

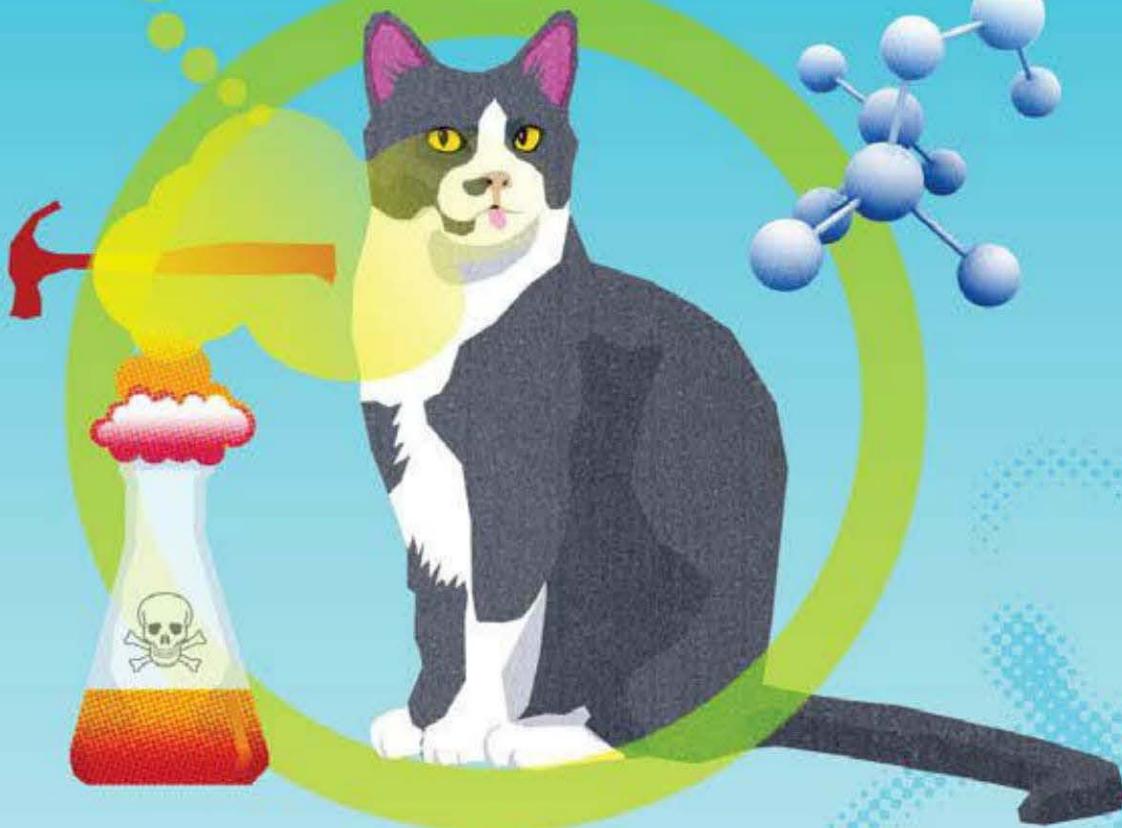
→ Aperçu

edp sciences

LA THÉORIE QUANTIQUE

EN IMAGES

Copyright © 2014 EDP Sciences.



J. P. McEVoy & OSCAR ZARATE

La théorie quantique nous révèle d'étranges paradoxes, en contradiction apparemment avec les lois et la logique de la physique classique. Au niveau sous-atomique, chaque particule semble savoir ce que font les autres et, selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, il y aurait même une limitation de la précision avec laquelle nous pouvons mesurer les phénomènes naturels.

Et pourtant, la théorie est étonnamment précise en soi et connaît de larges applications, expliquant toute la chimie et l'essentiel de la physique. Ce guide de la physique quantique nous invite à faire un large tour d'horizon, étape par étape, à la rencontre de personnalités telles que Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg et Schrödinger. Chacun a apporté au moins un concept à l'édifice théorique.

On y trouvera le mystère de la dualité onde/particule et des détails sur deux questions qui s'opposaient à l'« interprétation de Copenhague » – à savoir le dilemme du chat vivant ou mort soulevé par Schrödinger et le paradoxe dit EPR (des initiales des auteurs, Einstein, Podolsky et Rosen).

Ces deux questions n'ont pas trouvé de réponse aujourd'hui.

Dans la même collection:

Le temps, C. Callender, R. Edney

La physique des particules, T. Whyntie, O. Pugh

La psychologie, N. Benson

Édition originale: Quantum Theory, © Icon Books Lts, London, 2013.

Traduction: Alan Rodney

Imprimé en France par Présence Graphique, 37260 Monts

Mise en page de l'édition française : studiowakeup.com

ISBN: 978-2-7598-1229-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinés à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

La théorie quantique, c'est quoi au juste ?

La théorie quantique constitue l'un des ensembles d'idées les plus réussies jamais conçues par l'être humain. Elle explique la table périodique des éléments et les réactions chimiques. Elle fournit des prédictions précises sur le fonctionnement de lasers et des micropuces électroniques, la stabilité de l'ADN et comment les particules alpha quittent le noyau atomique par un effet dit de «tunnel».



La présentation qu'en a faite Niels Bohr en 1927 reste la version orthodoxe aujourd'hui. Mais les expérimentations impliquant la pensée qu'avait imaginées Einstein dans les années 1930 soulèvent encore bien des débats, tant elles mettent en doute la validité fondamentale de la théorie. Est-ce que Einstein avait raison, une fois de plus ? Ou manquait-il quelque chose dans son raisonnement ? Alors, pour y voir clair, commençons par le commencement...

À la découverte de la théorie quantique...



Voici en quoi consiste le problème. Juste avant le début du xx^e siècle, les physiciens étaient si convaincus de la justesse de leurs idées relatives à la nature de la matière et du rayonnement que tout nouveau concept en contradiction avec **leur vision classique** était aussitôt réfuté, balayé.

Non seulement le formalisme mathématique d'**Isaac Newton** (1642–1727) et celui de **James Clerk Maxwell** (1831–1879) étaient jugés impeccables, mais les prévisions basées sur leurs théories avaient été confirmées par des expérimentations très détaillées au fil des années. L'âge de raison était devenu celui de la certitude !

Les physiciens dits classiques

Quelle définition donne-t-on à «classique»?

Le qualificatif «**classique**» sert à désigner les physiciens de la fin du xix^e siècle qui avaient été élevés à la «nourriture académique», combinant la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell – les deux synthèses les mieux réussies des phénomènes physiques que le monde ait jamais conçues.



Le fait de tester des théories par des observations sur le terrain a toujours été le signe, la marque de confiance de la «bonne physique» depuis **Galilée** (1563–1642). Celui-là a enseigné comment prendre des mesures et comparer les résultats obtenus avec les prévisions des lois mathématiques.

L'interaction théorie/expérimentation constitue toujours la meilleure manière de procéder dans un monde de sciences aux résultats jugés «acceptables».

Tout est validé (et classique) ...

Depuis les XVIII^e et XIX^e siècles, les lois du mouvement (dynamique) de Newton ont été revisitées de fond en comble et vérifiées par des tests fiables.



«... à la sixième place après la virgule»

Un physicien de l'université de Glasgow, **Lord Kelvin** (1824–1907), professeur d'influence, a jeté deux ombres sur l'horizon newtonien.



En juin 1894, le prix Nobel américain **Albert Michelson** (1852–1931) pensait paraphraser Kelvin dans une remarque qu'il allait regretter le restant de sa vie.



Les hypothèses fondamentales de la physique classique

Les physiciens avaient bâti un ensemble d'hypothèses pour les aider à focaliser leurs réflexions et recherches en un corpus qui rendait difficilement acceptable l'arrivée de nouvelles idées. Voici la liste de **ce dont ils étaient convaincus**, relatif au monde matériel...

- 1) *L'Univers est comme une machine géante dans un cadre de temps et d'espace absolu. Un mouvement complexe peut être interprété comme un mouvement simple de rouages à l'intérieur de cette machine, même si ces rouages ne peuvent être visualisés.*
- 2) *La synthèse newtonienne implique que tout mouvement nécessite une cause. Si un corps s'avère être en mouvement, on peut toujours identifier ce qui produirait le mouvement observé. C'était une simple affaire de cause et d'effet et personne ne contestait l'analyse.*
- 3) *Si l'état du mouvement peut être connu à un moment dans le temps – disons le présent –, il peut aussi être calculé pour tout autre moment dans le passé ou dans le futur. Rien n'est indéterminé, mais simplement la conséquence d'une cause antérieure. Le déterminisme était né.*

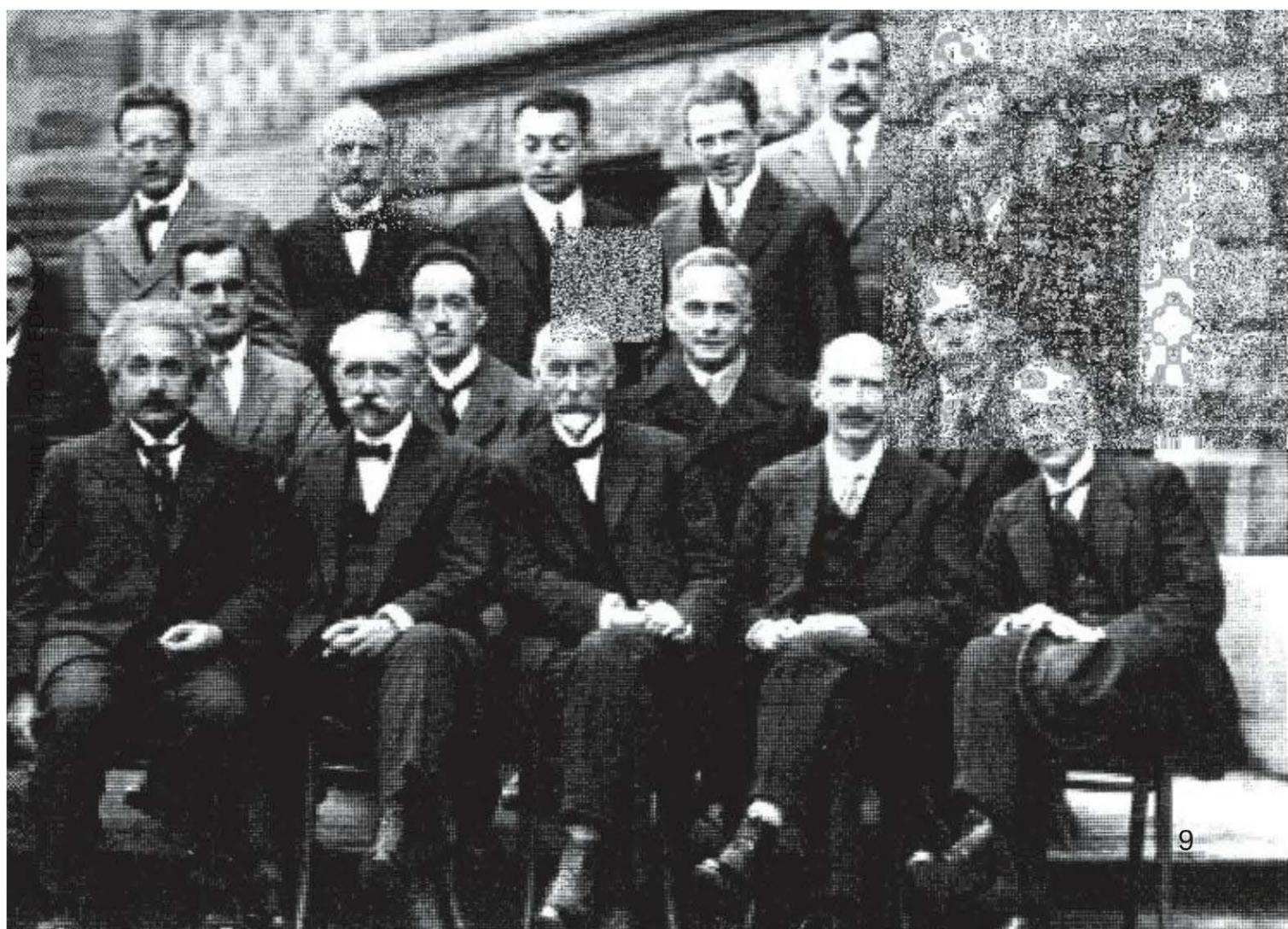


4) Les propriétés de la lumière sont **complètement décrites** dans la théorie des **ondes** électromagnétiques de Maxwell et avaient été observées par les réseaux d'interférence constatés lors d'une simple expérience de double fente, en 1802, qui porte le nom du découvreur Thomas Young.

5) Il existe deux modèles physiques pour représenter l'énergie en mouvement: l'un est représenté par **une particule**, sphère impénétrable comme une bille de billard, l'autre par **une onde** qui, telle une vague, se propage vers les plages à la surface de l'océan. Ces deux modèles, exclusifs l'un de l'autre, impliquent que l'énergie doit être considérée comme constituée soit d'ondes, soit de particules.

6) Il est possible de mesurer les propriétés d'un système, comme la température ou la vitesse, avec toute la précision souhaitée. Il suffit de réduire l'intensité du sondage de l'observateur ou de le corriger avec un ajustement dicté par la théorie. On croyait alors que les systèmes atomiques n'échapperaient pas à la règle.

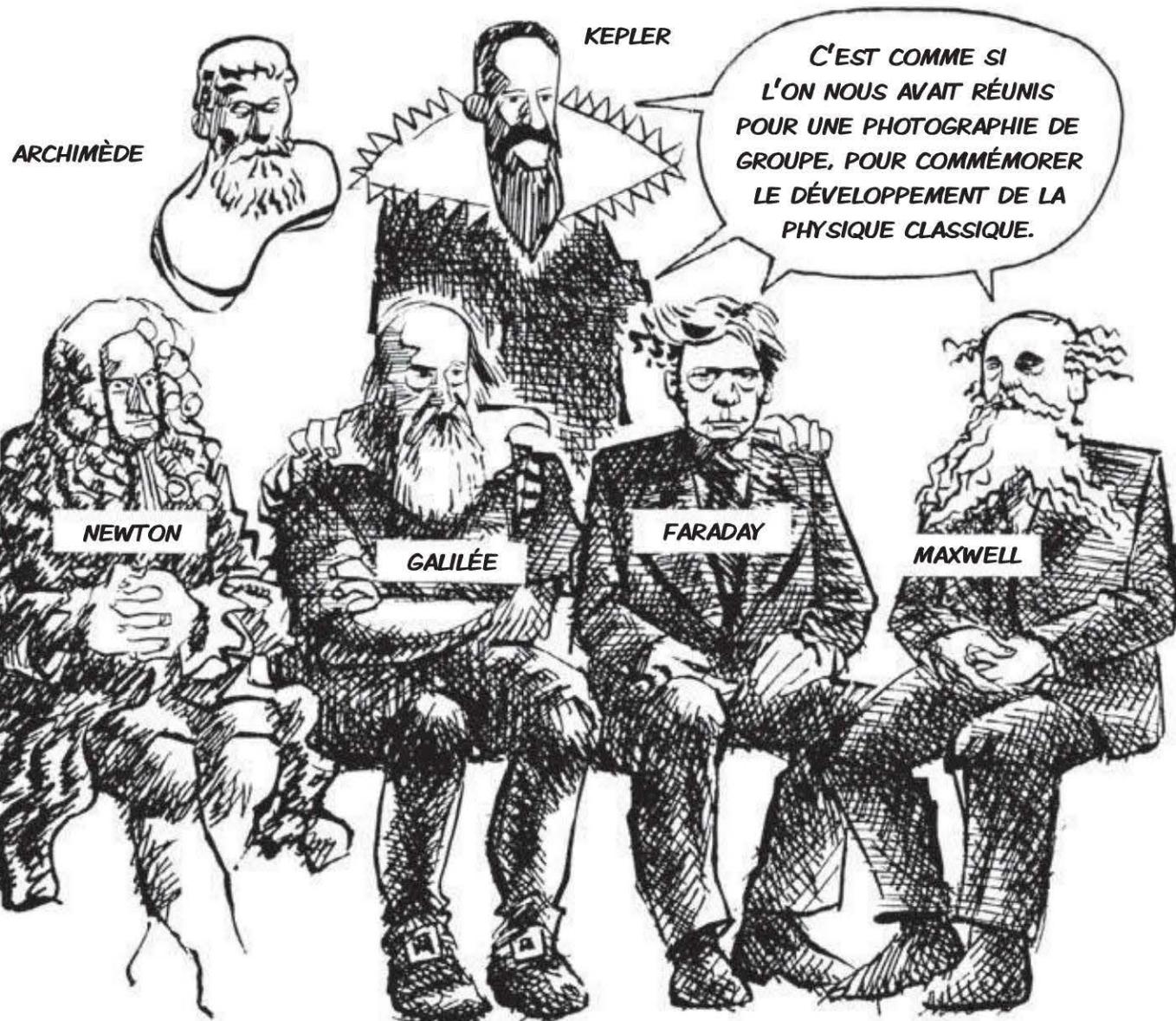
Les physiciens classiques pensaient que ces six affirmations étaient **absolument vraies**. Il se trouve que **toutes** ont finalement été **mises en doute**. Et les premiers à le faire étaient membres d'un groupe qui s'est réuni, le 24 octobre 1927, à l'Hôtel Métropole à Bruxelles.



La conférence de Solvay de 1927 – la formulation de la théorie quantique

Quelques années avant le déclenchement de la Première Guerre mondiale, un industriel belge, **Ernest Solvay** (1836–1922), a sponsorisé la première d'une série de rencontres de physique à Bruxelles. Les participants, limités à 30 environ sur invitation personnelle, devaient traiter en priorité d'un sujet établi et approuvé à l'avance.

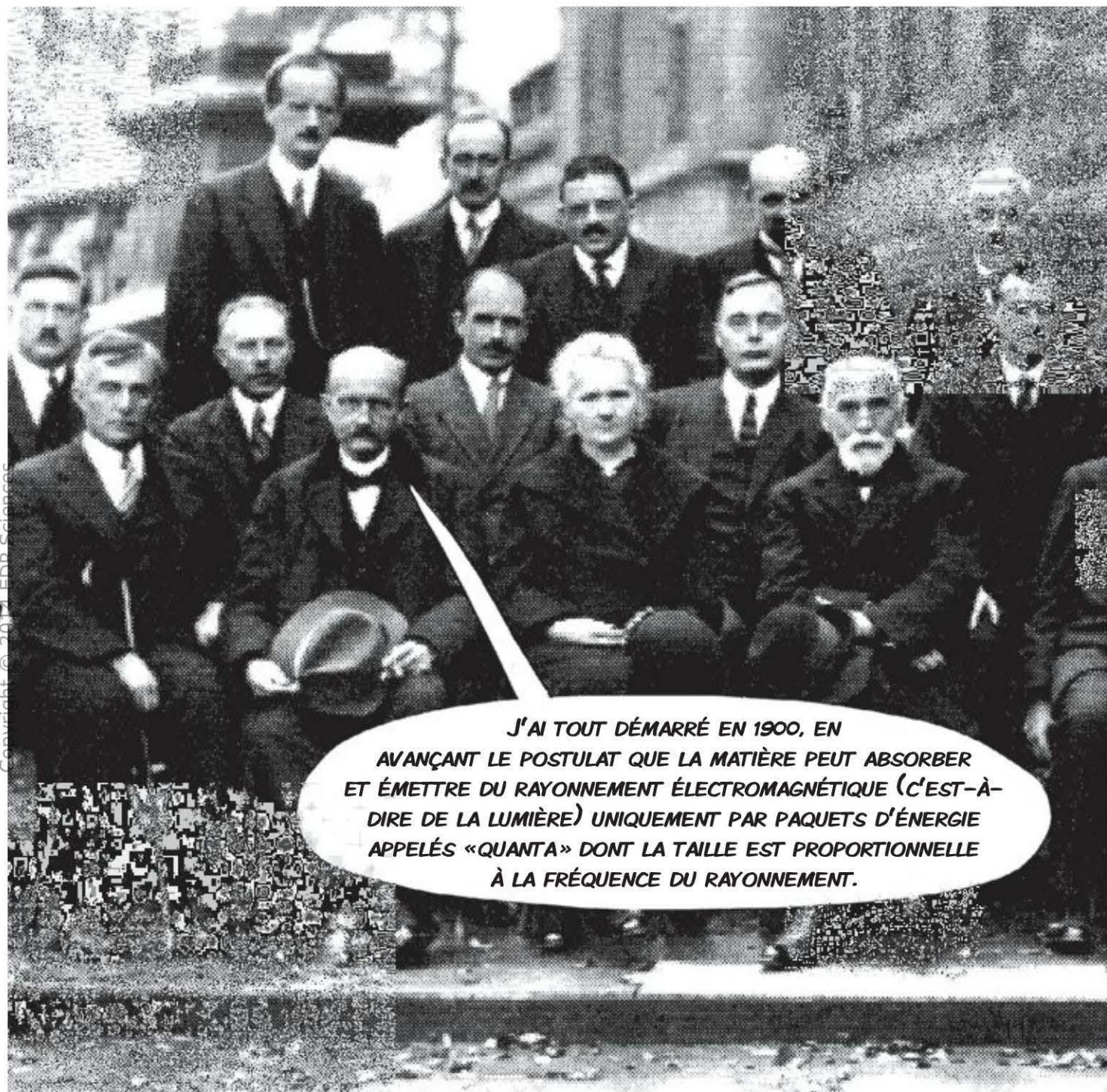
Les cinq premières rencontres se sont tenues entre 1911 et 1927, et le récit qui en a été fait témoigne, de façon remarquable, des développements de la physique au début du xx^e siècle. La conférence de 1927 était centrée sur la physique quantique et a réuni pas moins de **neuf** physiciens théoriques qui avaient tous réalisé des apports majeurs en termes de théorie. Chacun a d'ailleurs reçu un prix Nobel pour sa contribution personnelle.



La photographie du groupe de la conférence de Solvay de 1927 constitue un excellent point de départ pour présenter les principaux acteurs du développement de la théorie la plus «moderne» de la physique. Les générations à venir vont s'émerveiller devant l'échelle de temps réduite et la proximité géographique qui a réuni en 1927 ces géants de la physique quantique.

On ne connaît guère de période dans l'histoire des sciences qui a vu autant de clarifications apportées par si peu d'hommes en si peu de temps.

Contemplez **Max Planck** (1858–1947), au regard si triste, assis au premier rang à côté de **Marie Curie** (1867–1934). Chapeau et cigare en main, Planck semble avoir perdu sa vitalité, épuisé après tant d'années et de tentatives pour réfuter sa propre vision révolutionnaire sur la matière et le rayonnement.

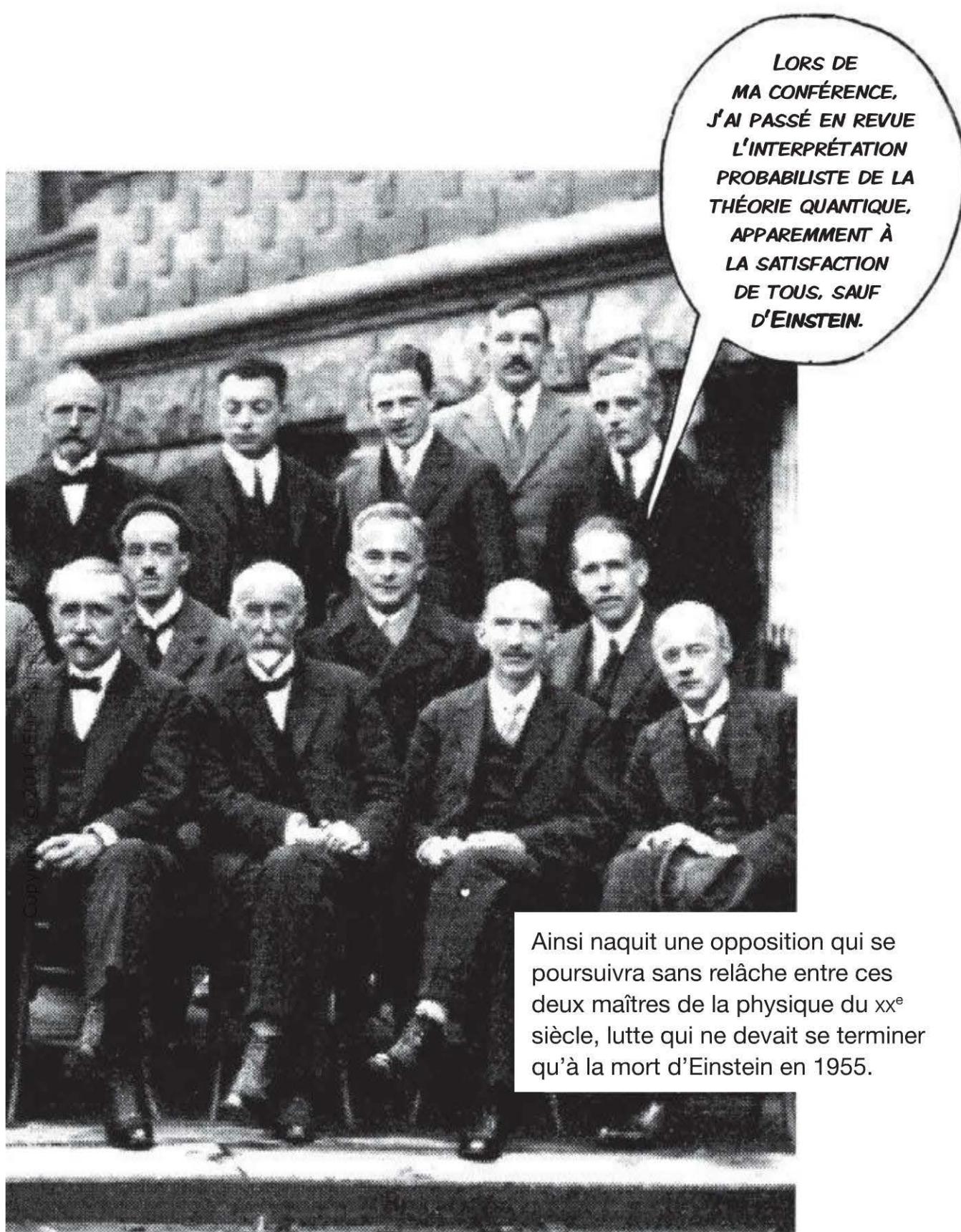


Quelques années plus tard, en 1905, un jeune clerc d'un bureau des brevets en Suisse, **Albert Einstein** (1879–1955), a donné une portée générale aux concepts de Planck.

Voici donc Einstein, au premier rang en plein centre, un peu rigide dans son accoutrement formel. Cela fait plus de 20 ans qu'il ressasse la problématique quantique sans avoir effectué de réelles avancées depuis son article fondateur en 1905. Pendant tout ce temps, cependant, il a continué à contribuer au développement de la théorie, approuvant les idées originales de ses pairs avec une certitude et une confiance en lui qui défient l'imagination. Son œuvre la plus connue, la *théorie générale de la relativité*, celle qui lui a conféré une renommée internationale, datait déjà d'une décennie.

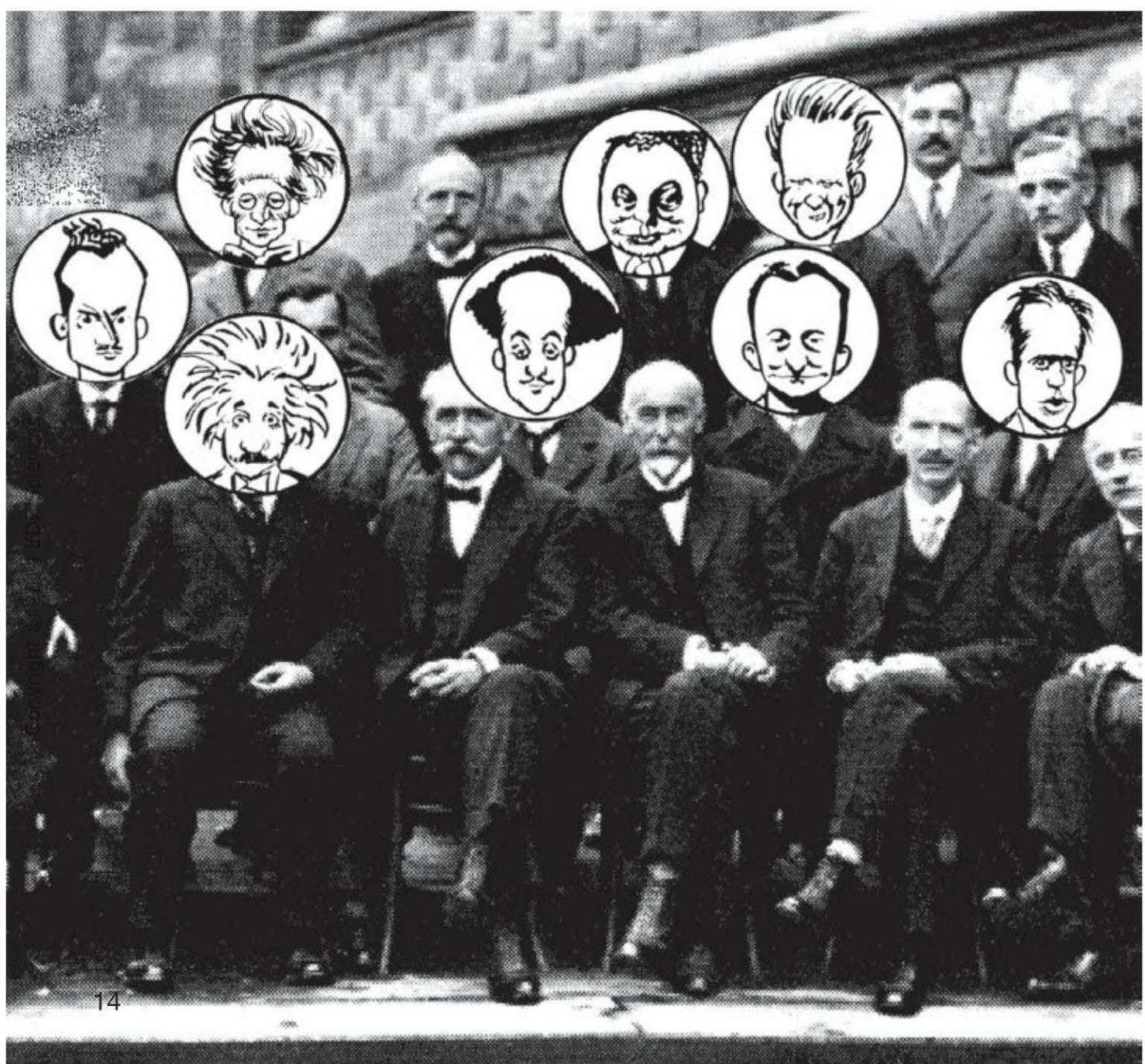


À Bruxelles, Einstein avait débattu des conclusions étranges de la théorie quantique avec son défenseur le plus respecté et déterminé, le « grand Danois » **Niels Bohr** (1885–1962). Bohr, plus que quiconque, devait être associé à la lutte pour interpréter et comprendre cette théorie. On le voit ici, détendu et confiant, à l'extrême droite du rang du milieu ; à 42 ans, le professeur Bohr était à l'apogée de sa puissance intellectuelle.

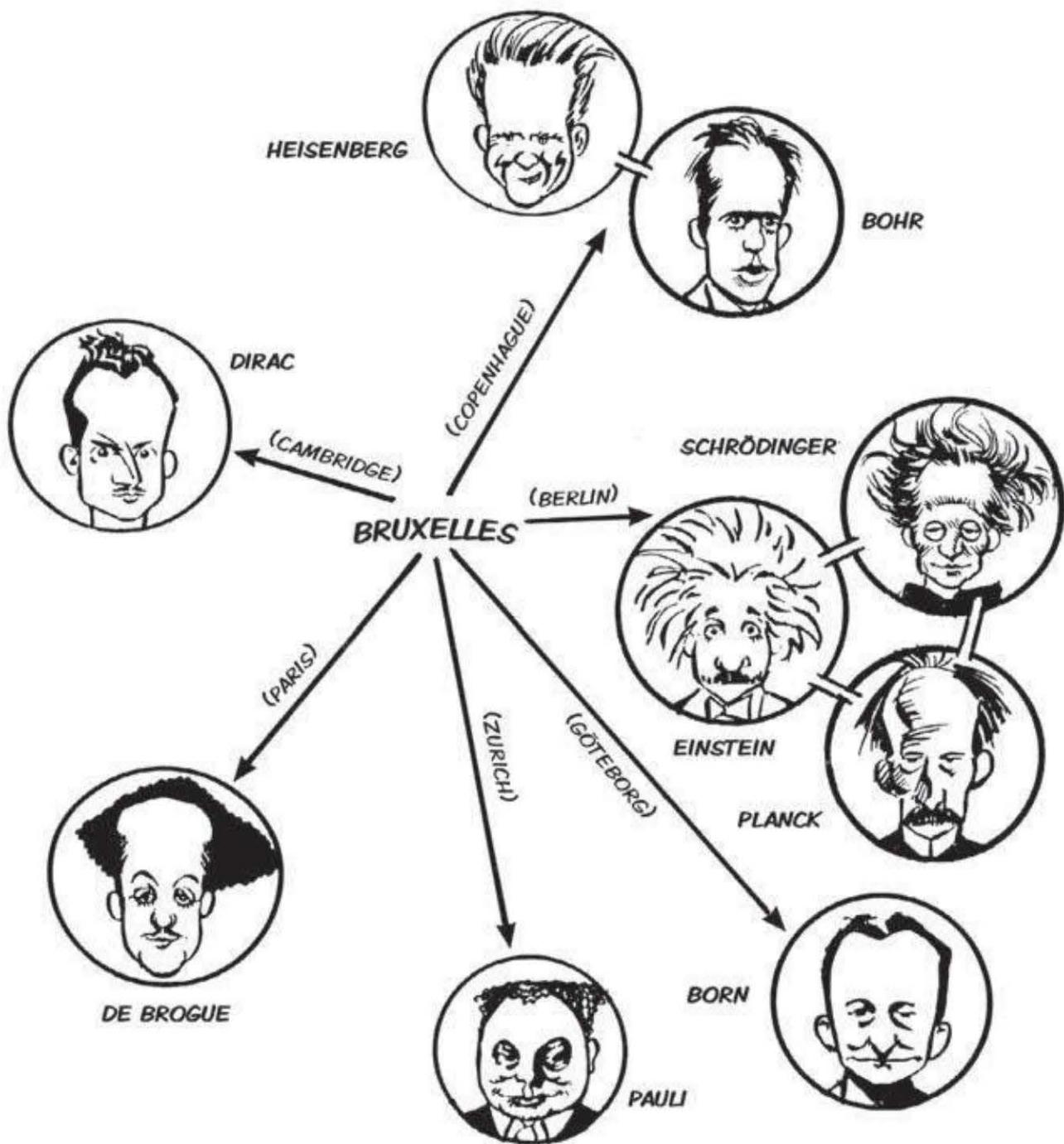


Au dernier rang, juste derrière Einstein, on aperçoit **Erwin Schrödinger** (1887–1961), qui paraît particulièrement à l'aise dans sa veste de sport et arborant un nœud papillon. Sur la gauche, en sautant une place, nous voyons les «jeunes Turcs» **Wolfgang Pauli** (1900–1958) et **Werner Heisenberg** (1901–1976) – chacun allant sur leurs 30 ans – et devant eux, **Paul Dirac** (1902–1984), **Louis de Broglie** (1892–1987), **Max Born** (1882–1970) et Niels Bohr. Ces hommes sont aujourd’hui immortalisés par leur association avec les propriétés fondamentales de l’infiniment petit : *l’équation d’onde* de Schrödinger, *le principe d’exclusion* de Pauli, *le principe d’incertitude* d’Heisenberg, *le modèle atomique* selon Bohr... et ainsi de suite.

Tous étaient présents – depuis Planck, le plus âgé à 69 ans, qui avait démarré tous ces travaux en 1900, jusque Dirac, le plus jeune à 25 ans, qui compléta la théorie en 1928.



Au lendemain de cette photo, le 30 octobre 1927, leurs esprits bruissant encore des épiques échanges entre Bohr et Einstein, les congressistes prirent le train à la gare centrale de Bruxelles pour Berlin, Paris, Cambridge, Göteborg, Copenhague, Vienne ou encore Zurich.



Ils emportaient avec eux le plus étrange ensemble d'idées jamais émises par des scientifiques. Au fond d'eux-mêmes, la plupart étaient probablement d'accord avec Einstein, à savoir que cette « folie » appelée « théorie quantique » serait une marche vers une théorie plus complète, mais qui serait renversée pour laisser la place à quelque chose de meilleur, qui plus est en phase avec le bon sens.

Mais comment la théorie quantique est-elle née ? Quelles expérimentations ont convaincu ces hommes parmi les plus circonspects d'ignorer les défenseurs de la physique classique et de proposer des idées sur la Nature qui défaisaient justement le bon sens ?



Avant d'évoquer et d'analyser ces paradoxes expérimentaux, nous avons besoin de quelques notions de base sur **la thermodynamique** et sur **les statistiques**, notions fondamentales au développement de la théorie quantique.

Qu'est-ce que la thermodynamique ?

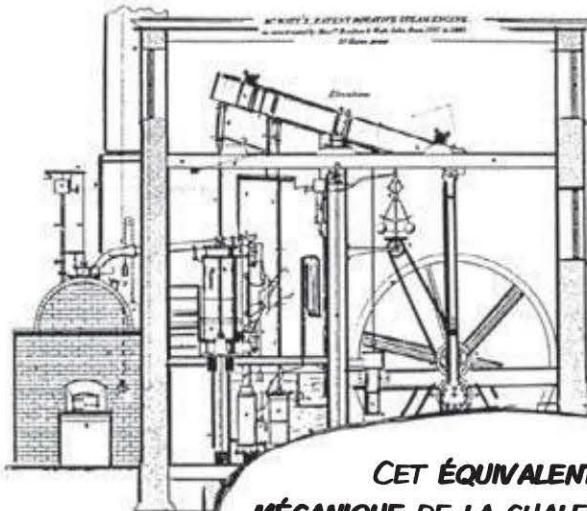
Ce mot signifie étymologiquement mouvement de la chaleur, laquelle se déplace toujours du corps ayant la température plus élevée vers celui à température plus basse, jusqu'à ce que la température des deux corps soit la même. Cet état porte le nom **d'équilibre thermique**.

La chaleur peut être correctement décrite comme **une sorte de vibration...**



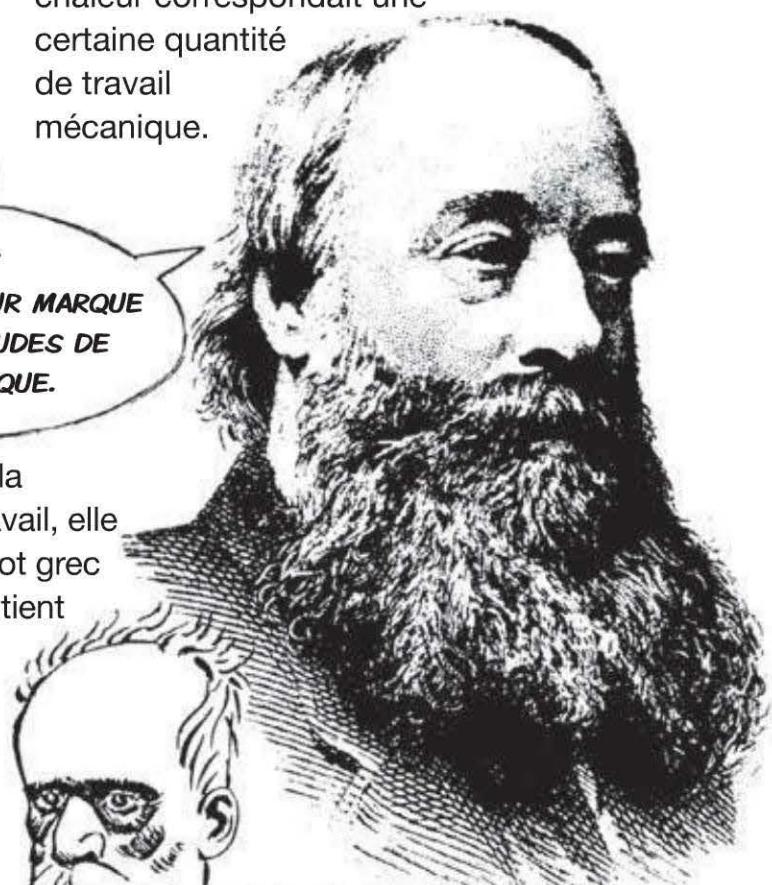
Premier principe de la thermodynamique

Des modèles mécaniques pour expliquer les flux de chaleur se sont développés rapidement en Grande-Bretagne au cours du XIX^e siècle, suivant les travaux de **James Watt** (1736–1819), un Écossais qui avait construit une machine à vapeur fonctionnelle.



CET ÉQUIVALENT
MÉCANIQUE DE LA CHALEUR MARQUE
LES DÉBUTS DES ÉTUDES DE
THERMODYNAMIQUE.

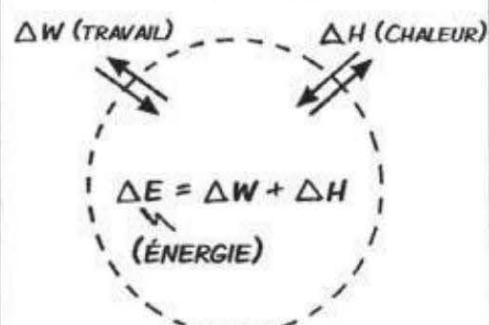
Peu de temps après, le fils d'un brasseur de Manchester, **James Prescott Joule** (1818–1889), a démontré qu'à une certaine quantité de chaleur correspondait une certaine quantité de travail mécanique.



Puis quelqu'un a affirmé : «puisque la chaleur peut être transformée en travail, elle doit être une forme d'énergie» (le mot grec désignant l'énergie signifie «qui contient du travail»). Mais il a fallu attendre 1847 pour qu'un scientifique respecté et académicien de surcroît, **Hermann von Helmholtz** (1824–1898), avance l'idée que :

DÈS LORS QUE L'ON
CONSTATE QU'UNE CERTAINE QUANTITÉ
D'ÉNERGIE DISPARAÎT D'UN ENDROIT DONNÉ,
UNE QUANTITÉ ÉQUIVALENTE DOIT
APPARAÎTRE AILLEURS MAIS DANS
LE MÊME SYSTÈME.

1^{ER} PRINCIPE



Cette équation s'appelle **la loi de la conservation d'énergie**. Elle constitue l'un des fondements de la physique moderne et est restée inchangée par les théories modernes.

Rudolph Clausius, auteur de deux lois

En 1850, le physicien allemand **Rudolf Clausius** (1822–1888) publie un article dans lequel il donne le nom de première loi de la thermodynamique à la conservation de l'énergie. Dans le même temps, il avance l'argument qu'il y a **un second principe de la thermodynamique** aux termes duquel il y aura toujours une dégradation de l'énergie totale du système, une création de chaleur non utile dans les processus thermodynamiques.

Clausius a introduit un nouveau concept, celui de **l'entropie** – définie en termes de chaleur transférée d'un corps vers un autre.





L'existence des atomes

Un philosophe grec du nom de **Démocrite** (*circa* 460–370 avant J.-C.) avait été le premier à proposer le concept de l'atome (du grec, signifiant «indivisible»).

Ce concept a été remis en cause par Aristote et le débat à ce sujet a duré des siècles avant que le chimiste britannique **John Dalton** (1766–1844) s'en serve pour prévoir les propriétés chimiques des éléments isolés ou composés, en 1806.

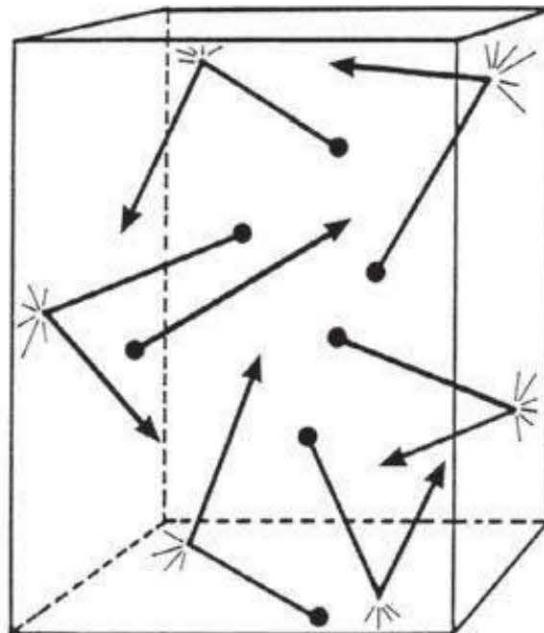
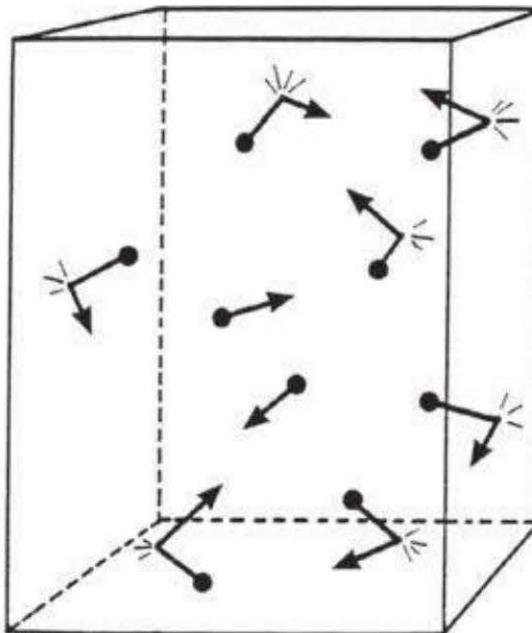
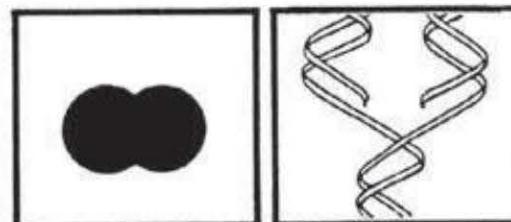
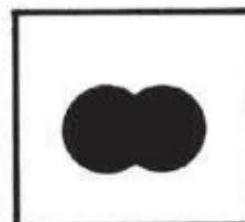
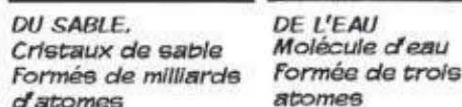
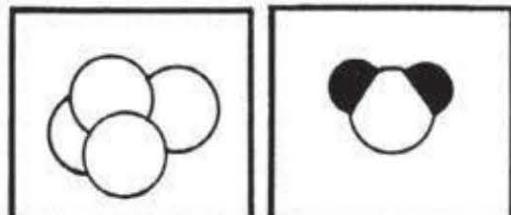


C'est seulement un siècle plus tard qu'un calcul théorique d'Einstein et des expérimentations conduites par un Français, **Jean Perrin** (1870–1842), ont fini par convaincre les sceptiques d'accepter l'existence des atomes comme un fait scientifiquement établi.

Cependant, pendant tout le xix^e siècle, même sans preuve physique de cette existence, nombreux de théoriciens les avaient déjà intégrés à leurs travaux.

La moyenne des molécules diatomiques

Le physicien écossais J. C. Maxwell, «atomiste» chevronné, a développé sa théorie cinétique des gaz en 1859.



Cette vision des gaz était cohérente avec les propriétés physiques des gaz, si nous admettons que l'échauffement des molécules les fait bouger plus vite et heurter les parois plus fréquemment.

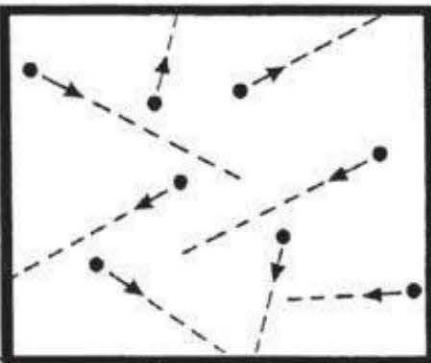
La théorie de Maxwell se basait sur les *moyennes statistiques* afin de voir si les propriétés macroscopiques (c'est-à-dire celles que l'on peut mesurer dans un laboratoire) pouvaient être prédites à partir d'un modèle microscopique appliqué à un ensemble de molécules en phase gazeuse.

Maxwell a considéré que les quatre conditions suivantes étaient validées :

LES MOLÉCULES RESSEMBLENT À DES SPHÈRES SOLIDES AUX DIAMÈTRES BIEN PLUS PETITS QUE LES DISTANCES QUI LES SÉPARENT.

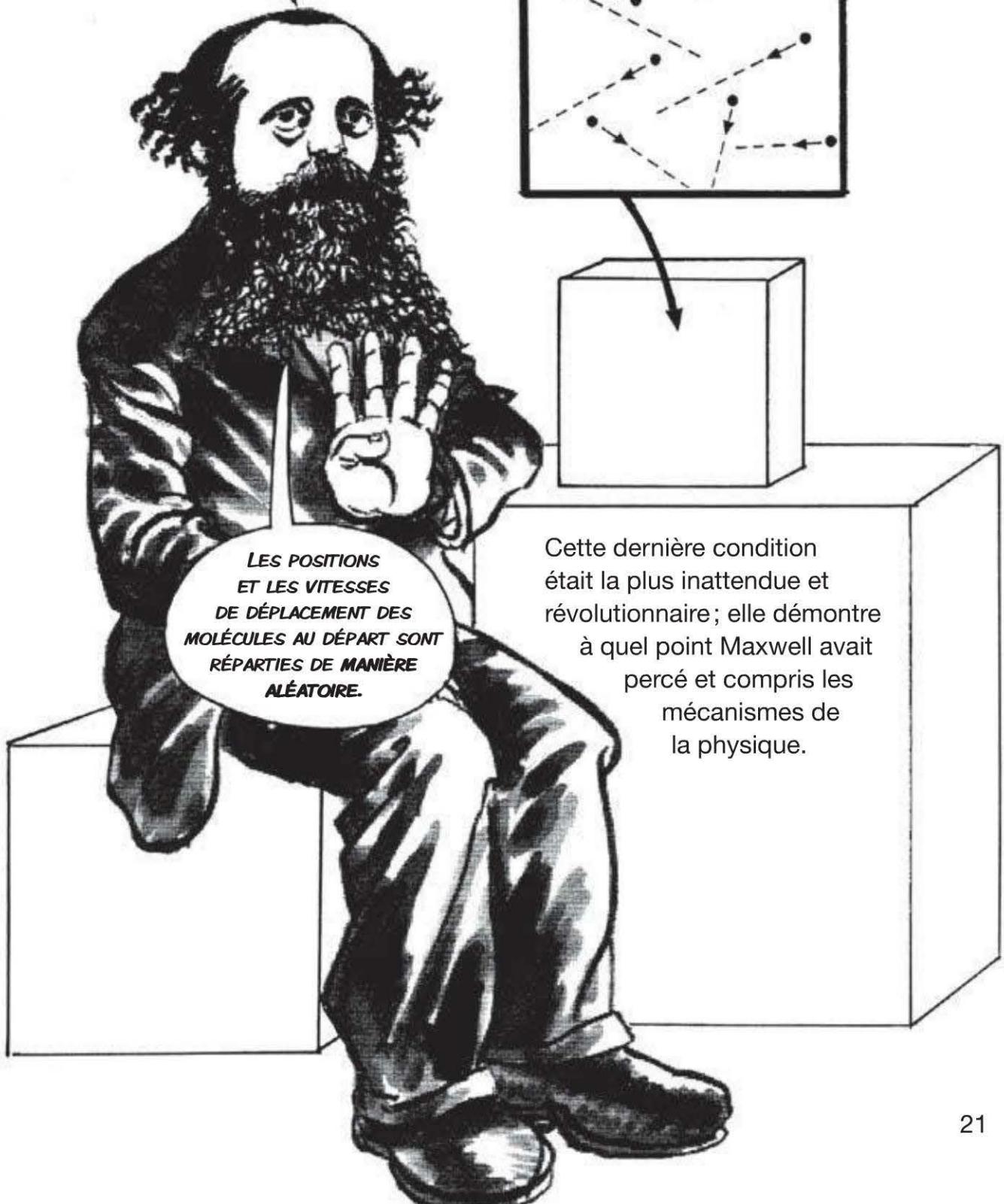
LES COLLISIONS ENTRE MOLÉCULES CONSERVENT LEUR ÉNERGIE.

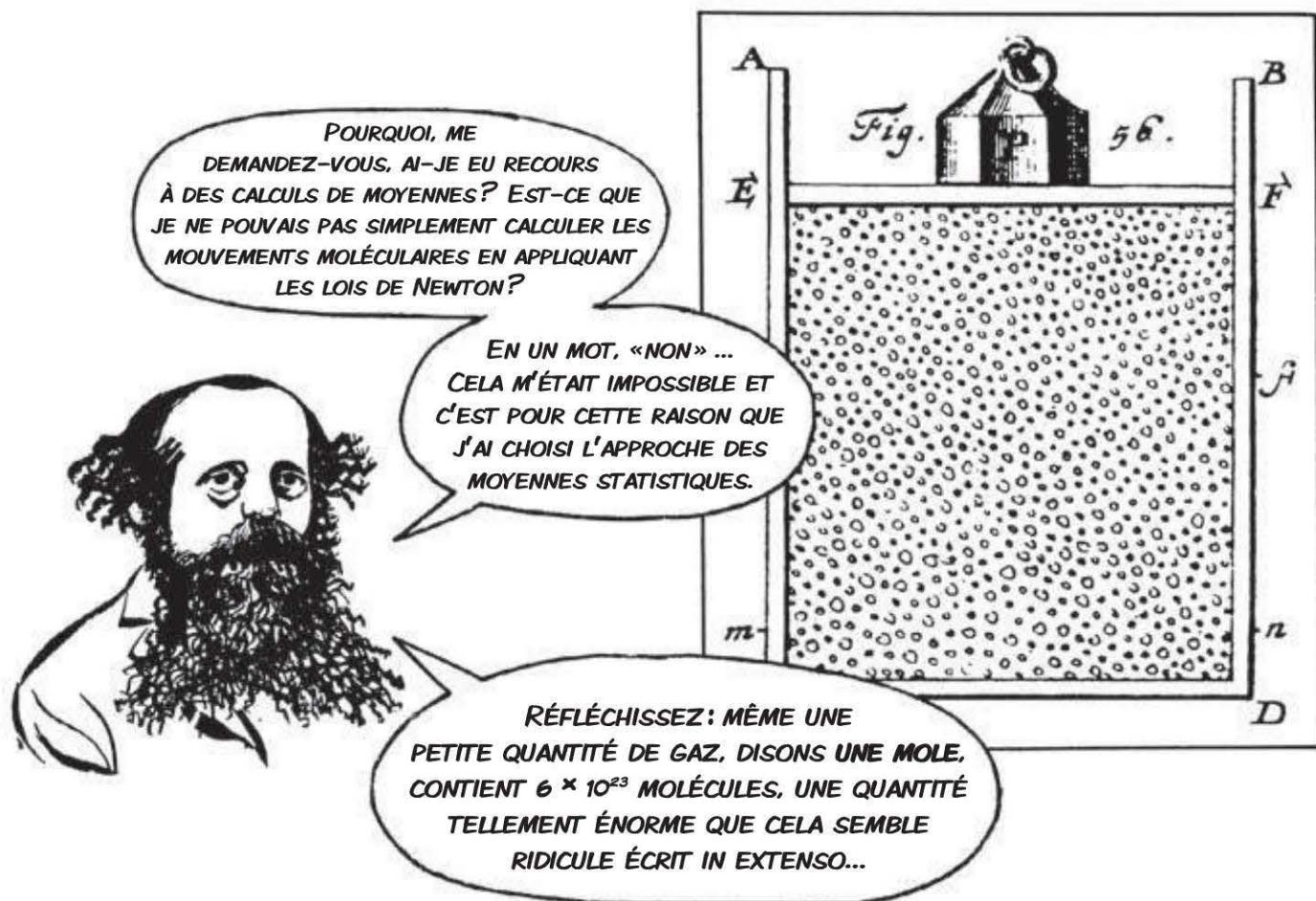
ENTRE DEUX COLLISIONS, LES MOLÉCULES SE DÉPLACENT EN LIGNE DROITE À VITESSE CONSTANTE SANS AUTRE INTERACTION.



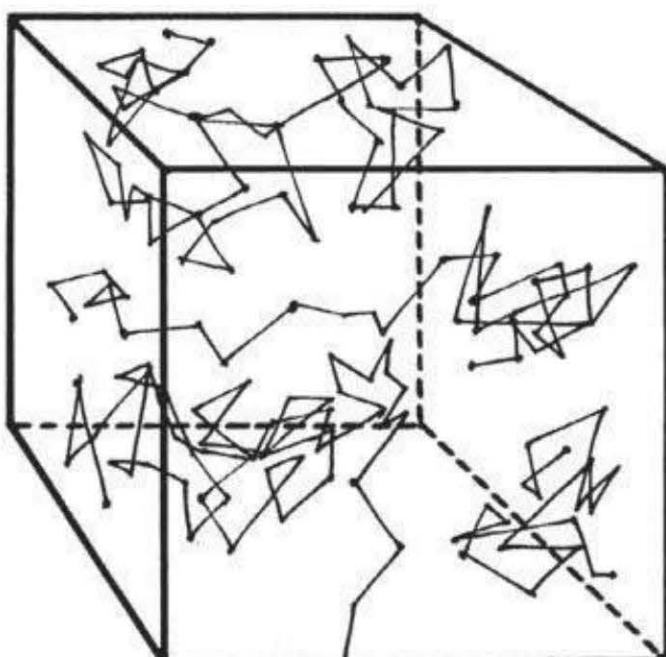
LES POSITIONS ET LES VITESSES DE DÉPLACEMENT DES MOLÉCULES AU DÉPART SONT RÉPARTIES DE MANIÈRE ALÉATOIRE.

Cette dernière condition était la plus inattendue et révolutionnaire ; elle démontre à quel point Maxwell avait percé et compris les mécanismes de la physique.





(600 000 000 000 000 000 000 000).



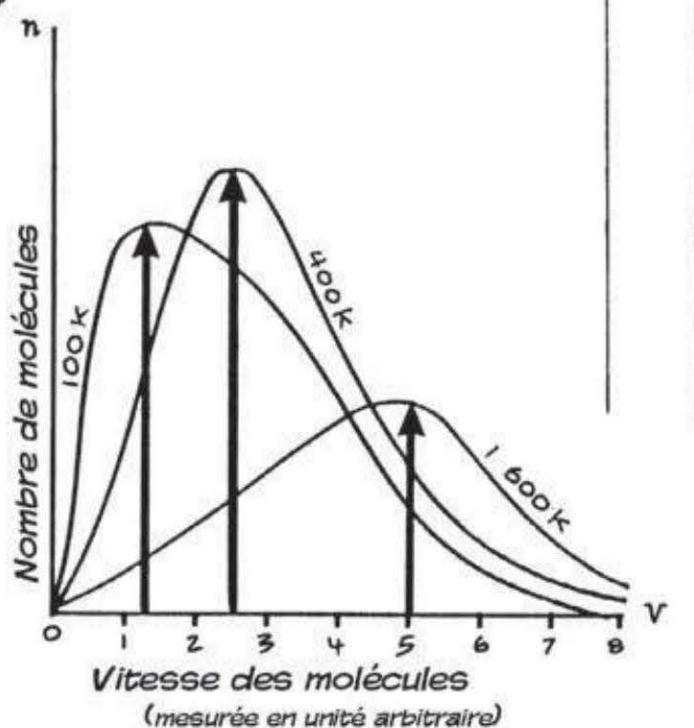
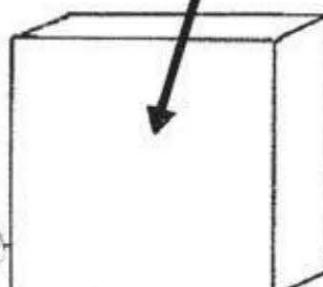
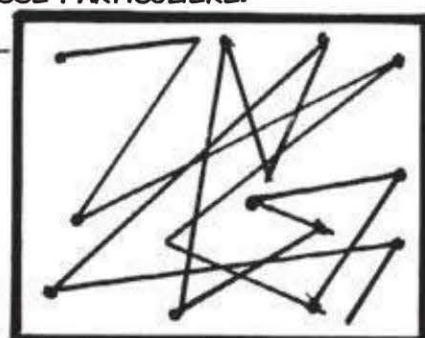
Mouvement aléatoire vu par Perrin

Il s'avérerait impossible de calculer les mouvements individuels de tant de particules. Mais l'analyse de Maxwell, basée sur la mécanique classique de Newton, a montré que la température est en fait une mesure de **la vitesse au carré moyennée** des molécules, c'est-à-dire la vitesse moyenne multipliée par elle-même.

La chaleur résulte du mouvement aléatoire et incessant des atomes.

Le plus important dans la théorie de Maxwell est sa prédiction de la distribution de la vitesse *probable* des molécules, si l'on se réfère à son modèle. Autrement dit, on en déduit une gamme de vitesses... qui indique comment et à quel point l'ensemble dévie de la valeur moyenne.

EN SUPPOSANT QUE LES PARTICULES DE GAZ SE DÉPLACENT UNIFORMÉMENT DANS L'ESPACE, INDÉPENDAMMENT LES UNES DES AUTRES ET SANS DIRECTION PRIORITAIRE, J'ÉTAIS EN MESURE DE CALCULER LA PROBABILITÉ QU'UNE MOLÉCULE DONNÉE, CHOISIE AU HASARD, PUISSE AVOIR UNE VITESSE PARTICULIÈRE.



Cette courbe, bien connue des physiciens sous le nom de *distribution de Maxwell*, donne des informations utiles sur des milliards et des milliards de molécules, quand bien même on ne peut calculer le mouvement d'une molécule prise isolément. C'est ici que des calculs de probabilité s'avèrent utiles, quand le calcul exact est, dans les faits, strictement impossible.

Ludwig Boltzmann et la mécanique statistique

Dans les années 1870, **Ludwig Boltzmann** (1844–1906) – s'inspirant de la théorie cinétique de Boltzmann – a fait l'annonce suivante.

- Il a présenté une loi générale de distribution probabiliste, appelée **distribution orthodoxe** ou **canonique**, qui s'appliquerait à tout ensemble d'entités libres de leurs mouvements, indépendantes les unes des autres et interagissant de manière aléatoire.

- Il a rédigé de façon formelle le théorème de l'**equipartition de l'énergie**. Cette énergie sera répartie de façon égale entre tous les degrés de liberté dès lors que le système aura atteint son équilibre thermique.

- Il a donné une nouvelle interprétation de la seconde loi.

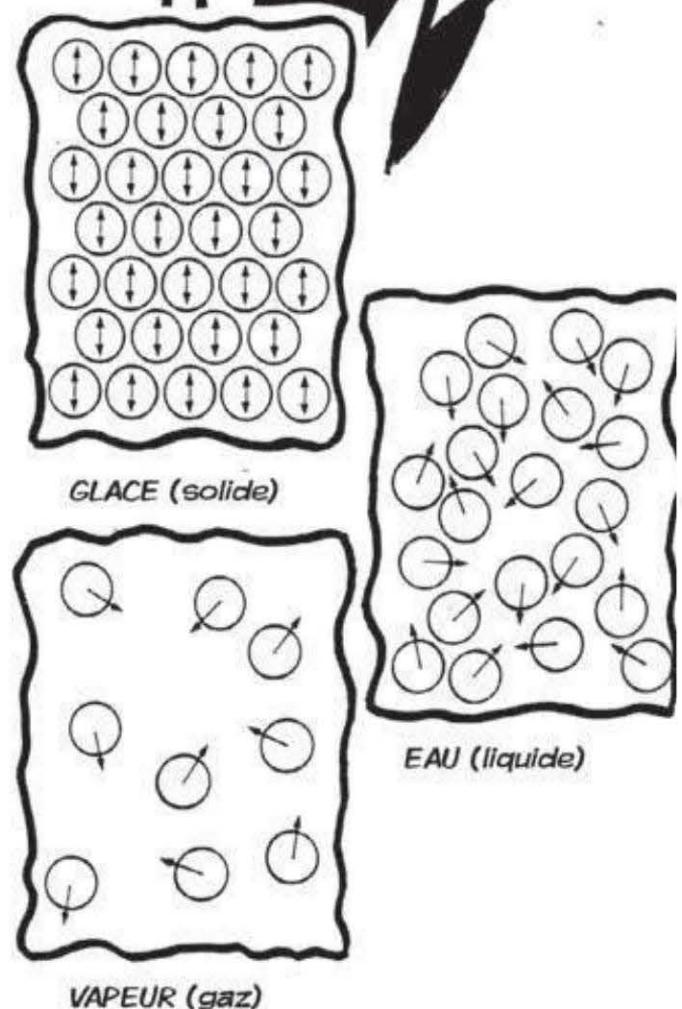
Quand l'énergie d'un système est «dégradée» (pour reprendre le terme de Clausius en 1850), les atomes du système deviennent de plus en plus désordonnés et l'entropie augmente. Mais on peut mesurer ce désordre; il s'agit de la probabilité d'un système particulier, définie comme le nombre de façons dont le système peut être assemblé à partir de son ensemble d'atomes.

Pour être plus précis,

$$S = K \log W \dots$$

où **k** est une constante (connue aujourd'hui comme la constante de Boltzmann) et **W** la probabilité que telle disposition physique des atomes puisse exister.

C'est ce travail qui a valu à Boltzmann d'être considéré comme le père de la mécanique statistique, une méthode où les propriétés des corps macroscopiques peuvent être prédites par le comportement statistique de leurs composants microscopiques.



