

Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Band: 131 (2010)

Artikel: La physique

Autor: Jeannet, Eric

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-130460>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

LA PHYSIQUE

ERIC JEANNET

Rue du Collège 30f, 2905 Courtedoux, Suisse.

Imaginons un gymnasien, son bac et une montre de son oncle Abraham-Louis en poche, qui décide en 1832 de s'octroyer une année sabbatique particulière : il s'embarque dans une fusée rapide¹ avec des vivres pour une année. Après six mois, il fait demi-tour et revient à Neuchâtel. Le bâtiment qui était en construction lors de son départ abrite un Lycée Jean Piaget et une Bibliothèque publique et universitaire. Il y entre et trouve un gros pavé jaune intitulé *Bulletins et Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, Table des matières et index (1835-2002), 2006-Tome 125/2*. Il l'ouvre, tombe sur la page 174, et apprend qu'un certain Juvet G. a donné, en 1925, une conférence intitulée « La théorie de la relativité et la théorie des quanta ».

Au début des années cinquante, lorsque j'ai commencé mes études à l'Université de Neuchâtel, j'avais deux passions : la cosmologie et les particules élémentaires. Je possédais l'ouvrage de Lemaître sur « L'atome primitif », et mes lectures de la revue² « Atomes » me confortaient dans l'idée que les particules alors connues : les protons, les neutrons, les électrons, les positrons, les hypothétiques neutrinos, les muons (découverts dans le rayonnement cosmique) et les mésons π (détectés, eux aussi, dans le rayonnement cosmique) méritaient vraiment leur nom de particules élémentaires. J'imaginais qu'avec la relativité, la théorie des quanta et ces particules élémentaires, la physique allait enfin expliquer le monde matériel, du noyau de l'atome à la fuite des nébuleuses. Surpris comme le neveu d'Abraham-Louis, je constate aujourd'hui que le nombre des particules identifiées³ dans les grands centres de recherche comme le CERN dépasse 300. Elles sont trop nombreuses pour être vraiment élémentaires !

Résumer 175 ans de physique est une gageure. Je me bornerai ici à rappeler les deux révolutions du début du XX^{ème} siècle : la relativité et les quanta, ainsi que les quatre interactions fondamentales de la physique. La physique de la matière condensée, si importante pour elle-même et pour ses applications (supraconductivité, microélectronique, matériaux composites, nanotechnologies, etc) sera délibérément mise de côté.

FARADAY, MAXWELL ET LES LOIS FONDAMENTALES DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE

James Clerk Maxwell est né en 1831, année de la découverte de la loi d'induction par Michael Faraday, soit un an avant la création de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel.

La mécanique, après Galilée, Newton et bien d'autres, fut le premier domaine de la physique à être mathématisé dans une forme qui est devenue celle de la science actuelle. Longtemps la

* les notes infrapaginaires sont regroupées de la page 122 à la page 125.

mécanique fut proposée comme modèle pour d'autres disciplines : toute la science aurait dû se réduire à la mécanique. On sait maintenant que cet espoir était illusoire.

A la mort de Newton en 1727, la plupart des phénomènes électriques et magnétiques étaient encore inconnus, mais dès l'Antiquité on avait observé que des objets frottés, à de la toile par exemple, pouvaient en attirer d'autres, et on connaissait les propriétés des barreaux de magnétite ; toutefois l'étude des phénomènes électrostatiques et magnétiques commence vraiment vers 1600. On retiendra notamment les noms de William Gilbert, Alessandro Volta, Stephen Grey, Benjamin Franklin, Charles Augustin Coulomb⁴, Hans Christian Oersted, André Marie Ampère qui sut donner, en 1827, la forme mathématique adéquate⁵ aux résultats accumulés, et surtout Michael Faraday⁶.

Oersted avait montré qu'un courant électrique dans un fil faisait dévier l'aiguille d'une boussole voisine. Faraday est fasciné par le fait que les forces qui alignent de la limaille de fer dans un plan perpendiculaire au fil n'agissent pas dans la direction du fil (comme ce serait le cas pour une force électrostatique ou une force de gravitation), mais agissent en cercles centrés sur le fil. Il réalise que les théories newtoniennes classiques ne peuvent expliquer la nature circulaire de ces forces.

Faraday ne tarde pas à réaliser que le phénomène inverse existe aussi : un effet magnétique produit un courant électrique, et il invente le principe de la dynamo en faisant tourner un aimant autour d'un fil. Il comprend que c'est le mouvement de l'aimant (pour lui la modification des lignes de forces⁷ magnétiques au cours du temps) qui est essentiel. En 1831 il monte une expérience pour voir si les lignes de forces magnétiques produites par une boucle de courant à l'intérieur d'une autre boucle conductrice peuvent y produire un courant ; le résultat s'avère négatif dans le cas d'un courant constant mais positif pour un courant variable.

Expérimentateur génial, Faraday n'avait pas les connaissances mathématiques nécessaires pour mettre ses découvertes sous forme d'équations valables dans tous les cas de figure. C'est Maxwell qui accomplira cette généralisation. Son premier article important concernant l'électricité⁸, « On Faraday's Lines of Force », paraît en 1856. Maxwell introduit entre autres des champs de vecteurs⁹ **E** et **H** dont les lignes de champ ne sont autres que les lignes de forces de Faraday. Il reprend le sujet en 1861 en imaginant un hypothétique milieu élastique, l'éther, support des champs électrique **E** et magnétique **H**.

Ce modèle, inventé pour attiser son imagination, le conduit à découvrir deux faits capitaux :

1. en plus du courant électrique de conduction, il existe un courant proportionnel à la variation temporelle du champ électrique $d\mathbf{E}/dt$ qui produit aussi un champ magnétique ; il interprète ce courant comme « un déplacement de l'électricité »,
2. lorsque ce milieu est l'objet d'une vibration électrique, elle est transversale et se propage avec une vitesse calculable à partir des lois de l'électrodynamique¹⁰, vitesse très voisine de celle de la lumière dans le vide¹¹.

Les résultats de Maxwell sont consignés dans son « Treatise on Electricity and Magnetism » paru en 1873. Fondement de l'électrodynamique, ses équations, en notation moderne avec les opérateurs *divergence* et *rotationnel*, s'écriront plus tard de la manière suivante dans le système d'unités MKSA (tab. 1).

