الطريق الطويلة لمعادلات ماكسويل

قصة أربعة علماء مفعمين بالحماس كان لهم الفضل في إبراز الكهرومغناطيسية إلى النور

إذا أردت أن تقدم التقدير اللائق بالعالم العظيم جيمس كليرك ماكسويل **James Clerk Maxwell**، فإنك لن تجد شحًا في الأماكن التي تستطيع أن تقدم له فيها تقديرك، فهناك نصب تذكاري في دير وستمنستر **Westminster** في لندن، بالقرب من قبر إسحق نيوتن **Isaac Newton**، كما نُصب مؤخرًا تمثال رائع في إدنبرة **Edinburgh**، بالقرب من مسقط رأسه، وأيضًا يمكنك أن تقدم عزاءك له في ملاذه الأخير بالقرب من قلعة دوغلاس **Castle Douglas** في جنوب غرب اسكتلندا، على مسافة قصيرة من معقل أجداده. هذا النصب التذكاري مناسب تمامًا للشخص الذي طوّر أول نظرية موحدة في الفيزياء، والذي برهن على أن الكهرباء والمغناطيسية مرتبطتان ارتباطًا وثيقًا.

هذه الأماكن لا تعكس حقيقة أن نظرية ماكسويل في الكهرومغناطيسية، والتي ساهمت كجزء أساسي في تطور عالمنا التكنولوجي الحديث، لم تكن بعد راسخة علميًا عندما توفي ماكسويل عام 1879.

يمكن تقليص كمية مهولة من المعلومات عن العالم ـ القواعد الأساسية التي تحكم السلوك الضوئي، وتدفق التيار الكهربائي، وكيفية عمل المغناطيسية ـ في أربع معادلات جميلة، والتي تسمى اليوم بمعادلات ماكسويل (**Maxwell's equations**)، ويمكنك أن تجدها في الكتب الدراسية التمهيدية للهندسة والفيزياء.

ظهرت هذه المعادلات قبل 150 سنة، عندما قدّم ماكسويل نظريته التي تحتوي على توحيد للقوتين الكهربائية والمغناطيسية، أمام الجمعية الملكية في لندن **Royal Society of London**، كما نشر تقريرًا كاملًا عنها في العام الذي يليه 1865. كان هذا العمل هو الذي وضع القاعدة الأساسية لأعظم الإنجازات في الفيزياء، وفي الاتصالات اللاسلكية، وفي الهندسة الكهربائية التي تلت ذلك.

ولكن كانت هناك فجوةٌ كبيرةٌ بين تقديم النظرية، وبين الاستفادة منها. حيث إن الأسس الرياضية والنظرية التي تستند إليها معادلات ماكسويل معقدةٌ جدًا وغير بديهية، وهذا الأمر جعلها مهملة جدًا بعد عرضها لأول مرة.

احتاج الأمر 25 عامًا تقريبًا لتقوم مجموعة من علماء الفيزياء، الذين كانوا مولعين بأسرار الكهرباء والمغناطيسية، بدعم معادلات ماكسويل. وقد كانوا هم الذين جمعوا الأدلة التجريبية اللازمة للتأكد من أن الضوء مكوّن من موجات كهرومغناطيسية (**electromagnetic waves**) كما كانوا هم الذين قدموا هذه المعادلات بالشكل الحالي الذي نراه. ولولا هذه الجهود الجبارة لـ"الماكسويليين" (**Maxwellians**) ـ وهو الاسم الذي أطلقه عليهم المؤرخ من جامعة تكساس في أوستن، بروس جيه هانت **Bruce J. Hunt** – لربما تأخر تبنّينا لمفهومنا الحالي عن الكهرباء والمغناطيسية لعقودٍ أخرى، والتي ستتسبب في تأخر لا يصدق في التاريخ العلمي والتكنولوجي الذي تلاها.

$$\nabla \cdot \mathrm{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathrm{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathrm{E} = -\frac{\partial \mathrm{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathrm{H} = \frac{\partial \mathrm{D}}{\partial t} + \mathrm{J}$$

المعادلات الذهبية الأربعة: تلخَّصُ العلاقة بين القوة الكهربائية والقوة المغناطيسية اليوم، بالإضافة للطبيعة الموجية للضوء والإشعاع الكهرومغناطيسي، بشكلٍ عام، في أربع معادلات تسمى بـ "معادلات ماكسويل" المبينة أعلاه. هذه المعادلات يمكن كتابتها بطرقٍ مختلفة هنا، يرمز بـ J لكثافة التيار الكهربائي، و E و B يرمزان للمجالين الكهربائي والمغناطيسي على التوالي. وهناك مجالان آخران، هما مجال الإزاحة ورمزه D ، والمجال المغناطيسي ورمزه H. يرتبط هذان المجالان بـE و B بواسطة الثوابت التي تعكس طبيعة الوسط التي تعبر الحقول خلاله (يمكن جمع قيم هذه الثوابت في الفراغ لتعطي سرعة الضوء). كان مجال الإزاحة D من المساهمات الرئيسية التي قدّمها ماكسويل، وتصف المعادلة الأخيرة كيف يمكن للتيار الكهربائي والمجالات الكهربائية المتغيرة أن يكوّنا مجالاتٍ مغناطيسية. الرموز في بداية كل معادلة عبارة عن مؤثرات تفاضلية (differential operators) ، تكتنز هذه الرموز التفاضل والتكامل المحتوي على متجهات –وهي كميات رياضية تمتلك اتجاهًا، وبالتالي لها مكونات س أو x، و ع أو z، و ص أو Y . الصيغ الأصلية للنظرية الكهرومغناطيسية احتوت على 20 معادلة

نحن نعلم منذ الصغر، أن الضوء المرئي ما هو إلا مجرد طيفٍ كهرومغناطيسي (**electromagnetic spectrum**) عريض، ذي إشعاع من مجالاتٍ كهربائية ومغناطيسية مهتزّة. وقد تعلمنا أن الكهرباء والمغناطيسية مرتبطتان بشكلٍ معقّد، حيث أن المجال المغناطيسي المتغير يولد مجالًا وتيارًا كهربائيًا، والمجال الكهربائي المتغير يولد مجالاتٍ مغناطيسية.

يجب أن نشكر ماكسويل لتزويده إيانا بهذه الأفكار الجوهرية، ولكنها لم تخطر بباله فجأةً ولم تخرج من لامكان، بل إن الأدلة اللازمة جاءت مجزأةً على أكثر من 50 عامًا.