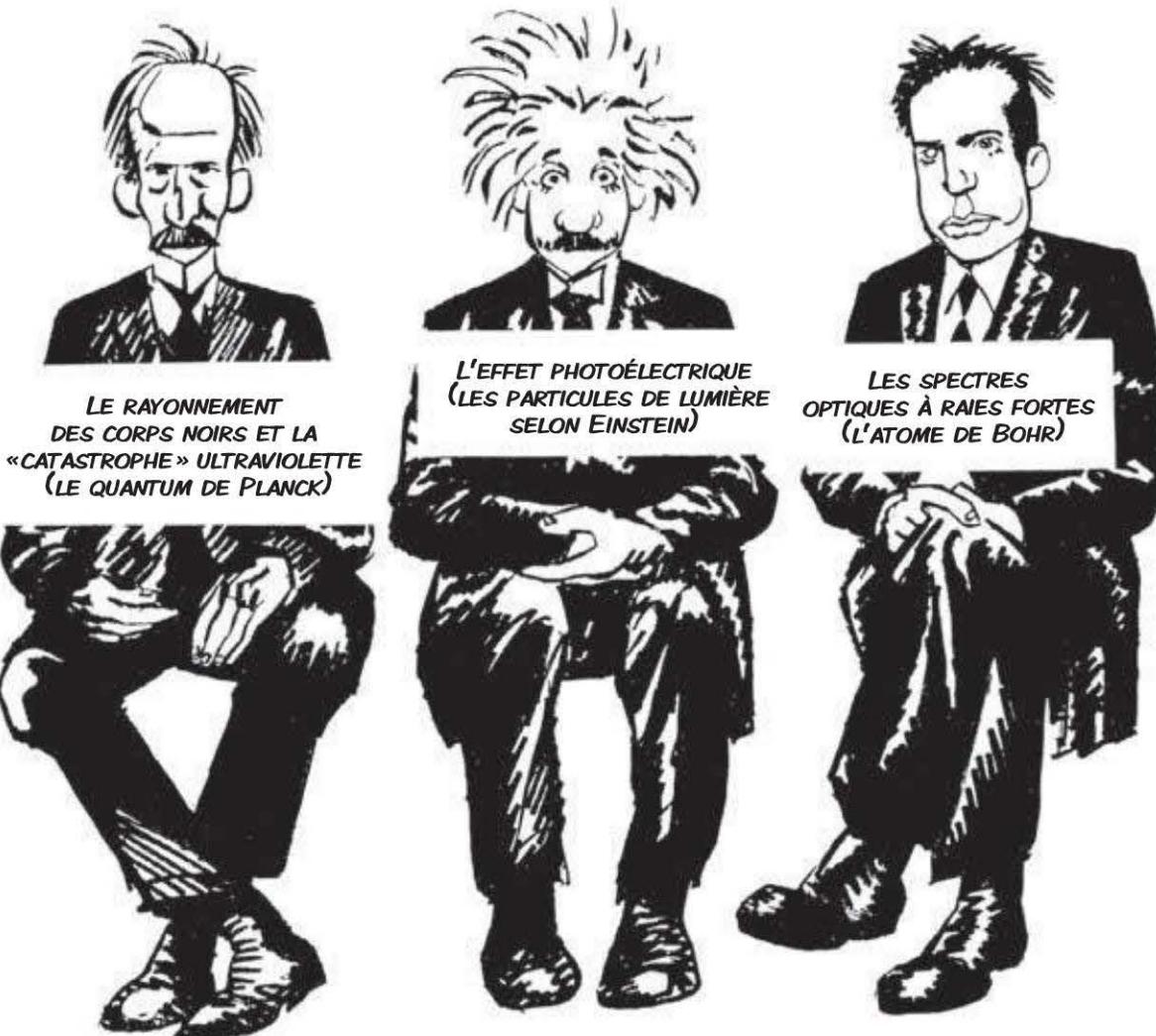
L'équilibre thermique et ses fluctuations



Ces idées nouvelles – l'utilisation de probabilités et de statistiques des systèmes *microscopiques* pour prévoir les propriétés *macroscopiques* mesurables en laboratoire (telles la température, la pression, etc.) – sous-tendent tout ce qui allait arriver par la suite dans les développements de la théorie quantique.

La guerre des Trente Ans (1900–1930) – physique quantique versus physique classique

Examinons à présent trois expériences déterminantes de l'époque préquantique qui ne pouvaient être expliquées par une simple application des lois de la physique classique.



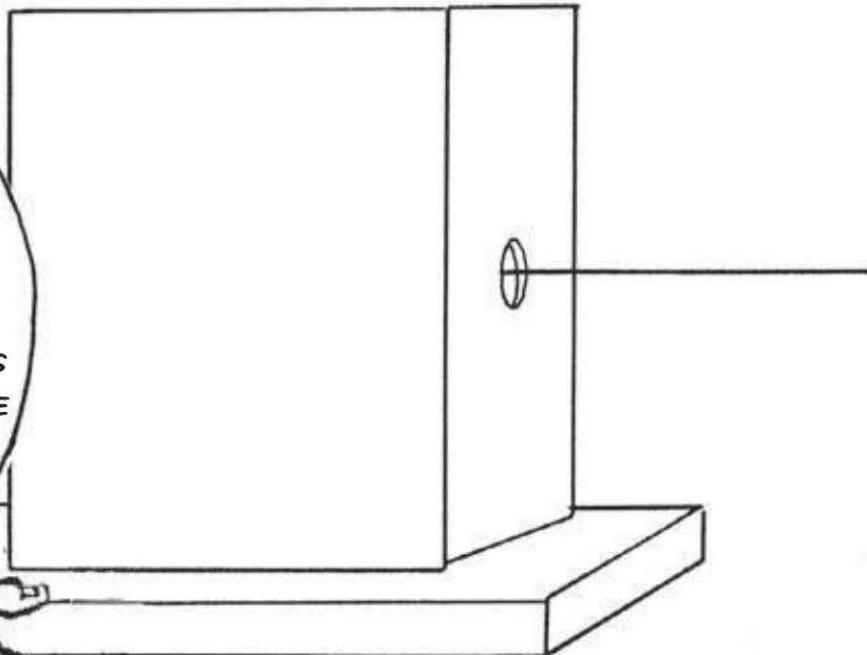
Chacune des expériences impliquait une interaction rayonnement-matière et faisait l'objet de rapports par des expérimentateurs scientifiques fiables. Les mesures annoncées étaient précises, reproductibles et, cependant, paradoxales... Le genre de situation où un bon théoricien serait prêt à mourir pour y être confronté.

Nous allons à présent décrire, étape par étape, chaque expérience, signalant la crise qui s'en est suivie et la solution apportée, tour à tour, par Max Planck, Albert Einstein et Niels Bohr. En présentant leurs solutions, ces trois scientifiques ont fait les premières contributions fondamentales à une nouvelle compréhension de la Nature. Aujourd'hui, ce corpus de travail – qui s'achève par le modèle de l'atome de Bohr en 1913 – est connu sous le nom d'*ancienne théorie quantique*.



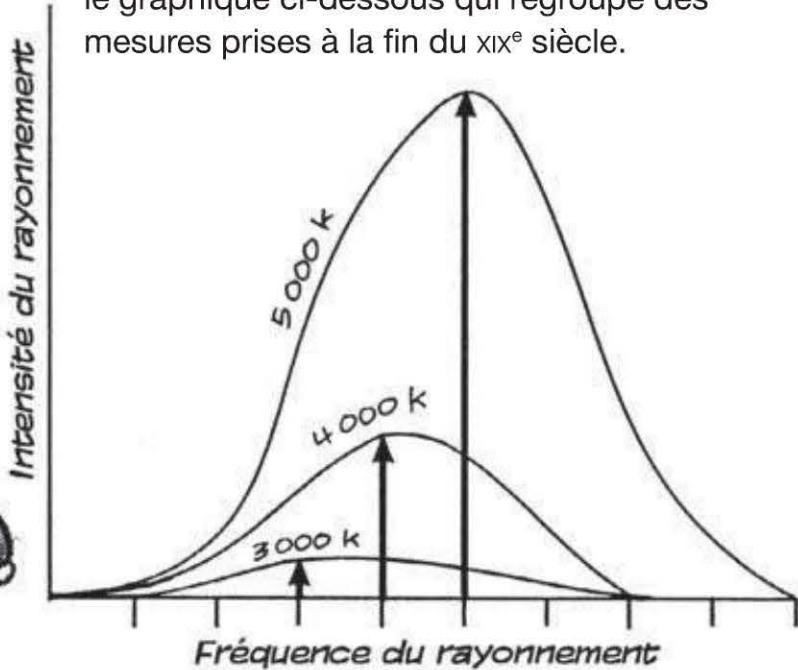
Le rayonnement des corps noirs

Quand un objet est chauffé, il émet un rayonnement sous la forme d'ondes électromagnétiques, c'est-à-dire de la lumière, dans un large spectre de fréquences.

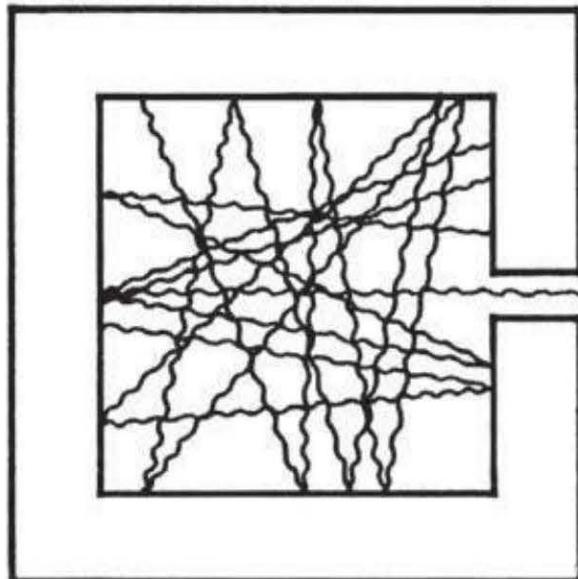


LES MESURES
EFFECTUÉES SUR LE
RAYONNEMENT QUI PASSE
PAR UN PETIT OPERCULE DANS
UN FOUR CHAUFFÉ ET FERMÉ -
EN ALLEMAGNE, NOUS APPELONS
CELA UNE CAVITÉ - MONTRE QUE
L'INTENSITÉ DU RAYONNEMENT
VARIE FORTEMENT SELON
SA FRÉQUENCE.

La fréquence dominante prend une valeur plus élevée, au fur et à mesure que la température monte, comme nous pouvons le voir dans le graphique ci-dessous qui regroupe des mesures prises à la fin du xix^e siècle.



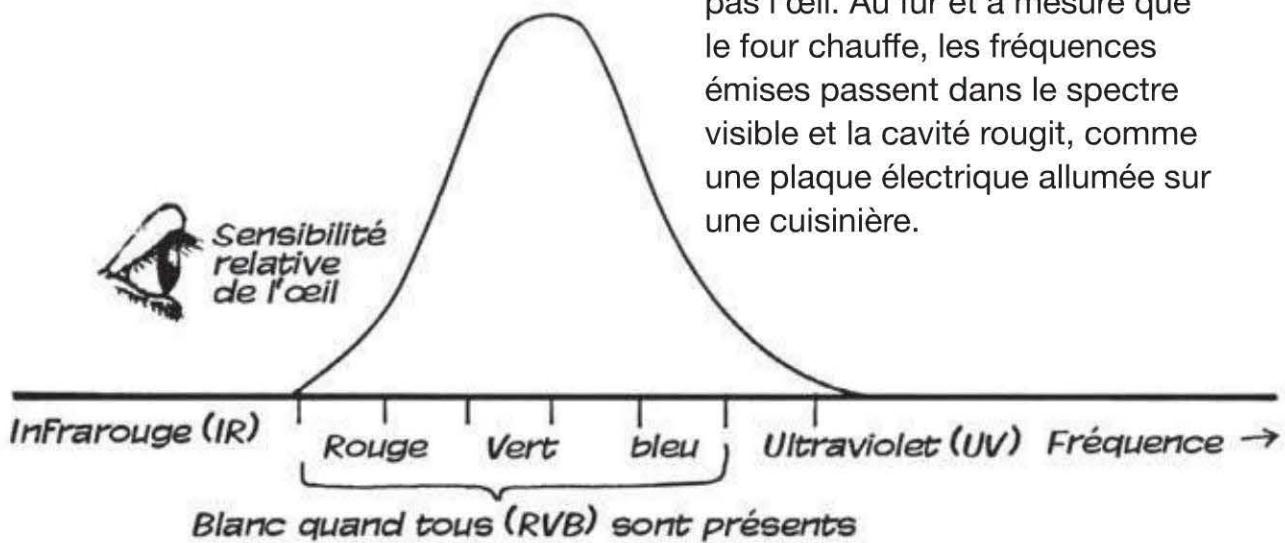
Une boîte (cavité) de rayonnement



Un corps noir est un corps qui absorbe en totalité le rayonnement qu'il reçoit. Dans une cavité, le rayonnement reçu n'a nulle part où aller et il est absorbé et renvoyé constamment par les parois. Ainsi, une petite ouverture va

laisser échapper du rayonnement émis par les parois, non réfléchi, caractéristique du corps noir.

Si le four est à peine chaud, le rayonnement existe mais n'est pas perceptible car il ne stimule pas l'œil. Au fur et à mesure que le four chauffe, les fréquences émises passent dans le spectre visible et la cavité rougit, comme une plaque électrique allumée sur une cuisinière.



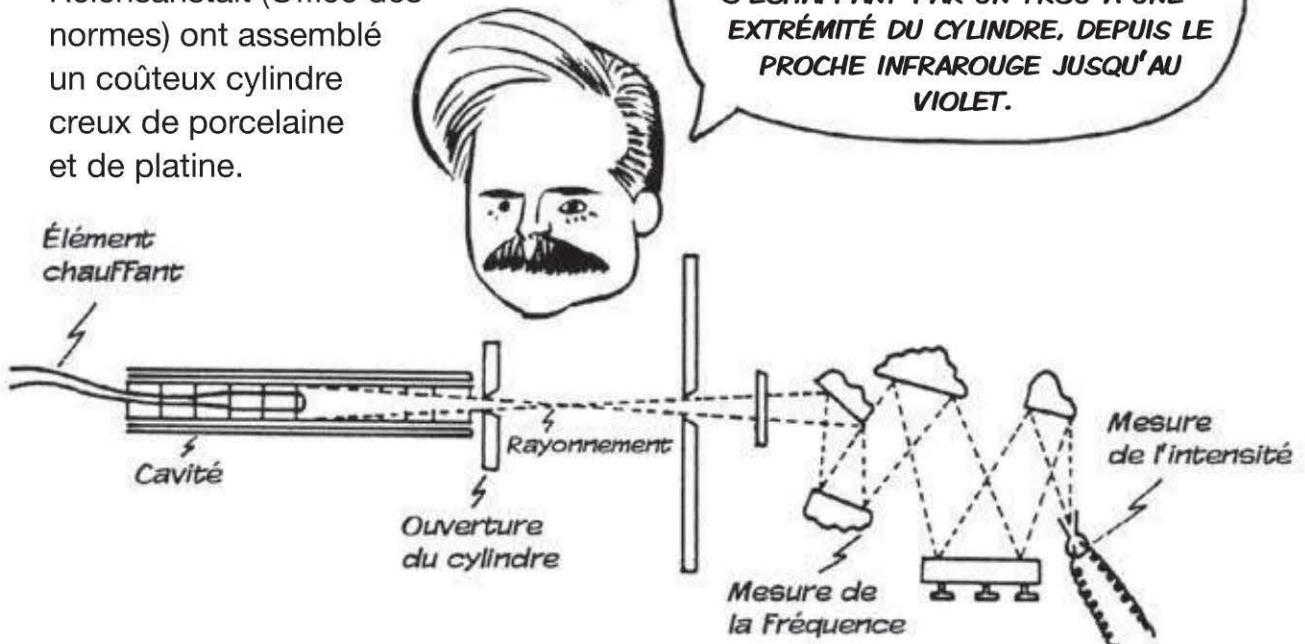
L'ÉQUILIBRE ATTEINT,
LE RAYONNEMENT NE DÉPEND QUE
DE LA TEMPÉRATURE. À ENVIRON 800 °C,
QUELLE QUE SOIT LA MATIÈRE DANS
LE FOUR – DU CHARBON, DU VERRE,
VOIRE DU MÉTAL –, UNE COULEUR
ROUGE UNIFORME ET VISIBLE
S'EN DÉGAGE.

C'est d'ailleurs ainsi que
les potiers vérifiaient la
température de leurs fours.

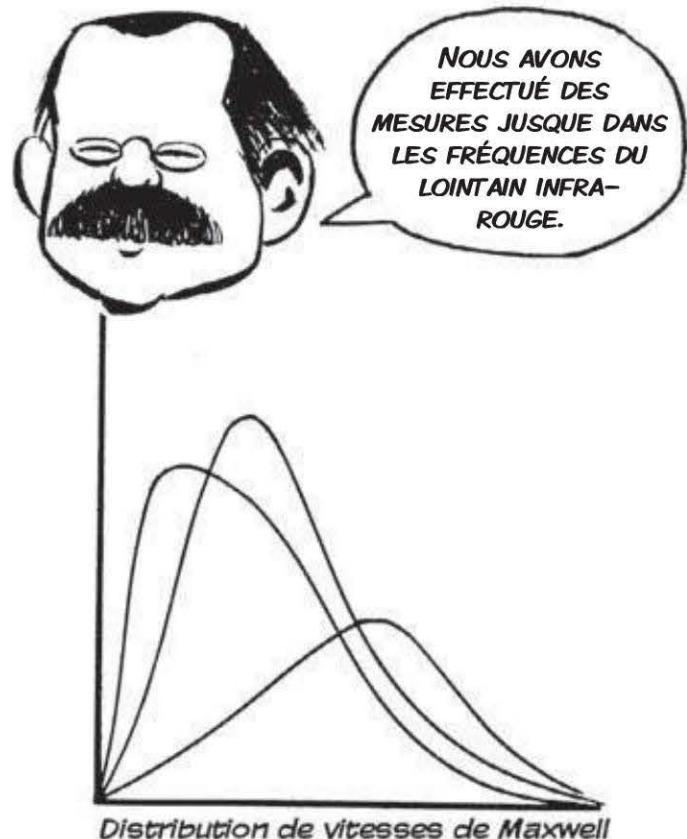
En 1792, le célèbre porcelainier
Josiah Wedgwood avait
déjà observé que tous les
objets devenaient rouges
à la même température.

ÉCHELLE DU POTIER	
550 °C	ROUGE FONCÉ
750 °C	ROUGE CERISE
900 °C	ORANGE
1 000 °C	JAUNE
1 200 °C	BLANC

En 1896, un ami de Planck, Wilhelm Wien, et d'autres qui travaillaient au Département de physique du Reichsanstalt (Office des normes) ont assemblé un coûteux cylindre creux de porcelaine et de platine.



Au *Technische Hochschule* (Université technique) de Berlin, un autre des proches collaborateurs de Planck, Heinrich Rubens, a utilisé un four de conception différente.



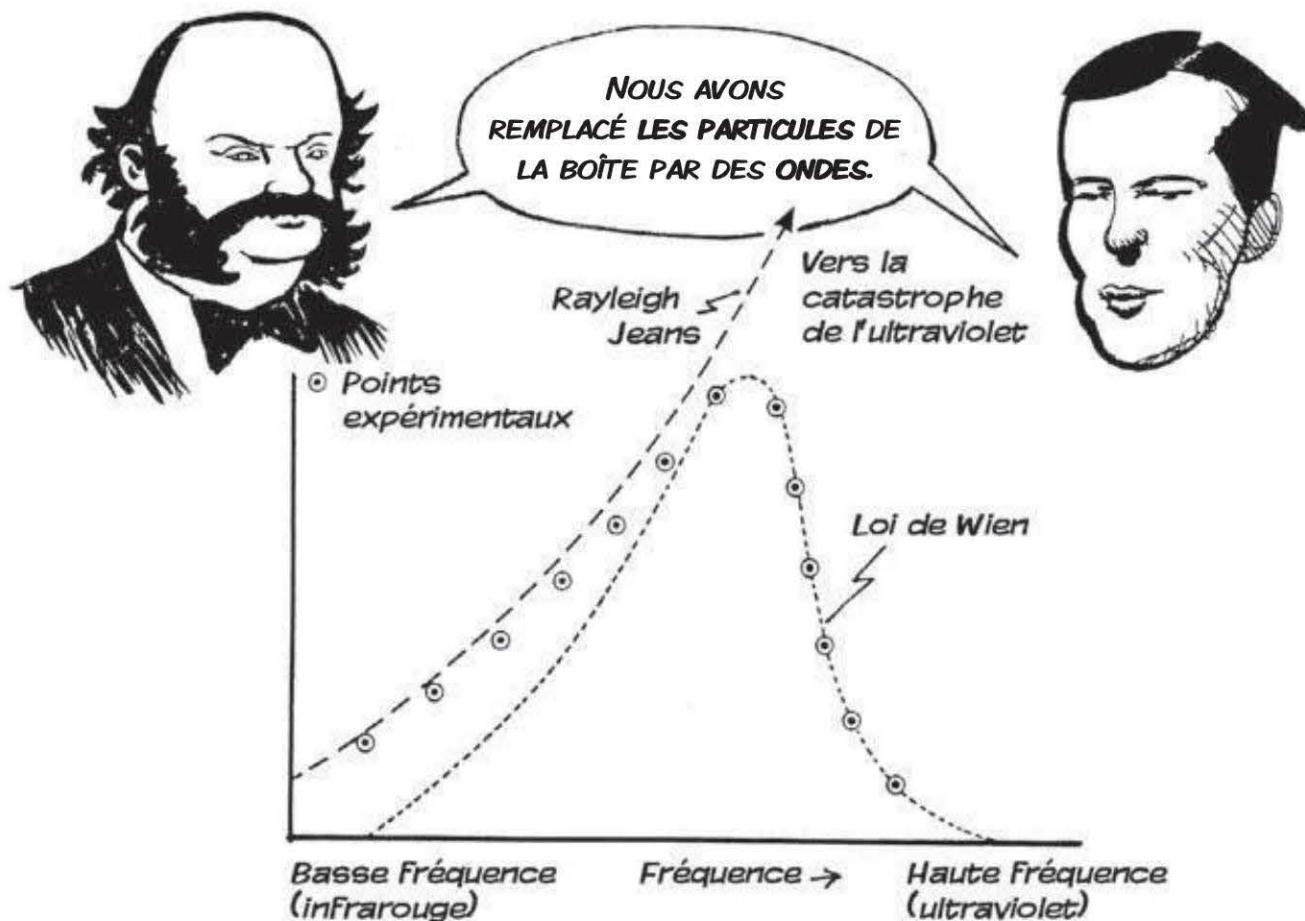
Ces courbes de rayonnement – qui posent l'un des problèmes centraux de la physique classique de la fin des années 1890 – se sont révélées très proches de celles calculées par Maxwell pour la distribution des vitesses (c'est-à-dire l'énergie) des molécules de gaz chauffées, dans une boîte fermée.

Résultats paradoxaux

Ce rayonnement des corps noirs peut-il être étudié de la même façon que le gaz dit « idéal » de Maxwell... c'est-à-dire sous la forme d'ondes électromagnétiques (à la place des molécules de gaz) en équilibre, qui rebondissent sans cesse sur les parois de la boîte fermée ?

Wien en avait déduit une formule, basée toutefois sur quelques arguments douteux, en accord avec les expériences publiées, mais seulement pour **la partie haute des fréquences** du spectre.

Les physiciens classiques britanniques **Lord Rayleigh** (1842–1919) et **Sir James Jeans** (1877–1946) se sont appuyés sur les mêmes présuppositions théoriques que Maxwell pour élaborer leur théorie cinétique des gaz.



L'équation de Rayleigh et Jeans s'accordait bien avec les résultats expérimentaux **aux basses fréquences**, mais ils ont eu un choc en comparant les résultats obtenus avec la plage des hautes fréquences. La théorie classique avait prévu **une intensité infinie dans la plage de l'ultraviolet** et au-delà, comme on le voit ci-dessus, phénomène rebaptisé «catastrophe de l'ultraviolet».

Que signifie exactement ce résultat expérimental ?

Qu'est-ce qui n'a pas marché ?

Le résultat de Rayleigh-Jeans est manifestement faux, sinon quiconque qui regarderait dans la cavité (ou M. Wedgwood dans son four à porcelaine) ...

*J'AURAIS LES YEUX
TOTALEMENT BRÛLÉS !*

*CETTE CATASTROPHE DE
L'ULTRAVIOLET DEVENAIT UN SÉRIEUX PARADOXE
POUR LES PHYSICIENS CLASSIQUES.*

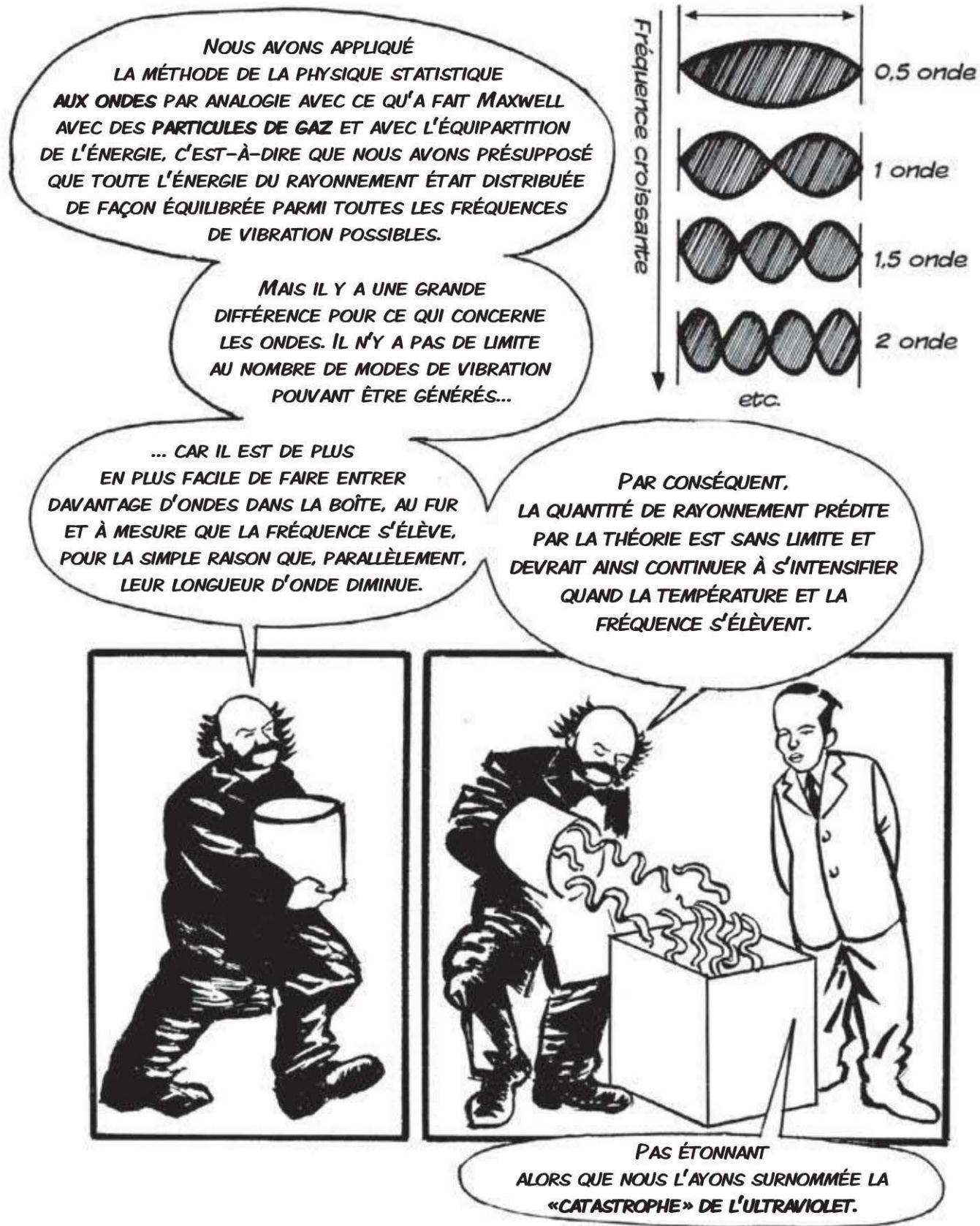
*SI RAYLEIGH ET
JEANS AVAIENT RAISON, IL SERAIT MÊME
DANGEREUX DE S'ASSEOIR DEVANT UN
FEU DE CHEMINÉE.*



Si les physiciens classiques gagnaient la partie, la lueur romantique des bûches enflammées se transformerait en rayonnement meurtrier. Il fallait faire quelque chose !

La catastrophe de l'ultraviolet

Tout le monde s'accorde à dire que la méthodologie était bonne et, par conséquent, il est intéressant de voir exactement comment ils ont procédé et pourquoi cela n'a pas marché.

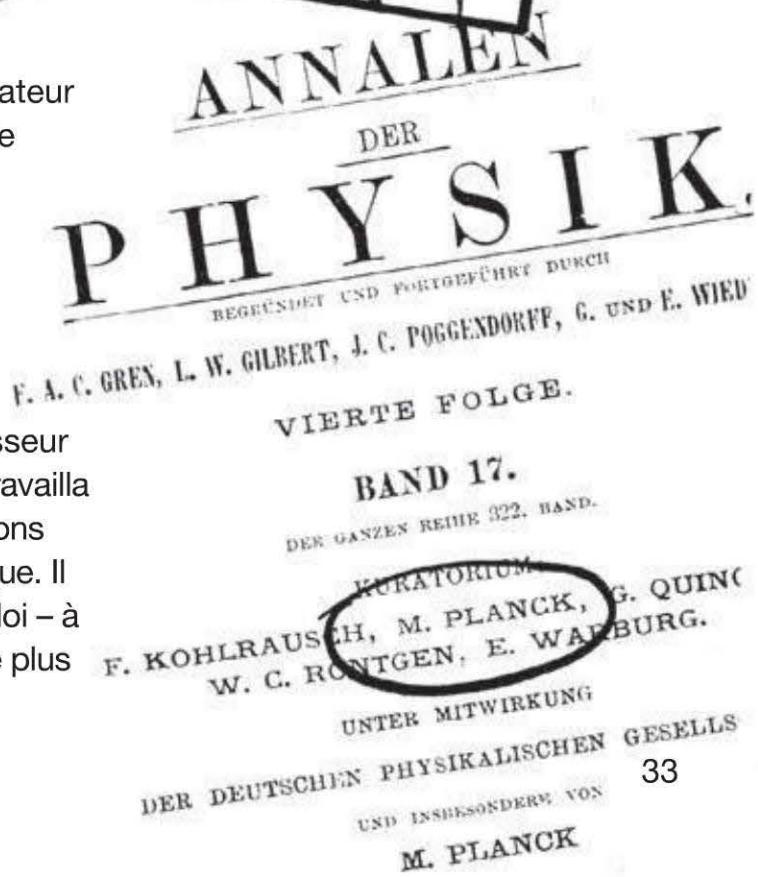


Entrée en scène de Max Planck

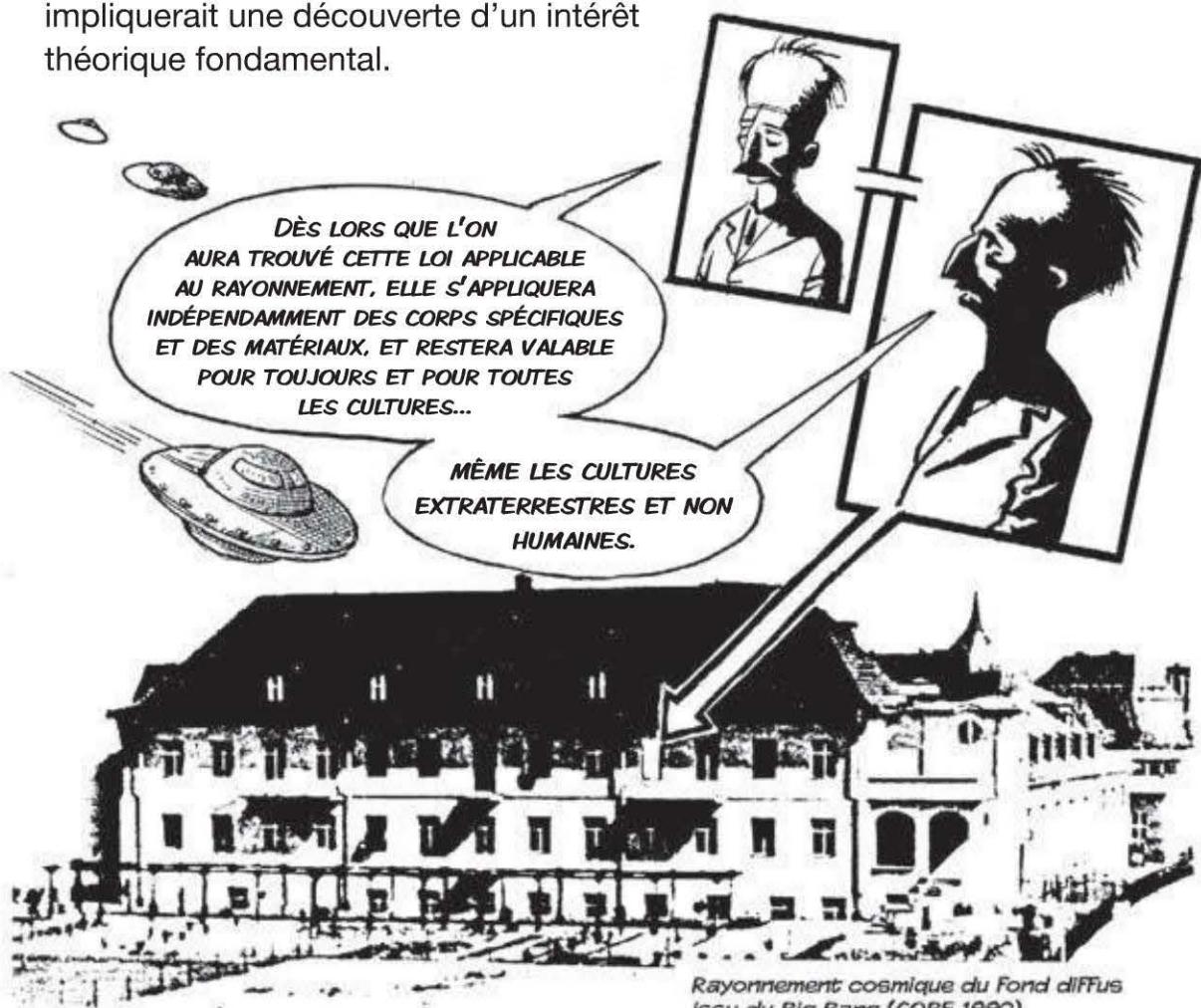
L'histoire de Planck démarre dans le Département de physique de l'Institut Kaiser-Wilhelm, à Berlin, juste avant le début du xx^e siècle.



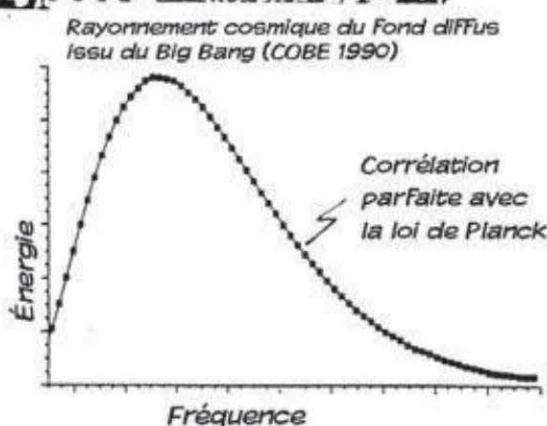
Planck était un membre très conservateur de l'Académie royale des sciences de Prusse, imprégné de méthodologie traditionnelle de la physique classique et un ardent défenseur de la thermodynamique. En fait, depuis l'obtention de son doctorat en 1879 (année de naissance d'Einstein) et jusqu'à sa nomination comme professeur titulaire à Berlin vingt ans plus tard, il travailla presque exclusivement sur des questions relatives aux lois de la thermodynamique. Il pensait, par exemple, que la seconde loi – à propos de l'entropie – avait une portée plus large que celle admise généralement.



Planck était attiré par les aspects absous et universels de la problématique des corps noirs. Des arguments plausibles avaient indiqué qu'à l'état d'équilibre, la courbe intensité du rayonnement en fonction de la fréquence ne devrait dépendre ni de la taille, ni de la forme de la cavité, ni du choix de matériaux de ses parois. La formule recherchée ne devrait contenir que le paramètre température et les fréquences du rayonnement, identiques en théorie pour toutes cavités et toutes couleurs. Trouver cette formule impliquerait une découverte d'un intérêt théorique fondamental.



L'histoire a donné raison à Planck et à son esprit visionnaire, surpassant même sa propre pensée. En 1990, les astronomes qui se servaient des instruments à bord du satellite COBE ont réussi à mesurer le rayonnement de fond cosmologique aux confins de l'Univers (c'est-à-dire le rayonnement issu d'environ 400 000 ans après le Big Bang) et ont constaté une corrélation parfaite avec la loi du rayonnement des corps noirs de Planck (cf. http://fr.wikipedia.org/wiki/Cosmic_Background_Explorer).

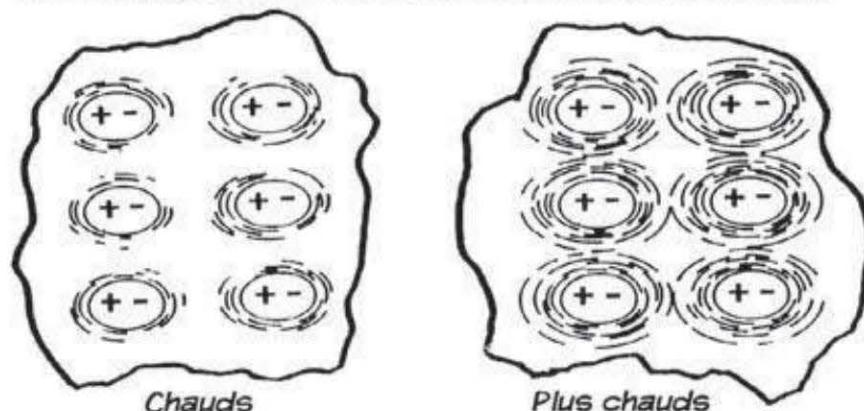


Le modèle préatomique de la matière

Planck savait que les mesures faites par ses amis **Heinrich Rubens** et **Ferdinand Kurlbaum** étaient tout à fait fiables.

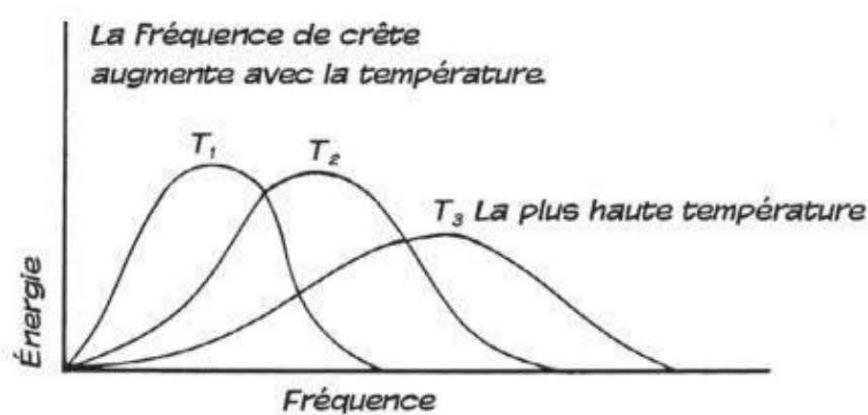


Les oscillateurs de Planck dans les parois de la cavité



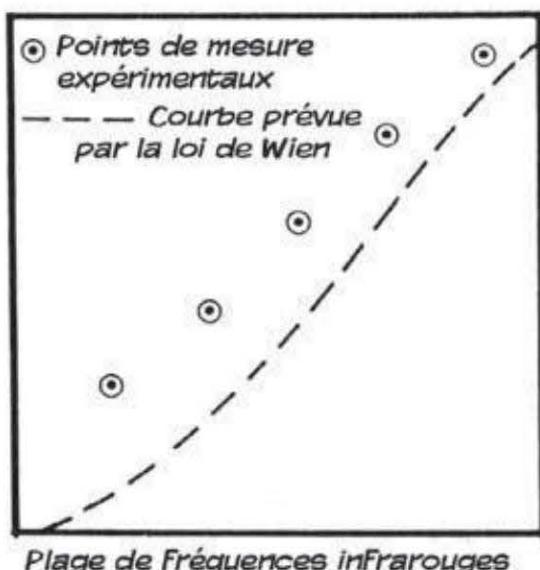
Planck a d'abord avancé l'idée de placer un ensemble d'oscillateurs dans les parois de la cavité, qui vibre sous l'influence de l'agitation thermique (**à noter: on ne savait rien à l'époque sur les atomes**).

Planck a supposé par ailleurs que toutes les fréquences possibles étaient présentes. De même, il s'attendait à ce que la **fréquence moyenne** s'élève avec la température puisque le fait de chauffer les parois ferait vibrer les oscillateurs de plus en plus vite, jusqu'au moment où l'équilibre thermique serait atteint.



La théorie électromagnétique pouvait expliquer complètement l'émission, l'absorption et la propagation du rayonnement, mais rien sur la distribution de l'énergie à l'état d'équilibre. C'était un problème thermodynamique.

Planck a fait quelques suppositions, liant l'énergie moyenne des oscillateurs à leur entropie, et est ainsi parvenu à une formule pour l'intensité du rayonnement qu'il espérait être en accord avec les résultats expérimentaux.



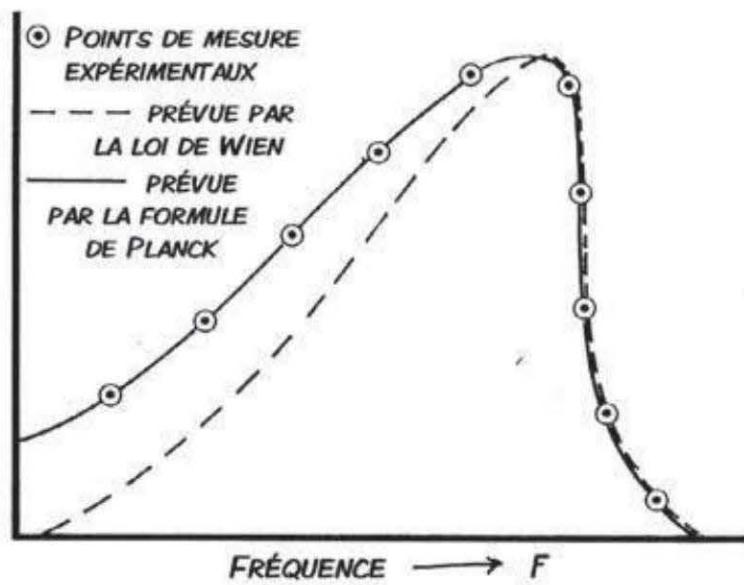
Planck a essayé de modifier sa définition de l'entropie du rayonnement, en en faisant un cas général, et a abouti à une nouvelle formule pour l'intensité du rayonnement sur tout le spectre des fréquences.



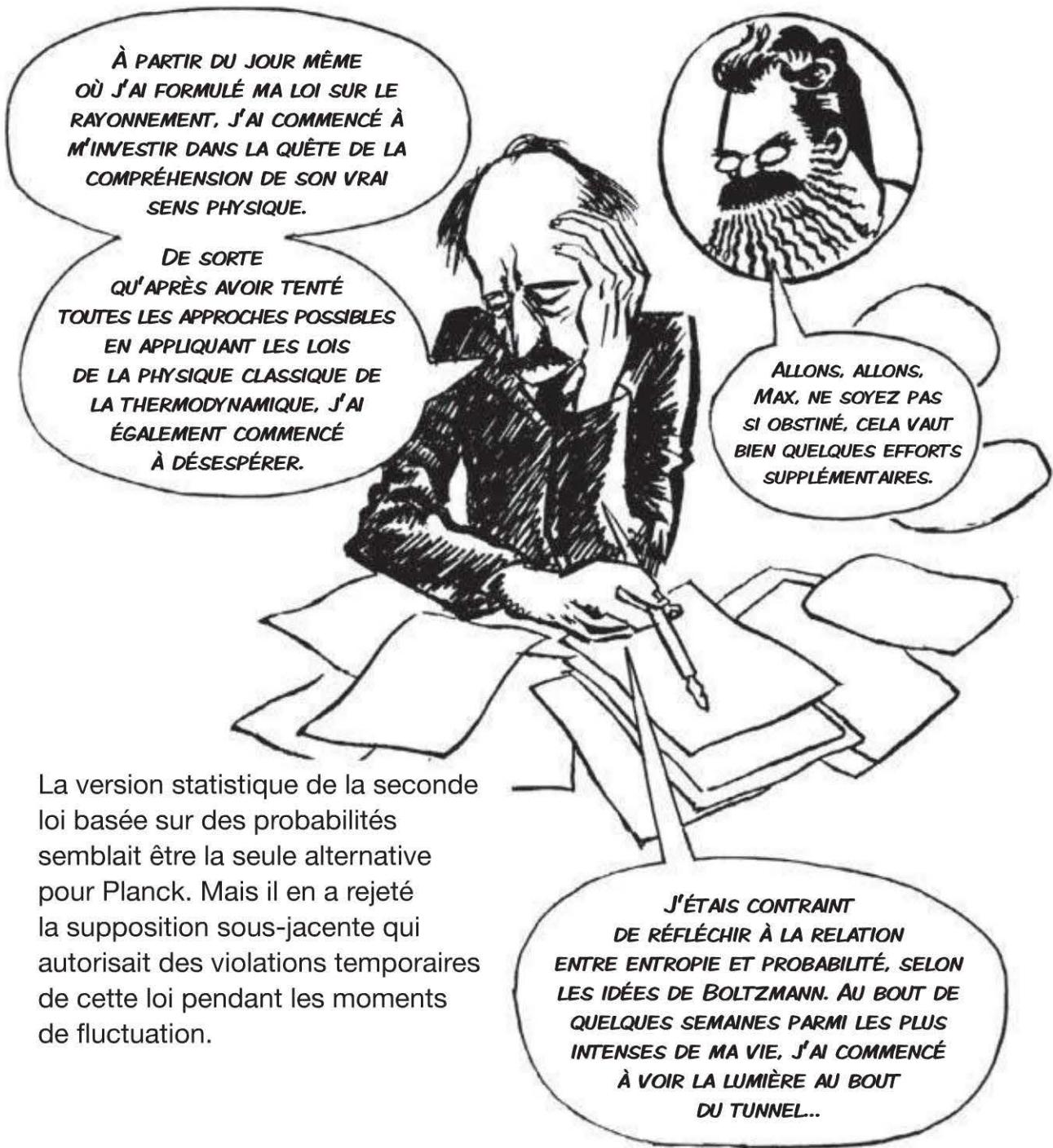
Les constantes C_1 et C_2 sont des nombres choisis par Planck pour que son équation corresponde aux données expérimentales.

Heinrich Rubens figurait parmi les participants de ce séminaire d'histoire. Il est retourné immédiatement à son domicile afin de comparer ses mesures avec celles prédictes par la formule de Planck. Il y a travaillé toute la nuit et, le lendemain, il a pu dire à Planck que la correspondance était parfaite.

Planck avait ainsi trouvé la formule correcte. Jusque-là, tout était parfait, mais Planck pouvait-il utiliser sa formule pour découvrir des lois de physique sous-jacentes ?



Le dilemme de Planck



La version statistique de la seconde loi basée sur des probabilités semblait être la seule alternative pour Planck. Mais il en a rejeté la supposition sous-jacente qui autorisait des violations temporaires de cette loi pendant les moments de fluctuation.

Et cette «lumière» s'écrivait ainsi:

$$S = k \log W$$

(la version de Boltzmann de la seconde loi de thermodynamique).

Pas une seule fois dans la quarantaine d'articles rédigés avant 1900, Planck n'avait utilisé, encore moins cité, la formulation statistique de la seconde loi.

Le découpage en tranches de l'énergie

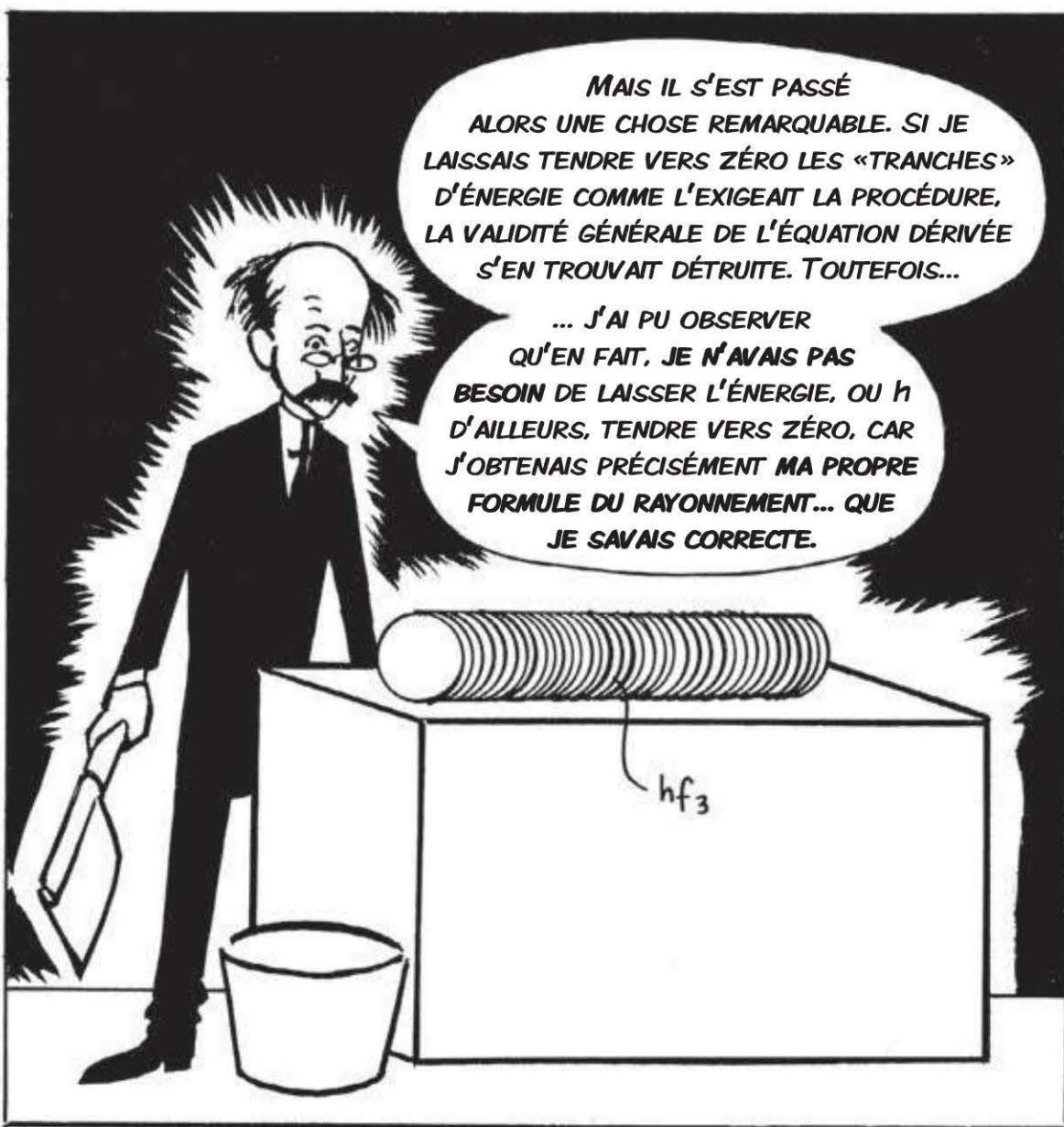
Ainsi, Planck a appliqué trois idées de Boltzmann sur l'entropie :

- 1) son équation statistique pour **calculer la valeur** de l'entropie;
- 2) la condition supposant que l'entropie est maximale (c'est-à-dire totalement désordonnée) à l'état d'équilibre;
- 3) sa technique de comptage pour évaluer la probabilité **W** dans l'équation d'entropie.

Pour calculer la probabilité liée à chaque disposition possible, Planck a suivi la méthode de Boltzmann qui consistait à découper l'énergie des oscillateurs en **tranches finies**, mais arbitrairement petites. Ainsi, l'énergie totale pouvait s'écrire $E = N e$ où N est un nombre entier et e une quantité arbitrairement petite d'énergie. e devient graduellement infiniment petite dès lors que le nombre de morceaux tend vers l'infini, ce qui est cohérent avec le protocole mathématique.



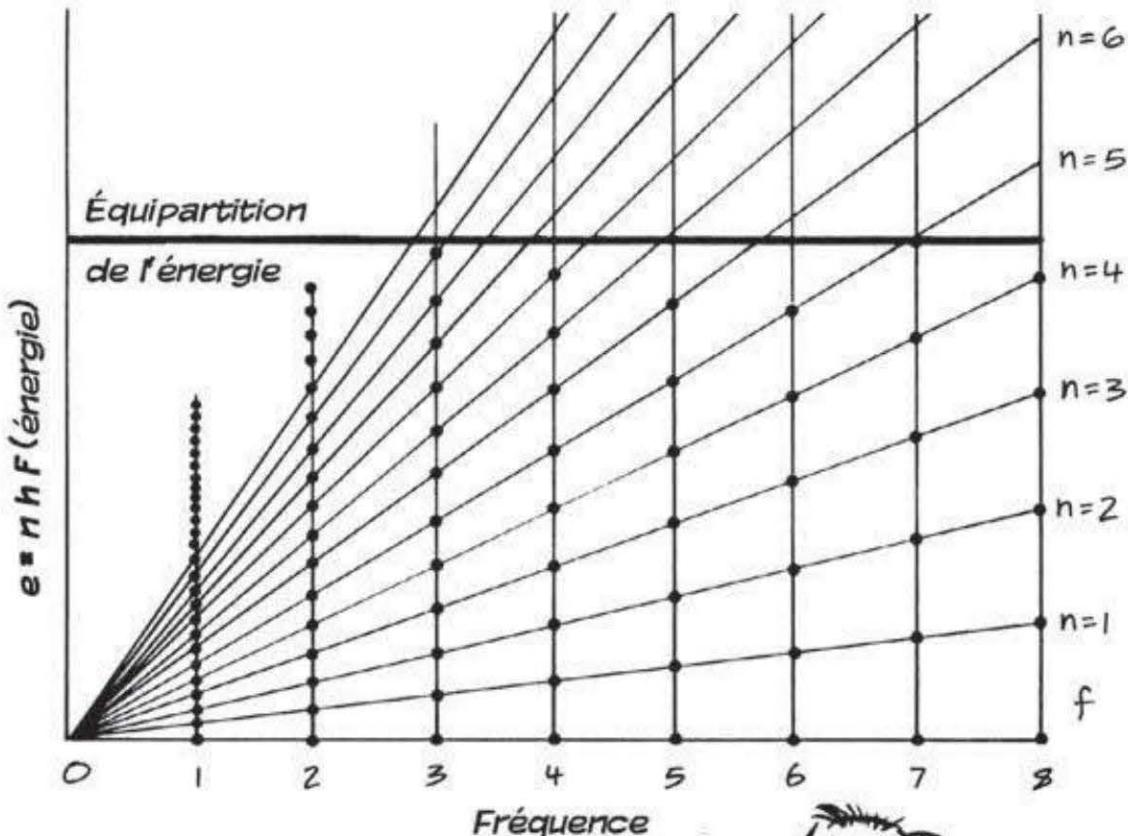
Le quantum d'énergie



Eurêka! Planck venait de découvrir par hasard une méthode mathématique qui, enfin, offrait une base théorique pour sa loi de rayonnement expérimentale – **mais seulement si l'énergie est de nature discontinue**.

Même si Planck n'avait aucune raison de proposer un tel concept (la discontinuité), il l'a admis, faute de mieux. Il était ainsi obligé d'avancer le postulat que la quantité $e = h f$ devait avoir une valeur finie, et donc que h ne pouvait être égale à zéro.

Si cela se révèle juste, on doit en conclure qu'il est impossible pour l'oscillateur d'absorber ou d'émettre l'énergie sur un spectre continu. Il doit en absorber ou en perdre de manière discontinue, en petites unités indivisibles de $e = h f$, que Planck a appelé des «quanta d'énergie».



À PRÉSENT, VOUS POUVEZ VOIR POURQUOI LA THÉORIE CLASSIQUE NE MARCHE PAS DANS LA PARTIE DES HAUTES FRÉQUENCES DE LA COURBE DE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR. DANS CETTE PLAGE, EN EFFET, LES QUANTA SONT SI GRANDS ($e = h f$) QUE SEULEMENT QUELQUES MODES DE VIBRATION SERAIENT EXCITÉS.

AVEC UN NOMBRE DÉCROISSANT DE MODES POUVANT ÊTRE EXCITÉS, LES OSCILLATEURS SONT POUR AINSI DIRE INHIBÉS ET LE RAYONNEMENT TEND VERS ZÉRO À L'EXTRÉMITÉ DES HAUTES FRÉQUENCES. LA CATASTROPHE DE L'ULTRAVIOLET N'A PAS LIEU.



La relation de Planck en ce qui concerne les quanta inhibe l'équipartition de l'énergie et les modes, par conséquent, n'ont pas tous la même énergie totale. C'est pour cette raison d'ailleurs que nous n'attrapons jamais de coup de soleil en tenant une tasse de café. (À méditer!)

L'approche classique de Rayleigh-Jeans fonctionne bien aux basses fréquences, plages où tous les modes peuvent être excités. Aux hautes fréquences, en revanche, et même si de nombreux modes de vibration sont possibles (on se rappelle qu'il est plus facile d'amasser plus d'ondes courtes dans la même boîte), il y en a peu d'excités dans le lot car cela exige trop d'énergie pour créer un quantum, puisque $e = h f$.

Au cours de sa promenade très matinale du 14 décembre 1900, Planck a informé son fils qu'il pensait peut-être avoir publié un travail aussi déterminant que l'œuvre de Newton. Le même jour, il a présenté ses travaux à la Société de physique de Berlin, marquant ainsi la naissance de la physique quantique.

Il lui a fallu moins de deux mois pour trouver une explication à sa propre formule sur le rayonnement des corps noirs. Ironie du sort, cette découverte était accidentelle, survenue après l'application d'une procédure mathématique incomplète. **En somme, un départ ignominieux pour l'une des plus grandes révolutions de l'histoire de la physique.**

C'est de ce «commencement» que nous comprenons, d'une part, pourquoi il faut appliquer des règles statistiques aux atomes et, d'autre part, pourquoi les électrons qui entourent l'atome ne plongent pas en spirale vers le noyau.

Début 1901, la constante **h**, connue de nos jours comme la constante de Planck, est imprimée pour la première fois. Ce nombre est petit:

$$h = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 006\ 626$$

mais ce n'est pas zéro! Sinon, nous ne pourrions jamais nous installer devant un feu. En réalité, c'est tout l'Univers qui serait différent. *Soyons reconnaissants pour les petites choses de la vie.*

En dépit des aspects importants, voire révolutionnaires, de la formule de rayonnement des corps noirs, il peut paraître surprenant qu'il y en ait eu peu d'échos dans les premières années du xx^e siècle. Et, plus étonnant encore, Planck lui-même n'était pas convaincu de sa validité.

*J'ÉTAIS SI SCEPTIQUE QUANT
À L'UNIVERSALITÉ DE LA LOI D'ENTROPIE
DE BOLTZMANN QUE J'AI PASSÉ PLUSIEURS
ANNÉES À EXPLIQUER MES TRAVAUX DE
FAÇON MOINS RÉVOLUTIONNAIRE.*

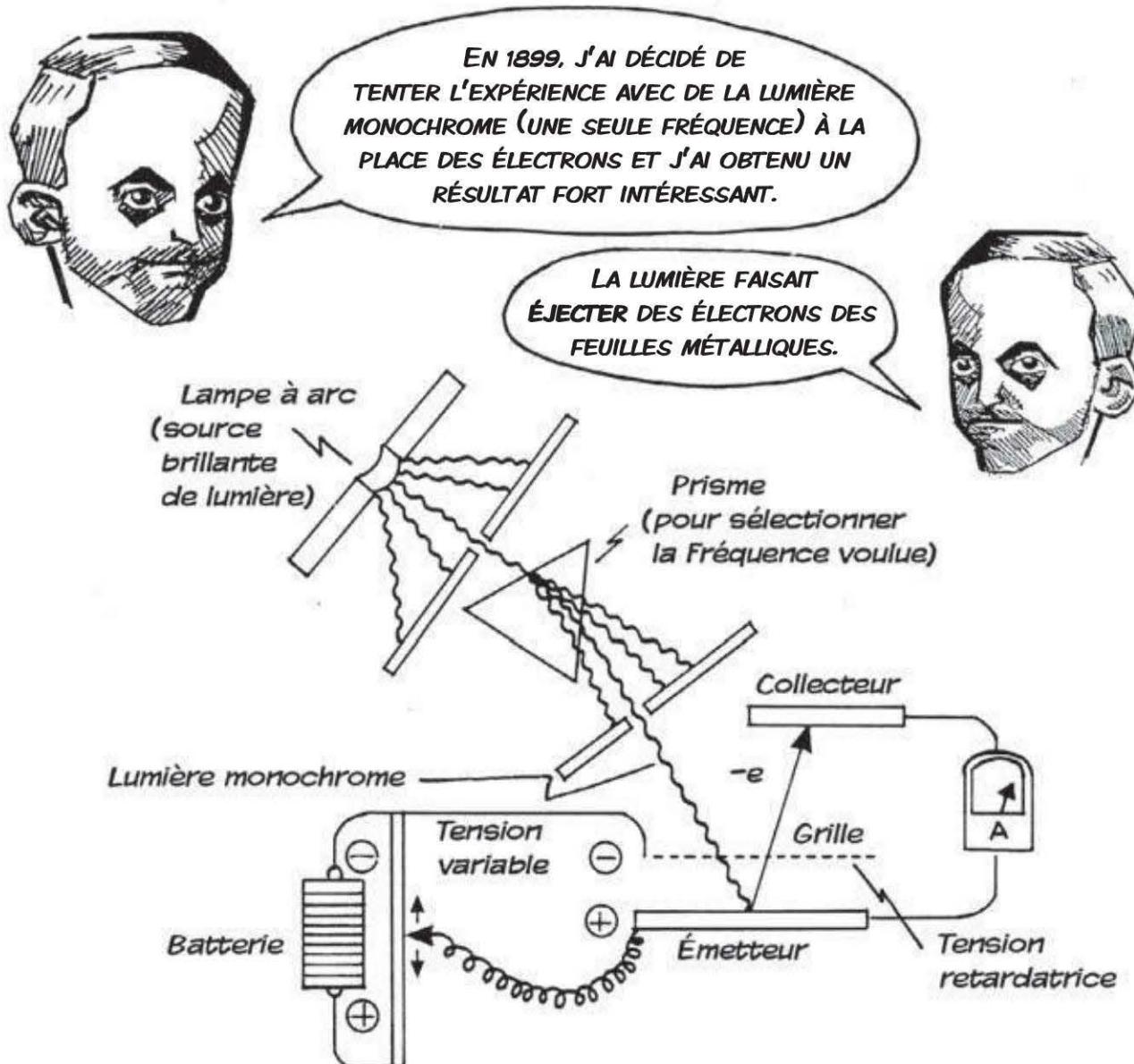


*NONOBSTANT,
LA THÉORIE DE LA PHYSIQUE
QUANTIQUE ÉTAIT NÉE.*

Nous pouvons maintenant passer à la seconde expérience non expliquée par la physique classique. Elle est plus simple, mais a donné lieu, cependant, à une profonde explication.

L'effet photoélectrique

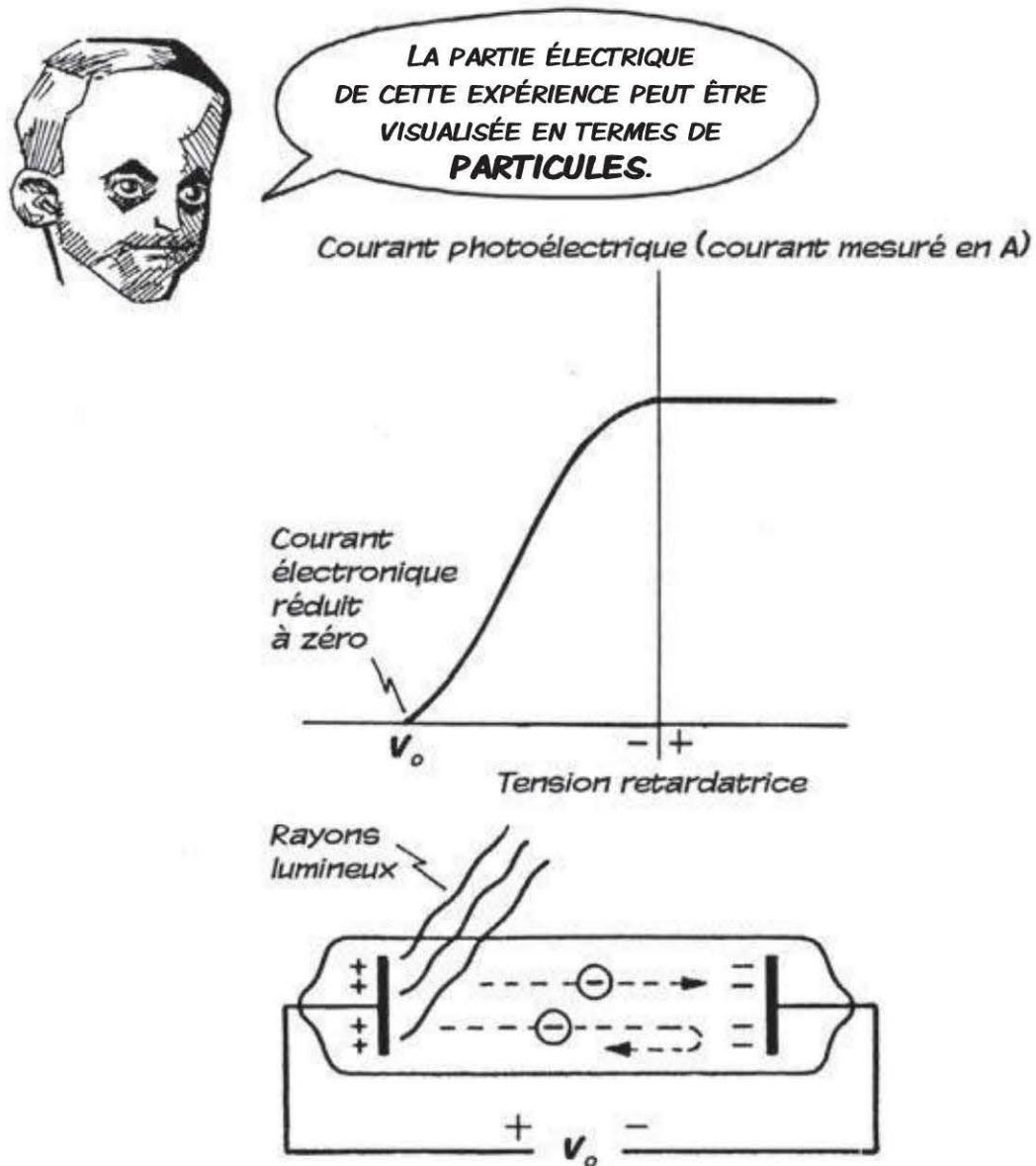
Pendant que Max Planck se débattait avec son problème du rayonnement des corps noirs, un autre physicien allemand, **Philipp Lenard** (1862–1947), bombardait de *rayons cathodiques* (bientôt identifiés comme étant constitués d'électrons) de minces feuilles métalliques.



Bien que cet effet ait été remarqué 10 ans plus tôt par **Heinrich Hertz**, Lenard pouvait maintenant mesurer certaines propriétés de ces photoélectrons au moyen d'un simple circuit électrique.

Les électrons éjectés de la surface métallique proviennent de l'illumination de la plaque appelée *émetteur* et sont absorbés par une seconde plaque appelée *collecteur*. Le courant photoélectrique est mesuré au moyen d'un instrument (ampèremètre) sensible désigné par A ci-dessus. La tension électrique (ou *voltage*) entre émetteur et collecteur peut être modifiée, et a ainsi un effet puissant sur le courant mesuré.

Le courant observé décroît fortement dès que l'on applique une tension «retardatrice», qui a pour effet de rendre l'électrode du collecteur négative par rapport à l'émetteur. (Les électrons portent une charge négative et sont donc repoussés par une tension négative.) Pour une valeur définie de cette tension retardatrice, notée V_0 dans le diagramme, le courant photoélectrique est totalement annulé.



Les électrons éjectés sous l'effet de la lumière incidente quittent la plaque cible avec une certaine énergie cinétique et commencent à la perdre de façon continue, se déplaçant contre le champ de la tension négative entre les plaques du collecteur et de l'émetteur.

Les électrons «collectés» et qui s'additionnaient au courant mesuré devaient avoir (au moment de leur émission) une énergie plus grande que qV_0 (q étant la charge de l'électron). Il s'agit là d'une relation bien connue pour noter l'énergie d'un électron sous l'influence d'une tension donnée.