La solution des équations de Maxwell à l'extérieur des domaines contenant les sources **i** et **p** conduit à une forme simple des champs **E** et **H** : ceux-ci vibrent en phase dans des plans perpendiculaires et se propagent dans la direction donnée par $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ avec une vitesse valant

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{div } \mathbf{D} = \rho$ | \mathbf{D} : champ de déplacement ; ρ : densité de charge électrique |
| $\text{rot } \mathbf{H} - \partial \mathbf{D} / \partial t = \mathbf{i}$ | \mathbf{H} : champ magnétique ; \mathbf{i} : densité de courant électrique |
| $\text{rot } \mathbf{E} - \partial \mathbf{B} / \partial t = \mathbf{0}$ | \mathbf{E} : champ électrique ; \mathbf{B} : champ d'induction magnétique |
| $\text{div } \mathbf{B} = 0$ | |
| avec $\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$: | |
| ϵ est la constante diélectrique (1 dans le vide) et $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ farad/m ⁽¹²⁾ | |
| et $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$: μ est la perméabilité magnétique (1 dans le vide) et | |
| $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henry/m ⁽¹²⁾ | |

Tableau 1

$$v = 1/\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}$$
 (dans le vide : $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$)

La lumière est ainsi une onde électromagnétique. En optique, dans un milieu d'indice de réfraction n , la vitesse de la lumière est donnée par $v = c/n$; l'indice de réfraction est donc lié aux propriétés électriques et magnétiques du milieu par

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

Devant la beauté d'un tel système d'équations, on comprend pourquoi le grand physicien autrichien Ludwig Boltzmann, lorsqu'il en prit connaissance, s'exclama, citant Goethe : « War es ein Gott der diese Zeichen schrieb ? ».

DES GAZ PARFAITS À LA MÉCANIQUE STATISTIQUE

La double question « Qu'est-ce que la chaleur ? et peut-on la réduire à une autre chose, plus fondamentale ? » a longtemps divisé à la fois les chimistes et les physiciens. Pour les uns la chaleur était une substance, avec ou sans poids ; pour les autres c'était une forme de mouvement, éventuellement une vibration.

La première interprétation était basée sur l'observation de mélanges de substances à différentes températures, la seconde sur la production de chaleur par frottement. Malgré une expérience capitale, réalisée par Humphry Davy¹³, dont les résultats sont à

l'actif de la seconde interprétation, Joseph Fourier¹⁴, dans son ouvrage de 1822 « Théorie analytique de la chaleur », considère encore la chaleur comme une substance indestructible.

La deuxième interprétation, qui implique la transformation de travail en chaleur selon une relation bien définie, ne s'impose qu'au milieu du XIX^{ème} siècle et va permettre d'établir le premier principe de la thermodynamique : celui de la conservation de l'énergie, une des lois fondamentales de la physique moderne. Curieusement le deuxième principe¹⁵, énoncé par Sadi Carnot en 1824 dans son ouvrage « Réflexions sur la puissance motrice du feu », a précédé le premier. C'est un peu, note Emilio Segrè dans son livre « From Falling Bodies to Radio Waves », comme si l'on avait découvert la géométrie non euclidienne avant l'euklidienne.

Les premières recherches concernant les gaz¹⁶ conduisent William Thomson¹⁷, en 1848, à la définition de la température absolue :

$$T = \theta + 273,16$$

où θ est la température en degrés Celsius. Avec la température absolue T , la loi des gaz parfaits (ou de Boyle-Mariotte) s'écrit simplement, p étant la pression du gaz enfermé dans un volume V :

$$pV = nRT$$

où n est le nombre de moles et $R = 8,314$ Joule/degré · mole la constante des gaz parfaits.

Mais les gaz parfaits qui ont joué un rôle essentiel dans l'élaboration de la thermodynamique n'existent pas : à haute pression et basse température, tous les gaz finissent par se liquéfier¹⁸. Les derniers, l'hydrogène et l'hélium, furent liquéfiés respectivement en 1898 par James Dewar et en 1908 par Heike Kammerlingh-Onnes. L'équation de Boyle est donc une approximation, d'autant meilleure que la pression et la température sont éloignées des conditions de liquéfaction du gaz. Johann van der Waals, en 1873, formule la loi suivante, relative à une mole et basée sur la théorie cinétique des gaz développée par Daniel Bernouilli dès 1738 :

$$(p + a/V^2) \cdot (V-b) = RT$$

a et b étant des constantes caractéristiques de chaque gaz.

Du temps de Boyle, (1627-1691), les gaz sont considérés comme des fluides continus ; la notion de pression ne pose alors aucun problème : c'est la force exercée par le piston (qui maintient le gaz dans son enceinte) divisée par la surface de celui-ci. Mais comment interpréter cette pression si le gaz est constitué de très petites particules se déplaçant de manière désordonnée, s'attirant ou se repoussant les unes les autres et rebondissant sur les parois du récipient ?

La quantité de mouvement d'une molécule qui rebondit sur une paroi est modifiée selon la loi de Newton : $d(mv)/dt = f$, où f est la force exercée par la paroi sur cette molécule lors du choc. Si, hypothèse simplificatrice, la vitesse est perpendiculaire¹⁹ à la paroi, la variation de la quantité de mouvement²⁰ $\Delta (mv)$ à chaque choc vaut $-2mv$. L'intervalle de temps Δt entre deux chocs de la molécule (qui rebondit sur la paroi opposée) est inversement proportionnel à sa vitesse v ; ainsi la force $\Delta (mv)/\Delta t$ due à une molécule est proportionnelle à v^2 . En faisant la somme des effets de toutes les molécules d'une mole sur les parois²¹, on peut calculer la pression du gaz et obtenir :

$$pV = Nm\langle v^2 \rangle / 3 = RT$$

où $N = 6,022 \cdot 10^{23}$ est le nombre d'Avogadro. Il s'ensuit, avec $k = R/N = 1,38 \times 10^{-23}$ Joule/degré (constante de Boltzman) :

$$3kT/2 = m\langle v^2 \rangle / 2 = \langle E_{cinétique} \rangle$$

Ainsi la température absolue est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne des molécules.

A la fin du XIX^{ème} siècle, la physique semblait pouvoir se résumer à la mécanique de Newton et à l'électrodynamique de Maxwell. Toutefois, malgré les succès réitérés des vérifications expérimentales de ces théories, il restait quelques points obscurs. Par exemple celui-ci : même si l'état d'un gaz est décrit par des collisions élastiques entre ses molécules, phénomènes réversibles²², l'expansion de ce gaz dans le vide est un phénomène irréversible. Pour comprendre cela, il faut revenir à la thermodynamique et à ses deux principes qui ont une portée générale.

Le premier principe dit qu'il est impossible de concevoir une machine qui crée de l'énergie à partir de rien²³ ; sous une forme plus explicite, c'est la conservation de l'énergie : U étant l'énergie interne d'un système matériel²⁴, c'est-à-dire la somme des énergies cinétiques et potentielles de tous ses constituants, sa variation dU est due au travail p·dV effectué et à la quantité de chaleur²⁵ δQ fournie au système :

$$dU = \delta Q - p \cdot dV$$

Le second principe dit qu'il est impossible de concevoir une machine dont l'unique résultat serait de transformer intégralement en travail la chaleur contenue dans un réservoir à température constante²⁶, car une partie de cette chaleur est inévitablement « dégradée », c'est-à-dire passe sans utilisation possible à une température plus basse. Cette impossibilité est liée à une nouvelle grandeur, l'entropie S d'un système matériel, définie par sa différentielle lors d'un échange réversible de chaleur $\delta Q_{rév}$ avec l'extérieur :

$$dS = \delta Q_{rév} / T$$

Pour trouver cette relation, Boltzmann considère deux systèmes indépendants, A et B, dont les entropies S_A et S_B et les probabilités thermodynamiques W_A et W_B sont liées par les expressions : $S_A = f(W_A)$ et $S_B = f(W_B)$. Il considère maintenant que A et B forment un seul système C avec la relation : $S_C = f(W_C)$.

