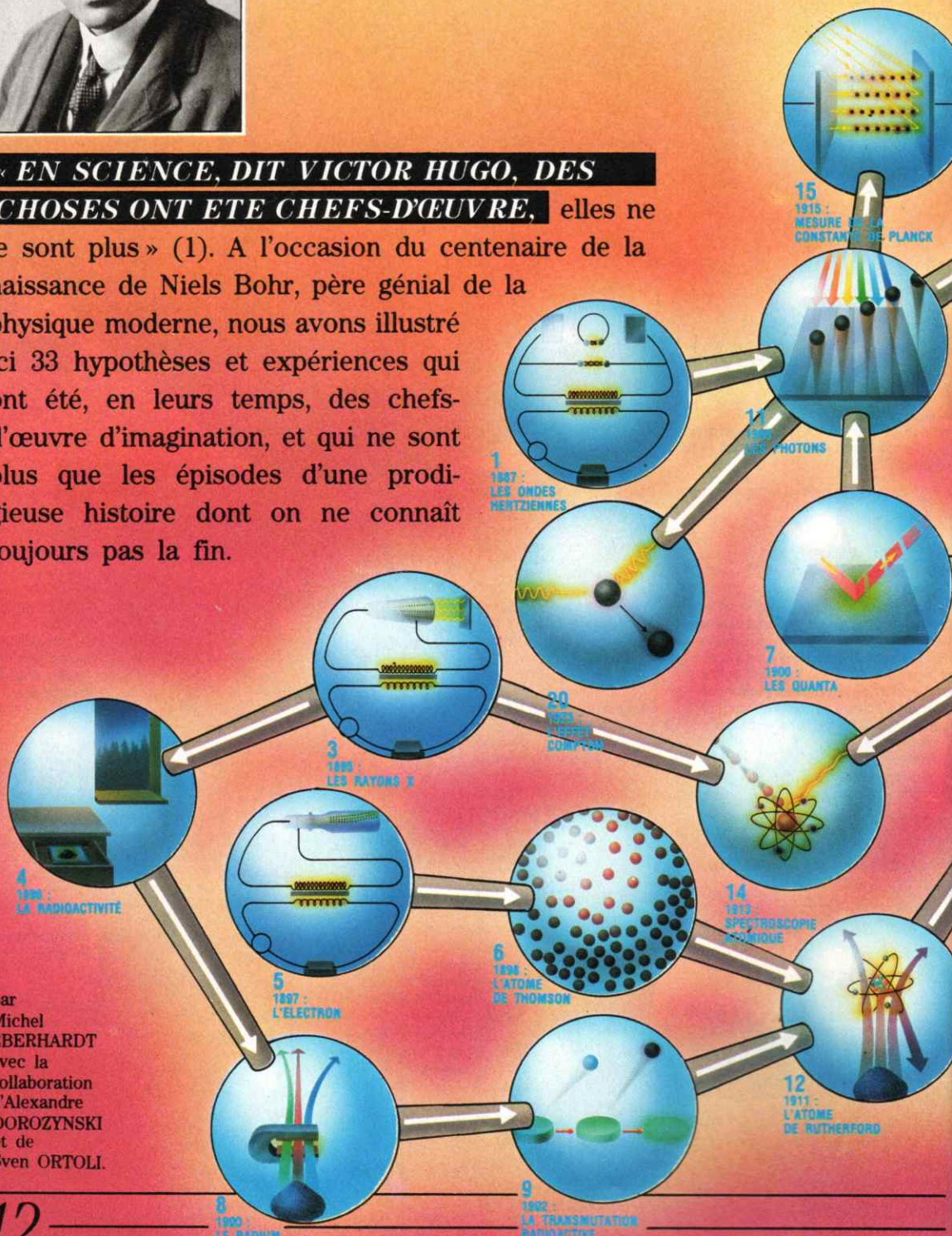


# BOHR, CET INCONNU

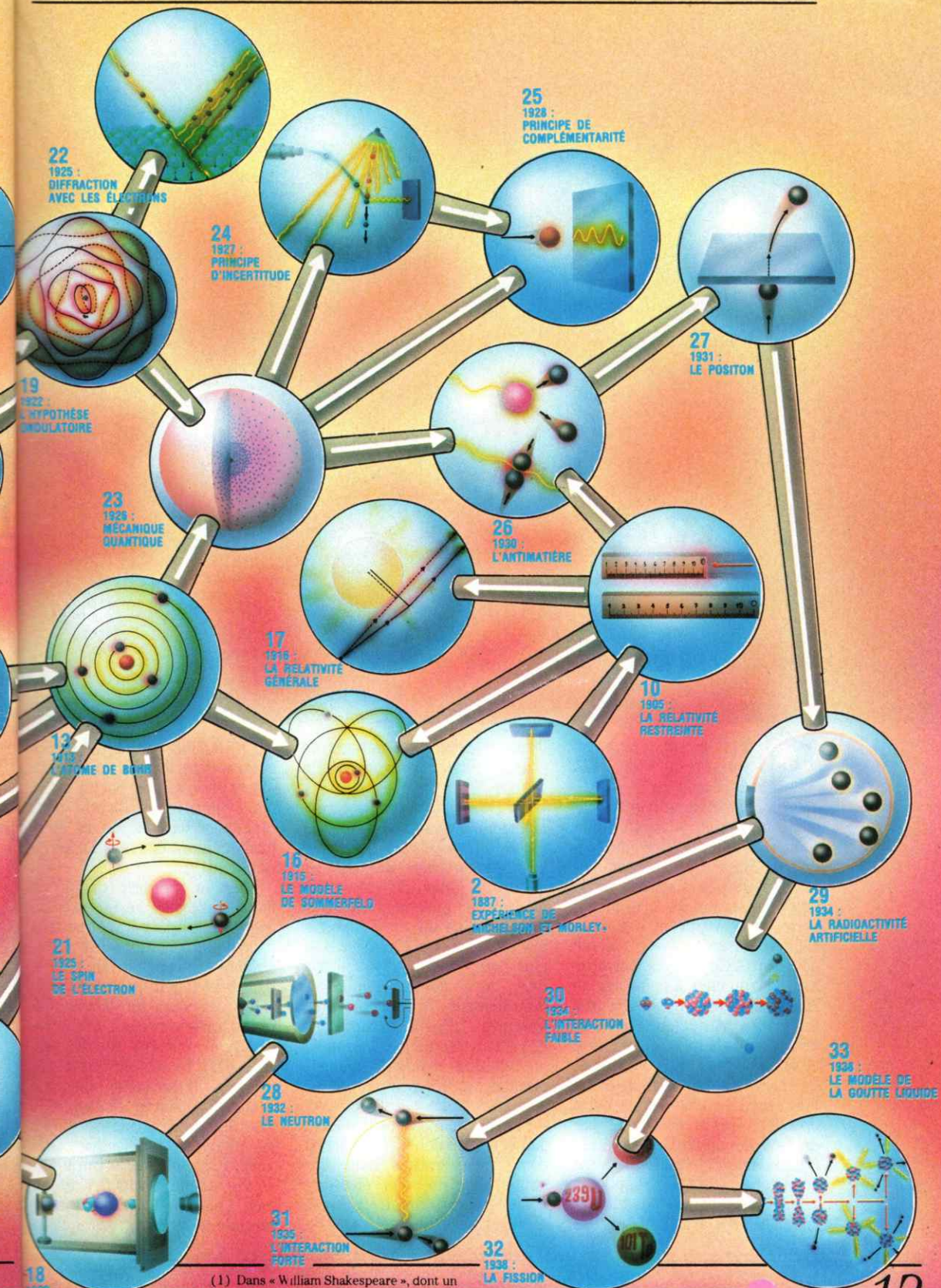
« EN SCIENCE, DIT VICTOR HUGO, DES CHOSSES ONT ETE CHEFS-D'ŒUVRE, elles ne

le sont plus » (1). A l'occasion du centenaire de la naissance de Niels Bohr, père génial de la physique moderne, nous avons illustré ici 33 hypothèses et expériences qui ont été, en leurs temps, des chefs-d'œuvre d'imagination, et qui ne sont plus que les épisodes d'une prodigieuse histoire dont on ne connaît toujours pas la fin.



Dessin J. Correia - Photo N. Bohr Institut

par Michel EBERHARDT avec la collaboration d'Alexandre DOROZYNSKI et de Sven ORTOLI.



(1) Dans « William Shakespeare », dont un large extrait vient d'être réédité, sous le titre « l'Art et la Science » par A.N.A.I.S. (Nice). A lire de toute urgence.



**1** 911. Au laboratoire Cavendish de l'université de Cambridge, en Angleterre, officie un célèbre physicien, Joseph John Thomson, encore tout aurolé du prix Nobel qu'il a obtenu en 1906. Cette récompense, il la doit principalement à la découverte de l'électron et à la nouvelle représentation de l'atome qu'il a tirée de cette découverte. En 1881, en effet, à peine âgé de 25 ans, il a émis l'hypothèse que les rayons cathodiques, c'est-à-dire le rayonnement qui est issu de la cathode d'un tube à vide et qui provoque l'apparition d'une fluorescence verte sur la paroi opposée, étaient constitués par un flot de particules chargées négativement — particules que Johnstone Stoney baptisera "électrons", dix ans plus tard. Si les physiciens avaient des droits

d'auteur comme les auteurs de chansonnette, Stoney serait devenu milliardaire!

En 1897, J.J. Thomson démontre, par des expériences directes, que de tels électrons peuvent être extraits de tous les atomes, et donc que, contrairement à ce qu'indique l'étymologie grecque du mot (*tomos* = insécable), l'atome n'est pas le plus petit constituant de la matière, mais contient lui-même des éléments encore plus minuscules. Tenant compte de cette nouvelle donnée, il propose en 1902 un modèle atomique original : l'atome, selon lui, serait composé d'une substance uniforme de charge positive dans laquelle seraient disséminés, comme des raisins dans une boule de pain, des électrons chargés négativement. La cohésion de l'ensemble serait assurée

par l'équilibre de deux forces antagonistes, les électrons étant, d'une part, attirés par la substance positive et, d'autre part, repoussés par les autres électrons conformément à la loi de Coulomb<sup>(2)</sup>.

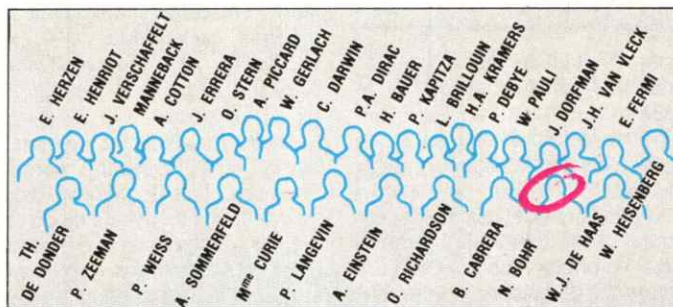
Dans un premier temps, ce modèle d'atome se montre extrêmement fécond, permettant d'expliquer nombre de phénomènes jusque-là incompréhensibles. Il faut dire que la physique est alors en pleine mutation, qu'elle connaît une sorte d'âge d'or. Elle effectue des percées dans toutes les directions. En 1895, le physicien allemand Röntgen découvre les rayons X. En 1896, le Français Becquerel découvre la radioactivité. En 1898, Pierre et Marie Curie isolent le radium. En 1900, le physicien allemand Max Planck formule la théorie des quanta

(2) Tout particule P portant une charge électrique q subit, de la part de toute autre particule P' portant une charge électrique q' une force f (répulsive ou attractive selon

que q et q' sont ou non de même signe) de module  $f = k \cdot q \cdot q' / r^2$ , r étant la distance entre ces deux particules.



(les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font de manière discontinue, par l'intermédiaire de grains, ou quanta, d'énergie). En 1905, un employé de bureau des brevets de Berne, du nom d'Albert Einstein, explique l'effet photo-électrique (lorsqu'un éclaircissement convenable tombe sur la surface de séparation de deux milieux différents dont l'un au moins est un conducteur ionique ou un semi-conducteur, il y a production d'un courant) en postulant que la lumière est elle-même constituée de quanta discontinus d'énergie, les photons. La même année, le même Albert Einstein expose dans les *Annales de la physique* sa théorie de la relativité restreinte. Décennie prodigieuse, où s'élaborent tous les fondements de la physique moderne !



1930, le congrès de Solvay réunit les sommités du monde de la physique.

En 1911, cependant au laboratoire Cavendish de l'université de Cambridge, J.J. Thomson éprouve quelques difficultés à établir un lien entre les spectres optiques émis par les atomes et la distribution des électrons dans son modèle atomique. On sait, à l'époque, que, dans certaines circonstances, les atomes peuvent émettre des raies spectrales de lumière. Si, par

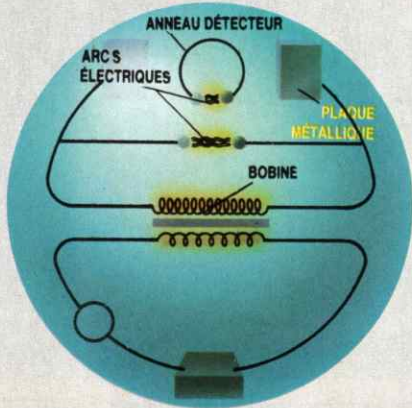
exemple, on chauffe une substance, ou si l'on fait passer un courant électrique dans un gaz, cette substance ou ce gaz émettent de la lumière. On sait aussi que si l'on analyse cette lumière à l'aide d'un prisme, qui en sépare les différentes couleurs, on constate que seules certaines raies, de couleurs bien déterminées, apparaissent dans le spectre. Chaque élément chi-

## 1. DES ONDES À LA CONQUÊTE DU MONDE



Hertz

« Votre découverte, M. Hertz, fera le tour du monde. » « Vous exagérez, Monsieur », répondit le savant au président Carnot qui le félicitait. Carnot avait raison ; les ondes électromagnétiques, prévues par le grand Maxwell et découvertes par Hertz en cette année 1887, allaient bientôt parcourir la Terre. A leur origine, une expérience aussi simple que belle : la décharge d'une bobine dans un circuit terminé par deux plaques métalliques avait créé entre ces plaques une émission d'ondes électromagnétiques ; leur présence était trahie par l'apparition d'étincelles aux extrémités d'un anneau servant de détecteur. Mais dans quel milieu ces ondes voyageaient-elles ?...



mique possède ainsi un ensemble parfaitement défini de raies, que l'on appelle son spectre de raies, et qui est en quelque sorte sa signature lumineuse.

Pour Thomson, ces raies spectrales sont dues à la vibration des électrons autour de leurs positions d'équilibre, et elles devraient pouvoir être déterminées par le calcul à partir de la distribution desdits électrons à l'intérieur de l'atome, selon le modèle qu'il a imaginé. Or, le vénérable professeur et ses élèves ont beau se livrer aux calculs les plus compliqués, recourir aux astuces mathématiques les plus subtiles, jamais les spectres évalués théoriquement d'après le modèle de Thomson ne coïncident avec les raies spectrales observées expé-

riementalement pour tel ou tel élément.

Est-ce à dire que le modèle de Thomson est mauvais, ou inadéquat ? Le maître ne le pense pas, et aucun de ses disciples n'oserait le suggérer. A l'exception d'un jeune physicien danois fraîchement débarqué à Cambridge : Niels Bohr.

