الفصل 5

الجسم الكهربائي

يعمل الجسم والعقل بالكهرباء، وتُزَوَّدُ خلايانا بالطاقة بواسطة مجالات كهربائية هائلة تدفع تيارات من الجسيمات المشحونة خلال عدد لا يحصى من الأسلاك الدقيقة. وهنالك أربعة أنواع مختلفة من الكهرباء الخليوية تحرِّك آلات دقيقة: محركات، وبوابات، ومضخات، ومزاليج، ومصانع كيميائية. أما السرعة فكبيرة على نحو لا يُتصور، والقوى الكهربائية ضخمة، والشرر المتطاير يهدِّد الحياة. هذا هو السر الحقيقي للطاقة الحية كما أن الكهرباء هي القوة الحيوية الحقيقية.

يبدو من الصعب في البداية أن نصدِّق أن الناس تتحرَّك بالكهرباء. فإذا لمسنا الجسم، فإننا لا نصاب بصدمة، وليس هنالك شرر نشاهده ولا يقف شعر رأسنا. ويرجع السبب إلى المقياس الدقيق الذي تعمل به الدارات الكهربائية البيولوجية. وهي دقيقة على نحو لا يخطر على بال مصمِّم الرقائق المجهرية. وتنعزل الشحنات الكهربائية

بواسطة سماكة الغشاء ـ التي تبلغ خمسة أجزاء من بليون من المتر أَو أقل من جزء من مليون من عرض الظفر. والقوة المحرِّكة الكهربائية صغيرة على نحو مماثل، حوالي 0,1 ڤولت، ولذلك ليس هنالك فرصة للإصابة بصدمة كهربائية (وللمقارنة، القدرة الكهربائية المنزلية التي يمكن أن تصيبك بصدمة تعمل بقوة كهربائية تتراوح بين 120 ـ 240 ڤولت. إن 0,1 ڤولت عبر خمسة أجزاء من بليون من المتر يشكِّل مجالاً كهربائياً فيه عشرون مليوناً من الڤولتات في المتر، وهذا أكبر بكثير من مجال العاصفة الرعدية التي تسبِّب البرق ـ حوالي مليون ڤولت في المتر. ويشكِّل هذا المجال قوة كهربائية ضخمة تحاول أن تدفع الجزيء المشحون كهربائياً عبر الغشاء. وهكذا تصبح الأغشية الخليوية مزودة بالطاقة الكهربائية وتُوزِّع الكهرباء في أنحاء الخلية. ويكون داخل الجسم رطباً ولياً وسبعين بالمئة منه ماء. وهذا يجعله منطقة غير مناسبة للكهرباء، لأن الكهرباء كما نعلم تنتقل عبر أسلاك معدنية صلبة محاطة بعازل بلاستيكي وتسبِّب مشاكل إذا اختلطت بالماء. وعلى كل حال، إن السبب الذي من أجله لا ينبغي للماء والكهرباء أن يختلط هو أن الماء ناقل جيد للكهرباء، مع أن الكهرباء في الخلية لا تُنْقل بواسطة الإلكترونات، (كما هو الحال في الأسلاك)، ولكن بواسطة البروتونات والملح (كلوريد الصوديوم) داخل الماء. فإذا وضعنا أسلاكاً مشحونة بالتيار الكهربائي في حوض الاستحمام، فإننا نستطيع أن نقتل قطة (أَو أنفسنا) كما أنه يمكن زيادة التيار بإضافة الملح إلى ماء الاستحمام. وعلى نحو مشابه، وفي

داخل الخلية، تُحْملُ التيارات الكهربائية من قبل البروتونات والملح اللذين يتحرَّكان في ماء الخلية.

تبدو الكهرباء غامضة. فهي تتسلَّل تحت أرض غرفنا وخلال جدراننا لتزود بصمت منازلنا ومدننا بالطاقة. وتندفع عبر السماء على شكل البرق، الذي كان سلاحاً مخيفاً. والآن يبدو أن أجسامنا الخاصة بنا وأرواحنا مشحونة بها. ولكن ما هي الكهرباء؟ إنها تيار من الشحنات ـ تماماً كتيار من الماء في الجدول. يجري الماء من أرض مرتفعة إلى أرض منخفضة تحت قوة الجاذبية. وتجري الشحنة الكهربائية من مناطق ذات شحنة عالية إلى مناطق ذات شحنة منخفضة مدفوعة بالقوة الكهربائية. وما الشحنة إلاَّ مجرد مادة يمكن أن تُدْفع أَو تُسْحب من قبل القوة الكهربائية. والمادة مؤلفة من مزيج من الإلكترونات (المشحونة سلباً) والبروتونات (المشحونة إيجاباً) والنيوترونات (محايدة ـ بدون شحنة). ومعظم المادة مكونة من عدد متساوٍ من الإلكترونات والبروتونات وجسيمات متعادلة الشحنة. ولكن إذا كان هنالك زيادة في عدد الإلكترونات عندئذٍ تشحن المادّة سلباً، وإذا كان هنالك زيادة في عدد البروتونات عندئذ تشحن إيجاباً. وجريان الشحنات داخل السلك سببه جريان الإلكترونات التي تستطيع أن تمر خلال المعدن بسبب حجمها المتناهي الصغر، وبسبب ارتباطها غير المحكم بالمعدن. ولا يشترط بالكهرباء أن تُنقل بالإلكترونات، لأن أي شحنات متحرِّكة يمكن أن تقوم بذلك. وتُنقل الكهرباء داخل خلايا جسمنا بالإلكترونات أَو البروتونات أَو الفوسفات