L'entropie S est une grandeur extensive (l'augmentation d'entropie dS est proportionnelle à la quantité de chaleur δQ) : $S_C = S_A + S_B$. D'autre part, les probabilités d'événements indépendants se multiplient : $W_C = W_A \times W_B$. Il en résulte que la fonction f satisfait :

$$f(W_A \cdot W_B) = f(W_A) + f(W_B)$$

On reconnaît une propriété de la fonction logarithmique. Ainsi $S = \text{constante} \cdot \ln W^{(29)}$

Tableau 2

où T est la température à laquelle la chaleur est fournie sous forme réversible.

Le deuxième principe indique que lors d'une transformation d'un état 1 à un état 2 d'un système isolé de l'extérieur, la variation d'entropie est positive ou nulle :

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq 0$$

Si $\Delta S = 0$, la transformation est réversible. Si $\Delta S > 0$, elle est irréversible.

Boltzmann interprète statistiquement l'entropie comme une mesure du désordre interne d'un système matériel²⁷. Par exemple, un gaz parfait se manifeste extérieurement par le volume qu'il occupe, par sa pression et par sa température. Un état donné de ce gaz peut être réalisé par plusieurs configurations microscopiques différentes des positions et des vitesses de ses molécules. Ce nombre de configurations est noté W. Un état macroscopique est d'autant plus probable que W est grand²⁸. L'évolution d'un système étant décrite, selon le deuxième principe, par une augmentation de son entropie S, et, selon l'interprétation statistique, par une augmentation de sa probabilité thermodynamique W, il existe une relation entre ces deux grandeurs : $S = f(W)$.

C'est donc par un raisonnement mathématique (tab. 2) que Boltzmann a montré que :

$$S = k \cdot \ln W^{(29)}$$

où $k = R/A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Joule/degré est la constante de Boltzmann.

LE CORPS NOIR, MAX PLANCK ET ALBERT EINSTEIN

Un résultat important de la mécanique statistique est la loi de distribution des vitesses des molécules d'un gaz parfait. Maxwell a montré que si dN est le nombre de molécules dont la vitesse est comprise entre v et v+dv, alors³⁰:

$$dN/dv = C v^2 \exp(-mv^2/2kT)$$

On peut en déduire : $v_{\max}^{(31)} = \sqrt{2kT/m}$, $\langle v \rangle = \sqrt{2kT/\pi m}$ et $\langle v^2 \rangle = 3kT/m$.

Un problème qui présente quelques analogies avec la distribution des vitesses moléculaires est celui de la lumière émise par un corps chauffé. On sait depuis longtemps que la température d'un four peut être évaluée par la couleur de son intérieur. Un fabricant de porcelaine signale, en 1792, que lorsqu'ils sont chauffés, tous les corps deviennent rouges à la même température. On appelle corps noir un objet idéal qui absorbe complètement les ondes électromagnétiques³² incidentes. Une petite ouverture pratiquée sur une cavité, comme la porte d'un four, constitue une bonne approximation d'un tel objet. L'émissivité ou pouvoir d'émission e d'un corps est l'énergie électromagnétique qu'il émet par seconde et par

Que dit la thermodynamique au sujet du corps noir ? Un premier résultat, obtenu en 1859 par Kirchhoff, indique que le rapport e/a est indépendant de la nature du corps, il ne dépend que de sa température et de la fréquence de la radiation. En 1884 Boltzmann montre, en utilisant l'électrodynamique de Maxwell, que la puissance totale émise doit être proportionnelle à T^4 comme l'avait observé Josef Stefan en 1879. Un pas supplémentaire est accompli par Wilhelm Wien qui montre, en 1893, que la densité spectrale d'énergie³³ $u(v,T)$ dans la cavité vaut (A et β étant des constantes) :

$$u(v,T) = Av^3 \exp(-\beta v/T)$$

Comme la formule n'est pas vérifiée aux basses fréquences, Max Planck va reprendre la question en supposant que les parois de la cavité sont des antennes hertziennes³⁴ de fréquence v émettant des ondes dont l'énergie moyenne en fonction de v vaut $\langle E \rangle$. Il montre alors que³⁵ : $u(v,T) = 8\pi v^2 \langle E \rangle / c^3$, mais calcule $\langle E \rangle$ en identifiant la valeur de $u(v,T)$ à celle de Wien, et, partant de la définition de l'entropie $dS = d\langle E \rangle / T$, trouve :

$$dS/d\langle E \rangle = 1/T = [-1/\beta v] \cdot \ln(8\pi\langle E \rangle / Ac^3v)$$

puis, pour la dérivée seconde :

$$d^2S/d\langle E \rangle^2 = -1/\beta v \langle E \rangle.$$

Mais si, ainsi que Rayleigh et Jeans l'ont proposé : $\langle E \rangle = kT$, alors $dS/d\langle E \rangle = 1/T = k/\langle E \rangle$, et la dérivée seconde devient : $d^2S/d\langle E \rangle^2 = -k/\langle E \rangle^2$.

L'expérience montre qu'aucune des expressions obtenues par Wien ou par Rayleigh-Jeans pour $u(v,T)$ n'est correcte, mais que chacune est valable dans un cas limite (respectivement $v \rightarrow 0$ et $v \rightarrow \infty$). Planck tente alors d'introduire une formule d'interpolation :

$$d^2S/d\langle E \rangle^2 = -1/[\beta v \langle E \rangle + (\langle E \rangle^2/k)]$$

et ça marche ! En intégrant, il trouve $dS/d\langle E \rangle$, qui est aussi égal à $1/T$, ce qui permet de calculer $\langle E \rangle$ et d'introduire sa valeur dans $u(v,T) = 8\pi v^2 \langle E \rangle / c^3$. En remplaçant β par une autre constante h telle que $\beta=h/k$ pour faire apparaître kT dans l'exponentielle, il obtient :

$$u(v,T) = 8\pi h v^3 / c^3 [\exp(hv/kT) - 1]$$

C'est la loi de Planck pour la radiation du corps noir et c'est ici qu'apparaît, pour la première fois, la constante h , dite de Planck.

Tableau 3

unité de surface ; le pouvoir d'absorption a est la fraction de l'énergie incidente absorbée ($a=1$ pour le corps noir). Cette radiation est étudiée au moyen d'un spectroscope qui permet d'analyser l'énergie émise par le corps noir dans chaque bande de fréquence (tab. 3).