كانت البداية عام 1800، عندما أعلن الفيزيائي أليساندرو فولتا **Alessandro Volta** اختراع البطارية، مما أعطى الفرصة للمختبرين لإجراء تجاربهم على التيار المستمر (**continuous direct current**) .

بعد 20 سنة تقريبًا، حصل هانز كريستيان أورستد **Hans Christian Ørsted** على أول دليل على وجود علاقة بين الكهرباء والمغناطيسية، عندما أثبت أن إبرة البوصلة تتحرك عندما وضع سلكًا حاملًا لتيار قريبًا منها. بعد فترة وجيزة، تبين لأندريه ماري أمبير **André-Marie Ampère** أنه يمكن جعل سلكين متوازيين، يحمل كل منهما تيارًا يقتربان من بعضهما أو يتنافران، وذلك بالاعتماد على الاتجاه النسبي للتيارين الكهربائيين. وبحلول ثلاثينات القرن التاسع عشر، أدرك مايكل فاراداي **Michael Faraday** أنه مثلما تؤثر الكهرباء على سلوك المغناطيس، فإن المغناطيس يؤثر على الكهرباء، وذلك عندما بيّن أن سحب مغناطيس عبر حلقة سلكية من الممكن أن يولّد تيارًا كهربائيًا.

كانت هذه الملاحظات تأتي على أجزاءٍ متفرقة، ولم يكن من الممكن أن تُفهم بشكل منظّم، أو بشكلٍ كامل. ما هو التيار الكهربائي بالضبط؟ كيف لسلك حامل لتيار كهربائي أن يؤثر في مغناطيس ويغير مكانه؟ وكيف يمكن للمغناطيس المتحرك أن يُنتج تيارًا كهربائيًا؟

كانت جهود فاراداي خطوةً أساسية في الطريق، الذي تَصوّر حالة توتر كهربائي (**electrotonic state**) غامضة وغير مرئية، محيطة بالمغناطيس–وهي ما نسميه اليوم بالمجال. حيث قال أن التغيرات التي تطرأ على حالة التوتر الكهربائي هي التي تسبب الظاهرة الكهرومغناطيسية. وافترض فاراداي أن الضوء نفسه كان موجةً كهرومغناطيسية. لكن تشكيل هذه الأفكار في نظرية مكتملة كان يحتاج إلى قدراتٍ رياضية تتجاوز قدراته، عندها دخل ماكسويل الساحة.

في خمسينيات القرن التاسع عشر، بعد تخرج ماكسويل من جامعة كامبريدج **University of Cambridge**، كرّس محاولاته لإيجاد تعابير رياضية تفسر ملاحظات فاراداي ونظرياته. ففي محاولته الأولى لذلك نشر ورقة عام 1855 تحت عنوان: خطوط فاراداي للقوة **Fraday's Lines of Force**، والذي ابتكر فيها نموذجًا عن طريق المقارنة، يستنبط منه أن المعادلات التي تصف تدفق الموائع غير القابلة للانضغاط (**incompressible fluid flow**) من الممكن أن تستخدم في حلّ المشاكل التي تكون فيها الحقول الكهربائية والمغناطيسية ثابتة.

كان عمله على ذلك متقطعًا بسبب كثير من المشتتات. ففي عام 1856 حصل على وظيفة في جامعة مارشال **Marischal College** في أبردين **Aberdeen** الاسكتلندية. حيث كرّس العديد من السنوات في دراساته الرياضية حول ثبات حلقات زحل، فقدَ وظيفته عام 1860 بسب عدم الاندماج مع الكلية، وأصيب بالجدري وكاد أن يتوفى قبل حصوله على وظيفةٍ جديدة كبروفيسور في كلية كينجز في لندن **King's College London** .

بطريقةٍ ما، وجد ماكسويل وقتًا لعمل صياغة لنظرية مجال فاراداي (**Faraday's field theory**). وبالرغم من أنها ليست نظرية كاملة للكهرومغناطيسية، فإن الورقة التي نشرها على أجزاء عديدة في 1861 و 1862 تبين أنها معلم مهم جدًا في صياغة النظرية.

بانيًا على الأفكار السابقة، تصور ماكسويل نوعًا من الوسط الجزيئي يكون فيه المجال المغناطيسي عبارةً عن مجموعات من دوامات غازلة (**spinning vortices**) ، وكل من هذه الدوامات يحيط بها جسيمات صغيرة تساعد في نقل الغزل من دوامة لأخرى. على الرغم من أنه رمى هذا التصور جانبًا في وقت لاحق، لكن ماكسويل أدرك أن هذا التصور الميكانيكي (**mechanical vision**) ساعد في وصف مجموعة من الظواهر الكهرومغناطيسية (**electromagnetic phenomena**). ولعل من أهم الأمور، أنها وضعت الأساس لمفهومٍ فيزيائي جديد يسمى بتيار الإزاحة (**displacement current**).

ليس تيار الإزاحة تيارًا فعليًا، ولكنه طريقة لتوضيح كيف أن التغير في المجال الكهربائي الذي يمر في نطاق معين يمكن أن يكوّن مجالًا مغناطيسيًا، كالذي يفعله التيار الكهربائي. وبحسب نموذج ماكسويل (**Maxwell's model**) فإن تيار الإزاحة ينشأ عندما يتغير موقع الجسيمات الموجودة في وسط الدوامة لحظيًا. وينشأ عن حركة هذه الجسيمات تيارا كهربائي.

واحدة من أكثر الظواهر إثارة في تيار الإزاحة موجودةٌ في المكثف الكهربائي (**capacitor**)، حيث تكون الطاقة المخزنة في بعض الدارات بين صفيحتي مكثف متأرجحةً بين قيم عالية ومنخفضة. وإلى حدٍ ما، من السهل رؤية كيف سيعمل نموذج ماكسويل الميكانيكي في هذا النظام. إذا كان المكثف يحتوي على مواد فاصلة أو عازلة (**dielectric**) كهربائيًا، فيمكنك افتراض أن تيار الإزاحة هو تيارٌ ناشئ عن حركة الإلكترونات المرتبطة بأنوية الذرات، والتي تتأرجح من جانبٍ إلى جانب آخر كما لو أنها كانت ملتصقةً بأشرطة مطاطية. لكن مفهوم تيار إزاحة ماكسويل أعمق من ذلك بكثير، فهو يستطيع أن ينشأ في أي وسط كان، بما في ذلك فراغ الفضاء (**vacuum of space**) ، حيث لا توجد إلكترونات لتكوين تيار كهربائي. ولكنه كالتيار الحقيقي بالضبط حيث أنه ينتج مجالًا مغناطيسيًا.