Qui est ce jeune impertinent ? Entré à l'université de Copenhague en 1903, il a déjà étonné ses professeurs et ébloui ses condisciples. Sa camarade Helga Lund, qui poursuivait comme lui des études de physique, écrit un jour à un parent : « C'est merveilleux de connaître un génie. J'en connais un, que je côtoie même tous les jours. Il se nomme Niels Bohr et je vous en ait déjà parlé. Il se montre de plus en plus remarquable, ce qui ne l'empêche pas d'être le jeune homme le plus agréable et le plus modeste que vous puissiez imaginer. » En 1907, il a reçu la médaille d'or de l'Académie royale danoise des sciences pour une étude sur la tension superficielle des liquides, (seul travail expérimental que nous possédions de lui). Venant de soutenir brillamment sa thèse de doctorat, il obtient une bourse de la fondation Carlsberg — les célèbres brasseries pratiquaient le mécénat scientifique — et décide de se rendre à Cambridge, où l'attire la réputation de J.J. Thomson.

Ainsi au cours du premier dîner auquel l'avait convié Thomson, Niels Bohr n'avait rien trouvé de mieux que de dire à ce dernier que sa théorie des électrons comportait des « erreurs » et que, si elle ne parvenait pas à rendre compte des raies spectrales, c'était parce qu'elle était « inadaptée » ?

Rude franchise qui ne laisse pas présager une collaboration harmonieuse. Bohr, plus tard, reconnaîtra d'ailleurs volontiers devant ses élèves que ce n'était pas la meilleure manière d'entrer en contact avec un grand ancien !

Cet irrespect n'est cependant pas gratuit. Sans pouvoir encore

déterminer précisément où se situe l'erreur de Thomson, Bohr soupçonne néanmoins la faille : puisque la lumière, raisonne-t-il, ne peut plus être assimilée à des ondes qui se propagent de manière continue, mais doit être considérée comme une succession de « paquets » discontinus d'énergie, de valeur bien définie (théorie des quanta de Planck) alors la mécanique de Newton, qui est continue et reste à la base du modèle atomique de Thomson, doit elle aussi être remise en question. En effet, si l'énergie électromagnétique de la lumière est « quantifiée », c'est-à-dire si elle se ramène à l'émission de un, deux, trois dix, etc. quanta lumineux, ne faut-il pas également admettre que l'énergie des électrons qui donnent naissance aux raies lumineuses est elle aussi « quantifiée » donc discontinue, et qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs nettement séparées, les autres étant interdites par une loi de la nature non encore découverte ? Car comment concevoir qu'un système atomique comme le modèle de Thomson, construit conformément aux lois de la mécanique classique de Newton, puisse émettre de la lumière sous la forme de quanta lumineux de Planck, qui eux n'ont rien à voir avec la physique classique ? Intuition géniale qui contient déjà en filigrane toute la future théorie atomique de Bohr.

**T**homson n'est pas convaincu par les conceptions révolutionnaires du jeune Danois. Entre eux, les discussions s'enveniment. Bohr, ne trouvant pas la compréhension nécessaire à l'épanouissement de ses idées, décide de quitter Cambridge et de terminer le temps de sa bourse en un lieu où ses idées seront mieux accueillies. Son choix se porte sur l'université de Manchester, où la chaire de physique est occupée par Ernest Rutherford, un homme qu'il a eu l'occasion d'entendre au cours du dîner

annuel du laboratoire Cavendish et qui lui a fait très forte impression.

Ernest Rutherford, né en Nouvelle-Zélande en 1871, avait été, lui aussi, un très brillant élève: premier en mathématiques, premier en physique, premier en chimie, mais aussi en latin, en littérature anglaise, en français et en histoire, il aimait bricoler des appareils photographiques, démonter des réveils et installer des moulins à eau sur les rivières proches de la ferme familiale.

A dix-huit ans, il se faisait remarquer en construisant un détecteur d'ondes électromagnétiques. Venu en Angleterre pour achever ses études, il fréquenta l'université de Cambridge, où il eut pour maître J.J. Thomson. Nommé en août 1898, professeur de physique à l'université McGill de Montréal, au Canada, il se passionna pour la radioactivité, qui venait d'être découverte. Il démontra que les particules alpha émises par les éléments radioactifs étaient des atomes d'hélium chargés positivement et se déplaçant à des vitesses extrêmement élevées.

Entièrement voué à la physique, jusque dans ses amours, il épousa en 1901 une jeune fille nommée... Marie Newton (simple homonymie!). Sa réputation croissant, il fut appelé en 1907 par l'université de Manchester et, l'année suivante, un prix Nobel récompensa ses recherches sur la chimie des substances radioactives.

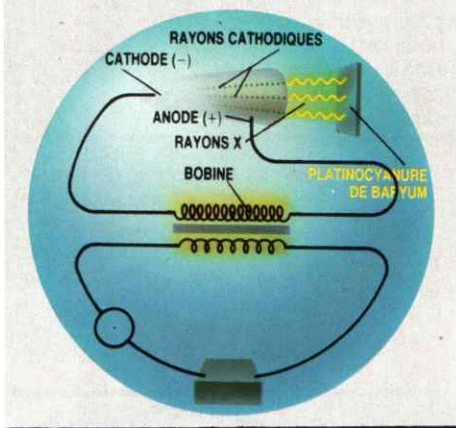
Quand Niels Bohr le rencontre pour la première fois, en 1911, Rutherford est plongé dans ses célèbres études sur la structure interne des atomes. Pour cela, il projette des particules alpha sur une mince feuille d'or et, avec l'aide de son jeune assistant Marsden, repère sur un écran fluorescent placé derrière la feuille les scintillations produites par les particules alpha qui ont traversé l'obstacle. En déplaçant l'écran tout autour de la feuille, il constate que certaines particules sont fortement déviées, et que quelques-unes reviennent même vers la source comme si elles avaient ricoché sur la feuille. Intrigué, il se demande quelle peut être la cause de ces déviations et de ces ricochets. A s'en tenir au modèle atomique de

### 3. DE MYSTÉRIEUX RAYONS X

...Avec les rayons X la famille électromagnétique allait s'agrandir. En 1895, Wilhelm Röntgen étudiait la nature des rayons cathodiques, rayons obtenus en plaçant deux électrodes + et - aux extrémités d'un tube dans lequel régnait le vide. Il ne découvrit pas ce qu'étaient ces rayons mais il observa qu'ils donnaient naissance à un autre rayonnement, à l'extérieur du tube cette fois, capable de rendre lumineux certains produits. Ce rayonnement extrêmement pénétrant, Röntgen le baptisa rayonnement X. Mais quelle était sa nature exacte?...



Röntgen



### 2. LA MORT DE L'ÉTHÉR

Maxwell avait annoncé que les ondes électromagnétiques étaient analogues aux ondes lumineuses. Hertz avait démontré leur existence. Restait une inconnue: tout comme le son se propage comme une oscillation d'atomes dans un liquide, un solide ou un gaz, les ondes électromagnétiques et donc la lumière devaient se propager dans un milieu encore indéterminé mais déjà baptisé: l'éther. Ce milieu, on peut en prouver l'existence, se dirent deux jeunes physiciens, Albert A. Michelson et Edward W. Morley; il suffit de déceler un mouvement de la Terre à travers l'éther. Pour cela ils fabriquèrent un interféromètre, appareil dans lequel les rayons lumineux issus d'une même source (monochromatique) viennent interférer après avoir parcouru des chemins différents. Si l'interféromètre (et donc la Terre) se déplaçait à une vitesse  $V$  par rapport à l'éther, la

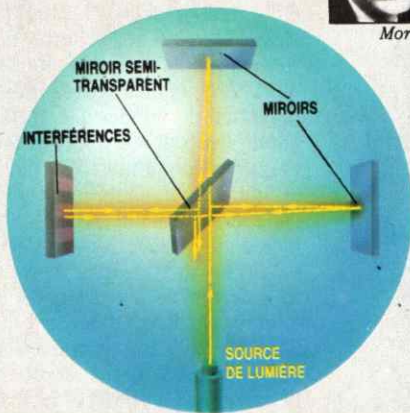
figure d'interférences devait changer après que l'appareil ait pivoté de  $90^\circ$ . L'expérience eut lieu en 1887, décidément année faste pour la physique. Et contrairement à toute attente, le résultat fut négatif: l'éther n'existait donc pas...



Michelson



Morley



Thomson, les lourdes et ultra-rapides particules alpha devaient, telles des balles transperçant un nuage de poussière, traverser sans peine les légères sphères de substance positive truffées de petits "pépins" négatifs (les électrons), lesquels sont près de 10 000 fois moins lourds que les particules alpha. De tels détournements ne peuvent donc s'expliquer que par des collisions avec d'autres éléments de grande masse, ou par le passage des particules alpha (qui, rappelons-le, sont chargées positivement) à proximité d'une autre charge positive importante et qui exercerait sur elles une action répulsive.

Aussi Rutherford est-il amené à proposer un nouveau modèle de l'atome, le modèle "planétaire", appelé ainsi en raison de son analogie avec le système solaire. La masse et la charge po-

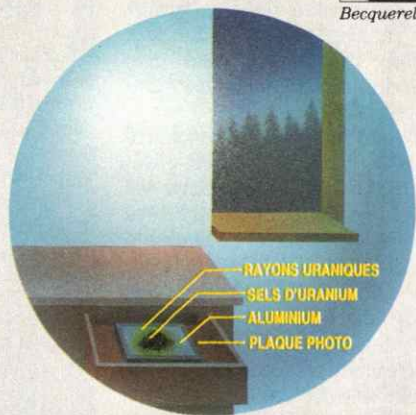
## 4. LE HASARD ET LA RADIOACTIVITÉ

...Pour le Français Henri Becquerel, la production de rayons X était inséparable du phénomène de luminescence. Il étudia donc des cristaux qui deviennent luminescents après exposition au soleil, pour y rechercher une émission de rayons X. Plus précisément, il utilisa des sels d'uranium placés sur une plaque d'aluminium, elle-même posée sur une plaque photo protégée de la lumière par un papier noir. En exposant le tout au soleil, il devait y avoir émission de rayons X, ce que prouverait l'impression de la plaque photo. Et effectivement, à chaque fois qu'il fit l'expérience, la plaque photo une fois développée montrait une tache. Mais un jour de février 1896, il répéta l'expérience sans exposition au soleil. Or la plaque présentait toujours une tache : l'uranium émettait un rayon-

nement en l'absence d'excitation lumineuse. Becquerel ne le savait pas encore, mais il avait découvert la radioactivité...



Becquerel



sitive sont concentrées dans un noyau central (semblable au Soleil) autour duquel gravitent (comme des planètes) des électrons de charge négative. Une différence cependant avec le modèle solaire : pour assurer la cohérence de l'ensemble,

l'attraction électrique remplace l'attraction gravitationnelle. Encore ne s'agit-il là que d'une nuance purement formelle, la loi de l'attraction électrique de Coulomb étant mathématiquement identique à la loi de gravitation de Newton (dans les deux cas, les forces sont inversement proportionnelles au carré de la distance).

Quand, au printemps 1912, Bohr reçoit l'autorisation de travailler à Manchester dans l'équipe du Pr Rutherford, celle-ci est occupée à étudier les conséquences du nouveau modèle atomique imaginé par le grand physicien. La représentation planétaire est, certes, très astucieuse, mais elle présente tout de même une anomalie. En effet, selon les lois de la physique classique, les électrons, non soumis à une accélération, celle de la force centrifuge, devraient rayonner des ondes électromagnétiques tout au long de leur pérégrination autour du noyau et, du même coup, perdre de l'énergie. Un calcul facile montre même que toute l'énergie d'un électron devrait être dissipée sous forme de rayonnement lumineux en moins d'un cent millionième de seconde, cette dissipation entraînant la chute de l'électron sur le noyau et la fin de

l'atome. Or, il ne se passe rien de semblable dans la réalité : les électrons en tournant engendrent un champ magnétique mais n'émettent aucun rayonnement, et les atomes sont quasi éternels.

Fort intrigué par cette contradiction, tout en demeurant persuadé que le modèle planétaire de Rutherford est beaucoup plus proche de la vérité que le modèle de Thomson, Niels Bohr subodore que la clé du problème se trouve dans une remise en question des règles de la physique classique. Résumant son sentiment de l'époque, il écrira plus tard<sup>(3)</sup> : « La faillite des théories de la physique classique à rendre compte des phénomènes atomiques s'accroît encore avec le progrès de nos connaissances sur la structure des atomes. Par-dessus tout, la découverte par Rutherford du noyau atomique révéla aussitôt combien les concepts de la mécanique et de l'électromagnétisme classiques étaient impropres à exprimer la stabilité inhérente à l'atome. »

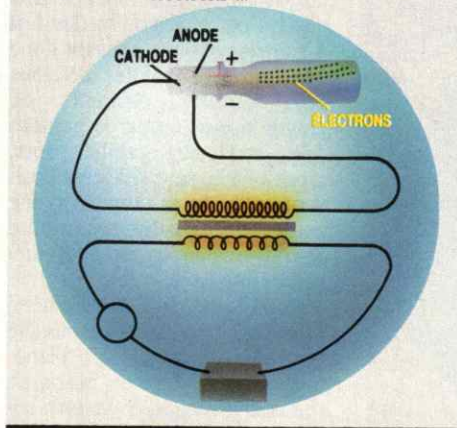
Sur le fond, l'intime conviction de Bohr n'a pas varié depuis les empoignades qu'il a eues avec J.J. Thomson. Il pense toujours que si l'énergie électromagnétique est quantifiée, comme l'ont démontré Planck et Einstein, l'énergie mécanique (énergie cinétique et moment cinétique des particules) doit l'être, elle aussi, sous une forme ou sous une autre. En effet quand un atome excité émet un quantum de lumière d'énergie  $h\nu$  ( $\nu$  étant la fréquence de l'onde, et  $h$  la constante de Planck, soit  $6,626\ 176 \cdot 10^{-34}$  joule.seconde), l'énergie mécanique de cet atome doit décroître exactement de la même quantité. D'autre part, comme les spectres atomiques sont formés par des raies distinctes bien définies, les différences d'énergie entre les divers états possibles d'un atome doivent prendre, elles aussi, des valeurs bien définies. En somme, le mécanisme atomique serait comparable à la boîte de vitesse d'une automobile : celle-ci peut

## 5. LES PARTICULES DE L'ÉLECTRICITÉ

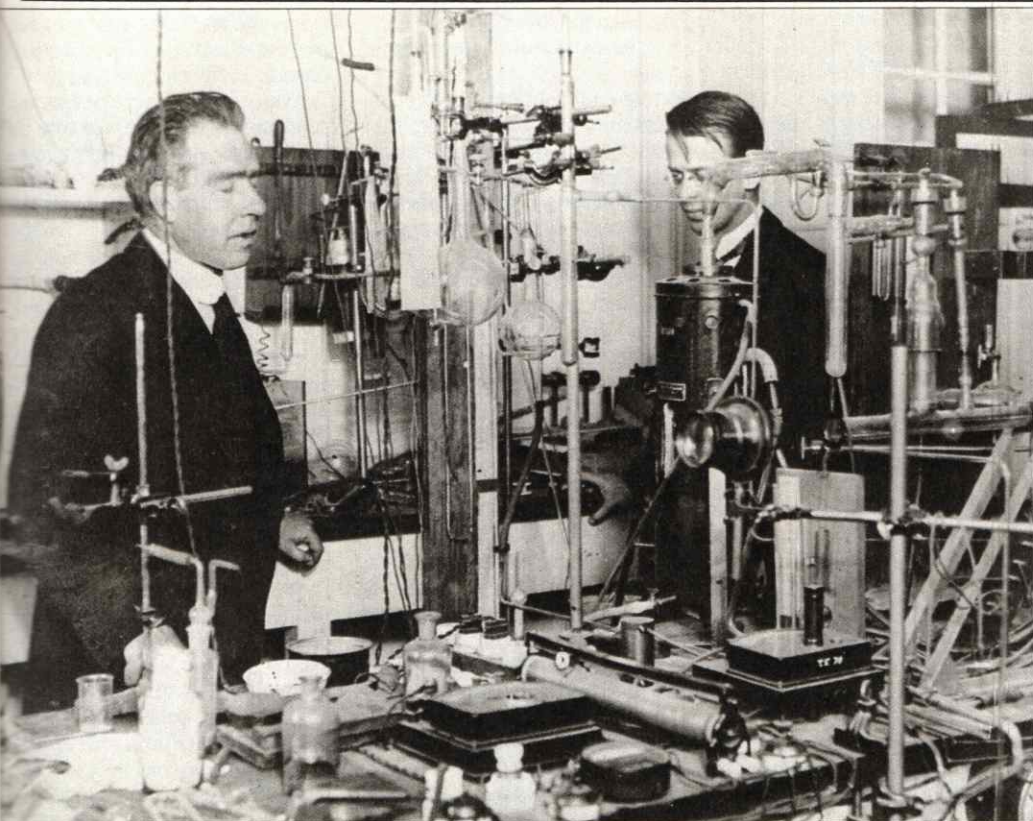


Thomson

...Et les rayons cathodiques ? Ils continuaient d'intriguer les physiciens et en particulier l'Anglais J.J. Thomson. En 1897, dans son laboratoire de Cambridge, il découvrit que ces fameux rayons étaient déviés par un champ magnétique. Le sens de la déviation indiquait qu'il s'agissait de particules négatives, qu'il baptisa "électrons"...