L'interprétation classique

Une interprétation simple aboutirait à la conclusion que les électrons émis doivent acquérir leur énergie cinétique des **rayons lumineux** qui tombent sur la surface métallique.

Ce point de vue classique présuppose que les rayons de lumière frappent la surface métallique comme les vagues déferlent sur une plage de galets (les électrons sont perturbés comme le seraient les galets). Il est évident que **plus l'illumination est intense** (c'est-à-dire brillante), **plus elle transférera de l'énergie aux électrons**.



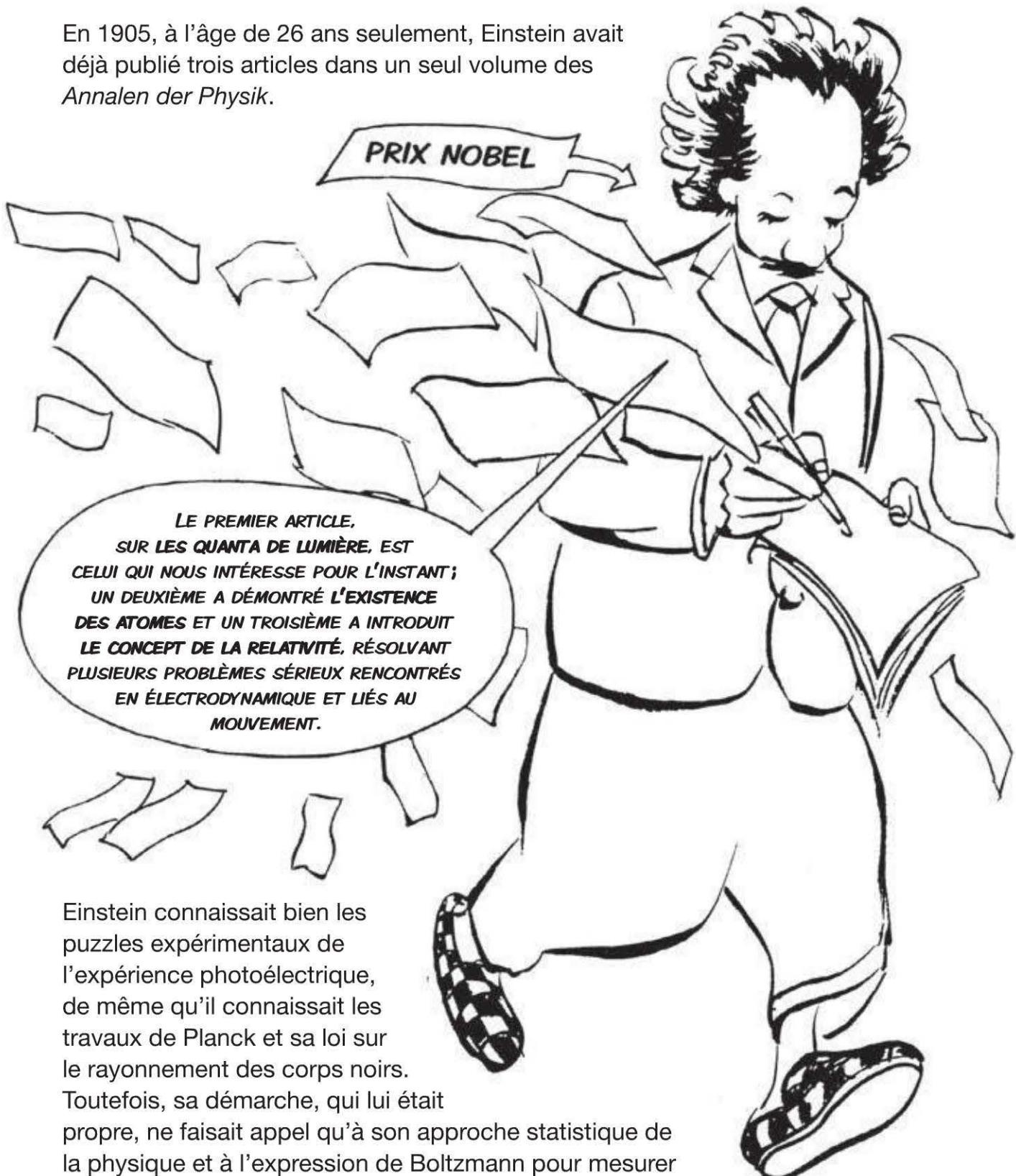
CE N'EST PAS CE
QUE J'AI TROUVÉ. EN 1902, J'AI
DÉCOUVERT QUE LES ÉNERGIES DES
ÉLECTRONS – TELLES QUE MESURÉES AU MOYEN
DES TENSIONS RETARDATRICES – ÉTAIENT
TOTALEMENT INDÉPENDANTES DE
L'INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE.

D'autres expériences ont révélé encore un effet non expliqué. Il existait une fréquence de **seuil** en dessous duquel **aucun photoélectron** n'était éjecté, et ce indépendamment de l'intensité des rayons lumineux. Un constat très étrange et une véritable source d'embarras pour les physiciens classiques.

Entrée en scène d'Albert Einstein

Cette fois, ce n'est pas un professeur chevronné et titulaire qui a résolu le problème, mais un jeune clerc travaillant au Bureau des brevets suisses, à Berne.

En 1905, à l'âge de 26 ans seulement, Einstein avait déjà publié trois articles dans un seul volume des *Annalen der Physik*.



Einstein connaissait bien les puzzles expérimentaux de l'expérience photoélectrique, de même qu'il connaissait les travaux de Planck et sa loi sur le rayonnement des corps noirs. Toutefois, sa démarche, qui lui était propre, ne faisait appel qu'à son approche statistique de la physique et à l'expression de Boltzmann pour mesurer l'entropie d'un ensemble de particules.

Dans un petit appartement, au Kramergasse 49, Berne

Einstein, avec sa femme Mileva (qui avait suivi une formation d'ingénierie) et leur jeune fils Hans Albert.

MILEVA, LIEBCHEN, JE VOULAIIS
TE MONTRER MES DERNIERS CALCULS. JE PENSE
QUE CELA AURA UN IMPACT CONSIDÉRABLE. TOUT
D'ABORD, TE SOUVIENS-TU DE LA LOI IMPORTANTE DE
BOLTZMANN CONCERNANT L'ENTROPIE D'UN SYSTÈME
DE PARTICULES SELON SA PROBABILITÉ,
 $S = k \log W\dots$

$S = k \log W\dots$

OUI, L'ÉQUATION QUE DÉTESTAIT
PLANCK MAIS QU'IL A BIEN FALLU
UTILISER POUR RÉSOUVRIR LE PROBLÈME DU
RAYONNEMENT DES CORPS NOIRS.

$$E = \alpha f^3 \exp(-\beta f/T)$$

fréquence constante (*bêta*)
 \ |
 \ constante (*alpha*) température

TU TE SOUVIENS PEUT-ÊTRE AUSSI DE
 LA FORMULE DE WILHELM WIEN, LE COLLÈGUE DE
 PLANCK À BERLIN, QUE TOUT LE MONDE S'ACCORDAIT
 À TROUVER JUSTE POUR CE QUI CONCERNE LA PLAGE
 DES HAUTES FRÉQUENCES DU CORPS NOIR.

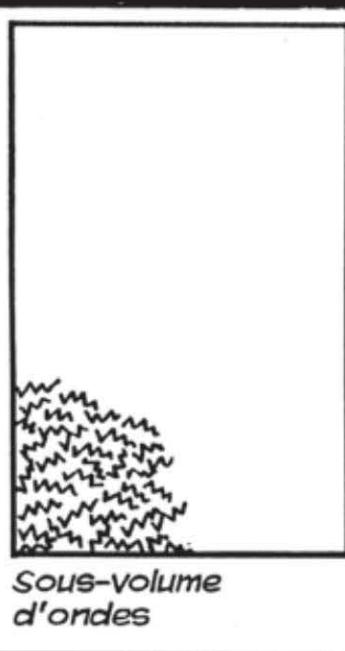
OUI, EN EFFET. MAIS LA
 FORMULE DE PLANCK N'ÉTAIT-ELLE PAS
 RÉDUCTIBLE À CELLE DE WIEN S'AGISSANT
 DES HAUTES FRÉQUENCES?



BRAVO
 MILEVA!

CEPENDANT,
 JE NE VEUX PAS
 ME SERVIR DE LA
 FORMULE THÉORIQUE
 DE PLANCK.

JE PRÉFÉRERAIS BASER
 MES TRAVAUX SUR LA LOI EMPIRIQUE
 DE WIEN, LAQUELLE S'ACCORDE SI BIEN
 AVEC LES VALEURS DES EXPÉRIMENTATIONS
 AUX HAUTES FRÉQUENCES. POUR CELA,
 J'EMPLOIE UNE MÉTHODE
 PHÉNOMÉNOLOGIQUE PLUTÔT QU'UNE
 APPROCHE STRICTEMENT
 THÉORIQUE.



J'AI UTILISÉ LA MÉTHODE DE FLUCTUATIONS QUE J'AI DÉVELOPPÉ RÉCEMMENT POUR CALCULER LA VARIATION D'ENTROPIE SI UN SYSTÈME EST SOUDAINEMENT COMPRESSÉ DANS UN PETIT SOUS-VOLUME DE SON VOLUME TOTAL

EN ME SERVANT DE LA FORMULE DE WIEN, IL EST TRÈS FACILE DE CALCULER LA BAISSE GLOBALE D'ENTROPIE POUR UN RAYONNEMENT MONOCHROME (C'EST-À-DIRE D'UNE SEULE FRÉQUENCE) QUI SE TROUVE COMPRIMÉ DANS UN PETIT «SOUS-VOLUME». TU REMARQUERAS, CHÉRIE, QUE CETTE BAISSE RESSEMBLE BEAUCOUP À CELLE DE L'ENTROPIE QUI ACCOMPAGNE LA CONTRACTION D'UN VOLUME DONNÉ DE PARTICULES D'UN GAZ IDÉAL.

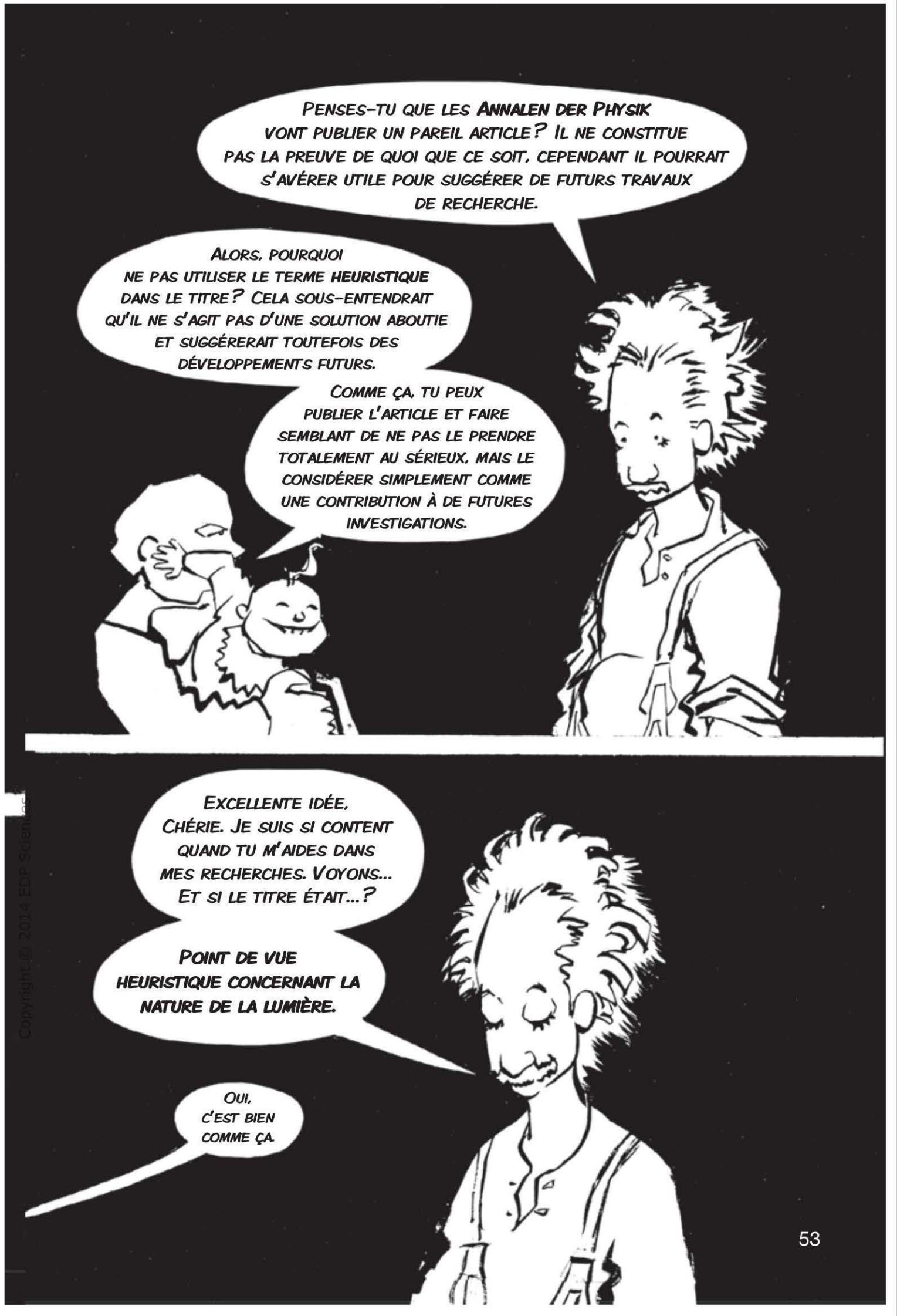


MAIS, MA CHÈRE MILEVA, JE N'AI RIEN PRÉSUPPOSÉ QUANT À LA STRUCTURE DES PARTICULES OU AUX LOIS DE MOUVEMENT. JE ME SUIS SEULEMENT SERVI DE LA FORMULE D'ENTROPIE $S = k \log W$ PRISE DANS LA FORMULATION DE BOLTZMANN POUR LA SECONDE LOI. LE RÉSULTAT – EN CE QUI CONCERNE LE RAYONNEMENT – EST TRÈS PROCHE DE CELUI D'UN GAZ COMPRIMÉ, DE SORTE QUE JE PEUX MAINTENANT METTRE EN ÉQUATION LES DEUX EXPOSANTS POUR PARVENIR À UNE RÉPONSE SIMPLE...

$$E = n k \beta f$$

MON HYPOTHÈSE DEVIENT ALORS...
DANS LES LIMITES DE VALIDITÉ DE LA LOI DE
WIEN (C'EST-À-DIRE LES HAUTES FRÉQUENCES) : LE
RAYONNEMENT SE COMPORE COMME S'IL ÉTAIT CONSTITUÉ
DE QUANTA INDÉPENDANTS LES UNS DES AUTRES D'ORDRE
DE GRANDEUR $k \beta f$, AUTREMENT DIT COMME DES
PARTICULES DE LUMIÈRE.





PENSES-TU QUE LES *ANNALEN DER PHYSIK*
VONT PUBLIER UN PAREIL ARTICLE ? IL NE CONSTITUE
PAS LA PREUVE DE QUOI QUE CE SOIT, CEPENDANT IL POURRAIT
S'AVÉRER UTILE POUR SUGGÉRER DE FUTURS TRAVAUX
DE RECHERCHE.

ALORS, POURQUOI
NE PAS UTILISER LE TERME HEURISTIQUE
DANS LE TITRE ? CELA SOUS-ENTENDRAIT
QU'IL NE S'AGIT PAS D'UNE SOLUTION ABOUTIE
ET SUGGÉRERAIT TOUTEFOIS DES
DÉVELOPPEMENTS FUTURS.

COMME ÇA, TU PEUX
PUBLIER L'ARTICLE ET FAIRE
SEMBLANT DE NE PAS LE PRENDRE
TOTALEMENT AU SÉRIEUX, MAIS LE
CONSIDÉRER SIMPLEMENT COMME
UNE CONTRIBUTION À DE FUTURES
INVESTIGATIONS.

EXCELLENTE IDÉE,
CHÉRIE. JE SUIS SI CONTENT
QUAND TU M'AIDES DANS
MES RECHERCHES. VOYONS...
ET SI LE TITRE ÉTAIT... ?

POINT DE VUE
HEURISTIQUE CONCERNANT LA
NATURE DE LA LUMIÈRE.

OUI,
C'EST BIEN
COMME ÇA.

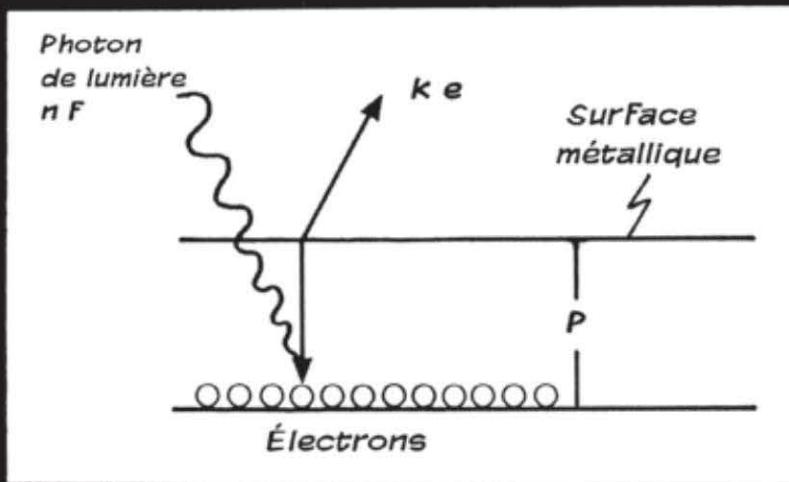
L'explication d'Einstein au sujet de l'effet photoélectrique

L'article publié par Einstein en 1905 démontre que tous les aspects intrigants de l'effet photoélectrique peuvent s'expliquer facilement dès lors que l'on admet que le rayonnement lumineux incident est en fait constitué de particules (les photons). Si les photons transfèrent leur énergie à la cible métallique, une seule image, simple de surcroît, devient possible. Examinons cela de plus près...



SI JE PRÉSUME
QUE LA LUMIÈRE INCIDENTE
SUR LA CIBLE EST CONSTITUÉE DE
QUANTA D'ÉNERGIE (SOUS LA FORME
DE PHOTONS) D'ORDRE DE GRANDEUR
 $\hbar f$, IL EST POSSIBLE DE CONCEVOIR LE
PROCESSUS D'ÉJECTION D'ÉLECTRONS
COMME SUIT. LES QUANTA D'ÉNERGIE
PÉNÈTRENT LA COUCHE SUPERFICIELLE
DE L'ÉLECTRODE CIBLE. L'ÉNERGIE EST
TRANSFORMÉE, AU MOINS PARTIELLEMENT,
EN ÉNERGIE CINÉTIQUE, S'AJOUTANT
À CELLE DES ÉLECTRONS DONT
QUELQUES-UNS SONT
AINSII ÉJECTÉS.

La manière la plus facile d'imaginer la scène est de supposer que le quantum de lumière transfère la totalité de son énergie – hf – vers l'électron, qui en perd une partie en se déplaçant vers la surface de l'électrode.



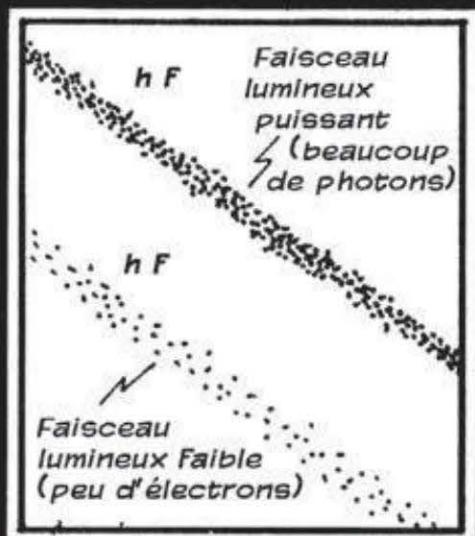
Avant d'être éjecté, chaque électron doit accomplir une certaine quantité de travail, notée P – caractéristique du métal de la cible et suffisante pour atteindre l'espace non métallique. Les électrons quittant le métal avec la plus grande vitesse seront ceux placés près de la surface, qui ont donc un minimum de travail à fournir pour se libérer du métal. L'énergie cinétique des électrons s'écrira...

L'ÉNERGIE CINÉTIQUE = $h F$
 (ÉNERGIE DU PHOTON INCIDENT) MOINS
 P (LE TRAVAIL NÉCESSAIRE POUR
 QUITTER LE MÉTAL).

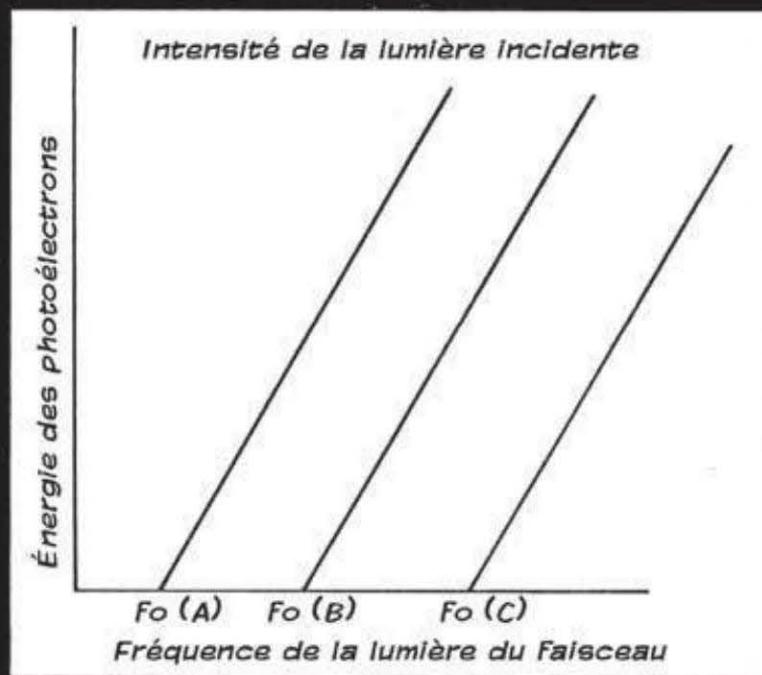
Si la plaque cible doit être portée à une tension V_0 pour pouvoir contrer l'énergie cinétique et réduire le courant électronique à zéro (c'est-à-dire y compris les électrons les plus énergiques), il s'ensuit que

$$q V_0 = h F - P$$

OÙ q DÉSIGNE LA CHARGE PORTÉE PAR L'ÉLECTRON.



Einstein avait ainsi élaboré une équation très simple pour ces photoélectrons qui se prêtait à une validation en laboratoire. De plus, puisque chaque interaction donnait lieu à la même quantité d'énergie transférée du photon vers l'électron, on pouvait expliquer assez facilement l'observation selon laquelle les énergies des électrons ne correspondaient pas aux changements d'intensité du faisceau lumineux. L'intensité joue sur le nombre de photons et donc sur la valeur du courant d'électrons, mais n'affecte en rien la tension de seuil V_0 , fixée par la seule fréquence.

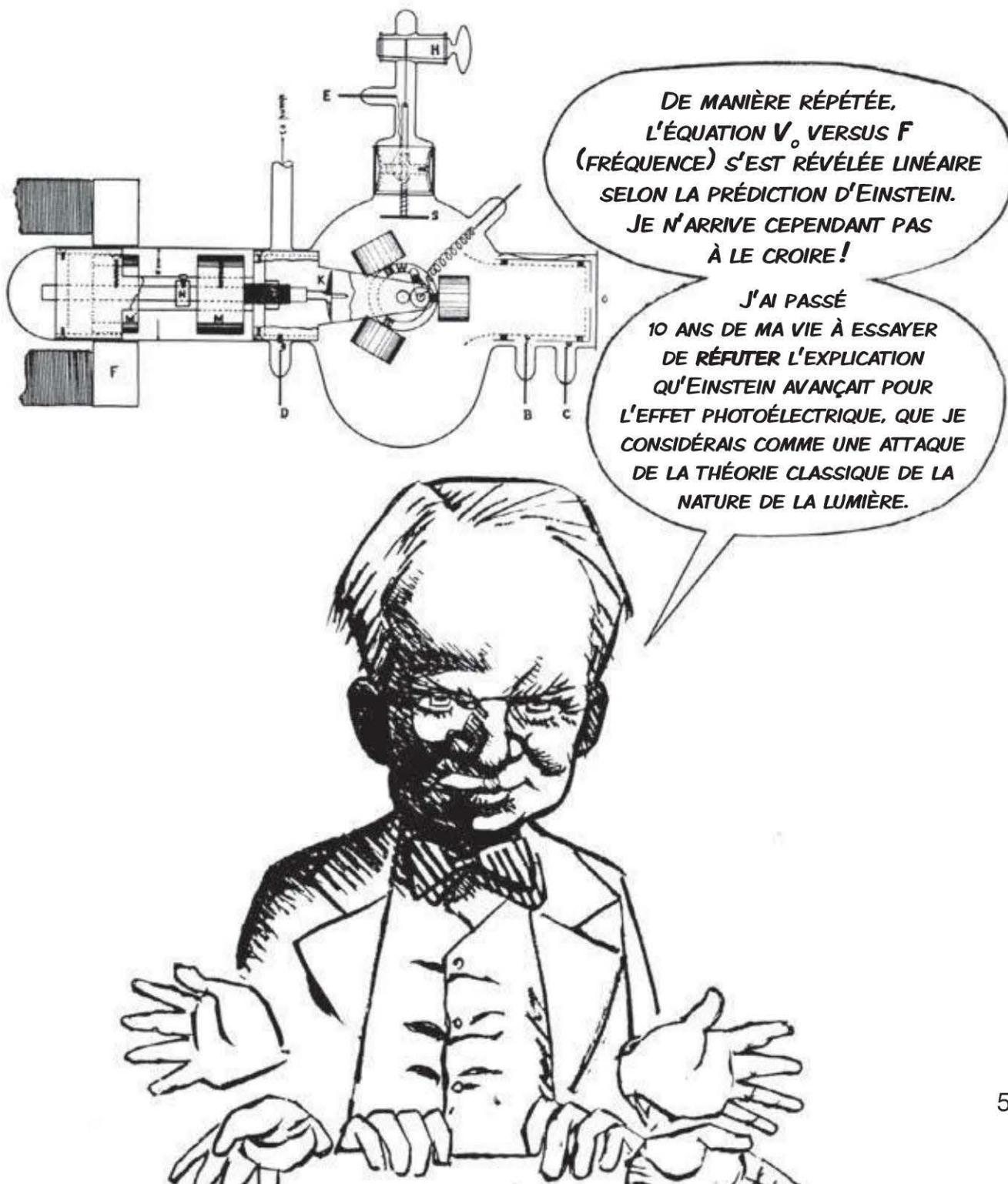


Il apparaît clairement que la conséquence de ces arguments et équations simples est que la tension retardatrice maximale V_0 est une fonction linéaire de la fréquence de la lumière incidente. Ainsi, si l'on pouvait – selon la méthodologie bien établie et respectée – vérifier cette relation linéaire (ligne droite), cela apporterait une preuve capitale du concept d'Einstein sur les photons. Ces tests expérimentaux devraient mesurer V_0 , la tension de seuil, à différentes fréquences de lumière et le graphique des résultats montrerait ou non leur linéarité.

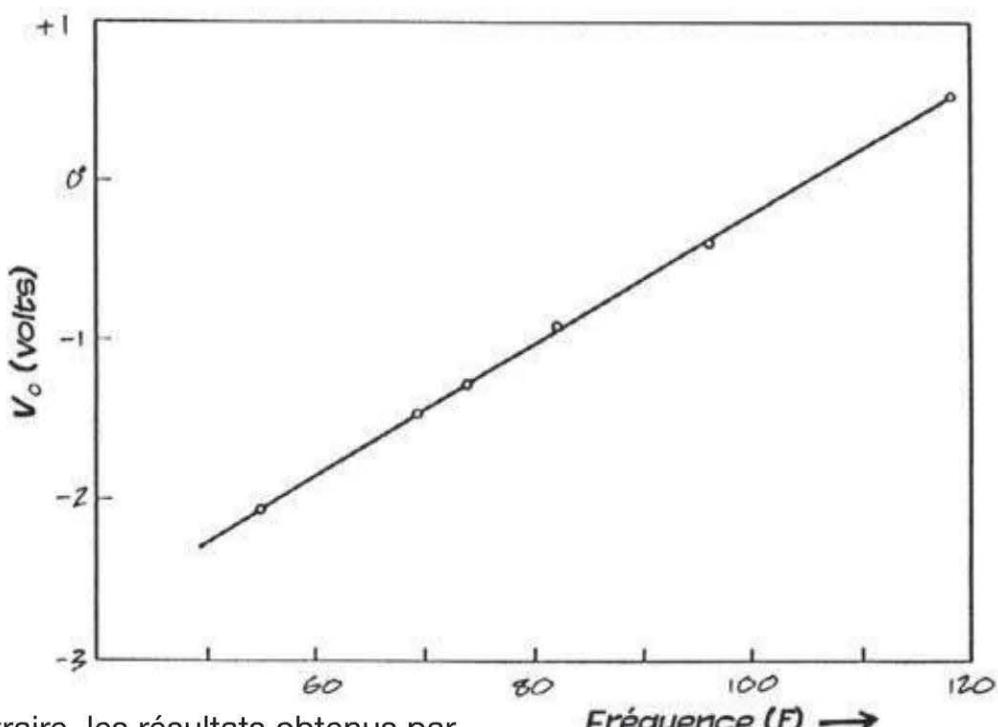
Millikan: physicien classique à la tête dure

De 1912 à 1917, **Robert A. Millikan** (1868–1953), qui travaillait aux laboratoires Ryerson, à l'université de Chicago, a soumis l'équation d'Einstein à des tests de linéarité. Pour ses cibles, Millikan a choisi plusieurs métaux, y compris le sodium, hautement réactif, et les a illuminés par des sources lumineuses de fréquences différentes.

Son protocole technique était irréprochable ; il allait jusqu'à gratter la surface des cibles pour en retirer les couches superficielles oxydées qui auraient pu affecter les mesures. **À chaque expérience, il obtenait bien des résultats linéaires...** mais il n'en était pas moins contrarié.



Les résultats de Millikan



Au contraire, les résultats obtenus par Millikan n'ont fait que renforcer l'explication d'Einstein, avec ses données remarquablement précises et une linéarité presque parfaite. En fait, ses travaux lui ont valu d'être, à la fin, lauréat du prix Nobel.



L'HYPOTHÈSE SOUS-JACENTE
ÉTAIT AVANCÉE UNIQUEMENT PARCE
QU'ELLE FOURNISSAIT UNE EXPLICATION PRATIQUE
DU FAIT QUE L'ÉNERGIE D'UN ÉLECTRON ÉJECTÉ EST
INDÉPENDANTE DE L'INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE...
MAIS DÉPEND DE SA FRÉQUENCE. ET JE
COMPRENDS QU'EINSTEIN LUI-MÊME EN
ARRIVE À NE PLUS L'ADMETTRE.

CONTRAIREMENT À TOUT
CE À QUI JE M'ATTENDAIS, JE SUIS
BIEN OBLIGÉ À PRÉSENT D'AFFIRMER SANS
AMBIGUITÉ ET, EN DÉPIT DE SON CARACTÈRE,
SELON MOI, DÉRAISONNABLE, LA VALIDATION
EXPÉRIMENTALE DE CETTE ÉQUATION.

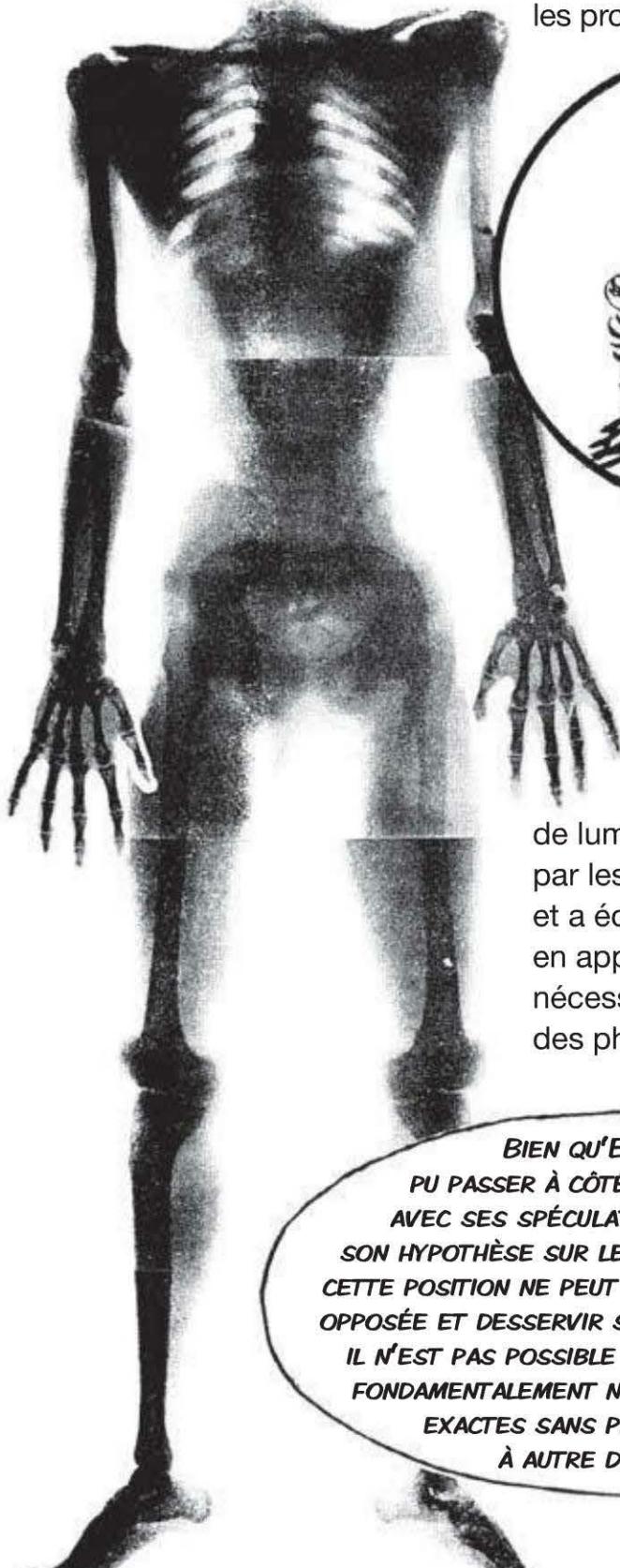
De tels «sentiments» étaient monnaie courante parmi les physiciens de la seconde décennie du xx^e siècle. De toute évidence, la prédiction du rayonnement «quantifié» ne constituait **pas un triomphe**, ni pour Planck, ni pour Einstein.





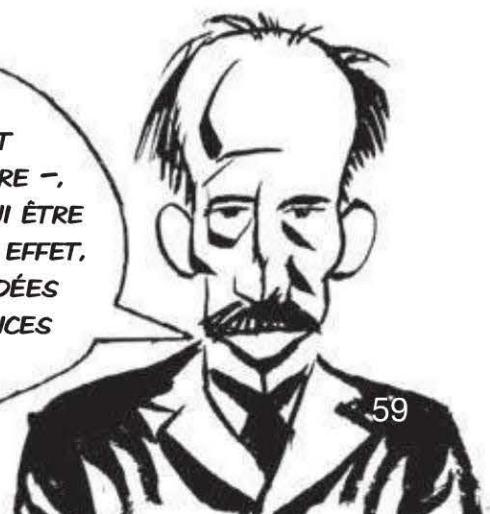
Röntgen

Au début des années 1900, des découvertes plus sensationnelles étaient en cours, dans le domaine de la radioactivité naturelle impliquant **Becquerel et les Curie** en France, de même que les rayons X miraculeux, dont l'existence a été démontrée par **Röntgen** en Allemagne. Ces découvertes ont dévié, en quelque sorte, l'attention des physiciens qui ont ainsi délaissé les problèmes du rayonnement de la lumière.



Entre-temps, Planck lui-même a non seulement réfuté les travaux d'Einstein, mais a renié ses propres travaux révolutionnaires sur les quanta de lumière. Toutefois, il était impressionné par les recherches d'Einstein sur la relativité et a écrit à l'Académie royale de Prusse pour en appuyer la candidature, tout en estimant nécessaire de s'excuser à propos la question des photons...

BIEN QU'EINSTEIN AIT
PU PASSER À CÔTÉ DE SES OBJECTIFS
AVEC SES SPÉCULATIONS - NOTAMMENT
SON HYPOTHÈSE SUR LES QUANTA DE LUMIÈRE -,
CETTA POSITION NE PEUT PAS RÉELLEMENT LUI ÊTRE
OPPOSÉE ET DESSERVIR SA CANDIDATURE. EN EFFET,
IL N'EST PAS POSSIBLE D'INTRODUIRE DES IDÉES
FONDAMENTALEMENT NOVATRICES EN SCIENCES
EXACTES SANS PRENDRE DE TEMPS
À AUTRE DES RISQUES.



Les spectres à raies intenses

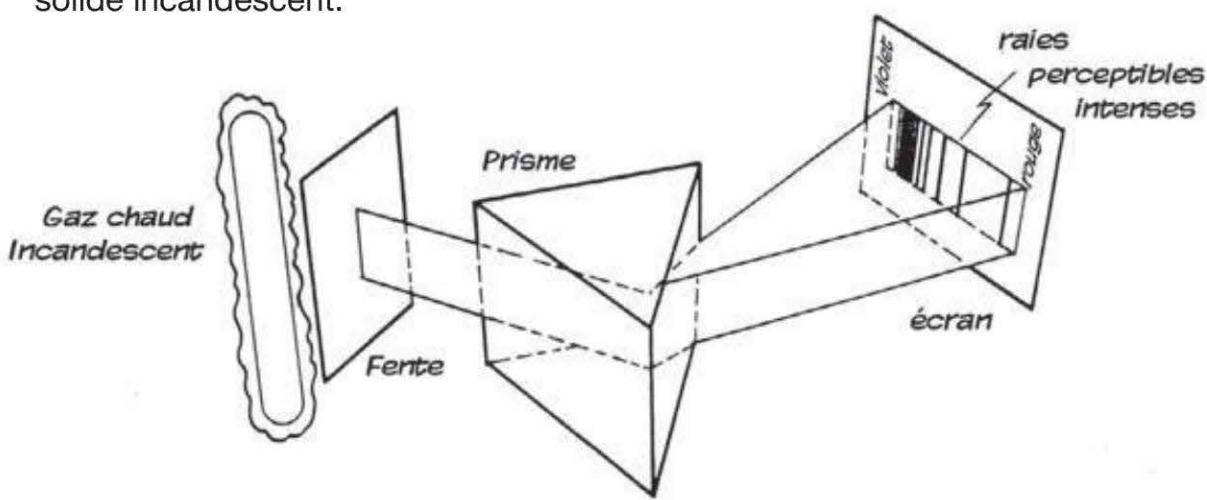
Nous pouvons à présent aborder la troisième expérience qui n'avait pas reçu jusque-là d'explication de la part des physiciens classiques : les spectres à raies intenses. Dressons, pour mémoire, leur liste :

- le **rayonnement des corps noirs** (expliqué par Planck),
- l'**effet photoélectrique** (expliqué par Einstein),
- les **spectres à raies intenses** (bientôt expliqués par Bohr).

Pendant 150 ans, des observations d'émission de lumière de gaz s'accumulèrent dans des laboratoires de physique européens. De nombreux physiciens crurent percer les secrets de l'atome. Mais comment déchiffrer cet énorme fonds de données ; autrement dit, comment créer l'ordre à partir du chaos ? Voilà le défi qui était en jeu. Des rapports existaient, dont les premiers remontaient jusqu'en 1752, à l'époque où le physicien écossais **Thomas Melville** (1726–1753) avait placé des fioles de gaz différents au-dessus d'une flamme pour en étudier la lumière émise.

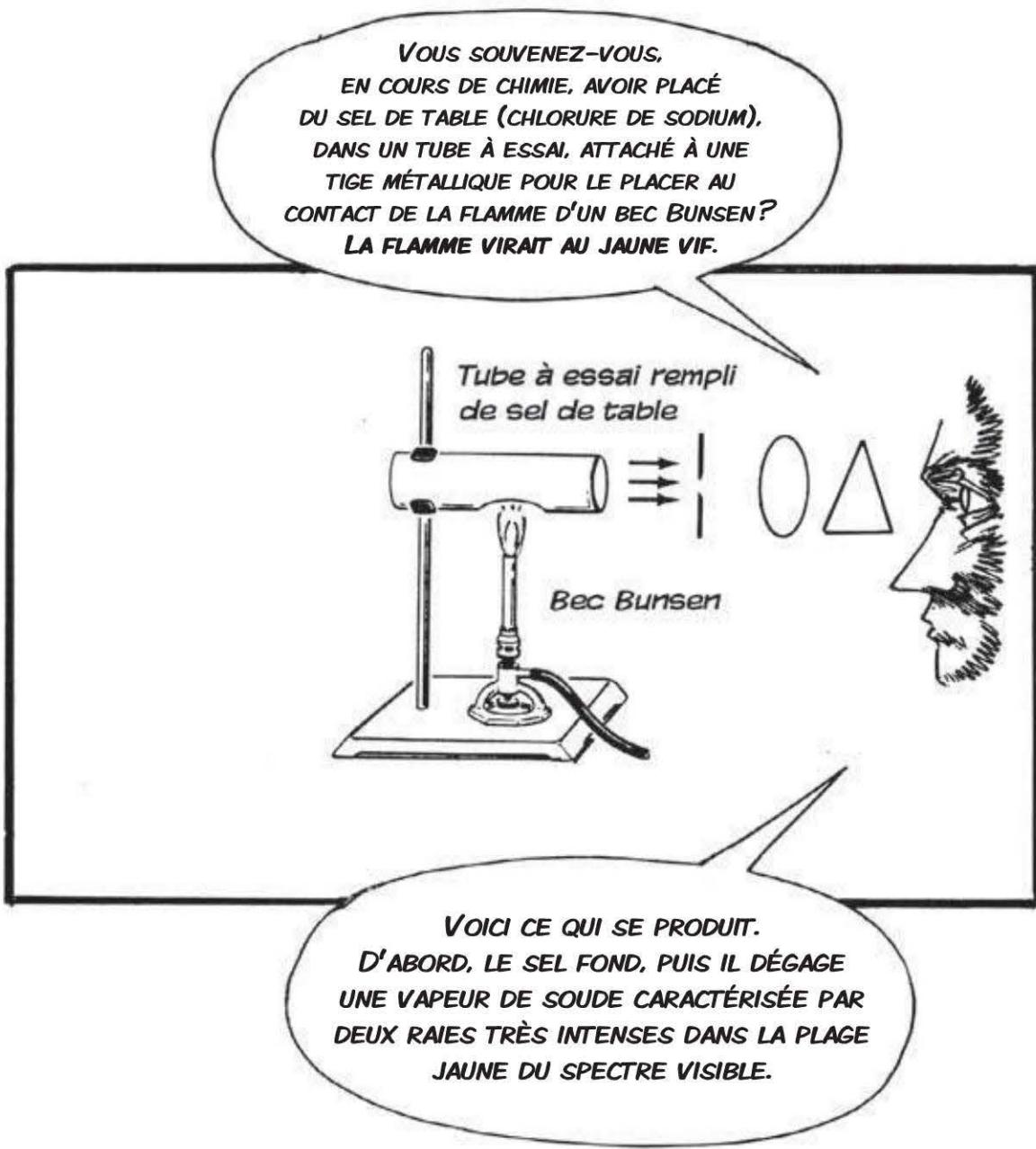
APRÈS AVOIR POSITIONNÉ
UNE PLAQUE CARTONNÉE MUNIE D'UN TROU
CIRCULAIRE ENTRE MON Oeil ET LA FLAMME, J'AI
EXAMINÉ LA CONSTITUTION DE CES DIFFÉRENTES
LUMIÈRES À L'AIDE D'UN PRISME.

Melville a fait alors une découverte assez remarquable, en ce sens que le spectre de lumière émis par un gaz chaud quand celle-là traverse le prisme est totalement différent du spectre «arc-en-ciel» bien connu émis par un solide incandescent.



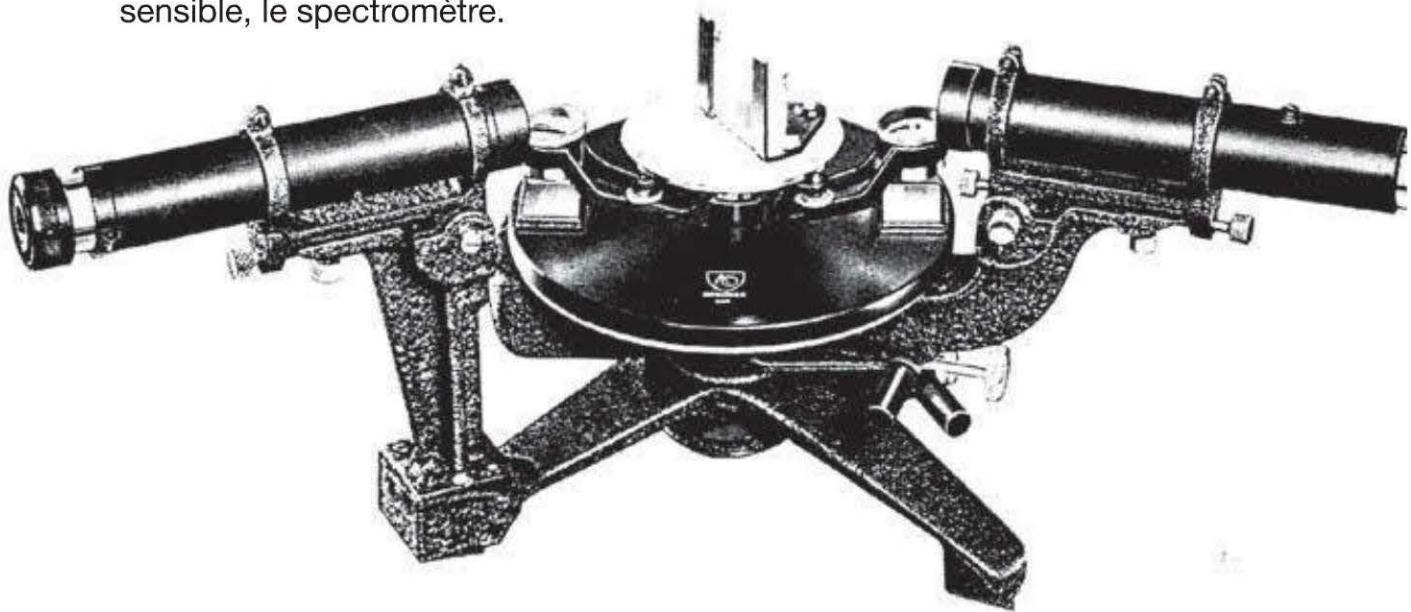
Spectres d'émission

Quand l'expérimentateur analyse, au travers d'une fente, un spectre de lumière émis par un gaz incandescent, il observe des **raies intenses bien distinctes**, chacune ayant une couleur de son spectre d'appartenance. Différents gaz donnent lieu à des dispositions de raies différentes.

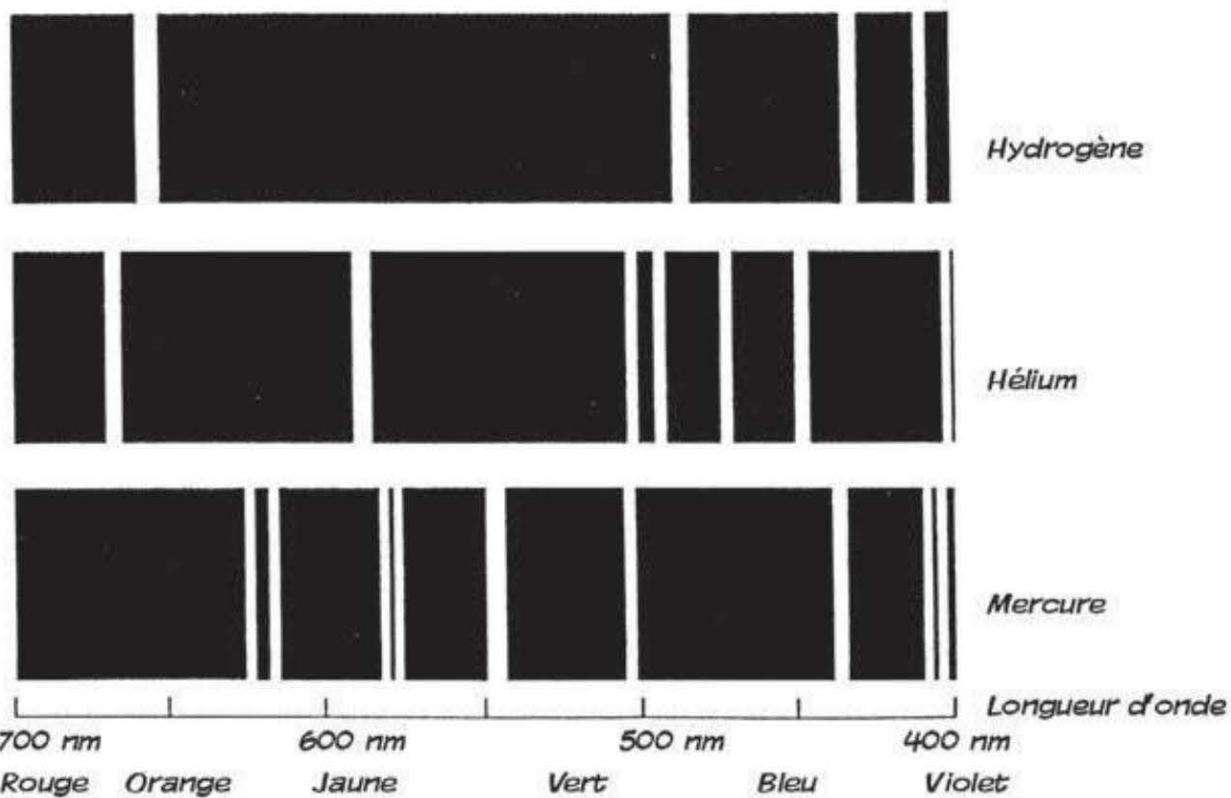


Les propriétés intégratrices de l'œil (humain, mais tout comme les yeux des autres animaux), qui combine les couleurs séparées, nous empêchent de distinguer ces raies, de sorte que nous ne percevons que leur mélange (par exemple, rougeâtre pour le gaz néon, bleu pâle pour l'azote et ainsi de suite). Dans le cas de la soude, l'œil mélange les deux raies jaunes et le résultat ressemble à des pétales de jonquilles épanouies.

La vapeur de **mercure** (Hg) (obtenue en vaporisant du mercure liquide) et celle d'**azote** donnent aussi des schémas avec des raies intenses nettement perceptibles que l'on peut enregistrer au moyen d'un instrument très sensible, le spectromètre.



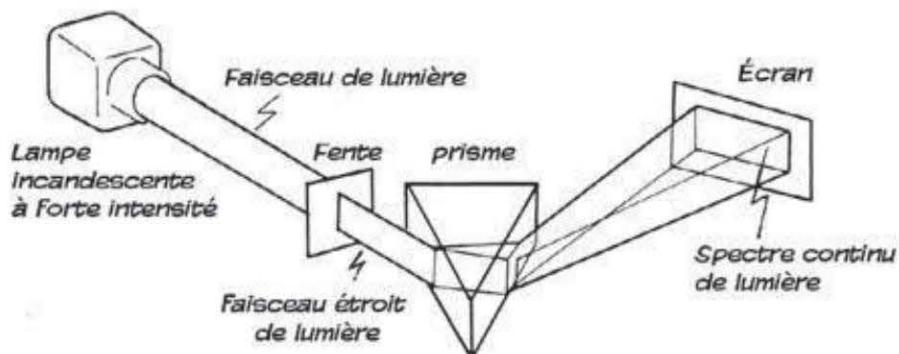
En fait, les schémas spectraux des éléments sont si différents et les mesures si précises, qu'aucun schéma n'est identique à celui d'un autre élément pour ce qui est de ses raies distinctives. On peut se servir des spectres pour identifier des traces de **gaz inconnus** comme, par exemple, la mise au jour du gaz hélium dans le spectre du Soleil. Mais avant de discuter de cette découverte majeure, clarifions nos idées sur les **raies sombres** des spectres de lumière.



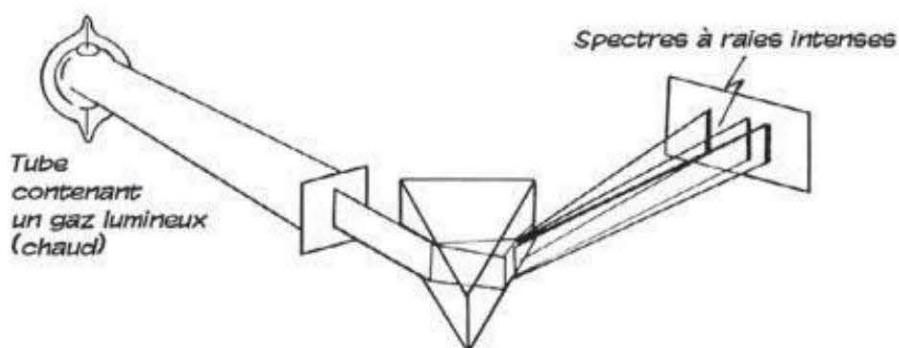
Les spectres d'absorption (raies sombres)

Ces trois diagrammes montrent comment il convient d'observer les deux types de spectre.

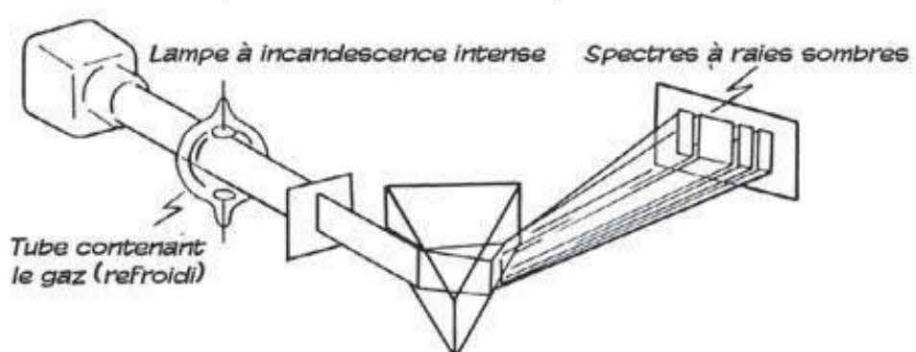
- 1) Un rayonnement de « lumière blanche » (combinant toutes les fréquences émises par un solide chauffé comme, par exemple, un filament de lampe incandescente chauffé à blanc) passe par une fente avant de pénétrer dans un prisme triangulaire proche d'un sommet. **Un spectre continu**, dit en « arc-en-ciel », apparaît sur l'écran.



- 2) Le même montage expérimental est utilisé (sauf que l'on remplace le **solide chauffé** par un **gaz chaud**). À présent, l'expérimentateur observera un **spectre à raies intenses** sur l'écran et la forme de chaque raie est l'image de la fente.



- 3) Cette fois-ci, il y a **du nouveau**. Reprenons le premier cas, celui du solide chauffé qui émet un rayonnement composé de toutes les fréquences. Le tube à essai contenant le gaz s'est interposé entre la source de lumière et la fente. À présent, le gaz n'est plus chauffé ... Il reste froid.



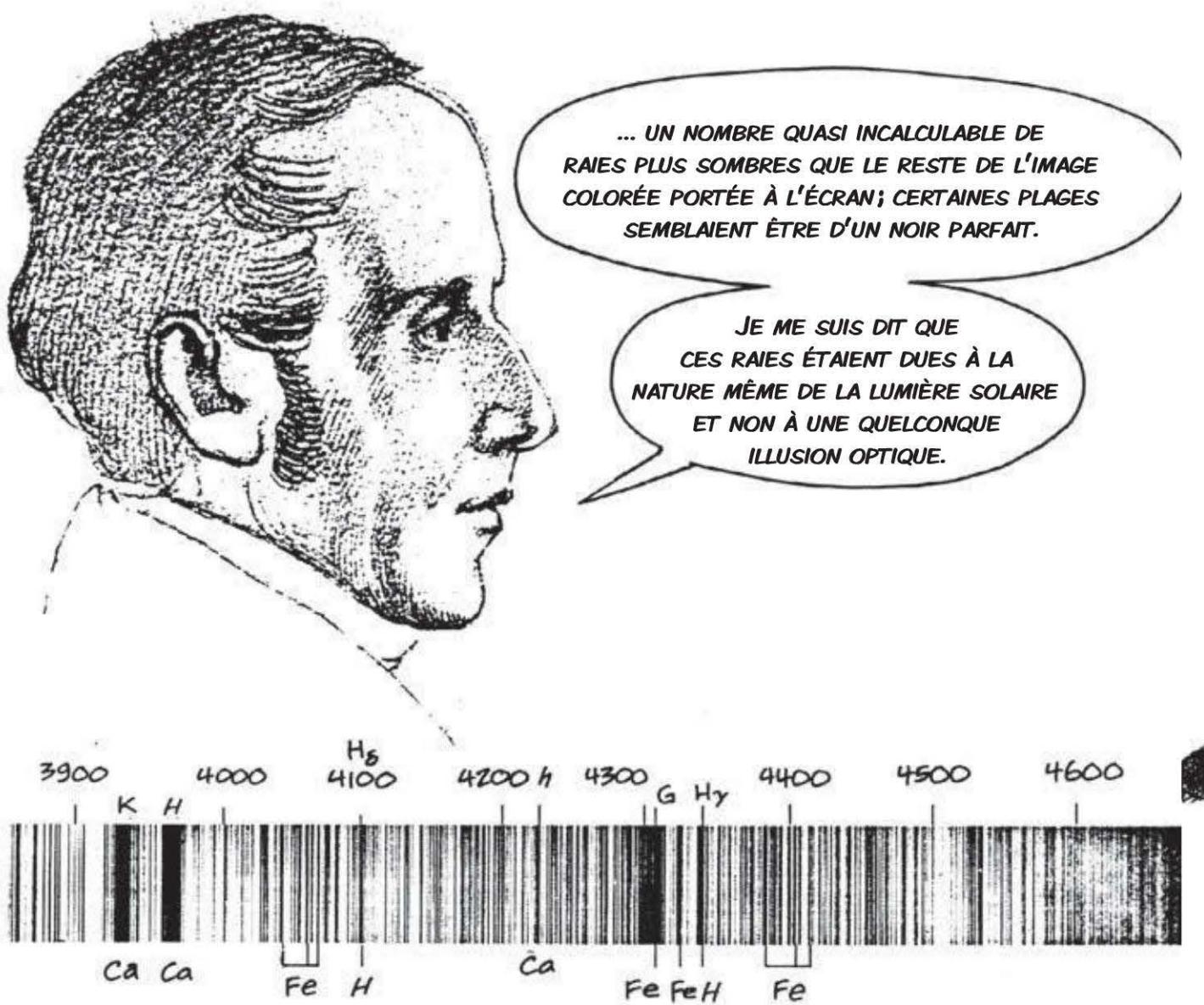
Regardons maintenant l'écran. Un **spectre à raies sombres** apparaît, les parties sombres correspondant parfaitement aux **raies intenses** de la première expérience quand le gaz était chauffé.

Une conclusion s'impose immédiatement. Le gaz refroidi (non excité) **absorbe** la lumière précisément aux mêmes fréquences **qu'émettait** le gaz quand il était chauffé. Il doit exister certains états d'énergie réversibles, caractéristiques de chaque gaz, c'est-à-dire que le gaz peut, selon l'état, **absorber** ou **libérer** de l'énergie. Très intéressant...

Les raies de Fraunhofer

Ces phénomènes étaient intrigants, mais en même temps encourageants, puisque dans les spectres d'émission et d'absorption, la fréquence (ou longueur d'onde) observée était toujours la même. Ces spectres à raies fournissaient aux physiciens des informations reproductibles à propos des éléments purs qu'ils examinaient.

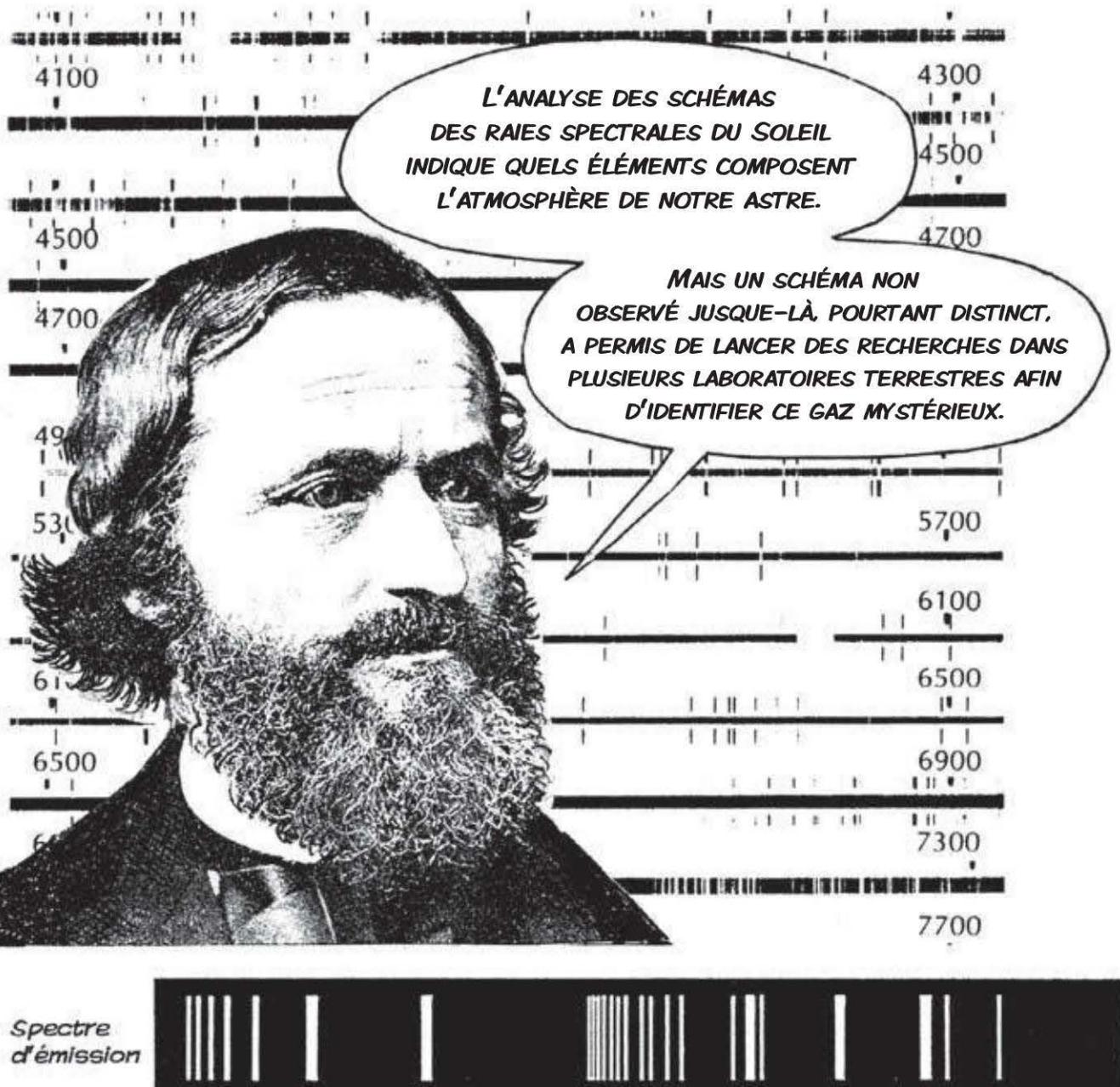
En 1814, **Joseph von Fraunhofer** (1787–1826) a assemblé le premier spectroscope, combinant un prisme avec un petit télescope focalisé sur une fente au loin. Il s'en est servi par la suite pour analyser le spectre du Soleil où il a vu...



Ces raies sombres du spectre solaire ont pris le nom de **raies de Fraunhofer** et servent de base scientifique pour la spectroscopie astrophysique.

La découverte de l'hélium

Gustav Kirchoff (1824–1887) a étudié ces raies sombres quelques années plus tard, grâce à une méthode ingénieuse pour superposer les raies jaunes intenses d'un sel, en l'occurrence du chlorure de soude (NaCl), dans le spectre solaire observé par Fraunhofer. La correspondance exacte de la superposition a démontré que les raies sombres étaient dues à la présence de vapeurs de soude à température «fraîche» dans l'atmosphère extérieure qui enveloppe le Soleil.



Cet élément «évasif» – un gaz inodore, incolore et chimiquement inerte – a finalement été détecté et isolé. On lui a attribué un nom bien approprié, d'après le mot grec désignant le Soleil (*helios*), à savoir **hélium**.

L'hydrogène – un cas pour tester la structure de l'atome

On pressentait que ces raies spectrales révélaient quelque chose de plus fondamental, en rapport avec la structure interne de l'atome. Mais quoi au juste ? Cela devait mener à des investigations supplémentaires.

Il n'est pas surprenant que dans leurs tentatives d'expliquer les raies intenses et de les relier à quelque théorie de la structure de l'atome, les physiciens aient choisi d'étudier le spectre de l'**hydrogène**. C'est l'atome le plus simple parmi tous les éléments.

Les quatre raies les plus évidentes de l'hydrogène, toutes dans la partie visible du spectre de lumière, avaient été mesurées avec précision dès 1862 par l'astronome suédois **A. J. Ångström** (1814–1874).



Balmer: maître d'école suisse

En 1885, un professeur de mathématiques, **Johann Jakob Balmer** (1825–1898), a publié des résultats de mois de travail passés à manipuler les valeurs numériques des fréquences des raies du spectre visible de l'hydrogène.



Presque par miracle, Balmer a réussi à dégager une formule utilisant des nombres entiers qui prédisait presque exactement les fréquences des quatre raies visibles du spectre de l'hydrogène – et d'autres dans la plage de l'ultraviolet –, formule confirmée et validée par la suite.

Constante de Rydberg

$$f = R \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Par le biais de cette formule, Balmer était en mesure de prédire les fréquences de quatre raies d'hydrogène si n_f (final) avait la valeur 2, n_i (initial) = 3, 4, 5 et 6, et R la valeur de $3,291\,63 \times 10^{15}$ cycles/s. Ces valeurs confèrent la meilleure corrélation possible aux mesures effectuées.

Le tableau ci-après donne une comparaison des valeurs de Balmer avec celles mesurées.