بالإضافة لهذا المفهوم، كان لدى ماكسويل العناصر الأساسية التي يحتاجها للربط بين خصائص دارتين كهربائيتين وبين ثابتين (لم يعد لهما استخدام الآن) يعبّران عن مدى سهولة تكوّن المجال الكهربائي والمغناطيسي كنتيجة للتيار أوالجهد (**voltage**) الكهربائيين. في الوقت الحاضر، نصوغ هذين الثابتين الأساسيين بشكل مختلف، فنصوغهما على شكل السماحية (**permittivity**) ، والنفاذية (**permeability**) من الحيز الفارغ.

يمكن جمع هذين الثابتين لتحديد سرعة انتقال الموجة الكهرومغناطيسية في الفراغ، وذلك يشابه كيفية تحديد ثابت النابض (**spring constant**) لسرعة ارتداد النابض بعد تمديده أو ضغطه. وبعدما قام أناس بتحديد قيمتهما بإجراء التجارب على المكثفات والوشائع (**inductors**)، صار ماكسويل قادرًا على تقدير سرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ. وعندما قارن هذه السرعة بتقديرات سرعة الضوء آنذاك، وجد أن السرعتين قريبتان من التطابق، ومن ذلك فإن من المنطقي أن يكون الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية.

هذا العمل هو أساس فهمنا الحديث للكهرومغناطيسية، كما أنه يزوّد الفيزيائيين والمهندسين بكامل الأدوات التي يحتاجونها لحساب العلاقات بين الشحنات (**charges**)، والمجالات الكهربائية، والتيارات الكهربائية، والمجالات المغناطيسية.

ولكن سرعان ما ظهر الشك في النظرية الكهرومغناطيسية، حتى من أقرب زملائه في الكلية، حيث كان السير ويليام طومسون **Sir William Thomson**، والذي عرف لاحقًا باللورد كلفن **Lord Kelvin** أحد أكثر المشككين بها. وكقائد في الجمعية العلمية البريطانية **British scientific community** آنذاك، فإن طومسون لم يكن يعتقد بأن شيئًا كتيار الإزاحة يمكن أن يوجد.

والتشكيك في هذا طبيعي جدًا، حيث يعد التفكير في تيار إزاحة يجري ضمن عازلٍ (**dielectric**) مملوء بالذرات أمرًا مختلفًا تمامًا عن تخيل تكوّن هذا التيار في فراغ يملؤه العدم. لكن، من دون نموذج ميكانيكي لوصف هذه البيئة، ومن دون شحنات كهربائية متحركة، لم تكن ماهيّة تيار الإزاحة واضحة بالضبط، ولم يكن معروفًا كيفية نشوئها. كان هذا الافتقار إلى ميكانيكية فيزيائية أمرًا بغيضًا بالنسبة للعديد من الفيزيائيين في العصر الفيكتوري **Victorian era**. أما اليوم، فنحن على أتم الاستعداد لقبول النظريات الفيزيائية، كميكانيكا الكم (**quantum mechanics**)، التي تتحدى بديهتنا الفيزيائية يوميًا، طالما أنها متناهية الدقة رياضيًا، ولها قدرات تنبؤية كبيرة.

وجد معاصرو ماكسويل قصورًا في نظريته. فمثلًا، افترض ماكسويل أن تذبذب المجالات الكهربائية والمغناطيسية معًا يشكّل أمواجًا، ولكنه لم يصف حركتها عبر الفضاء. جميع الموجات المعروفة في ذلك الوقت كانت تتطلب وسطًا (**medium**) لتنتقل خلاله، فمثلًا، تنتقل الموجات الصوتية (**Sound waves**) عبر الهواء والماء. وبالتالي، إن كانت الموجات الكهرومغناطيسية موجودةً، فإن فيزيائيي ذلك الوقت كانوا استنتجوا أنه يجب أن يكون هناك وسط تنتقل خلاله، حتى لو كان ذلك الوسط لا يُرى، أو يتذوّق، أو يُلمس.

حتى ماكسويل أيضًا كان مؤمنًا بوجود وسط كهذا، أو بوجود الأثير (**ether**) وكان يتوقع أنه يملأ كامل أنحاء الفضاء، وأن السلوك الكهرومغناطيسي هو نتيجة التضاغطات (**stresses**)، والتخلخلات (**strains**)، والحركات داخل هذا الأثير. لكن، في العام 1865، وفي أطروحته الأخيرة المكونة من مجلدين اثنين، والمعنونة: أطروحة حول الكهرباء والمغناطيسية **Treatise on Electricity and**

Magnetism، وفيها قدّم ماكسويل معادلاته دون أي نموذج ميكانيكي يبرّر طريقة أو كيفية انتشار هذه الموجات الكهرومغناطيسية الغامضة. وبالنسبة للكثير من معاصريه، فقد اعتبروا نظرية ماكسويل غير مكتملة بشكلٍ كبير لافتقارها لنموذجٍ ميكانيكي.

لعل من أهم الأمور، أن وصف ماكسويل لنظريته كان معقدًا بشكل مذهل. قد يستقبل طلاب الجامعات المعادلات الأربع لماكسويل بالرعب، ولكن صياغة ماكسويل كانت تتسم بالفوضى بشكل أكبر من المتوقع. من أجل كتابة المعادلات بالصيغة الاقتصادية، نحتاج إلى رياضيات لم تكن ناضجةً عندما كان ماكسويل يقوم بعمله، وبالتحديد، فنحن نحتاج إلى حسابات التفاضل والتكامل المتجهة (**vector calculus**)، وهي طريقة لترميز المعادلات التفاضلية للمتجهات ذات الأبعاد الثلاثة، بشكل مضغوط.