أَو إيونات الصوديوم. ويشكِّل الصوديوم نصف الملح المشترَك. وعندما ينحل الملح في الماء، يطفو الصوديوم متحرِّراً من الكلوريد، ولكنه يفقد إلكتروناً لصالح الكلوريد، ولذلك يصبح للصوديوم شحنة موجبة زائدة. «والأيون» ذرة أَو جزيء له شحنة، ولذلك أيون الصوديوم هو ذرة صوديوم بشحنتها الموجبة. أما الفوسفات فعبارة عن جزيء صغير يُسَمِّد به المزارعون نباتاتهم، ويصبح له شحنة سالبة عندما يُحل بالماء. وكما أن الماء الجاري في الجدول يستطيع أن يقوم بعمل، كدفع دولاب طاحونة مثلاً، كذلك الشحنة الكهربائية في السلك تستطيع أن تقوم بعمل وذلك بدفع الشحنات الموجودة في المحرك الكهربائي. إن القوة الكهربائية أعظم بكثير من قوة الجاذبية، ولذلك تستطيع أن تقوم بعمل أكبر إذا قارناها بقوة الجاذبية.

لاحَظَ الإغريق القدماء بعض الخصائص الغريبة للكهرباء. وكان الفيلسوف طاليس Thales يعرف أنّه إذا دَلَك العنبر، فإنه يجذب أجساماً أُخرى. وكان أبقراط يعلم أن السمك الرعاد الكهربائي يسبِّب صدمة، واستعمله فيما بعد لمعالجة الصداع. ولكن أول دراسة علمية جرت، كانت على يدي وليام غيلبيرت William Gilbert طبيب الملكة إليزابيث الأولى الذي مَيَّز بين القوى الكهربائية والمغناطيسية. كما أنّه هو الذي صاغ كلمة «كهربائي» (من الكلمة الإغريقية «إلكترون» وتعني عنبر). وساهم الكثير من العلماء بمن فيهم بنيامين فرانكلين وجوزيف بريستلي في تقدم فهم خصائص الكهرباء في القرن السابع والثامن عشر. وهنالك من شَبّه الكهرباء بقوة حيوية أَو بالروح. وقد أكّد ذلك

بوضوح لويجي غالڤاني وذلك باكتشافه المثير سنة 1770 عن الكهرباء الحيوانية. كان غالفاني (1737 ـ 1798) طبيباً إيطالياً، اكتشف بالصدفة عند تقطيع أوصال ضفدع، أن شرارة كهربائية قد مرت من المشرط إلى عصب الساق، مسبِّبة تقلّص عضلة الضفدع. وقد أدَّت هذه التجربة إلى عدد من التجارب المرعبة، ومن بينها، شطر ضفدع إلى نصفين أثناء ليلة عاصفة، وربط عصب ساقها بسلك يتجه نحو السماء. ومن الملفت للنظر أن السيقان قد تقلَّصت عندما كان هنالك رعد وبرق. وعندها وُلِدَت قصة وحش فرانكينشتاين وكذلك قوة الحياة الكهربائية. الكونت أليساندرو ڤولتا (1745 ـ 1827) فيزيائي إيطالي، استخدم هذه الأفكار ليبيِّن أن الكهرباء كانت حقاً القوة وراء السيالة العصبية والتقلّص العضلي. وهكذا كان يُنْظَرُ إلى الكهرباء أنها كانت مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالقوة الحيوية، وإذا كان هنالك شيء يستحق أن يدعى قوة حيوية فهو الكهرباء.

ولكن من أين تأتي الكهرباء التي تحرِّك أجسامنا، إذاً؟ إنّها تأتي من الطعام الذي نتناوله والهواء الذي نستنشقه. تُنزع الإلكترونات من الطعام وتُلقم للأوكسجين داخل خلايانا. وأثناء الانتقال من الطعام إلى الأوكسجين تمر الإلكترونات من خلال «سلسلة نقل إلكترونية» تتألَّف من سلك مكون من ذرات النحاس الحديد متوضعة في البروتينات الموجودة في الغشاء. وتُلقم الإلكترونات إلى السلك من جزيئات الطعام بطاقة كبيرة وتُسحب الإلكترونات من الطرف الآخر للسلك إلى أوكسجين بطاقة منخفضة. وهكذا يجري تيار كهربائي

على طول هذا السلك والذي يمكن استخدامه ليقوم بعمل، لأن السلك يمر خلال آلات بروتينية مختلفة موجودة في الغشاء. وهذا مشابه للماء الذي يجري في أنبوب أو نهر. فهو يُدْفع من طرف ويُسْحب من الطرف الآخر. وتُدْفع الدواليب بالماء الجاري لكي تقوم بالعمل المطلوب. وهكذا يُدار الدولاب بالماء الذي يجري من مستوى طاقة عالية (أعلى من الدولاب) إلى مستوى طاقة منخفضة (في المستوى المنخفض من الجدول). وعلى نحو مشابه، يُحرِّكُ تيارٌ من الإلكترونات الذي يمر من خلال سلسلة النقل الإلكترونية، من المستوى العالي للطاقة إلى المستوى المنخفض للطاقة آلات مختلفة (المضخات البروتينة)، لأنه ينبغي عليها أن تتوقف وتُنْقل بين جزيئات مختلفة من السلسلة، التي تشبه قناة عليها حواجز وطواحين وبرك الطواحين.