Bohr obtient des aides financières qui permettent à de jeunes physiciens de venir travailler dans son laboratoire.



fonctionner en première vitesse, en seconde, en troisième, etc., mais jamais en première et demie ou en troisième trois quarts.

Ces notions, tout à fait nouvelles pour l'époque, ne suscitent pas chez Rutherford l'hostilité qu'elles avaient fait naître chez Thomson. Même s'il n'y souscrit pas entièrement, l'éminent physicien de Manchester les écoute d'une oreille attentive, voire bienveillante. Pour la plus grande satisfaction de Niels Bohr, qui voit dans cette attitude conciliante un encouragement à poursuivre ses recherches.

Bohr ne reste que quelques mois à Manchester, sa bourse arrivant à expiration. En dehors de son travail spéculatif, il y réalise quelques expériences sur la radioactivité. En été 1912, il regagne sa ville natale, Copenhague, et, le 1<sup>er</sup> août, y épouse Margrethe Norlund. Bohr lui attribuera plus tard le mérite d'avoir élevé leurs enfants, dé-

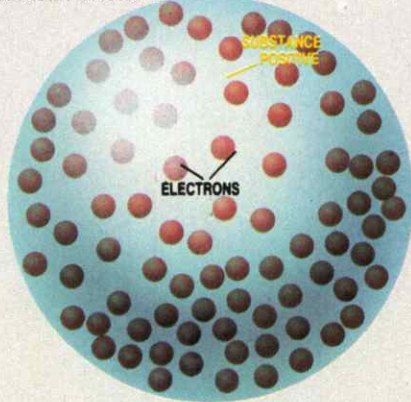
clarant que, pour sa part, il s'était borné à « formuler une ou deux observations en relisant les épreuves » (4).

Après un voyage de noces en Angleterre et en Ecosse, Niels Bohr obtient un poste de maître de conférence à l'université de Copenhague. Mais, la plupart du temps, il s'enferme chez lui et consacre ses journées à développer et à mettre en forme ses idées sur la structure atomique. Il en résulte, en 1913, un mémoire intitulé *De la constitution des atomes et des molécules*, véritable acte de naissance de la physique moderne.

En effet, cette œuvre d'un jeune universitaire de 28 ans est l'un des textes les plus importants de l'Histoire de la physique. Partant du modèle atomique de Rutherford et s'inspirant directement des conceptions de Planck et d'Einstein, Niels Bohr explique la stabilité des structures atomiques au moyen de deux postulats, qu'il appelle

## 6. L'ATOME SE DIVISE

...D'où provenaient ces électrons ? Thomson abattit allégrement une vieille idée de la physique ; en 1898, il suggéra que les atomes n'étaient pas "insécables" mais formés d'une sorte de pâte positive fourrée de "pépins" négatifs : les fameux électrons formant les rayons cathodiques. La matière et la lumière avaient-elles livré tous leurs secrets ?...



(4) Jorgen Kalckar: *Niels Bohr: un aperçu de sa vie et de son œuvre*, dans la revue *Impact* n° 137.



les "postulats quantiques":

1° Dans l'atome, du fait que l'énergie, selon Planck, est quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne peut avoir que certaines valeurs bien précises, les électrons qui tournent autour du noyau ne peuvent occuper que certaines orbites également bien précises. En particulier, il existe une orbite minimale au-dessous de laquelle un électron ne peut tomber. Quand les électrons occupent une de ces configurations stables, l'atome se trouve dans un "état stationnaire", et il ne se produit alors aucun rayonnement.

2° Dans certaines conditions, les électrons sont susceptibles de monter, par une transition brusque, d'une orbite inférieure à une orbite supérieure, ou au contraire, de descendre d'une orbite supérieure à une orbite inférieure. L'atome passe alors d'un état stationnaire à un autre

état stationnaire. Quand un électron descend sur une orbite inférieure, il perd de l'énergie, et l'atome qui contient cet électron émet un "quantum de lumière" (un photon) qui emporte toute cette énergie. D'après la loi de conservation de l'énergie, l'énergie de ce photon est égale à la différence entre l'énergie que possédait l'électron à son niveau supérieur et celle qu'il a à son niveau inférieur. Autrement dit, la fréquence du rayonnement est égale au quotient par la constante de Planck de la différence entre les deux niveaux d'énergie, soit :

$$\nu = (E_m - E_n)/h$$

( $\nu$  étant la fréquence,  $h$  la constante de Planck,  $E_m$  le niveau supérieur d'énergie, et  $E_n$  le niveau inférieur). A l'inverse, pour qu'un électron saute sur une orbite supérieure, il faut qu'il absorbe un "quantum de lumière" dont l'énergie soit égale

au supplément d'énergie que présente le niveau supérieur par rapport au niveau inférieur.

Ayant achevé la rédaction de son mémoire, Bohr l'envoie à Rutherford pour solliciter son avis. Le physicien anglais, quoi qu'il soit très intéressé, se montre quelque peu réticent : l'originalité, pour ne pas dire l'audace de la démarche intellectuelle du Danois heurte ses convictions profondes et son attachement à la physique classique. S'engage alors, par correspondance, une discussion passionnée. Bohr, qui pense que rien ne vaut le contact direct, finit par se rendre à Manchester pour mieux défendre sa thèse. Là, tant par la persuasion que par la sagacité de ses arguments, il finit par emporter l'adhésion de son maître. Rutherford, conquis, confie à son entourage : « Ce jeune homme est l'être le plus intelligent que j'aie connu ! »

A son retour au Danemark, Bohr n'est plus un jeune savant qui travaille en solitaire : il est désormais le chef de file d'une orientation nouvelle de la physique. Grâce à une prodigieuse intuition, mise en valeur par une faculté de raisonnement hors pair, il a construit un modèle atomique qui, pour la première fois, est en accord avec les données expérimentales. Car sa théorie n'est pas seulement une séduisante construction intellectuelle, elle rend compte de toute une série de phénomènes jusqu'alors inexplicables. L'origine et la nature des spectres atomiques, par exemple, deviennent tout à coup "lumineuses" : si les atomes émettent des raies spectrales, c'est parce que leurs électrons, chaque fois qu'ils passent d'une orbite haute à une orbite plus basse, émettent des photons.

Pour sa démonstration, Bohr choisit l'atome le plus simple, celui d'hydrogène, qui est constitué d'un proton autour duquel gravite un seul électron. Cet électron, étant unique, est libre d'occuper n'importe quel état d'énergie possible. En l'absence d'excitation extérieure, il occupe

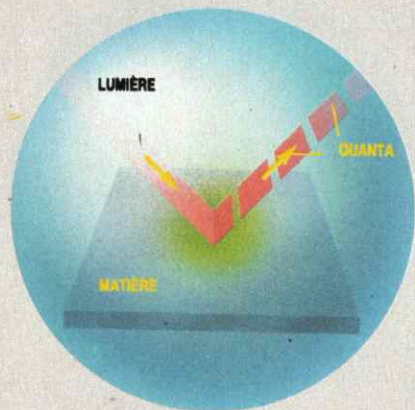
## 7. UNE HYPOTHÈSE DÉRAISONNABLE



Planck

...Presque, pensait-on à l'époque ; si l'on exceptait justement les interactions rayonnement-matière. Comment en effet expliquer le rayonnement émis par un corps chauffé (le fer chauffé devient rouge à 600°, puis blanc à 2.000°). Il faut, dirent lord Rayleigh et sir James Jeans, appliquer au rayonnement le principe d'équipartition de l'énergie qui a si bien expliqué les gaz : dans un gaz, les collisions entre molécules ralentissent les molécules rapides et accélèrent les molécules lentes jusqu'à ce que l'énergie soit distribuée unifor-

mément. Mais l'analogie ne tenait pas : dans une enceinte, le nombre des molécules d'un gaz est toujours fini alors que le nombre de vibrations électromagnétiques est infini. La formule de Rayleigh-Jeans impliquait que toute matière chauffée émettrait très rapidement du rayonnement ultraviolet ou X. Ce n'est heureusement pas le cas, mais personne ne savait expliquer pourquoi, jusqu'à ce que Max Planck propose, en 1900, une explication : les échanges d'énergie entre lumière et matière se font par paquets, les quanta ; chaque paquet contenant une énergie proportionnelle à la fréquence du rayonnement. Il résolvait ainsi le problème de Rayleigh-Jeans, mais à quel prix ! Jusque-là, en physique, on considérait que les échanges d'énergie pouvaient se produire d'une manière continue, avec des quantités aussi petites que l'on voulait. Or Planck affirmait en quelque sorte qu'un homme ne peut avancer que par enjambées d'au moins 20 cm, qu'il est incapable de faire des pas plus petits, et que, s'il fait des pas plus grands, ils sont toujours un multiple de l'enjambée minimale. L'hypothèse des quanta allait avoir du mal à s'imposer...



naturellement l'état énergétique le plus bas, le plus proche du noyau. Par contre, si, par une excitation quelconque (décharge électrique, échauffement, etc.), il est élevé jusqu'à son niveau de plus haute énergie, il retombera par paliers jusqu'à l'état inférieur primitif, en émettant à chaque palier un photon. Ce sont ces photons qui constitueront les diverses raies du spectre de l'hydrogène.

A partir de la masse de l'électron, de son unité élémentaire de charge électrique et de la constante de Planck, Bohr montre que l'on peut calculer avec précision l'énergie de chaque état stationnaire, autrement dit les différentes orbites permises à l'électron. Or, connaissant ces orbites et sachant les différents niveaux d'énergie qu'elles représentent, on peut aussi évaluer la quantité d'énergie que perd l'électron lorsqu'il descend d'une orbite haute à une basse. Ces déperditions d'énergie se traduisant chaque fois par l'émission d'un photon, on connaît automatiquement l'énergie de chacun de ces photons, c'est-à-dire leur fréquence, et l'on peut donc prévoir très exactement le spectre émis par un atome d'hydrogène qui se désexcite.

**E**t, de ce fait, ça marche ! Le spectre lumineux de l'hydrogène que Bohr détermine ainsi par le calcul correspond parfaitement au spectre observé expérimentalement. Mieux : le physicien anglais Moseley, appliquant la méthode de Bohr à d'autres atomes, et comparant les résultats obtenus avec les données que lui fournit son spectromètre, confirme l'accord entre l'expérience et la théorie établie par le Danois.

En corollaire, Bohr démontre qu'il est possible, à partir de l'étude du spectre, et plus particulièrement des longueurs d'onde des raies spectrales, de calculer les niveaux d'énergie de l'atome. Ce qu'il exprime de la

façon suivante : « La découverte du quantum d'action nous a appris que toute variation de l'énergie d'un atome ou d'une molécule doit être considérée comme un processus élémentaire qui fait passer cet atome ou cette molécule d'un état stationnaire à un autre. Lorsqu'un de ces passages s'accompagne de l'émission ou de l'absorption de lumière, il apparaît ou disparaît exactement un quantum de lumière, ce qui nous permet, à l'aide d'observations spectroscopiques, de mesurer directement l'énergie de ces états stationnaires. »

D'ores et déjà une conclusion s'impose : si la lumière émise par les atomes est quantifiée, c'est parce que la structure desdits atomes est elle-même quantique.

D'autres physiciens ne vont pas tarder à s'emparer de la doctrine de Bohr et à la développer. L'Allemand Sommerfeld, en particulier, établira une théorie des raies spectrales plus détaillée que celle de Bohr, rendant compte notamment de l'effet Zeeman et de l'effet Stark (décomposition des raies spectrales émises par un atome quand on soumet celui-ci soit à un champ magnétique, soit à un champ électrique).

Bohr lui-même perfectionnera son modèle atomique, en accentuant la puissance explicative. Il démontrera, entre autres, que les propriétés physico-chimiques des éléments sont le reflet des propriétés des électrons périphériques, et associera la périodicité du tableau de Mendeleïev à la disposition caractéristique des électrons en couches successives autour du noyau.

Le plus remarquable demeure toutefois qu'avec les quelques rudiments de théorie quantique connus à l'époque, il ait réussi à résoudre le problème de la structure atomique. Einstein, admiratif, écrira dans ses *Notes autobiographiques* : « Que cette base si fragile et contradictoire ait suffi à Bohr, à son instinct et sa sensibilité extraordinaires, pour découvrir les lois

## 8. LES ÉMISSIONS RADIOACTIVES

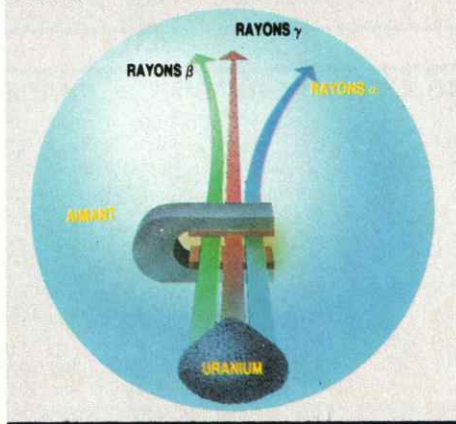
...Les rayons uraniques avaient fasciné le monde de la physique. Entre 1898 et 1902, Marie et Pierre Curie avaient découvert et étudié d'autres substances analogues (polonium et radium). Ils avaient en particulier constaté que, contrairement aux rayons X, les rayons uraniques étaient déviés par un champ magnétique. Ernest Rutherford avait, lui aussi, réalisé cette expérience et constaté que les rayons uraniques étaient au nombre de trois ; il les baptisa alpha, bêta et gamma. Les rayons alpha (positifs) étaient déviés en sens inverse des rayons bêta (négatifs). Les rayons gamma étaient électriquement neutres...



Pierre



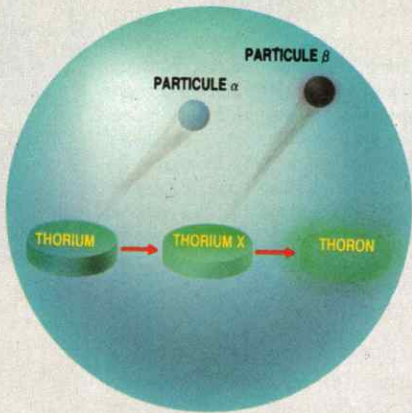
et Marie Curie



fondamentales des raies spectrales et de la structure électronique des atomes, en expliquant leur signification pour la chimie, voilà qui, pour moi, tenait du miracle et m'apparaît encore aujourd'hui tenir du miracle. C'est la plus belle manifestation de musicalité qu'on puisse imaginer dans le domaine de la pensée. » On ne peut rêver plus beau compliment !