يمكن تلخيص نظرية ماكسويل اليوم بأربعة معادلات، على الرغم من أن صياغته اتخذت شكل 20 معادلة متزامنة، بـ20 متغيرًا. كان على ماكسويل أن يفصل المكونات البُعدية لمعادلاته (الاتجاهات س، و ع، و ص)، وقد وضع بعض المتغيرات التي تخالف المنطق السائد وقتئذ. أما اليوم، فنحن معتادون على التفكير في المجالات الكهربائية والمغناطيسية والعمل بها، ولكن ماكسويل عمل مع نوع آخر من المجالات، وقد دعاها بالزخم الكهرومغناطيسي (**electromagnetic momentum**)، والذي يمكن من خلالها أن يحسب المجالين الكهربائي والمغناطيسي، واللذين تصورهما فاراداي قبلًا. قد يكون سبب اختيار ماكسويل ذلك الاسم لذلك المجال ـ والذي يعرف اليوم باسم الجهد الاتجاهي المغناطيسي (**magnetic vector potential**)ـ هو أن مشتقته بالنسبة للزمن تنتج قوةً كهربائية. ولكن الجهد لن يفيدنا في شيء إذا ما أردنا حساب العديد من السلوكيات الكهرومغناطيسية (**electromagnetic behaviors**) البسيطة على الحدود، وذلك من مثل كيفية انعكاس الموجات الكهرومغناطيسية عن سطحٍ موصّل (**conductive surface**) .

كانت النتيجة النهائية من هذه التعقيدات هو أنه عندما ظهرت نظرية ماكسويل لأول مرة، لم يُعرها أحدٌ اهتمامه.

ولكن القليل من الأشخاص أعاروها اهتمامًا. وأحد هؤلاء هو أوليفر هيفساید **Oliver Heaviside**، وذلك عندما وصفها صديق له بأنها: "**غرابة من الطراز الأول**". أما هيفساید، فقد نشأ في فقر مدقع، وكان فاقدًا للسمع جزئيًا، كما أنه لم يدخل أيّما جامعة. وبدلًا من ذلك، فقد علّم نفسه العلوم الحديثة، والرياضيات.

كان هيفساید في أوائل العشرينات من العمر، وكان عاملَ تلغراف في نيوكاسل **Newcastle**، في شمال شرق إنجلترا، عندما حصل على أطروحة ماكسويل لعام 1873. كتب بعدها هيفساید: "لقد رأيتها عظيمة، فأعظم، فأعظم، لقد قررت أن أحيط علمًا بالكتاب وعقدت العزم على العمل"، وفي السنة التالية، ترك وظيفته وانتقل ليعيش مع والديه ليتعلم معادلات ماكسويل.

لقد كان هيفساید، عاملًا بشكل منغلق، هو من وضع معادلات ماكسويل في شكلها الحالي. في صيف 1884، كان هيفساید يبحث في كيفية انتقال الطاقة من مكان إلى آخر في الدارة الكهربائية. كان تساؤله منصبًا على إيجاد إجابة للسؤال "هل هذه الطاقة تنتقل عبر التيار في السلك الكهربائي، أو في مجال مغناطيسي محيط به؟"

انتهى الأمر بهيفساید بأن يتوصّل إلى نتيجة كان قد نشرها لتوه فيزيائيٌ بريطاني آخر، جون هنري بوينتينغ **John Henry Poynting**، ولكن هيفساید بقي يمضي قدمًا في عمله، وخلال عمله في عمليات التفاضل المتجهة (**vector calculus**) المعقدة، فقد اهتدى إلى طريقة لإعادة صياغة المعادلات الأربع لماكسويل لتظهر بالشكل الذي نعرفه بها في يومنا هذا.

كان المفتاح الأساسي هو إزالة ذلك الجهد الاتجاهي المغناطيسي الغريب لماكسويل. قال هيفساید بعد ذلك: "لم أحرز أيّما تقدم حتى قمت بإلقاء الجهود الاتجاهية بعيدًا". وضعتِ الصياغةُ الجديدة المجالين الكهربائي والمغناطيسي في المقدمة وفي المركز.

كان أحد نتائج العمل أنه أظهر التناظر البديع في معادلات ماكسويل. تصف أحد المعادلات كيف أن المجال المغناطيسي المتغير يُشكّل مجالًا كهربائيًا (وهو اكتشاف فاراداي)، وتصف أخرى كيف أن المجال الكهربائي المتغير يُشكّل مجالًا مغناطيسيًا (وهو تيار الإزاحة المشهور، والذي أضافه ماكسويل).

كما أن هذه الصياغة أظهرت لغزًا جديدًا. تمتلك الشحنات الكهربائية، كالإلكترونات (**electrons**) والأيونات (**ions**)، خطوطًا من المجال الكهربائي حولها والتي تنطلق من الشحنة، ولكن لا يوجد مصدر لأي خطوط مجال مغناطيسي، ففي عالمنا، تكون خطوط المجال المغناطيسي دائمًا عبارة عن حلقات مغلقة، بدون بداية أو نهاية.

أشكل هذا اللاتناظر على هيفساید، وبالتالي فقد أضاف حدًّا على المعادلة ليمثل الشحنة المغناطيسية (**magnetic charge**)، مفترضًا أنها لم تكن مكتشفة بعد. ولا شك أنها لم تكتشف بعد. ومنذ ذلك الحين قام الفيزيائيون بعمل أبحاث معمقة لمثل هذه الشحنة المغناطيسية، والتي أيضًا تدعى بأحادية الأقطاب المغناطيسية (**magnetic monopoles**)، ولكنها لم تكتشف قط.

ولكن مع ذلك، فإن التيار المغناطيسي (**magnetic current**) يعتبر وسيلةً مفيدةً لحل المسائل المتعلقة بالكهرومغناطيسية، والتي تمتلك بعضًا من المكونات الهندسية وذلك من مثل سلوك الإشعاع عندما يتحرك عبر شقٍّ في صفيحة موصلة.

ولكن إذا كان هيفساید قد عدّل معادلات ماكسويل لهذه الدرجة، لمَ لا نطلق عليها معادلات هيفساید؟ أجاب على هذا السؤال هيفساید نفسه عام 1893 في مقدمة الجزء الأول من منشوره ذي الأجزاء الثلاثة **Electromagnetic Theory**، فقد كتب أنه إن كان لدينا سبب جيد "**إيماناً مني بأنه كان ليعترف بضرورة التغيير عندما نبه إليه، فلأنني أعتقد أن النظرية المعدلة يمكن أن تسمى بنظرية ماكسويل**".