أدَّى مفهوم تيار الإلكترونات المار من خلال سلسلة نقل إلى تكوين آراء متعارضة لكل من هينرك وايلاند Heinrich Wieland (1877 ـ 1957) وأوتو ووربيرغ (1883 ـ 1970) Otto Warburg. وقد أمضى هذان الكيميائيان البيولوجيان الكثير من مهنتهما الشهيرتين في نزاع مع بعضهما انتهى بهدنة في الحرب العالمية الأولى عندما خدم ووربيرغ في سلاح الفرسان على الجبهة الشرقية، وعندما كان وايلاند مديراً لمشروع الحرب الكيميائية. ويمكن أن يُنظر إلى وايلاند كنموذج للعالِم التحليلي الدقيق، فقد درس بعناية فائقة قلب القوى الباطنية في الفرد. وصنع وحدد بنية الكثير من السموم القاتلة، كما عمل على

تشكيل مركب كيميائي من أصبغة تُعطي ألواناً مشابهة لأجنحة الفراشات. وكان قد مُنحَ جائزة نوبل سنة 1927 لتحديد البنية الكيميائية لمركبات الستيرويد، علماً أنه تبين فيما بعد أن ذلك لم يكن صحيحاً. أما ووربيرغ فكان عليه أن ينتظر حتى سنة 1931 لينال جائزة نوبل، وهذا ما أغضبه كثيراً. ولكن غطرسته وسوء طبعه يُرَجَّحُ عليهما ذكاؤه وألمعيته. كان ووربيرغ مديراً لمعهد ماكس بلانك لفيزيولوجيا الخلية في برلين حتى سنة 1941، عندما أُبعدَ عن منصبه من قبل النازيين لأن أحد والديه كان يهودياً، ولكن مقامه الدولي ونفعه كانا كبيرين ولذلك أُعيد تنصيبه مرة أُخرى وَرُشِّح لجائزة نوبل ثانية، علماً أن القوانين النازية منعته من قبولها.

بَيَّن علماء القرن الثامن والتاسع عشر أن الطعام الذي تهضمه القناة الهضمية كان يحترق باستعمال أوكسجين الهواء الذي نتنفسه داخل كل خلية من الجسم: أي عمليات التنفس الخليوي. والمشكلة التي واجهها علماء الطاقة البيولوجيية أوائل القرن العشرين كانت عن كيفية وصول الإلكترونات من الطعام إلى الأوكسجين. وليس هذا بسؤالٍ تافه لأن الإلكترونات لا تستطيع أن تنتقل وحدها (إلاَّ إذا نُقلت بواسطة معدن كالحديد أَو النحاس) ـ ولذلك لا تستطيع معظم الأشياء أن تنقل الكهرباء. ولكن يمكن للإلكترونات أن تنتقل من جزيء إلى جزيء إذا اجتمعت مع البروتونات مثل ذرات الأوكسجين (إلكترون واحد وبروتون واحد يساوي ذرة هيدروجين). وقال وايلاند إن آلات الجزيء (الأنزيمات) داخل الخلايا تفصل الهيدروجين عن الطعام.

وهذا «الهيدروجين المُنشَّط» H يتفاعل بطريقة ما مع الأوكسجين O2 ليشكِّلا ماءً H2O. وَبُنِيَ رَأيُ وايلاند على أبحاث الكثير من الكيميائيين البيولوجيين في العقدين الأوليين للقرن الثاني عشر الذين قالوا إن هنالك فعلاً آلات جزيئية من خلايانا التي يمكن أن تأخذ الأوكسجين من الطعام ومن جزيئات عضوية أُخرى. وتدعى هذه الآلات بآلات الزهرجة، وتعني أن آلة الجزيء هي التي تُزيل الهيدروجين، كما سُميت النظرية بنظرية زهرجة التنفس.

اعترض أتو ووربيرغ بشدة ـ وقالت نظريته إن التنفس يحدث لأن هنالك آلة داخل الخلايا تشتمل على الحديد الذي يتحد مع الأوكسجين، ويأخذ الأوكسجين الإلكترونات من الحديد وبعدئذ يأخذ الحديد الإلكترونات من الطعام، وكان يعتقد ووربيرغ أن هنالك آلة واحدة «أنزيمة تنفسية» وهي أوكسيديس، أي آلة تستخدم الأوكسجين وتأخذ الإلكترونات من جزيئات أُخرى وتستهلك جميع الأوكسجين الذي استنشقه الجسم واستعمله. وقد توصل ووربيرغ إلى هذا الاستنتاج بعد اكتشافه سنة 1913 أن كميات ضئيلة من مادة السيانيد كانت تمنع استهلاك أوكسجين الخلايا والأنسجة، وكان من المعروف أن السيانيد والأوكسجين كانا يتحدان بالحديد، واعتقد ووربيرغ (وكان على صواب) أن مادة السيانيد كانت تتحد مع الحديد داخل الأنزيمة التنفسية فتمنع اتحاد الأوكسجين مما يؤدي إلى منع التنفس (والموت نتيجة لذلك).