Planck présente ce résultat le 19 octobre 1900 au séminaire de physique de l'Université de Berlin. Le soir même les expéri-

mentateurs Rubens et Kurlbaum comparent leurs résultats à ceux prédis par la formule de Planck : l'accord est parfait. Planck semblait bien avoir trouvé la loi d'émission du corps noir ; mais peut-être n'était-ce qu'une heureuse interpolation qui s'avérait correcte. Encore fallait-il en donner une justification théorique.

La formule³⁶ $S = k \cdot \ln W$ permet de trouver l'état final d'un système en rendant maxi-

male l'entropie S . Pour calculer W par les méthodes de l'analyse combinatoire, Planck trouve utile d'admettre que l'énergie émise par chacune des antennes est un multiple entier d'une énergie ϵ . Avec cette hypothèse, Planck calcule $\langle E \rangle$ et retrouve la loi du corps noir. Pour justifier cette décomposition utile mais non fondée théoriquement, Planck imagine que ϵ peut devenir arbitrairement petit. Malheureusement pour lui, ce n'est pas le cas : la loi de Wien, valable pour les hautes fréquences, ne peut être retrouvée que si ϵ est une énergie finie proportionnelle à la fréquence, précisément selon le facteur h :

$$\epsilon = hv$$

L'émission d'ondes électromagnétiques par le corps noir se fait donc par quanta d'énergie hv : la théorie des quanta était née ; bien que Planck fût plutôt réservé sur ce résultat, Albert Einstein en tirera de nombreuses conséquences, expliquant notamment l'effet photoélectrique.

Ce phénomène, découvert en 1887 par Heinrich Hertz, consiste en l'émission d'électrons par certains métaux soumis à un rayonnement lumineux. Ces électrons n'ont pas tous la même vitesse ; le spectre des vitesses est limité par une vitesse maximale v_{\max} . On constate expérimentalement, pour une lumière monochromatique, que v_{\max} dépend de la fréquence v de cette lumière mais qu'elle est indépendante de son intensité, ce qui semblait contradictoire³⁷ avec sa nature ondulatoire.

L'explication en est donnée en 1905 par Einstein : une lumière de fréquence v est constituée de « grains de lumière » ou photons d'énergie hv , h étant la constante³⁸ de Planck. Lorsqu'il arrive dans un métal, un photon transmet en partie ou totalement son énergie à un électron qui, dans ce dernier cas, est animé de la vitesse v_{\max} . Ce qui s'écrit :

$$hv = e\phi + m(v_{\max}^2)/2$$

où e est la charge de l'électron, m sa masse et ϕ le potentiel qui lie l'électron au métal

considéré. Cette formule explique pourquoi v_{\max} ne dépend pas de l'intensité lumineuse comme Hertz l'avait trouvé. On comprend alors qu'en augmentant l'intensité de la lumière on augmente le nombre de photons du faisceau lumineux (puisque v_{\max} reste le même) et, du même coup, le nombre d'électrons émis. Cette formule montre aussi pourquoi, au-dessous d'une certaine fréquence v_0 du rayonnement, aucun électron n'est émis³⁹.

EINSTEIN ET LES RELATIVITÉS RESTREINTE ET GÉNÉRALE

Longtemps la nature profonde de la lumière divisa les physiciens. Pour Newton la lumière est faite de projectiles qui se déplacent à grande vitesse ; pour Huyghens elle est faite d'ondes qui se propagent dans un milieu hypothétique, l'éther. Dès la fin du XIX^{ème} siècle, à la suite des travaux de Maxwell, aucun doute ne subsiste : la lumière est une onde électromagnétique.

Une question, toutefois, demeure gênante : les équations de Maxwell ne s'écrivent pas de la même manière dans deux systèmes de référence en mouvement relatif uniforme l'un par rapport à l'autre, alors que c'est le cas pour la loi fondamentale de la mécanique⁴⁰. Hendrik Lorentz montre que les équations de Maxwell sont invariantes lors de la transformation :

$$x' = [x - vt]/\sqrt{[1 - (v/c)^2]}$$

et que le temps, lui aussi, doit être changé :

$$t' = [t - vx/c^2]/\sqrt{[1 - (v/c)^2]}$$

Lorentz, comme tous les physiciens, considère qu'il s'agit là d'un simple artifice mathématique. Par contre Einstein, qui à Berne est en charge des brevets relatifs à la synchronisation des horloges⁴¹, est convaincu du sens à donner à ces relations. Dans son article fondateur de 1905, « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », il propose deux postulats qui conduisent aux transformations de Lorentz :

1. La physique est la même dans tous les systèmes de référence en mouvement relatif uniforme les uns par rapport aux autres. Cela signifie que le résultat d'une expérience est le même pour un observateur lié à un de ces systèmes⁴².
2. La vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de sa source.

Les conséquences de ces deux postulats sont loin d'être intuitives : dilatation du temps, contraction des longueurs, variation de la masse avec la vitesse⁴³ et la célèbre équation $E=mc^2$. Notons ici une relation entre la quantité de mouvement $p=mv$, la masse au repos m_0 et l'énergie totale :

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

On constate que même si la masse m_0 est nulle, la quantité de mouvement ne l'est pas : $p=E/c$.

Cette théorie, dite relativité restreinte, établit des relations entre les trois dimensions spatiales et le temps ; elle est décrite de façon élégante dans un système de coordonnées à quatre dimensions (x,y,z,ict) où $i=\sqrt{-1}$ et c est la vitesse de la lumière.

Einstein ne manqua pas de se demander ce qui se passe lorsque les systèmes de référence sont en mouvement relatif accéléré. Ses réflexions le conduisirent à la relativité générale. Alors que la relativité restreinte est basée sur le fait que la vitesse de la lumière ne dépend pas de la vitesse de sa source, la relativité générale est fondée sur le postulat que la masse inerte est identique à la masse pesante. De quoi s'agit-il ?

La quantité de matière, mesurée par sa masse, se manifeste de deux manières en mécanique : par des effets d'inertie (l'accélération d'un corps soumis à une force est d'autant plus petite que sa masse est grande) et par des effets gravifiques (deux corps s'attirent mutuellement d'autant plus que le produit de leurs masses est grand et d'autant moins que le carré de la distance

qui les sépare est grand). On est ainsi amené à considérer la masse inerte m_i et la masse pesante m_G d'un corps. Expérimentalement, ces deux masses s'avèrent proportionnelles l'une à l'autre (On sait, depuis Galilée, que tous les corps tombent dans le vide avec la même accélération⁴⁴). Newton a admis que le coefficient de proportionnalité était égal à 1. Ce postulat simplificateur est souvent occulté dans les cours de physique ... pour ne pas les compliquer !