Spectre d'émission d'hydrogène (Balmer, 1885)

Valeurs expérimentales		Valeurs prédites par la formule de Balmer	
Longueur d'onde (nm = 10^{-9} m)	Fréquence (10^6 Mhz)	Fréquence (10^6 Mhz)	Valeur de n_i
656,210 (rouge)	457,170	457,171	3
486,074 (vert)	617,190	617,181	4
434,01 (bleu)	691,228	691,242	5
410,12 (violet)	731,493	731,473	6

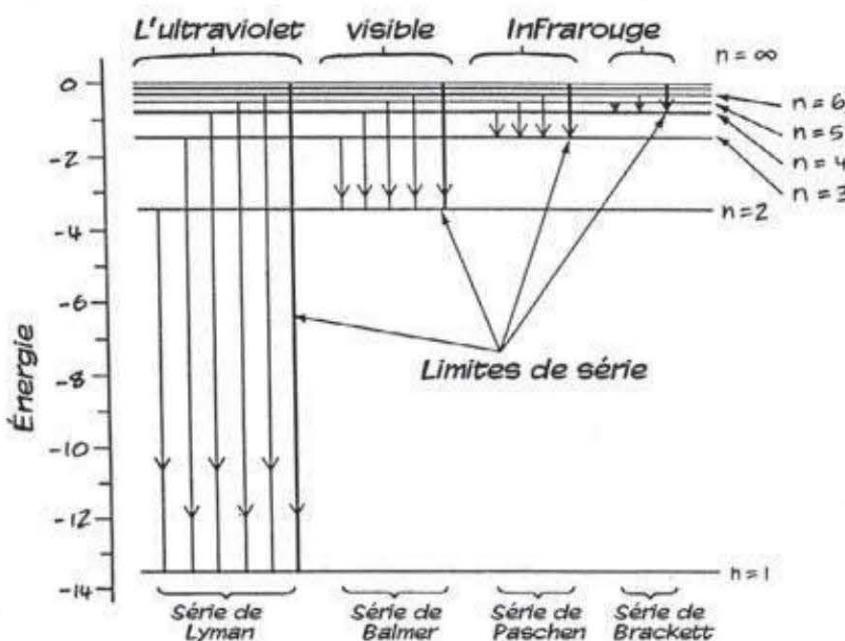
ADMIREZ LA CORRÉLATION PRESQUE PARFAITE ENTRE LES FRÉQUENCES EXPÉRIMENTALES ET CELLES QUE J'AI CALCULÉES EN APPLIQUANT MA FORMULE.



La précision était trop remarquable pour ne pas être vraie. Il devait donc y avoir autre chose de plus fondamental sous-jacent à cette formule de Balmer. Peut-être, si l'on appliquait certaines lois physiques à la structure de l'atome, pourrait-on générer une équation de ce type.

En attendant, Balmer a prédit d'autres raies – dans les fréquences de l'ultraviolet et de l'infrarouge – que l'on ne savait pas encore mesurer à son époque. Il a procédé avec différentes valeurs de n_f , et a prédit plusieurs séries de raies de spectre.

L'équation de Balmer a été utilisée pour prédire un nombre infini de raies... Et ces prédictions, comme nous allons le voir, étaient parfaitement exactes.



Plus la Flèche est longue, plus la Fréquence de la lumière analysée est haute. Les origines des diverses séries sont indiquées ci-dessus.

Les fréquences d'hydrogène à partir de la formule de Balmer

Balmer a spéculé qu'il y avait davantage de raies d'hydrogène quand n_f prenait des valeurs autres que 2. Par exemple, $n_f = 1$ donne une nouvelle série dans l'ultraviolet et $n_f = 3$ et 4 d'autres dans l'infrarouge.

Table des séries de raies d'hydrogène (équation de Balmer)

n_{final}	$n_f = 1$	$n_f = 2$	$n_f = 3$	$n_f = 4$
$n_{initial}$	$n_i = 2,3,4,5,6\dots$	$n_i = 3,4,5,6,7\dots$	$n_i = 4,5,6,7,8\dots$	$n_i = 5,6,7,8\dots$
Plage	ultraviolet	visible	Infrarouge	Infrarouge
Découverte	1906-14	1885	1908	1922
Découvreur	Lyman	Balmer	Paschen	Brackett

Ces séries suggéraient une sorte de diagramme d'énergie, comme si les courbes d'**émission/absorption** de la lumière émise par un atome devaient correspondre à une **baisse/augmentation** de son énergie. Le diagramme ci-dessus montre comment la formule de Balmer a été utilisée pour prédire les fréquences des raies, en faisant commencer chaque série par un entier différent, tel qu'indiqué dans le tableau.

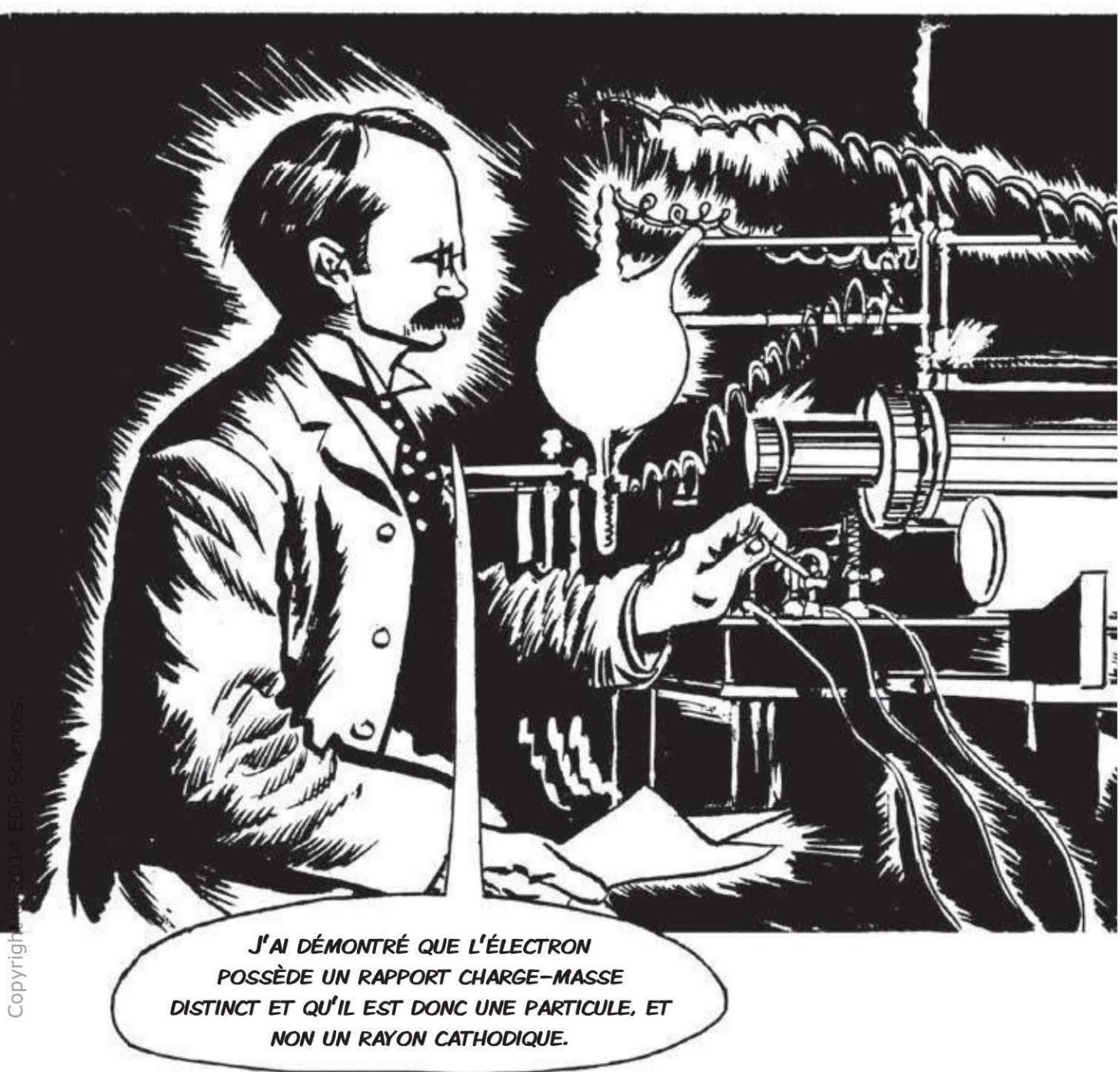
Fréquences de l'hydrogène à partir de la formule de Balmer

Cette information serait essentielle à toute théorie atomique. Ces changements de nombres entiers, ce qui donnait des fréquences précises de rayonnement, ont suggéré qu'un certain réarrangement des parties de l'atome se produisait.

En 1890, personne n'avait d'idée sur la structure interne d'un atome. Mais il semblait clair, à l'époque, qu'une théorie satisfaisante devrait inclure de façon signifiante la formule miraculeuse de Johann Jakob Balmer.

La découverte de l'électron

C'est dans les vénérables locaux du laboratoire Cavendish de l'université de Cambridge (Grande-Bretagne) que l'on a commencé à décortiquer l'atome. Un certain **J. J. Thomson** (1856–1940), l'un des physiciens les plus renommés du xix^e siècle, affirme...

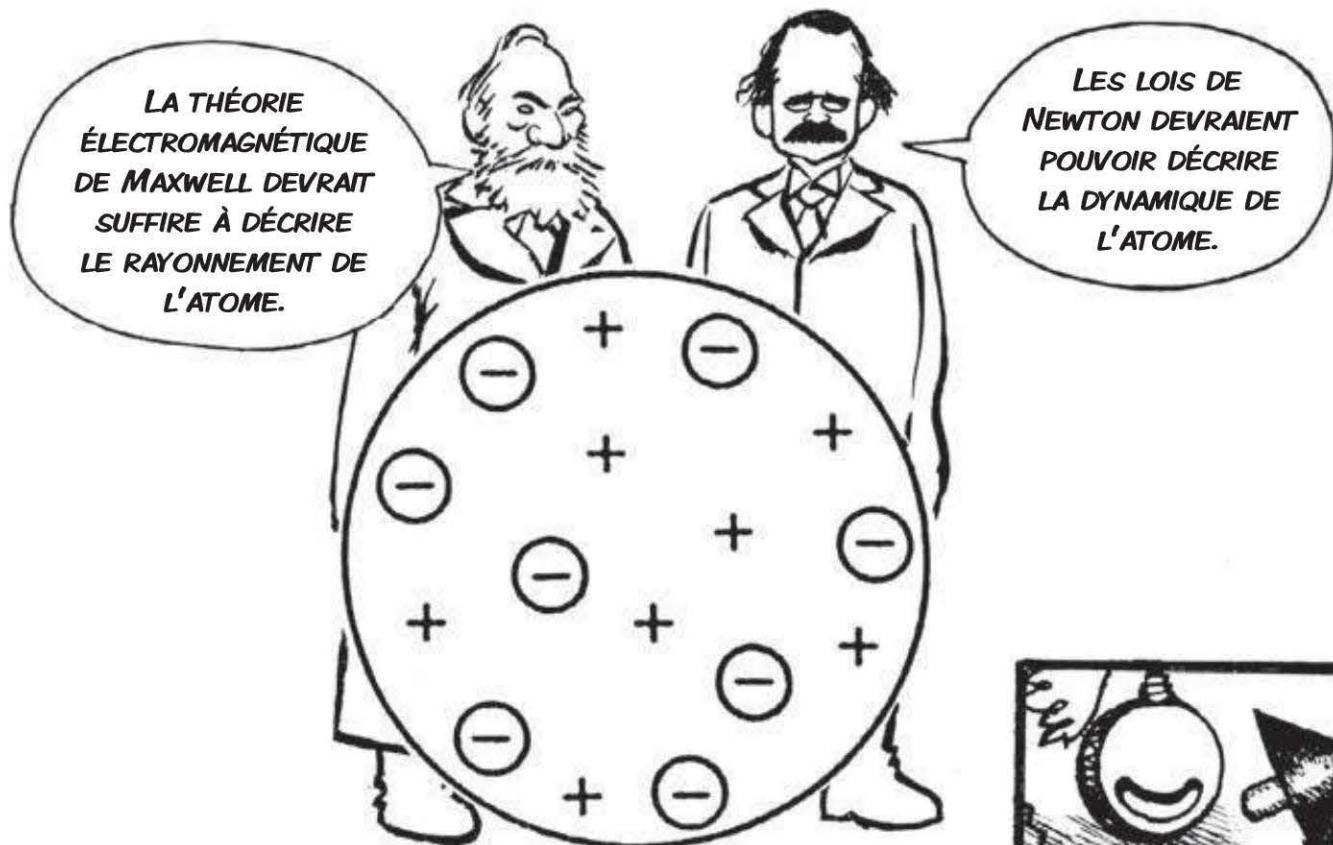


*J'AI DÉMONTRÉ QUE L'ÉLECTRON
POSSÈDE UN RAPPORT CHARGE-MASSE
DISTINCT ET QU'IL EST DONC UNE PARTICULE, ET
NON UN RAYON CATHODIQUE.*

En fait, au cours des cinq dernières années du xix^e siècle, d'autres soi-disant rayons présentaient des comportements particulaires. Les rayons alpha et bêta ont été rebaptisés **particules alpha** et **particules bêta**. L'étape suivante allait consister à déterminer comment ces particules pouvaient conduire à un atome.

L'atome en forme de pudding de Noël

J. J. Thomson et Lord Kelvin ont développé un modèle de l'atome (sans doute à l'époque de Noël) dans lequel les électrons négatifs étaient disséminés dans une sphère uniforme de charge positive à l'instar des raisins dans un pudding. Ils ont appliqué les suppositions « classiques » de leur temps.



Le modèle du pudding aux raisins de l'atome. Les électrons chargés négativement (les raisins) sont disséminés dans une sphère uniforme de charges positives (le pudding).



Bien que fort répandu, ce schéma était intrinsèquement instable et ne menait nulle part.

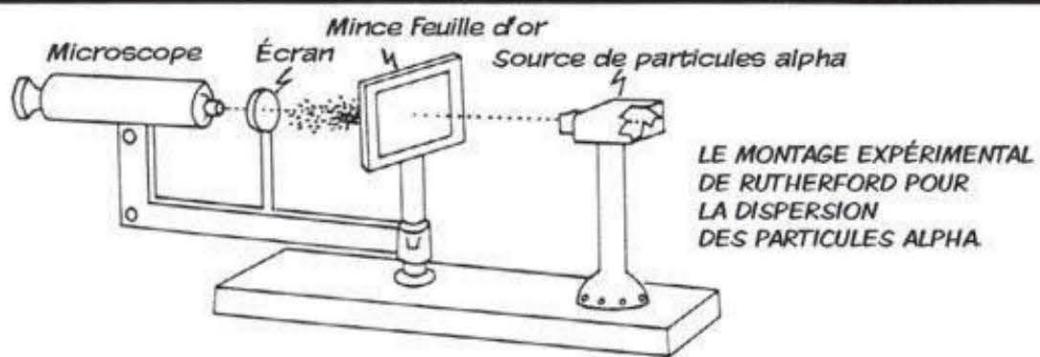
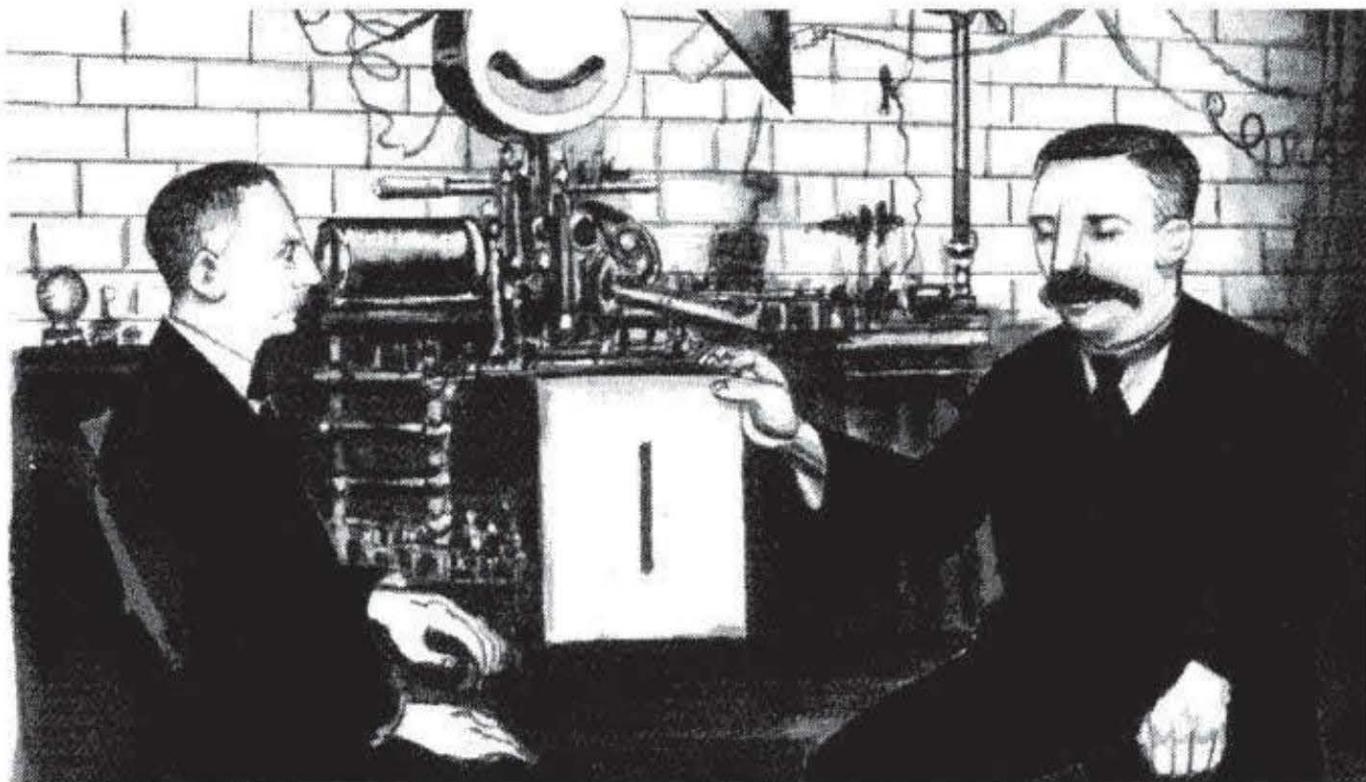
Puis vers 1907, l'un des plus imaginatifs et des plus iconoclastes des physiciens, Ernest Rutherford (1871–1937), autrefois élève de Thomson à Cambridge et désormais professeur titulaire de physique à l'université de Manchester, qui travaillait dans un domaine nouveau de recherche, la radioactivité, est projeté sur le devant de la scène.



L'atome nucléaire de Rutherford

Tout en étant à la base un expérimentaliste infatigable, Rutherford était toujours prêt à considérer un modèle théorique pour peu qu'il soit basé sur des mesures fiables qu'il pouvait «voir» et comprendre.

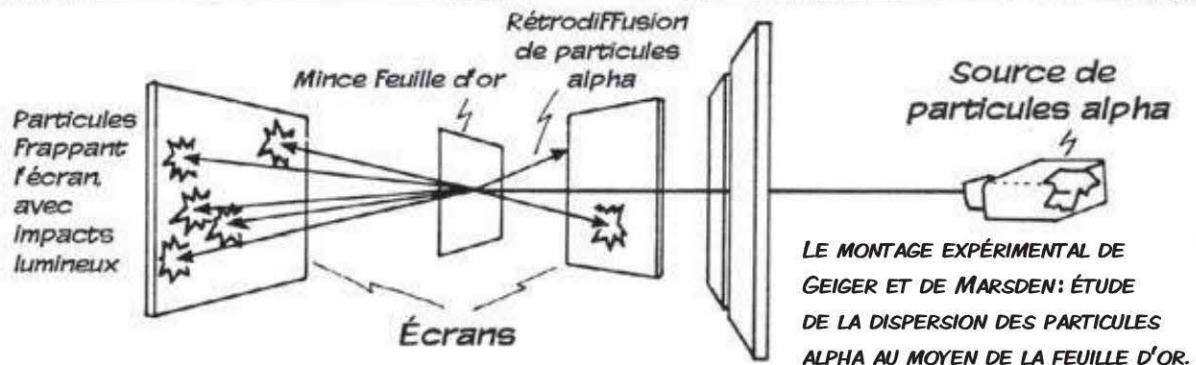
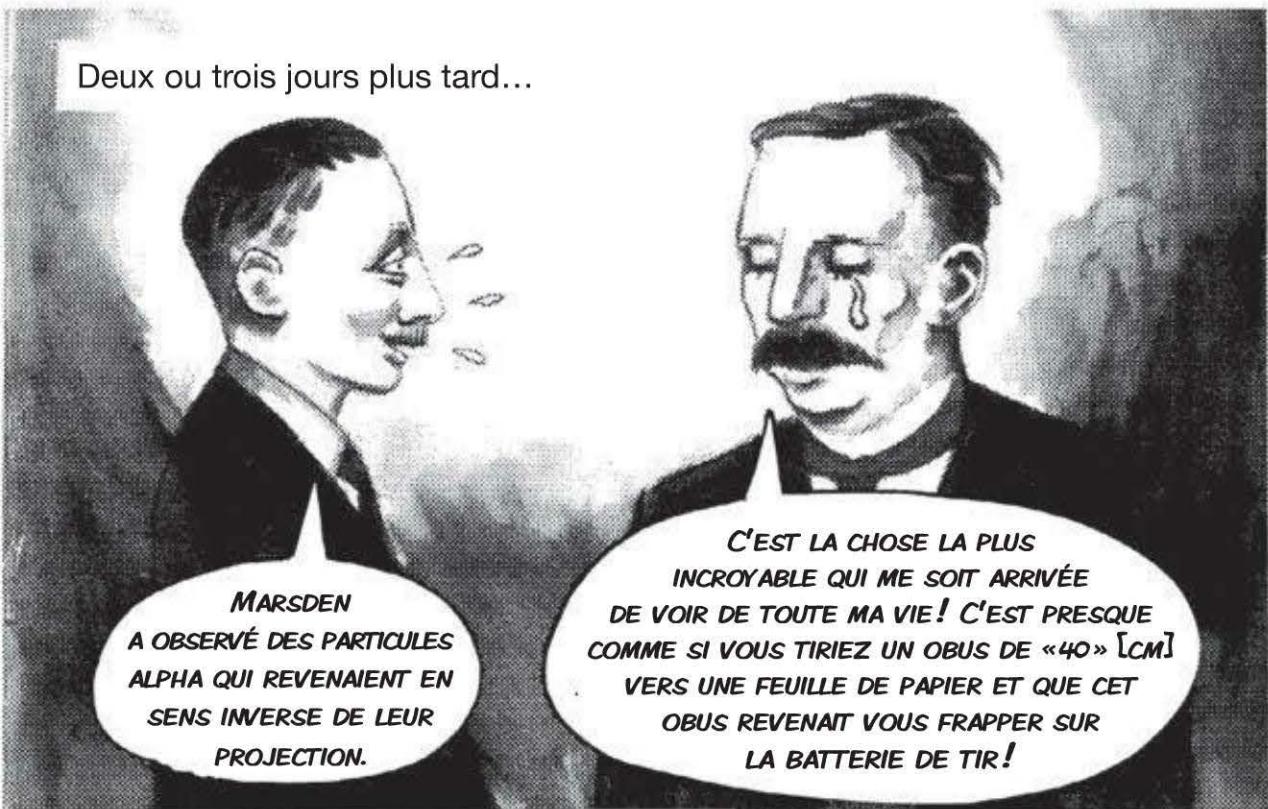
Il collaborait en quelque sorte avec ses étudiants en recherche, les encourageant en entonnant dans les couloirs un chant religieux aux intonations guerrières : «Onward Christian soldiers, Marching off to war!».



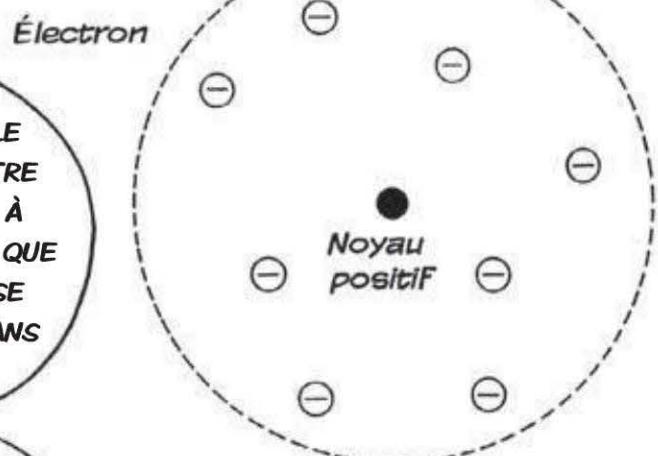
En 1908, tout en poursuivant un programme de recherche sur les particules alpha radioactives, Rutherford eut l'idée que ces projectiles «massifs», chargés positivement, pouvaient lui servir de sondes idéales pour étudier la structure de l'atome. Avec l'un de ses étudiants, **Hans Geiger** (1882–1945), Rutherford démarra une étude de dispersion de particules alpha au moyen d'une mince feuille d'or, observant au travers d'un microscope les brefs flashes produits quand les particules frappaient la surface d'un écran fluorescent.



* Ernest Marsden (1889–1970), physicien néo-zélandais.



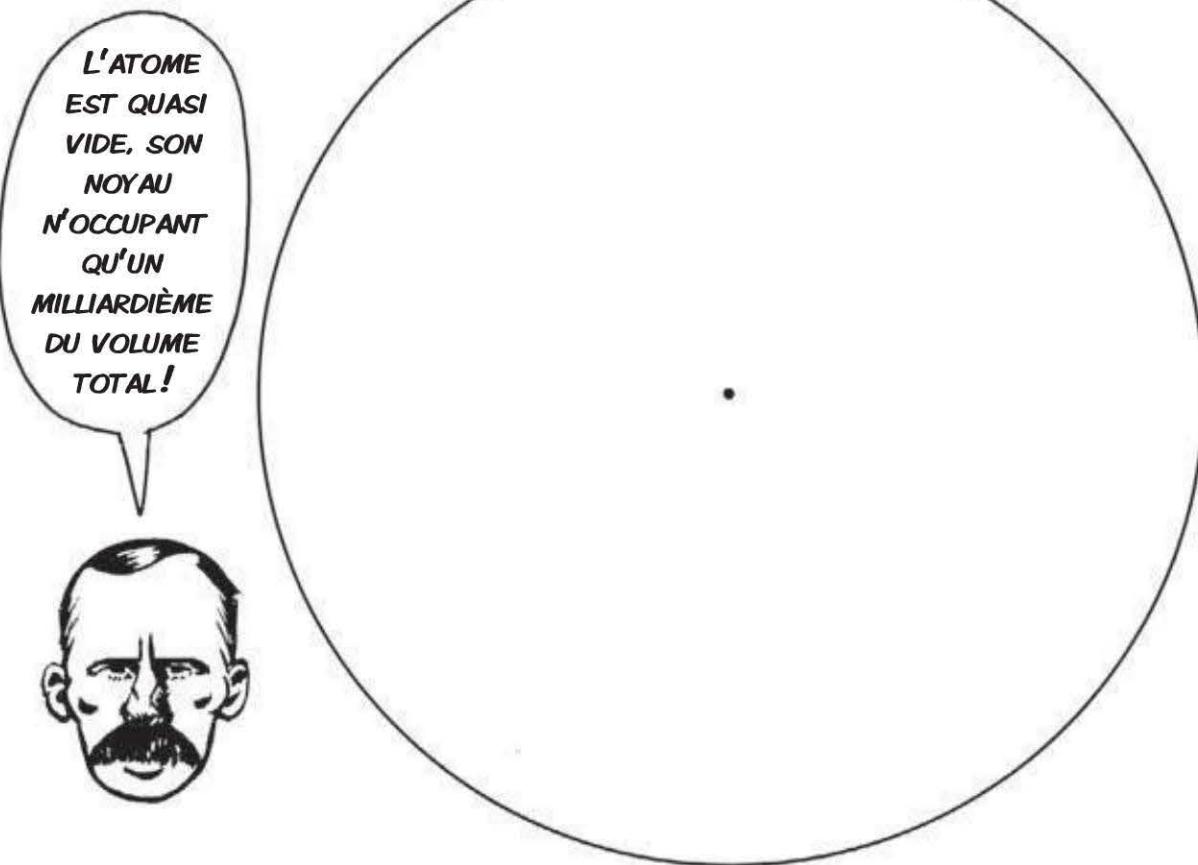
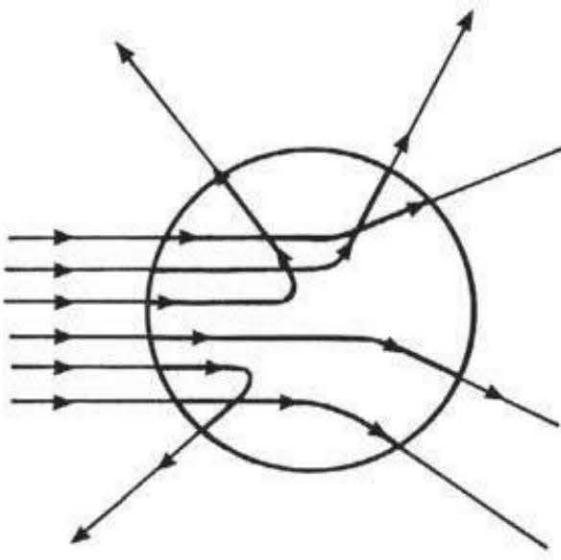
Plus tard, Marsden notera...



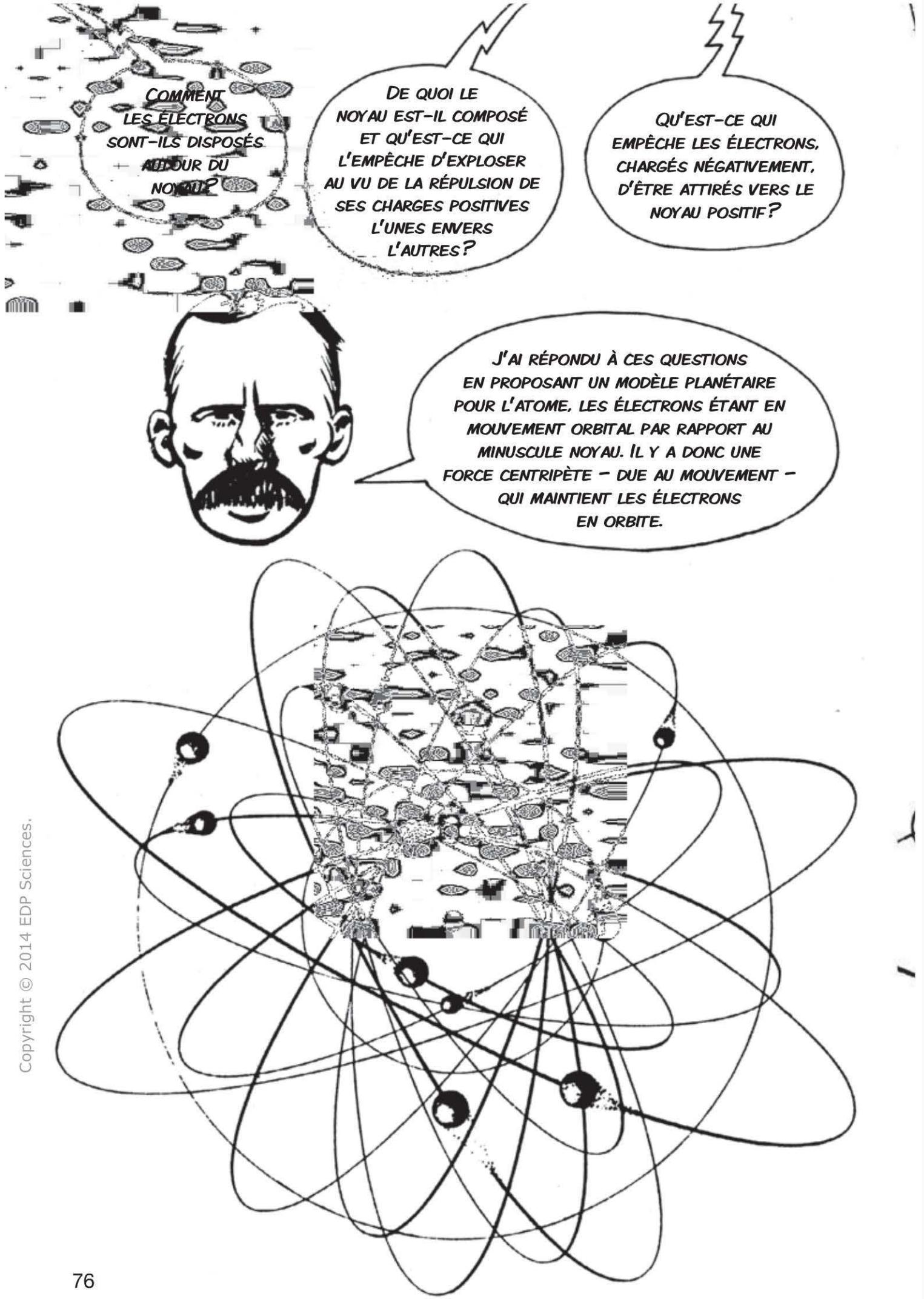
Ces expériences et l'interprétation qu'en a faite Rutherford marque le début du concept moderne du modèle nucléaire de l'atome.

La taille du noyau

On pouvait, à partir des expérimentations de dispersion décrite précédemment, déduire la taille du noyau atomique. Si une particule alpha se déplace directement vers un noyau, son énergie cinétique se transformera en une énergie de potentiel électrique pendant l'approche, ce qui la ralentit et finalement l'arrête. On peut alors calculer la distance la plus proche en appliquant la loi de conservation d'énergie.



Ainsi, la plupart des particules alpha ou autres projectiles, tels les atomes eux-mêmes ou les neutrons, peuvent pénétrer des milliers de couches d'atomes dans des feuilles minces métalliques ou à travers les gaz subissant très rarement une déflection en marche arrière. C'est pour cette raison que Geiger et Marsden ont dû faire preuve de beaucoup de patience (comme la plupart des bons scientifiques) avant de découvrir leur rétrodiffusion, à Manchester. Aussi réussi que fût ce modèle quand il s'agissait d'expliquer la structure de l'atome dit «nucléaire», il soulevait, néanmoins, de nombreuses questions inédites.



Mais cette constatation a induit un problème supplémentaire...

SI LES ÉLECTRONS SE COMPORTENT COMME DANS UN MINUSCLE SYSTÈME SOLAIRE, SE DÉPLAÇANT EN ORBITES CIRCULAIRES AUTOUR DU NOYAU (ET DONC EN ACCÉLÉRATION CONSTANTE), QU'EST-CE QUI LES EMPÈCHE DE RAYONNER DE FAÇON CONTINUE, COMME LE PRÉVOIT LA THÉORIE ELECTROMAGNÉTIQUE?

ILS PERDRAIENT TOUTE LEUR ÉNERGIE EN UNE FRACTION DE SECONDE.

Le modèle de Rutherford était instable.

ON NE DEVRAIT PAS S'ATTENDRE À CE QU'UN MODÈLE — QUI RÉPOND BIEN À UN ENSEMBLE DE RÉSULTATS CURIEUX — RÉSOLVE TOUS LES AUTRES CAS MYSTÉRIEUX.

IL VA FALLOIR D'AUTRES PRÉSUPPOSITIONS POUR COMPLÉTER NOTRE VISION, EN PARTICULIER EN RAPPORT AVEC LES DÉTAILS DE LA STRUCTURE SUPPOSÉE DE L'ATOME.

La «visualisation» de la structure atomique avait au moins commencé. L'étape suivante s'est également déroulée dans le groupe de Rutherford à Manchester et coïncide avec l'arrivée d'un jeune chercheur danois, venu de Cambridge...

L'arrivée du héros quantique, Niels Bohr

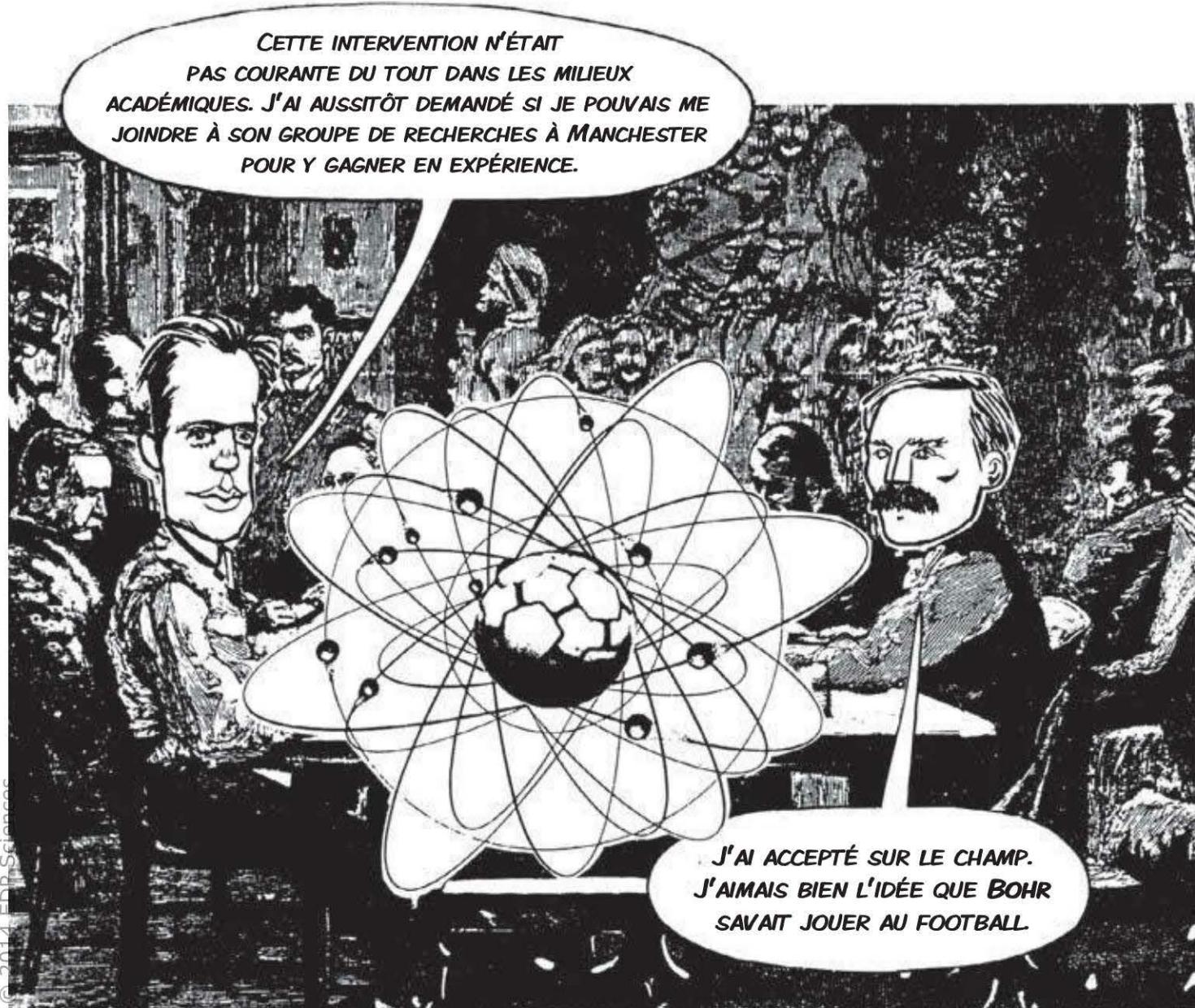
Dans le laboratoire de Rutherford, à Manchester, en 1912, le « Grand Danois » Niels Bohr a commencé sa quête pour comprendre complètement la physique quantique, travail qu'il a poursuivi inlassablement pendant 50 ans, jusqu'à sa mort survenue en 1962.

Pour sa profusion d'efforts, personne n'arrive à la cheville de Bohr, même pas Einstein. Il est sans aucun doute le grand-père de la physique quantique, proposant les premières idées et collaborant avec tous ceux qui avaient contribué au développement de la théorie.

Il est arrivé en Grande-Bretagne en 1911 avec un grand dictionnaire et l'œuvre complète de Charles Dickens, ce qui lui permit d'étudier la langue anglaise. Bohr possédait une grande confiance en lui et une capacité inouïe de travail.



Bohr a fait la connaissance de Rutherford lors d'un dîner à Cavendish ; il fut très impressionné par l'enthousiasme et les louanges exprimées par Rutherford, rendant compte des travaux de **quelqu'un d'autre**.



Quand Bohr est arrivé à Manchester, tout le monde parlait fébrilement de l'atome planétaire présenté par Rutherford. Bohr n'était nullement intimidé par les restrictions attachées au modèle de Rutherford et, par intuition sans doute, il pressentait que la mécanique classique n'allait pas s'appliquer à l'atome. Il savait que le travail de Planck et d'Einstein sur le rayonnement de la lumière revêtait une grande importance et n'était pas simplement une excellente idée allemande.

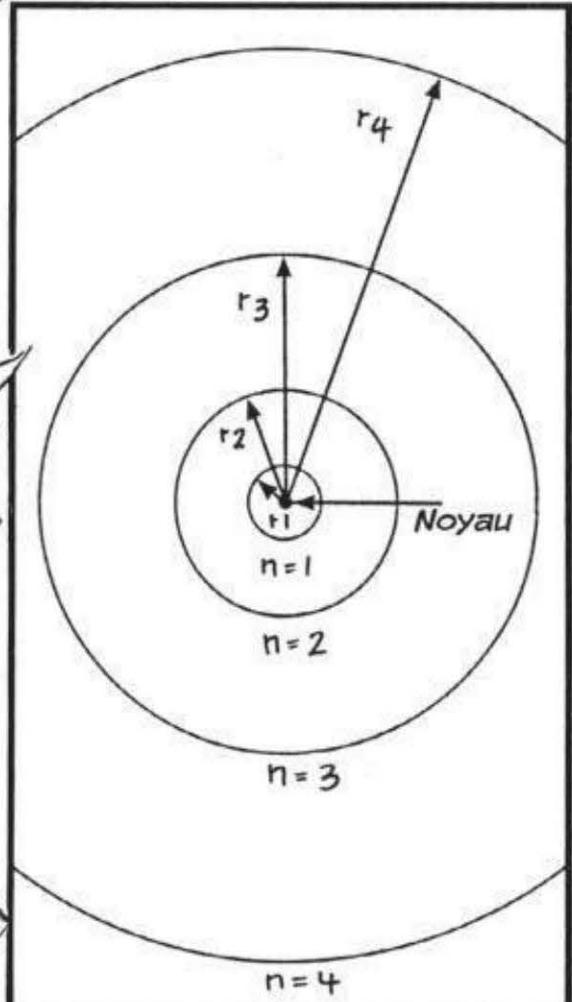
À l'été 1912, Bohr avait déjà préparé un premier jet intitulé « De la constitution des atomes et de molécules », qui abordait d'entrée de jeu la question de l'instabilité atomique.

SI L'ATOME D'HYDROGÈNE EST CONSTITUÉ D'UN PROTON ET D'UN ÉLECTRON, IL ÉTAIT LOGIQUE, À L'INSTAR DE RUTHERFORD, DE PRÉSUPPOSER QUE L'ÉLECTRON TOURNE EN ORBITE AUTOUR DU NOYAU, COMME DANS UN PETIT SYSTÈME SOLAIRE.

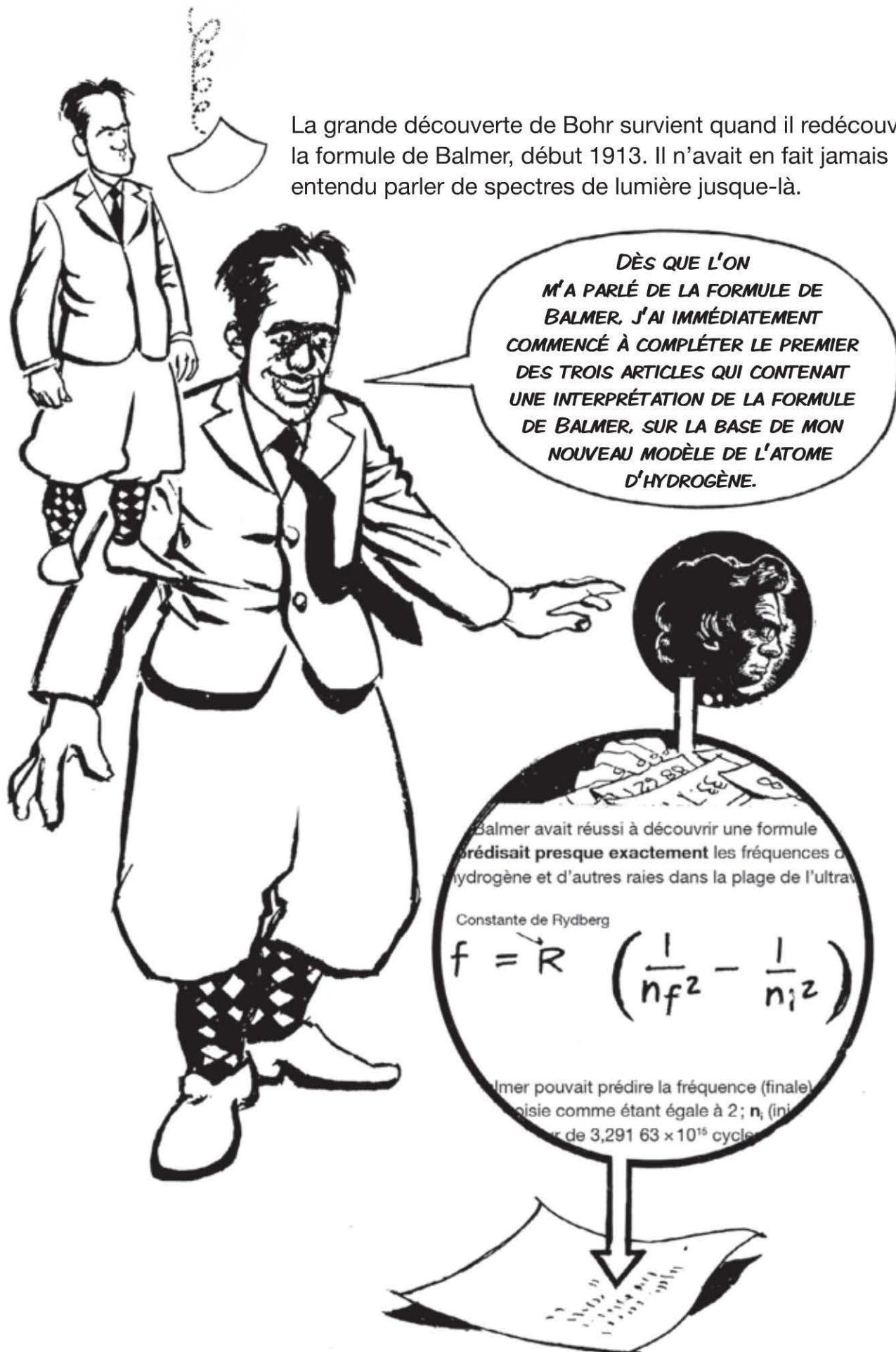
MAIS COMMENT CET ÉLECTRON POUVAIT-IL EXISTER ? LA PHYSIQUE CLASSIQUE PRÉDISAIT QU'UN ÉLECTRON NE POUVAIT EXISTER PLUS D'UNE FRACTION DE SECONDE DANS CETTE CONFIGURATION.

L'ÉLECTRON EN ORBITE RAYONNERAIT TOUTE SON ÉNERGIE ET « TOMBERAIT » VERS LE NOYAU.

ALORS Y AURAIT-IL, PEUT-ÊTRE, DES ORBITES SPÉCIALES ET STABLES AYANT UN RAPPORT AVEC LA RELATION PLANCK/EINSTEIN ENTRE L'ÉNERGIE D'UN PHOTON DE LUMIÈRE ET SA FRÉQUENCE, $e = h f$?



Orbites stables dans l'atome de Bohr



C'est bien cet événement qui a marqué le début de la théorie quantique de la structure de l'atome.

Quand Bohr rencontre Nicholson : le moment angulaire quantifié



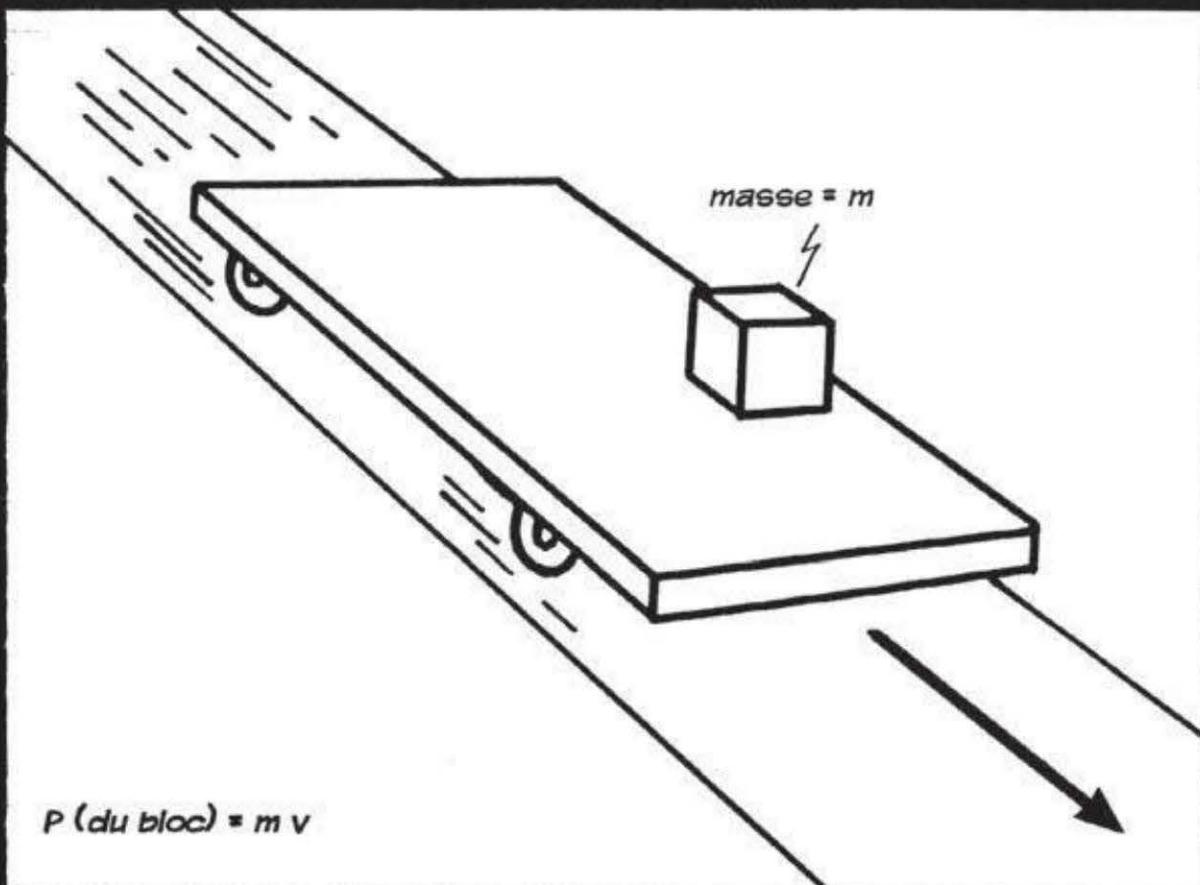
J. W. Nicholson (1881–1955), mathématicien, avait quantifié le moment angulaire et en avait déduit, par calcul, la valeur exacte pour l'hydrogène

$$L = m v R = n (\hbar / 2\pi).$$

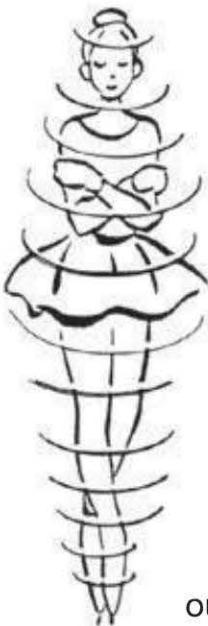
Bohr, cependant, ne semblait pas avoir besoin de la découverte de Nicholson pour poursuivre ses travaux, pour le moment. En réalité, c'était une avancée notable au point que cela nous conduit ici à l'examiner de plus près.

1. Le moment linéaire

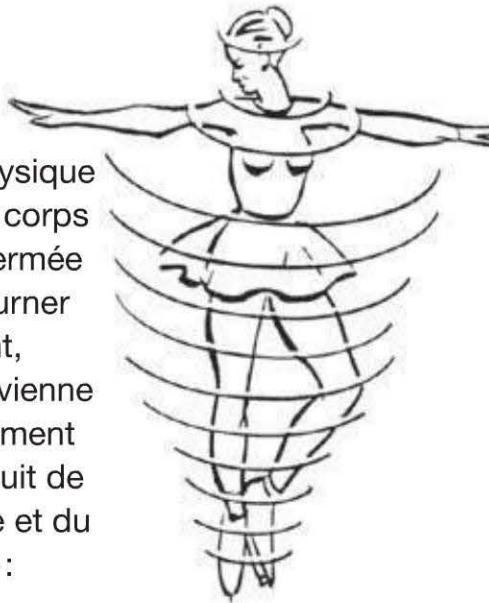
Dans le langage quotidien, en France, on n'entend peu le terme latin des physiciens anglo-saxons momentum pour désigner la difficulté d'arrêter un objet dès lors qu'il est en mouvement. En physique, on parle de moment avec le même sens. Dans un système linéaire (en ligne droite) sans friction, un corps en mouvement va continuer à avancer à moins qu'une force extérieure ne vienne le perturber. Le principe de conservation du moment était connu de Galilée, avant même la naissance de Newton.



2. Le moment angulaire



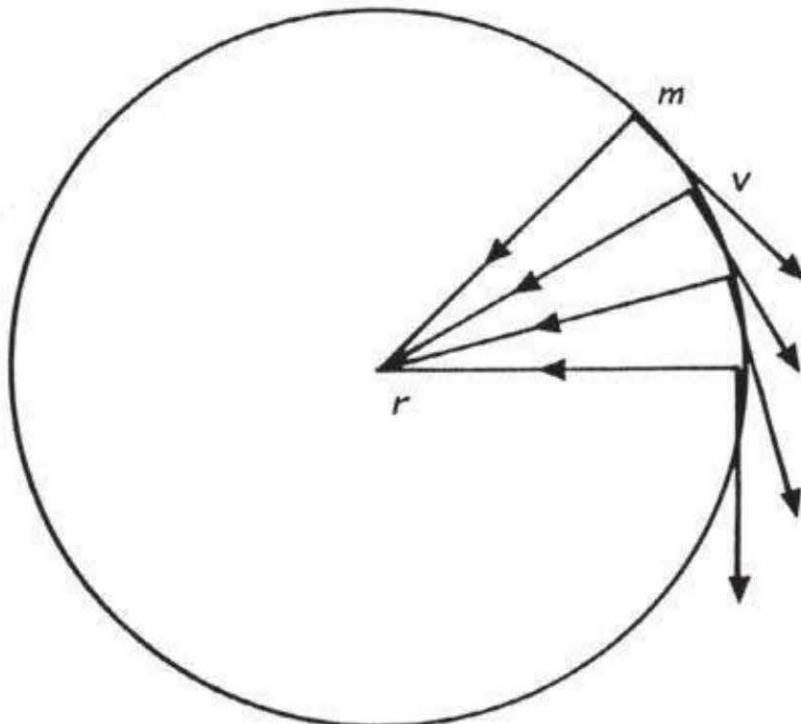
Dans un système en rotation, la physique qui s'y applique est similaire. Si un corps tourne autour d'un axe, en orbite fermée et sans friction, il va continuer à tourner avec un moment angulaire constant, jusqu'à ce qu'une force extérieure vienne perturber l'orbite. L'ampleur du moment est simplement donnée par le produit de la masse m du corps, de sa vitesse et du rayon de son orbite autour de l'axe :



$$L = m \cdot v \cdot r$$

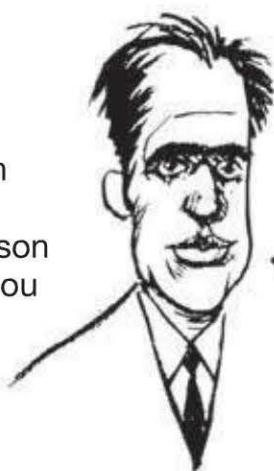
(moment angulaire).

où m est la masse et v la vitesse autour de l'orbite.



Moment angulaire constant (sans Forces extérieures)

Dans le modèle de Bohr, si un électron est excité à partir de son état d'énergie initial, il ne peut «sauter» que vers une orbite où son moment angulaire va augmenter ou décroître d'une valeur égale à un entier n que multiplie $\hbar / 2\pi$.



CELA
REPRÉSENTE LE
RAISONNEMENT CENTRAL
DE MON SCHÉMA...
LA QUANTIFICATION DES
ORBITES DES ÉLECTRONS
EN «ENTIERS» DE
LA CONSTANTE DE
PLANCK.

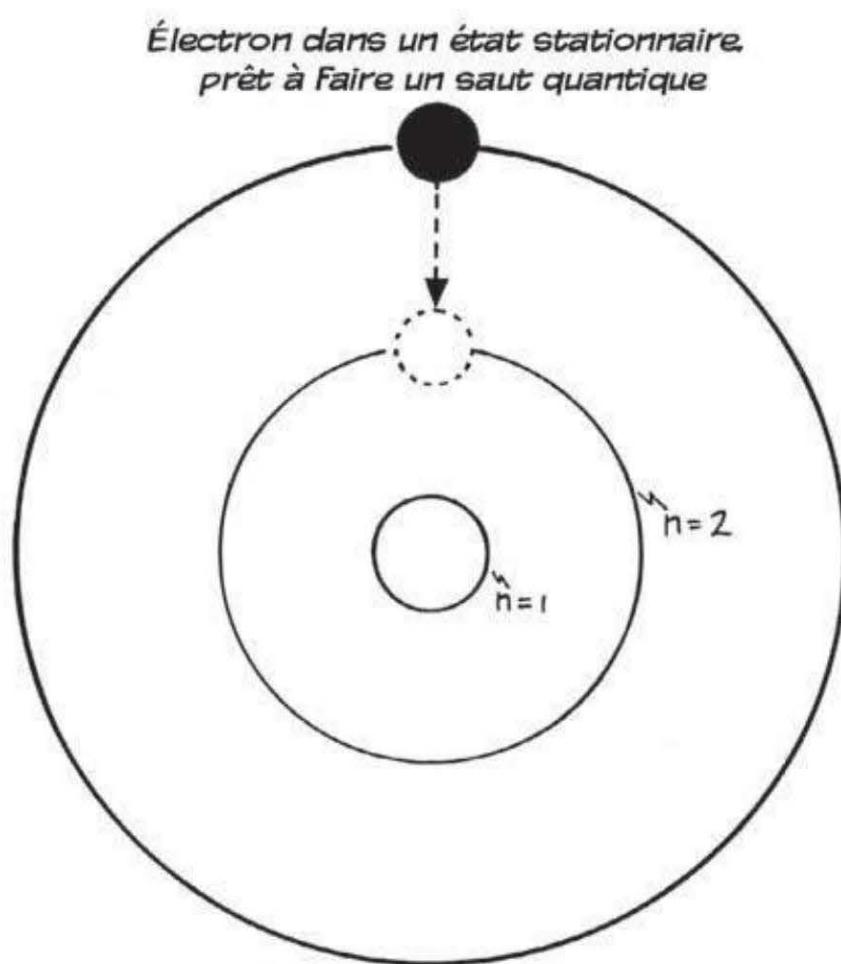
Les postulats quantiques de Bohr

Bohr a proposé deux nouveaux postulats pour rendre compte de l'existence d'orbites d'électrons stables. Dans le premier postulat, il justifie son schéma d'un atome nucléaire, en dépit des objections formulées par les physiciens classiques.

Premier postulat de Bohr

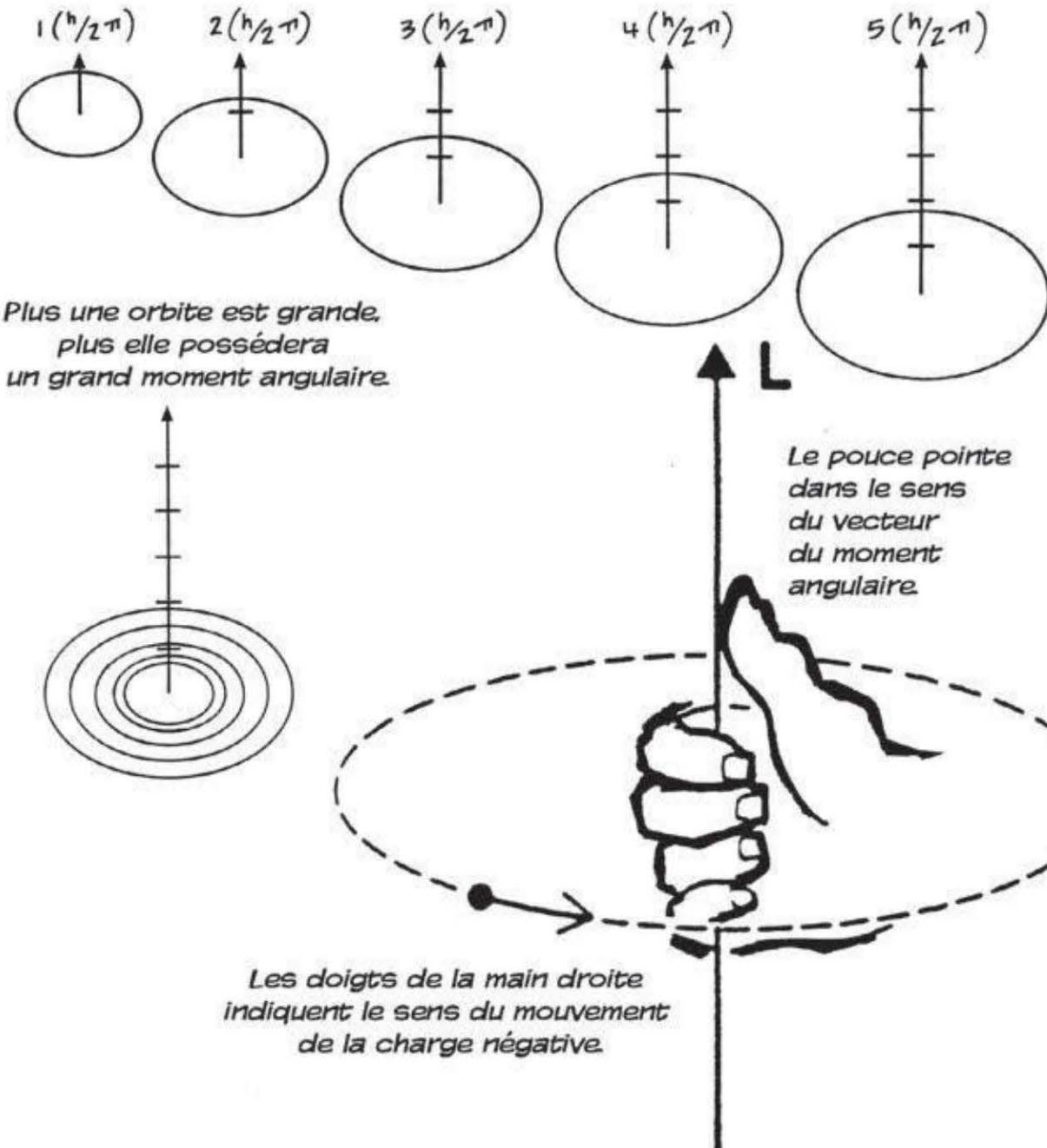


Appelée « condition orbitale quantique »



Le moment angulaire \mathbf{L} ne peut pas prendre n'importe quelle valeur – ce qui se passerait en physique classique –, mais certaines valeurs uniquement.

$\mathbf{L} = 1 (\hbar/2\pi)$ désigne une première orbite possible; $\mathbf{L} = 2 (\hbar/2\pi)$ désigne une seconde orbite; $\mathbf{L} = 3 (\hbar/2\pi)$ une troisième; et ainsi de suite. L'entier n s'appelle le nombre quantique principal.



Quelle est l'unité quantique fondamentale, \hbar ou $\hbar/2\pi$?

Nous avons vu plus haut que la lumière ne peut exister que sous la forme d'unités d'énergie « finement tranchées »: $E = \hbar f$ (fréquence). Ici, nous prenons note que le moment angulaire est également quantifié, avec pour unité $\hbar/2\pi$. Comment expliquer la différence ? D'où vient le facteur 2π ?

Pourquoi le moment angulaire est-il quantifié de manière différente de l'énergie ? La question peut intriguer – nous allons bientôt y répondre !

Comment marier les physiques classique et quantique ?

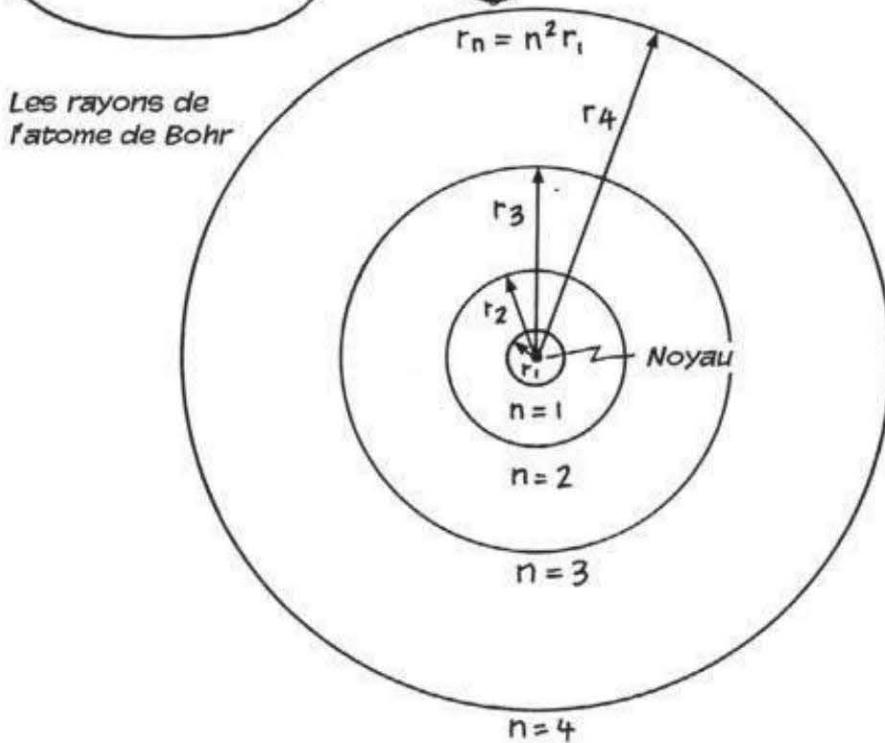
Si l'on connaît le moment angulaire d'un corps en orbite – dans le cas présent, sous la forme d'un postulat –, il est relativement facile de calculer le rayon et l'énergie de l'orbite, partant de la physique classique. Bohr s'est écarté du modèle planétaire de Newton pour le système solaire afin de donner sa formule du rayon des orbites des électrons...

$$r = \left(\frac{h^2}{4\pi^2 mq^2} \right) n^2$$

constante de Planck
rayon de l'orbite de l'électron masse de l'électron charge électronique
nombre quantique principal



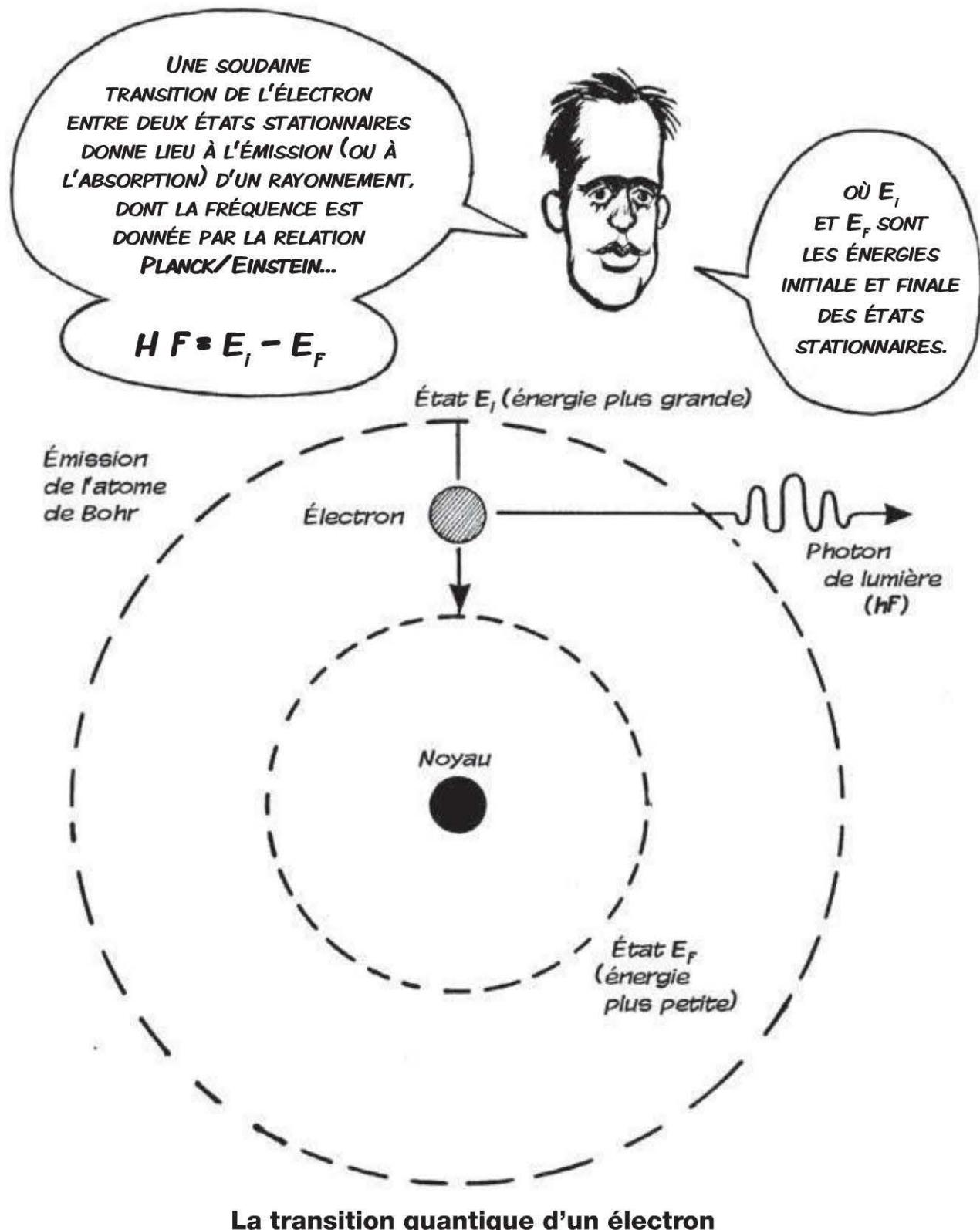
Le rayon de l'orbite dépend ainsi uniquement du nombre entier n (qui quantifie également le **moment angulaire**) puisque tous les autres termes de l'équation sont des constantes physiques.