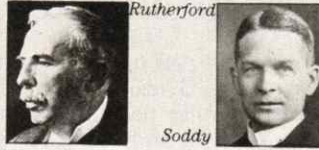
Après deux nouvelles années passées à Manchester, Niels Bohr rentre au Danemark en avril 1916 : l'université de Copenhague lui a offert la chaire de physique théorique, spécialement créée à son intention. Le voilà professeur d'université à trente et un ans ! Si cette promotion le ravit, il s'aperçoit bien vite que la rose n'est pas sans épines.

## 9. LES ALCHEMISTES N'AVAIENT PAS TORT



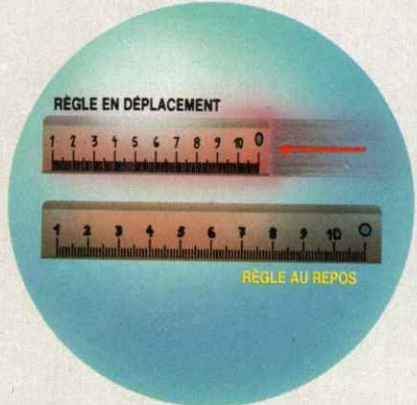
...Y avait-il un rapport avec la constitution des atomes ? Rutherford et un jeune chimiste, Frédéric Soddy,

mirent au point une expérience qui allait le démontrer : ils constatèrent qu'un échantillon de thorium émettait des particules alpha en se transformant en une autre substance, le thorium X, laquelle émettait des particules bêta en se transformant en thoron. C'était l'explication de la radioactivité dans laquelle un atome se transforme en un autre atome. Quant à la nature des alpha et des bêta, Rutherford découvrit un peu plus tard que les premiers étaient des noyaux d'hélium et les seconds des électrons...



## 10. LE TEMPS REJOINT L'ESPACE

...Le physicien Lorentz avait montré que tous les corps animés d'un mouvement rectiligne et uniforme doivent subir une contraction dans le sens de leur mouvement (contraction notable à des vitesses proches de celle de la lumière). Là-dessus, l'expérience de Michelson et Morley avait prouvé que la vitesse de la lumière ne dépend pas du mouvement de la source lumineuse ou du récepteur. Einstein, en 1905, allait donner toute leur portée à ces idées, base de la relativité restreinte : il montra qu'il n'existe pas de simultanéité absolue entre deux événements (puisque aucun signal ne va plus vite que la lumière). Avec lui la notion de temps absolu disparaissait au profit de celle d'espace-temps...



Les tâches d'enseignement lui prennent beaucoup de temps et, surtout, l'université ne possède ni laboratoire ni matériel d'expérimentation adaptés à ses recherches. Au fond de lui-même, il lui arrive de regretter les jours heureux de Manchester, où, dans une ambiance stimulante, en compagnie d'autres physiciens venus de tous les horizons, et sous la conduite d'un animateur enthousiaste, il pouvait donner libre cours à son génie créatif.

Cette nostalgie transparaît dans une de ses lettres qu'il adresse à l'époque à Rutherford : « Je pense très souvent, écrit-il, à tout ce que j'ai appris pendant mon séjour à Manchester, non seulement par vos conseils, mais aussi par l'expérience que j'y ai acquise, et j'essaie de diverses manières d'introduire les méthodes anglaises dans mon travail à l'université. »

Au début de l'année 1917, Bohr suggère aux autorités universitaires de créer un petit institut de physique théorique, doté du matériel adéquat, où, comme à Manchester, des chercheurs venus du monde entier pourraient confronter leurs connaissances, échanger leurs idées et, du même coup, faire progresser la physique. Cette proposition est immédiatement soutenue par

l'Académie royale des sciences du Danemark et par la fondation Carlsberg. D'autre part, se constitue un cercle des amis de Bohr, composé à la fois d'intellectuels et d'hommes d'affaires, qui lance une souscription et recueille en quelques semaines les fonds nécessaires à l'achat d'un terrain.

La construction du bâtiment débute en novembre 1918, mais elle est bientôt entravée par une série de grèves, nées des difficultés économiques que connaît le Danemark en ces lendemains de guerre. Si bien que l'Institut de physique théorique, aussitôt dénommé Institut Niels-Bohr, n'est inauguré que le 3 mars 1921.

Parmi les premiers invités, figurent Ernest Rutherford, qui a pris la succession de J.J. Thomson au laboratoire Cavendish de Cambridge, Arnold Sommerfeld (déjà cité) et le physicien hongrois George de Hevesy, un vieil ami de Bohr, rencontré à Manchester et qui passera six ans à l'Institut, où il découvrira, en collaboration avec le Hollandais Dirk Coster, l'élément 72, baptisé "hafnium" d'après l'ancien nom latin de Copenhague (*Hafnia*).

Mais Bohr n'invite pas à son Institut que des gens célèbres. Grâce à l'aide financière qu'il a pu obtenir de la fondation Rask-Orsted, il offre des bourses à de jeunes physiciens en début de carrière, qui peuvent ainsi travailler sous sa houlette pendant un ou deux ans. D'autres viendront pour des périodes brèves, mais n'en recevront pas moins une aide financière. Ce sera le cas, par exemple, de trois futurs prix Nobel : l'Allemand Max Born, l'Anglais Owen Richardson et l'Autrichien Erwin Schrödinger.

Le succès de l'Institut est tel que rapidement il ne peut plus satisfaire à la demande. Outre le contingent des physiciens danois, le nombre des étrangers qui y séjournent passe de cinq en 1921 à treize en 1924. La place manque cruellement dans ce petit bâtiment de trois étages,

En bon  
Scandinave,  
Bohr ne  
dédaigne  
pas le sport.



dont l'entresol et le premier son occupés par le laboratoire, les ateliers et les bureaux, le reste étant réservé, selon la tradition universitaire danoise, au logement de Bohr et de sa famille.

Vu la situation économique du pays, inutile d'espérer des crédits publics pour agrandir les lieux. En désespoir de cause, Bohr se tourne vers les Etats-Unis et demande une subvention à l'International Education Board. Sur sa réputation et celle de son Institut, il obtient quarante mille dollars. Avec cet argent seront édifiés, en 1926, une résidence séparée pour lui et les siens, et un laboratoire annexe placé à l'arrière du premier bâtiment.

Entre 1921 et 1930, soixante-trois physiciens, de dix-sept nationalités différentes, viendront travailler au numéro 17 de la Blegdamsvej, c'est-à-dire à l'Ins-

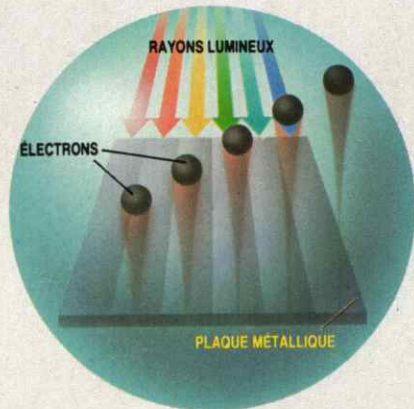
## 11. LA RÉVOLUTION DES PHOTONS

...Toujours en 1905, Einstein résolut une énigme qui, plus encore que la relativité, allait bouleverser la physique: Hertz avait observé que la lumière ultraviolette avait la propriété d'extraire des électrons de la surface d'une plaque de métal. Mais la vitesse, donc l'énergie cinétique de ces électrons, variait non pas avec l'intensité du rayonnement incident, mais avec sa longueur d'onde. En particulier, au-delà d'une certaine longueur d'onde, aucun électron n'était arraché. Il y avait là un mystère qu'Einstein expliqua en utilisant l'hypothèse de Planck: il supposa qu'une lumière monochromatique est formée de myriades de corpuscules porteurs d'un même quantum d'énergie. Quand l'un de ces corpuscules, qu'il baptisa photons, frappe la plaque métallique, il communique son quantum d'énergie à un électron, lequel en dépense une partie pour

s'arracher à l'attraction de son noyau et transforme le reste en énergie cinétique. Chaque quantum d'énergie est proportionnel à la fréquence (inverse de la longueur d'onde) de la radiation...

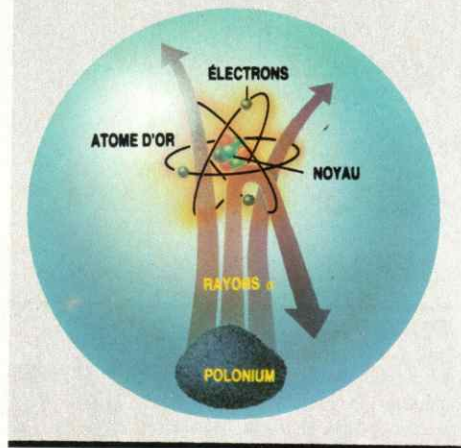


Einstein



## 12. L'ATOME COMME UN SYSTÈME SOLAIRE

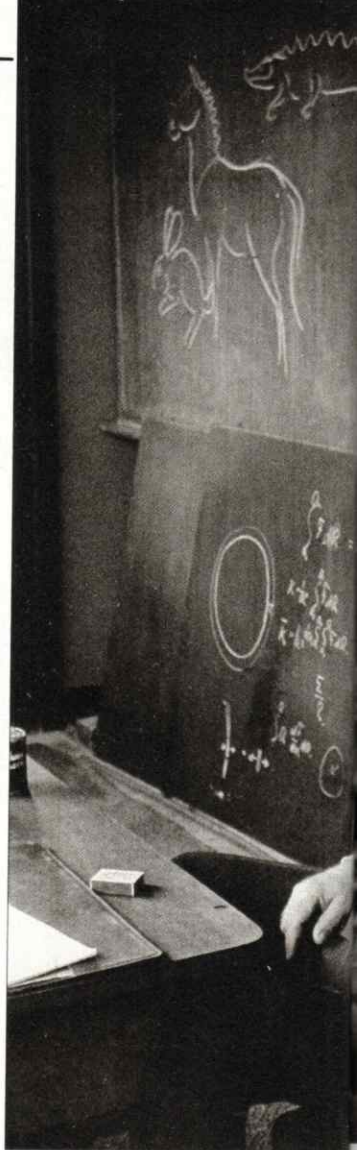
...La théorie de la radioactivité conduisit Rutherford à étudier la structure interne de l'atome. En envoyant des particules alpha sur une mince feuille d'or, il constata que, si la plupart des particules traversaient la feuille, certaines étaient soit déviées, soit réfléchies. Pour Rutherford ces déviations ne pouvaient s'expliquer que si la masse et la charge électrique positive, contrairement au modèle de Thomson, étaient concentrées dans un très faible volume. Cette hypothèse lui permit d'établir un nouveau modèle d'atome dans lequel toute la charge positive et la majeure partie de la masse seraient concentrées dans un noyau central 10 000 fois plus petit que le diamètre atomique; comme les planètes autour du Soleil, les électrons graviteraient autour du noyau...



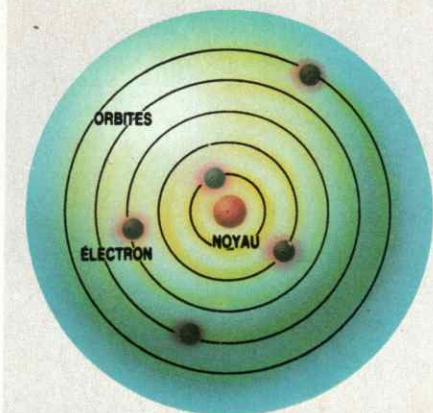
titut Niels-Bohr. Pour obtenir cette faveur, ils n'ont pas eu besoin de passer un examen ni d'étaler leurs diplômes: il a suffi que, par leurs travaux, leur enthousiasme ou leur tournure d'esprit, ils aient séduit le maître des lieux. Écoutons l'un d'entre eux, le physicien russe George Gamow, raconter la façon dont il a été "engagé":

«Après mes examens généraux à l'université de Leningrad, au printemps 1928, j'avais obtenu du gouvernement soviétique l'autorisation de passer deux mois à l'école d'été de l'université de Göttingen, en Allemagne. A la fin de ce stage estival, j'avais épuisé tout mon argent et je devais rentrer. Je décidai de faire un crochet par Copenhague afin de rencontrer le Pr Bohr, dont j'admirais les travaux.

«A Copenhague, je pris une chambre dans un petit hôtel minable et me rendis à l'Institut pour voir la secrétaire de M. Bohr, M<sup>lle</sup> Schultz, et obtenir un rendez-vous avec le célèbre physicien. Elle me dit que le professeur pouvait me recevoir l'après-midi même. Quand j'entrai dans son bureau, je trouvais un homme d'une quarantaine d'années, aimable et souriant, qui me demanda à quelle partie de la physique je m'intéressais et à quoi je travaillais. Je lui parlai de mes recherches sur les transformations nucléaires. Après m'avoir



## 13. LES QUANTA ENTRENT DANS L'ATOME



...L'atome de Rutherford avait un grave défaut. Les électrons comme toute charge électrique en rotation auraient dû émettre du rayonnement, donc perdre leur énergie et tomber sur le noyau. Pour éliminer cette contradiction, Niels Bohr, en 1913, introduisit les hypothèses de Planck et d'Einstein dans son modèle atomique: un électron ne peut décrire que certaines orbites et alors il n'émet aucun rayonnement. Ce n'est qu'en "sautant" d'une orbite à l'autre qu'il émet (s'il descend), ou absorbe (s'il monte) un photon d'énergie égale à la différence entre les deux niveaux...

attentivement écouté, il me dit: «Très intéressant, vraiment très intéressant. Combien de temps restez-vous ici?» Je lui expliquai que j'avais juste assez d'argent pour une journée encore. «Mais pourriez-vous, me demanda-t-il, rester un an si je vous procurais une bourse de notre Académie des sciences?» Le souffle coupé, je finis par bredouiller: «Oui, je le pourrais.» Alors, tout alla très vite. M<sup>lle</sup> Schultz me trouva une belle chambre dans une pension tenue par M<sup>lle</sup> Have, non loin de l'Institut, et, dès le lendemain matin, je travaillais aux côtés de M. Bohr<sup>(5)</sup>. »



uniforme font irruption dans la salle et, s'approchant de Bohr, lui jettent à la figure : « Professeur, vous êtes accusé de rapt d'enfant, nous vous arrêtons ! » Bien sûr, il ne s'agissait que d'un "canular" : les deux policiers étaient des étudiants déguisés qui se vengeaient ainsi de la désinvolture avec laquelle Bohr avait "débauché" un des meilleurs éléments de leur université.

La liste de ceux qui ont passé un an ou davantage à l'Institut est proprement impressionnante. On y trouve la plupart des hommes qui ont révolutionné la physique entre 1920 et 1940 : les Allemands Max Delbrück et Werner Heisenberg ; l'Autrichien Wolfgang Pauli ; le Belge Léon Rosenfeld ; les Américains J.R. Oppenheimer, J.C. Slater et R.C. Tolman ; le Norvégien Sven Roseland ; le Suédois Oscar Klein ; le Japonais Nishina ; les Néerlandais Hendryk Casimir et Hendryk Kramers ; les Britanniques Paul-Adrien Dirac et Neville Mott ; les Soviétiques George Gamow et Lev Landau.