لم يَبْرز أَو يَظْفر وايلاند أَو ووربيرغ بشيء، لأن كليهما كانا على

صواب وعلى خطأ، وكان كل واحد منهما ينظر إلى طرف من سلسلة الآلات: وهي سلسلة النقل الإلكتروني. فعلى قمة السلسلة كان هنالك عملية الزهرجة التي كانت تُطلق الإلكترونات من الطعام، وعند أسفلها كانت هنالك عملية أوكسيديس (الآن تدعى أوكسيديس كروموزونات الخلية) التي تحتوي على الحديد الذي ينقل الإلكترونات إلى الأوكسجين. وكأن وولبيرغ ووايلاند كانا يدرسان الطرفين المتقابلين لفيل ضخم (التنفس). وكان الرأس لوايلاند (حيث دخلت الإلكترونات) الذي أكد أن كل شيء وهنالك كان للفيل. وكان الطرف الخلفي لووربيرغ (حيث خرجت الإلكترونات) واعتقد أن ذلك كان ماهية الفيل. إن جهلهما الواضح أمر غير مفاجئ إذا أخذنا بعين الاعتبار الوسائل المتوفرة لهما. إن هنالك في الواقع حوالي ألف آلة مختلفة لكل منهما أنشطة خاصة في الأنسجة. ولكنهما لو علما بذلك لربما أخضعا ذلك للتجربة.

وأخيراً سويت خلافاتهما عندما اكتشفت صلة الوصل بينهما من قبل ديڤد كيلين David Keilin وهو كيميائي بولندي المولد يعمل في إنكلترا كعالم طفيليات. كان هنالك بين الطرف الأمامي والطرف الخلفي للفيل الخيالي سلسلة من كروموزونات الخلية، وهي آلات جزيئية تأخذ الإلكترونات من الزهرجة وتوصلها إلى الأوكسجين. إن كلمة «كروموزونات» تعني صبغيات الخلية، وهي في الواقع مكونات الخلايا التي تعطيها لوناً. وتغير لونها عندما تكسب أو تخسر إلكترونات. ولكن كيف اكتشفها كيلين واكتشف دورها في عملية

التنفس؟! كان كيلين يعمل بأصبغة ألوان الحشرات، وكان يَستعمل موشوراً يُمْسَكُ باليد، تمكن بواسطته أن يحلل الضوء الصادر من النسيج إلى ألوان طيف قوس قزح. واستطاع كيلين أن يشاهد مباشرة أي الألوان التي كانت تتغير في النسيج. ووجد بعض العُثة بدون هيموغلوبين، الأمر الذي يَسَّر عليه أن يرى أصبغة الجسم عديمة الهيموغلوبين (كروموزونات الخلية). وألصق ظَهْرَ عُثة على الشريحة الزجاجية، ولاحظ أنه عندما كانت تضرب أجنحتها بشدة محاولة الهروب فإن عضلات طيرانها تغير لونها، وكانت تعود إلى ألوانها عندما توقف تحريك جناحيها. وقد حدث تغير ألوان مشابه، عندما حرم كيلين العُث من الأوكسجين. لقد عذَّب كيلين الطبيعة من أجل الكشف عن أسرار الطاقة الحية. بعدئذٍ فصل كروموزونات الخلية وشرح كيف تُشَكِّلُ سلسلة تتلقى الإلكترونات من الطعام (من خلال عمليات الزهرجة) وَتُمَرِّرُ الإلكترونات إلى الأوكسجين. (من خلال أوكسيديس كروموزونات الخلية) وهكذا تشكل سلسلة النقل الإلكتروني، أي صلة وصل أفكار وايلاند وَووربيرغ.

تسمح سلسلة النقل الإلكتروني للإلكترونات أن تنتقل من الطعام إلى الأوكسجين مُوَلِّدَةً إمداداً مستمراً من الكهرباء داخل الخلية. ولكن ماذا تفعل هذه الكهرباء؟ كيف تحرك عضلاتنا وعقولنا؟ أما صلة الوصل التالية في سلسلة الاكتشافات فلم تتشكل حتى سنة 1960 عندما اكتُشِف أن كهرباء الإلكترون تُسْتَخدم لتوليد كهرباء البروتون. وتُسْتخدمُ الإلكترونات التي تجري في سلسلة النقل لتشغيل الآلات

التي هي قسم من السلسلة نفسها. هذه الآلات هي «مضخات بروتينية» ووظيفتها ضخ البروتونات خارج المايتوكندريا. وكان ووربيرغ أول من عزل أَو فصل المايتوكندريا كيميائياً عن بقية المواد، وهي عبارة عن جسيمات داخل الخلية وتعمل عمل محطة الطاقة للخلية. وتقع المضخات مع سلسلة النقل الإلكترونية في غشاء المايتوكندريا وتأخذ البروتونات من داخل المايتوكندريا وتضخها خارجها. ولهذه البروتونات شحنة موجبة وتُضخُّ خارجاً وتتجمع الشحنات الموجبة خارجاً، بينما تُتْرَكُ الشحنات السالبة داخل المايتوكندريا، وهذا يشكِّل اختلافاً في الڤولتات في الغشاء يقدر بـ 0,2 ڤولت ومجالاً كهربائياً يقدَّر بأربعين مليون ڤولت في المتر. ولأن هذه الكهرباء مَبنية على البروتونات وليس على الإلكترونات، لذلك تسمى أحياناً كهرباء البروتون. وهكذا، فإن كهرباء الإلكترون التي يولّدها احتراق الطعام في المايتوكندريا تُستخدم من قبل مضخات البروتون لتوليد كهرباء البروتون. ثم تُستخدم كهرباء البروتون هذه لتوليد الشكل التالي للطاقة التي تستخدمها الخلية ـ وهي ATP أَو كهرباء الفوسفات.