Le plus petit rayon est obtenu avec $n = 1$, soit une valeur de $5,3 \times 10^{-9}$ ou 5,3 nm. C'est une valeur proche des mesures que nous pouvons effectuer de nos jours. D'ailleurs, on donne le nom de rayon de Bohr à cette valeur, qui indique que l'énergie de l'atome d'hydrogène est minimale et que l'atome se trouve dans son état fondamental.

Le second postulat de Bohr

Poursuivant son analogie qui compare l'atome à un mini système solaire, Bohr pouvait facilement calculer l'énergie de chaque orbite une fois son rayon déterminé. Il pouvait ensuite utiliser la **différence d'énergie** entre états stationnaires pour déterminer les fréquences d'émission et d'absorption de la lumière, et proposer à présent son *second postulat*...



Bohr propose une dérivée de la formule de Balmer

À partir de ces deux postulats, Bohr s'est efforcé de retrouver la formule de Balmer (connue déjà pour prédire les valeurs exactes des raies du spectre d'hydrogène), mais sur la base de son nouveau modèle atomique. En combinant la physique classique et la physique quantique, il obtient

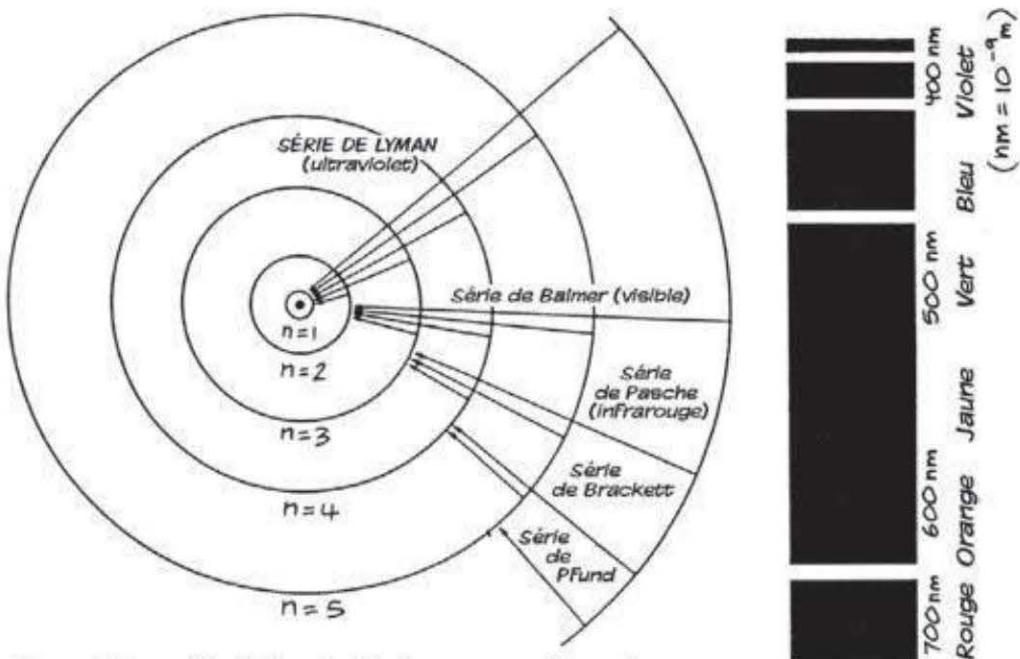
$$f = \frac{2\pi^2 mq^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

c'est-à-dire exactement la même formule qu'avait trouvée Balmer pour les fréquences caractéristiques de l'atome hydrogène, si l'on démontre que le terme **R** dans la formule de Balmer est égal à **R** = (2 π^2 m q⁴ / h³).

Prenant les valeurs dont il disposait en 1914 pour **q**, **m** et **h**, Bohr a calculé **R** = 3,26 × 10¹⁵ cycles/s, les mêmes valeurs que celles obtenues par Balmer à quelques pourcents près.

Ainsi, **Bohr avait retrouvé la formule de Balmer** (connue pour donner les valeurs exactes du spectre entier de l'hydrogène) en partant d'une théorie physique basée sur l'électron en orbite autour d'un noyau d'hydrogène, un résultat remarquable !

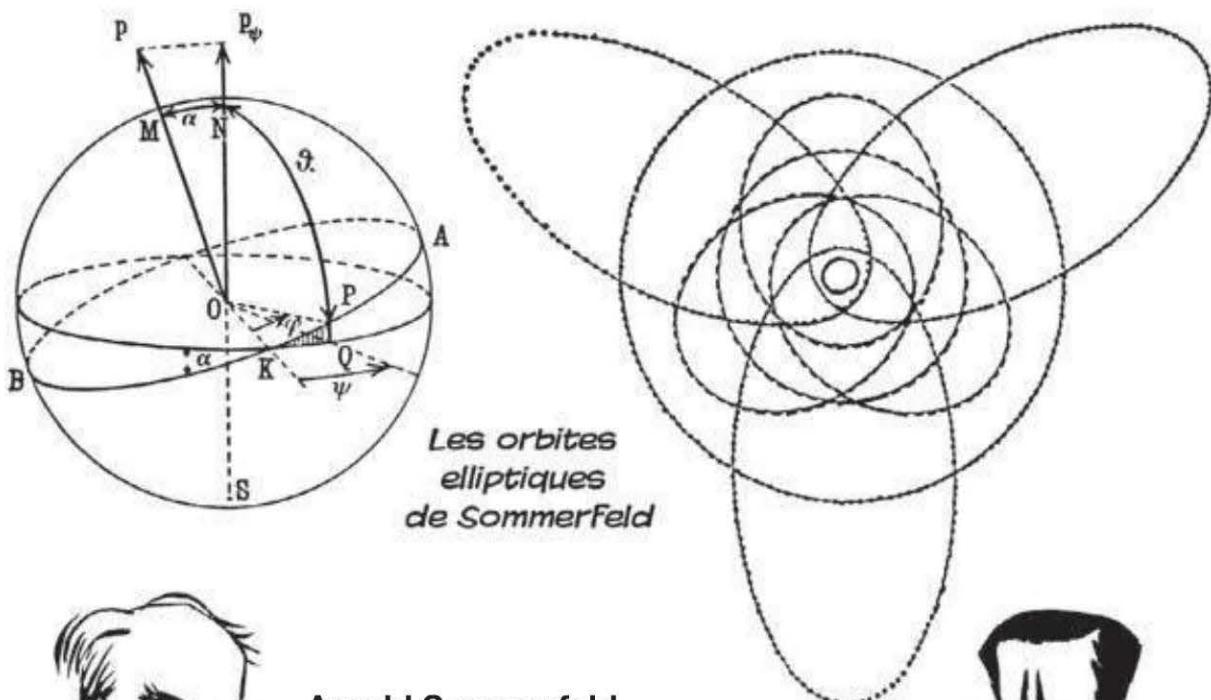
Bohr pouvait maintenant dessiner son diagramme d'énergie avec les différentes orbites possibles dans son atome, pour montrer comment divers spectres se révèlent. Cela signifiait-il que le jeune Danois avait résolu l'éénigme de la structure atomique ? Est-ce que son modèle était vérifiable, en d'autres termes pouvait-il prédire les spectres d'autres éléments ?



Transition d'orbite de Bohr reproduisant les séries de Balmer... et les raies correspondantes

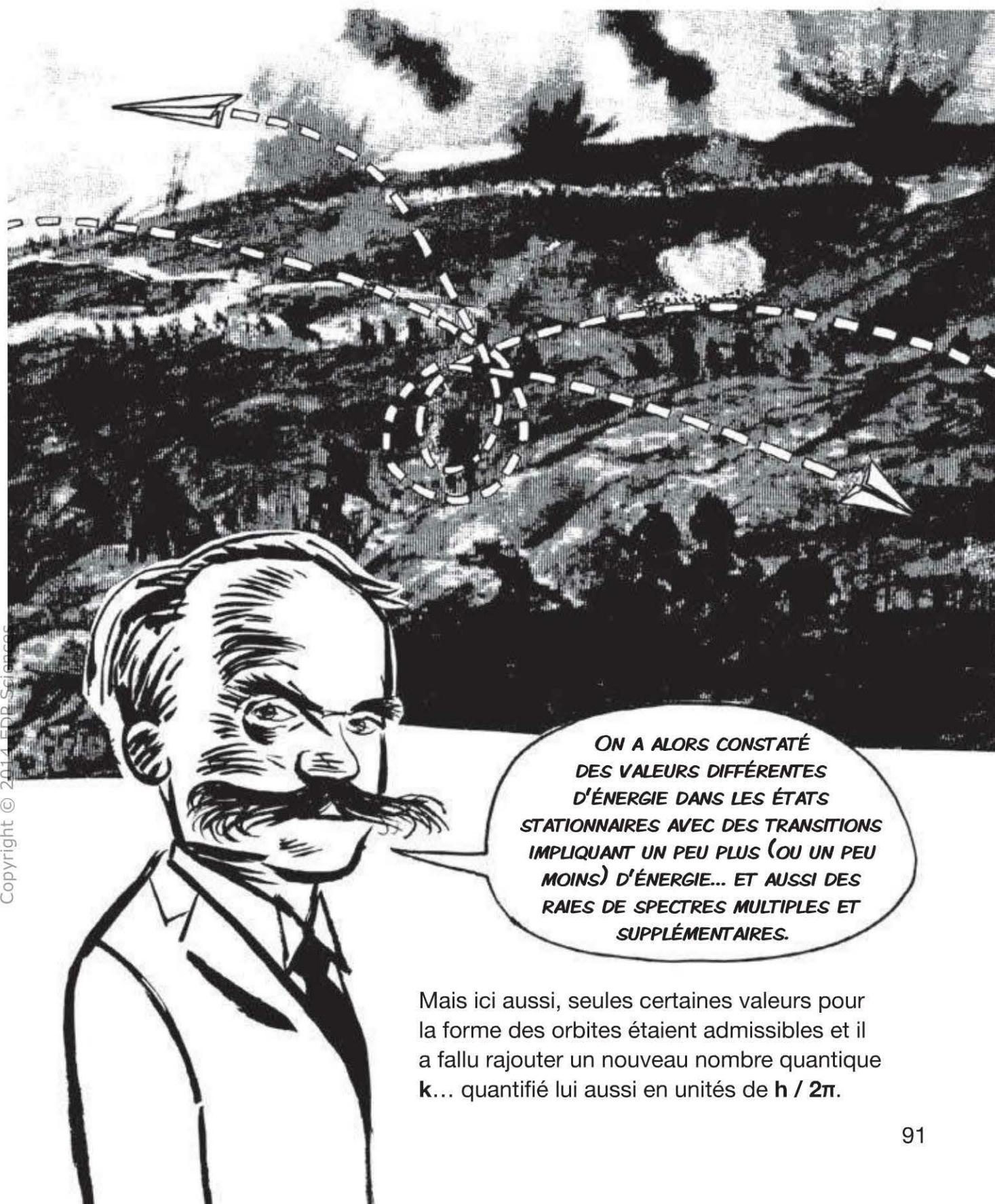
Analyse plus fine des spectres... et d'autres raies

Bientôt, on remarqua d'autres raies, y compris dans le cas supposé simple de l'hydrogène, et on en est venu à contester le modèle que proposait Bohr. Plus on disposait de mesures précises des spectres de l'hydrogène, plus il apparaissait nécessaire d'y ajouter une structure supplémentaire au modèle. Il y avait, apparemment, davantage d'états possibles pour cet électron que les seules orbites circulaires prévues par le modèle de Bohr – et ce avec un seul nombre quantique. C'est alors qu'un théoricien de renom vient à la rescousse.



Un nouveau nombre quantique k

Malgré le début des hostilités de la Grande Guerre (1916–1918), des articles scientifiques étaient acheminés secrètement de Munich à Copenhague, où Sommerfeld a exposé ses idées sur les orbites elliptiques de forme différente, mais avec les mêmes valeurs de n .

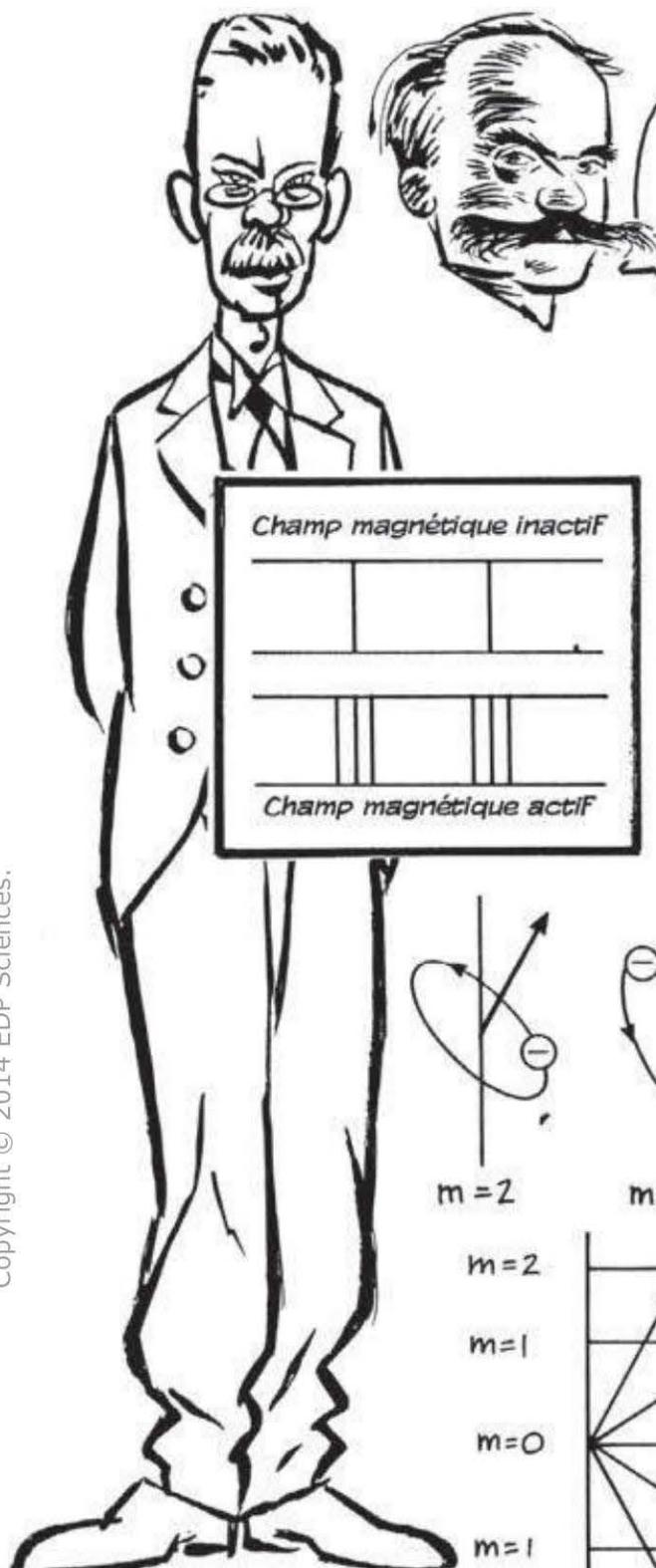


ON A ALORS CONSTATÉ
DES VALEURS DIFFÉRENTES
D'ÉNERGIE DANS LES ÉTATS
STATIONNAIRES AVEC DES TRANSITIONS
IMPLIQUANT UN PEU PLUS (OU UN PEU
MOINS) D'ÉNERGIE... ET AUSSI DES
RAIES DE SPECTRES MULTIPLES ET
SUPPLÉMENTAIRES.

Mais ici aussi, seules certaines valeurs pour la forme des orbites étaient admissibles et il a fallu rajouter un nouveau nombre quantique k ... quantifié lui aussi en unités de $\hbar / 2\pi$.

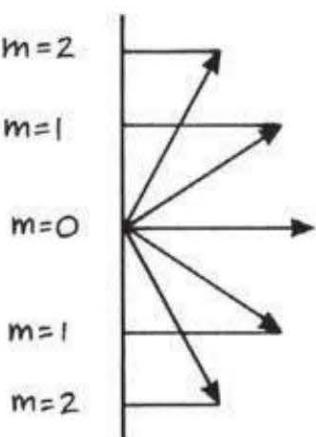
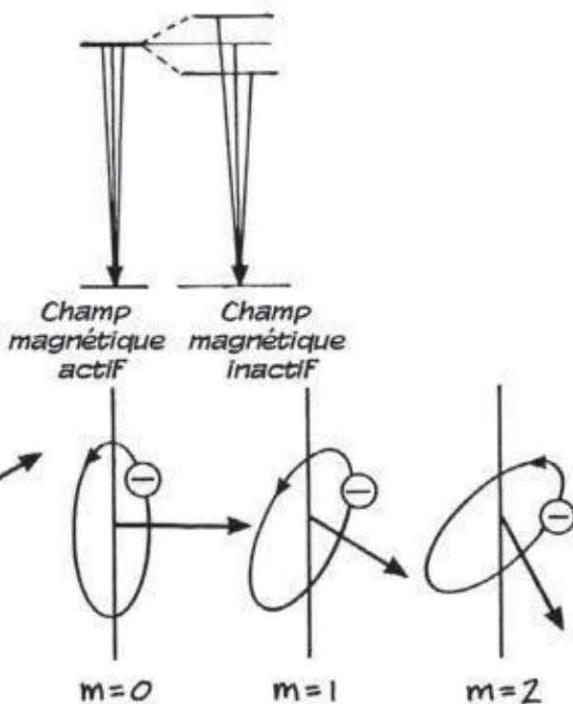
L'effet Zeeman... et encore des raies

Dès les années 1890, le Néerlandais **Pieter Zeeman** (1865–1943) a démontré que des raies spectrales externes apparaissaient quand les atomes excités se trouvaient dans un champ magnétique. Il fallait une vraie théorie atomique pour expliquer ce phénomène, connu par la suite comme *l'effet Zeeman*. Sommerfeld a apporté la réponse que l'on attendait.



LE SENS D'ORIENTATION DE
L'ORBITE A SON IMPORTANCE, CAR QUAND UN
CHAMP MAGNÉTIQUE EST APPLIQUÉ, LES ÉLECTRONS
EXCITÉS PEUVENT CHOISIR, EN QUELQUE SORTE,
PARMI D'AUTRES ORBITES ORIENTÉES DANS TELLE
OU TELLE DIRECTION PAR RAPPORT AU SENS
DU CHAMP, CE QUI AUTORISE DES ÉNERGIES
DIFFÉRENTES.

Ces **directions** peuvent être quantifiées pour donner un *nombre quantique magnétique m*. Sommerfeld avait réussi une fois de plus.

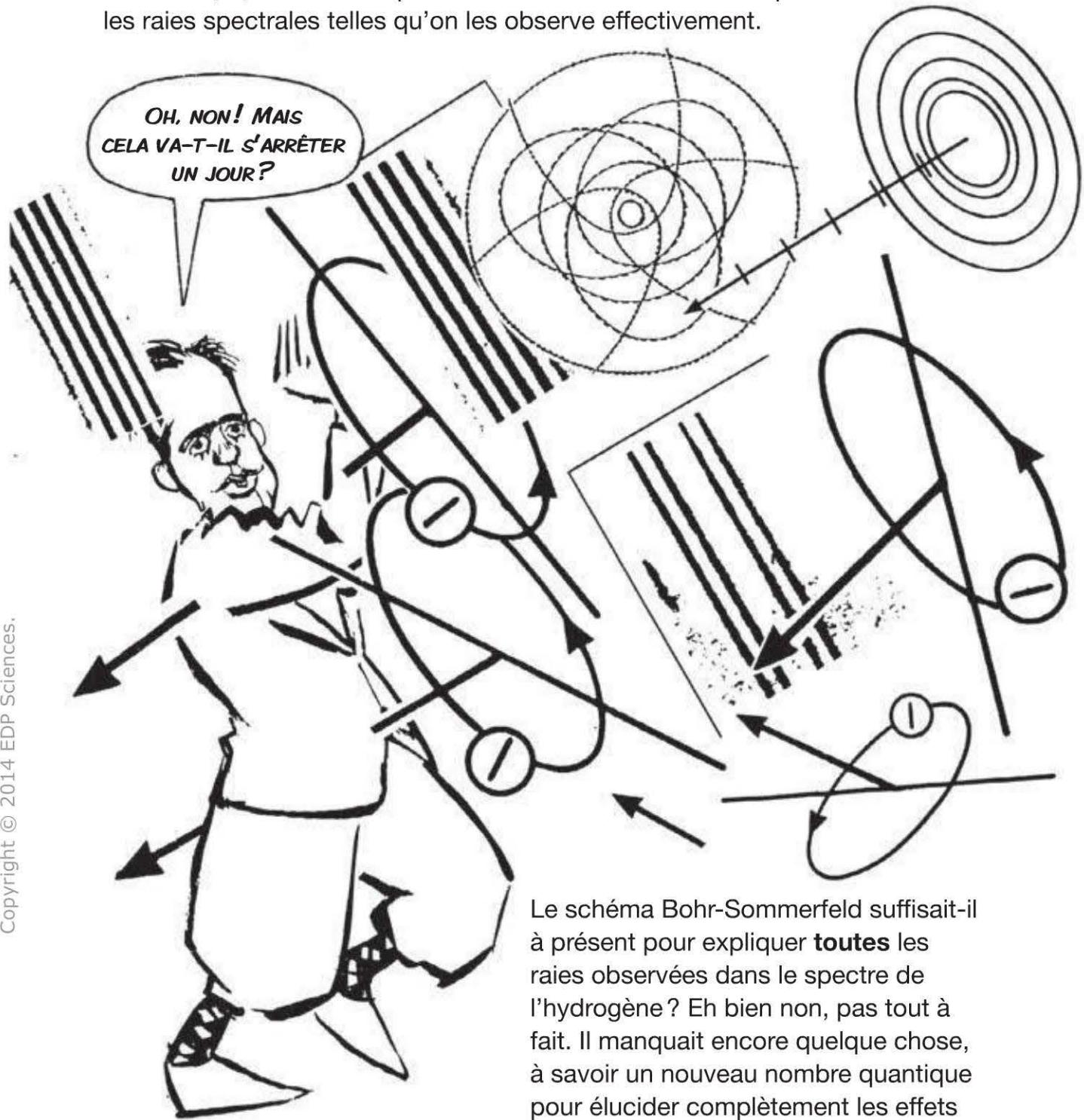


En février 1916, Einstein a écrit à Sommerfeld, en lui disant qu'il considérait ces nouveaux résultats comme une «révélation» et Bohr d'ajouter, un mois plus tard : «Je pense ne pas avoir lu quoi que ce soit avec autant de plaisir que vos travaux magnifiques.»

Trois nombres quantiques: n, k et m

En s'aidant des calculs de Sommerfeld, Bohr a préparé une série de règles de sélection pour les transitions atomiques, sur la base des trois nombres quantiques : la taille de l'orbite (**n**), la forme de l'orbite (**k**) et l'orientation de pointage de l'orbite (**m**).

À chaque état d'énergie distinct sera affecté un ensemble des valeurs entières **n**, **k**, **m** de sorte que les transitions entre ces états produisent les raies spectrales telles qu'on les observe effectivement.



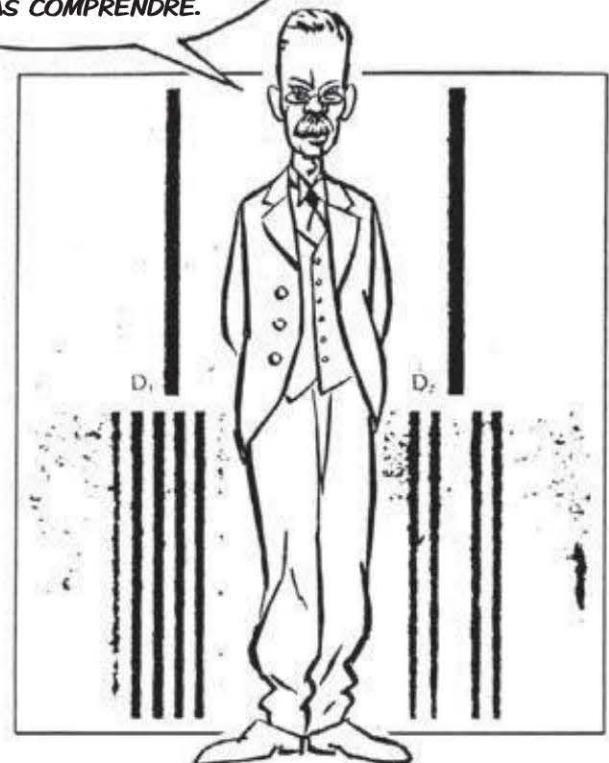
Le schéma Bohr-Sommerfeld suffisait-il à présent pour expliquer **toutes** les raies observées dans le spectre de l'hydrogène ? Eh bien non, pas tout à fait. Il manquait encore quelque chose, à savoir un nouveau nombre quantique pour élucider complètement les effets des champs magnétiques.

Wolfgang Pauli: l'effet anormal de Zeeman, le spin électronique et le principe d'exclusion



L'explication du décalage magnétique des raies spectrales, tel que rapporté par Zeeman en 1894, constituait l'un des grands succès des orbites appelées Bohr-Sommerfeld. Mais, plus tard, des observations spectrales sous champ magnétique ont révélé encore d'autres raies et, cette fois, les physiciens ne savaient plus quoi en penser. Ils l'ont baptisé alors l'*effet anormal de Zeeman* (EAZ).

*L'EFFET N'AVAIT VRAIMENT
RIEN D'ANORMAL, SEULEMENT
MES PAIRS NE POUVAIENT
PAS COMPRENDRE.*



En 1924–1925, tout le monde était sous l'emprise l'EAZ, dont **Wolfgang Pauli** (1900–1958), un théoricien suisse. Cet effet le perturbait à telle enseigne qu'il a inspiré de nombreux récits à son sujet (la plupart étant probablement véridiques).

Pauli venait d'accepter une invitation à collaborer avec Bohr à Copenhague. Il avait écrit deux articles sur l'EAZ, mais ni l'un ni l'autre n'étaient satisfaisants à ses yeux. Au cours de son séjour (1922–1923), il se trouvait souvent déprimé et agité par son absence de progrès sur la question. Un jour, un collègue l'a croisé, errant sans but apparent dans les rues de Copenhague...



Pauli avait commencé à aller à l'école dans sa ville natale, Vienne, où, adolescent, il avait fait des progrès remarqués et remarquables en mathématiques et en physique. En 1918, il est admis à l'université de Munich où, avec les encouragements de son professeur Arnold Sommerfeld, il publia trois ans après un article sur la relativité générale qui a été porté aux nues dès lors qu'Einstein a écrit : « *Quiconque étudie ce travail mature et excellemment conçu, ne peut que s'étonner que son auteur n'a que 21 ans.* »

L'effet Pauli

Pauli a préparé sa thèse de doctorat sous la supervision de Sommerfeld en 1921, avec comme sujet *la théorie quantique de l'hydrogène ionisé*. Il a ensuite passé six mois comme «assistant» auprès de Max Born à Göteborg, puis est devenu **privat-docent** [*Privatdozent – enseignant non rémunéré, ayant l'habilitation mais pas encore de chaire*]. C'est de cette époque que datent les premières manifestations de l'*effet Pauli* (à ne pas confondre avec le *principe de Pauli*, qui sera traité plus loin) ...

Chaque fois que Pauli entrait dans un laboratoire, quelque chose fonctionnait mal au niveau des équipements! (D'où l'expression l'*effet Pauli*!)



Il était couramment admis que les théoriciens étaient nuls du point de vue de leur talent d'expérimentateur. Mais Pauli était un théoricien si exceptionnel que sa seule présence faisait que les équipements se «déglinguaient». Pauli aimait à raconter, hilare, que son ami **Otto Stern** (1888–1969), un expérimentateur distingué et des plus respectés, le consultait seulement au travers de la porte fermée de son laboratoire!

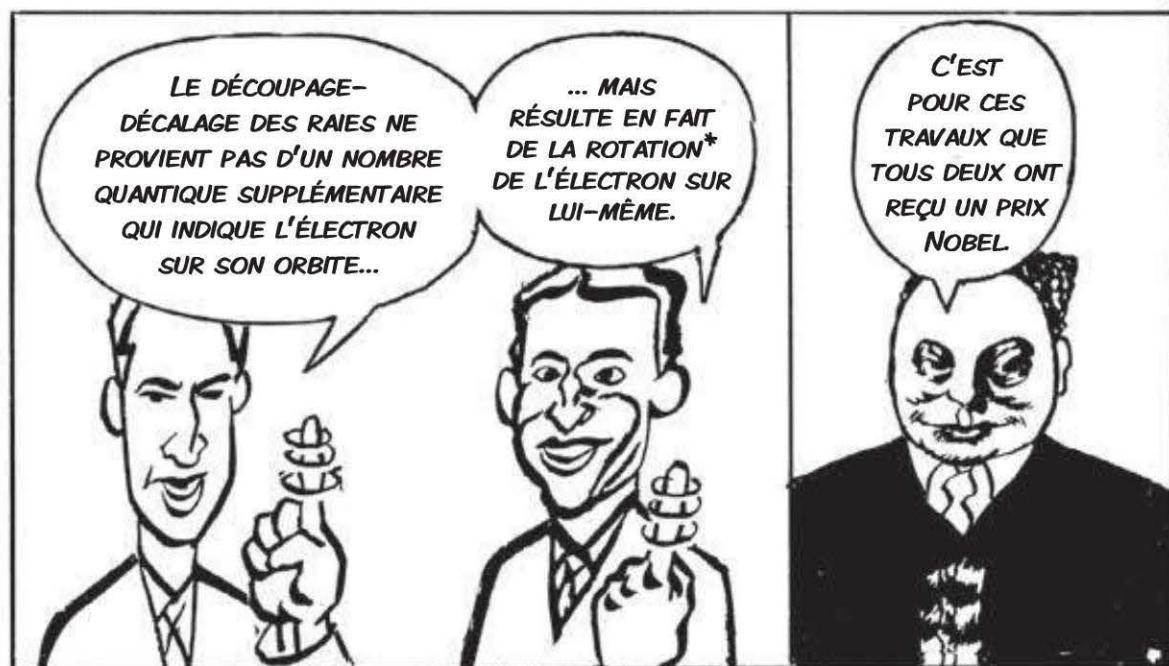
L'effet anormal de Zeeman (EAZ) – qui avait tant troublé Pauli pendant son séjour à Copenhague – a finalement conduit la communauté à immortaliser Pauli en tant que l'un des contributeurs majeurs de la théorie quantique.

La rotation cachée de Pauli et l'électron qui tournoie

Pauli a avancé l'hypothèse qu'un effet de **rotation cachée** produisait un moment angulaire supplémentaire responsable de l'EAZ. Il a donc proposé un **quatrième** nombre quantique ayant deux valeurs possibles, permettant enfin d'expliquer l'effet anormal de Zeeman qui avait rendu perplexes les physiciens.

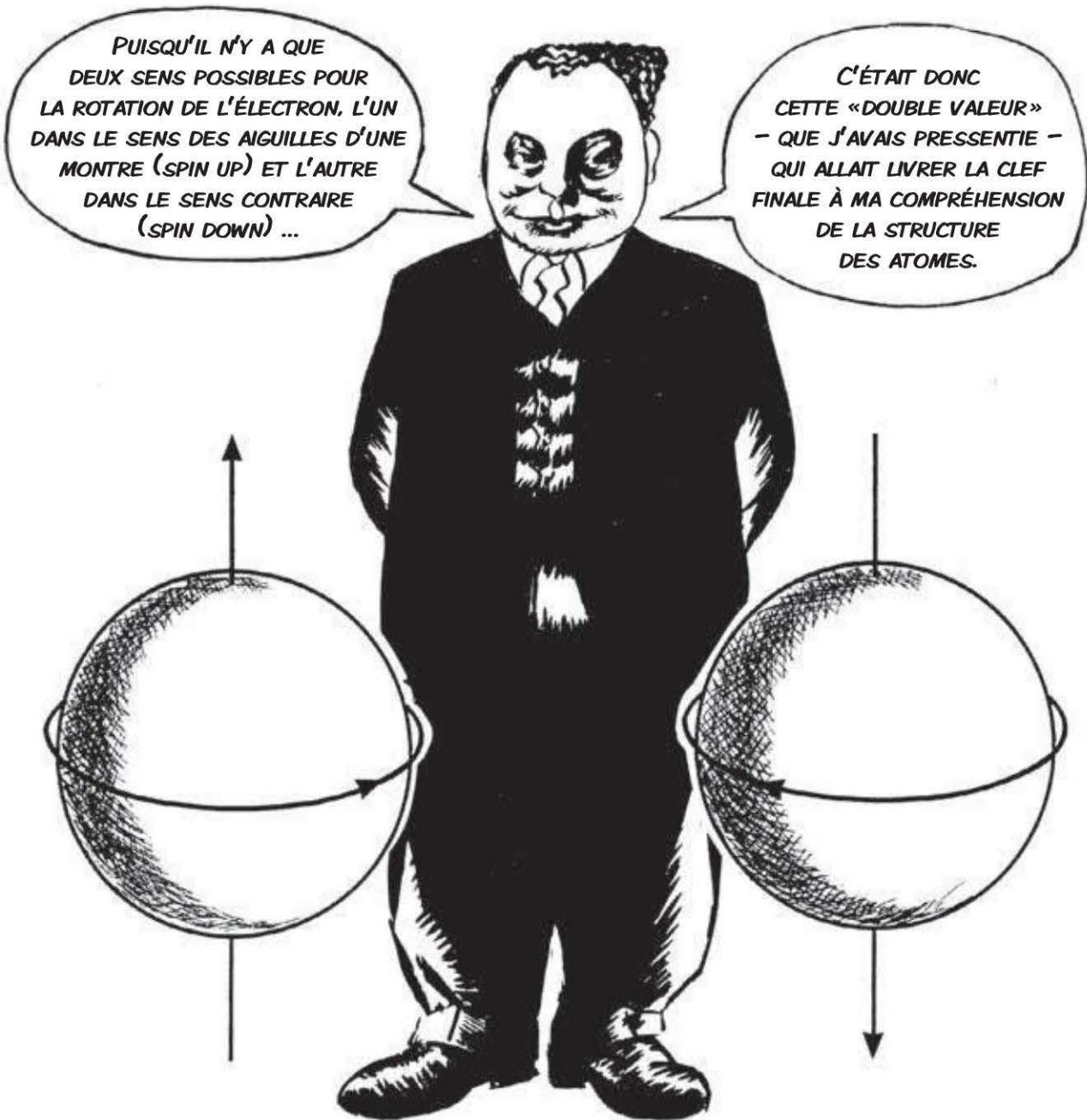


Pendant ce temps-là, deux physiciens néerlandais, **George Uhlenbeck** et **Sam Goudsmit** ont eu la même idée. Leur professeur à tous deux, **Paul Ehrenfest**, s'est montré plus accueillant et a envoyé leur article afin qu'il soit publié.



* appelée aussi le « spin »

On allait bientôt montrer que les résultats mystérieux connus sous le nom d'EAZ étaient dus à ce qui sera dénommé le «spin» de l'électron, phénomène physique qui lui confère un moment angulaire plus grand.

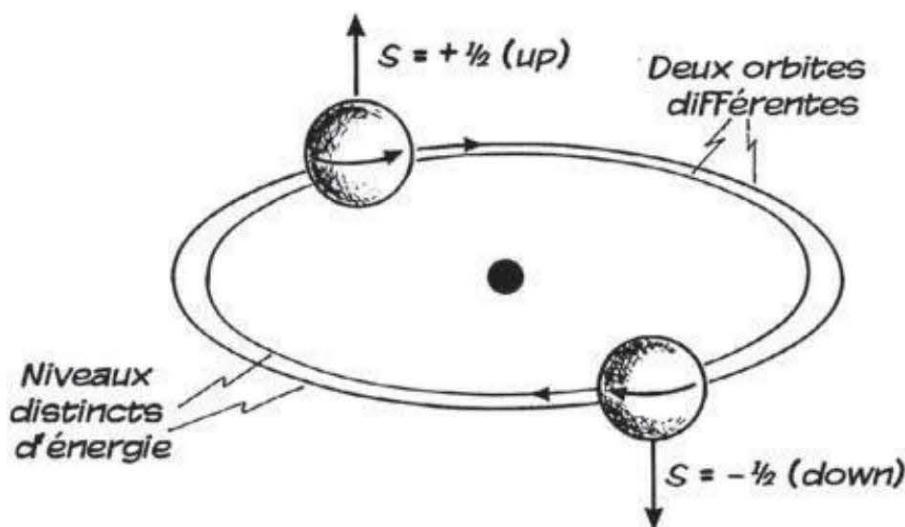


Il restait, cependant, un aspect troublant dans la découverte du spin des électrons et qui vaut d'être mentionné ici, puisqu'il a mené inévitablement, un an plus tard, à une nouvelle théorie quantique. Le moment angulaire de l'électron en rotation a **la moitié seulement de la valeur $h / 2\pi$ des orbites atomiques** et, pour cette raison, on lui a donné le nom de **spin $1/2$** .

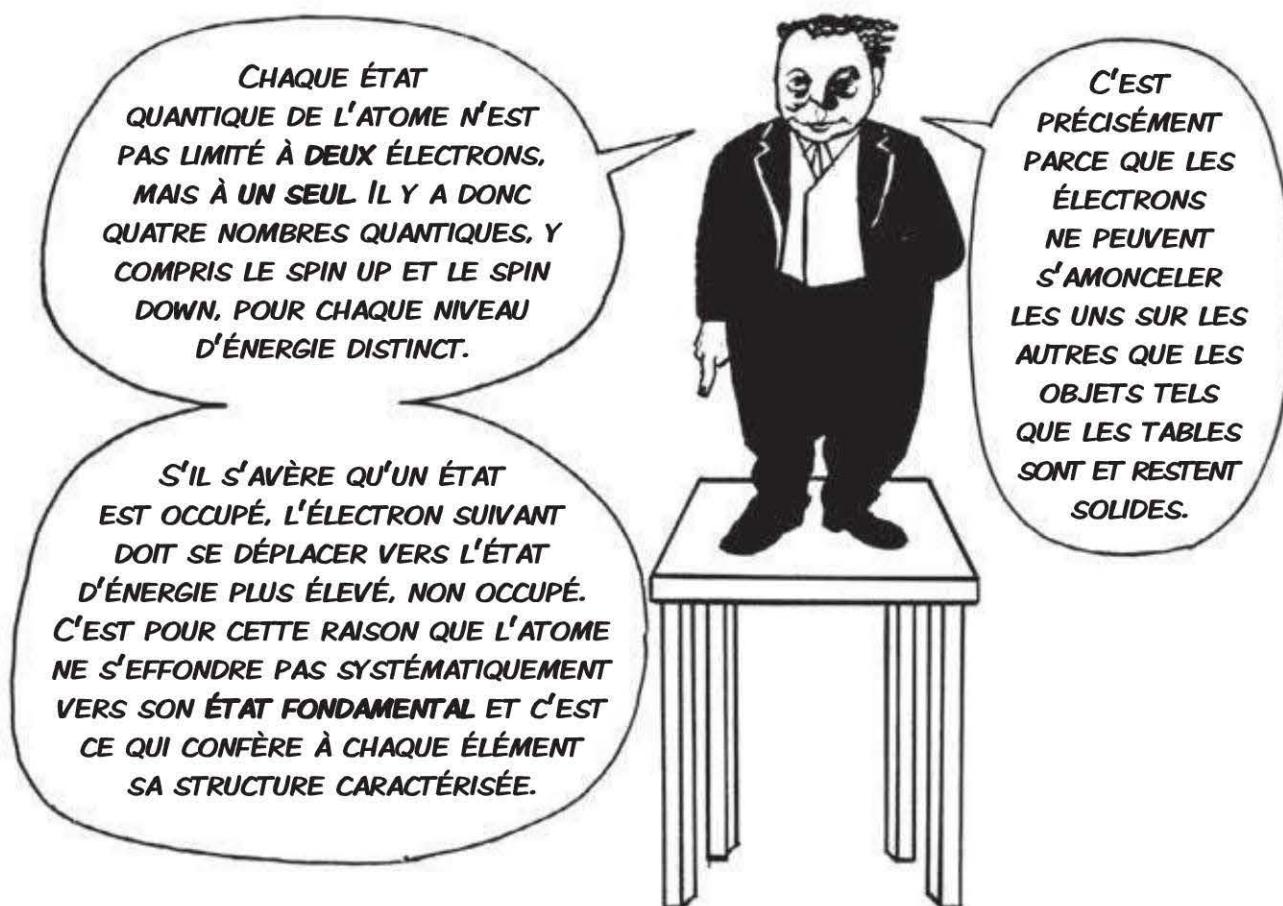
Un autre exemple d'un concept semi-classique qui ne fonctionnait pas tout à fait comme on pouvait s'y attendre (l'électron devrait faire deux tours avant de revenir à son état initial!).

Le principe d'exclusion de Pauli

Le puzzle initial de la structure atomique consistait à comprendre pourquoi tous les électrons ne tombaient pas pour finir leur course à leur état fondamental. Et c'est ici que Pauli a proposé que chaque état atomique (ensemble de trois nombres quantiques) contienne en fait **deux électrons** qui avaient donc besoin chacun d'une orbite exclusive. On a donné à cet état le titre un peu abusif de *quantification de l'espace*.



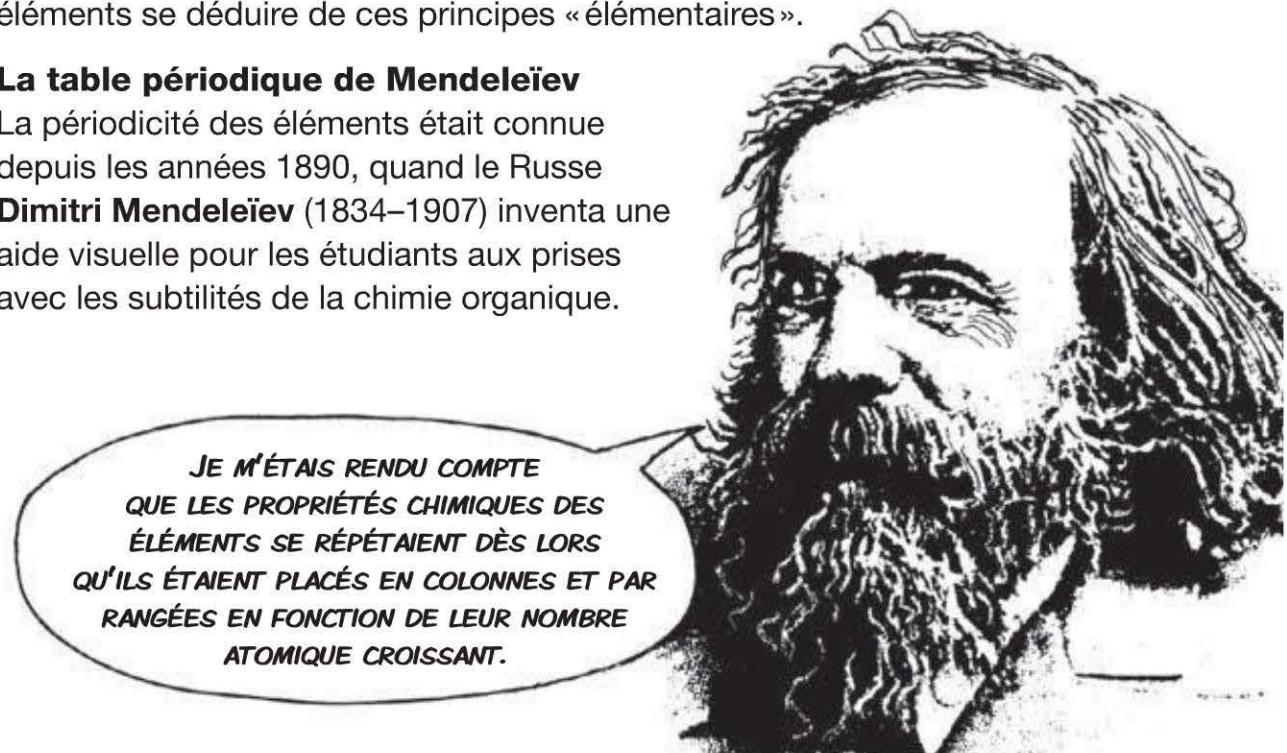
Avec son concept de spin à deux valeurs possibles, Pauli était en mesure de formuler de manière définitive son **principe d'exclusion**...



À la différence de son hypothèse antérieure qui se limitait aux électrons en orbites extérieures (dits électrons de valence) pour expliquer le phénomène de EAZ, Pauli proposait à présent que son principe s'applique à **tous les électrons** et à **tous les atomes**. Sur la base de ce principe à la fois simple et large d'application, les états quantiques pour n'importe quel atome pouvaient être « construits » et la forme même de la table périodique des éléments se déduire de ces principes « élémentaires ».

La table périodique de Mendeleïev

La périodicité des éléments était connue depuis les années 1890, quand le Russe **Dimitri Mendeleïev** (1834–1907) inventa une aide visuelle pour les étudiants aux prises avec les subtilités de la chimie organique.



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

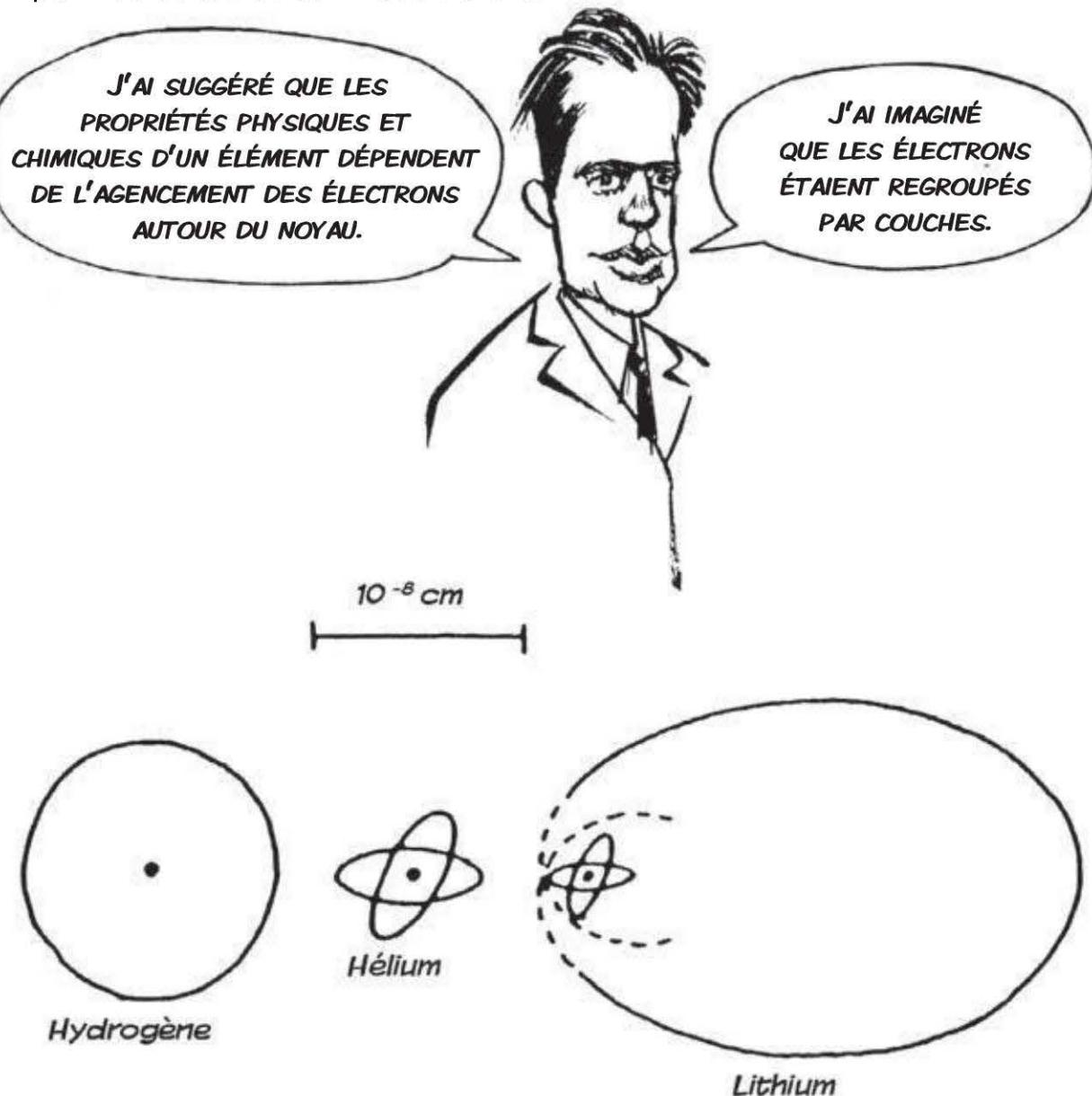
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВЪСЪ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

$T_1 = 50$	$Zr = 90$	$? = 180.$
$V = 51$	$Nb = 94$	$Ta = 182.$
$Cr = 52$	$Mo = 96$	$W = 186.$
$Mn = 55$	$Rh = 104,$	$Pt = 197,$
$Fe = 56$	$Ru = 104,$	$Ir = 198$
$Ni = Co = 59$	$Pi = 106,$	$Os = 199.$
$H = 1$	$Cu = 63,$	$Ag = 108 \quad Hg = 200$
$Be = 9,$	$Mg = 24$	$Zn = 65,$
$B = 11$	$Al = 27,$	$? = 68$
$C = 12$	$Si = 28$	$? = 70$
$N = 14$	$P = 31$	$As = 75$
$O = 16$	$S = 32$	$Se = 79,$
$F = 19$	$Cl = 35,$	$Br = 80$
$Li = 7$	$Na = 23$	$Ca = 40$
		$Sr = 87,$
		$? = 45$
		$Ce = 92$
		$Er = 56$
		$La = 94$

Cette périodicité est restée mystérieuse jusqu'au moment où Pauli a explicité son principe d'exclusion, en lui donnant une véritable interprétation, fondamentale. Toutefois, Bohr l'avait déjà expliquée, avant même la découverte de Pauli, en se servant de son modèle orbital de l'atome.

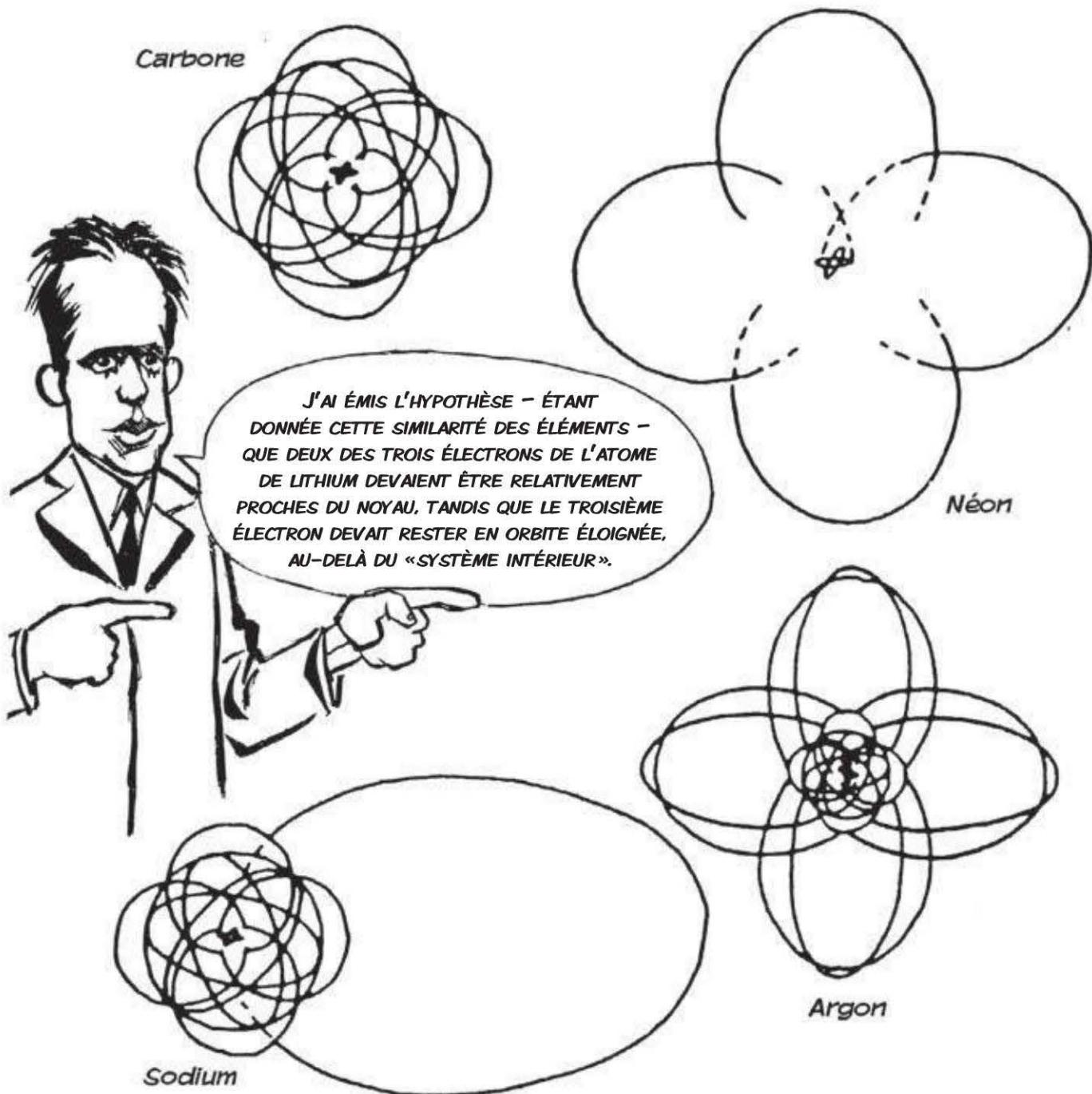
Explication donnée par Bohr pour l'agencement de la table périodique

Plutôt que l'explication des spectres observés par Balmer, c'était bel et bien la table périodique qui le préoccupait quand il a commencé ses études atomiques en 1913, et il a procédé avec une grande intuition physique, à partir de détails de son modèle orbital.



Chaque couche ne peut contenir qu'un certain nombre d'électrons et les propriétés chimiques de l'élément sont en rapport avec le degré de remplissage (ou de vide) de la couche donnée. Ainsi, on suppose que les couches des gaz inertes tels l'hélium, le néon, l'argon... sont complètement remplies.

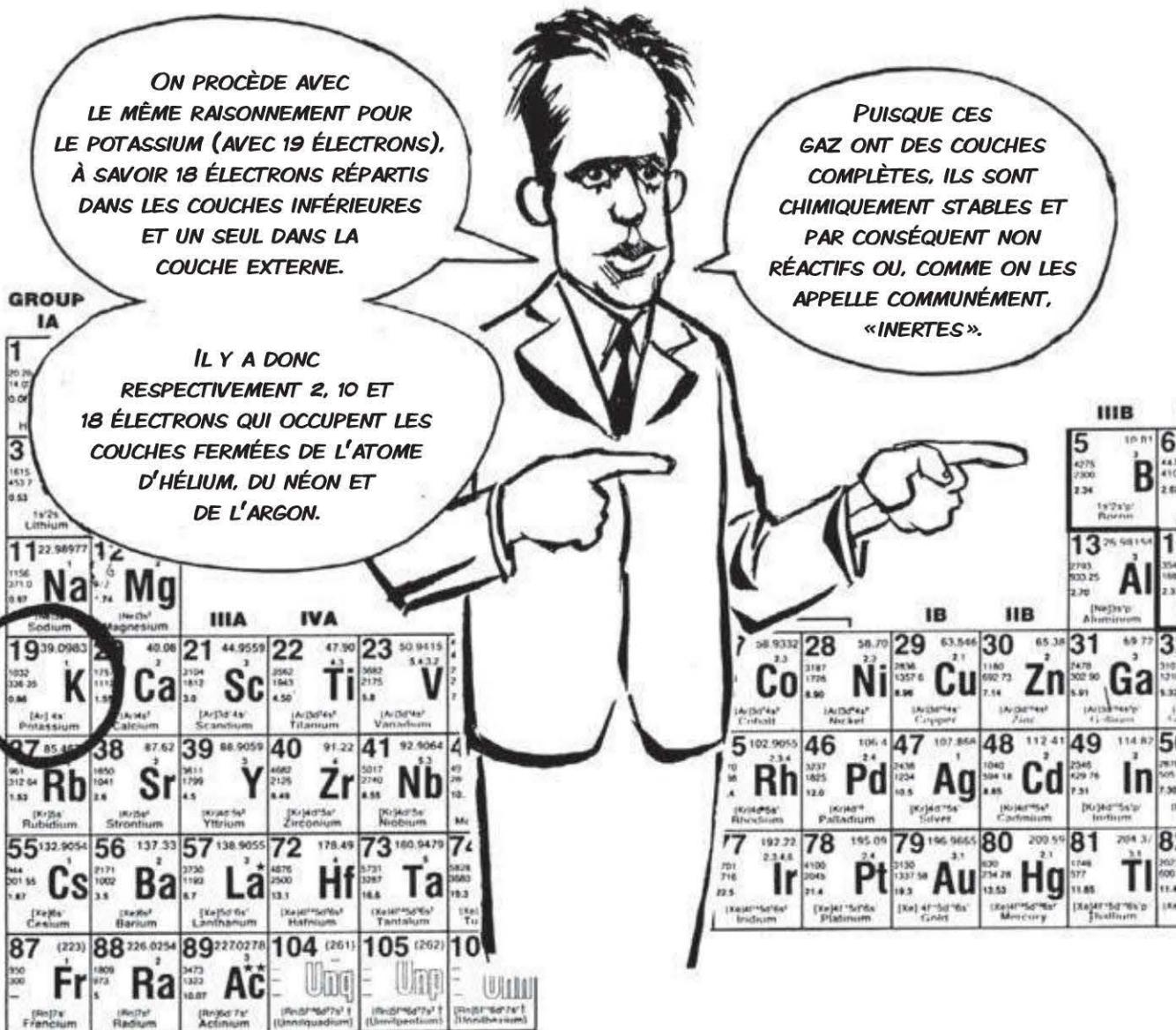
Bohr fait remarquer d'emblée que l'élément hydrogène (avec son électron unique) et le lithium (avec trois électrons) se ressemblent chimiquement. Tous deux possèdent une valence de 1 (c'est-à-dire un électron en couche externe) et entrent dans la composition de composés de type similaire, par exemple le chlorure d'hydrogène HCl (plus connu sous le nom d'acide chlorhydrique) et le chlorure de lithium LiCl.



Ainsi, le lithium pouvait-il être sommairement dessiné comme un atome d'hydrogène ? Cette image physique semblable était la raison de la similitude de leurs propriétés chimiques. La première couche contient deux électrons, et le troisième électron monte pour occuper la couche suivante (externe).

Couches fermées et gaz inertes

Le sodium (avec onze électrons) est le prochain élément dans la table périodique à posséder des propriétés chimiques similaires à celles de l'hydrogène et du lithium. Cette similarité nous suggère que l'atome de sodium est «comme l'hydrogène», avec un seul électron en orbite près de son noyau. Donc, dans le cas du sodium, le onzième électron doit se trouver dans la couche externe, ce qui laisse huit électrons pour occuper la seconde couche.



Ces idées qualitatives ont amené Bohr à la représentation cohérente qu'il imaginait pour l'agencement des électrons en orbite, disposés en couches autour du noyau de l'atome. L'hydrogène, le lithium, le sodium et le potassium ont chacun un seul électron (en couche externe) autour d'un noyau et ressemblent beaucoup à l'élément qui les précède, en l'occurrence un gaz inerte. On s'attend à ce que ce soit cet électron externe qui *interagisse* avec les atomes proches et cela est conforme aux faits observés.

Bohr a conduit une analyse complète des éléments et, en 1921, a proposé une table périodique telle que reproduite ci-dessous. La table de Bohr est encore en usage de nos jours et donne un exemple de la manière dont une théorie de la physique peut fournir une base plausible pour mieux comprendre la chimie.

	Period I	Period II	Period III	Period IV	Period V	Period VI	Period VII
1 H	3 Li	11 Na	19 K	37 Rb	55 Cs	87 --	
2 He	4 Be	12 Mg	20 Ca	38 Sr	56 Ba	88 Ra	
	5 B	13 Al	21 Sc	39 Y	57 La	89 Ac	
	6 C	14 Si	22 Ti	40 Zr	58 Ce	90 Th	
	7 N	15 P	23 V	41 Nb	59 Pr	91 Pa	
	8 O	16 S	24 Cr	42 Mo	60 Nd	92 U	
	9 F	17 Cl	25 Mn	43 Ma	61 Il		
	10 Ne	18 A	26 Fe	44 Ru	62 Sa		
			27 Co	45 Rh	63 Eu		
			28 Ni	46 Pd	64 Gd		
			29 Cu	47 Ag	65 Tb		
			30 Zn	48 Cd	66 Dy		
			31 Ga	49 In	67 Ho		
			32 Ge	50 Sn	68 Er		
			33 As	51 Sb	69 Tu		
			34 Se	52 Te	70 Yb		
			35 Br	53 I	71 Lu		
			36 Kr	54 Xe	72 Hf		
					73 Ta		
					74 W		
					75 Re		
					76 Os		
					77 Ir		
					78 Pt		
					79 Au		
					80 Hg		
					81 Tl		
					82 Pb		

Mais c'est bien Pauli qui a proposé le fondement logique qui sous-tend la table périodique «physique» de Bohr. Son *principe d'exclusion* (qui stipule que chaque électron doit posséder son propre ensemble unique de nombres quantiques) génère automatiquement les nombres magiques 2, 8, 18, etc., avancés par Bohr pour décrire les couches d'électrons. C'est la première manifestation du fait que chaque électron dans un atome donné «connaît l'adresse» de tous les autres électrons et occupe alors une place unique dans la structure de l'atome en question. (Nous reviendrons sur cette notion de «connectitude».)

La table qui suit montre comment le principe d'exclusion génère **les nombres magiques** (c'est-à-dire le nombre maximum d'électrons qui peuvent occuper chaque couche). La gamme des valeurs des nombres **k** et **m** peut être déduite des diagrammes p. 91–93. Le quatrième nombre quantique **s**, fixé par l'EAZ, qui représente le spin de l'électron, ne peut prendre *que* les valeurs «**up**» ou «**down**». Donc, dans cette table, les couches de Bohr correspondent aux orbites désignées par le nombre quantique principal, **n**.

	n	Possible k	Possible m	Possible s	Nombre total d'états possibles
1 ^{re} couche	1	1	0	$\pm \frac{1}{2}$	$2 = 2$
	2	1	0	$\pm \frac{1}{2}$	2
2 ^e couche	2	2	-1, 0, 1	$\pm \frac{1}{2}$	6
	3	1	0	$\pm \frac{1}{2}$	2
3 ^e couche	3	2	-1, 0, 1	$\pm \frac{1}{2}$	$6 = 18$
	3	3	-2, -1, 0, 1, 2	$\pm \frac{1}{2}$	10

Dualité onde/particule

Avant d'aborder une façon radicalement différente d'imaginer l'agencement des électrons dans un atome, il est important de comprendre d'abord les propriétés des ondes et de considérer ainsi l'un des paradoxes les plus intrigants qu'ont eu à affronter les physiciens.

La nature fondamentale du rayonnement et de la matière peut-elle être mieux décrite par une représentation ondulatoire ou particulaire ? Ou avons-nous besoin des deux ?

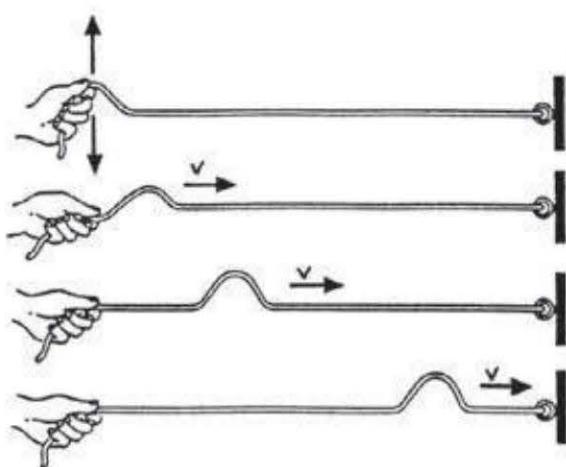
Pour trouver les origines de la controverse **onde/particule**, nous devons retourner à l'époque où Isaac Newton et le physicien néerlandais **Christiaan Huygens** (1629–1695) se sont affrontés sur la question de la nature de la lumière.



Alors, qui des deux savants a raison ? Et si c'est Huygens, quels sont les arguments en faveur d'une théorie ondulatoire de la lumière ?