Poser que $m_i = m_G$ conduit à des conséquences révolutionnaires insoupçonnées :

- le temps des horloges sur la Terre dépend de l'altitude,
- la lumière est déviée par des masses : celle des étoiles est déviée par le Soleil,
- le mouvement des planètes est modifié : avance du périhélie de Mercure,
- la géométrie de l'espace doit être reconstruite : la géométrie adéquate est celle de Riemann et non plus celle d'Euclide,
- les ondes gravitationnelles,
- les trous noirs,
- le décalage gravitationnel de la fréquence de la lumière vers le rouge.

Les équations (non formulées ici) de la relativité générale expriment l'effet des masses sur la courbure de l'espace de Riemann. Leur résolution dans un cas particulier⁴⁵ par le physicien russe Aleksandr Friedmann, en 1922, montre que l'univers est nécessairement en expansion. Or, en 1929, Edwin Hubble découvre la fuite des nébuleuses : l'univers est bien en expansion. Depuis quand ? C'est la physique nucléaire qui répondra à cette question.

LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE : BOHR, DE BROGLIE, SCHRÖDINGER ET LES AUTRES

En 1885 le physicien bâlois Johann Jakob Balmer montre que les fréquences v des raies spectrales de l'hydrogène, mesurées par Angström, obéissent à une loi simple⁴⁶ :

$$v = R \cdot [(1/n_1^2) - (1/n_2^2)]$$

où n_1 et n_2 sont des entiers positifs ($n_1 < n_2$) et R est la constante de Rydberg⁴⁷.

A cette époque on se représente l'atome d'hydrogène, en analogie avec le système planétaire, par un électron tournant autour du proton sous l'effet d'une force électrique. Mais cette image est fausse : un électron qui tourne sur son orbite est accéléré ; selon les équations de Maxwell, il émet une onde électromagnétique et, en conséquence, il perd peu à peu de l'énergie et finit par tomber sur le noyau. Niels Bohr imagine alors, en 1913, qu'il existe des orbites électroniques stables, d'énergies données E_n , et que la radiation électromagnétique émise lorsque l'électron passe d'une orbite à l'autre est un photon d'énergie $h\nu = E_1 - E_2$, par exemple. C'est peu dire que les propositions de Bohr se heurtent à quantité d'objections...

Un pas suivant est accompli par Louis de Broglie qui, dans sa thèse en 1924, associe à l'électron une onde (de longueur d'onde λ) reliée à sa quantité de mouvement $p=mv$ par $\lambda=c/p$. Il pose alors qu'une trajectoire (circulaire de rayon r pour simplifier) est stable si :

$$2\pi r = n\lambda$$

où n est un nombre entier⁴⁸. Il peut alors calculer les rayons r_n des trajectoires stables et trouve :

$$r_n = r_1 \cdot n^2 \quad \text{avec } r_1 = 5,29 \cdot 10^{-9} \text{ mètre}$$

Erwin Schrödinger, alors à l'Université de Zurich, cherche à inscrire les idées de Louis de Broglie dans une véritable théorie ondulatoire. En 1926, il publie sa célèbre équation pour une « fonction d'onde⁴⁹ » $\Psi(x,y,z)$ associée à une particule de masse m dans un potentiel $U(x,y,z)$:

$$\partial^2\Psi/\partial x^2 + \partial^2\Psi/\partial y^2 + \partial^2\Psi/\partial z^2$$

$$= - (8\pi^2 m/h^2) [E - U(x,y,z)] \cdot \Psi(x,y,z)$$

où h est la constante de Planck et E l'énergie de la particule. Les valeurs des fonctions solutions de l'équation de Schrödinger ne sont finies⁵⁰ que pour certaines valeurs par-

ticulières de E , appelées valeurs propres.

Pour l'atome d'hydrogène, le potentiel U est le potentiel électrique $(-e^2/4\pi\epsilon_0) \cdot (1/r)$ où $r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$ est la distance de l'électron au proton constituant le noyau. La résolution conduit à des valeurs propres E_n identiques aux niveaux prédis par Bohr ainsi qu'à de nouveaux nombres quantiques qui ont permis de comprendre la constitution des atomes et la classification des éléments par Mendeleïev.

L'interprétation de la fonction d'onde $\Psi(x,y,z)$ couramment admise est due à Niels Bohr : Ψ , que rien n'empêche d'être une fonction complexe⁵¹, n'a pas de signification particulière, mais

$\Psi(x,y,z) \cdot \Psi^*(x,y,z) = |\Psi(x,y,z)|^2$ s'avère être la densité de probabilité de trouver la particule en $(x;y;z)$. L'intégrale triple de cette densité doit donc être égale à 1.

Ce caractère probabiliste de la physique est paradoxal. En effet imaginons le cas simple d'une particule décrite par une fonction uniquement de x , $\Psi(x)$, sinusoïdale par exemple. La particule a une longueur d'onde associée λ bien définie et, en vertu de la relation due à de Broglie, $\lambda=c/p$, une quantité de mouvement $p=mv$ bien définie. Mais la particule peut se trouver partout sur l'axe Ox avec une probabilité nulle! Ainsi, si la quantité de mouvement (et donc la vitesse) est bien connue, la position ne l'est pas. D'une manière générale, la position x d'une particule est entachée d'une indétermination Δx et la quantité de mouvement d'une indétermination Δp_x . Werner Heisenberg a montré que :

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi, \text{ ainsi que } \Delta y \cdot \Delta p_y \geq h/4\pi \text{ et } \Delta z \cdot \Delta p_z \geq h/4\pi \text{ et } \Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi,$$

Ce sont les fameuses relations d'incertitude de la mécanique quantique.

Schrödinger avait en vain cherché à élaborer une théorie ondulatoire relativiste⁵², mais ses résultats ne « collaient » pas avec l'expérience. C'est Paul Adrien Maurice Dirac qui, en 1929, a résolu la question en propo-

sant, pour l'électron, une équation compatible avec les principes de la mécanique quantique et ceux de la relativité restreinte. Non seulement la théorie de Dirac prédit l'existence de l'antimatière⁵³, mais elle montre que le spin⁵⁴ de l'électron apparaît naturellement dans une théorie relativiste.

En relation avec le spin, mentionnons sans explication complémentaire, qu'il existe deux catégories de particules : celles ayant un spin nul ou entier (photon, méson π , ...) qui sont appelées bosons⁵⁵ et celles ayant un spin demi-entier (électron, proton, neutron, neutrino, méson K, ...), appelées fermions⁵⁶. Pauli a montré que deux fermions en interaction ne pouvaient avoir des nombres quantiques tous identiques. Ce *principe d'exclusion* explique, en particulier, la constitution des atomes.

VERS UNE THÉORIE UNIQUE DES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Nous n'avons, jusqu'ici, mentionné que deux théories fondamentales concernant les forces entre particules : la loi de la gravitation universelle et les équations de Maxwell de l'électrodynamique. La découverte de la radioactivité⁵⁷ et l'avènement de la physique nucléaire, dès la fin du XIX^e siècle, impliquent l'existence de deux nouvelles forces : l'interaction forte, qui explique la stabilité des noyaux des atomes, et l'interaction faible, qui rend compte de l'instabilité β de ceux-ci.