نال العالم الإنكليزي بيتر ميتشيل Peter Mitchell (1920 ـ 1992) جائزة نوبل سنة 1978 لاكتشافه أن كهرباء البروتون كانت شكلاً من أشكال الطاقة العامة في الخلايا. وقد تبيّن أن هذه الفكرة وصاحبها كانا مثيرين للجدل والخلاف بصورة كبيرة. وكان ميتشيل يعمل في بحث علمي في مخبرين في كامبريدج وأدنبره لمدة سنوات. ولكنه

هجر المكانين بعد أن وجد أن الجو الأكاديمي يسبِّب له خوفاً مرضياً ناشئاً عن الأماكن المقفلة أَو الضيقة. فأنشأ مخبره الخاص على طرف بودمين مور في منطقة كونوول المحاطة بالخراف وأرض سبخية منعزلة. وأشار عمله إِلى أن المايتوكندريا يمكن أن تضخ وتولِّد مجالاً كهربائياً يُستخدم في تشكيل ATP. وحاول الكثير من العلماء، خلال تلك الفترة، أن يثبتوا خطأ ميتشيل، الأمر الذي غالباً ما كان يؤدي إِلى القضاء على أعمالهم وإفلاسهم، ونشأ نزاع مرير حول أسبقية أفكار وتفسير التجارب الغامضة. فقبل أن يقول ميتشيل إن ATP كان متعلقاً باحتراق الطعام عبر وسيط كهربائي (كهرباء بروتون) كان يهيمن على حقل هذا النشاط كيميائيون يعتقدون أن الوسيط كان مادة كيميائية. ولما كان ذلك الوسيط الكيميائي مجهولاً ويقوم على الافتراض، لذلك عُرف بكلمة «خربشة»، استخفافاً به كما وُصف برمز شبه غامض (∽)، الذي كان يرمز إِلى وصلة كيميائية مشحونة بالطاقة. ومضت عدة سنوات عقيمة في البحث عن هذا الوسيط الذي وُصف بالخربشة، إِلاَّ أن بعض كيميائيي «الخربشة» اهتدوا إِلى فكرة كهرباء البروتون. وكان حقل النشاط نفسه يتغيّر ببطء لأن علماءً من الشباب دخلوا هذا الحقل وتبنّوا قضية كهرباء البروتون بينما تقاعد بعض العلماء الأكبر سناً أَو تخلّوا عن هذا المجال وانتقلوا إِلى أبحاث علمية أكثر خصباً. وهذا يؤكد رأي ماكس بلانك أن الكثير من الأَفكار العلمية لا تنجح باهتداء العلماء إِلى الحقيقة ولكن بحوث خصومهم واحداً بعد الآخر.

في الواقع، كل الطاقة المستخدمة لتشكيل كهرباء البروتون تستعمل فيما بعد لصنع ATP. ولكن ماذا تكون ATP؟ إنها انتشار طاقة الخلية، وهي طاقة فورية وشاملة. وإن أي آلة تحتاج انفجاراً فورياً من الطاقة تأخذها من ATP. ولكن كيف يمكن أن يحدث هذا؟ حَسناً، إن ATP تشبه بندقية الهواء حيث تضغط الطلقة على نابض قوي داخل ماسورة البندقية، ويمسك الطلقة زناد. فإذا ضُغط على الزناد، يتحرَّر النابض دافعاً الطلقة بسرعة كبيرة. إن ATP بندقية كيميائية. ويمثل هذا الاسم المختصر مادة أدينوسين ترايفسفات. والأدينوسين وفوسفاتان تمثل البندقية. والجزيئات الفوسفاتية مشحونة بشحنات سالبة، لذلك يتنافر بعضها مع بعضها الآخر. ولكن هنالك ثلاثة جزيئات فوسفورية في ATP متصلة مع بعضها ومتنافرة بشدّة. وعندما تقطع الصلة بين الفوسفات النهائي والجزيئين الآخرين، فإنه ينطلق كما تنطلق الطلقة من البندقية. أما الجزيء الباقي، وقد نقص منه فوسفات واحد، فيسمى ADP أدينوسين دايفوسفات. أما إعادة فوسفات إلى ADP وشحن البندقية ثانية، فإنه أمر يأخذ الكثير من الطاقة. وهذا العمل يتم بواسطة آلات ATP المحرِّكة الموجودة في المايتوكندريا، التي تُشحن بكهرباء البروتون.

إن ATP جزيء صغير يتجول عشوائياً في أنحاء الخلية، صادماً عدة آلات مختلفة. إن ATP بندقية مشحونة ولكنها لا تستطيع أن تضغط على زنادها. إنها بحاجة ليد لتفعل ذلك. أما الأيدي فتتوضع على الكثير من الآلات الجزيئية المنتشرة في أنحاء الخلية. وفي

الواقع، تمتد هذه وتمسك ATP عابراً سبيله ثم تستخدمه ليفجر الطاقة. وليس من المفيد الضغط على الزناد دون تسخير الطاقة للقيام ببعض المهام. إن ATP يُمسَكُ بإحكام من قبل الآلة ويُحدّدُ له مكان ملائم بحيث عندما تُقْطعُ الصلة عن الفوسفات الانتهائي، فإن التنافر في الفوسفات يُستخدمُ ليقوم بعمل، كجعل الآلة أن تغير شكلها. بعدئذٍ يُمكن أن يَنطلق ADP وكذلك الفوسفات، وإذا احتاجت الآلة المزيد من الطاقة فإنّها تمسك ATP آخر.