Les propriétés des ondes

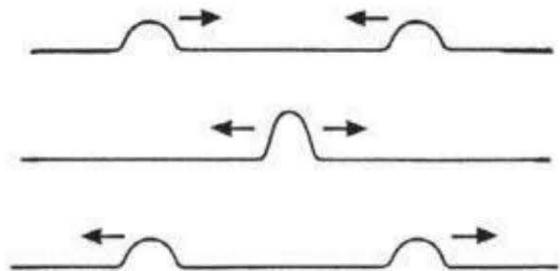
Il faut penser à une impulsion qui se propage le long d'une corde flexible mais tendue. Il s'agit là de la forme la plus simple de mouvement ondulatoire.



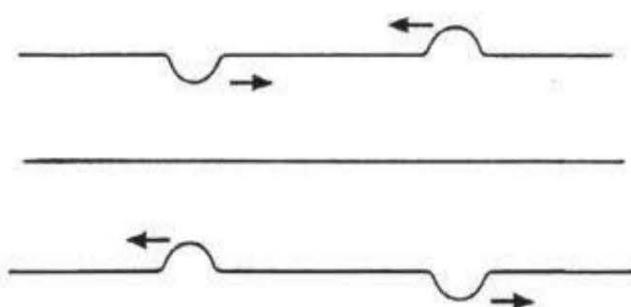
Considérons à présent deux impulsions générées à chaque bout de la corde, qui progressent l'une vers l'autre. Au point de rencontre, nous observons une propriété importante spécifique aux ondes, la **superposition** (la même chose ne se produit pas pour les particules).

La superposition

Si deux impulsions se propagent dans une corde et se rencontrent à un point donné en même temps, le déplacement latéral de la corde correspond à la somme algébrique des déplacements de chaque impulsion.

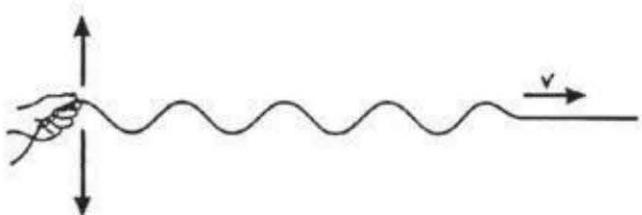


Notons que si les impulsions ont la même forme et la même ampleur, mais sont de polarité opposée, elles s'annulent complètement au point de jonction (l'énergie est transférée au mouvement de la corde) et réapparaissent de l'autre côté.



Les ondes périodiques

On parle d'ondes périodiques si des impulsions se succèdent de manière régulière. Les ondes sonores, les vagues sur l'eau et les ondes de lumière sont toutes périodiques.



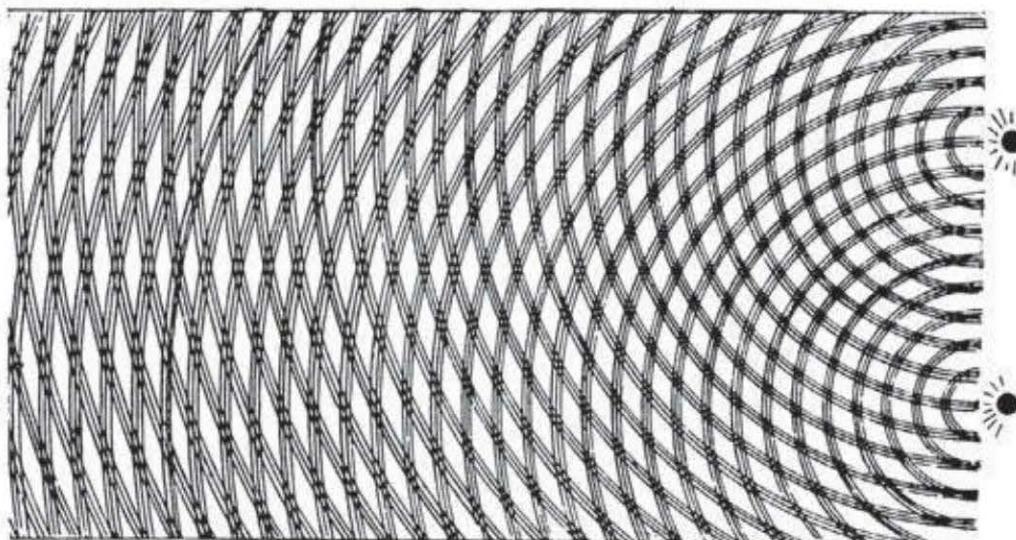
La vitesse de propagation d'une onde

La vitesse (v), la longueur d'onde (λ) et sa fréquence (f) se retrouvent dans la formule $v = f \lambda$. Cela constitue une évidence dans la mesure où la fréquence f est donnée par le nombre d'ondes par seconde et λ est la longueur de chaque onde.

Interférence – l'expérience de la double fente

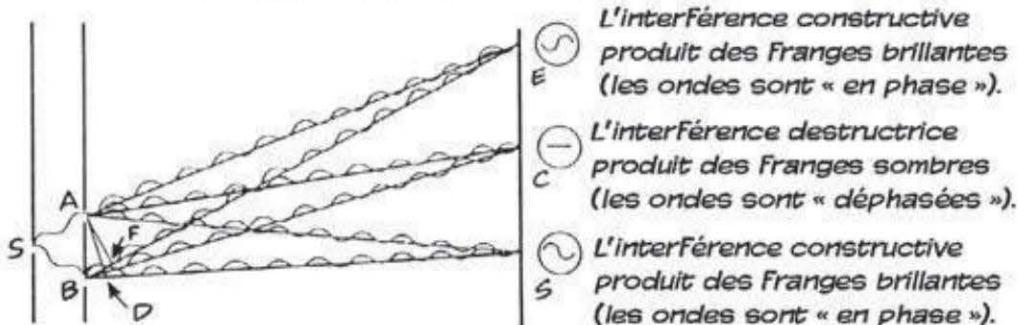
Il s'agit d'une expérience « classique ». Si deux ondes périodiques identiques arrivent en même temps mais avec une phase décalée d'exactement une demi-onde, une **interférence destructrice** se produit et le résultat est un point noir (si l'onde est lumineuse). Si le décalage est **exactement d'une longueur d'onde**, alors le résultat est un point brillant (dans le cas d'une source lumineuse) que l'on appelle **interférence constructive**.

C'est un médecin et physicien britannique **Thomas Young** (1773–1829) qui, le premier, a rapporté ce phénomène, en 1801. Sa démonstration de l'interférence lumineuse (franges brillantes et sombres) constituait pour les observateurs de l'époque une évidence claire de la nature ondulatoire de la lumière. Vous pouvez faire le même constat au moyen du dessin original de Young, reproduit ci-dessous.



Dans ce dessin qui reproduit l'original de Young, on voit les effets de l'interférence. Pour mieux saisir visuellement le phénomène, vous placerez votre œil près du bord droit de la page pour regarder le dessin en biseau.

Le montage à double fente pour observer l'interférence



Diffraction et interférence

La diffraction, qui désigne la courbure des ondes en rencontrant un bord, peut également produire des franges d'interférence. Quand une source lumineuse ponctuelle (ou toute autre sorte d'onde) traverse un minuscule trou circulaire (de dimension proche de la longueur d'onde de la lumière incidente), il se produit une diffraction sur les bords de ce trou telle que la lumière se disperse sur un disque écran et que l'on y perçoit les franges.



Ce schéma de franges apparaît dans la photographie ci-dessus. Bien que les parcours de propagation des ondes soient plus complexes que dans le cas de l'expérience à double fente, les principes en action sont identiques. Nous reverrons ce schéma quand nous traiterons de l'existence non ambiguë des ondes.

En plus de ces effets d'interférence, une démonstration supplémentaire de la nature ondulatoire de la lumière se trouvait dans la théorie électromagnétique énoncée par Maxwell en 1865. Les physiciens classiques du xix^e siècle étaient satisfaits. La lumière était indiscutablement ondulatoire.

Einstein, une voix solitaire s'élève

Au début du xx^e siècle, le jeune Einstein avait reproposé l'idée des corpuscules pour expliquer l'*effet photoélectrique* (cf. p. 44). Et quelques années plus tard, en 1919, il appliqua sa nouvelle et puissante méthode des fluctuations statistiques à la loi sur le rayonnement des corps noirs de Planck, afin de montrer que deux termes distincts coexistaient, formant ainsi une *dualité*...



Einstein était bien seul pour se préoccuper ainsi de ce problème. Personne ne croyait à ses photons. Mais ce ne sera pas la première fois qu'Einstein devance ses pairs en traitant d'une partie ambiguë de la théorie quantique, du moins en ce qui concerne la lumière.

Cependant, même lui n'était pas prêt au choc qui allait venir de Paris. Fort heureusement, il fut contacté immédiatement. On demandait son avis de toute urgence!

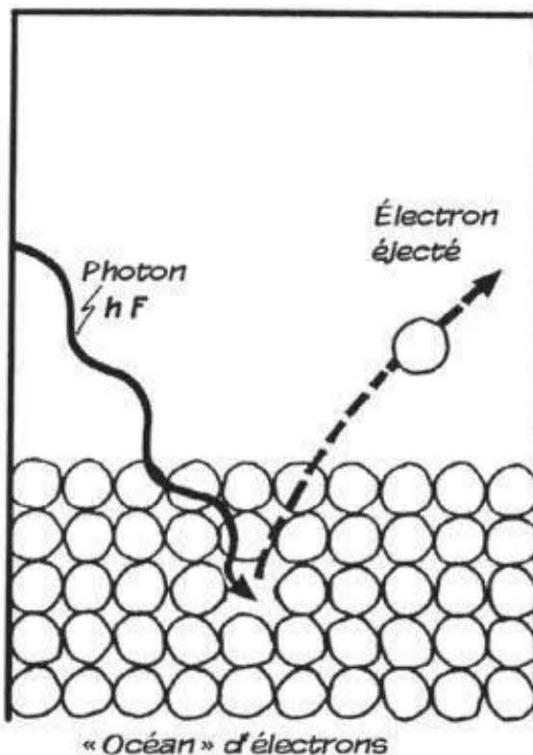
Le prince français qui découvre les ondes de la matière

En 1923, un jeune diplômé inscrit à la Sorbonne, à Paris, le prince **Louis de Broglie** (1892–1987) proposa une idée des plus étonnantes, à savoir que les particules pouvaient montrer des propriétés ondulatoires. De Broglie avait été largement influencé par les arguments d'Einstein selon lesquels on aurait peut-être besoin du concept de dualité si l'on voulait comprendre correctement la nature de la lumière.

Dans sa thèse de doctorat, soutenue en 1924, on lit :



Il avait été profondément impressionné par ces particules de lumière, pour reprendre le terme d'Einstein, qui étaient capables de produire l'effet photoélectrique (à savoir déloger des électrons d'une cible métallique), tout en portant l'information périodique qui menait à des franges d'interférence dans un contexte différent, telle l'expérience à double fente. Puis arrive «la bombe»: dans la première partie de sa thèse, de Broglie proposa l'un des plus grands principes unificateurs de la physique...



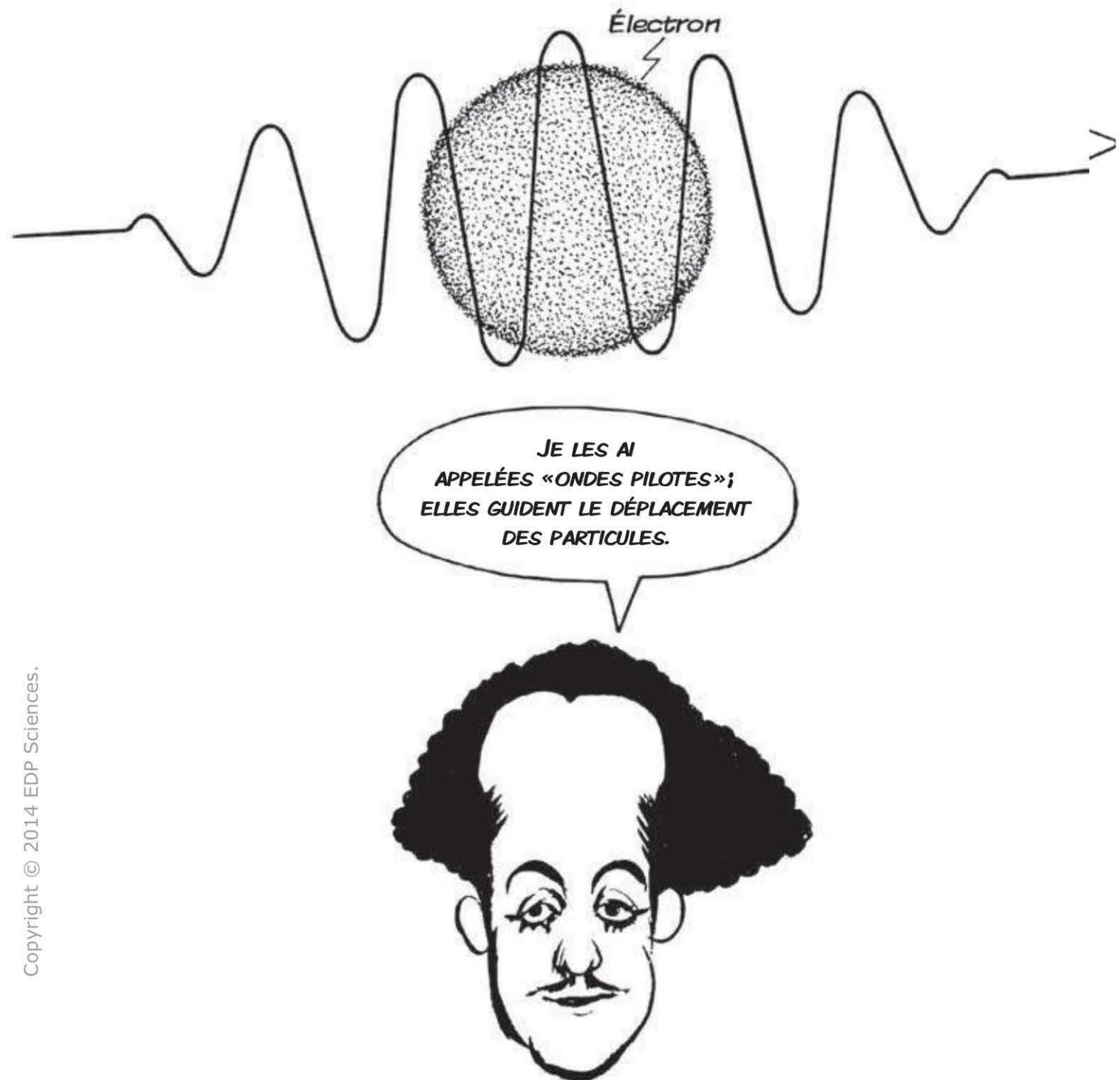
*Un photon avec une
Fréquence mesurable
(longueur d'onde)
interagit avec un
seul électron.*

*JE SUIS
CONVAINCU QUE LE
CONCEPT DE DUALITÉ ONDE/
PARTICULE RÉVÉLÉE PAR EINSTEIN
DANS SA THÉORIE SUR LA NATURE
DE LA LUMIÈRE A, EN FAIT, UNE
PORTÉE GÉNÉRALE ET S'ÉTEND
AU MONDE PHYSIQUE DANS
SA TOTALITÉ.*

*IL ME PARAÎT COMME
CERTAIN QUE LA PROPAGATION
D'UNE ONDE EST NÉCESSAIREMENT
ASSOCIÉE AU DÉPLACEMENT D'UNE
PARTICULE, PEU IMPORTE LAQUELLE:
PHOTON, ÉLECTRON, PROTON
OU AUTRE.*

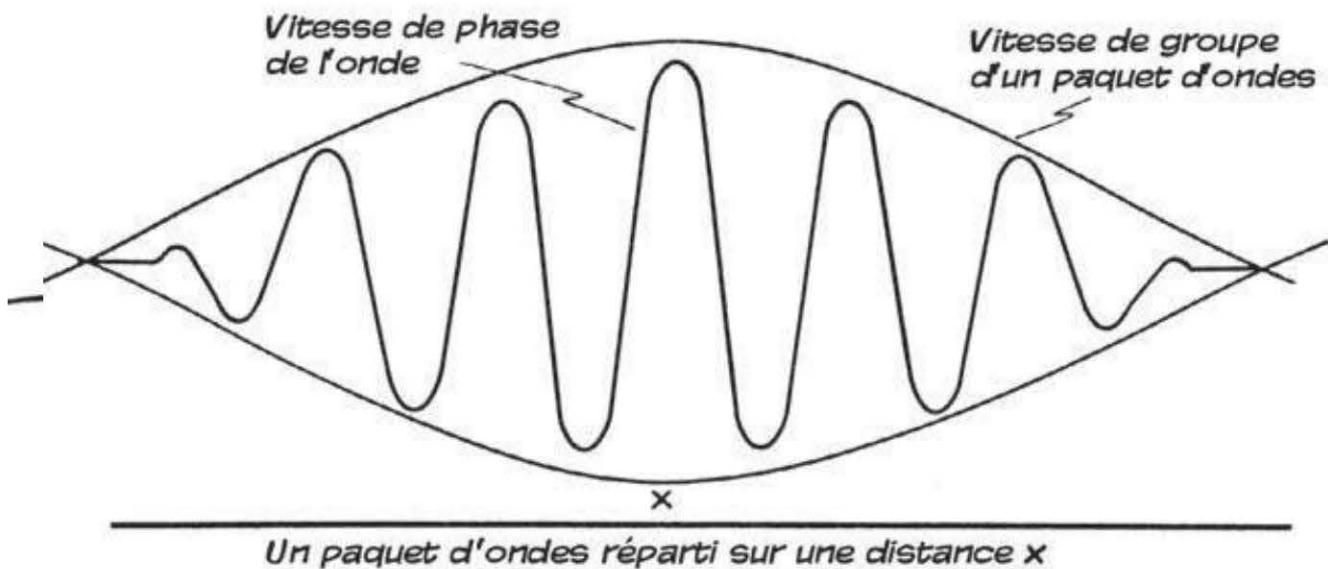
L'onde associée

De Broglie a affecté une fréquence, non pas au comportement périodique interne de la particule (c'est ainsi qu'il avait imaginé le photon d'Einstein), mais à une onde qui accompagnerait la particule dans l'espace et le temps, de telle sorte qu'elle était toujours «en phase» avec le processus «interne».

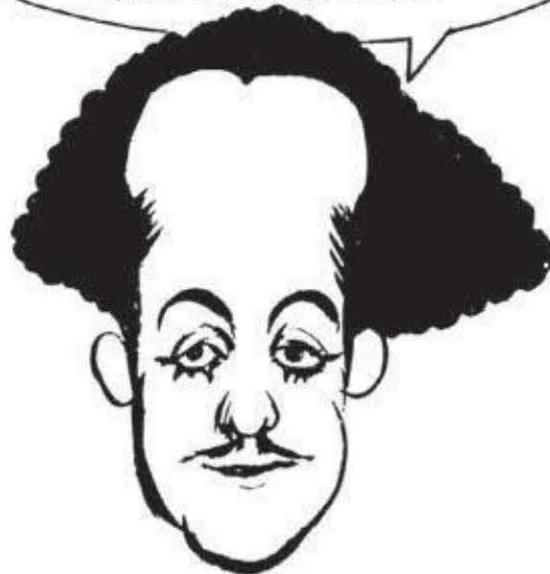


De telles ondes pourraient-elles être un jour détectées ? Autrement dit, ces ondes mystérieuses sont-elles en rapport avec le **déplacement réel des particules** et peuvent-elles être mesurées ?

De Broglie a répondu «oui», en ce sens que ces ondes ne sont pas de pures idées abstraites. Mais le résultat important dans ces idées novatrices et radicales, du point de vue de la physique, réside dans le fait que l'on devait associer **deux vitesses** aux ondes pilotes.



L'UNE DES VITESSES EST
LA VITESSE DE PHASE - C'EST-À-DIRE LA
VITESSE DE PROPAGATION DE LA CRÊTE D'ONDE -;
L'AUTRE, APPELÉE VITESSE DE GROUPE, DÉSIGNE
LA VITESSE DE PROPAGATION DES ZONES DE
RENFORCEMENT (LÀ OÙ DE NOMBREUSES
ONDES SE SUPERPOSENT).



De Broglie a identifié la vitesse de groupe comme étant la vitesse d'une particule et a démontré que la zone de renforcement possède toutes les propriétés mécaniques – tels l'énergie et le moment – que l'on associe normalement à une particule. (Cela est semblable à la manière dont une **impulsion** se produit par la superposition de nombreuses ondes de fréquences différentes.)

Des conclusions dramatiques

De Broglie devait annoncer des conclusions encore plus dramatiques lorsqu'il rapporta des relations simples mathématiques pour ses idées – par analogie avec les photons.

Il est parti de la célèbre équation d'Einstein $E = mc^2$ pour désigner l'énergie totale (de toute matière). Et, dans ce cas, les photons...

$$E = mc^2 = (mc)(c)$$

Observons maintenant comment de Broglie y a opéré des substitutions.

Puisque **mc** est la masse que multiplie la vitesse, le *moment p* d'un photon est

$$E = (p)(c) = (p)(f\lambda)$$

avec **c** (vitesse) = **f** (fréquence) que multiplie **λ** (longueur d'onde) pour les ondes.

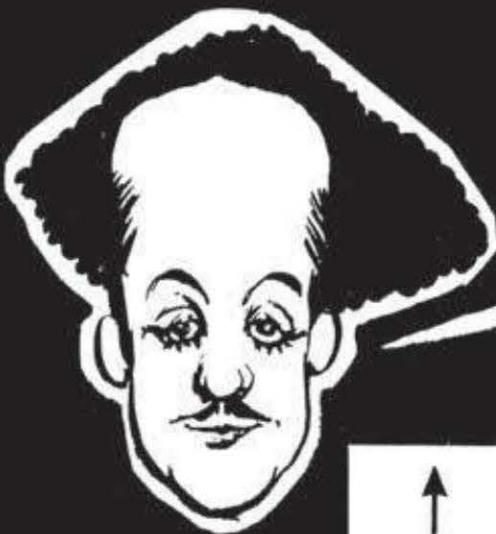
Nous reprenons $e = hf$ de la relation Planck/Einstein dans la formule ci-dessus pour obtenir

$$(h)(f) = (p)(f\lambda)$$

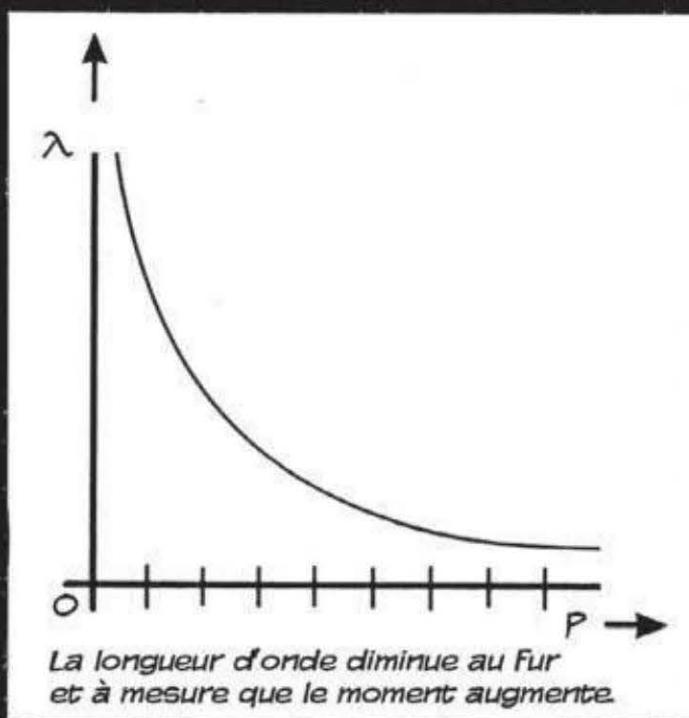
Et, moyennant un peu d'algèbre, nous parvenons à $h/p = \lambda$ (photons).



CETTE FORMULE
SIGNIFIE QUE SI LA
LONGUEUR D'ONDE DIMINUE,
LE MOMENT DES PHOTONS
DE LUMIÈRE AUGMENTE.



CELA CONSTITUE UN RÉSULTAT TRÈS IMPORTANT ET SERVIRA À MONTRER COMMENT HEISENBERG A EXPLICITÉ SON PRINCIPE D'INCERTITUDE; IL CONVIENT DE BIEN LE COMPRENDRE À CE STADE. SON ÉNONCÉ FORMEL EST SIMPLE ET SON CONCEPT D'UNE IMMENSE PORTÉE.



Par analogie directe, de Broglie a annoncé que la formule serait «vraie» (et donc vérifiable) non seulement pour les **photons**, mais aussi pour les **électrons**... et, enfin, pour **toute** particule

$$\lambda = h/P \dots$$

autrement dit (la longueur d'onde) = (la constante de Planck divisée par le moment).

Pour les électrons,

$$\text{le moment } P = (m) (v) = (\text{masse}) (\text{vitesse})$$

peut facilement être calculé de façon expérimentale et la longueur d'onde peut ainsi être déduite de la formule de de Broglie.

Pour la plupart des physiciens, le concept proposé par de Broglie paraissait absurde. L'électron était une **PARTICULE**, connue des physiciens classiques depuis sa découverte par J. J. Thomson en 1897!

Une thèse étonnante

Les idées avancées par de Broglie devant son jury de soutenance, en 1924 à l'université de Paris, ont décontenancé ses membres. Sa thèse avait pour titre «*Recherches sur la théorie quantique*». Le jury de thèse comprenait l'éminent physicien **Paul Langevin** (1872–1946) qui avait reçu par avance un exemplaire qu'il avait fait suivre à Einstein.

Ce dernier a lu la thèse et en a informé **Henrik Lorentz** (1853–1928), comme suit :



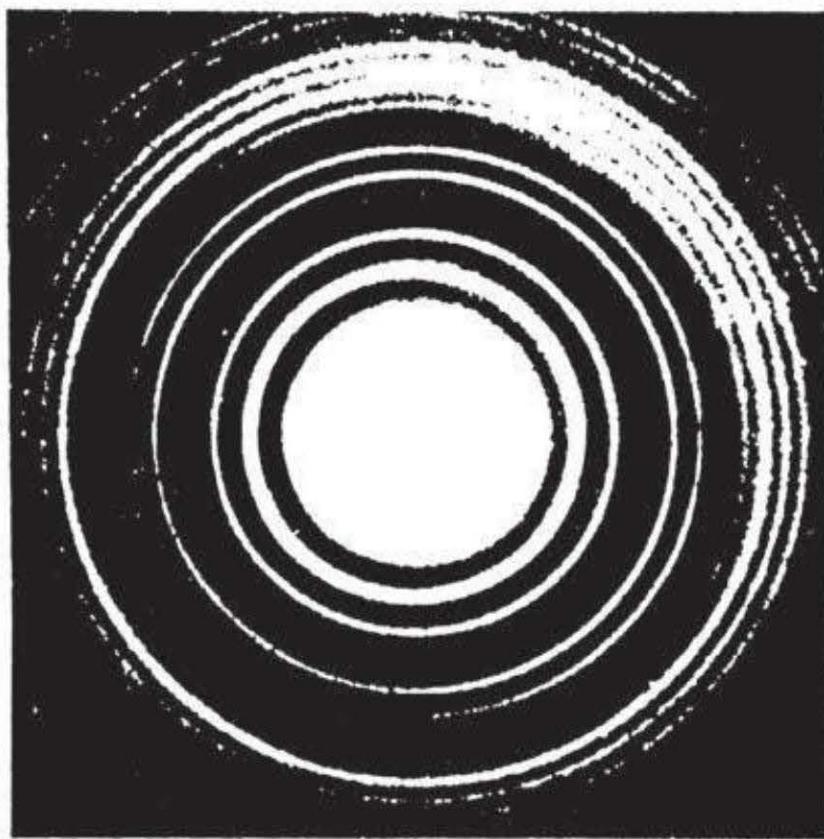
La confirmation des ondes de la matière

En quelques années seulement, toutes les prédictions de de Broglie furent vérifiées expérimentalement. Ce qui est remarquable, c'est la suggestion faite par de Broglie face à un membre de son jury de thèse un tant soit peu sceptique...



LES ONDES DE LA
MATIÈRE SONT OBSERVABLES
DANS DES EXPÉRIENCES DE
DIFFRACTION DE RAYONS X
TRAVERSANT DES RÉSEAUX
CRISTALLINS.

Ironie du sort, de telles franges de diffraction étaient révélées pour la première fois par **G. P. Thomson** (1892–1975) – ce qui démontre la propriété ondulatoire des électrons.

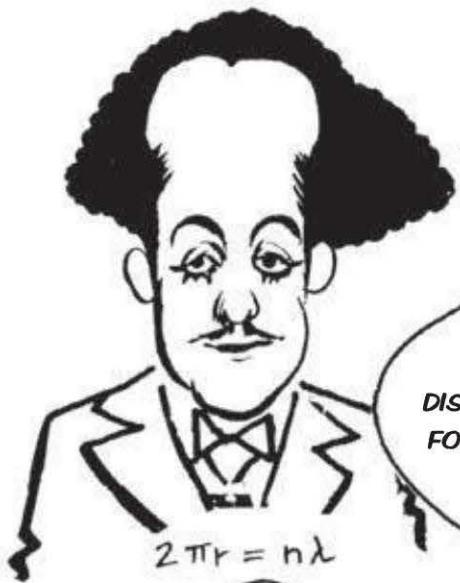


C'ÉTAIT
ENVIRON 30 ANS
APRÈS QUE MON
PÈRE J. J. THOMSON
A DÉMONTRÉ
LA PROPRIÉTÉ
CORPUSCULAIRE DES
ÉLECTRONS.



Et comme nous allons le découvrir tout de suite, de Broglie allait encore avancer une idée intéressante.

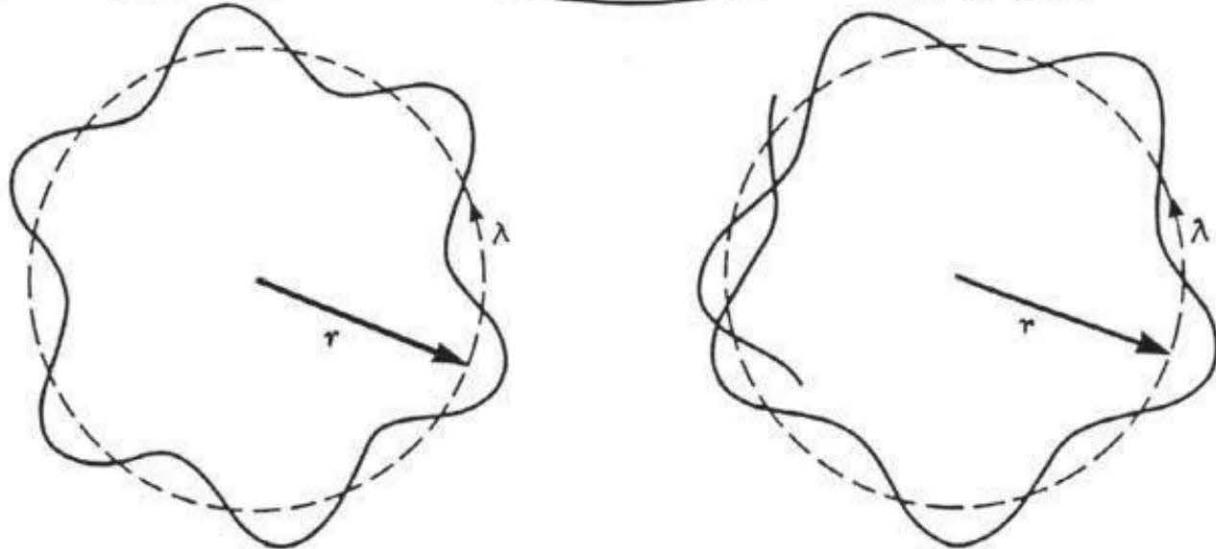
Les ondes électroniques dans les atomes



DANS CETTE SITUATION,
SEULES CERTAINES FRÉQUENCES
DISCRÈTES SONT PRODUITES - LA NOTE
FONDAMENTALE ET SES HARMONIQUES,
COMME CHAQUE ÉTUDIANT DE
MUSIQUE DOIT LE SAVOIR.

QUAND L'ÉLECTRON
SE DÉPLACE AUTOUR DE SON NOYAU,
L'ONDE ASSOCIÉE EST STATIONNAIRE,
C'EST-À-DIRE SOUS FORME D'UNE
ONDE ENTRETENUE (CF. P. 106).
COMME L'ONDE QUI AGITE UNE
CORDE DE VIOLON FIXÉE PAR
SES DEUX EXTRÉMITÉS.

$$2\pi r \neq n\lambda$$



Les ondes stationnaires de l'électron dans un atome. Seules certaines longueurs d'onde s'accordent de la circonférence de l'orbite.

Voici précisément ce dont de Broglie avait besoin en 1913 pour étayer son postulat de l'atome d'hydrogène (on se rappelle du facteur inexplicable de 2π). En insérant un nombre entier d'ondes d'électrons autour de la circonférence de l'orbite et en invoquant les formules de de Broglie, Bohr aurait pu donner une justification théorique complète de la quantification des orbites. Pour s'en convaincre, il faut encore un peu d'algèbre...

$$n\lambda = 2\pi r \quad (\text{ondes stationnaires})$$

$$n(h/mv) = 2\pi r \quad (\text{se servant de l'équation de de Broglie})$$

$$n(h/2\pi) = m v r \quad (\text{postulat de l'orbite quantifiée})$$

La condition quantique de Bohr **n'est plus un postulat**, elle est devenue réalité...

Visualiser l'atome : l'ancienne théorie quantique

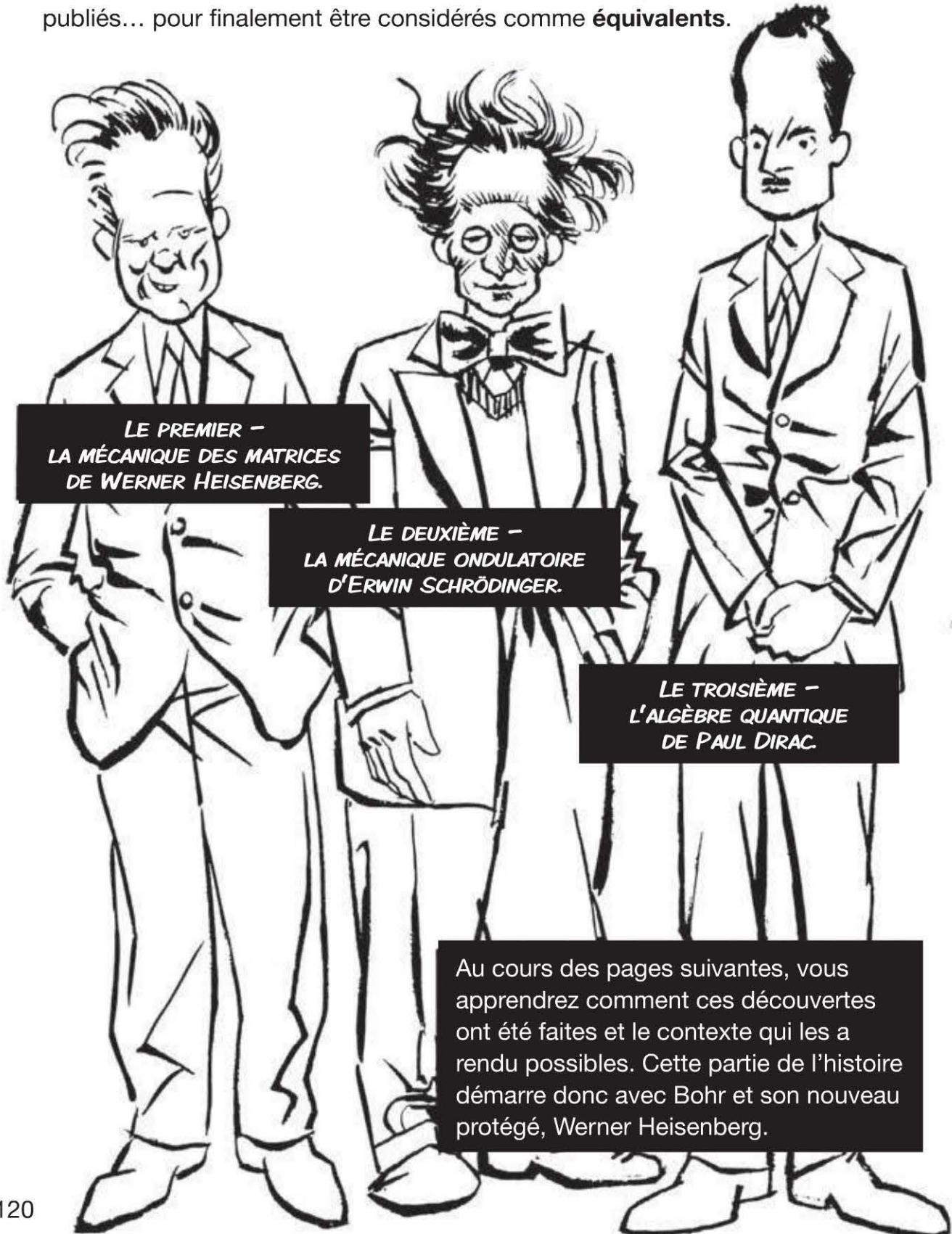
L'ancienne théorie quantique, qui découle du modèle orbital de l'atome de Bohr (y compris les modifications apportées par Sommerfeld), pouvait s'enorgueillir de quelques succès : le **spectre d'hydrogène**, c'est-à-dire la dérivée de la formule de Balmer, les **nombres quantiques** et les **règles de sélection** des états possibles d'énergie dans un atome, l'**explication de la table périodique** des éléments et le **principe d'exclusion** de Pauli.



Pour l'instant, cela n'a aucune importance. Nous aurons besoin des deux visions pour poursuivre notre exposé. Mais avec cette « image » ambiguë de l'électron, à la fois onde et particule, nous nous approchons de la substance véritable qui sous-tend la théorie quantique.

La triple naissance de la nouvelle théorie quantique

Faisons le point sur ce qui va signaler la fin de 25 ans de confusion. Pendant ces 12 mois (juin 1925–juin 1926), pas un mais **trois** développements distincts, indépendants offrant une théorie quantique complète allaient être publiés... pour finalement être considérés comme **équivalents**.





Heisenberg, génie et alpiniste

Werner Heisenberg (1901–1976) a été élevé à Munich où son père était professeur de grec à l'université. Toujours attiré par les randonnées en montagne, Heisenberg a pu profiter des Alpes bavaroises qui encerclent la ville. Étudiant brillant et aussi excellent pianiste, Heisenberg s'était plongé dans des études personnelles de physique dès le lycée.

À l'automne 1920, aussitôt après son admission à l'université de Munich (pour y étudier la physique avec le professeur Sommerfeld), Heisenberg rencontra Wolfgang Pauli, point de départ d'une amitié qui allait durer toute sa vie.

Pauli et Heisenberg étaient ensemble à Göteborg en juin 1922 quand ce dernier – tout juste âgé de 20 ans et doctorant – a rencontré non seulement Bohr, mais s'est permis de le questionner lors d'un cours. Bohr a alors répondu, non sans hésitation.

À LA FIN DU COURS, BOHR M'A DEMANDÉ DE ME JOINDRE À LUI, POUR FAIRE UNE PROMENADE L'APRÈS-MIDI MÊME, DANS LA MONTAGNE DE HAINBERG.

CETTE BALADE ALLAIT AVOIR DE PROFONDES RÉPERCUSSIONS SUR MA CARRIÈRE SCIENTIFIQUE. OU DEVRAIS-JE DIRE PLUTÔT QUE MA CARRIÈRE SCIENTIFIQUE N'A VRAIMENT DÉBUTÉ QUE CET APRÈS-MIDI-LÀ, QUAND BOHR M'A EXPLIQUÉ QUE... LES ATOMES N'ÉTAIENT PAS DES OBJETS.

AU BOUT DE TROIS HEURES DE DISCUSSION - ET POUR LA PREMIÈRE FOIS -, JE VOYAS QUE L'UN DES FONDATEURS DE LA THÉORIE QUANTIQUE ÉTAIT TRÈS TROUBLÉ PAR LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES. BOHR AVAIT UNE COMPRÉHENSION PROFONDE DES CHOSES, NON PAS PAR SES ANALYSES MATHÉMATIQUES, MAIS À PARTIR D'OBSERVATIONS DE PHÉNOMÈNES RÉELS.

IL PRÉSENTAIT LES RAPPORTS DES CHOSES OBSERVÉES INTUITIVEMENT PLUTÔT QUE PAR UNE ANALYSE FORMELLE.

De retour de cette randonnée, Bohr a parlé à des amis d'Heisenberg.

HEISENBERG A TOUT COMPRIS ET IL A DÉSORMAIS LA SOLUTION ENTRE SES MAINS. IL FAUT QU'IL TROUVE UNE EXPLICATION AUX DIFFICULTÉS QUE NOUS VOYONS DANS LA THÉORIE QUANTIQUE.

De toute évidence, Bohr avait décelé chez le jeune physicien Heisenberg des talents inouïs.

Heisenberg réserva une surprise à Niels Bohr. Il n'aimait pas du tout l'idée des orbites d'électron telles que Bohr les avait imaginées dans son modèle de l'atome.

JAMAIS ON NE POURRA LES OBSERVER; ALORS À QUOI BON PARLER DE PARCOURS INVISIBLES À L'INTÉRIEUR D'ATOMES MINUSCULES DÉJÀ EUX-MÊMES INVISIBLES?

SI L'ON NE PEUT OBSERVER L'ATOME, LE CONCEPT EST DÉNUÉ DE SENS.

Au printemps 1925, il quitte Copenhague et retourne à Göteborg où Max Born avait obtenu pour lui le titre et la fonction de *Privatdozent*, à seulement 22 ans! En Allemagne, Heisenberg souffrait de deux allergies majeures : les pollens et la question des orbites atomiques.

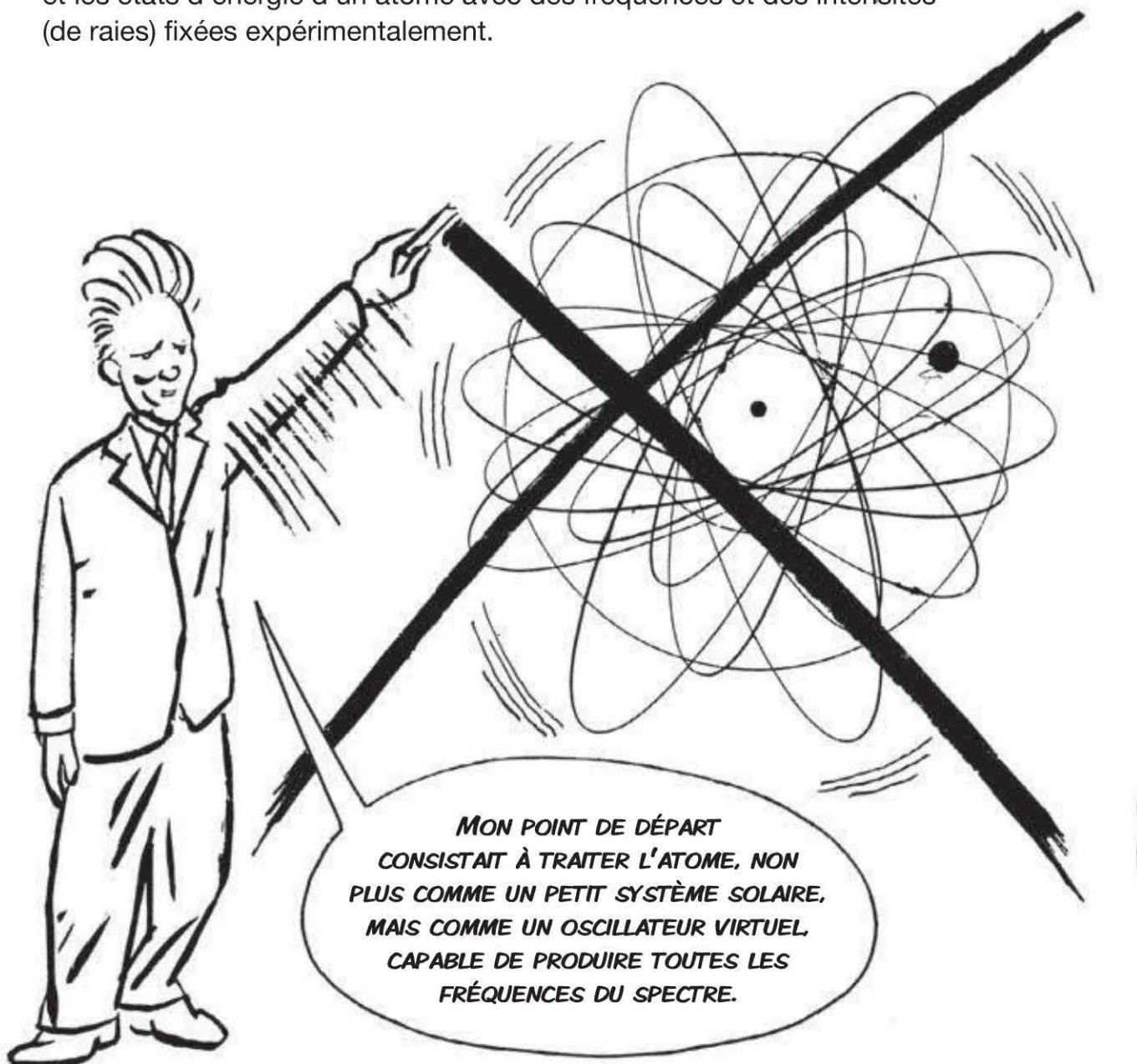
J'AVAIS SUBI UNE ATTAQUE CARABINÉE DE RHUME DES FOINS - J'ÉTAIS CARRÉMENT AVEUGLE.

MON ÉTAT ÉTAIT TEL QUE J'AI DÉCIDÉ DE RECHERCHER UNE MEILLEURE ATMOSPHÈRE, UN ENDROIT OÙ L'AIR NE CONTIENDRAIT PAS DE POLLENS. JE SUIS AINSI ARRIVÉ SUR L'ÎLE DE HELIGOLAND EN MER DU NORD.

J'ÉTAIS ALORS EXTRÈMEMENT FATIGUÉ ET, À L'ARRIVÉE SUR L'ÎLE, J'AVAIS LE VISAGE TOUT TUMÉFIÉ AU POINT QUE MA LOGEUSE M'A DEMANDÉ SI JE N'AVAIS PAS ÉTÉ ROUÉ DE COUPS.

La vision de l'atome d'Heisenberg

Heisenberg dormait fort peu, passant ses jours et ses nuits entre la mécanique quantique, l'escalade et apprenant par cœur les poèmes de Goethe. Il cherchait à établir **un code** pour relier les nombres quantiques et les états d'énergie d'un atome avec des fréquences et des intensités (de raies) fixées expérimentalement.

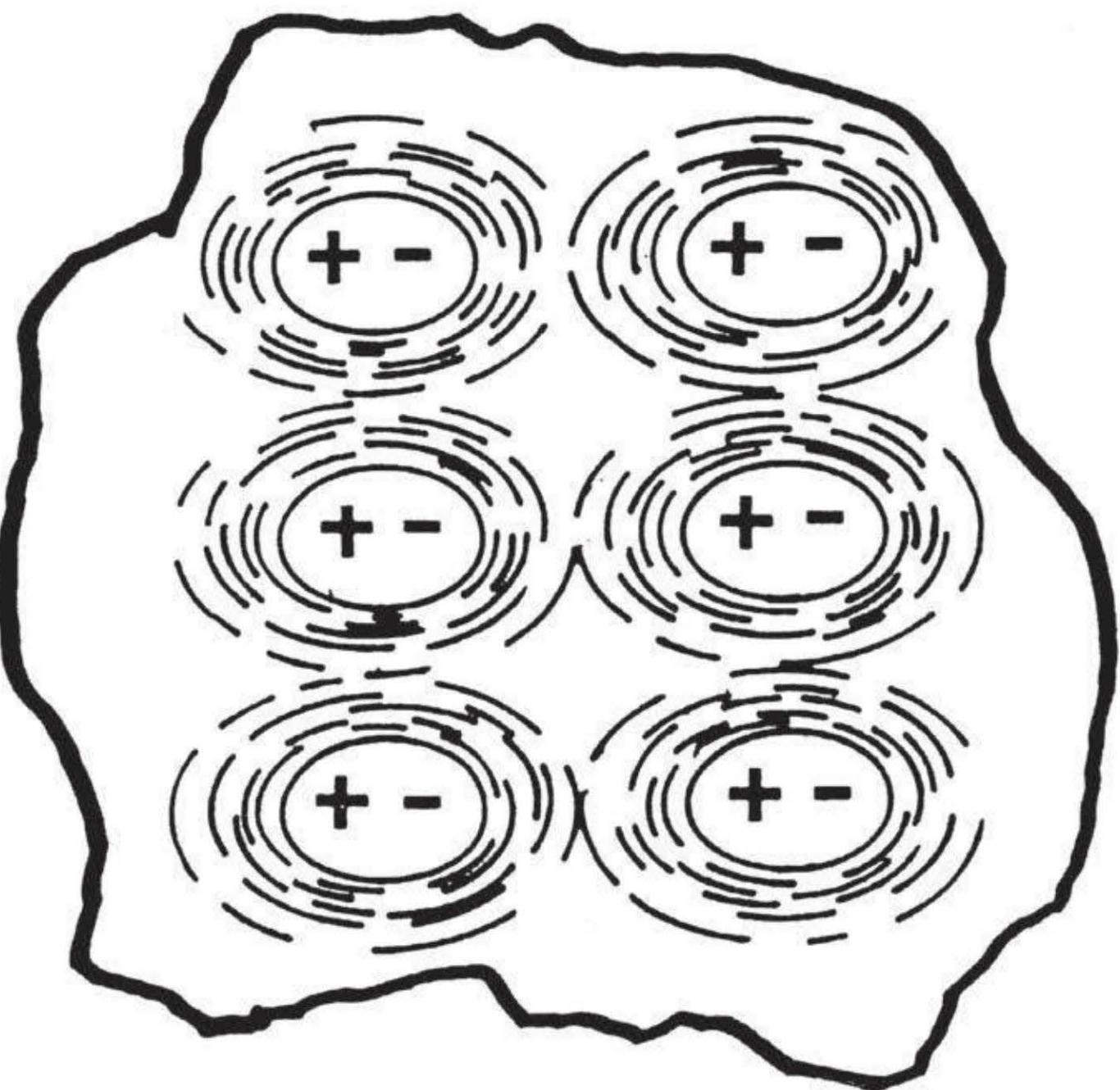


Cette approche était similaire à celle adoptée par Planck pour expliquer le rayonnement des corps noirs en 1900.

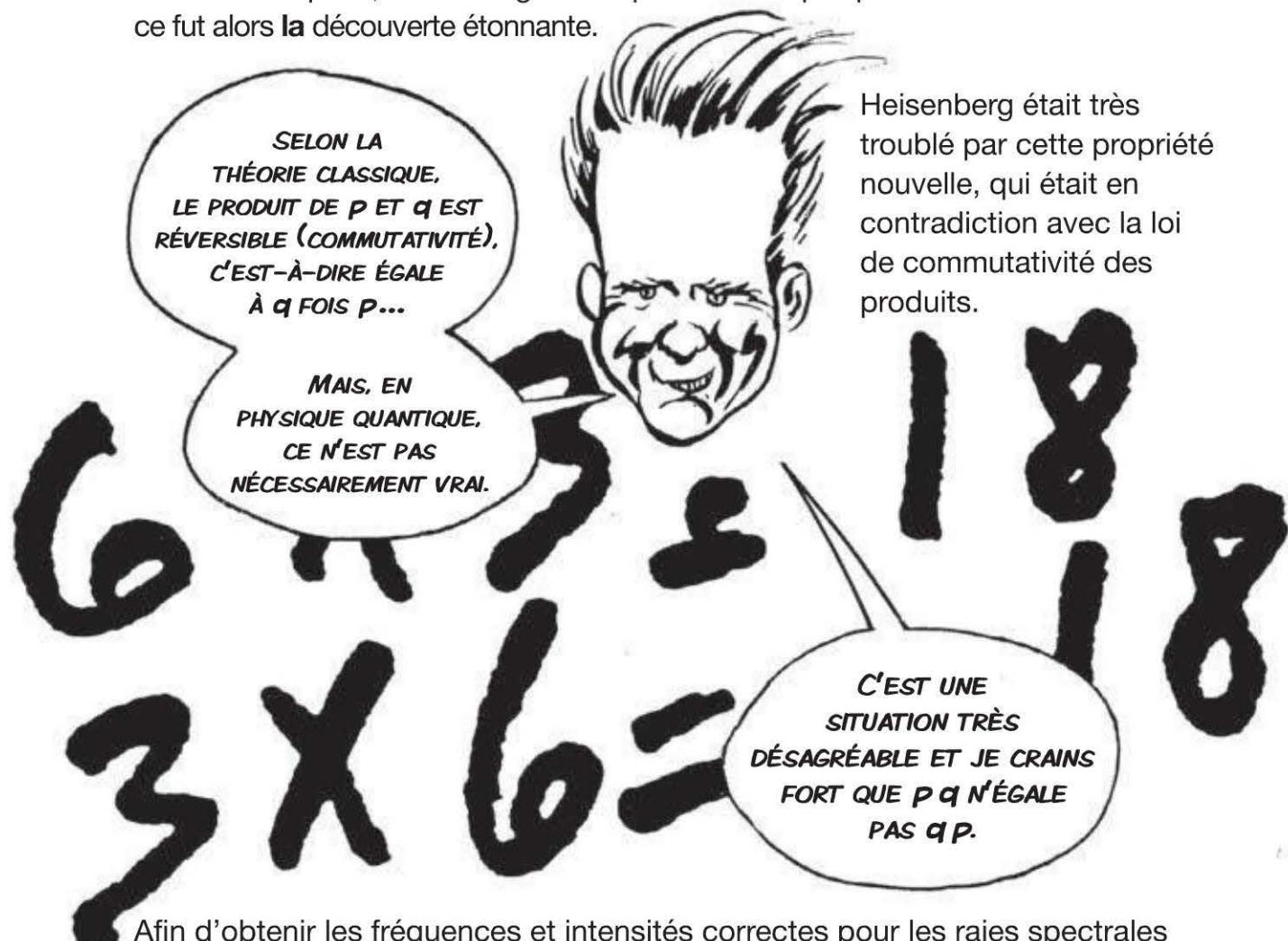
En se servant du concept que Bohr avait appelé le *principe de correspondance* (là où les zones quantiques et classique se superposent), Heisenberg a imaginé un atome de Bohr avec des orbites très éloignées du noyau. À ces distances, la fréquence orbitale serait égale à la fréquence de rayonnement et l'atome agirait comme un simple oscillateur linéaire.

Il savait comment analyser ce problème d'un point de vue classique. Il pouvait faire intervenir des quantités telles que le moment linéaire (\mathbf{p}) et le déplacement à partir d'un état stationnaire (\mathbf{q}). De manière classique, il pouvait résoudre l'équation du mouvement des électrons, puis calculer l'énergie des particules dans un état \mathbf{n} et ses valeurs quantifiées E_n .

En partant de l'orbite la plus éloignée – où il était assuré d'avoir des réponses –, Heisenberg a extrapolé vers le centre. Et c'est ici qu'intervient son intuition – certains diraient génie – lui ouvrant la voie pour énoncer une formule qui rendait compte de tous les états possibles. **Heisenberg avait «craqué» le code spectral.**

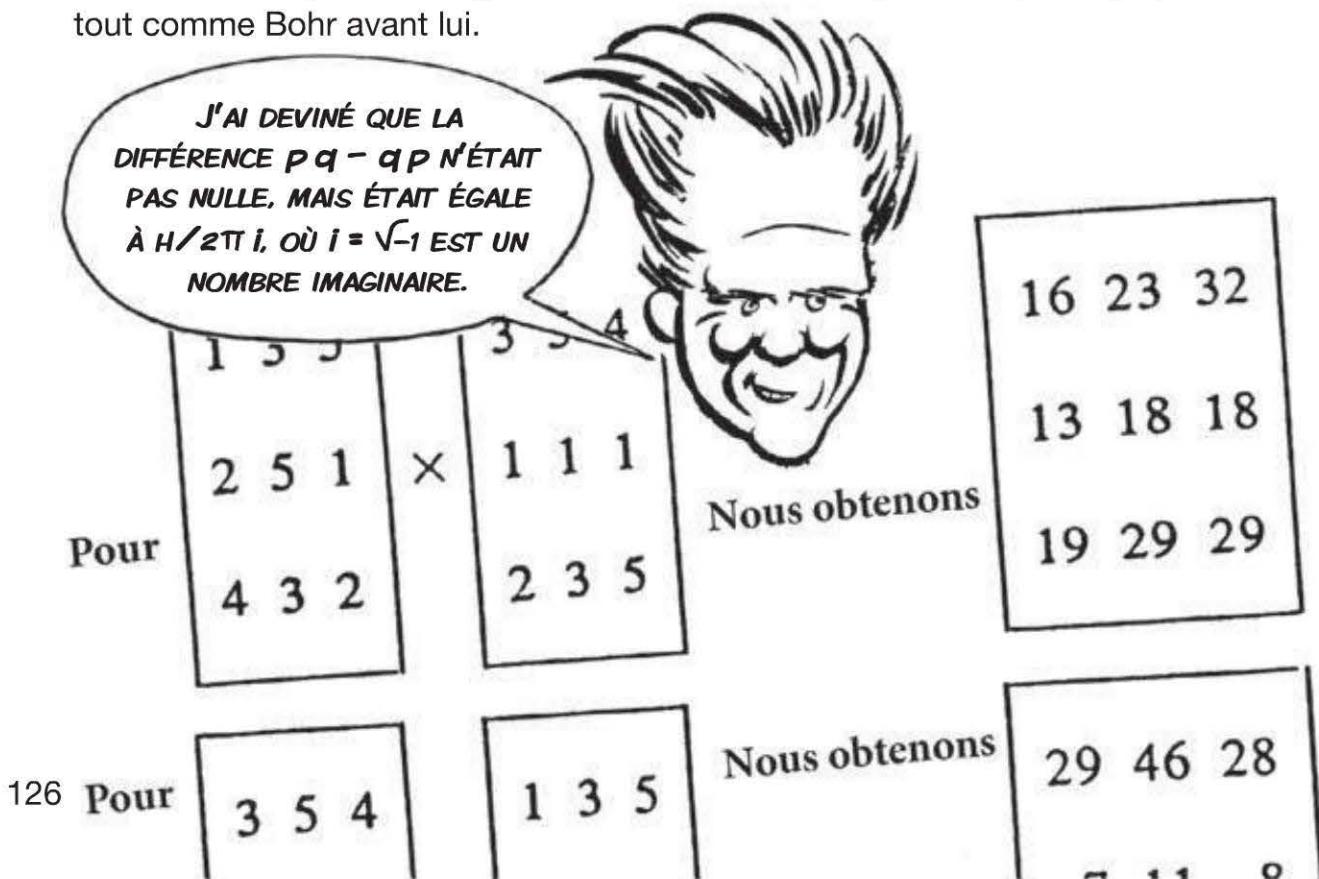


Parvenu à ce point, Heisenberg savait qu'il détenait quelque chose de nouveau et ce fut alors la découverte étonnante.

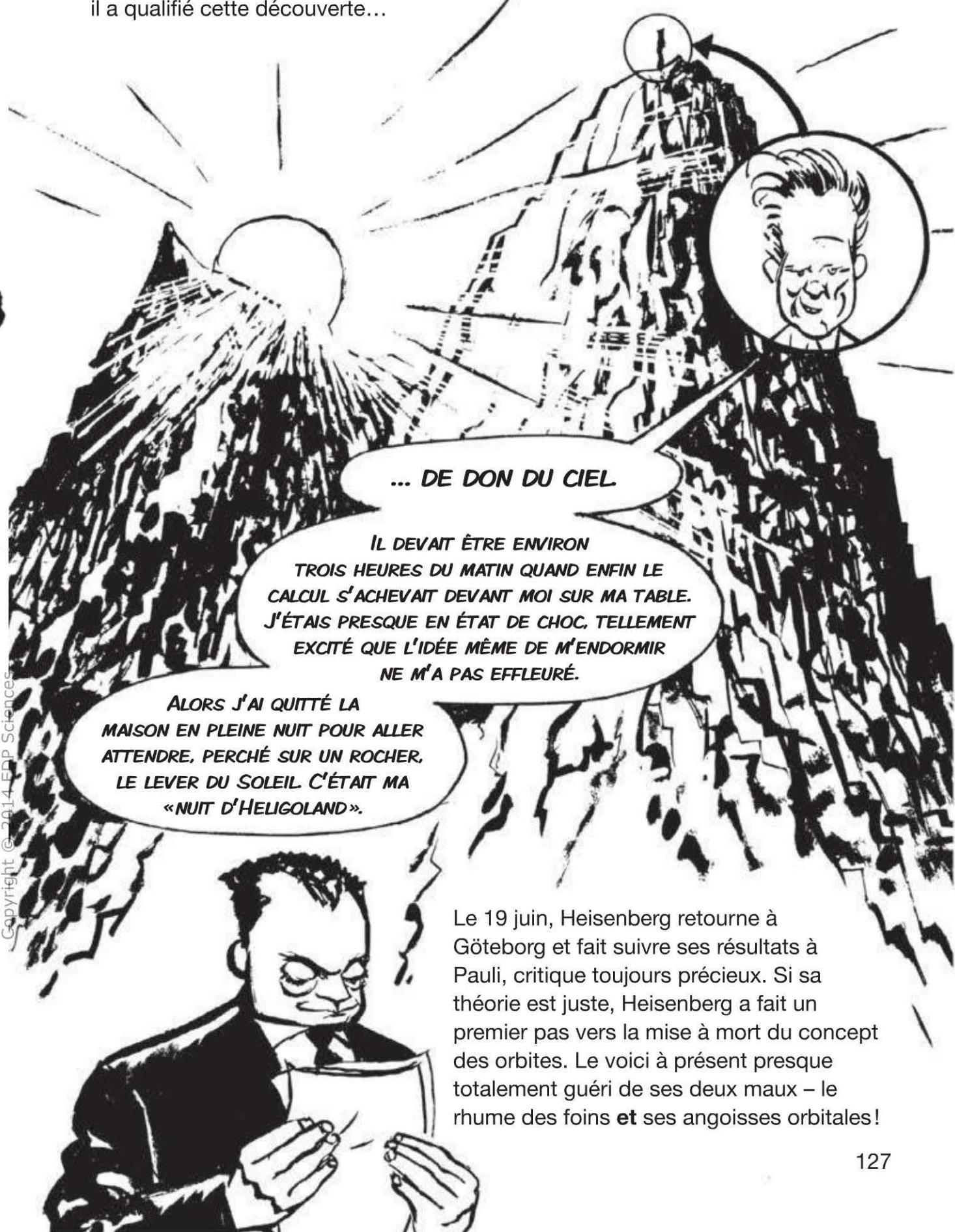


Heisenberg était très troublé par cette propriété nouvelle, qui était en contradiction avec la loi de commutativité des produits.

Afin d'obtenir les fréquences et intensités correctes pour les raies spectrales dans sa théorie, Heisenberg se devait d'introduire un postulat quantique, tout comme Bohr avant lui.



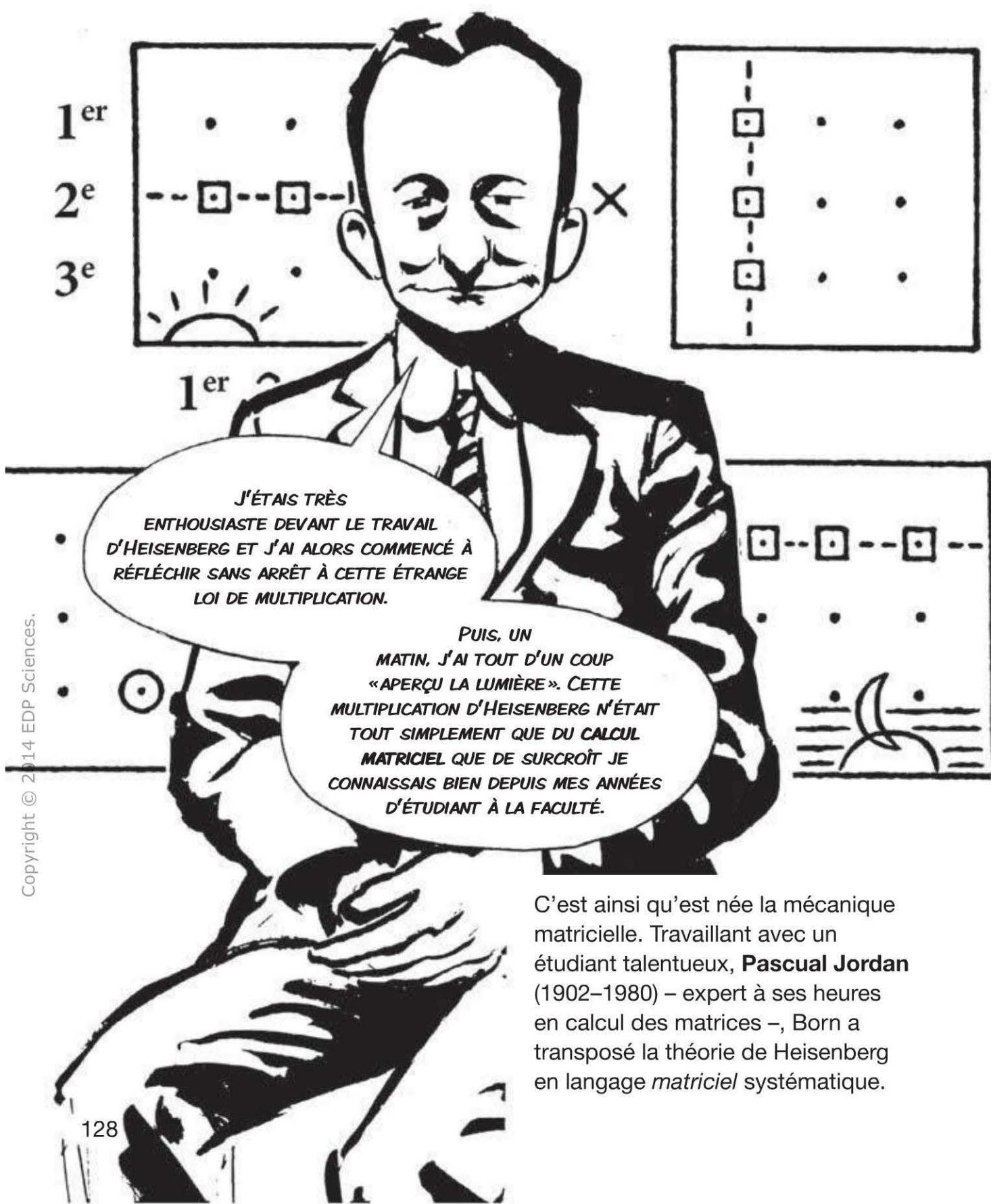
Cette nuit-là, sur l'Heligoland, il a réussi à démontrer que les états d'énergie étaient à la fois **quantifiés et indépendants du facteur temps**, c'est-à-dire qu'ils étaient *stationnaires* comme dans l'atome de Bohr. Par la suite, il a qualifié cette découverte...



Le 19 juin, Heisenberg retourne à Göteborg et fait suivre ses résultats à Pauli, critique toujours précieux. Si sa théorie est juste, Heisenberg a fait un premier pas vers la mise à mort du concept des orbites. Le voici à présent presque totalement guéri de ses deux maux – le rhume des foins **et** ses angoisses orbitales !