يعد التفوق الرياضي أمرًا مختلفًا عن إيجاد الدليل التجريبي لنظرية ماكسويل. عندما مات ماكسويل في 1879، عن عمر 48 سنة، كانت نظريته تُعتبر غير مكتملة بعد. لم يكن هناك دليل تجريبي على أن الضوء مكوّن من موجات كهرومغناطيسية، هذا بالإضافة إلى الحقيقة القائلة بأن سرعة الضوء المرئي والإشعاع الكهرومغناطيسي (**electromagnetic radiation**) متساويتان. بالإضافة إلى ذلك، فإن ماكسويل لم يُشر بشكل خاص إلى العديد من الخصائص التي يجب أن يمتلكها الإشعاع الكهرومغناطيسي فيما إذا كوّن الضوء، وذلك من مثل خاصيتي الانعكاس (**reflection**) والانكسار (**refraction**).

عمل الفيزيائيان جورج فرنسيس فيتزجيرالد **George Francis FitzGerald**، وأوليفر لودج **Oliver Lodge** ليقويا الرابط مع الضوء. التقى العالمان، وهما نصيران لأطروحة 1873 لماكسويل، في السنة السابقة لموت ماكسويل في اجتماع للجمعية البريطانية لتقدم العلوم **British Association for the Advancement of Science** في دوبلين **Dublin** ، وباشرا بالتعاون، عن طريق تبادل الرسائل بشكل أساسي. ساعد تبادلُهما الرسائل مع بعضهما، ومع هيفساید، في تطوير الفهم النظري لنظرية ماكسويل.

وكما يوجز المؤرخ هانت **Hunt** في كتابه، **The Maxwellians**، فإن لودج وفيتزجيرالد كانا يأملان أن يصلا إلى دليلٍ تجريبي ليدعم الفكرة القائلة أن الضوء عبارة عن أمواج كهرومغناطيسية، ولكن الحظ لم يحالفهما هنا. في نهايات السبعينات من القرن التاسع عشر، طوّر لودج بعضًا من مجموعات الدوائر الكهربائية (**circuitry**) ، والتي أمل أن تكون قادرةً على تحويل الكهرباء (ذات التردد المنخفض) إلى ضوء (ذي التردد المرتفع)، ولكن جهده هذا أخفق عندما أيقن لودج وفيتزجيرالد أن مخططاتهما ستُنتج إشعاعات ذات ترددات منخفضةٍ جدًا، أخفض من أن تُرى بالعين.

بعد حوالي عقد من الزمن، كان لودج يجري تجارب على الحماية من البرق، عندما لاحظ أن المكثفات المفرَّغة (**discharging capacitors**) على طول الأسلاك قد كونت أقواسًا كهربائيةً، ثم قام، ممتلئًا بالفضول، بتغيير أطوال السلك فوجد أنه يمكنه أن يرى

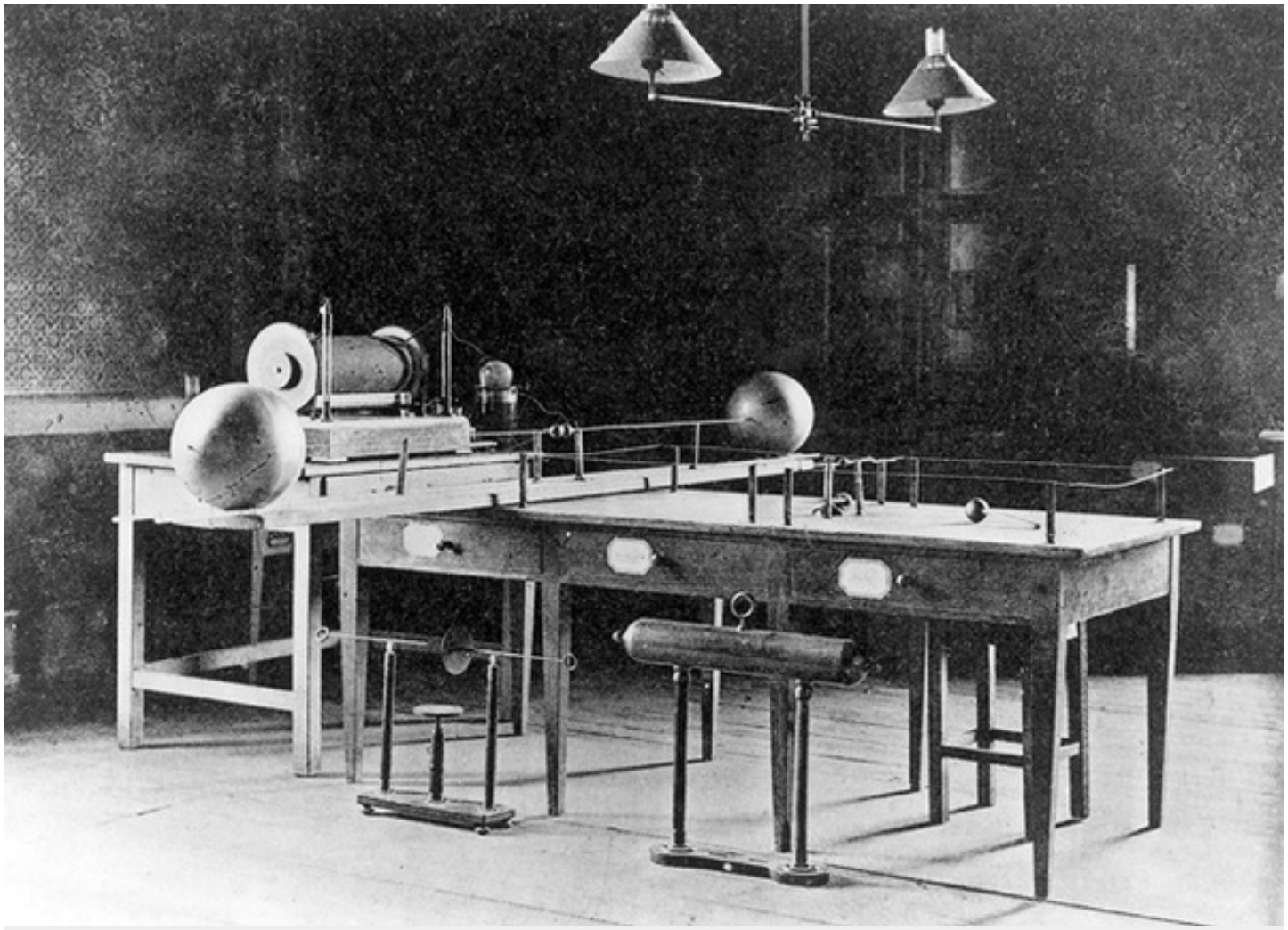
شرارات مدهشة. وقد قام باستنتاجه الصحيح، وهو أن ذلك كان نتيجةً لعمل موجة كهرومغناطيسية في دائرة رنين . (**Resonance**) وجد لودج أنه بوجود طاقة كافية، فإنه بإمكانه أن يرى الهواء يتأيّن حول الأسلاك، وهو توضيح دراماتيكي لموجة مستقرة.