أحياناً، بدلاً من إطلاق الفوسفات من ATP فإن الفوسفات الانتهائي يُربط بآلة بروتينية. وهذا يجعل الآلة الجزيئية تُغيّرُ شكلها بصورة دائمة أَو على الأقل حتى يُنْزعُ الفوسفات ثانية بآلة أُخرى كذلك. إن التغير في الشكل المُسْتَحَث من قبل الفوسفات يمكن أن يُطْفِئ الآلة أَو يُشغِّلها. وهي الطريقة العادية التي يُسيطرُ بها على الآلات البروتينية. وبعض الآلات البروتينية اختصاصية وتتلقَّى المعلومات من طرق الخلية التي تُبَلِّغ بالإِشارة وتضيف الفوسفات من ATP إِلى سلسلة من آلات بروتينية أُخرى، فتطفئها أَو تُشَغِّلها، بينما تخصَّصت آلات بروتينية مختلفة في نزع الفوسفات من البروتينات عندما تُعطى إشارة أن تفعل ذلك، وهكذا يُسْتخدمُ ATP كذلك من أجل نقل المعلومات داخل الخلية.

بعد أن يتشكّل ATP من قبل الميتوكندريا، فإنه يُسْتخدمُ من قبل آلات موجودة في أنحاء الخلية. والمتخلف من هذا التفاعل، أي ADP والفوسفات فيعودان إِلى الميتوكندريا ليتحولا إِلى ATP. إن

لدورة ATP وADP داخل الخلية وظيفة تقوم على توزيع الطاقة إلى آلاف المستخدِمين المختلفين. واكتُشِفت دورة ATP في الثلاثينيات من القرن العشرين من قبل عدد من الكيميائيين البيولوجيين ومن بينهم ووربيرغ Warburg ومايرهوف Meyerhof. وقد بيع ATP لفترة من الزمن في قارورة كجرعة طاقة أساسية. ولسوء الحظ ليس لتناول ATP تأثير على مستوى طاقتك والسبب أنه لا يستطيع أن ينفذ من خلال غشاء الخلية. إن ATP هو الحامل الرئيسي لكهرباء الفوسفات في الخلية ويستطيع أن ينقل الفوسفات إلى جزيئات أُخرى. والحامل المهم الآخر للفوسفات هو الكرياتين، وخصوصاً في العضلات الهيكلية، وقد أَخَذَ مؤخراً بناةُ الأجسام والرياضيون بحماسة جرعات كبيرة من الكرياتين كمادة إضافية داعمة. وهنالك دليل مادي يقول إن الكرياتين الغذائي يدخل فعلاً إلى خلايا العضلات، مما يؤدي إلى تحسين أداء التمارين مثل رفع الأثقال والسباق القصير. ولكن هذه الزيادات في المستوى والأداء زيادات هامشية على كل حال، وتتطلب مستويات عالية من جرعة غذائية، وقد تشكل خطراً يهدِّد الصحة.

تبلورت دورة ATP من قبل فريتز ليبمان Fritz Lipmann (1899 ـ 1986) وتحولت من مجموعة معلومات وأفكار متفرقة إلى نظرية عامة عن نقل الطاقة داخل الخلية. واشترك ليبمان في هجرة العلماء المفاجئة من وسط أوروبا إلى بريطانيا وأمريكا بسبب ظهور النازية في الثلاثينيات. وقد وضعت هذه الهجرة نهاية مئة سنة من تفوق ألمانيا كأمة علمية مبرزة، كما أدَّت الهجرة إلى نهوض الولايات المتحدة

لتحل محلها. ولد ليبمان في كونيغزبيرغ، التي أصبحت عاصمة شرق بروسيا فيما بعد، (كالينينغراد الآن) ودرس الطب هنالك إلى أن استُدعيَ من قبل الجيش الألماني كطالب طب في السنة الأخيرة من الحرب العالمية الأولى. وبعد الحرب تحول ليبمان من الطب إلى الكيمياء البيولوجية ودرس في برلين مع الكيميائي البيولوجي العظيم أتو مايرهوف (1884 ـ 1951) Otto Meyerhof. كان مايرهوف يبحث عن طاقة الحياة في عصارة عضلات الضفدع، وبَيَّن أن هذه العصارة يمكن أن تُخَمِّرَ الغلوكوز، كانت هذه العملية مشابهة لتخمر مادة البِست، علماً أن الناتج النهائي لم يكن كحولاً وإنما حمض اللبن (الحمض الذي يسبِّب ألماً ملتهباً إذا استخدمْتَ عضلاتك على نحو غير صحيح)، هذه الطريقة أي الانتقال من الغلوكوز إلى حمض اللبن سميت باسم مكتشفيها: طريقة ليدمان ـ مايرهوف. أما الآن فتعرف بكلمة غلايكوليسيس glycolysis. إن غلايكوليسيس هام للعضلات لأنه يستطيع بسرعة أن يشكِّل طاقة بدون أوكسجين. وأشار مايرهوف أن تقلّص عضلة الضفدع (مع عدم وجود أوكسجين) كان دائماً يشكِّل مقداراً محدداً من الحرارة إضافة إلى تخمُّر الغلوكوز وتحوله إلى حمض اللبن. ولكن هل كان هنالك وسيط مجهول يخزن الطاقة المنطلقة ثم يقدمها لتقلّص العضلة؟

لقد وجد مايرهوف وآخرون أنّه عندما يدخل الغلوكوز إلى الخلايا فإنه يتحد مع الفوسفات ـ وقد يكون الفوسفات المشحون بالطاقة هو الوسيط المفقود. وبدأ ليبمان، بناءً على اقتراح مايرهوف، بدراسة