Max Born et la mécanique des matrices

La réaction de Pauli fut favorable. Par conséquent, et avant d'aller visiter le laboratoire Cavendish à Cambridge, suivi de vacances sous le signe de la randonnée, Heisenberg transmit son article à Max Born.



À présent, les fréquences du spectre optique pouvaient être représentées par une matrice infinie...

$f_{m,n}$	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	etc.
	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}	f_{25}	f_{26}	etc.
	f_{31}	f_{32}	f_{33}	f_{34}	f_{35}	f_{36}	etc.
	f_{41}	f_{42}	f_{43}	f_{44}	f_{45}	f_{46}	etc.
	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

Et puisque l'idée de Heisenberg était que les oscillateurs pris isolément, avec leur moment $p(t)$ et leur déplacement $q(t)$, vibreraient à ces fréquences, eux aussi pouvaient être représentés par des matrices infinies.

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & \text{etc.} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & \text{etc.} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & \text{etc.} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & \text{etc.} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{bmatrix}$$

L'introduction de ce postulat quantique d'Heisenberg avait pour but d'obtenir les fréquences et intensités correctes, chacune pouvant être représentée par deux nombres sous une forme matricielle

$$pq - qp = (h/2\pi i) I \quad (\text{la condition quantique})$$

où I est la matrice :

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 1 & 0 & \text{etc.} \\ 0 & 0 & 1 & \text{etc.} \\ \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} & \text{etc.} \end{bmatrix}$$

Pauli démontre l'exactitude de la mécanique matricielle

Quand cette condition quantique a été rajoutée à l'équation classique de la **mécanique sous sa forme matricielle**, on disposait alors d'un ensemble d'équations qui prédisaient les fréquences et intensités relatives des raies spectrales des atomes. Toutefois...



Mais il y avait quelque chose de différent. Pas d'aide visuelle, pas de modèle permettant d'imaginer et de visualiser les atomes. Finies les orbites complexes d'électrons qui enlaçaient le noyau, image que Bohr et Sommerfeld avaient construite pour expliquer le spectre de l'hydrogène. Maintenant, nous étions confrontés à un formalisme mathématique rigoureux, difficile à manier et impossible à visualiser. Toutefois, ce formalisme donnait les bons résultats!

Heisenberg abandonna l'idée de visualiser l'atome avec des particules ou des ondes. Il avait en fait déduit que toute tentative de faire une analogie entre la structure atomique et le monde physique classique serait inévitablement vouée à l'échec.



Plus tard, d'autres physiciens ont dérivé les spectres d'autres atomes. Mais aucun d'eux n'était en mesure d'expliquer le **sens physique** de l'étrange non-commutativité, partie intégrante cependant de la théorie.

Est-ce que cela pouvait signifier que l'ordre dans lequel les mesures étaient effectuées avait son importance ? L'acte même de la mesure pouvait-il se révéler néfaste pour le processus ?

Erwin Schrödinger – génie et amant

Mais en attendant mieux, d'autres physiciens n'avaient pas abandonné l'idée de visualiser **tous les aspects de l'univers physique** – et la structure atomique n'en était qu'une partie. Par conséquent, ils n'ont pas bien accueilli la mécanique matricielle de Heisenberg.

En particulier, le talentueux Erwin Schrödinger à Zürich méprisa la nouvelle théorie, dépourvue de visualisation et source de complications mathématiques



Là où Werner Heisenberg aspirait à la solitude de ses promenades en montagne et à une atmosphère libre de pollens, où Paul Dirac recherchait la tranquillité monastique de ses locaux au collège de Saint John's, à l'université de Cambridge, Erwin Schrödinger avait besoin de bien autre chose pour trouver l'inspiration.

Schrödinger est un coureur de jupons notoire, toujours inspiré dans ses travaux de physique par sa plus récente conquête. Au cours des vacances de Noël en 1925, il fait la plus importante découverte de sa carrière pendant une escapade amoureuse dans son hôtel favori du Tyrol autrichien. Sa tête tournait et son esprit retourna les problèmes ondulatoires.



L'équation de Schrödinger

J'AVAIS TROUVÉ
UNE ÉQUATION ADAPTABLE
À N'IMPORTE QUEL SYSTÈME
PHYSIQUE DANS LEQUEL LA FORME
MATHÉMATIQUE DE L'ÉNERGIE
EST CONNUE.

La solution de l'équation de Schrödinger consistait en *une onde* qui suffisait à décrire de façon quasi magique les aspects quantiques du système. L'interprétation physique de cette onde allait devenir l'un des grands problèmes de la mécanique quantique.

dérivée seconde
par rapport à x

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \Psi = 0$$

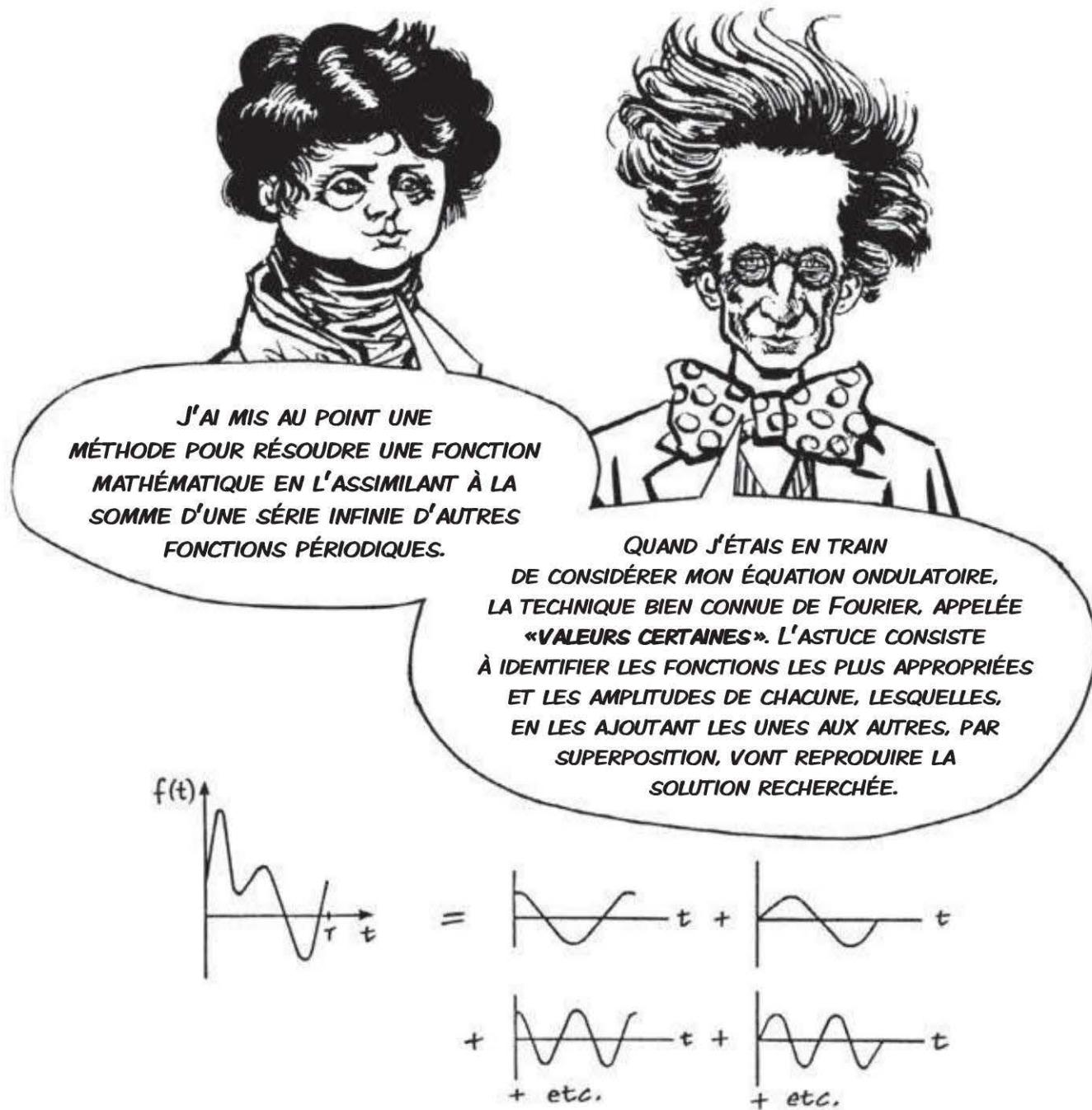
position fonction d'onde de Schrödinger

énergie énergie potentielle

L'onde elle-même est représentée par le symbole grec Ψ et, pour tous les physiciens actifs aujourd'hui, cela ne signifie qu'une seule chose... C'est la solution à l'équation de Schrödinger. Ce dernier avait accepté l'idée ondulatoire proposée par de Broglie et l'avait prise très au sérieux.

L'analyse des fonctions périodiques de Fourier

Aussi technique que puisse paraître ce titre, il est important de dire quelques mots sur l'analyse de Fourier, afin de mieux apprécier les délices éprouvés par les physiciens devant la parution de l'équation de Schrödinger en janvier 1926.

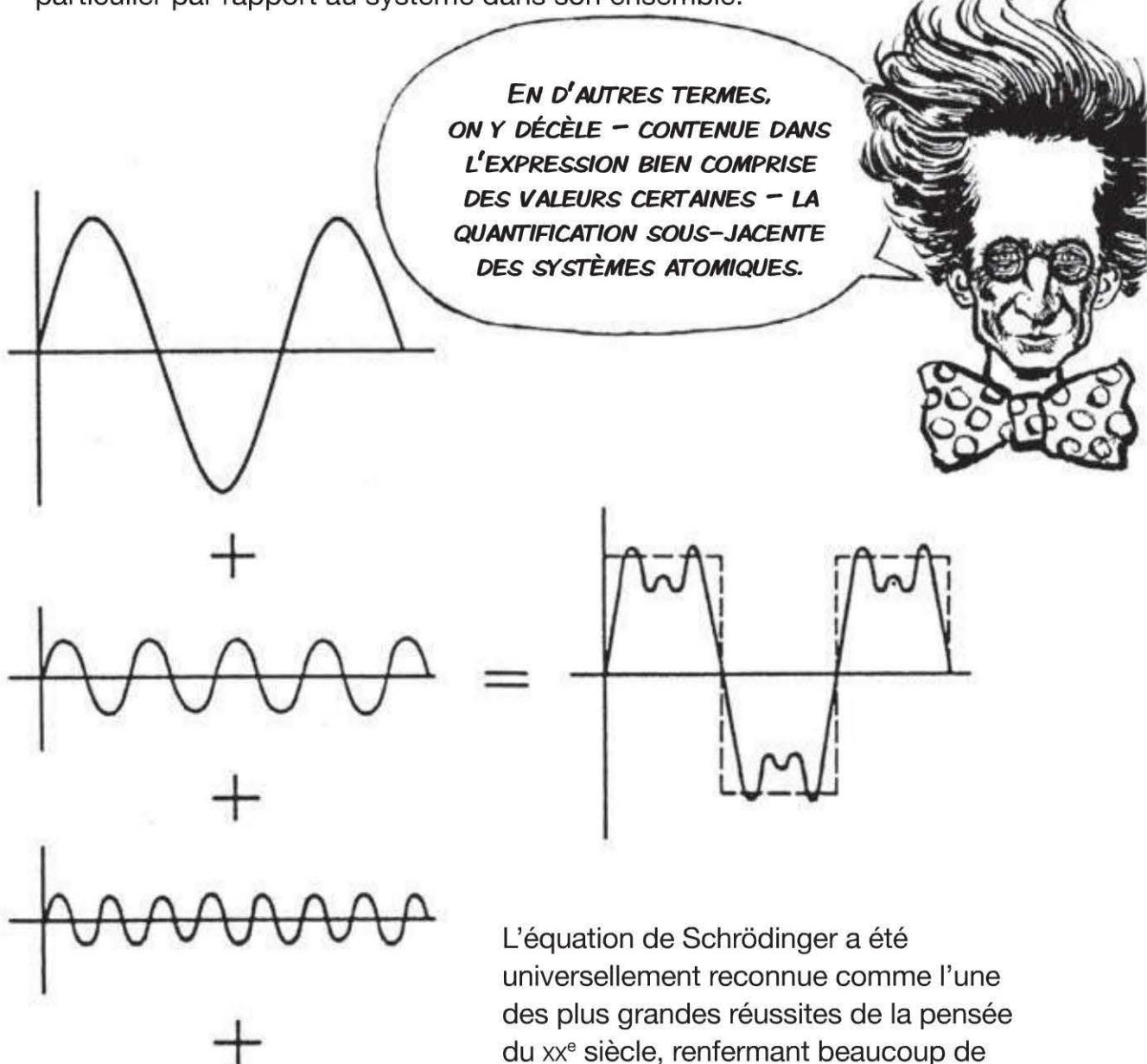


Toute Fonction $F(t)$ est égale à la somme de Fonctions harmoniques simples.

Ainsi, la solution de l'équation de Schrödinger, la **fondation d'onde du système**, était remplacée par une série infinie, les **fonctions d'ondes des états individuels que sont les harmoniques naturels**; c'est-à-dire que leurs fréquences sont reliées dans le rapport des entiers.

On voit comment la méthode s'applique dans les figures ci-dessous. La courbe **en gras** est la fonction initiale, qui sera remplacée alors par la somme de la série infinie des ondes périodiques harmoniques.

La découverte remarquable de Schrödinger énonçait que les **ondes de substitution** décrivent les **états individuels du système quantique** mais aussi leurs **amplitudes**, qui donnent l'importance relative de chaque état particulier par rapport au système dans son ensemble.



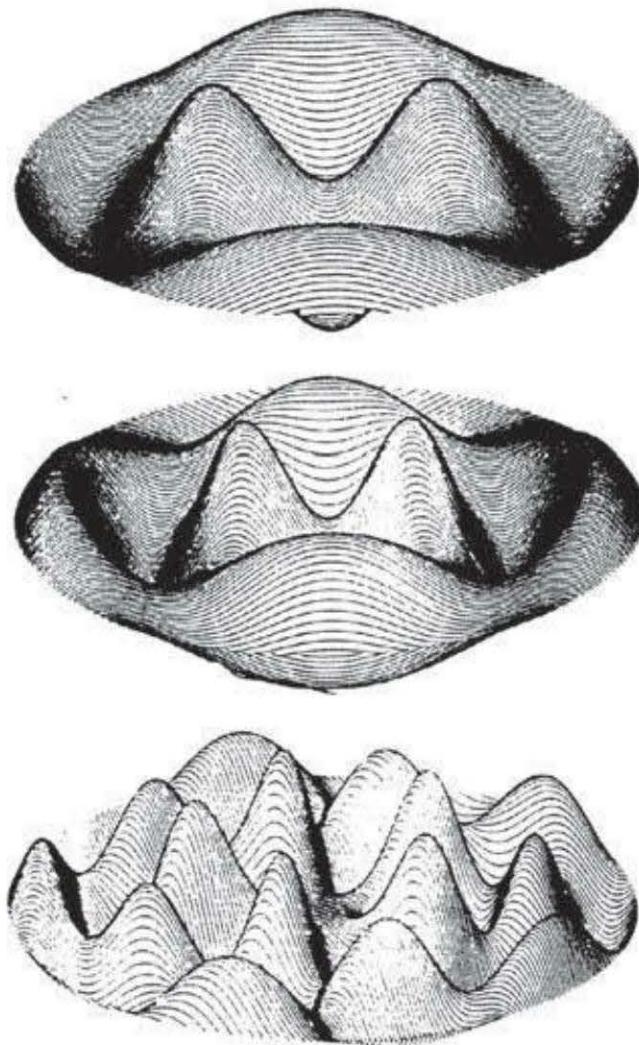
L'équation de Schrödinger a été universellement reconnue comme l'une des plus grandes réussites de la pensée du xx^e siècle, renfermant beaucoup de physique mais également toute la chimie, en principe. Elle a été utilisée aussi comme un outil d'une puissance sans précédent pour traiter des problèmes associés à la structure atomique de la matière.

Il n'est donc pas étonnant que ces travaux ont pris le nom de *mécanique ondulatoire*.

Comment visualiser l'atome de Schrödinger

Schrödinger a réussi à ramener le problème des états d'énergie d'un atome à celui qui consiste à identifier les harmoniques naturels du système en vibration, au moyen de l'analyse de Fourier.

Ces fréquences harmoniques naturelles et le nombre de nœuds pour une *onde stationnaire à une dimension* (exemple : une corde de violon) sont faciles à visualiser. L'image peut être étendue à un *système à deux dimensions*, tel que les vibrations de la surface tendue d'un tambour. Une simulation des calculs de différents modes vibratoires à la surface du tambour donne une indication sur ce que Schrödinger avait à l'esprit.



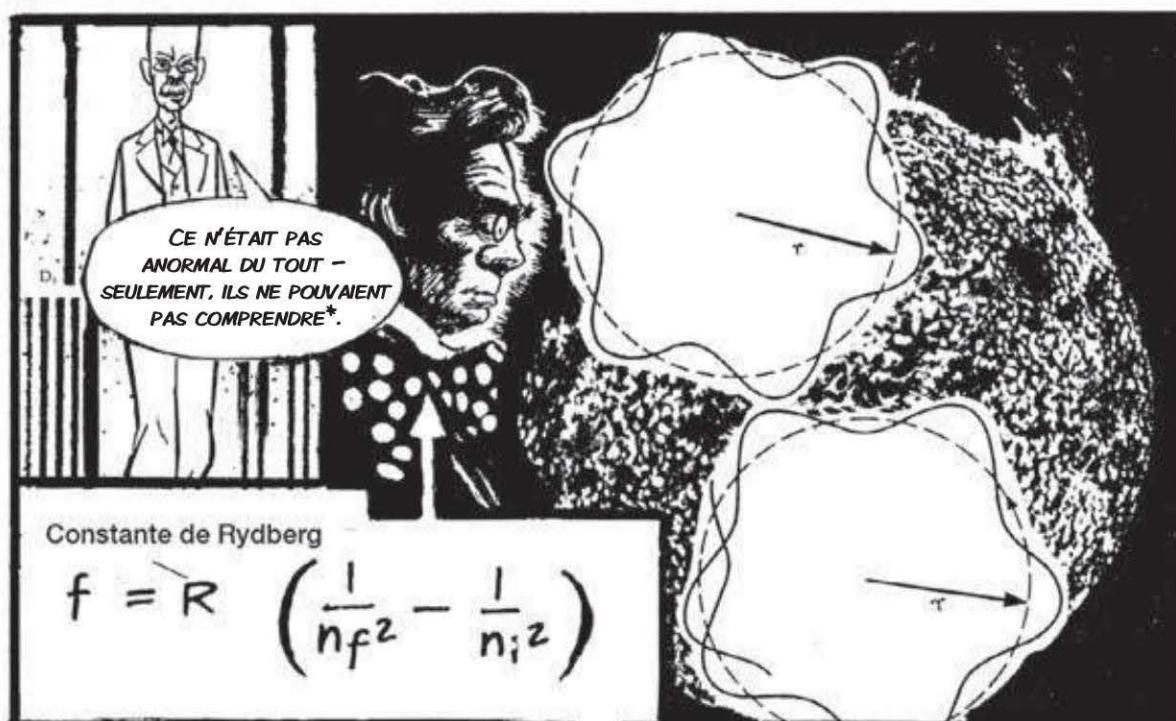
Et bien qu'il soit très difficile de visualiser un *système vibratoire à trois dimensions*, dans l'atome d'hydrogène, les images à une et à deux dimensions peuvent aider.

Les nombres entiers appelés *nombres quantiques* par Bohr, Sommerfeld et Heisenberg étaient liés dorénavant de façon naturelle au **nombre de nœuds présents dans un système vibratoire**.

La formule de Balmer, l'effet Zeeman et «tout ça*»

On devait bientôt montrer que la théorie de Schrödinger fournissait une description complète des raies spectrales de l'atome d'hydrogène, reproduisant en quelque sorte la pierre de touche moderne qu'était la formule de Balmer. De plus, la subdivision en champs électrique et magnétique était également issu directement de l'équation d'onde.

Ainsi, Schrödinger était capable d'observer que les entiers – à savoir les nombres de nœuds présents – provenaient d'une solution à trois dimensions qui correspondait exactement aux trois nombres quantiques n , k et m empruntés à la théorie quantique ancienne.



* (cf. Balmer, p. 94)

*Jeu de mot avec un célèbrissime titre d'histoire populaire anglaise «1066 and all that». Cf. http://www.en.wikipedia.org/wiki/1066_and_All_That (en anglais).

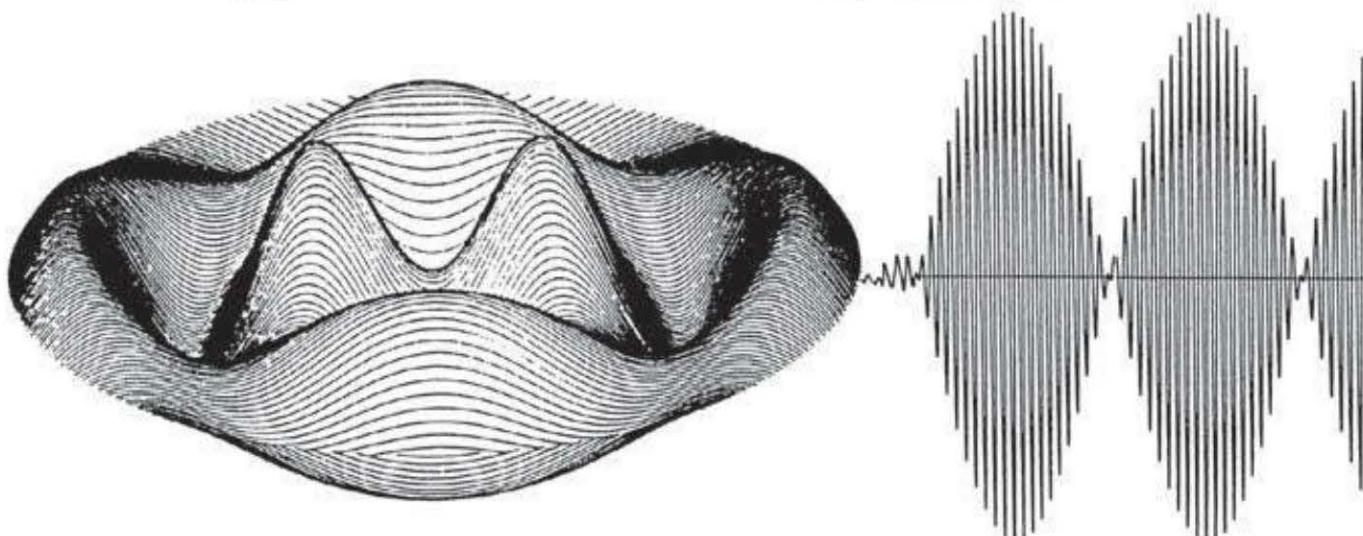
Avec Schrödinger, le retour vers la physique classique ?

En dépit de l'aspect innovateur de sa grande découverte en théorie quantique, notre physicien autrichien conservait néanmoins ses racines à l'école de physique traditionnelle. Il détestait littéralement le concept des sauts quantiques dans l'atome tels que proposés par Bohr. Et maintenant, il disposait d'un système mathématique qui expliquait bien les raies spectrales sans qu'il y ait besoin de postuler ces affreux sauts quantiques. Schrödinger en a tiré une analogie avec les ondes sonores.



LES FRÉQUENCES DES
RAIES INTENSES DU SPECTRE PEUVENT
ÊTRE VISUALISÉES COMME DES BATTEMENTS
ENTRE DEUX FRÉQUENCES VIBRATOIRES DE
DEUX AUTRES ÉTATS QUANTIQUES.

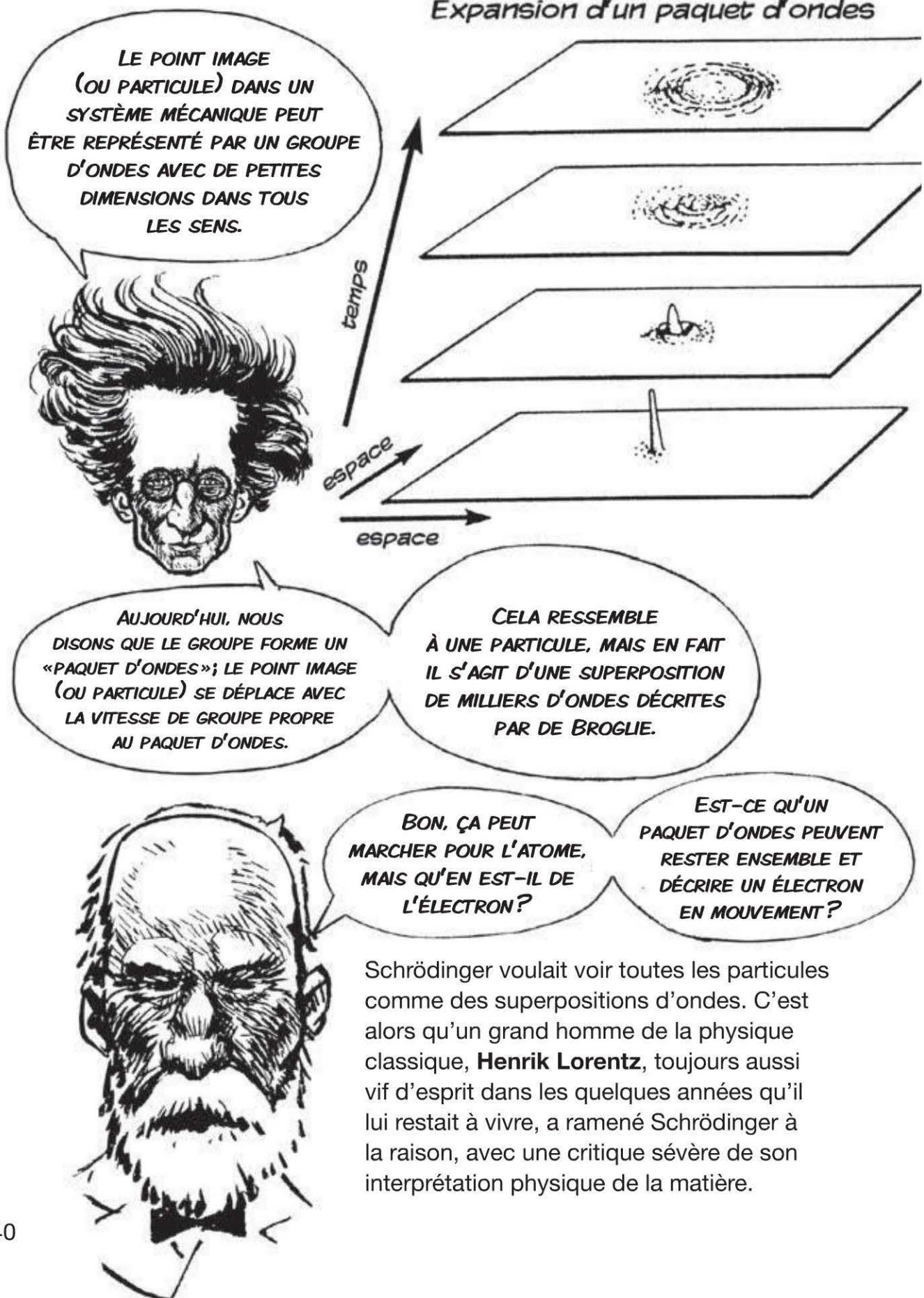
C'EST QUAND MÊME
BIEN PLUS ATTRACTIF POUR L'ESPRIT
D'ANNONCER QUE LES TRANSITIONS D'ÉNERGIE
PASSENT CONTINÜMMENT D'UN SCHÉMA DE
VIBRATION À UN AUTRE, PLUTÔT QUE DE DÉPENDRE
D'ÉLECTRONS QUI « SAUTENT » D'ORBITE EN
ORBITE, ON NE SAIT COMMENT !



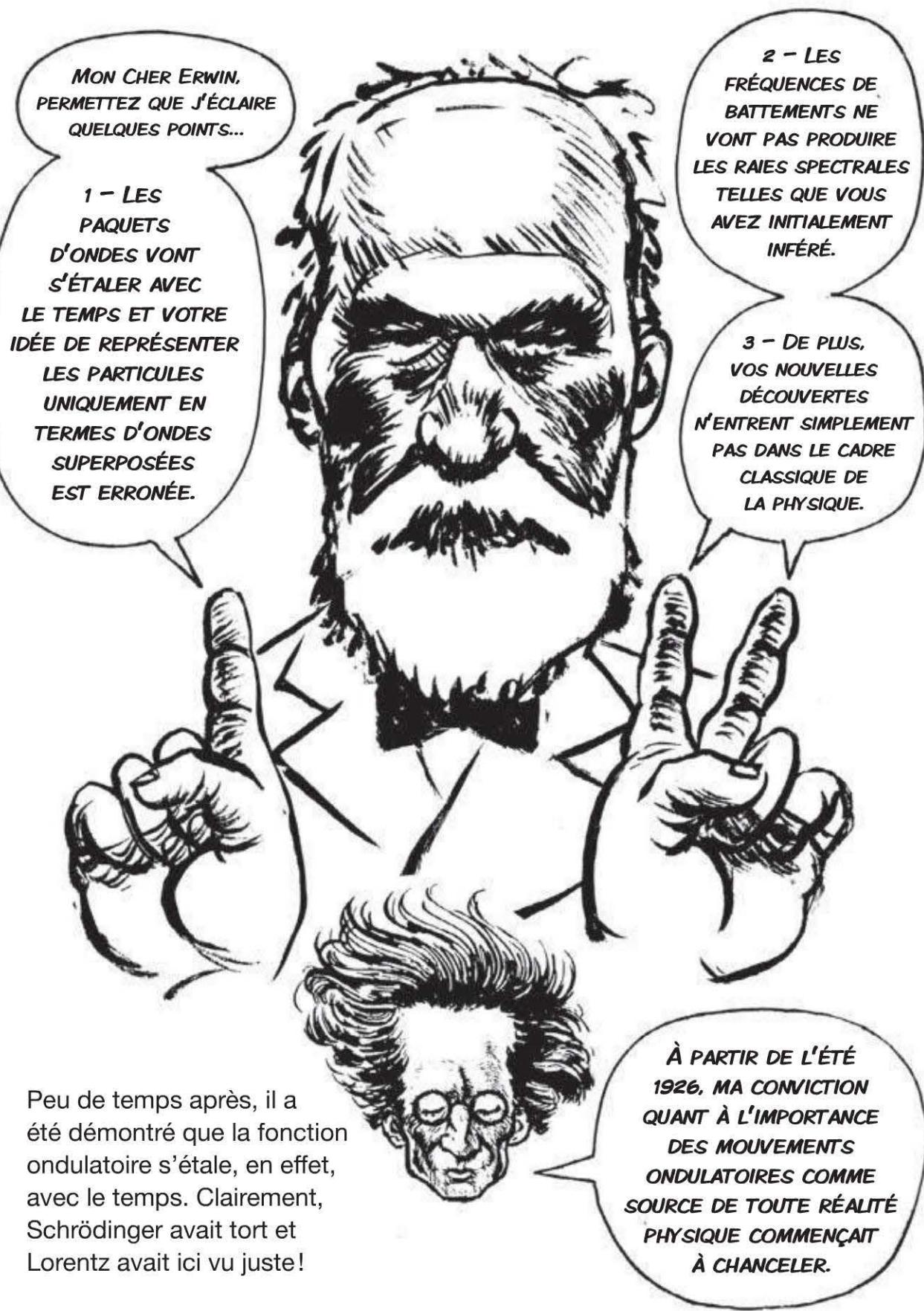
Schrödinger voulait se servir de sa découverte récente pour tracer un chemin en **marche arrière** vers une physique basée sur des continuums, non affectée par des transitions soudaines. Il proposait en somme une théorie assez classique des ondes de la matière qui aurait le même rapport à la mécanique que la *théorie des ondes électromagnétiques* de Maxwell entretient avec l'optique.

Mais qui a besoin de particules ?

Schrödinger commença même à douter de l'existence des particules.



Schrödinger voulait voir toutes les particules comme des superpositions d'ondes. C'est alors qu'un grand homme de la physique classique, **Henrik Lorentz**, toujours aussi vif d'esprit dans les quelques années qu'il lui restait à vivre, a ramené Schrödinger à la raison, avec une critique sévère de son interprétation physique de la matière.

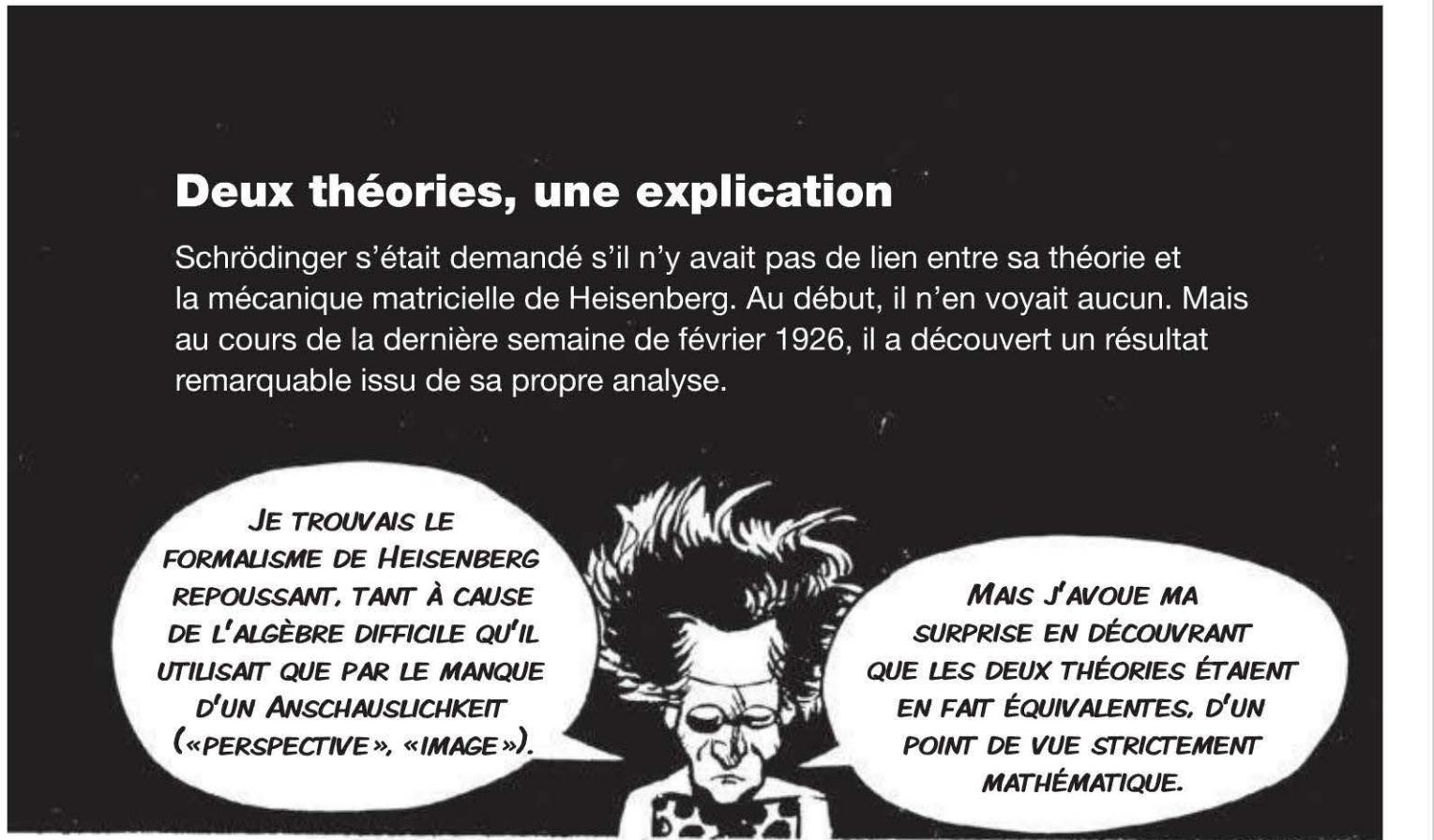


Peu de temps après, il a été démontré que la fonction ondulatoire s'étale, en effet, avec le temps. Clairement, Schrödinger avait tort et Lorentz avait ici vu juste!

Alors, quelle pouvait donc être la relation existant entre la fonction d'onde d'une particule et la particule elle-même ? Question difficile. C'était l'ultime problème qui restait à résoudre pour finaliser le développement de la mécanique ondulatoire.

Deux théories, une explication

Schrödinger s'était demandé s'il n'y avait pas de lien entre sa théorie et la mécanique matricielle de Heisenberg. Au début, il n'en voyait aucun. Mais au cours de la dernière semaine de février 1926, il a découvert un résultat remarquable issu de sa propre analyse.



JE TROUVAIS LE
FORMALISME DE HEISENBERG
REPOUSSANT. TANT À CAUSE
DE L'ALGÈBRE DIFFICILE QU'IL
UTILISAIT QUE PAR LE MANQUE
D'UN ANSCHAUSLICHKEIT
("PERSPECTIVE", "IMAGE").

MAIS J'AVOUE MA
SURPRISE EN DÉCOUVRANT
QUE LES DEUX THÉORIES ÉTAIENT
EN FAIT ÉQUIVALENTES, D'UN
POINT DE VUE STRICTEMENT
MATHÉMATIQUE.

L'une des théories était basée sur un modèle ondulatoire conceptuellement clair de la structure atomique et l'autre annonçait qu'un tel modèle serait dénué de sens. Toutefois, les deux théories donnaient les mêmes résultats. Cela devenait de plus en plus étrange !

Cependant, l'équation de Schrödinger était là et allait perdurer. En 1987, elle a même figuré, sous sa forme finale, sur un timbre-poste autrichien, édité spécialement pour marquer le 100^e anniversaire de Schrödinger.



Rencontre d'Heisenberg et Schrödinger

Le 1^{er} juillet 1926, Schrödinger a donné un cours à Munich au séminaire hebdomadaire de Sommerfeld. Heisenberg était présent dans l'auditoire.

Le cours terminé, l'équation étant encore écrite au tableau quand Schrödinger demande s'il y a des questions dans la salle.

Heisenberg se lève et lance :



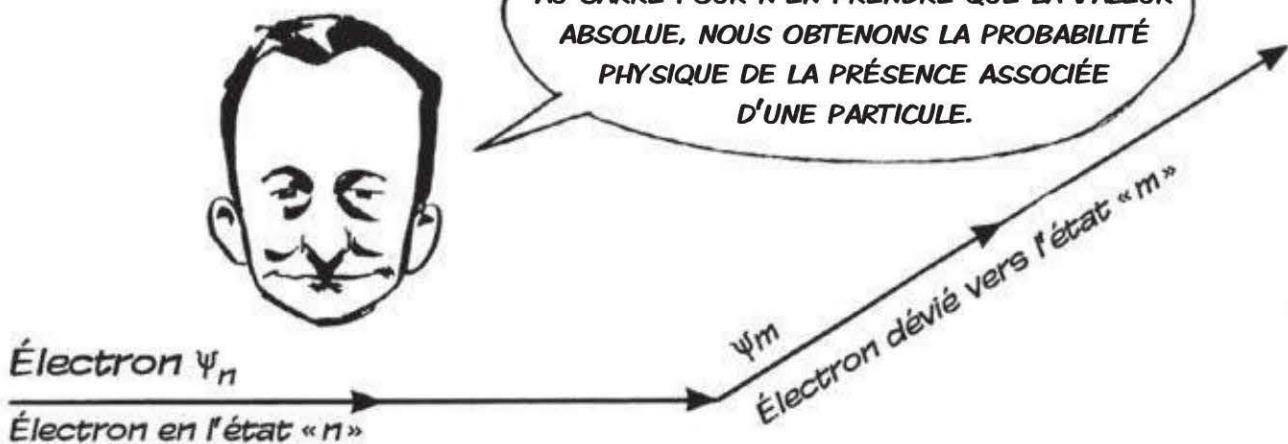
Nous retrouvons Schrödinger dans sa chambre, de retour de Munich...



Max Born : l'interprétation probabiliste de Ψ

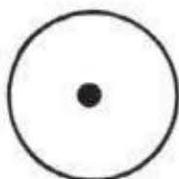
Schrödinger avait décidé que Ψ représenterait une « onde ombre » qui indiquerait – on ne sait pas exactement comment – la position de l'électron. Puis il changea d'avis, pensant alors qu'il s'agissait de la densité de la charge de l'électron. À vrai dire, il n'était sûr de rien.

Une idée plus admissible a été développée par Max Born pendant l'été 1926. Il a écrit un article sur les phénomènes de collision et y a introduit le concept de la **probabilité des quanta mécaniques**.

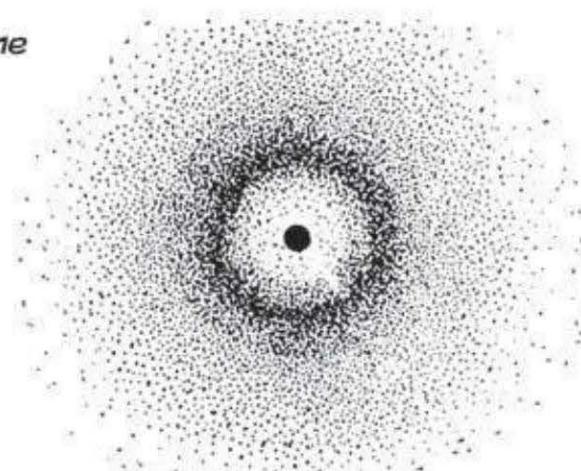


Un mois plus tard, Born affirmait que la probabilité d'**existence d'un état quelconque** est donnée par le carré de l'amplitude normalisée de la fonction d'onde individuelle (c'est-à-dire Ψ^2). C'était donc un nouveau concept – la probabilité qu'un **certain état quantique existe**. Autrement dit, annonce Born, dorénavant tout dans la théorie atomique devient probabilité.

L'état Fondamental de l'hydrogène



Selon Bohr



Selon Born

Deux sortes de probabilités

Le 10 août 1926, Schrödinger présenta un article à l'université d'Oxford où il faisait la distinction nette entre « anciennes » et « nouvelles probabilités » en physique. L'ancienne théorie classique de Maxwell-Boltzmann (cf. p. 20–25) avait utilisé des coordonnées microscopiques dans la théorie cinétique des gaz, les remplaçant par des valeurs moyennes basées sur des probabilités, faute de pouvoir faire mieux. Il s'était avéré impossible de calculer les valeurs exactes pour tant de particules.

LA NOUVELLE THÉORIE
PROCURE LES MÊMES RÉSULTATS
SANS DEVOIR D'AUCUNE FAÇON INVOQUER
DES VALEURS MOYENNES. CELA NE CONSTITUE
PAS UNE PROBABILITÉ «FAUTE DE MIEUX».
ELLE REPRÉSENTE EN FAIT TOUT CE QUE NOUS
NE POUVONS JAMAIS SAVOIR SUR UN
SYSTÈME ATOMIQUE DONNÉ.

Born avait trouvé le moyen de réconcilier « particules » et « ondes » en introduisant un concept de probabilité. L'onde Ψ détermine la probabilité que l'électron se trouve à une position donnée. À la différence du champ électromagnétique, Ψ n'a aucune existence physique.

Le chat de Schrödinger, le problème de la mesure quantique

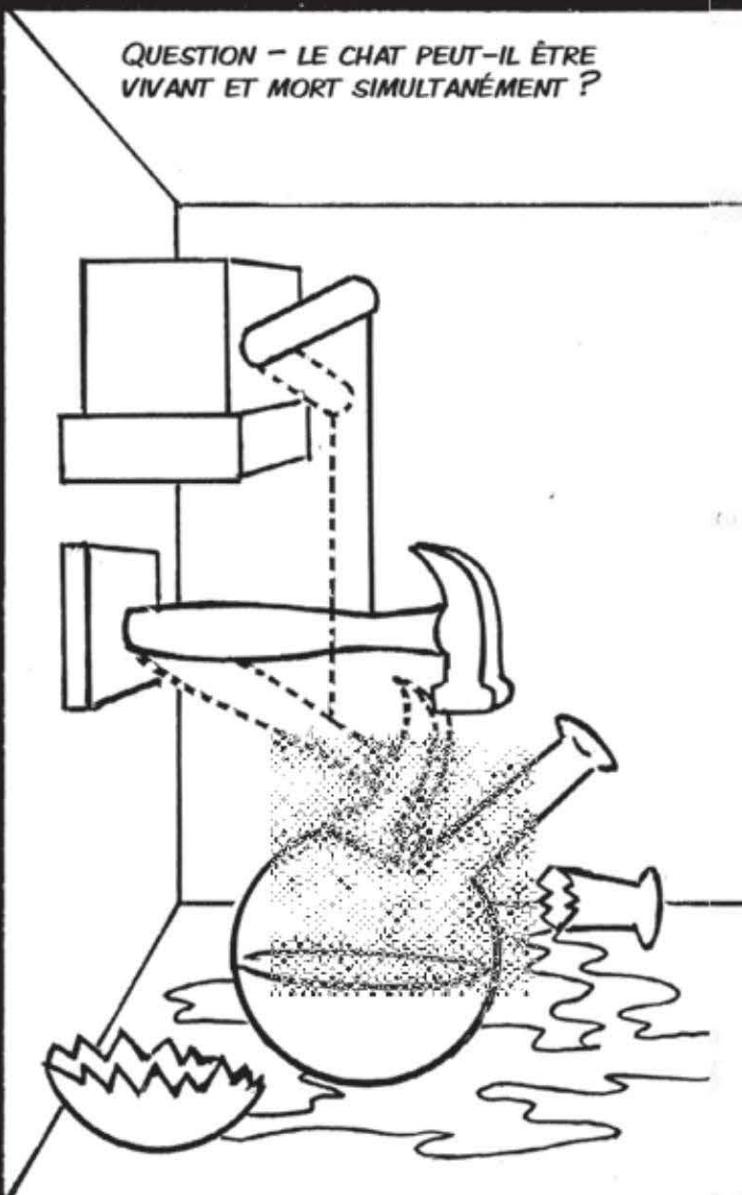
Environ dix ans après la publication des articles de Born, cette notion de probabilité de superposition d'états quantiques était généralement admise. Schrödinger, attristé à l'idée que son équation soit malmenée, proposa une «expérience par la pensée», laquelle selon lui démontrerait une fois pour toutes l'absurdité du concept.

Schrödinger a imaginé cette étrange expérience au cours de laquelle un chat vivant serait placé dans une boîte près d'une source radioactive, d'un compteur Geiger, d'un marteau et d'un flacon de verre contenant un gaz létal. La radioactivité naturelle de la source active le compteur qui, pour une valeur donnée, déclenche une détente libérant le marteau qui brise le flacon. Le gaz mortel tue immédiatement le chat.

*SUPPOSONS
QUE LA SOURCE EST TELLE
QUE LA THÉORIE QUANTIQUE
PRÉVOIT UNE PROBABILITÉ DE 50 %
QU'UNE PARTICULE SE DÉSINTÈGRE
CHAQUE HEURE; IL Y A donc
UNE PROBABILITÉ ÉGALE QUE
LE CHAT SOIT ENCORE EN VIE
OU QU'IL SOIT MORT.*



*QUESTION - LE CHAT PEUT-IL ÊTRE
VIVANT ET MORT SIMULTANÉMENT ?*



La théorie quantique (selon l'interprétation de Born) prédirait qu'à exactement une heure après le début de l'expérience, la boîte renfermerait un chat, **ni totalement vivant ni tout à fait mort**, mais un mélange de deux états, c'est-à-dire la superposition des deux fonctions d'onde.

*Vous voyez bien
que cette affirmation
est stupide.*

*UNE INTERPRÉTATION
PROBABILISTE DE
MON ÉQUATION N'EST
PAS ACCEPTABLE !*



Ainsi, Schrödinger pensait avoir défendu son point de vue. Mais aujourd'hui même, son «paradoxe», comme on l'appelle, sert encore à enseigner les bases conceptuelles de la probabilité quantique et la superposition des états quantiques.

*DÈS QUE L'ON OUVRE
LE COUVERCLE DE LA BOÎTE,
AFIN DE VOIR SI LA PRÉDICTION
QUANTIQUE EST JUSTE OU NON,
LE PROBLÈME EST RÉSOLU.*

*PAR UN ACTE D'OBSERVATION,
LA SUPERPOSITION DES DEUX FONCTIONS
D'ONDE SE TROUVE RÉDUITE À UNE SEULE
FONCTION – SOIT LE CHAT EST
DÉFINITIVEMENT MORT, SOIT
IL EST VIVANT.*



La conscience et la fonction de l'onde qui s'effondre

Eugène Paul Wigner (1902–1995), physicien né en Hongrie, expert en théorie quantique et lauréat du prix Nobel de physique en 1963, figure parmi les rares scientifiques soucieux de connaître **la cause de l'effondrement de la fonction d'onde**.

C'EST EN RÉALITÉ LA CONSCIENCE DE L'OBSERVATEUR QUI FAIT LA DIFFÉRENCE. QUAND NOUS SOMMES CONSCIENTS DE QUELQUE CHOSE, NOUS PRODUISONS L'EFFONDREMENT IMPORTANT DE LA FONCTION D'ONDE, DE SORTE QUE LES ÉTATS MIXTES DE VIE OU DE MORT S'ESTOMPENT.

CEUX QUI CRITIQUENT CETTE VISION DES CHOSES DEMANDENT SI UNE AMIBE AMÈNERAIT L'EFFONDREMENT OU SI LA CONSCIENCE DU CHAT LUI-MÊME LE GARDERAIT «EN VIE RÉELLE» PENDANT L'EXPÉRIENCE. LA PHYSIQUE EST AINSI DEVENUE MÉCONNAISSABLE DEPUIS L'ÉPOQUE D'ISAAC NEWTON.

L'idée de conscience proposée par Wigner n'a pas été bien accueillie par les physiciens, ni considérée d'ailleurs comme importante.

Elle apporte simplement des réponses pratiques à des questions techniques des plus ardues. Ceux qui mettent en œuvre la théorie quantique de manière quotidienne se moquent de savoir ce qui a pu être la cause de l'effondrement de la fonction d'onde!



Paul Adrian Maurice Dirac : un génie reclus

Ayant vu deux versions alternatives de la «nouvelle» théorie quantique – la première défendue par Heisenberg et utilisant des méthodes d'algèbre matricielle et la seconde dominée par l'équation d'onde de Schrödinger –, nous ajoutons maintenant une troisième vision, développée indépendamment des deux autres par un mathématicien britannique, **Paul A. M. Dirac** (1902–1984).

À l'été 1925, Heisenberg avait été invité au Club Kapitza* de Cambridge. Il donna un exemplaire de son manuscrit, non encore publié, à l'hôte de la soirée, Ralph Fowler, qui le transmit à Paul Dirac, un jeune diplômé, avec l'annotation «*Comment jugez-vous ce texte ?*». Dirac prit la demande très au sérieux.

Travaillant seul – une approche dont il n'allait pas déroger pendant les 44 ans de sa carrière de physicien –, Dirac conclut rapidement que le texte de Heisenberg représentait un nouveau départ pour la physique.

Note : le Club Kapitza se réunissait les mardis soir à Trinity College, après le dîner sur place.

Armé d'une craie et devant son tableau noir, le conférencier invité devait être prêt à affronter les questions qui allaient – c'était aussi la tradition – fuser dans la salle.

IL EST CAPABLE DE RÉSOUTRE
LES DIVERSES DIFFICULTÉS QUE
SOULÈVE L'ANCIENNE THÉORIE DE
BOHR, EINSTEIN ET PLANCK.



La mécanique quantique : la version de Dirac

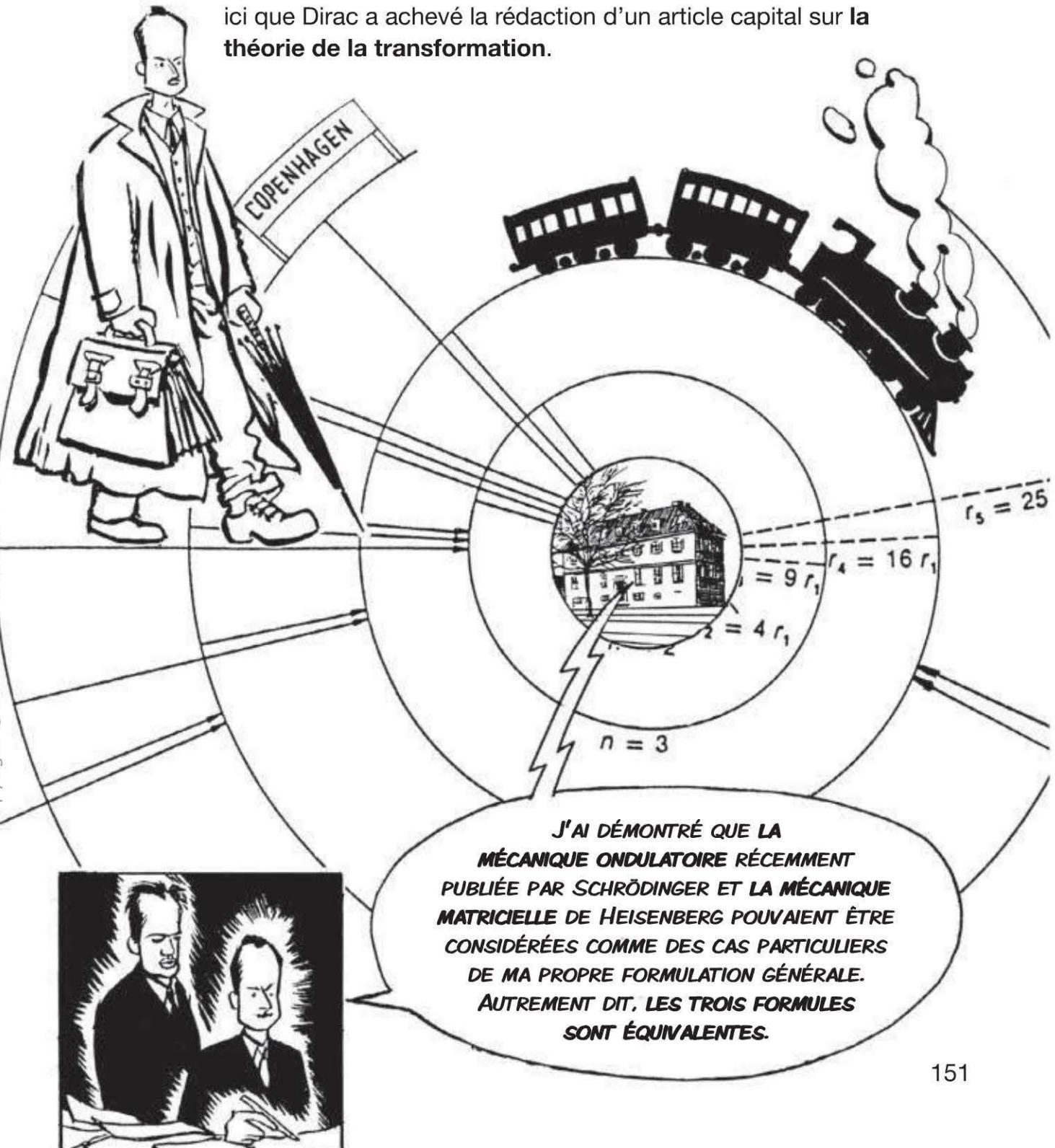
Dirac, qui au départ était intrigué par la venue de deux quantités non commutatives (où leur produit dépend de l'ordre, tel que $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ n'est pas égal à $\mathbf{B} \times \mathbf{A}$), s'est rendu compte que c'était l'essence même de la nouvelle approche. Il a rapidement trouvé un lien avec la physique classique et s'est servi de la nouvelle idée fondamentale représentée par la non-commutativité pour développer sa propre version de la mécanique quantique.



Dirac : la théorie de la transformation

Ce n'était que le commencement et, arrivé en novembre 1925, quatre mois seulement après avoir récolté les semences de la nouvelle mécanique, Dirac comptait quatre articles de plus, qui ont attiré l'attention des théoriciens partout dans le monde, en particulier à Copenhague, Göteborg et Munich – à l'époque les principaux centres de recherche quantique. Dirac a rassemblé ses articles sous forme d'une thèse qu'il a présentée à la faculté des sciences de Cambridge, ce qui lui a valu d'obtenir son Ph.D. avec les félicitations du jury.

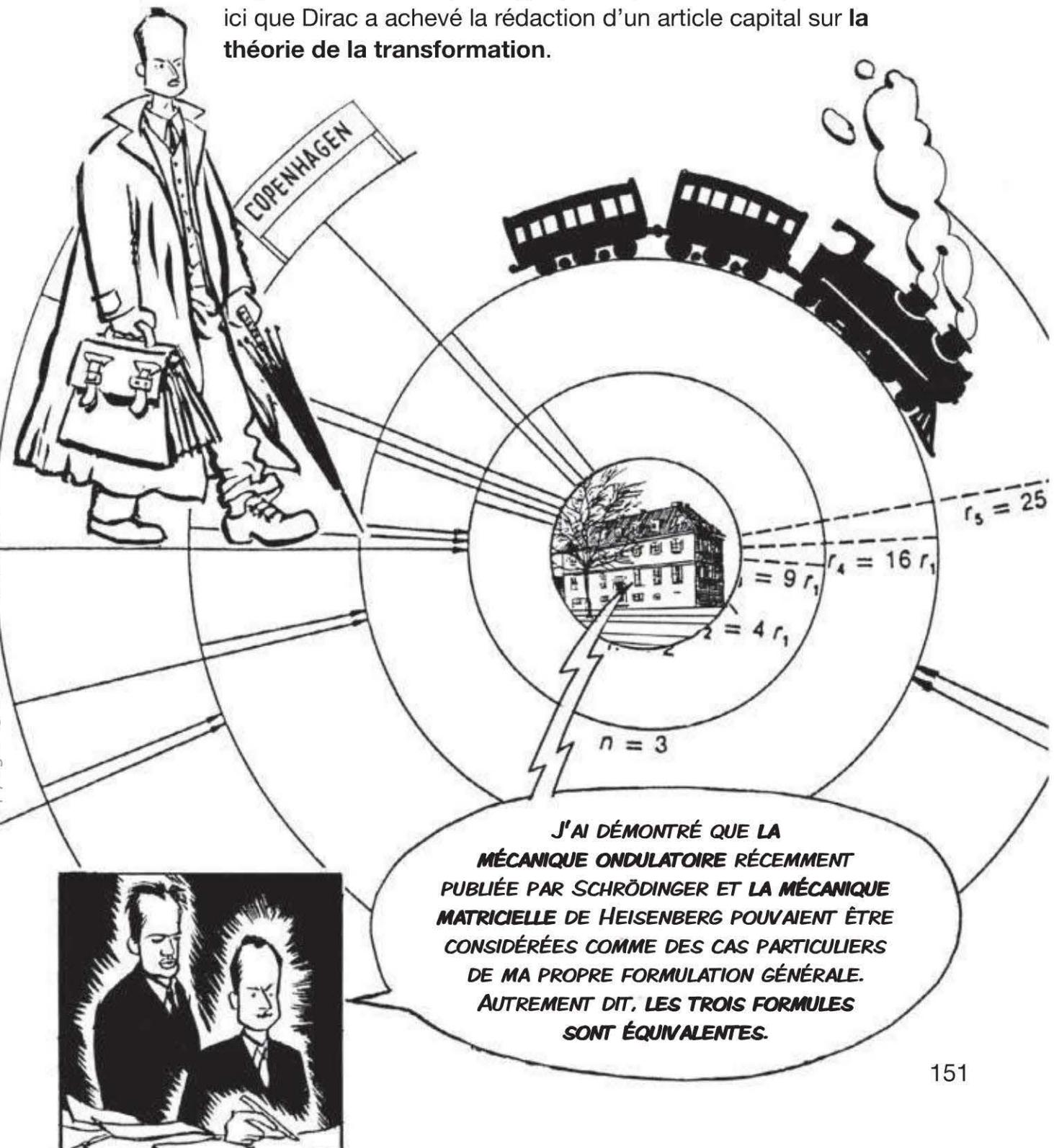
Bohr l'a ensuite prié de venir à Copenhague, en septembre 1926, et c'est ici que Dirac a achevé la rédaction d'un article capital sur **la théorie de la transformation**.



Dirac : la théorie de la transformation

Ce n'était que le commencement et, arrivé en novembre 1925, quatre mois seulement après avoir récolté les semences de la nouvelle mécanique, Dirac comptait quatre articles de plus, qui ont attiré l'attention des théoriciens partout dans le monde, en particulier à Copenhague, Göteborg et Munich – à l'époque les principaux centres de recherche quantique. Dirac a rassemblé ses articles sous forme d'une thèse qu'il a présentée à la faculté des sciences de Cambridge, ce qui lui a valu d'obtenir son Ph.D. avec les félicitations du jury.

Bohr l'a ensuite prié de venir à Copenhague, en septembre 1926, et c'est ici que Dirac a achevé la rédaction d'un article capital sur **la théorie de la transformation**.

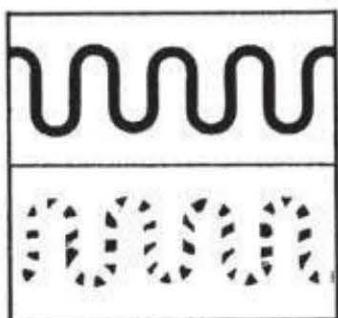


Le commencement de l'électrodynamique quantique

À Copenhague (et plus tard à Göteborg), Dirac commença à travailler sur les problèmes d'émission et d'absorption de rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire de *la lumière*. Un quart de siècle plus tôt, Planck et Einstein avaient tiré des conclusions théoriques : la lumière était composée de particules que nous appelons aujourd'hui photons.

En dépit de l'évidence convaincante présentée tout au long du xixe siècle en faveur du modèle ondulatoire de la lumière, c'est Einstein qui a ranimé la controverse de **la dualité particules/onde**.

Mais une approche raisonnable voulait que la lumière soit particules ou onde, et il reviendra à Dirac de démontrer que la théorie quantique renferme la réponse à cet apparent paradoxe.



Le concept d'un champ continu, proposé par **Faraday** et d'autres (souvenez-vous des expériences à l'école avec de la limaille de fer et un aimant), pouvait être à présent en segments de façon à interagir avec la matière (composée d'entités discrètes telles que l'électron, le proton, etc.). La nouvelle approche de Dirac pouvait permettre un traitement de la lumière sous forme d'onde ou sous forme de particules et fournissait les bonnes réponses. Magique !

Le révérend **J. C. Polkinghorne** (né en 1930), physicien et théologien qui avait été professeur de physique à Cambridge (Grande-Bretagne) de 1968 à 1979 avant de devenir prêtre anglican en 1982, avait appris la mécanique quantique directement auprès de Dirac. Il était, 70 ans plus tard, encore impressionné par cette réussite; il a offert une métaphore saisissante...

DIRAC AFFICHAIT UN FORMALISME BIEN COMPRIS: QUAND ON L'INTERROGEAIT DU POINT DE VUE DES PARTICULES, IL DONNAIT D'EXCELLENTES RÉPONSES PARTICULAIRES ET, DE MÊME, QUAND ON L'INTERROGEAIT SOUS L'ANGLE ONDULATOIRE, IL DONNAIT D'EXCELLENTES RÉPONSES DE COMPORTEMENTS ONDULATOIRES.



C'ÉTAIT COMME SI QUELQU'UN AVAIT SOUTENU L'INCAPACITÉ POUR UN MAMMIFÈRE DE PONDRE UN ŒUF AVANT DE DÉCOUVRIR L'EXISTENCE DES ORNITHORYNQUES EN TASMANIE.

Depuis ce travail effectué par Dirac, la nature duale de la lumière (onde et/ou particules) ne présentait plus de paradoxe, du moins pour ceux qui étudiaient les mathématiques. Après la Seconde Guerre mondiale, le travail de pionnier entrepris par Dirac a progressé grâce à **Richard Feynman** (1918–1988) et d'autres.

LA THÉORIE QUE NOUS APPELONS ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (ACRONyme QED EN ANGLAIS) DÉCRIT L'INTERACTION DE LA LUMIÈRE ET DE LA MATIÈRE AVEC UNE PRÉCISION REMARQUABLE.



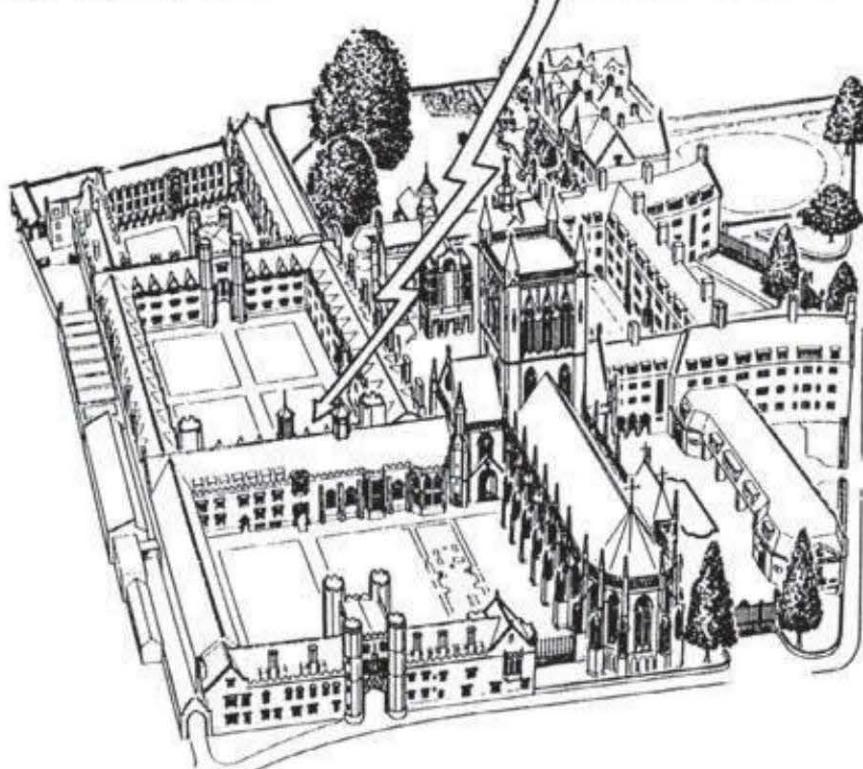
L'équation de Dirac et le spin électronique

La renommée internationale de Dirac n'a pas beaucoup modifié ses habitudes. Il est retourné à Cambridge où il y a travaillé intensément et presque exclusivement dans le calme de sa chambre donnant sur le cloître de St John's College. Il était sur le point de faire une nouvelle et grande découverte.

La mécanique ondulatoire de Schrödinger était au-devant de la scène et l'équation d'onde omniprésente dominait la théorie quantique (et c'est encore le cas pour la plupart des scientifiques). Schrödinger ne connaissait pas l'existence de la curieuse propriété magnétique de l'électron, à savoir son «*spin*»; par conséquent, il était dans l'incapacité d'incorporer la relativité d'Einstein dans son équation d'onde. Dirac l'a fait à sa place, de manière éclatante, en avançant des arguments esthétiques.