خطط لودج، بعد أن صار واثقًا من قدرته على توليد وكشف الموجات الكهرومغناطيسية، أن يعلن نتائجه المذهلة في اجتماعٍ في الجمعية البريطانية، وذلك مباشرة بعد أن عاد من رحلة في جبال الألب. ولكن، وبينما كان يقرأ دوريةً في القطار الخارج من ليفربول، فقد اكتشف أن شخصًا ما سبقه إلى هذا الاكتشاف. وجد لودج في عدد يوليو/تموز 1888 من مجلة "**Annalen Der physic**" مقالة عنوانها: عن الموجات الكهروديناميكية في الهواء وانعكاساتها "**Über elektrodynamische Wellen im Luftraum und deren Reflexion**"، قام بكتابتها باحث ألماني قليل الشهرة، هاينريش هيرتس **Heinrich Hertz**.

بدأ عمل هيرتس التجريبي على هذا الموضوع في **Technische Hochschule**، والمعروف اليوم باسم معهد كارلسروه للتكنولوجيا **Karlsruhe Institute of Technology** في كارلسروه **Karlsruhe** في ألمانيا، عام 1886، فقد لاحظ أن شيئًا ما مثيرًا للفضول حصل عندما أفرغ مكثفًا عبر حلقة سلكية. كما كونت حلقةٌ مماثلةٌ موجودةٌ على مسافة قصيرة أقواسًا عبر أطرافها غير الموصولة. أدرك هيرتس أن الشرارات الموجودة في الحلقة غير الموصولة كان سببها استقبال موجات كهرومغناطيسية كانت قد وُلِّدَت من الحلقة ذات المكثف الذي جرى تفريغه.

أُلهم هيرتس بذلك، واستخدم الشرارات في مثل هذه الحلقات ليكتشف الموجات غير المرئية ذات التردد الراديوي (**radio-frequency waves**). كما استمر في عمله ليجري تجارب يؤكد فيها أن الموجات الكهرومغناطيسية تبدي سلوكات شبيهة بالضوء، تتضمن الانعكاس، والانكسار، والانحراف (**diffraction**)، والاستقطاب (**polarization**). كما أجرى مجموعة من التجارب في الحيز الفارغ، وكذلك على طول الأسلاك، وأيضًا قام بسبك منشور بطول متر مصنوع من الأسفلت والذي كان شفافًا للموجات الراديوية، واستخدمه ليراقب أشكال الانعكاس والانكسار كبيرة الحجم نسبيًا، وقام بإطلاق موجاتٍ راديوية باتجاه شبكة من الأسلاك المتوازية، وبرهن أن الموجات ستنعكس عن الشبكة أو تمر عبرها، وذلك يعتمد على اتّجاه الشبكة. لقد برهن ذلك على أن الموجات الكهرومغناطيسية كانت ذات اتجاه مستعرض، أي أنها تهتز، تمامًا كما يفعل الضوء، في اتجاهٍ معامد لاتجاه انتشارها. قام هيرتس أيضًا بعكس موجاتٍ راديوية عن صفيحة كبيرة من الزنك (**zinc**). وقد كان يقيس المسافة بين الأصفار التي تلغي بعضها في الموجات المستقرة التي نشأت، وذلك ليُحدّد أطوال تلك الموجات.

مستخدمًا هذه البيانات ـ جنبًا إلى جنب مع تردد الإشعاع، والذي حسبه عن طريق قياس السعة والمحاثة (التحريضية) الكهربائية للهوائي الناقل الخاص به والشبيه بالدائرة الكهربائية ـ كان هيرتس قادرًا على أن يحسب سرعة هذه الموجات اللامرئية، والتي كانت قريبة جدًا من سرعة الضوء المرئي.



استخدم هيرتس الملف (يسارًا) والهوائيات (يمينًا) لينتج ويكشف عن الإشعاع الكهرومغناطيسي خارج المجال المرئي. حقوق الصورة: أرشيف معهد كارلسروه للتكنولوجيا. Credit: Karlsruhe Institute of Technology Archives.

كان ماكسويل قد افترض أن الضوء عبارة عن موجةٍ كهرومغناطيسية، أما هيرتس فقد أظهر أنه من المحتمل وجود عالمٍ كامل من الموجات الكهرومغناطيسية والتي تسلك سلوكًا مماثلًا لسلوك الضوء المرئي، وتتحرك عبر الفراغ بنفس السرعة. كان هذا الإشهار كافيًا، بالدليل، للعديد من العلماء ليتقبلوا فكرة أن الضوء نفسه هو موجة كهرومغناطيسية.