Pour expliquer l'interaction forte, incompréhensible dans le cadre de la physique d'alors, des physiciens comme Murray Gell-Mann introduisent dès 1960 l'idée que les hadrons⁵⁸ seraient constitués d'hypothétiques quarks. Ils proposent deux quarks, notés u et d , et leurs antiquarks \bar{u} et \bar{d} : le proton serait un état uud , le neutron un état udd , l'antiproton serait $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, l'antineutron $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$; les mésons π qui sont produits dans les collisions proton-proton, proton-neutron et neutron-neutron, et qui sont tous instables, seraient des combinaisons : $u\bar{d}$ pour π^+ , $\bar{u}d$

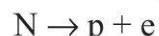
pour π^- et $(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$ pour π^0 . Pour rendre compte des propriétés électriques des protons et des neutrons, ces quarks devraient avoir des charges fractionnaires⁵⁹ : $2e/3$ pour le quark u et $-e/3$ pour le quark d .

Fondamentalement, l'interaction forte agit entre les quarks. Contrairement aux forces électriques qui diminuent lorsque la distance entre charges augmente, cette force ne dépend pas de la distance entre les quarks et vaut approximativement 60 tonnes, ce qui explique pourquoi on n'observe pas de quark libre.

D'autres particules, comme les mésons K découverts initialement dans le rayonnement cosmique, sont étudiées systématiquement dès la mise en route des grands accélérateurs de particules aux USA et au CERN. Leurs propriétés nouvelles et bizarres conduisent les physiciens à introduire un quark s , dit *étrange*⁶⁰, puis une quark c , qualifié de *charme*⁶¹, et plus tard par des quarks t et u . Mais cela ne suffit pas, il faut encore introduire trois types de gluons⁶², particules qui jouent, par rapport aux quarks, un rôle analogue à celui des photons par rapport aux charges électriques.

L'interaction faible, dès sa découverte, pose un problème important : la loi de la conservation de l'énergie semble être violée, l'énergie des particules produites lors de la désintégration β étant insuffisante. Alors que Niels Bohr peut s'en accommoder, Wolfgang Pauli, dès 1930, postule l'émission non détectée d'une particule neutre de masse nulle. La découverte du neutron par James Chadwick en 1932 ne résout pourtant pas la question⁶³, mais la désintégration du neutron permet de préciser le problème.

Les neutrons, qui servent de « ciment » entre les protons du noyau atomique, sont instables lorsqu'ils sont libres, c'est-à-dire non liés à des noyaux. Chadwick a trouvé que les neutrons N se désintègrent⁶⁴ en protons p et électrons e et que les électrons émis n'ont pas tous la même énergie. Si vraiment le neutron se désintégrait en deux particules :



| Type d'interaction | Intensité relative | Portée (en mètre) | Particules |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------|
| Nucléaire forte ⁶⁸ | 1 | $\approx 10^{-15}$ | quarks, gluons |
| Electromagnétique | $\approx 10^{-2}$ | ∞ (loi en $1/r^2$) | charges électriques, photons |
| Nucléaire faible | $\approx 10^{-14}$ | $\approx 10^{-18}$ | leptons, hadrons |
| Gravitation | $\approx 10^{-38}$ | ∞ (loi en $1/r^2$) | toutes |

Tableau 4

les quantités de mouvement du proton et de l'électron seraient égales et opposées, et les électrons auraient tous la même énergie, contrairement aux résultats expérimentaux. Autre paradoxe pour Pauli, le spin du neutron étant $\frac{1}{2}$, comme celui du proton et de l'électron, la combinaison de ces deux spins ne peut être que 0 (soit $\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$) ou 1 (soit $\frac{1}{2}+\frac{1}{2}$) alors que le spin du neutron est aussi $\frac{1}{2}$. La particule de masse nulle⁶⁵ et de spin $\frac{1}{2}$ ainsi prédite par Pauli, le neutrino, sera identifiée en 1956 par Reiner et Cowan dans un réacteur nucléaire.

Le mode de désintégration du neutron est donc :

$$N \rightarrow p + e + \nu_e$$

où l'indice e signifie que le neutrino est émis en association avec un électron⁶⁶. Il faut bien préciser que le neutron n'est pas constitué d'un proton, d'un électron et d'un neutrino (contrairement à l'atome d'hydrogène, lui, composé d'un proton et d'un électron) mais que le neutron est « transmuté » en proton⁶⁷ et que l'électron et le neutrino sont alors créés. Ces particules créées lors de l'interaction faible sont appelées leptons.

La physique semble ainsi fondée sur quatre interactions fondamentales : la gravitation dont l'explication initiale due à Newton a été revue et complétée par Einstein, les forces électromagnétiques décryptées par Maxwell puis généralisées dans l'électrodynamique quantique, l'interaction nucléaire forte formalisée dans la chromodynamique quantique et, finalement, l'interaction nucléaire faible dont Enrico Fermi a proposé la théorie. Ces quatre interactions ont des intensités et des portées très différentes (tab. 4).

Poussés par leur curiosité, Weinberg et Salam proposent, en 1967-1968, la « théorie électrofaible », une généralisation de la théorie de Fermi et de l'électrodynamique quantique, qui prédit l'existence de nouvelles particules : les bosons⁶⁹ W^+ , W^- et Z^0 qui jouent, par rapport à l'électron et au neutrino, un rôle analogue à celui du photon par rapport aux charges électriques.

En ce début du XXI^{ème} siècle, une théorie, dite « modèle standard », regroupe les interactions fortes et électrofaibles selon le schéma du tableau 5 :

La gravitation, qui n'est pas une théorie quantique, n'en fait pas partie. Une voie qui permet d'entrevoir une théorie plus générale⁷¹ décrivant toutes les interactions fondamentales est celle de la théorie des cordes, dont il existe plusieurs versions. Au lieu d'idéaliser une particule fondamentale comme un point, on imagine une corde, c'est-à-dire un objet à une dimension⁷², susceptible de vibrer, donc d'avoir une certaine énergie et ainsi une masse selon la relation $E=mc^2$. Pour rendre compte, à la fois, du modèle standard et de la relativité générale, il faut envisager un espace à plusieurs dimensions pour décrire ces cordes. Une de ces théories nécessite un espace à dix dimensions dont six seraient « effondrées », c'est-à-dire inférieures à 10^{-33} cm, et par là non observables, laissant à nos instruments de mesure les trois dimensions de l'espace et le temps.

Prochain rendez-vous en 2010 au CERN pour savoir si le boson de Higgs existe réellement !