Les méthodes de travail à l'Institut sont on ne peut plus libérales. Dès leur arrivée, les nouveaux venus reçoivent la clef de leur bureau et celle de la porte d'entrée du bâtiment. Chacun peut ainsi faire ce qu'il veut, aller travailler ou rentrer chez lui à sa guise. L'Institut organise simplement quelques cours réguliers et des séminaires hebdomadaires au cours desquels des physiciens venus des principaux laboratoires du monde exposent leurs travaux les plus récents.

Véritable ruche où ne bourdonnent que de brillants sujets, l'Institut devient rapidement le centre du monde de la physique quantique. Là s'épanouira une génération de nouveaux physiciens, qui tous seront fiers plus tard de pouvoir dire : j'ai travaillé avec Bohr. Là naîtra le fameux *Kopenhagener Geist* (l'esprit de Copenhague) qui marquera d'une empreinte profonde, et pour des décennies, toute la physique atomique.

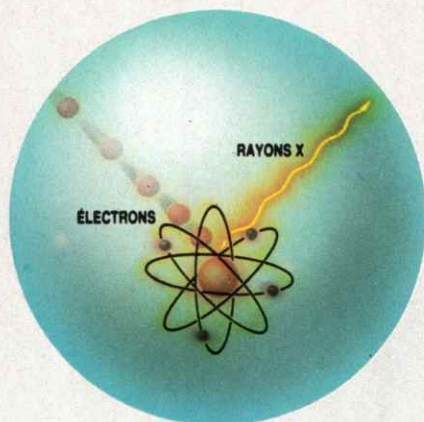
Les circonstances dans lesquelles Werner Heisenberg fut invité à l'Institut sont encore plus pittoresques. Passant à l'université de Göttingen, Niels Bohr y remarque le jeune physicien allemand, dont les travaux commencent à être connus (c'est lui qui, le premier, donnera une formulation mathématique cohérente à la théorie quantique). Il lui propose tout de go de venir travailler avec lui à Copenhague. Belle promotion pour ce jeune homme de vingt-cinq ans, au visage d'adolescent. Le lendemain, lors du dîner donné à l'université en l'honneur du célèbre Danois, deux policiers en

## 14. NIELS BOHR AVAIT RAISON...

...Hypothèse que confirmera quelques mois plus tard l'expérience de l'Anglais Moseley : en bombardant différents éléments avec des électrons de haute énergie, celui-ci constata une émission de rayons X dont les fréquences étaient liées aux différences d'énergie entre les orbites électroniques...



Moseley

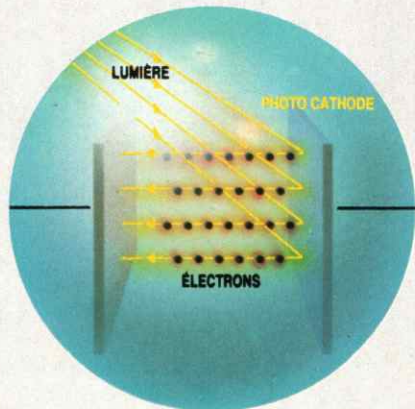


## 15. ... EINSTEIN AUSSI

...En 1915, le physicien R.A. Millikan étudia expérimentalement l'effet photoélectrique. D'après Einstein, un électron, en recevant de l'énergie lumineuse, pouvait être extrait d'une plaque métallique. Son énergie cinétique serait alors liée à la fréquence de la lumière incidente par l'intermédiaire d'une constante, découverte par Planck. Millikan mesura le rapport de cette constante de Planck sur la charge électrique et vérifia que la valeur trouvée s'accordait avec la relation d'Einstein...



Millikan

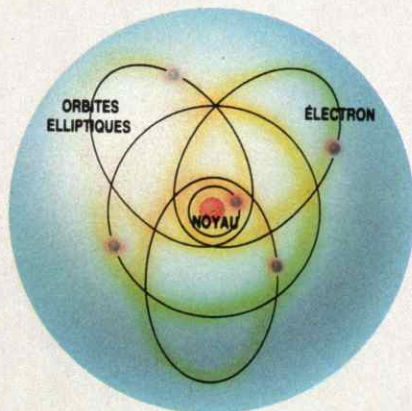


## 16. DES ÉLECTRONS RELATIVISTES



Sommerfeld

...Raffinant le modèle de Bohr, Sommerfeld prend en compte les effets des champs électrique et magnétique sur les orbites électroniques. Il "permet" pour cela aux électrons des trajectoires plus variées (orbites elliptiques) soumises de surcroît aux lois de la relativité restreinte...



## 17. UN SOLEIL COURBE LA LUMIÈRE

...Ces lois, Einstein va les incorporer dans une théorie beaucoup plus vaste, la théorie de la relativité générale : extension du principe de relativité restreinte aux systèmes accélérés d'une part, théorie du champ de gravitation d'autre part. D'après Einstein, un rayon lumineux doit subir dans un champ de gravitation (créé par tout corps massif) une courbure analogue à celle que doit subir la trajectoire d'un corps lancé dans ce même champ...



Entièrement accaparé par la direction de son Institut et la poursuite de ses travaux, profondément attaché aussi à la culture et au mode de vie danois, Bohr résiste sans peine aux chants des sirènes : il refuse des chaires prestigieuses que lui proposent Berlin, Cambridge ou les États-Unis, postes généralement assortis d'appointments substantiels et de conditions de recherche nettement supérieures à celles dont il dispose chez lui. Néanmoins, convaincu de l'utilité de la collaboration internationale pour les progrès de la science, et soucieux de lier des relations avec les chercheurs de tous les pays, il acceptera toujours de donner des conférences à l'étranger. Certaines, à Göttingen notamment, seront si prisées que les étudiants les baptiseront, avec quelque irrévérence, les "festivals Bohr".

En 1922, Niels Bohr connaît la grande consécration, tant auprès de ses pairs que dans l'opinion publique, en se voyant attribuer le prix Nobel de physique. Il a trente-sept ans ! Victime d'une de ces distractions que l'on prête volontiers aux scientifiques, il oublie à son hôtel, le jour de la cérémonie officielle, le discours de réception qu'il avait soigneusement préparé. Il s'en tire en improvisant devant la docte assemblée.

Malgré la diversité de ses occupations et de ses charges, Bohr n'a jamais cessé, depuis son célèbre mémoire de 1913, de compléter et de perfectionner sa théorie atomique.

Ses deux principales découvertes — les états stationnaires et les transitions quantiques —, si elles expliquent parfaitement le phénomène des raies spectrales, laissent cependant bon nombre de questions en suspens. C'est pourquoi, au cours des années 20, il s'attachera surtout à résoudre certains problèmes pratiques de la physique quantique. De cette époque datent la formulation du principe de correspondance, celle du principe de complémentarité, ainsi que le célèbre débat qui l'a opposé à

Albert Einstein.

Énoncé par Bohr pour la première fois en 1916, précisé par la suite, revu et corrigé en 1927 par le physicien autrichien Paul Ehrenfest, le principe de correspondance a pour ambition de jeter un pont entre les phénomènes discontinus de la microphysique (par exemple la désintégration), tels que les décrit la physique quantique, et les phénomènes d'apparence continue de l'échelle macroscopique (par exemple la combustion), dont la physique classique fournit une bonne interprétation. En d'autres termes, Bohr cherche à établir un lien entre la description classique et



la description quantique.

Ce lien, il le trouvera dans les situations extrêmes. Par exemple, dans les phénomènes où interviennent un très grand nombre de particules, la théorie quantique conduit aux mêmes résultats que la physique classique. Ou bien, aux plus grandes orbites quantiques correspond un rayonnement de l'électron qui se rapproche beaucoup du rayonnement de type classique. En clair, cela signifie que, si l'on s'en tient aux phénomènes à notre échelle, la physique classique demeure un moyen d'investigation satisfaisant, mais que, si l'on descend dans le cœur de l'atome, il faut obligatoirement

changer d'optique et chausser des lunettes quantiques. En fait, cette apparente concession dissimule une pure et simple annexion de la physique classique par la physique quantique, la première n'étant plus considérée que comme un cas limite de la seconde.

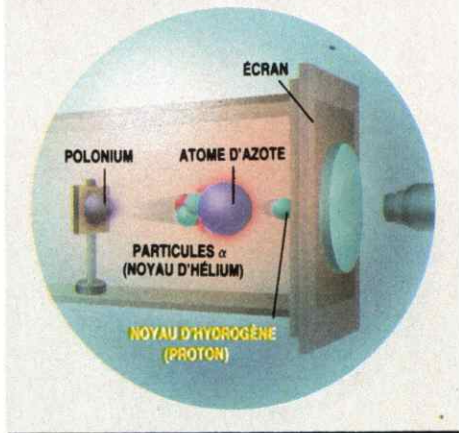
Le principe de complémentarité, lui, a été formulé par Bohr, en 1927, pour mettre fin au dualisme onde-corpuscule. En effet le formalisme mathématique de la théorie quantique permet deux représentations simultanées de l'électron, l'une sous forme d'onde, l'autre sous forme de corpuscule, représentations qui, de surcroît, en bonne physique classique, s'excluent l'une l'autre (une particule est un objet concret, qui occupe une place définie dans l'espace et dans le temps ; une onde est une représentation abstraite, qui varie sans cesse dans l'espace et dans le temps). Bref, pour les physiciens de l'époque, il y avait là quelques chose qui heurtait le sens commun.

Pour Bohr, la contradiction est purement formelle : elle provient du fait que le langage de la physique classique n'est pas apte à décrire la réalité fondamentalement différente de la physique quantique. Dans le monde de l'atome, des représentations aussi différentes que l'onde et le corpuscule ne sont pas antinomiques, mais "complémentaires". Quel sens Bohr donne-t-il à ce terme ? Écoutons-le : « Des informations obtenues sur le comportement d'un seul et même objet atomique, informations s'excluant mutuellement, peuvent néanmoins être dites complémentaires. En effet, bien qu'il soit impossible de les rassembler en une image unique décrite à l'aide des concepts de la vie journalière, elles représentent chacun des aspects également essentiels de ce que l'on peut apprendre sur l'objet en question. »

En résumé, l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire sont deux représentations "complémentaires" d'une seule et même

## 18. DANS LE NOYAU IL Y A DES PROTONS

...Sans se préoccuper outre mesure des vagues provoquées par les théories de la relativité générale et des quanta, Rutherford continue obstinément son travail sur la structure de l'atome : en 1920, il observe que le bombardement d'atomes d'azote par des particules alpha donne naissance à des noyaux d'hydrogène qu'il baptisa protons : c'était la première transmutation artificielle ; d'un atome, il avait extrait un autre atome...



réalité. Un être physique unique peut nous apparaître tantôt sous forme de corpuscule (quand, par exemple, il provoque une scintillation sur un écran fluorescent), tantôt sous forme d'onde (quand, par exemple, nous observons les franges d'interférences<sup>(6)</sup> produites par un flux d'électrons). Cela dépend en fait de la manière dont nous le regardons, c'est-à-dire des instruments avec lesquels nous l'étudions.

Conclusion : cela n'a pas de sens de parler des propriétés physiques d'un objet quantique sans spécifier très précisément le dispositif expérimental avec lequel nous l'analysons. En conséquence, la réalité quantique est en partie une réalité créée par l'observation. C'est ce que traduit la remarque du physicien John Wheeler : « Aucun phénomène n'est réel tant qu'il n'a pas été observé. »

Bohr, qui tout au long de sa vie a été attiré par la philosophie,

En Norvège, avec son petit-fils.



(6) Succession de bandes alternativement claires et foncées créée par la superposition de deux ondes.

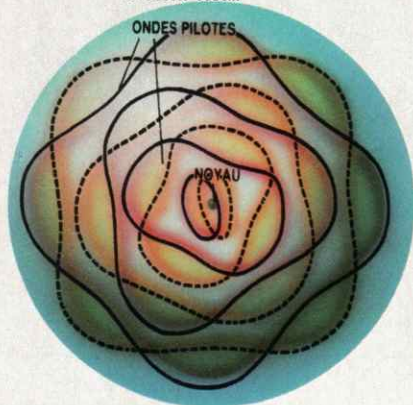


## 19. LA COMÉDIE FRANÇAISE



de Broglie

...Si la lumière est faite de particules, pourquoi les particules ne seraient-elles pas composées d'ondes ? Telle est la question géniale que se pose le prince physicien Louis Victor de Broglie. Il imagina que chaque électron, dans ses pérégrinations atomiques, était accompagné d'une onde pilote circulant le long de l'orbite. Idée tellement saugrenue que certains de ses confrères parlèrent à propos de la thèse de de Broglie, de "comédie française". Ils avaient tort...

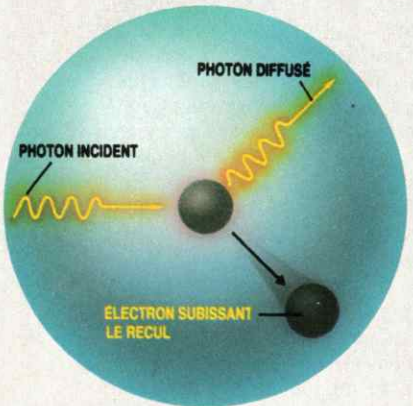


## 20. LES PHOTONS EXISTENT, JE LES AI RENCONTRÉS



Compton

...En tout cas, affirme A. Compton, la lumière est bien formée de particules : en 1923 il observe en effet que les rayons X changent de fréquence en frappant un atome. L'absorption instantanée par celui-ci d'un quantum lumineux implique la localisation de ce quantum au même titre que celle d'un électron...



essaiera d'étendre sa théorie de la complémentarité à d'autres domaines, en particulier à la psychologie et à la biologie, pensant qu'il s'agissait d'un principe universel. Les résultats, malheureusement, seront beaucoup moins convaincants. La complémentarité reste un postulat physique et même un postulat quantique.

Le problème d'une réalité objective existant ou non en dehors de l'observation va susciter un profond différend entre Bohr et Einstein. Le père de la physique quantique et le père de la relativité s'étaient rencontrés pour la première fois à Berlin en 1920. Une sorte d'amitié était née entre eux, fondée essentiellement sur une grande estime réciproque. Il n'empêche que la controverse qui les opposera durera près de trente ans, jusqu'à la mort d'Einstein, en 1955. Débat de titans, entre le dernier physicien classique et le chef de fil des "nouveaux physiciens"

Alors que, pour Niels Bohr, le rôle de la physique n'est pas de découvrir ce qu'est la réalité, mais simplement de voir ce que l'on peut dire sur cette réalité, en faisant table rase de toute idée préconçue, Einstein, lui, ne peut admettre que, par exemple, l'électron n'ait une position ou une vitesse — donc une existence — qu'au moment où il est observé. Pour lui, il existe une réalité physique indépendante de l'observation. Il ne met pas en cause le côté fonctionnel de la théorie quantique (c'est un instrument de travail qui "marche" très bien), mais son incapacité à décrire complètement l'Univers.