الكرياتين الفوسفوري في العضلات، فاكتشف ليبمان أن الغلايكوليسيس Glycolysis كان يتسمم في عضلات الجرذان الحية ويمكن أن يستمر التقلّص لكن هذا كان يؤدي إلى تحلّل الكرياتين الفوسفوري للعضلات (يفقد الفوسفات) وبالتالي أصبح كل من العضلة والجرذ يابسين، (حالة تعرف باسم «تَيَبُّس الأعضاء» كما في تيبس الجسد عند الموت). وهكذا بدأ الكرياتين الفوسفاتي كوسيط بين غلايكوليسيس والتقلّص العضلي، وربما كان يحمل الفوسفات المشحون بالطاقة من الغلايكوليسيس إلى آلية التقلّص العضلي. وأشارت التجارب، في الواقع، أن ATP قام بهذا الدور وهو حمل الفوسفات المشحون بالطاقة، بينما قام الكرياتين الفوسفائي بدور تلميع أو ادخار لطاقة الفوسفات في الخلية. وتفادى ليبمان قيام النازية وغادر ألمانيا متجهاً إلى الدانمرك في الثلاثينيات من القرن العشرين ثم هاجر إلى الولايات المتحدة عندما أصبح للنازيين نفوذ في الدانمرك. وَفَرَّ مايرهوف كذلك من ألمانيا في الوقت نفسه إلى باريس في البداية ثم إلى أمريكا عند غزو فرنسا سنة 1940. وعندما كان لاجئاً شكّل ليبمان مفهوم الفوسفات المشحون بالطاقة الذي دعاه «فسفاة الخربشة» أو ~P كوسيط رئيسي أو انتشار طاقة الخلية. لقد أدخل ليبمان رمز الخربشة (~P) ليمثّل رابطة مشحونة بالطاقة بين ذرتين. وهكذا أصبح أول عالِم «خربشة» وتوصل في بحثه سنة 1941 إلى ما يلي:

القوة الطبيعية للاستقلاب تُولد التيار (~P). وهذا التيار يمسّه حمض الأدينليك ADP الذي يعمل عمل الأسلاك التي توزِّع التيار. أما

إذا وجد كرياتين ~ P فإنه يعمل عمل الحاشد للتيار ~ P.

إن الطاقة التي ينقلها ATP طاقة كهربائية في طبيعتها من جهة (التنافر الكهربائي في الفوسفات) وطاقة كيميائية من جهة أُخرى. وإن جريان شحنة الفوسفات من المايتوكندريا إلى بقية الخلية ليس سببه، على كل حال، المجالات الكهربائية داخل الخلية، وإنما سببه القوة النسبية للروابط الكيميائية التي تربط الفوسفات إلى جزيئاته الناقلة المختلفة (ADP، كرياتين وبروتينات). وهكذا نجد أن كهرباء الفوسفات تُشْحنُ بصورة رئيسية بالقوى الكيميائية، وليس بالقوى الكهربائية. وهذا المفهوم الجديد عن دورة ATP أدَّى إلى شهرة ليبمان العلمية في الدولة التي اختارها، ثم تابع مفسراً الطرق الأُخرى التي بواسطتها تنتقل الطاقة داخل الخلية. ومن أجل ذلك نال جائزة نوبل سنة 1953.

يُسْتخدمُ ATP من قبل مئات من الأنواع المختلفة من الآلات في الخلية. أما المستخدمون الرئيسيون فهم التقلّص العضلي وتشكل البروتين ومضخة الصوديوم. وتقع مضخة الصوديوم في غشاء الخلية. وتَضُخُ الصوديوم عبر الغشاء من داخل الخلية إلى خارجها. ولأن للصوديوم شحنة موجبة، فإن ضخ الشحنة خارج الخلية يولد مجالاً كهربائياً كبيراً عبر الغشاء. ويعمل هذا المجال الكهربائي كمصدر ملائم للطاقة من أجل أنظمة مختلفة كثيرة في أنحاء الخلية التي تشتمل على جزيئات النقل ومراقبة حجم الخلية وتوليد نبضات كهربائية في العضلات والقلب والأعصاب. وإن مجرد وصل الآلة

البروتينية بالغشاء المشحون بالطاقة أمرٌ كافٍ لشحن الآلة بالقدرة، لأن المجال الكهربائي والصوديوم يعملان عمل البطارية التي تدفع أي شحنة من خلال البروتين وعبر الغشاء. وهكذا تَستخدِمُ الخليةُ شكلاً آخر من الكهرباء، وهذه المرة كهرباء الصوديوم، لتشحن غشاء الخلية بالطاقة. وإن كهرباء الصوديوم هي التي تشحن أدمغتنا وفكرنا بالقدرة.

إذاً، هنالك أربعة أشكال للكهرباء في الخلية: هي كهرباء الإلكترون، والبروتون، والفوسفات، والصوديوم. وتتولد كهرباء الإلكترون داخل أغشية المايتوكندريا وذلك بحرق الطعام. وتُسْتخدمُ هذه الكهرباء لضخ البروتون خارج المايتوكندريا وتوليد كهرباء البروتون. أما كهرباء البروتون التي تجري عائدة إلى المايتوكندريا فتستعمل من قبل آلة ATP المحركة لحشو ATP بفوسفات الشحنة السالبة وإدخاله عنوة إلى ADP. وهذا بدوره يشكِّل كهرباء الفوسفات التي هي، على نحو ما، شكل كيميائي للطاقة، يحملها ATP ومواد كيميائية أُخرى تحتوي الفوسفات في تركيبها. وينتشر ATP في غشاء الخلية، حيث يُسْتخدمُ من قبل مضخة الصوديوم لإدخال الصوديوم عنوة عبر الغشاء. وبذلك تتولّد كهرباء الصوديوم. ويمكن أن تستخدم كهرباء الصوديوم بعدئذ لتحريك ونقل الكثير من الجزيئات الأُخرى عبر غشاء الخلية. وهكذا نجد أن الأشكال الأربعة للكهرباء تتحول باستمرار من شكل إلى آخر في سلسلة من الطاقة.