Particules de base du modèle standard

fermions de spin $\frac{1}{2}$:

trois générations de leptons (e^- , ν_e), (μ^- , ν_μ) et (τ^- , ν_τ),
trois générations de quarks (d , u), (s , c) et (b , t),
ainsi que leurs antiparticules.

bosons de spin 1 :

un boson électrofaible de masse nulle, le photon γ ,
trois bosons électrofaibles massifs, W^+ , W^- et Z^0 ,
huit gluons colorés.

boson de spin 0 de Higgs⁷⁰.

Tableau 5

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

SEGRÈ, E. 1984. From Falling Bodies to Radio Waves. *Freeman and Co, N.Y.*

SEGRÈ, E. 1980. From X-Rays to Quarks". *Freeman and Co, N.Y.*

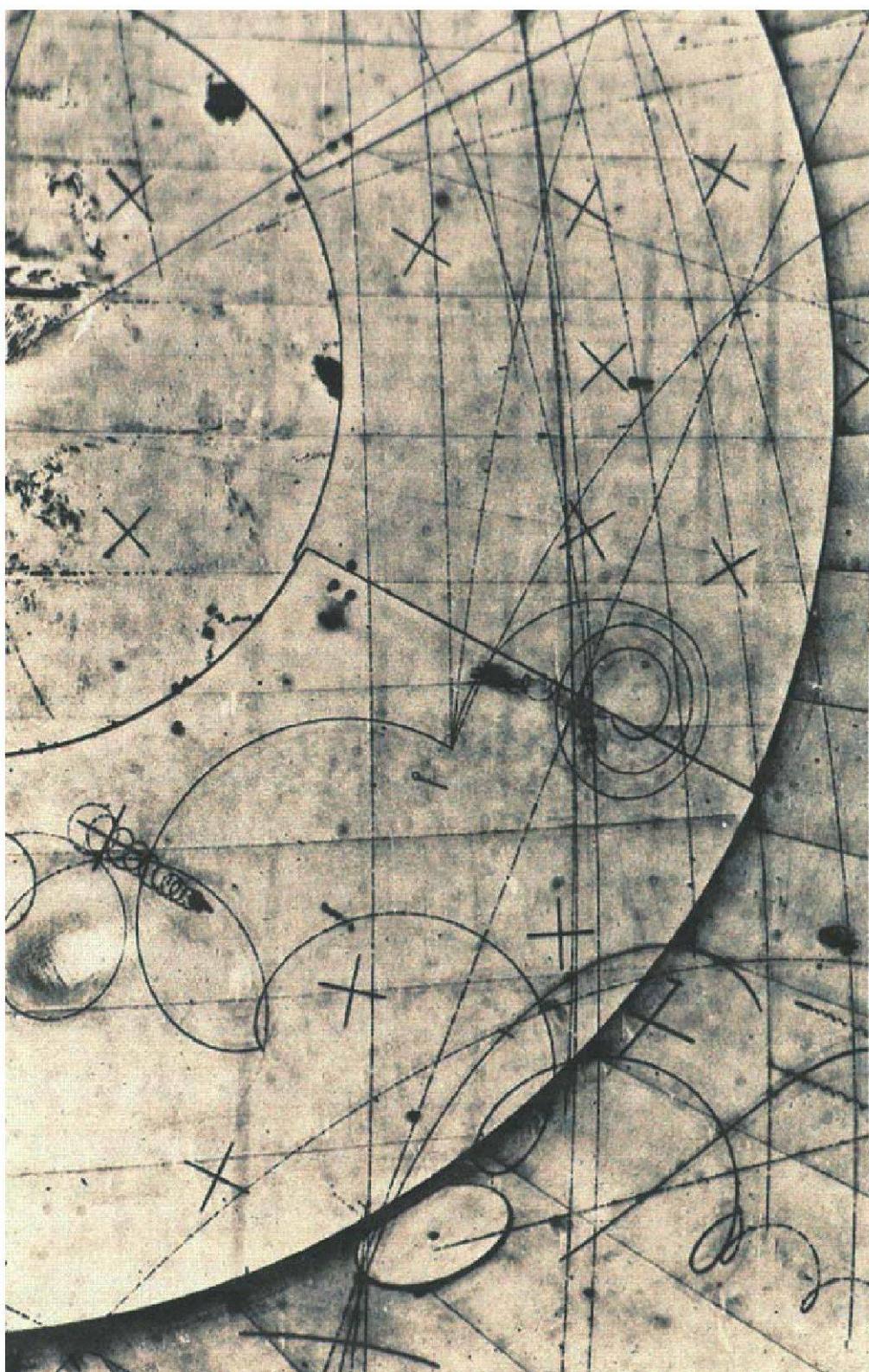
WILLIAMS, W.S.C. 1991. Nuclear and Particle Physics. *Clarendon Press, Oxford.*

KLEIN, E. 2005. Il était sept fois la révolution. *Flammarion.*

BAIS, S. 2007. Les équations fondamentales de la physique. *DésIris.*

NOTES DE FIN

- 1 dont la vitesse vaut 299'787,53 km/seconde;
- 2 qui deviendra « La Recherche »;
- 3 dont la quasi-totalité sont instables ; même le proton pourrait se désintégrer selon le mode : $p \rightarrow \pi^0 + e^+$; la mesure est difficile, on pense que la vie moyenne du proton est supérieure à 10^{30} années;
- 4 qui montre que les forces entre deux charges électriques varient proportionnellement à l'inverse du carré de leur distance, comme pour la loi de l'attraction entre deux masses;
- 5 son ouvrage s'intitule « Sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience »;
- 6 nous n'évoquerons pas ici l'électrolyse découverte par Faraday;
- 7 la notion de champ, due à Maxwell, n'avait pas encore vu le jour;
- 8 si Maxwell est considéré comme le fondateur de l'électrodynamique moderne, il est aussi un des créateurs de la thermodynamique et de la mécanique statistique;



Tiré de <http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/others/PHO/photo-ex/68681.jpeg>
CERN Document Server.