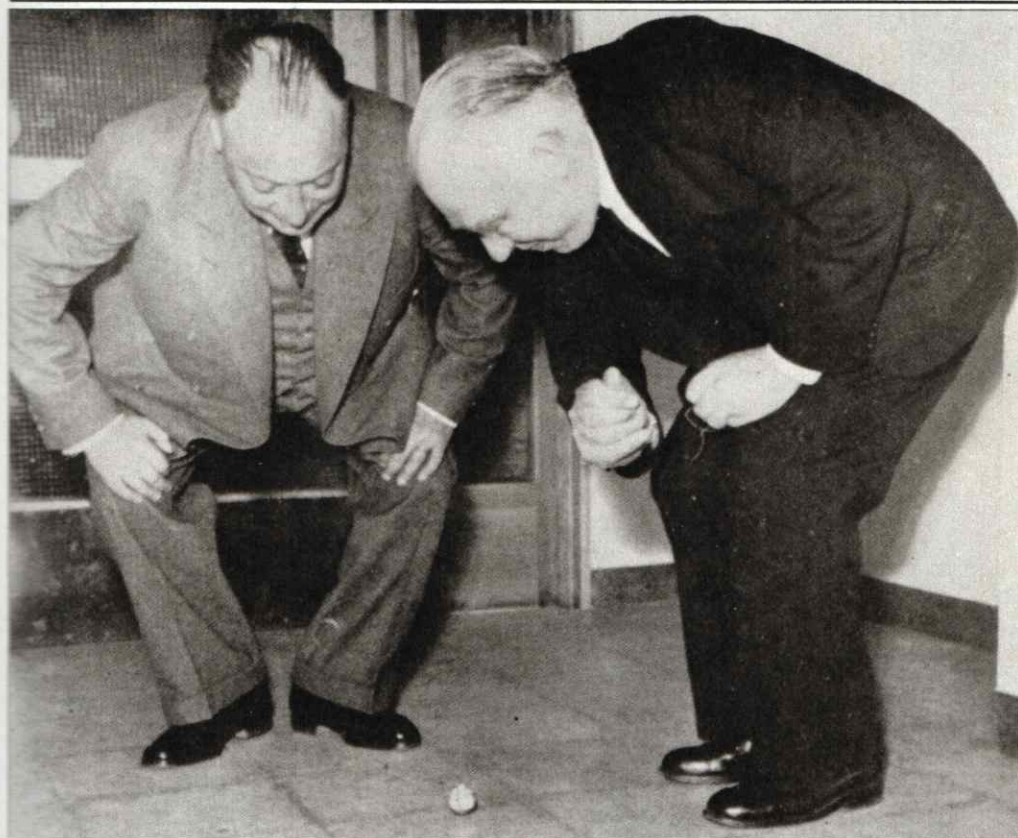
Einstein imagine toutes sortes d'expériences compliquées, qu'il appelle des expériences "mentales", et qui sont destinées à mettre en lumière les failles de la doctrine quantique. Chaque fois, Bohr lui démontre que son raisonnement est entaché d'erreur ; que d'ailleurs les problèmes soulevés n'ont pas lieu de l'être ; qu'il faut se contenter de ce qu'apporte la théorie quantique et ne pas chercher midi à quatorze heures.

Le pragmatisme de Bohr ne sera jamais partagé par Einstein, mais sera ratifié par presque tous les physiciens. Comme le dit le Pr Pierre Aigrain, « Si l'énorme majorité des physiciens ont choisi de suivre Bohr plutôt qu'Einstein et ses successeurs, c'est peut-être qu'ils ont senti confusément que, du point de vue de la science, l'attitude de Bohr était finalement plus constructive » (7).

**B**ohr n'a rien du scientifique austère, constamment plongé dans ses pensées et indifférent aux plaisirs de la vie. Toujours aussi sportif, mais n'ayant plus l'âge de pratiquer le football, où il excellait, il s'adonne volontiers au ski de randonnée, où il en remonte aux plus jeunes.

Il lui arrive souvent d'entraîner ses étudiants au cinéma, généralement pour voir des westerns, le genre qu'il aime le plus. Il s'inspire de ces films pour illustrer la théorie des probabilités : « Je veux bien croire, dit-il, qu'une jeune fille parcourt seule un sentier des Rocheuses, qu'elle fasse un faux pas et que, dévalant la pente, elle parvienne à s'accrocher à un petit sapin surplombant un précipice. Je veux bien admettre aussi qu'à ce moment précis, un charmant cow-boy, se promenant à cheval sur le même sentier, soit témoin de l'accident, et que, à l'aide de son lasso, il réussisse à sauver la jeune fille au moment où celle-ci allait lâcher prise. Mais il me semble extrêmement improbable qu'au même moment un cinéaste soit présent avec sa caméra pour filmer cet intéressant événement ! »

Ses facéties sont célèbres. George Gamow, le physicien russe dont nous avons déjà parlé, qui fut l'un des hôtes de l'Institut et demeura un familier de Bohr, en raconte une particulièrement édifiante. « Un soir, à Copenhague, Bohr, sa femme, le physicien hollandais Casimir et moi-même revenions d'un dîner



Pauli et Bohr, deux physiciens très attentifs aux mouvements d'une... toupie !

d'adieu donné par Oscar Klein à l'occasion de sa nomination à l'université de Stockholm. A cette heure tardive, les rues de la ville étaient désertées. Nous passâmes devant un bâtiment dont les murs étaient formés de gros blocs de béton. C'était une banque. Sur l'arête de l'édifice, les blocs étaient disjoints, et les interstices, assez profonds, offraient des prises possibles pour un bon alpiniste. Casimir, grimpeur émérite, se hissa jusqu'au troisième étage. Bohr, malgré son inexpérience, voulut relever le défi. Alors qu'il était en difficulté au niveau du deuxième étage et que M<sup>me</sup> Bohr et moi surveillions avec inquiétude son ascension, deux policiers surgirent, la main sur la crosse de leur révolver. Mais l'un deux, regardant en l'air, dit à l'autre : « Oh ! ce n'est que le Pr Bohr ! » Et ils allèrent tranquillement à la chasse de plus dangereux professionnels du hold-up (\*).

Au début des années 30, la

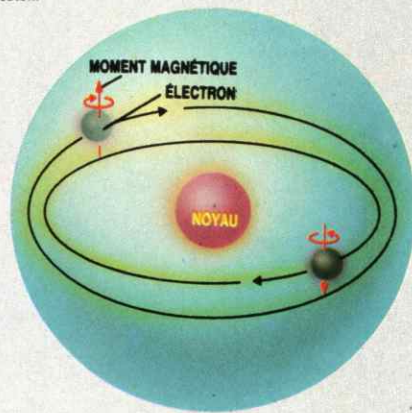
famille Bohr déménage : elle quitte le bâtiment principal qui lui était réservé à l'Institut pour occuper un grand hôtel particulier appartenant à la fondation Carlsberg. Le propriétaire de la grande brasserie avait en effet stipulé dans son testament qu'à

sa mort sa luxueuse demeure devrait être attribuée au plus célèbre Danois vivant. Indiscutablement, Niels Bohr, au faite de sa gloire, était cet homme-là (après le roi, bien entendu ; mais ce dernier avait déjà son propre palais !).

## 21. UNE TOUPIE ÉLECTRONIQUE

...Cet électron, il est d'ailleurs plus riche qu'on ne le croyait : puisque la Terre tourne sur elle-même en tournant autour du Soleil, l'électron doit aussi tourner sur lui-même en orbitant autour d'un noyau, suggèrent les Néerlandais Gorges Uhlenbeck et Samuel Goudsmit en 1925. Baptisé le "spin", cette nouvelle propriété de l'électron va permettre d'expliquer certaines anomalies magnétiques. L'existence du spin conduisit le physicien Wolfgang Pauli à postuler un principe d'exclusion : principe selon lequel deux électrons ne peuvent pas se trouver ensemble sur la même orbite dans le même état de spin ; c'est-à-dire, en utilisant une image classique qui sera très vite aban-

donnée, en tournoyant dans le même sens...



(\*) George Gamow : Trente années qui ébranlèrent la physique.

## 22. LES ÉLECTRONS SONT DES ONDES

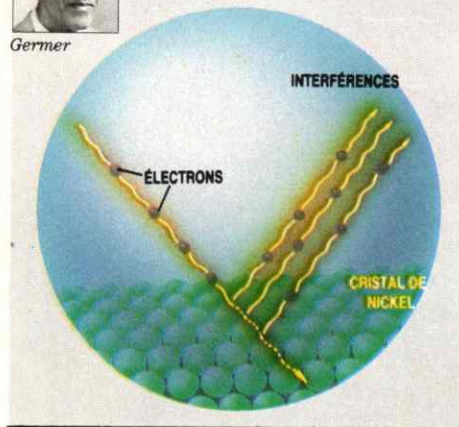


Davisson



Germer

...En 1925, deux jeunes chercheurs américains, C.J. Davisson et L.H. Germer, observèrent par hasard que la réflexion d'un pinceau d'électrons, à la surface d'un cristal de nickel, donnait naissance sur une plaque photographique à des taches de diffraction. Or de telles interférences sont la preuve d'une nature ondulatoire. De Broglie avait donc raison...



Quand Bohr, fatigué par ses multiples tâches, veut échapper aux bruits de la ville, aux contraintes de l'Institut, aux moulures et aux bas-reliefs de sa somptueuse résidence, il se rend dans la petite maison de campagne qu'il possède à Tisvilde. Sur la porte de celle-ci, il a cloué un fer à cheval, ce qui ne manque pas d'intriguer les visiteurs : comment, se demandent-ils, un si grand esprit peut-il se laisser aller à de telles superstitions. « Rassurez-vous, dit Bohr, je ne suis pas superstitieux ; mais on dit que cela porte bonheur même quand on n'y croit pas ! »

Homme heureux, apparemment comblé, il n'est cependant pas à l'abri des épreuves. Il connaît même, en 1934, l'une des plus cruelles qui soit : alors qu'il navigue en mer avec son fils aîné Christian, sur son bateau *La Chita*, le garçon tombe à l'eau et disparaît. Pendant des semaines, le grand scientifique ne sera plus qu'un père effondré.

Le travail l'arrachera au chagrin. Petit à petit, il re-

prendra ses recherches provisoirement abandonnées. Depuis la découverte du neutron, en 1932, par le physicien anglais James Chadwick, il s'était intéressé aux réactions induites par l'impact de neutrons lents sur des noyaux cibles et avait même branché tous les physiciens de son institut sur l'exploration des noyaux atomiques. En 1936, dans une nouvelle et brillante étude, il met en évidence l'un des mécanismes fondamentaux des réactions nucléaires : il montre que lorsqu'une particule (un neutron) pénètre à l'intérieur d'un noyau, elle n'expulse pas aussitôt certaines particules de ce noyau ; au contraire, la particule projectile s'intègre au noyau et forme avec lui, pendant un temps très court, un "noyau composé". Durant ce laps de temps, l'énergie cinétique du projectile est distribuée entre toutes les particules qui constituent le noyau. Ensuite seulement, le "noyau composé" libère son énergie excédentaire,

soit par l'émission d'un quantum de rayonnement, soit par l'expulsion d'une ou de plusieurs particules.

Ainsi s'explique, selon Bohr, le fait que, très souvent, le neutron incident est purement et simplement capturé par le noyau cible. Son énergie, nous l'avons vu, est dispersée entre toutes les particules du "noyau composé", et, en raison de cette dispersion, aucune desdites particules ne possède assez d'énergie pour s'échapper. La désintégration du "noyau composé" ne peut se produire que par suite d'une fluctuation statistique conduisant à la concentration fortuite d'une quantité suffisante d'énergie sur l'un des modes possibles de désintégration du système (émission de rayonnement ou expulsion de particules).

L'introduction de cette notion d'état intermédiaire (le "noyau composé") simplifiera considérablement l'analyse des réactions nucléaires complexes.

C'est à peu près à la même

## 23. THÉORIE DES QUANTA : L'ÂGE D'HOMME



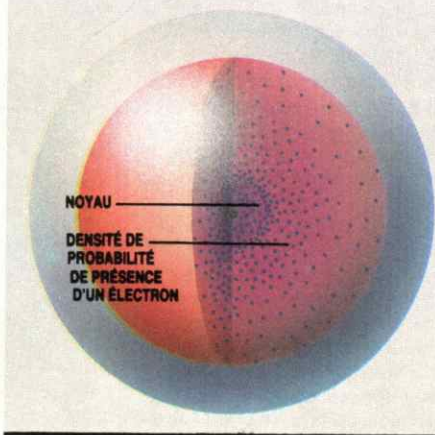
Born

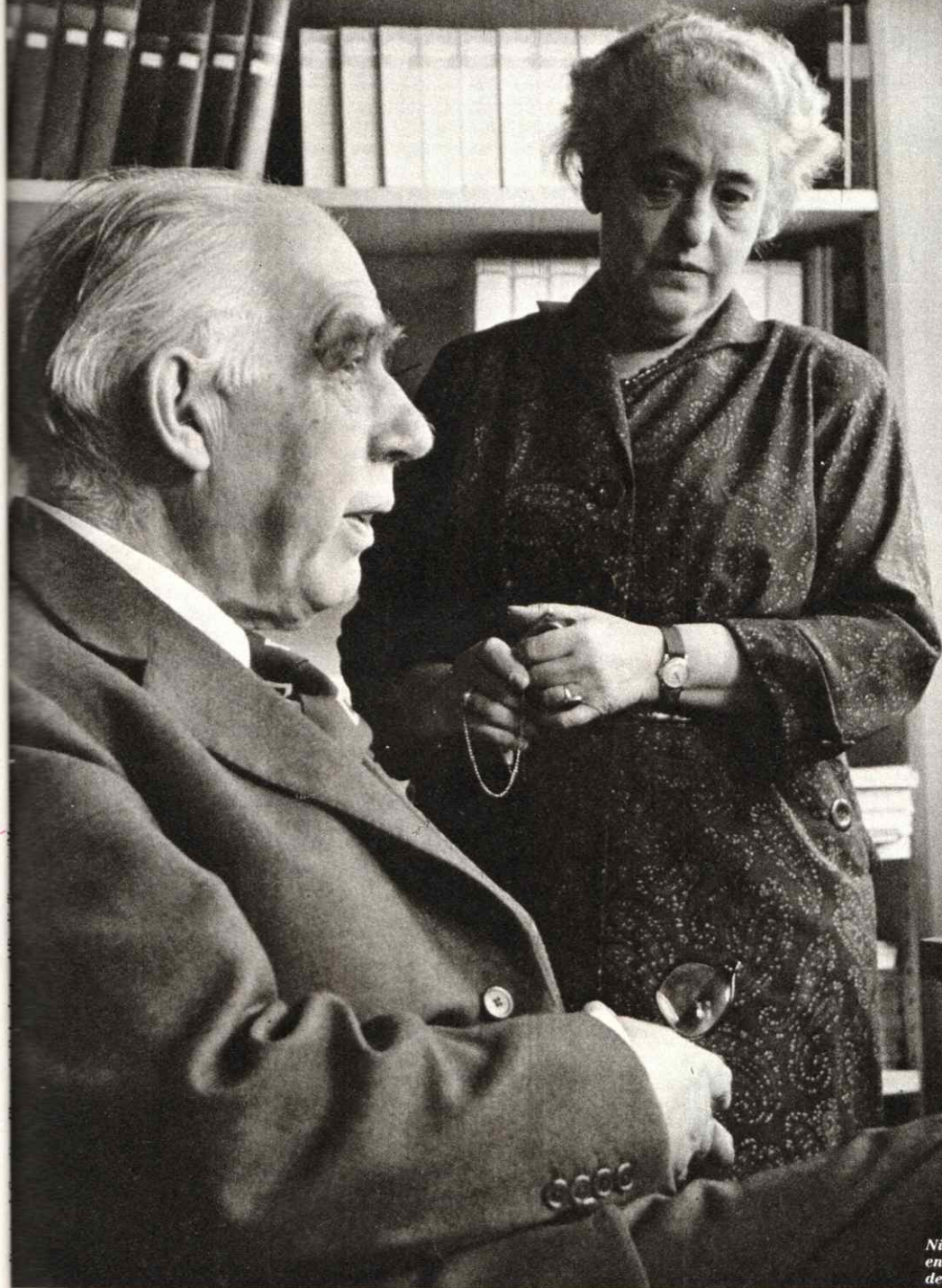


Schrödinger

...Mi-quantique, mi-classique, l'atome de Bohr, aussi raffiné soit-il, souffrait d'être bâtard. Pour passer de la physique quantique à la physique classique, Bohr avait bien imaginé un principe de correspondance selon lequel les lois quantiques tendent vers les lois classiques quand le nombre de quanta mis en jeu devient très grand. Mais ce n'était qu'un expédient. Entre 1925 et 1927, l'atome va

devenir purement quantique et cesser de ressembler à ce que permet notre intuition. Heisenberg, Born et Jordan, d'une part, Dirac, d'autre part, vont indépendamment développer une théorie mathématique identique, abandonnant pour cela toute image d'orbites et de système planétaire. Ils développent une mécanique matricielle n'utilisant que ce qui est effectivement observable dans les atomes : les fréquences et intensités de rayonnements émis. De son côté, Schrödinger va développer une autre théorie à partir des idées de de Broglie : il décrit le mouvement d'un électron à partir d'une équation d'onde. Deux théories différentes pour décrire la même chose ! Quelle était la bonne ? Les deux sont complémentaires, répond Schrödinger en les unifiant en 1926. Et les électrons sont décrits par une "fonction d'onde". L'électron n'est plus ponctuel, mais réparti dans tout l'espace autour du noyau avec une densité de probabilité de présence plus ou moins grande...