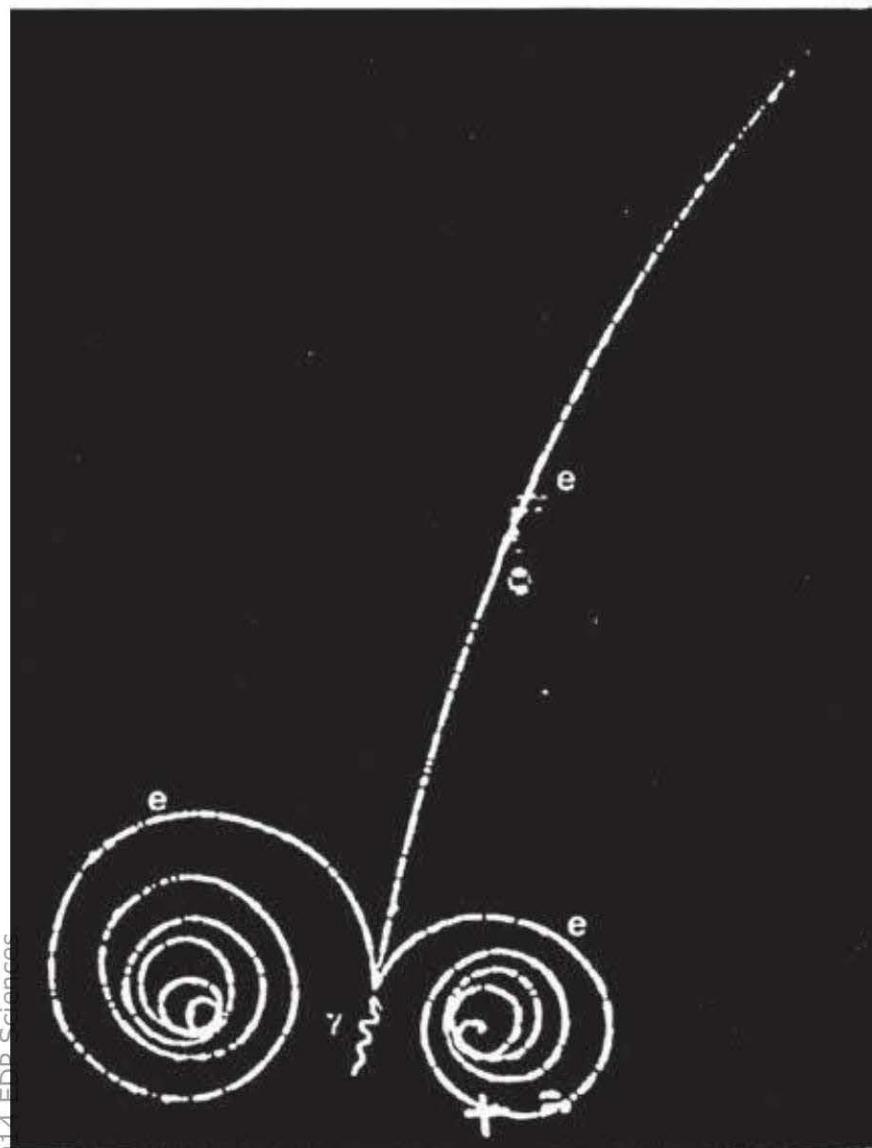
TOUT EN PRÉSERVANT LA
SYMÉTRIE À LA FOIS DE LA RELATIVITÉ
SPÉCIALE ET DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE,
J'AI SUBODORÉ UNE NOUVELLE ÉQUATION
APPLICABLE À L'ÉLECTRON – ET CELA
A L'AIR DE MARCHER.



La formule qu'il venait de trouver (aujourd'hui appelée **équation de Dirac**) décrivait non seulement correctement le comportement d'un électron se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, mais prédisait aussi, et **sans besoin d'invoquer d'autres hypothèses ad hoc**, que l'électron possédait un spin 1/2, tel que validé sur le plan expérimental.

L'hypothèse de l'antimatière

Ce qui est remarquable – et prévu par l'équation de Dirac – c'est l'existence d'un électron chargé positivement, c'est-à-dire le contraire de tous les électrons observés jusque-là.



C'ÉTAIT
LA PREMIÈRE
INDICATION DE LA
POSSIBLE EXISTENCE
DE L'ANTIMATIÈRE, À
SAVOIR DES PARTICULES
AYANT LES MÊMES
MASSE ET SPIN QUE
DANS LA MATIÈRE
«NORMALE», MAIS
AVEC UNE INVERSION
DES CHARGES
ÉLECTRIQUES.



Cette prédiction fut vérifiée quelques années plus tard par le physicien américain **Carl David Anderson** (1905–1991), au moyen d'une chambre à bulles, à Caltech en 1932. Dirac venait d'ouvrir un vaste champ de recherche, celui de la physique des antiparticules.

Seulement un an après l'observation expérimentale du positron, Dirac reçut, avec Schrödinger, le prix Nobel (de physique en 1933) pour l'ensemble de leurs travaux sur la théorie quantique. Revenons sur la période 1926–1927...

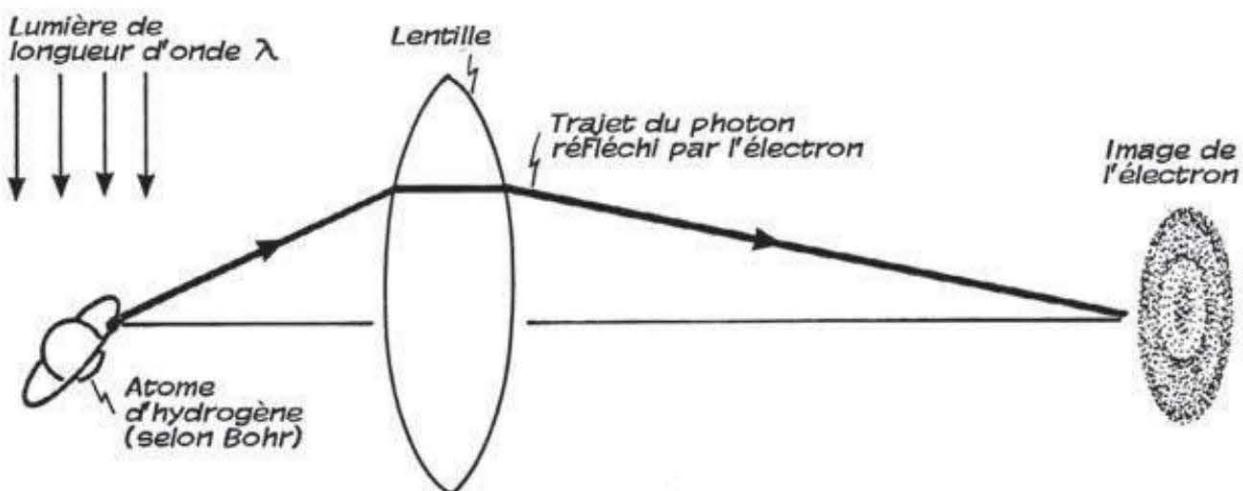
Le principe d'incertitude

En 1927, Heisenberg fait une seconde découverte majeure, aussi capitale, pense-t-on, que celle de la mécanique matricielle. Mû par son crédo positiviste, à savoir que seules les quantités mesurables pouvaient être intégrées aux théories, quelles qu'elles soient, Heisenberg s'était rendu compte que la théorie quantique impliquait une limitation fondamentale sur l'aptitude à mesurer avec précision certaine paires de variables physiques simultanément. Voici comment il a procédé.

Rappelons la non-commutativité des deux variables – **la position et le moment** ($pq - qp = \hbar/2\pi i$) ...

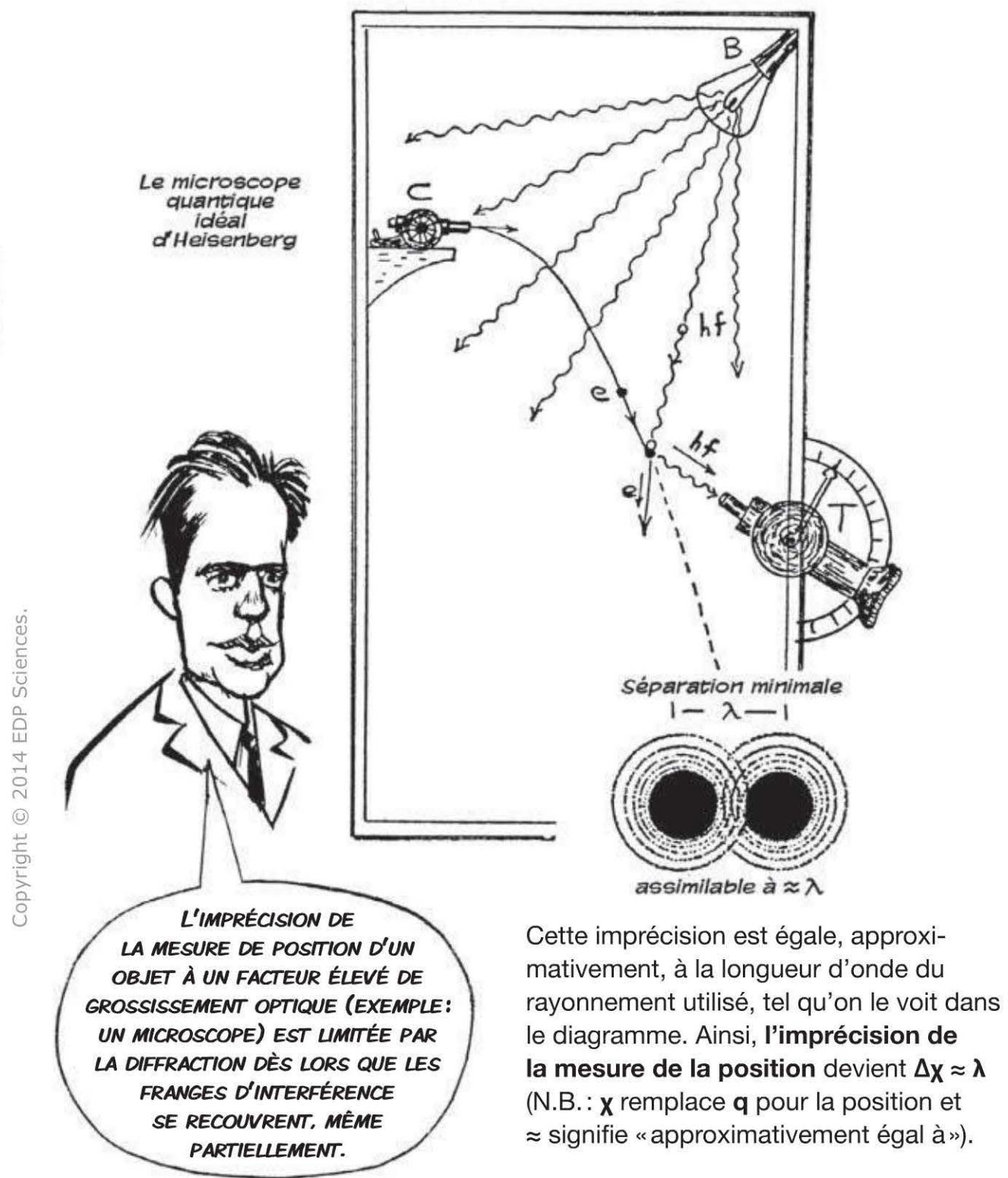


Le lien quantitatif de cette incertitude pouvait être déduit facilement, en estimant **le degré d'imprécision** dans une mesure simultanée de la position et du moment de la particule. Pour « voir » et localiser avec précision un quelconque objet, le rayonnement qui l'illumine doit être **d'une longueur d'onde significativement plus petite que la dimension propre de l'objet**. Pour mesurer un électron, par exemple, les ondes doivent être inférieures en taille à la longueur qui caractérise l'ultraviolet, puisque le diamètre total de l'atome d'hydrogène n'est qu'une fraction d'une longueur d'onde prise dans le spectre visible.



Le microscope à rayons gamma d'Heisenberg

Pour étudier cette question, Heisenberg a choisi un microscope «hypothétique» qui acheminerait des **rayons gamma**, composés d'ondes très courtes mais avec un moment cinétique élevé. Ainsi, le trajet de l'électron n'est pas «lisse et continu», mais en zigzag à cause du bombardement des photons gamma. Nous reproduisons ci-après le célèbre dessin du physicien russe **George Gamow** (1904–1968) pour illustrer ce montage hypothétique d'Heisenberg.



Cette imprécision est égale, approximativement, à la longueur d'onde du rayonnement utilisé, tel qu'on le voit dans le diagramme. Ainsi, **l'imprécision de la mesure de la position** devient $\Delta x \approx \lambda$ (N.B.: x remplace q pour la position et \approx signifie «approximativement égal à»).

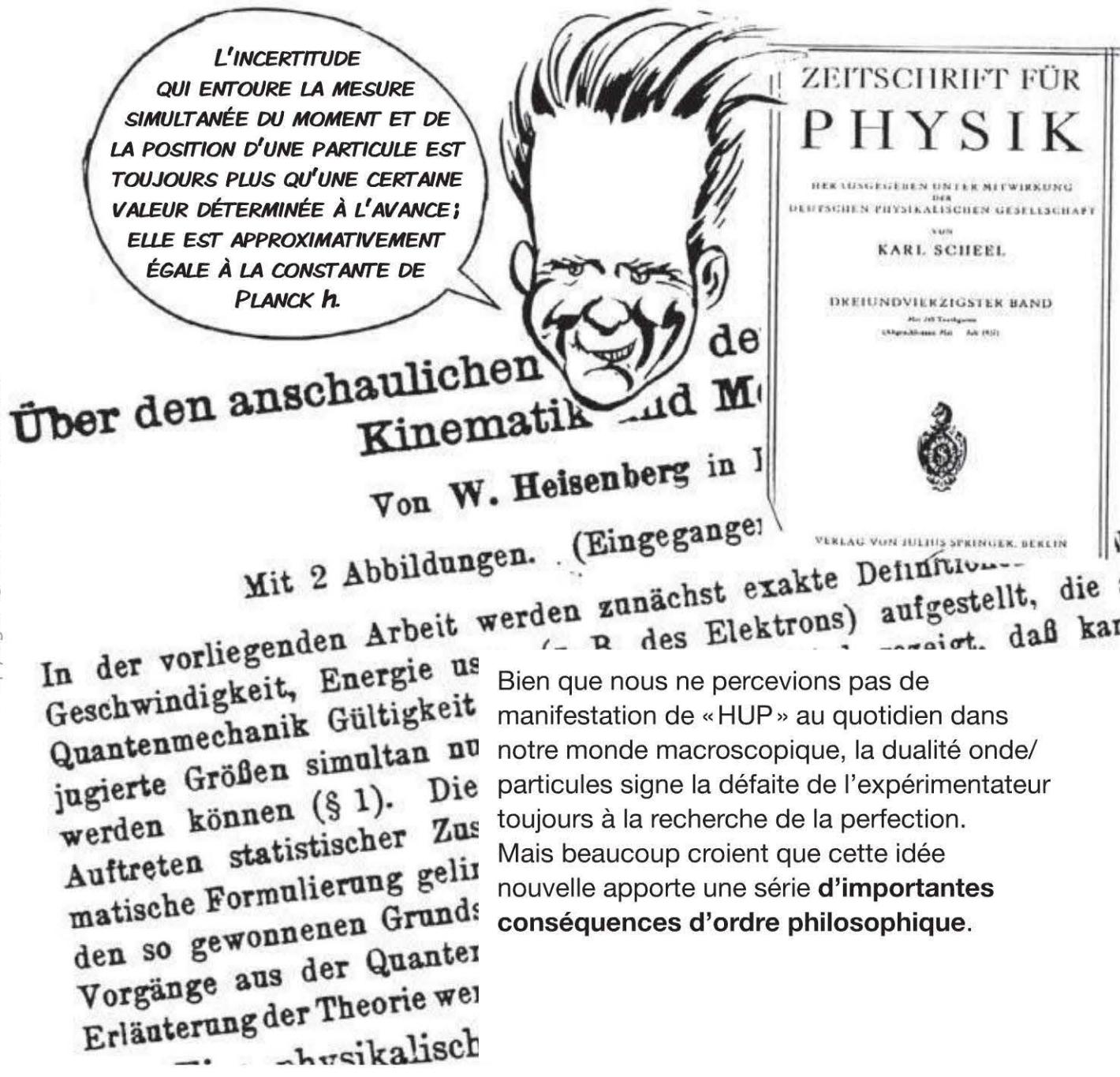
De manière similaire, la **précision minimale de la mesure du moment cinétique** est approximativement égale au moment imparié à l'électron par un **photon unique** du rayonnement qui éclaire la particule, c'est-à-dire la plus petite perturbation possible. À partir de l'équation de de Broglie/Einstein $\Delta p \approx h/\lambda$, Heisenberg a obtenu une valeur pour l'imprécision de la mesure de moment. En multipliant ces deux imprécisions, Heisenberg obtient et démontre que ce produit $\Delta x \Delta p$ sera toujours plus grand ou égal (\geq) à une certaine valeur...

Équation de de Broglie

$$(\Delta x)(\Delta p) \geq (\lambda)(h/\lambda) \geq h \text{ ou } \dots \Delta x \Delta p \geq h$$

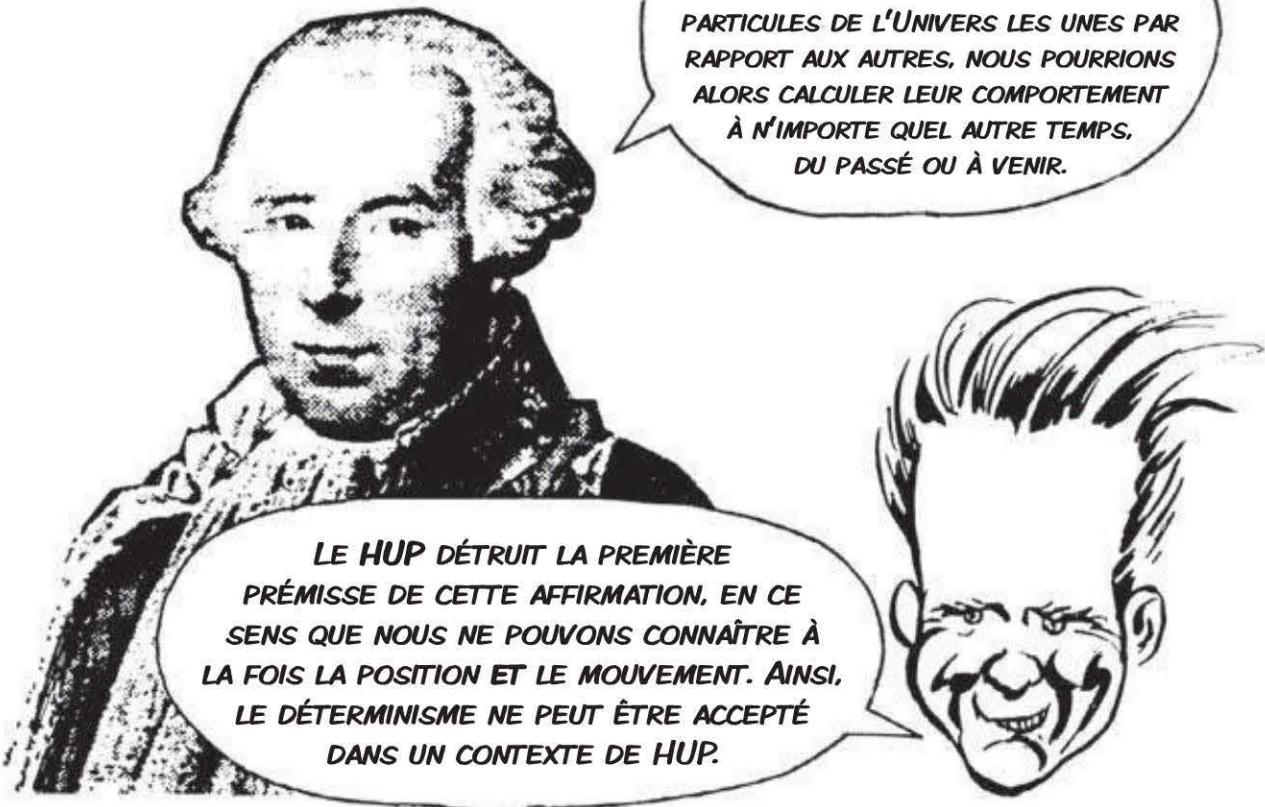
À partir de la limite de diffraction

Cette formule porte le nom de **principe d'incertitude d'Heisenberg** (connu sous son acronyme HUP en anglais) qui énonce...



La démise du déterminisme

À la fin du XVIII^e siècle, le philosophe français Pierre-Simon de Laplace (1749–1827) a énoncé le principe du déterminisme.



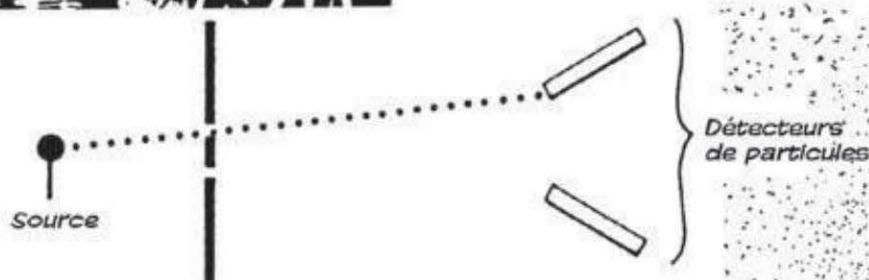
Cette conclusion a aussi ses détracteurs qui avancent qu'une équation basée sur le monde atomique ne peut pas prétendre à une validité universelle. Victor Weisskopf, un physicien hongrois ayant assisté en personne à nombre de ces conférences-réunions des années 1930 à l'Institut de Bohr, a apporté une réponse éloquente :



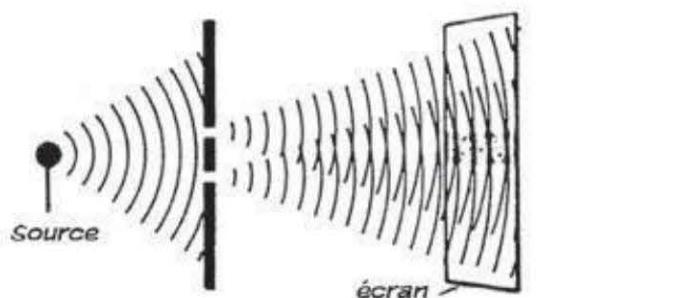
Mais personne ne pouvait imaginer ce qui était réellement dans la philosophie du « Grand Danois » Bohr, au printemps 1927.

La complémentarité

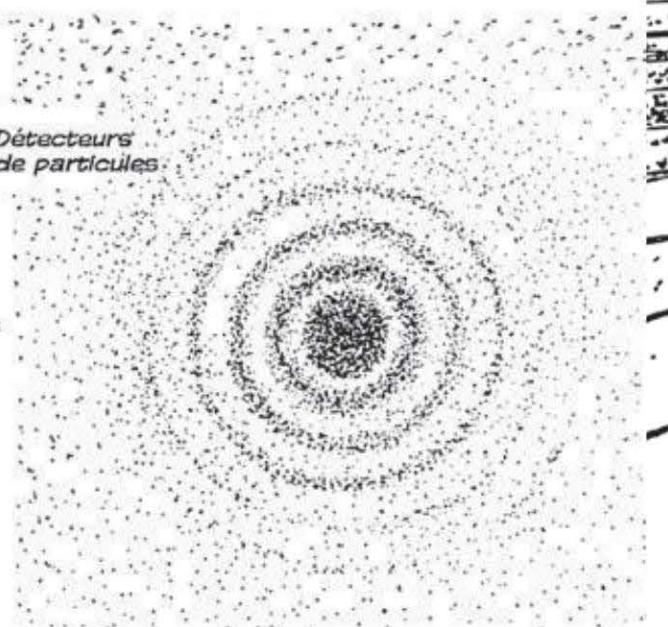
Au cours des vacances d'hiver en Norvège en 1927, Bohr avait trouvé ce qu'il croyait être le cœur même de la compréhension de la mécanique quantique, à savoir la dualité onde/particules. C'est alors que lui apparaît un nouveau point de vue.



Observation de photon avec un détecteur de particules



Observation de photon avec un détecteur d'ondes



L'électron montre des propriétés d'onde ou de particule

L'interprétation de Copenhague (CHI)

Après s'être disputé des semaines durant avec Heisenberg à propos de son concept, Bohr a commencé à rassembler les différentes « parties » de la théorie quantique pour en construire un ensemble cohérent. Il a combiné des aspects des travaux d'Heisenberg – la mécanique matricielle, par exemple, et le principe d'incertitude – et l'interprétation probabiliste de Born de l'équation d'onde de Schrödinger et de sa nouvelle vision de **complémentarité**.



C'était, en effet, un nouveau concept, qui se focalisait sur les problèmes de mesures quantiques et le sacro-saint lien avec la physique classique. Cet ensemble d'idées était connu sous le nom **d'interprétation de Copenhague** (CHI en anglais).

Côme, Italie, septembre 1927

Après s'être battu des mois entiers pour lier tous les aspects de la pensée contemporaine sur la théorie quantique, Bohr présenta une conférence à Côme en Italie en septembre 1927 devant un parterre composé des meilleurs physiciens d'Europe. Loin de l'œil et de l'entendement critiques d'Einstein – lequel ne souhaitait pas mettre un pied en Italie devenue fasciste –, Bohr fit une première présentation détaillée de son **principe de complémentarité**.

SUPPOSONS QU'UN ENSEMBLE
DE RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX NE
PEUT ÊTRE INTERPRÉTÉ QUE SUR LA BASE
DE PROPRIÉTÉS ONDULATOIRES ET QU'UN
AUTRE ENSEMBLE NE PEUT ÊTRE INTERPRÉTÉ
QUE SUR LA BASE DE PROPRIÉTÉS
DE PARTICULES.

PUISQUE LES RÉSULTATS ONT
ÉTÉ OBTENUS PAR DES PROTOCOLES
EXPÉRIMENTAUX DIFFÉRENTS, ILS NE PEUVENT ÊTRE
COMBINÉS POUR NE DONNER QU'UNE SEULE « IMAGE »,
MAIS DOIVENT RESTER SÉPARÉS ET CONSIDÉRÉS
COMME COMPLÉMENTAIRES.



La conférence de Solvay, octobre 1927

Fin octobre 1927, quelques semaines seulement après la conférence de Côme, Bohr arrive à l'Hôtel Métropole, à Bruxelles, pour participer à la célèbre conférence de Solvay dont nous avons longuement parlé au début de l'ouvrage.



Einstein voulait une théorie qui décrive l'objet *per se* et non sa probabilité d'exister. Mais Bohr était convaincu que Einstein accepterait son interprétation, puisque liée à des travaux expérimentaux. C'était en effet la méthode qu'Einstein lui-même avait utilisée pour défendre sa théorie de la relativité spéciale et qui, à l'époque, avait semblé contraire au bon sens.

Toutefois, à la surprise de Bohr, pour ne pas dire déception, Einstein a annoncé...



Einstein s'attache alors à mettre à mal l'interprétation de Copenhague (CHI), en s'attaquant plus particulièrement au principe d'incertitude, qu'il trouvait «peu appétissant», sur lequel l'interprétation était basée. Il a avancé des expériences de la pensée afin de contredire la loi d'Heisenberg. Mais à chaque démonstration, Bohr a trouvé une faille dans le raisonnement d'Einstein et a pu ainsi réfuter ses attaques.

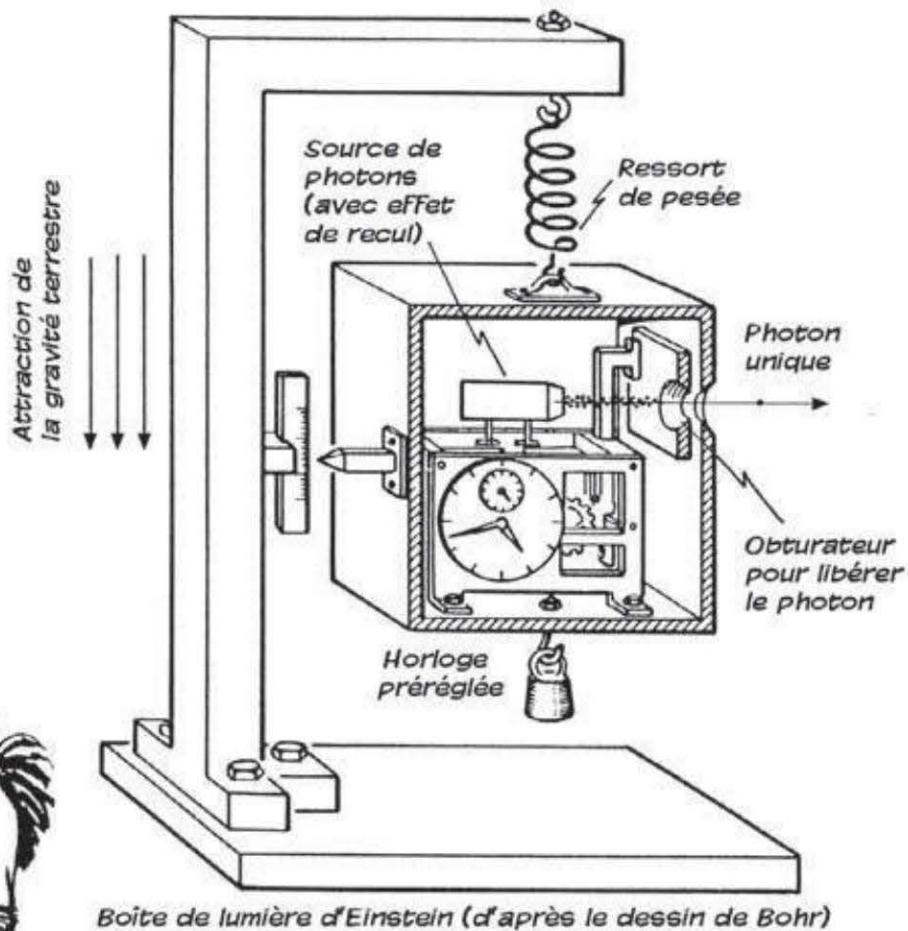
La boîte de lumière d'Einstein

Trois ans plus tard, à la conférence Solvay suivante, se produisit l'attaque la plus sérieuse. Einstein pensait avoir trouvé enfin « le cas » où l'interprétation HUP serait prise en défaut. Il imagine une boîte pleine de lumière et suggère que l'on peut déterminer avec précision **l'énergie** d'un seul photon et **le temps** auquel a eu lieu l'émission. Le temps et l'énergie étaient, en principe, une paire de variables « gouvernée » par la CHI.



Une nuit sans sommeil

Bohr allait-il reconnaître sa défaite ? L'histoire nous dit qu'il est resté éveillé toute la nuit, essayant de trouver une faille dans cette expérience. Au petit matin, il la trouva et, à la conférence du matin, il dessina la boîte de lumière. Bohr réfuta l'argument de la boîte de lumière, ce qui – on s'en doute – a beaucoup chagriné Einstein.



CELA
VA PRODUIRE UNE
INCERTITUDE CORRESPONDANTE
DANS L'ENREGISTREMENT DU
TEMPS PRÉCIS – EN APPLICATION,
TENEZ-VOUS BIEN, DE VOTRE
PROPRE THÉORIE DE LA
RELATIVITÉ GÉNÉRALE.

LORSQUE LE PHOTON EST ÉMIS,
LA SOURCE RECULE, CE QUI ENTRAÎNE UNE
INCERTITUDE QUANT À LA POSITION EXACTE
DE L'HORLOGE DANS LE CHAMP DE
GRAVITÉ TERRESTRE.

Le maître aurait-il oublié sa propre théorie ? Laquelle Bohr a utilisée pour calculer l'incertitude prédite par l'équation de Heisenberg. Après cette confrontation, l'interprétation de Copenhague (CHI) est devenue la norme pour aborder des questions de la théorie quantique, et cela perdure encore aujourd'hui.

Le paradoxe «EPR»

À son tour, Einstein allait-il s'avouer vaincu ? Pas exactement. Cinq ans plus tard, l'arrivée au pouvoir d'Hitler en Allemagne disperse les physiciens européens de par le monde, Einstein atterrissant à l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey. Avec deux collègues américains plus jeunes que lui, **Boris Podolsky** (1896–1966) et **Nathan Rosen** (1909–1995), Einstein constitua un nouveau défi pour Bohr, qui n'était pas basé sur le principe d'incertitude. On lui donna le nom de **paradoxe d'EPR**, qui reprend les initiales des physiciens.

IL EST POSSIBLE D'OBtenir UNE PAIRE
DE PARTICULES, DISONS DES ÉLECTRONS, DANS UN ÉTAT
DIT «SINGLET» OÙ LE SPIN DE L'UN ANNULE LE SPIN DE L'AUTRE.
SUPPOSONS MAINTENANT QUE CETTE PAIRE D'ÉLECTRONS,
DÉNOMMÉS A ET B, SE DÉPLACENT ASSEZ LOIN L'UN DE
L'AUTRE, APRÈS QUOI NOUS MESURONS LE SPIN DE
A DANS UN AXE DONNÉ ET DÉCOUVRONs QU'IL EST
DANS SON ÉTAT «UP».

MAIS, PUISQUE
LES DEUX SPINS DOIVENT S'ANNULER,
IL S'ENSUIT QUE LA PARTICULE B
DANS LE MÊME AXE DOIT AVOIR
L'ÉTAT «DOWN».

EN PHYSIQUE CLASSIQUE,
CELA NE SOULÈVERAIT AUCUN PROBLÈME.
ON CONCLURAIT SIMPLEMENT QUE LA
PARTICULE B AVAIT UN SPIN «DOWN»
DEPUIS SA SÉPARATION D'AVEC A.



Podolsky

Einstein
quitte
définitivement
l'Allemagne
en 1933.





TOUTEFOIS, EN SUIVANT
L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE, LE SPIN DE A N'A PAS
DE VALEUR DÉFINITIVE TANT QU'ELLE N'A PAS ÉTÉ MESURÉE.
À CE MOMENT-LÀ, DOIT INTERVENIR UN EFFET SIMULTANÉ À B,
OÙ SA FONCTION D'ONDE S'EFFONDRE POUR QUE L'ÉLECTRON
PARVienne À L'ÉTAT OPPOSÉ, C'EST-À-DIRE «DOWN».



CETTE SITUATION
ÉTRANGE IMPLIQUE QU'IL Y AIT
UNE INTERVENTION, SOIT UNE ACTION
À DISTANCE, SOIT UNE ACTION QUI
SE DÉROULE PLUS VITE QUE LA
VITESSE DE LA LUMIÈRE, L'UNE ET
L'AUTRE Étant À NOS YEUX
INACCEPTABLES.

Rosen

Einstein et ses collègues étaient alors convaincus qu'ils avaient mis au jour des variables cachées (appelées éléments de réalité) que la théorie quantique ne prenait pas en compte. Ils en conclurent que la théorie était **incomplète**.

Ce problème de taille sera appelé état de séparabilité d'Einstein, ou encore **principe de localité**.

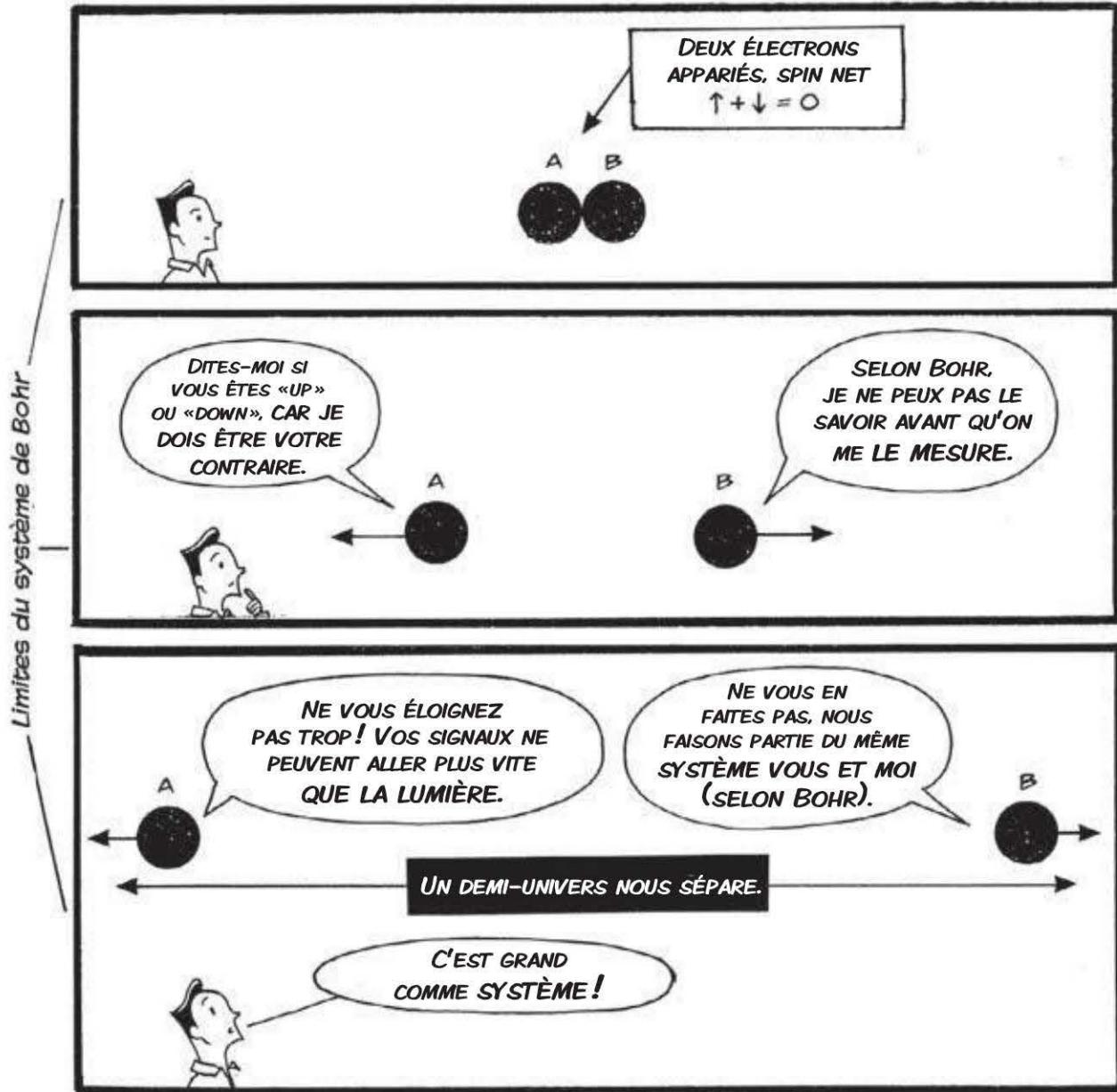


SI DEUX SYSTÈMES SE TROUVENT ISOLÉS
L'UN DE L'AUTRE UN CERTAIN TEMPS, UNE
MESURE EFFECTUÉE SUR L'UN N'INDUIRA AUCUN
CHANGEMENT RÉEL DANS L'AUTRE.

N'OUBLIONS
PAS QUE D'APRÈS MA
THÉORIE DE LA RELATIVITÉ
SPÉCIALE, RIEN NE PEUT SE
DÉPLACER PLUS VITE QUE
LA LUMIÈRE.

Bohr et la non-localité

Le concept de séparabilité ou de localité n'est pas permis, affirmait Bohr. Il rappela immédiatement à Einstein (et au monde par la même occasion) l'affirmation constante de Copenhague...

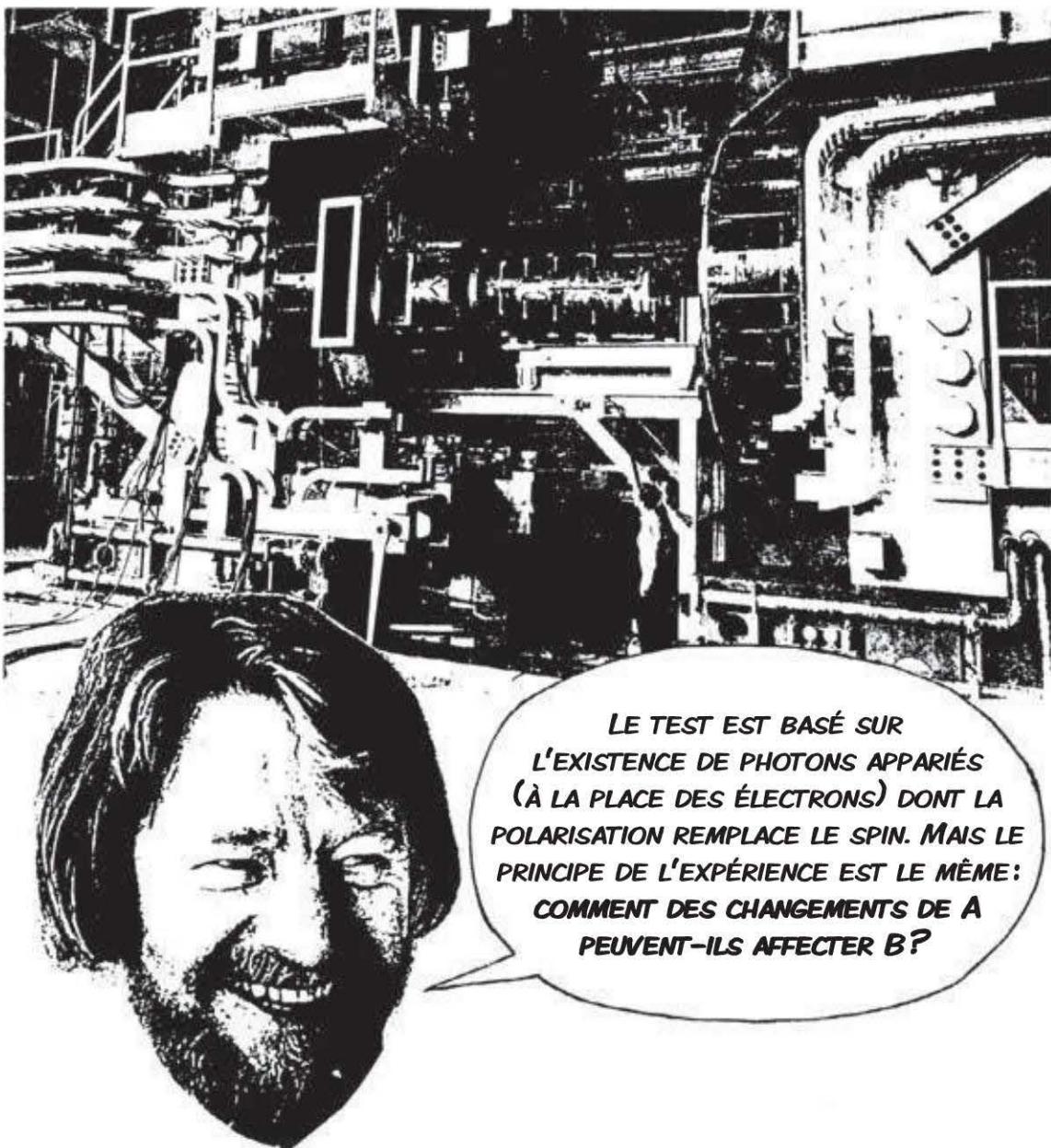


La mécanique quantique n'autorise pas de séparation entre l'observateur et l'observé. Les deux électrons dont il est question ici **et** l'observateur font partie du même système. L'expérience EPR ne démontre pas l'incomplétude de la théorie quantique, mais souligne la naïveté de supposer qu'il y ait des conditions **locales** dans les systèmes atomiques. Une fois connectés, les systèmes atomiques ne se séparent jamais.

La question est de savoir si cette propriété remarquable de non-localité peut être vérifiée ou non. Ou, autre question, l'existence de **séparabilité** d'Einstein peut-elle être validée ?

Bell et le théorème de l'inégalité

Trente ans après l'énoncé du paradoxe d'EPR, peu de progrès avaient été enregistrés sur cette importante question, jusqu'à ce qu'un physicien de Belfast, en Irlande du Nord, **John S. Bell** (1928–1990), prenne une année sabbatique au CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), à Genève. Il développa un **principe d'inégalité** très astucieux pour tester les interrogations soulevées par le paradoxe d'EPR.

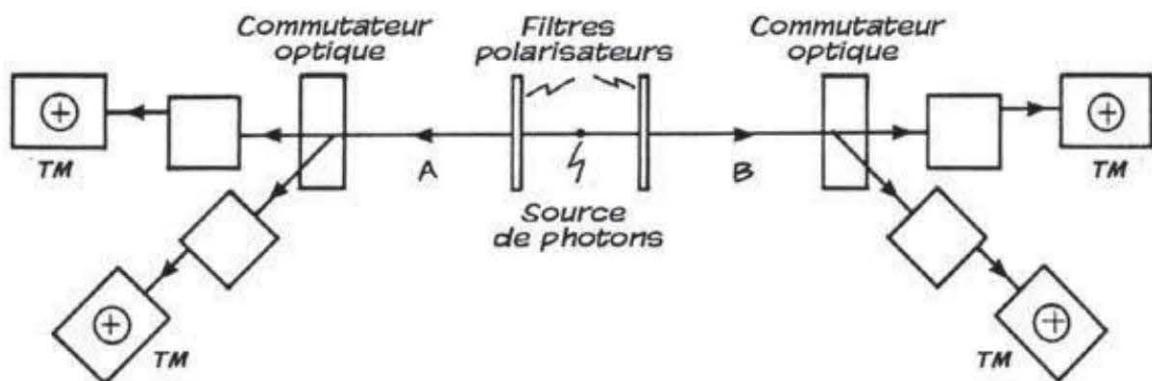


Pour établir son équation d'inégalité, Bell s'est servi de certains faits et idées avec lesquels tout le monde pouvait être d'accord, excepté la condition de localité, que Bell tenait pour « vraie ».

Si des expériences démontraient que le **principe d'inégalité était violé**, cela voudrait dire que l'une de ses prémisses était fausse. Bell en conclut que la Nature est non locale.

Les expériences menées par **John Clauser** et d'autres à Berkeley en 1978, et par le laboratoire d'**Alain Aspect** à Paris en 1982, indiquent une vérification expérimentale de violation de l'inégalité de Bell.

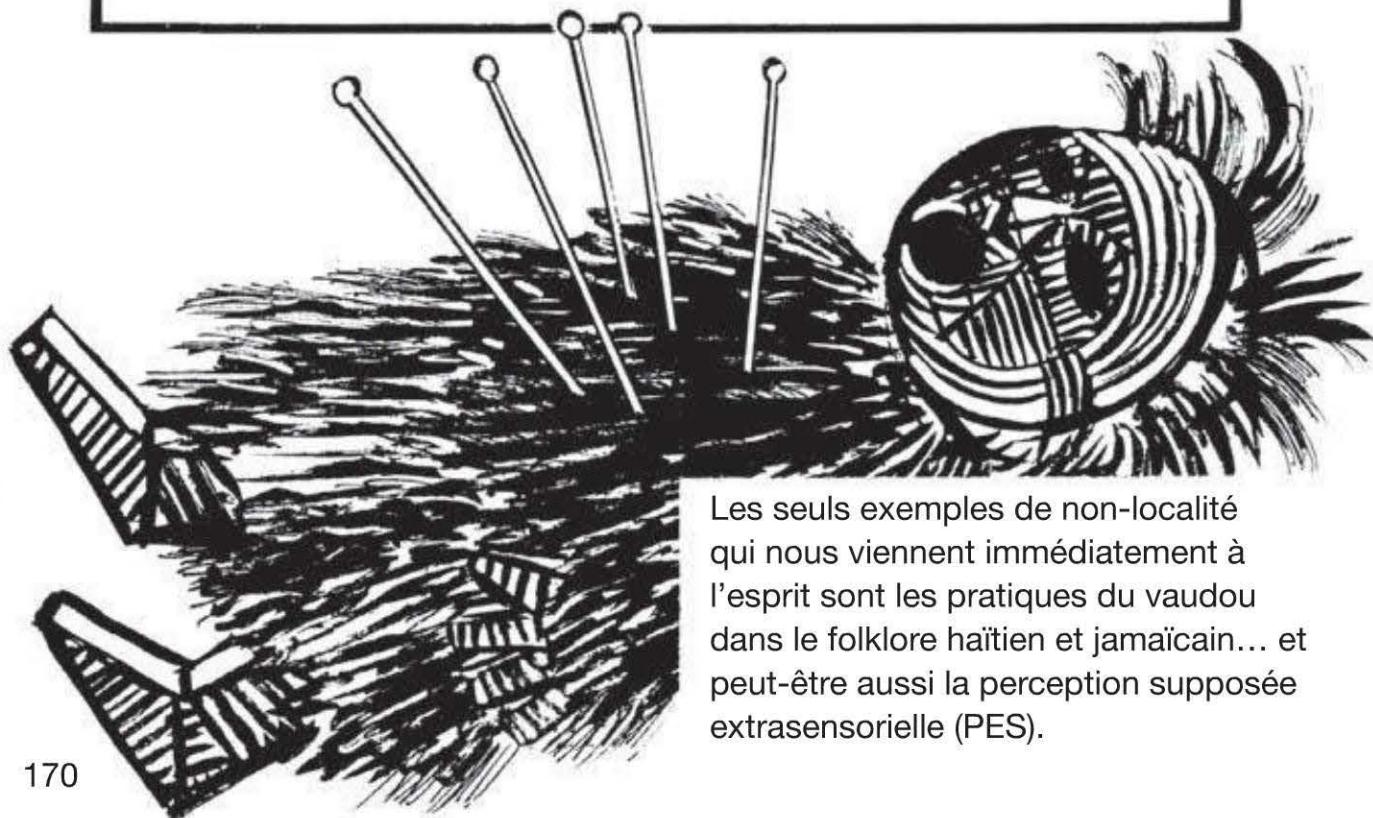
TM - Tube photomultiplicateur



Cela signifie qu'en dépit d'apparences locales de phénomènes, notre univers est en fait basé sur une réalité invisible qui – sans médiation – **autorise des communications à une vitesse plus élevée que celle de la lumière, jusqu'à être instantanées.**

Interactions dans une réalité non locale

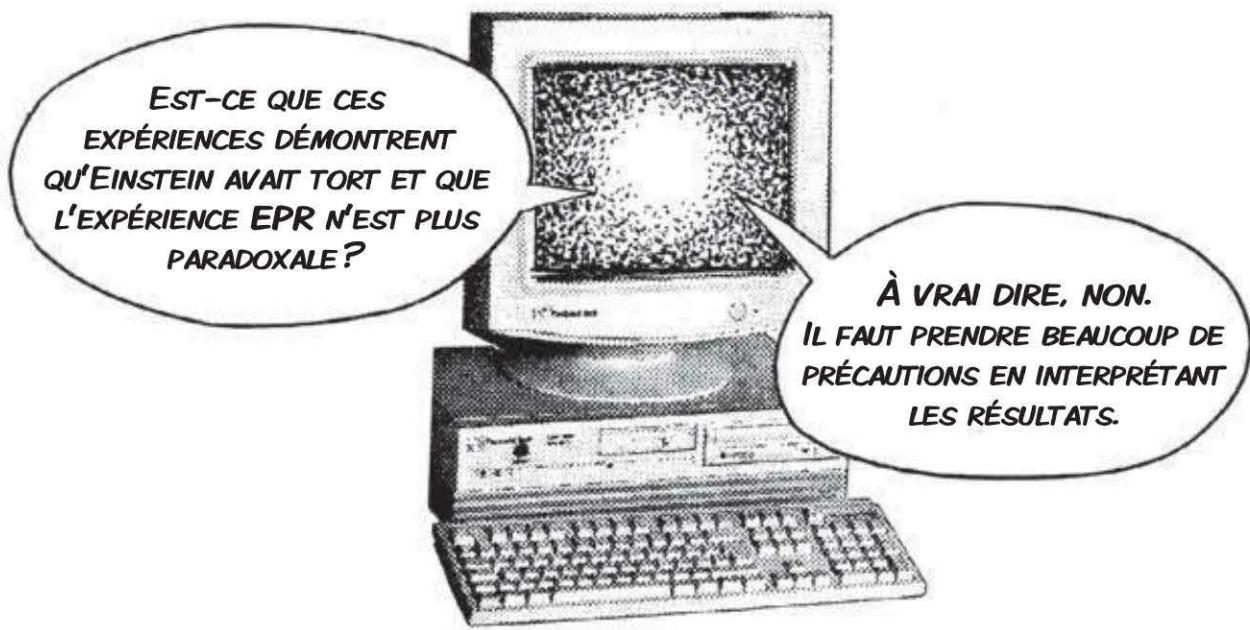
1. L'interaction ne diminue pas avec la distance.
2. Elle peut intervenir instantanément (plus vite que la lumière).
3. Elle relie des points sans devoir «traverser» l'espace qui les sépare.



Les seuls exemples de non-localité qui nous viennent immédiatement à l'esprit sont les pratiques du vaudou dans le folklore haïtien et jamaïcain... et peut-être aussi la perception supposée extrasensorielle (PES).

Un monde inconnu

Cela semblerait indiquer un aspect des plus remarquables de la Nature, une découverte découlant d'une application de la théorie quantique. Les travaux de Bell, qui devraient pouvoir s'appliquer à toute théorie fondamentale de la Nature (c'est-à-dire pas seulement la théorie quantique), pourraient bien constituer l'une des idées théoriques les plus marquantes du siècle.



En dépit de l'enthousiasme certain soulevé à ce sujet au cours de la dernière décennie, il semblerait qu'il y ait des failles dans les expériences telles que celles conduites par Alain Aspect en France, basées sur l'analyse de centaines de mesures. Ces failles ont inversé la « preuve du théorème de Bell » pour en faire un problème ouvert. Einstein et son paradoxe ont encore de beaux jours devant eux. De nombreuses recherches sont menées dans le monde sur la question, comme nous avons pu le constater sur une page Internet téléchargée récemment.

On

- Tuesday 21 November 1995, 16.00 h precisely at the UvA ...
- Thursday 7 December 1995, 16.00 h precisely at NTT ...
- Philippe Eberhard reviewed the ...
at the University of Am ... were not met by ... At NTT ...

The EPR Paradox and Bell's Inequality Principle

In 1935 Albert Einstein and two colleagues, Boris Podolsky and Nathan Rosen (EPR) developed a thought experiment to demonstrate what they felt was a lack of completeness in quantum mechanics. This so-called "EPR paradox" has led to much subsequent, and still on-going, research. This article is an introduction to EPR, Bell's inequality, and the real experiments which have attempted to raise by this discussion.

One of the principal features of quantum mechanics is that not all the classical issues raised by this discussion.

World Wide Web Worm: Future

December 1995, 16.00 h precisely



La théorie quantique et le nouveau millénaire

Le célèbre échange censé être l'objet de cette photographie ne représente pas le défi **le plus sérieux** d'Einstein devant l'interprétation que donne Bohr de la théorie quantique. La vision ondulatoire de Schrödinger et le principe d'incertitude d'Heisenberg sont justes et «fonctionnent». Mais le paradoxe d'EPR est une tout autre affaire!



Il est vrai que les expériences menées sur des photons appariés (Aspect et al.) semblent indiquer des violations du théorème de Bell, en ce sens que la Nature n'est pas «non locale». La question semble être résolue.

Cependant, est-ce que cette idée de **non-localité** peut être vraie et vérifiable ? Pouvons-nous vivre tranquillement avec le concept **d'action à distance** (télékinésie, vaudou, perception extrasensorielle (PES), etc.) ?

Aujourd'hui, tout le monde s'accorde à dire que les expériences de corrélation sont «conclusives». Mais maintenant, où cela nous mène-t-il exactement ?

John Archibald Wheeler, « physicien quantique » de son état

Le seul homme capable d'y répondre est **John Wheeler** (1911–2008), professeur émérite de physique à l'université de Princeton. Wheeler lui-même avait été aux avant-postes de la physique du xx^e siècle – dans la cosmologie relativiste et la théorie quantique, et cela pendant plus de 60 ans. Il était bien connu pour déployer des efforts sans relâche pour comprendre tous les aspects du formalisme quantique. Son travail soulignait d'ailleurs le rôle central de l'observateur quand ce dernier crée la réalité.

NOUS SOMMES PLUSIEURS À NE PAS ACCEPTER
TOUTES LES EXPLICATIONS CONTENUES DANS L'INTERPRÉTATION
DE COPENHAGUE, SURTOUT CELLES SUR LA NON-LOCALITÉ. JE POSE
DONC LA QUESTION: ET SI EINSTEIN, UNE FOIS
DE PLUS, AVAIT RAISON?

L'auteur J. P. McEvoy (à gauche) a rendu visite à John Wheeler à Princeton, un jour bien enneigé de décembre 1995.



POUR CE QUI EST DU PARADOXE EPR, SOUVENONS-NOUS:
NOUS N'AVONS PAS LE DROIT DE POSER LA QUESTION DE CE QUE FONT LES
PHOTONS PENDANT QU'ils VOYAGENT. AUCUNE PARTICULE ÉLÉMENTAIRE N'A D'EXISTENCE
PHÉNOMÉNOLOGIQUE TANT QU'ELLE N'A PAS ÉTÉ DÛMENT CONSTATÉE. J'AJOUTE QUE, DANS
LE CONTEXTE CONTEMPORAIN, LA THÉORIE QUANTIQUE EST INÉBRANLABLE ET NE PEUT
ÊTRE BATTUE EN BRÈCHE – ELLE A PASSÉ BRILLAMMENT L'ÉPREUVE DU FEU.

Le mot de la fin

John Wheeler a écrit récemment à l'auteur. « *Décembre 2000 marquera le 100^e anniversaire de la plus grande découverte faite dans le monde de la physique, à savoir le quantum. Pour fêter le centenaire, je propose pour votre titre « The Quantum: The Glory and the Shame » [Le quantum, la gloire et la honte]. Pourquoi la gloire ? Puisqu'il n'existe aucun recoin de la physique que le quantum n'éclaire pas. La honte ? Parce que nous ne savons toujours pas « pourquoi le quantum existe ».* »

Suggestions de lectures complémentaires

Force est de constater que nous ne pouvons pas expliquer la théorie quantique. Des physiciens et des mathématiciens de renom, de Niels Bohr à Roger Penrose, ont dit clairement que cela n'avait pas de sens. Toutefois, nous pouvons découvrir comment les idées se sont développées et comment ou à quoi la théorie s'applique. Notre ouvrage a pris le parti d'explorer surtout la genèse et le développement des idées. Nous faisons ici quelques recommandations de lectures supplémentaires.

Développement de la théorie quantique

The Quantum World [Le monde quantique], J. C. Polkinghorne, Éd. Penguin, 1990. Dense mais excellent, de la plume d'un scientifique élève de Dirac.

Thirty Years that Shook Physics [Les trente ans qui ont fait trembler la physique], George Gamov, Éd. Doubleday, 1966. Une perle pour ce physicien/dessinateur humoristique qui avait le premier appliquée la théorie quantique dans les années 1930. Disponible aussi chez Dover (livre de poche).

In Search of Schrödinger's Cat [À la recherche du chat de Schrödinger], John Gribbin, Éd. Bantam, 1984. Voici le meilleur guide de l'amateur existant aujourd'hui sur la genèse des idées qui sous-tendent la théorie quantique. Ce livre offre des exemples d'application de la théorie, décrit aussi l'électrodynamique quantique de Feynman et résume les interprétations «modernes» de l'époque.

Taking the Quantum Leap [Vers le bond quantique], Fred Alan Wolf, Éd. Harper & Row, 1989. Présentation haute en couleurs des idées de base (mais qui restent surprenantes) de la théorie quantique.

La vie et l'œuvre des principaux acteurs

The Dilemmas of an Upright Man [Les affres d'un honnête homme], J. L. Heilbron, Éd. Uni. of California Press, 1986. Biographie complète et agréable de Max Planck, «découvreur» du quantum.

Subtle is the Lord [Que le Seigneur est malin], Abraham Pais, Éd. Oxford University Press, 1982. Parmi quelques dizaines de récits biographiques sur Einstein, celui-ci doit être l'ouvrage de référence.

Neils Bohr's Times [Du temps de Niels Bohr], Abraham Pais, Éd. Oxford University Press, 1991. Une approche anecdotique qui nous révèle l'homme qui avançait à tâtons au travers de la physique atomique de son siècle, mais qui en était aussi le leader.

Physics and Philosophy [La physique et la philosophie], Werner Heisenberg, Éd. Harper, 1958. Ce livre, écrit par le découvreur de la mécanique matricielle et du principe de l'incertitude, soulève la question de l'interprétation dite de Copenhague et son importance pour les philosophes, le tout couvrant une période de 30 ans.

The Restless Universe [Un Univers agité], Max Born, Éd. Dover, 1951. Un «classique» facile à lire sur la physique du xx^e siècle, comprenant des passages qui expliquent certains aspects statistiques de la théorie quantique. Les coins de page servent à illustrer des séquences temporelles.

Matter and Light [La matière et la lumière], Louis de Broglie, Éd. Norton, 1939 (existe aussi chez Dover en livre de poche). Le point de vue du prince français, raconté par lui-même.

Schrödinger: Life and Thought [Schrödinger: sa vie, sa pensée], Walter Moore, Cambridge University Press, 1989. Biographie universellement acclamée du «polymatheux» autrichien. Tout y passe, verrues comprises!

Beyond the Atom: Philosophical Thoughts of Wolfgang Pauli [Au-delà de l'atome: la pensée philosophique de Wolfgang Pauli], Laurikainen, Éd. Springer-Verlag, 1985. On y trouve

un homme cynique qui a rêvé du principe d'exclusion mais qui, un jour, en a décrit la théorie comme d'autant plus mauvaise « qu'elle n'était même pas fausse ».

Directions in Physics [Où va la physique ?], Paul Dirac, Éd. Wiley, 1978. Ensemble de cours/conférences donnés par Dirac, comprenant son point de vue sur des travaux non encore achevés de théoriciens fondamentalistes.

Interprétations de la théorie quantique

Quantum Reality, Beyond the New Physics [Au-delà de la nouvelle physique], Nick Herbert, Éd. Bantam, 1985. L'auteur résume plusieurs interprétations de la théorie quantique, certaines ayant perdu depuis toute crédibilité.

The Ghost in the Atom [Le fantôme dans l'atome], série d'entretiens rassemblés et présentés par P. C. W Davies et J. R. Brown, Cambridge University Press, 1986. Interviews de John Bell, Alain Aspect, John Wheeler et d'autres qui décrivent bien l'état de l'art sur la question de la non-localisation il y a environ 190 ans. Introduction et fond de deux paradoxes qui remontent à 1935 ; le chat de Schrödinger et l'EPR (voir intra).

Quantum Theory on the Internet [La théorie quantique sur Internet]. Il est possible de télécharger des séquences vidéo montrant des fonctions d'ondes qui prouvent le principe d'incertitude et l'éparpillement quantique. Formats – Windows® et Macintosh®.

Mots de recherche – Visual Quantum Mechanics Project ou demander un lien par mail à kzollman@bluegiant.phys.ksu.edu.

Remerciements

Ce livre était plus difficile à écrire que je ne l'avais imaginé. Mais je bénis les dieux d'avoir eu Oscar Zarate comme partenaire, car cela soulignait le fait que ce récit était, avant tout, une aventure humaine. Des conversations avec John Polkinghorne, Chris Isham et John Wheeler se sont révélées très utiles à l'ouvrage, et le livre qu'a écrit Abraham Pais sur Bohr s'est avéré être une source biographique essentielle. Je dois beaucoup à l'historien des sciences Martin Klein, dont les articles publiés dans *The Natural Philosopher* sur les premiers travaux de Planck et d'Einstein m'ont ouvert les yeux il y a 25 ans. Ma femme Pat et d'autres membres de la famille étaient on ne peut plus patients quand je m'emmuraïs dans des silences ombrageux.

(«**Joe**») **J. P. McEvoy** a été enseignant et chercheur avant de devenir journaliste et auteur scientifique. On lui doit notamment *Stephen Hawking for Beginners* [Stephen Hawking pour les débutants] ; il a obtenu un MS en physique à Uni. Pennsylvania et un Ph.D. de l'université de Londres. Aux États-Unis, il était chercheur associé des laboratoires de recherche de RCA, à Princeton. Il a ensuite passé 15 ans dans le domaine de la physique à l'état solide, aux États-Unis, en Suisse et au Royaume Uni. En octobre 2006, l'American School in London lui a conféré la prestigieuse récompense dite du Fondateur pour «son dévouement et ses services de grande inspiration en faveur de l'éducation».

Oscar Zarate a précédemment illustré *Freud, Lenin, Mafia, Machiavelli et Stephen Hawking for Beginners*, et signé bon nombre de romans graphiques internationalement reconnus. A small killing [Un petit meurtre] coécrit avec Alan Moore a reçu le prix Will Eisner – «meilleur roman graphique 1994». Oscar Zarate a achevé *It's dark in London* [Il fait sombre à Londres], une série d'histoires graphiques destinées aux éditions Serpent's Tail, en septembre 1996.

Les diagrammes et graphiques sont de **Judy Groves**.

Les crédits photographiques

Pages 10, 11 : Institut de Solvay.

Pages 164, 172 : Niels Bohr Archive.

Index

- Absorption **63**
Anderson Carl **155**
Antimatière **155**
Aspect, Alain **170**
Atomes
 découverte **19**
 Heinseberg **124–125**
 Schrödinger **137**
 structures **66, 71–77**

Balmer, J. J. **67–69**
Bell, John S. **169**
Bohr, Niels **13, 78–89,**
 118, 160–165
Boltzmann, Ludwig
 24–25, 38–39, 48
Born, Max **3, 144–145**
Broglie, Louis de
 3, 110–119

Clausius, Rudolf **18**
Complémentarité **160–162**
Copenhague,
 l'interprétation de **161**
Correspondance,
 principe **124**

Déterminisme, principe **159**
Dirac, Paul **3, 149–155**
Dualité onde/particules **109**

Effet photoélectrique
 44, 59, 111, 143
Einstein, Albert **3,**
 12–13, 47–56
Électrodynamique **152**
Électrons **44, 70, 119, 127**
Entropie **18**
Équipartition de
 l'énergie **24, 41**
Exclusion, principe **99, 119**

Fourier, analyse **135**
Fréquences
 d'hydrogène **66–69**

Gaz, théorie cinétique **20**
Heisenberg, Werner
 3, 121–127, 143

Incertitude, principe
 115, 158, 163–165
Inégalité (théorème de
 Bell) **169–171**

Laplace,
 Pierre-Simon de **159**
Lenard, Philippe **44–46**
Localisation,
 principe **167**
Maxwell, J. C.
 5–6, 20–23
Mécanique
 matricielle **128–131**
Melville, Thomas **60**
Millikan, Robert **57–58**
Moment angulaire **82, 84**
Moment linéaire **83**

Newton, Isaac **6**
Ondes **105–108, 111–113,**
 135, 148, 140
Ondes d'électrons **118**
Ondes matière **110,**
 117, 132
Ondes stationnaires **118**
Ondes, théorie **6, 9**
Paradoxe EPR **166–168**
Particules **9, 70, 115, 140**
Pauli, Wolfgang **3, 94–99**

Photons **111, 114**
Physique classique **5, 9, 139**
Planck, Max **3, 11,**
 33–43, 58–59
Polkinghorne, J. C. **153**
Probabilité **24,**
 144–147, 163

Quantum (théorie)
 3–4, 42, 172

Raies de Fraunhofer **64**
Raies spectrales intenses
 60–69, 139
Rayonnement des corps
 noirs **27–43, 143**
Rayonnement, loi **40**
Rayons gamma **157**
Rutherford, Ernest **71–77**

Schrödinger, Erwin
 3, 133–144
Solvay, conférence
 10–15, 183
Sommerfeld,
 Arnold **90–93**
Spectres **60–69, 90–93, 125**

Table périodique
 100–104, 119
Thermodynamique,
 1^{re} loi **17**
 2^e loi **18**

Vitesse (molécules) **22–23**

Wheeler, John
 Archibald **173**
Wigner, Eugene **148**

Zeeman, effet **94–96**