9 les grandeurs vectorielles sont notées ici en caractère gras;
10 vitesse calculée à partir des expériences de Kohlrausch et Weber;
11 vitesse mesurée par Fizeau;
12 ϵ_0 et μ_0 sont des constantes qui caractérisaient les propriétés de l'éther;
13 il montra que deux morceaux de glace frottés l'un contre l'autre fondaient bien que la chaleur spécifique de la glace fût
inférieure à celle de l'eau;
14 inventeur des séries de sinus et cosinus qui portent son nom;
15 voir plus loin, page 114;
16 Robert Boyle en 1662, Edme Mariotte en 1679, Alessandro Volta en 1791 et Joseph Gay-Lussac en 1802;
17 alias Lord Kelvin;
18 historiquement on appelait vapeur l'état gazeux d'une substance dont on connaissait l'état liquide;
19 ou la composante v_x , par exemple, de la vitesse v dans le cas général;
20 la description continue $d(mv)/dt$ est approchée par une description discontinue notée par $\Delta(mv)/\Delta t$;
21 on fait appel ici à une hypothèse fondamentale dite « ergodique » : on peut remplacer la moyenne des vitesses de toutes
les molécules à un instant par la vitesse moyenne d'une molécule au cours du temps, notée $\langle v \rangle$;
22 les lois de la mécaniques sont invariantes par rapport à une inversion du temps (changement de t en $-t$ dans les formules);
23 historiquement, c'est l'impossibilité du mouvement perpétuel de première espèce;
24 $U = U(V,T)$ s'exprime en fonction du volume et de la température;
25 on distingue dU , différentielle d'une fonction $U(V,T)$, de δQ , quantité échangée indépendamment du volume et de la
température;
26 c'est l'impossibilité du mouvement perpétuel de deuxième espèce;
27 dans l'exemple de l'écoulement d'un gaz par un orifice, les vitesses des molécules ont un certain ordre (elles sont à peu
près parallèles près de l'orifice), ordre qui disparaît loin de l'orifice;
28 W est appelé « probabilité thermodynamique » bien qu'il soit supérieur à l'unité. En divisant W par le nombre total de
configurations microscopiques possibles on obtient une probabilité au sens mathématique du terme;
29 \ln désigne le logarithme népérien;
30 C est une constante qui dépend du nombre total de molécules;
31 vitesse la plus probable;
32 en particulier la lumière;
33 plus accessible au calcul, $u(v,T)$ est proportionnelle à l'émissivité : $u(v,T) = 4\pi e(v,T)/c$
34 pour lesquelles le rapport émissivité/absorption est indépendant de la nature du corps;
35 comme Rayleigh et Jeans l'ont proposé dans un calcul classique où $\langle E \rangle = kT$;
36 voir plus loin
37 l'onde électromagnétique agit sur les électrons en exerçant sur chacun d'eux une force eE ; ils subissent donc une
accélération eE/m d'autant plus grande que E est grand, donc que l'intensité de la lumière est grande;
38 $h = 6,623 \cdot 10^{-34}$ Joule·seconde
39 pour $hv_0 = e\phi$, $v_{max} = 0$;
40 $d^2x/dt^2 = F/m$ sur l'axe Ox devient $d^2x'/dt^2 = F/m$ sur un repère $O'x'$ qui se déplace à la vitesse v sur Ox ; $x' = x - vt$ est la
transformation de Galilée;
41 synchronisation rendue nécessaire par le trafic ferroviaire. A Genève, à la fin du XIX^{ème} siècle, il y avait trois horloges à la
Tour de l'Ile : celle du centre donnait l'heure de Genève, celle de gauche indiquait l'heure de l'horaire de la ligne de
chemin de fer Paris-Lyon-Marseille et celle de droite affichait l'heure de Berne;
42 ici, Einstein reprend un principe de relativité déjà présent chez Newton et dû initialement à Galilée;
43 $m = m_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$ où m_0 est la masse au repos;
44 la loi du mouvement d'un corps de masse inerte m_i et de masse pesante m_G tombant dans le vide à la surface de la Terre
s'écrit, a étant l'accélération de ce corps : $m_i a = \gamma m_G M/R^2$ où γ est la constante de la gravitation universelle, M la masse
de la Terre et R son rayon; pour un autre corps, de masses m_i' et m_G' , l'accélération a' sera donnée par : $m_i' a' = \gamma m_G' M/R^2$
comme $a = a'$ on en déduit que $m_i'/m_G' = m_i/m_G = \text{constante}$;
45 en posant qu'une grandeur (la constante cosmologique Λ) introduite par Einstein, pour décrire un univers statique, était
nulle; Einstein regrettera toujours d'avoir introduit cette constante cosmologique; s'il vivait encore, il serait heureux de
voir les cosmologistes du début du XXI^{ème} siècle réintroduire quelque chose qui ressemble à Λ pour rendre compte de la
« matière noire »;
46 la loi de Balmer concerne en fait les longueurs d'onde $\lambda = c/v$;
47 $R = 109737,3 \text{ cm}^{-1}$;
48 appelé désormais nombre quantique principal;
49 dont la signification est précisée plus loin;
50 celles pour lesquelles $\iiint |\Psi(x,y,z)|^2 dx dy dz$, intégrée sur tout l'espace, est finie;
51 par exemple $\Psi = A + iB$ où A et B sont des fonctions réelles;

52 l'équation de Schrödinger présentée ici est dite « stationnaire »; Schrödinger en a proposé une autre également non
53 relativiste, dite « dépendante du temps », pour la fonction $\Psi(x,y,z,t)$;
54 Carl David Anderson découvre le positron, de masse égale à celle de l'électron et de charge identique mais positive, dans
le rayonnement cosmique en 1932;
55 considérer une particule élémentaire comme un point n'est pas suffisant, il faut lui adjoindre un moment cinétique $s \cdot h/2\pi$
où $h/2\pi$ est une unité « naturelle » de moment cinétique et s est le spin; pour l'électron $s=1/2$;
56 Bose et Einstein ont décrit le comportement statistique d'un ensemble de bosons en interaction;
Fermi et Dirac ont décrit le comportement statistique d'un ensemble de fermions en interaction;
57 il existe trois types de radioactivité : α ou émission d'un noyau d'hélium, β ou émission d'un électron et γ ou émission de
photons par le noyau atomique;
58 on appelle hadrons les particules soumises à l'interaction forte : les protons, neutrons, mésons et leurs antiparticules;
59 $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb étant la charge élémentaire, $+e$ pour le proton, $-e$ pour l'électron;
strangeness en anglais;
60 allusion au film « Le charme discret de la bourgeoisie » ?, la propriété nouvelle étant en quelque sorte cachée dans une
combinaison quark-antiquark;
61 caractérisés par une « couleur » qui n'a rien à voir avec la peinture, sinon qu'il existe trois couleurs fondamentales ; la
théorie s'appelle chromodynamique quantique;
62 sa masse est trop élevée;
63 la vie moyenne du neutron est de 889 secondes;
64 pour la physique actuelle, il s'agit du neutrino ν_e , de masse non nulle mais expérimentalement 100'000 fois inférieure à la
masse de l'électron $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg;
65 on sait maintenant qu'il existe trois sortes de neutrinos, ν_e mais aussi ν_μ et ν_τ qui sont émis, eux, avec un muon μ ou,
respectivement, un tauon τ ;
66 un hadron est transformé en un autre hadron;
67 il s'agit ici de l'interaction entre hadrons qui résulte, de manière compliquée, des forces entre quarks;
68 découvertes en 1983 au CERN dans des collisions proton-antiproton; les W^\pm sont 83 fois plus lourds que le proton, et le
 Z^0 95 fois;
69 particule hypothétique impatiemment attendue au LHC du CERN;
certains l'appellent « théorie du tout »;
70 ces cordes seraient très petites, leur longueur serait de l'ordre de 10^{-33} cm, ce qui les rendrait indétectables.
71