إن بنية الآلات الجزيئية المختلفة التي تُشحن بالكهرباء الخليوية

قد حُلَّتْ مؤخراً لصالح الذرة. بكلمة أُخرى، إننا نعرف الآن موقع كل ذرة (حتى ضمن عُشر جزء من بليون جزء من المتر) داخل الجزيء الذي يمكن أن يحتوي على حوالي مئة ألف ذرة. وبالرغم من أن هذا إنجاز مذهل، إلاَّ أن تركيب الآلات الجزيئية لا يخبرنا بالضرورة كيف تعمل. وهذا ينطبق على «أوكسيديس كروموزونات الخلية» أي مضخة بروتون واحدة من سلسلة النقل الإلكتروني، والتي عَرَفَ تركيبَها مجموعة البحث العلمي من شينيا يوشيكاما في اليابان. وإن بنية جزيء مركب «ضخم» كهذا يمكن أن يدرك إدراكاً كاملاً فقط باكتشاف نموذج منه له ثلاثة أبعاد ومشاهدته على شاشة الكمبيوتر. وبعد مؤتمر علمي في موسكو حضره الأستاذ يوشيكاوا الذي وصف التركيب أولاً، التقينا معاً في المطار لمدة أربع وعشرين ساعة. وأخبرني كيف كان قد أمضى ساعات سعيدة طويلة إضافة إلى الأسابيع مكتشفاً هذا النموذج. وقد دُهش بجماله، كما أنه اعتبر أن ميزة له أن يكون واحداً من أوائل الناس الذين شاهدوا هذا الجزيء، وهو أقدم الجزيئات وأهمها في الحياة. وكانت هذه البُنى الجزيئية بالنسبة إليه شيئاً عصرياً معادلاً للكاتدرائيات العظيمة للعصور الوسطى.

مع أن بنية أوكسيديس كروموزونات الخلية تعطي مؤشرات عن آليتها فإننا لا نزال غير قادرين أن نعطي وصفاً تفصيلياً عن كيف تضخ مضخة البروتون البروتونات. وهنالك بنية عظيمة أُخرى عرفت حديثاً وهي بنية محرك ATP (الآلة الجزيئية التي تشكِّل ATP من ADP

والفوسفات) وذلك من قبل العالم الإنكليزي جون ووكر John Walker وزملائه (التي من أجلها نال هو وبول بوير Paul Boyer جائزة نوبل 1997) هنا، تشير البنية أن هذا الجزيء «الضخم» عبارة عن محرِّك صغير، بل هو أصغر محرك في الوجود. فهو يَدور كدولاب الطاحونة الذي يحرّكه جريان كهرباء البروتون، ولكنه يشكِّل ATP ولا يشكّل طحيناً. ولهذا المحرك عامود يتصل بغشاء المايتوكندريا ويتحرَّك بكهرباء البروتون التي تمر من خلال قناة في الغشاء، فيدور العامود داخل «الآلة» مُرْغِماً فوسفات ADP الموجود في المحرِّك أن يشكِّل ATP. ويستطيع هذا المحرك أن يعمل في الاتجاه المعاكس، مستخدماً ATP للضخ إلى الوراء البروتونات إلى خارج المايتوكندريا، ومولداً كهرباء البروتون. وقد صُوِّرَ دوران محرك ATP على شريط ڤيديو من قبل كازوهيكو كينوسينا Kazuhiko Kinosita وزملائه في اليابان. لقد وضعوا طرفاً من المحرك على شريحة زجاجية وربطوا قضيباً مُسْتَشْعاً دقيقاً بالطرف الآخر. وعندما أضيف ATP استطاع الفريق الياباني أن يرى من خلال مجهر دوران القضيب كحزم أشعة المنارة التي تبدّد الظلام. ومع أن هذا المحرك يتألّف من جزيء واحد وهو أصغر محرك دوراني معروف في الوجود، إلاَّ أنه اَكْتُشِف أنواع أُخرى كثيرة لتزود بالقدرة ما يلي: حركة الجزيئات على طول الهيكل الخليوي وتقلّص العضلات وتشكيل DNA وRNA وتحريك الباكتريا.

يبدو أنّه أمر لا يصدق أننا نعمل ونُدار بالكهرباء بطريقة أَو بأُخرى. في أوائل القرن التاسع عشر، كان هنالك الوحش المسْخ

لفرانكينشتاين، المخلوق المركب من جثث أعيدت إليها الحياة بالكهرباء. ثم في النصف الأول من القرن العشرين، كان هنالك الإنسان الآلي، أي آلة كهربائية تبدو وتعمل كالإنسان، ثم منذ عهد قريب، كان هنالك الإنسان الإلكتروني الذي كان نصفه إنساناً ونصفه آلة. والآن تبين أننا آلات كهربائية من البداية حتى النهاية.