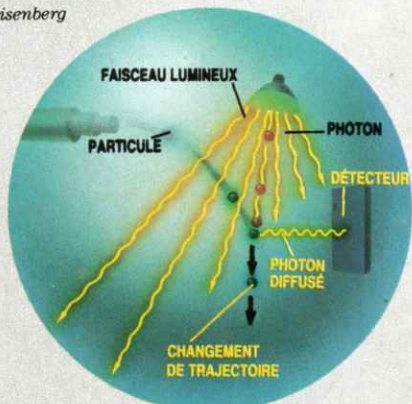
*Niels Bohr  
en compagnie  
de sa femme.*

## 24. LA DURE LOI DE L'INCERTITUDE



Heisenberg

...Poussant la nouvelle théorie quantique dans ses ultimes retranchements, Heisenberg coupe définitivement les ponts avec la physique classique ; il énonce en 1927 le principe



d'incertitude qui découle mathématiquement de sa théorie : il est impossible en microphysique de connaître à la fois la position et la vitesse d'une particule. Mieux cette position est définie, moins la vitesse est bonne et vice versa. Essayons, dit-il, d'observer dans une chambre réfléchie, où règne un vide parfait, la chute d'une particule. Pour cette observation, il faut que la chambre soit éclairée. Dès ce moment, la lumière réfléchie par la particule pénétrera dans l'instrument d'observation. Mais si la particule est frappée par un rayon lumineux, elle est soumise à une certaine pression qui la fait dévier de sa trajectoire. Donc mieux on connaît la trajectoire de la particule, et plus sa vitesse est perturbée par l'apport d'énergie des quanta lumineux. C'est le principe d'incertitude...

époque que Bohr propose son modèle de la "goutte liquide". Le noyau atomique, de forme généralement sphérique, peut être assimilé à une goutte liquide, incompressible et de très haute

densité. Les nucléons (les particules qui composent le noyau : protons et neutrons) situés près de la surface du noyau sont moins fortement liés à l'ensemble que ceux qui se trouvent à l'intérieur. On peut donc dire que l'énergie de liaison d'un noyau est proportionnelle à sa surface — comme la tension superficielle d'un liquide. Dans ce modèle, les modes de désintégration du "noyau composé" peuvent être comparés à l'évaporation des molécules d'une goutte de liquide chauffée par l'énergie cinétique provenant de la particule incidente. Le modèle de la "goutte liquide", bien qu'approximatif, se révélera à l'usage extrêmement fécond.

En 1937, Bohr entreprend un grand voyage autour du monde : il se rend notamment en URSS, au Japon et en Chine. Invité par des institutions scientifiques ou des organisations culturelles, il donne, dans tous les pays où il passe, plusieurs conférences. Il y parle de l'atome, du noyau atomique et de la désintégration nucléaire, ses "tubes" dirait-on aujourd'hui. Partout il est fêté, honoré, interrogé comme un oracle. En Chine, la radio retransmet en direct les confé-

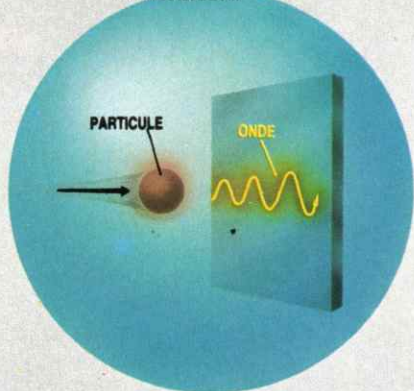
rences qu'il fait dans les universités.

La veille de Noël 1938, la physicienne autrichienne Lise Meitner, qui s'est réfugiée en Suède pour fuir le régime nazi, reçoit une lettre de Berlin, dans laquelle Otto Hahn et Fritz Strassman lui font part de leur dernière découverte : en bombardant un échantillon d'uranium avec des neutrons, ils ont obtenu du baryum et un autre élément qui s'est révélé être un isotope du krypton. Cette découverte, ajoutent-ils, les plonge dans la plus grande perplexité, car ils ne comprennent pas comment un noyau d'uranium peut se scinder en deux fragments à peu près égaux (fragments donnant le baryum et l'isotope du krypton).

Au moment où elle reçoit cette lettre, Lise Meitner séjourne dans un petit hôtel près de Göteborg, où elle a justement la visite de son neveu, le physicien Otto Robert Frisch, réfugié, lui, au Danemark. Ensemble, ils se penchent sur la question et, grâce au modèle de la "goutte de liquide" inventé par Bohr, entrevoient la solution : le processus qui engendre la fission est comparable à celui d'une goutte de liquide qui se divise. La goutte commence par s'étirer, puis elle prend la forme d'un haltère, dont les deux boules réunies par une mince tige ont des masses à peu égales ; enfin, la tige cède, et les deux boules se séparent. De la même façon, le noyau d'uranium, lorsqu'il est frappé par un neutron, se déforme ; du coup, les forces répulsives entre protons de même charge l'emportent sur les forces attractives qui assurent habituellement la cohérence du noyau ; celui-ci se scinde alors en deux fragments qui s'éloignent à grande vitesse l'un de l'autre. Ce processus s'accompagne de la libération d'une énergie considérable (égale à la différence entre l'énergie de liaison totale des nucléons qui constituent au départ le noyau d'uranium, et les énergies de liaison des deux noyaux plus légers résultant de

## 25. UN PRINCIPE PEUT EN CACHER UN AUTRE

...De cette constatation naît le principe de complémentarité de Bohr : onde et particule sont deux aspects d'une même chose ; selon la méthode d'observation, les objets de la microphysique apparaissent comme des ondes ou comme des particules. Toute tentative, pour essayer de repérer à la fois onde et particule, se heurtera au principe d'incertitude...



la fission).

Niels Bohr s'apprête à partir pour les Etats-Unis sur le paquebot *Drottningholm* quand Frisch, de retour à Copenhague, le met au courant de la découverte de Hahn et Sassman, et de l'interprétation que Lise Meitner et lui-même en donnent. Bohr se frappe le front et s'exclame : « Que nous sommes bêtes ! Nous aurions dû voir cela plus tôt ! »

Pendant toute la traversée, il réfléchit au problème avec le physicien belge Von Rosenfeld qui l'accompagne. En arrivant à New-York, le 16 janvier, il est attendu sur le quai par Enrico Fermi et John A. Wheeler, à qui il révèle la découverte de la fission. Quelques jours plus tard, le 26 janvier, il en parle à la Conférence annuelle de physique théorique organisée à Washington par George Gamow et Edward Teller. Aussitôt, tout le monde de la physique est en ébullition. Plusieurs expériences sont lancées, qui toutes concluent à la réalité de la fission.

**A**u début du printemps, Bohr, qui est à Princeton, démontre, à l'aide de son modèle du "noyau composé", que c'est l'U235, c'est-à-dire l'isotope rare de l'uranium naturel, et non l'U238<sup>(9)</sup>, qui subit la fission par neutrons lents. En effet, explique-t-il, l'énergie d'excitation apportée par le neutron incident est plus grande si celui-ci forme avec le noyau cible un "noyau composé" comportant un nombre pair de neutrons que s'il forme un "noyau composé" ayant un nombre impair de neutrons (car, dans une configuration paire, l'énergie qui lie les particules entre elles est plus grande que dans une configuration impaire). Ainsi, un neutron lent pénétrant dans un noyau d'U235, et donnant un "noyau composé" d'U236, apporte plus d'énergie que s'il entre dans un noyau d'U238, et la fission peut se produire.

Analyse magistrale qui, une

fois de plus, sera corroborée par l'expérience : le plutonium 239, découvert en 1941, et contenant lui aussi un nombre impair de neutrons, se révéla, conformément aux prévisions de Bohr, fissionable par neutrons lents.

En collaboration avec John A. Wheeler, Bohr entreprend une étude approfondie du mécanisme de la fission. Il calcule les déformations que subit un noyau lourd, selon le modèle de la "goutte liquide", pour toute une série d'éléments, les seuils à partir desquels se produit la fission (à mesure qu'augmente la déformation, augmente aussi la probabilité de fission, car, plus le noyau s'étire, plus les forces électriques de répulsion, qui sont de longue portée, prennent le pas sur les forces d'attraction, qui sont de courte portée). Par une coïncidence étrange, cette étude sur la fission nucléaire paraîtra dans le numéro de *Physical Review* daté du 3 septembre 1939, c'est-à-dire le jour même de la déclaration de la Seconde Guerre mondiale.

Entre-temps, Enrico Fermi et ses collaborateurs avaient mesuré le nombre moyen de neutrons émis à chaque fission d'un noyau d'uranium, et avaient trouvé qu'il était supérieur à deux. L'établissement d'une réaction en chaîne était donc possible. Le monde venait d'entrer dans l'ère nucléaire.

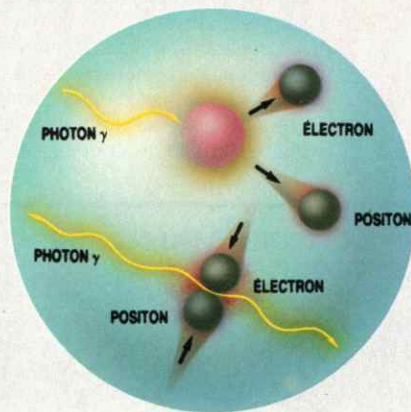
Quand la guerre éclate, Bohr est à Copenhague. L'Allemagne ayant signé avec le Danemark un pacte de non-agression, il pense que son pays, comme lors de la Première Guerre mondiale, restera à l'écart du conflit. Cependant, le 9 avril 1940, les Allemands envahissent le Danemark, afin de garantir les communications avec leurs bases de sous-marins en Norvège. Les Britanniques pressent vivement le physicien de venir se réfugier en Angleterre, car ils craignent pour son sort. Bohr n'a-t-il pas, dès 1933, créé un comité destiné à aider les savants allemands qui refusaient le régime nazi ? N'a-t-il pas accueilli dans son Institut des dizaines de scientifiques

## 26. L'ANTIMATIÈRE

...En unifiant la théorie des quanta et celle de la relativité, Dirac va trouver une nouvelle équation d'onde de l'électron où son énergie peut être indifféremment choisie positive ou négative. Dirac va interpréter cela en postulant qu'à toute particule correspond une antiparticule. En particulier à l'électron correspond un positon ; en se rencontrant ceux-ci doivent s'annihiler en émettant des rayons gamma de même qu'un rayon gamma peut donner naissance à un couple électron-positon...



Dirac

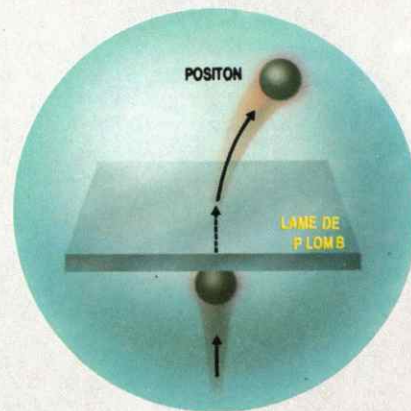


## 27. UN POSITON COSMIQUE

...Et en 1931, Anderson qui étudiait le rayonnement cosmique observa les fameux positons dans une chambre de Wilson (dans laquelle le passage d'une particule chargée se matérialise par condensation de l'air), il photographia la trajectoire d'une particule s'incurvant, sous l'effet d'un champ magnétique, en sens inverse de celle d'un électron...



Anderson



(9) L'uranium naturel est composé de trois isotopes : l'U234, sous forme de traces ; l'U235 (0,72%) et l'U238 (99,27%).

victimes des lois racistes du Reich, en attendant que ceux-ci trouvent un point de chute en Grande-Bretagne ou aux Etats-Unis ?

En 1941, le physicien anglais James Chadwick, le "découvreur" du neutron, envoie un message secret à Bohr, dans lequel il l'invite à rejoindre son équipe, qui travaille activement sur la fission nucléaire. Mais Bohr ne veut pas quitter son pays occupé : il pense qu'en restant, et grâce à sa notoriété, il pourra, s'il le faut, venir en aide à ses compatriotes.

Cependant, devant la montée de la résistance danoise, le commissaire allemand Best décide, en août 1943, de supprimer les libertés politiques et de placer le



## 28. LA FAMILLE NUCLÉAIRE S'AGRANDIT



Bothe

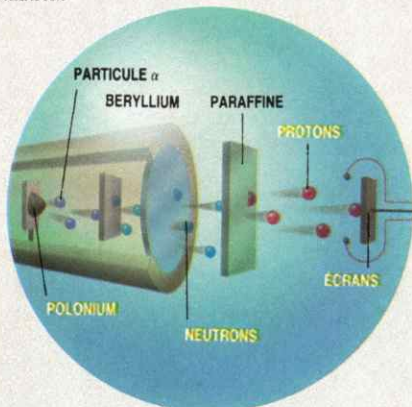


Becker



Chadwick

...En 1930, deux physiciens allemands, W. Bothe et H. Becker, avaient constaté qu'un échantillon de béryllium, irradié par des rayons alpha, donnait naissance à un rayonnement aussi pénétrant qu'inconnu. Ce fut James Chadwick qui, en 1932, découvrit de quoi il s'agissait : il bombardait à son tour du béryllium avec des rayons alpha et observa que le passage du mystérieux rayonnement à travers de la paraffine provoquait une éjection de protons. La seule hypothèse plausible était celle de particules neutres, de masse sensiblement comparable à celle des protons : le neutron venait rejoindre le proton comme composant du noyau atomique...



roi sous surveillance dans son palais. Le 29 septembre 1943, des résistants apprennent à Bohr que la Gestapo est sur le point de l'arrêter. Le soir même, le physicien s'embarque avec sa femme sur un bateau de pêche, traverse le détroit du Sund et se réfugie en Suède. Ajoutons pour l'anecdote qu'avant de quitter sa demeure, Bohr fait dissoudre la médaille d'or de son prix Nobel dans de l'eau régale (mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique qui a la propriété de dissoudre l'or et le platine) ; elle demeurera ainsi sur une étagère jusqu'à la fin de la guerre.

