Omega*, 3: 4752–4759.

Zeravcica, Z. and M. P. Brenner. 2014. Self–replicating colloidal clusters. *PNAS*, 111 (5): 1748–1753.

Zhang, Y. 2016. Quantum coherence and entanglement in open quantum systems. *Open Access Dissertations*. 895. https://docs.lib.purdue.edu/open_access_dissertations/895

Zimmer, M. 2002. Green Fluorescent Protein (GFP): Applications, structure, and related photophysical behavior. *Chem. Rev.*, 02: 759–781.

Zurek, W. H. 2002. Decoherence and the transition from quantum to classical—revisited. *Los Alamos Science*, 27: 1–24.

Zurek, W. H. 2003. Quantum darwinism and envariance. *arXiv*: quant-ph/0308163v1 28 Aug 2003. Pdf, 17 pp.

Zurek, W. H. 2009. Quantum Darwinism. *arXiv*: 0903.5082v1 [quant-ph] 29 Mar 2009. pdf 10 pp.

هنـــداوي