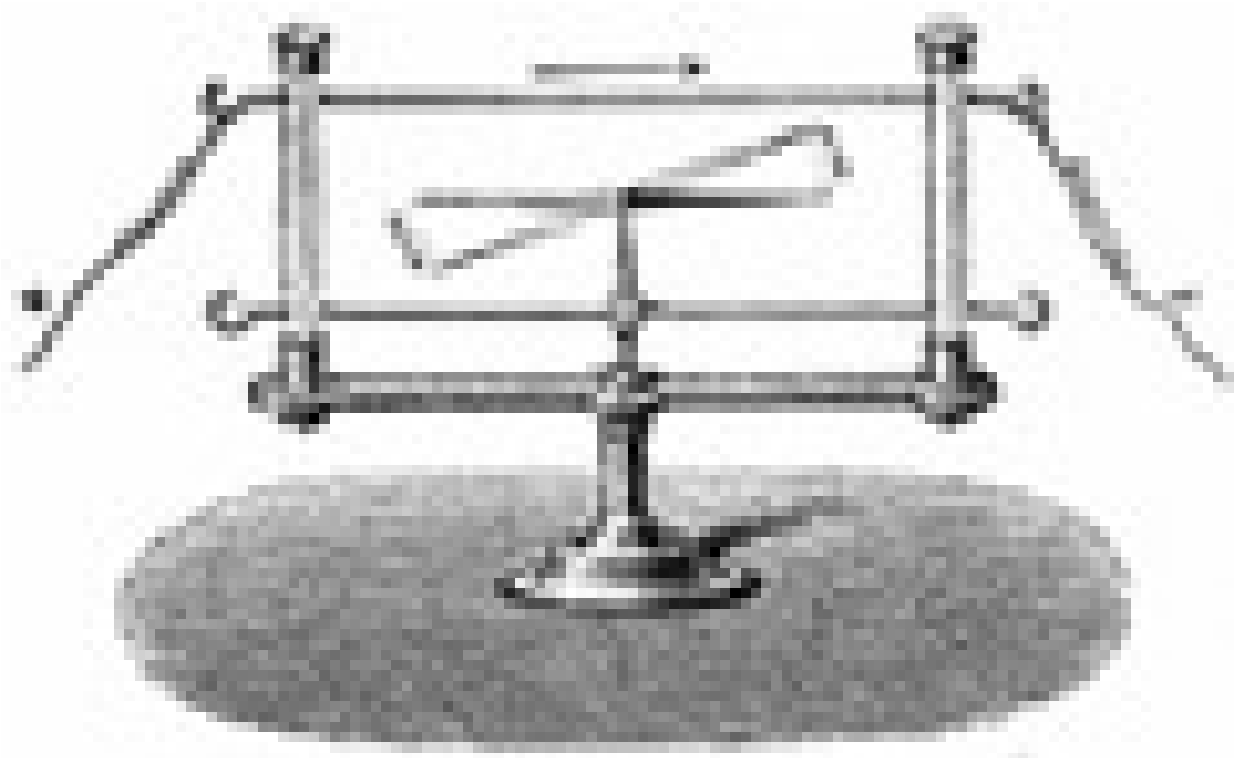
لم يدم إحساس لودج بالإحباط طويلًا، فقد عوّضه جمالُ عمل هيرتس وكماله خيرًا من ذلك. عمل لودج وفيتزجيرالد على إشهار مكتشفات هيرتس، وذلك بعرضها أمام الجمعية البريطانية. ثم بدأ عمل هيرتس مباشرةً بدفع عملية تطوير الإرسال البرقي اللاسلكي. استخدم أول تجسيد لهذه التقنية ناقلاتٍ شبيهة جدًا بالأجهزة ذات الفجوات الشررية والحزمة العريضة، كتلك التي استخدمها هيرتس.

وفي النهاية، فقد وافق العلماء على أن الموجات قد تنتقل عبر الفراغ. كما أن مفهوم المجال، والذي كان يعتبر شيئًا كريهًا في البداية لافتقاره الأجزاء الميكانيكية التي تؤهله للعمل، صار مفهومًا مركزيًا لجزءٍ كبير من الفيزياء الحديثة.

كان للنظرية أن تنمو أكثر، ولكن وقبل انتهاء القرن التاسع عشر، وبفضل الجهود العنيدة لقلة من المتحمسين المكرّسين أنفسهم لها، فإن ميراث ماكسويل قد تم تأمينه.

تواريخ وأحداث

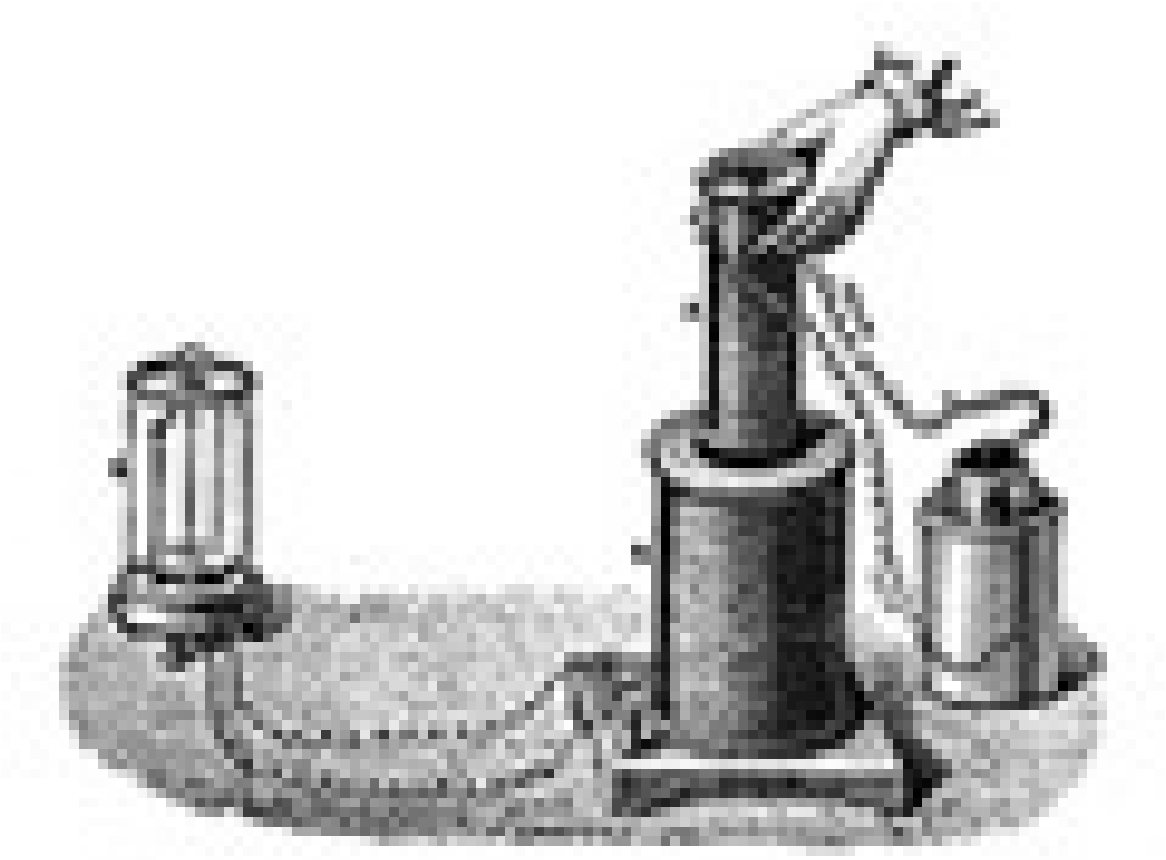
- 1785، تشارلز أوغستن دو كولوم **Charles-Augustin de Coulomb** طرح تقريرًا يفيد بأن القوة بين شحنتين تتناسب عكسيًا مع مربع المسافة بينهما.



1800، أليساندرو فولتا Alessandro Volta اخترع أول بطارية، التي سمحت للمختبرين بإجراء تجاربهم على التيار المستمر. حقوق الصورة: ويكيبيديا

- 1820، أدرك هانز كريستيان أورستد **Hans Christian Ørsted**، لأول مرة، أن هناك علاقة بين الكهرباء والمغناطيسية، بعد أن لاحظ بأن إبرة البوصلة المغناطيسية تتحرك عندما توضع بالقرب من سلك يحمل تيارًا.

- 1820، أندريه ماري أمبير يبين أن باستطاعة سلكين متوازيين حاملين لتيار أن يؤثرا على بعضهما البعض بقوة تجاذب أو قوة تنافر وهذا يتوقف على الاتجاه النسبي للتيارات الكهربائية فيهما.



1831، مايكل فاراداي الذي تصوّر المجالات الكهربائية والمغناطيسية، يكتشف الحث الكهرومغناطيسي. حقوق الصورة: ويكيبيديا

- وضع ماكسويل آخر حجارة الأساس لنظريته الكهرومغناطيسية في العام 1864، عندما كان ابن 33 عامًا (على الرغم من تقديمه لتوضيحات وتبسيطات لأعماله في وقت لاحق). رمى ماكسويل بالنموذج النظري الميكانيكي جانبًا، وذلك في حديثه عام 1864، وفي الورقة البحثية التي تلته، لكنه أبقى على مفهوم تيار الإزاحة. وبالتركيز على الجانب الرياضي، وصف كيف ترتبط القوتان، الكهربائية والمغناطيسية، وكيف تتحركان إذا ما أُنشئتا بصورة سليمة في تناغم لتكون موجات كهرومغناطيسية.



1831، جيمس كليرك ماكسويل ولد في أدنبرة. حقوق الصورة Universal History Archive/Getty Images:

- 1855، تُنشر أول ورقة لماكسويل عن ملاحظات فاراداي، ونظرياته.
- 1861 و1862، يصدر ماكسويل ورقة من أربعة أجزاء: **On Physical Lines of Force** والتي تعرض الفكرة الأساسية في أن الاختلاف في التدفق الكهربائي عبر سطحٍ ما، قد يخلق مجالًا مغناطيسيًا.
- 1864، يعرض ماكسويل عملًا جديدًا أمام المجتمع العلمي في لندن، والذي نُشر السنة التالية، ويقترح فيه أن المجالين الكهربائي والمغناطيسي يمكن أن يتحركا عبر الفضاء في موجات، وأن الضوء نفسَه عبارة عن موجة مماثلة.

- 1873، ماكسويل ينشر رائعته العلمية، "أطروحة حول الكهرباء والمغناطيسية"، والتي تحتوي على أعمال رياضية وتفسيرية أخرى.



1879، أثارت منافسة أقامتها الأكاديمية البروسية للعلوم اهتمام هاينريش هيرتس بعمل ماكسويل، كانت هذه المنافسة تتطلب الحصول على دليل تجريبي لصالح الموجات الكهرومغناطيسية أو ضدها. حقوق الصورة Popperfoto/ Getty Images

- 1879، توفي ماكسويل بسرطان المعدة، عن عمر يناهز 48 سنة.



1885، أوليفر هيفساید ينشر نسخة مكثفة من معادلات ماكسويل، مقللًا عدد المعادلات من 20 إلى أربع. حقوق الصورة :SSPL/Getty Images

- 1888، هيرتس، وبعد عدة سنوات من انتقاله إلى مختبر مجهز جيدًا في كارلسروه، يعلن تأكيده لوجود الموجات الكهرومغناطيسية التي تنبّأ بها ماكسويل.

- 1940، ألبرت أينشتاين يعطي دفعة للمصطلح "معادلات ماكسويل" في بحثه **Considerations Concerning the Fundaments of Theoretical Physics**.

- التاريخ: 2015-09-24
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#معادلات ماكسويل #الكهرباء والمغناطيسية #فاراداي #نموذج ماكسويل

المصطلحات

- **الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic spectrum)**: يُمثل الطيف الكهرومغناطيسي توزع الطاقة الكهرومغناطيسية عند الأطوال الموجية المختلفة، ويمتد انطلاقاً من الأطوال الموجية الراديوية الطويلة جداً وصولاً إلى أشعة غاما القصيرة جداً. تستطيع العين البشرية كشف قسم صغير من هذا الطيف، وهو القسم المعروف بالضوء المرئي. باختصار إنه المجال الكامل للترددات انطلاقاً من الأمواج الراديوية، ووصولاً إلى الأشعة غاما. المصدر: ناسا
- **كلفن (Kelvin)**: هي الواحدة الدولية الرئيسية لدرجة الحرارة الترموديناميكية وتُعرف على أنها جزء من 273.16 من درجة الحرارة الترموديناميكية للنقطة الثلاثية للماء. وللحديث بشكل عملي أكثر، يقيس سلم كلفن درجة حرارة الجسم التي تكون فوق الصفر المطلق، وهي درجة الحرارة النظرية الأشد برودةً. على مقياس كلفن، تكون نقطة التجمد للماء 273 كلفن (0 درجة سيلسيوس، 0 درجة كلفن) (الكلفن= 273 + سيلسيوس= 273+ 9/5 (فهرنهايت-32)). غالباً ما يتم استخدام سلم كلفن لقياس درجات الحرارة في علوم مثل علم الفلك. المصدر: ناسا
- **الأيونات أو الشوارد (Ions)**: الأيون أو الشاردة هو عبارة عن ذرة تم تجريدها من الكترون أو أكثر، مما يُعطيها شحنة موجبة.وتسمى أيوناً موجباً، وقد تكون ذرة اكتسبت الكتروناً أو أكثر فتصبح ذات شحنة سالبة وتسمى أيوناً سالباً

المصادر

- spectrum.ieee

المساهمون

- ترجمة
  - عبد الرحمن سوالمه
  - أحمد نادر فراج
- مُراجعة
  - مازن قنجراوي
- تحرير
  - وليد عادل العبد
  - دعاء حمدان
- تصميم
  - وائل نوفل
- نشر
  - مي الشاهد