Le 6 octobre 1943, un chasseur-bombardier britannique *Mosquito* atterrit en Suède : il a pour mission de ramener Niels Bohr en Angleterre. Mais le *Mosquito* est un petit avion où la place est comptée, et la traversée manque de tourner au drame. « Bohr, équipé d'un parachute et muni de fusées, avait été placé dans la soute à bombes de l'appareil, raconte Margaret Gowing<sup>(10)</sup>. Il avait été prévenu qu'en cas d'attaque la soute serait ouverte et qu'il devrait amerir. En fait, le professeur aurait été hors d'état de se tirer de cette désagréable situation si elle avait dû se produire : en effet il fut inconscient pendant la majeure partie du

voyage. L'avion devait voler très haut, et Bohr avait reçu un masque à oxygène qu'il devait utiliser dès que le pilote l'avertirait par le téléphone intérieur. Mais le crâne du physicien était si haut que les écouteurs du casque n'atteignaient pas ses oreilles, et il n'entendit pas les instructions du pilote. Celui-ci, n'obtenant pas de réponse, s'alarma à l'idée que sa précieuse charge enlevée aux Nazis, était morte. Au mépris des règles de sécurité, il perdit aussitôt de l'altitude et, lorsque l'appareil atteignit l'Ecosse, Bohr avait repris connaissance. »

En Angleterre, Bohr est mis au courant, à titre confidentiel, des travaux menés par les Britanniques et les Américains en vue d'utiliser l'énergie atomique à des fins militaires. Les Alliés redoutent en effet que les Allemands ne les devancent, et mettent les bouchées doubles. Le Danois, associé à l'équipe britannique, travaille pendant quelque temps pour le British Atomic Energy Project, avant de passer aux Etats-Unis où il retrouve son fils Aage, physicien comme lui.

Sans tarder, il se rend à Los Alamos, dans le Nouveau-Mexique, au site Y, l'énorme laboratoire où on étudie la bombe atomique. Il y restera plusieurs mois travaillant avec des physi-

(10) Margaret Gowing : *Britain and Atomic Energy, 1939-1945*.



ciens célèbres, dont certains, comme J.R. Oppenheimer, le responsable du projet, étaient passés par son Institut. A Los Alamos, les règles de sécurité sont très strictes, et chaque physicien se voit attribuer un pseudonyme dont seules les initiales rappellent le nom d'origine. Ainsi Niels Bohr reçoit des papiers d'identité au nom de Nicholas Baker, mais tous ses collègues, en raison de son âge (il est dans sa soixantième année), l'appellent familièrement "oncle Nick".

**D**ès cette époque cependant — nous sommes en 1944 —, Bohr s'inquiète des conséquences que pourra avoir pour l'humanité l'aboutissement des travaux en cours. Qu'advient-il du monde si plusieurs pays se mettent à fabriquer et à utiliser cette terrifiante arme de destruction ? Il demande à être reçu par lord Halifax, ambassadeur de Grande-Bretagne aux Etats-Unis, et par sir Donald Campbell, ministre de Sa Majesté de passage à Washington, pour leur faire part de ses préoccupations. Lord Halifax lui conseille de se rendre à Londres et de plaider son dossier directement devant le Premier ministre. Ce qu'il fait.

A Londres, Winston Churchill reçoit Bohr pendant une trentaine de minutes. Il l'écoute poliment, mais reste totalement imperméable à ses arguments. Pour toute réponse, il fait mener par ses services une enquête sur les activités du physicien, afin de s'assurer qu'il ne divulgue pas d'informations aux scientifiques étrangers, notamment à ceux d'Union Soviétique !

Bohr ne se décourage pas : il rédige un mémoire à l'intention du président Roosevelt, dans lequel il préconise, contre « les dangers d'une gravité sans précédent » que ferait courir à l'humanité une course aux armements atomiques, « la conclusion d'un accord universel et sincère », accord assorti « de mesures efficaces de contrôle ». Il pense même que c'est aux Alliés, qui par chance tiennent la tête dans la compétition engagée pour l'exploitation de l'énergie de fission, de prendre une initiative en ce sens. Il suggère enfin que les savants du monde entier, grâce aux relations personnelles qu'ils ont nouées entre eux, soient en quelque sorte les initiateurs et les garants d'un tel accord.

Ce mémoire est envoyé au président des Etats-Unis le 3 juillet 1944, et, le mois suivant, Roosevelt accorde à Bohr une longue entrevue. Moins fermé que Churchill aux arguments du physicien, il lui promet d'y réfléchir.

Au mois de mars 1945, Bohr revient à la charge. Dans un mémoire complémentaire, il insiste sur la gravité de la menace et pousse plus avant l'étude du problème du contrôle. Les phrases suivantes résument l'essentiel de sa pensée, sur bien des points prémonitoire :

« L'énergie atomique n'en est qu'à ses débuts. Un avenir sans doute très proche dévoilera des méthodes permettant de simplifier la production des substances radioactives et d'en modifier les effets, au point que toute nation dotée de grandes ressources industrielles pourra disposer de moyens de destruction

## 29. DES ÉLÉMENTS RADIOACTIFS INCONNUS

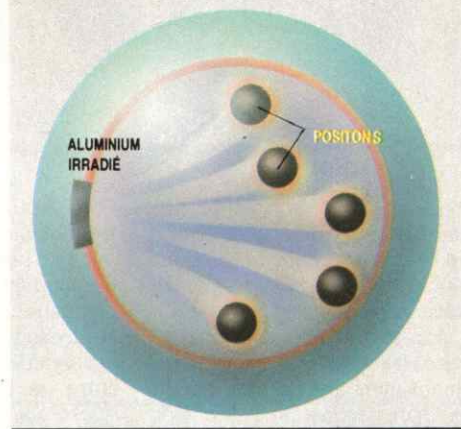
...Après cette découverte, la physique nucléaire allait progresser à pas de géant : en 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie constatèrent que, en irradiant une plaque d'aluminium avec des particules alpha, il y avait une émission de positons, non pas instantanément mais quelques minutes après l'irradiation. De plus, l'activité en positons décroissait de moitié toutes les trois minutes quinze secondes. Ils avaient découvert la radioactivité artificielle : la création d'éléments radioactifs nouveaux à partir de noyaux stables...



Irène



et Frédéric Joliot-Curie



dont la puissance dépassera tout ce qu'il est permis d'imaginer aujourd'hui. Dans ces conditions, l'humanité courra des dangers sans précédent si des mesures ne sont pas prises en temps utile pour prévenir une course désastreuse à des armements aussi formidables, et pour exercer un contrôle international sur la fabrication et l'utilisation de ces substances capables de libérer une telle quantité d'énergie.

« Un comité permanent d'experts, rattaché à une organisation internationale de sécurité, pourrait être chargé de se tenir au courant des nouvelles découvertes scientifiques ou techniques, et d'indiquer éventuellement comment les mesures de contrôle devraient être modifiées.

« Les recommandations de ce comité permettraient de fixer les conditions dans lesquelles l'ex-



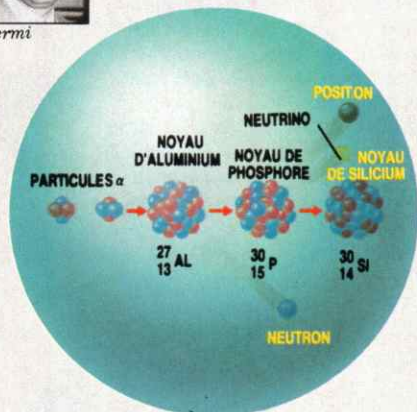
### 30. IL Y A TROIS FORCES DANS L'UNIVERS...



Fermi

...Enrico Fermi entreprit de développer une théorie expliquant cette désintégration avec émission de positons (bêta +) de même que la désin-

tégration symétrique avec émission d'électrons (bêta -). Il fut ainsi amené à postuler l'existence d'une nouvelle force, l'interaction faible, responsable de la désintégration. Dans ce processus, un proton (ou un neutron) se transforme en un neutron (ou un proton) en émettant un positon (ou un électron) et un neutrino (ou un antineutrino). Cette dernière particule dépourvue de masse avait été imaginée par Wolfgang Pauli pour assurer dans ce type de désintégration la loi de conservation de l'énergie. La radioactivité observée par les Joliot-Curie pouvait alors s'expliquer par la transformation d'un noyau d'aluminium en un noyau de phosphore avec émission d'un neutron; par désintégration bêta le noyau de phosphore se transformant ensuite en noyau de silicium...



ploitation industrielle des sources d'énergie atomique pourrait être autorisée, ainsi que les restrictions qui empêcheront tout assemblage explosif de substances radioactives.»

Adressé au Président Roosevelt le 24 mars 1945, ce mémoire complémentaire ne sera pas lu par son destinataire: déjà très affaibli, celui-ci sera emporté par une crise cardiaque le 12 avril suivant.

Quand Bohr quitte les Etats-Unis, en juin 1945, les derniers essais de la bombe atomique n'ont pas encore eu lieu. Avant de rentrer au Danemark, il passe quelques semaines en Angleterre; c'est là qu'il apprend le bombardement d'Hiroshima (6 août) et de Nagasaki (9 août). Il en est si affecté qu'il décide un peu plus tard, de ne plus jamais participer à aucun projet atomique militaire.

A Copenhague, il retrouve avec émotion sa maison et son Institut. Mais les choses ont bien changé: la guerre a laissé des blessures profondes, et l'internationalisme scientifique qui avait tant contribué au succès de l'Institut dans les années 20 et 30, se relève difficilement de haines mal éteintes.

Cependant, petit à petit, grâce à l'affabilité de Bohr et aussi

grâce à son aura scientifique, Copenhague redevient un lieu de rencontre privilégié où les ennemis d'hier et les adversaires d'aujourd'hui peuvent communier dans le langage universel de la physique. Il est significatif, à cet égard, qu'après la rupture entre les Etats-Unis et l'Union soviétique, le premier article publié conjointement par un physicien américain et un physicien russe ait été conçu et rédigé à l'Institut Niels-Bohr.

En plus de son travail universitaire, Bohr consacre une bonne partie de son temps à l'Académie des sciences et à la Commission atomique du Danemark. C'est à son initiative que sera édifié sur la presqu'île de Riso, au bord du fjord de Roskilde, un centre atomique comprenant un réacteur et un accélérateur de particules.

Mais, malgré la multiplicité de ses occupations, les périls nés des applications militaires de l'énergie atomique continuent de l'obséder. En 1946 et en 1948, il profite de deux séjours aux Etats-Unis, où il participe à des conférences scientifiques, pour suggérer à quelques hommes d'Etat américains de prendre une initiative en vue d'un accord international sur le contrôle des armes atomiques. Pour lui, une seule solution: en finir avec les

secrets et les barrières qui existent entre les nations. Chaque pays doit s'ouvrir aux autres, car « le libre accès à la connaissance réciproque favorisera la compréhension mutuelle et permettra de s'entendre sur les mesures propres à éliminer efficacement les dangers communs. »

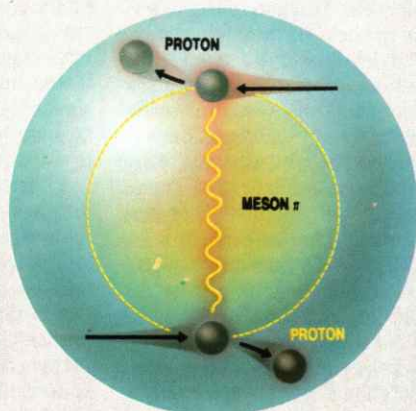
Utopie d'idéaliste croyant pouvoir appliquer au monde politique l'esprit de coopération qu'il a su développer dans le monde scientifique? Peut-être, mais l'idée lui tient à cœur. Le 9 juin 1950, en pleine guerre froide, il adresse une lettre ouverte au secrétaire général des Nations unies, lettre dans laquelle il reprend tous les thèmes qu'il a développés depuis 1944. L lançant l'idée d'un « civisme mondial », fondé sur une

### 31. ... NON, QUATRE !



Yukawa

...Un an plus tard, une quatrième force allait rejoindre les interactions gravitationnelle, électromagnétique et faible: il fallait en effet expliquer comment neutrons et protons pouvaient rester assemblés au sein du noyau; les protons, pour le moins, auraient dû se repousser conformément à la loi de Coulomb. Or la nouvelle force découverte par Fermi était trop faible pour expliquer les liaisons nucléaires. Le physicien japonais Yukawa imagina alors un nouveau modèle d'interaction mettant en jeu une particule d'échange, le méson, pesant 200 fois la masse de l'électron. Il fallut attendre 1947 pour observer réellement cette particule...





La dernière photo du savant quinze jours avant sa mort le 18 novembre 1962.

« absolue franchise réciproque », il propose que les nations mettent en commun leurs expériences et se soumettent aux mesures nécessaires d'inspection et de contrôle. « Comme il n'eût saurait être question pour l'humanité, écrit-il, de renoncer aux perspectives de progrès matériel que lui ouvre l'énergie atomique, le salut de la civilisation exige une transformation radicale des rapports entre nations. Or — et c'est là le nœud du problème — l'assurance que le progrès scientifique sera utilisé au mieux des intérêts de l'humanité présuppose chez les nations précisément la même attitude qu'exige leur coopération dans tous les domaines de la culture. » Et il termine par son leitmotiv habituel : « Les efforts de tous les partisans de la coopération internationale, individus ou nations, ne seront pas de trop pour que, dans tous les pays, la voix de l'opinion, toujours plus forte et plus claire, s'élève pour réclamer un monde sans secrets ni barrières. »

Bohr exposera une nouvelle fois sa doctrine en 1955, dans son discours d'introduction à la première Conférence de Genève sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, et, le 9 novembre 1956, il adressera une seconde lettre, toujours sur le même thème, au secrétaire général des Nations unies. Une telle constance venant d'un esprit si éminent eût mérité une meilleure fortune.

En 1961, âgé de 76 ans, mais

toujours prêt à porter à travers le monde la bonne parole quantique, il retourne en URSS pour une série de conférences à l'institut Kourchatov, à l'institut de Physique et à l'université de Moscou. Lors d'un entretien à batons rompus, le physicien Lev Landau lui demande comment il a fait pour attirer à lui tant de jeunes talents. « Il n'y a pas de secret, lui répond Bohr, toujours aussi facétieux. Tout simplement, je n'ai jamais eu peur d'avoir l'air bête devant les jeunes ! »

Ce sera son dernier voyage. Le 18 novembre 1962, alors qu'il attend des amis dans sa résidence de Copenhague, il meurt subitement d'une thrombose de l'aorte.

Son œuvre, elle, lui survit, non seulement comme l'un des plus formidables outils que l'homme ait inventé pour percer les secrets de l'Univers, mais aussi comme le moteur de toute une série d'innovations technologiques. La nouvelle théorie des solides, la théorie de la conductivité électrique, la théorie des ondes, la théorie des matériaux magnétiques, la théorie des changements de phase de la matière, la théorie de la supraconductivité, la théorie de la superfluidité, la théorie expliquant l'origine de l'énergie des étoiles, sont toutes issues de la physique quantique. Parallèlement, les accélérateurs de particules, les réacteurs nucléaires, les circuits intégrés, la chimie moléculaire, les lasers, les masers, ont tous grandement bénéficié de l'appareil théorique de la physique quantique.

Le 16 octobre dernier, soit soixante-douze ans après la formulation de ses postulats quantiques, Niels Bohr triomphait une fois encore par personne interposée. Ce jour-là, en effet, l'Académie suédoise des sciences décernait le prix Nobel de physique à l'Allemand Klaus von Klitzing pour sa "théorie quantique de l'effet Hall".

Rarement un homme aura laissé une aussi durable empreinte.

## 32. L'ÂGE NUCLÉAIRE

...En 1938, trois chercheurs Otto Hahn, Fritz Strassman et Lise Meitner allaient propulser la physique et le monde dans l'âge nucléaire : en bombardant des noyaux d'uranium avec un faisceau de neutrons, ils observèrent l'apparition de noyaux de baryum et de technétium. Or la masse atomique du baryum ajoutée à celle du technétium était égale à celle de l'uranium. Sous l'action des neutrons il y avait donc fission des noyaux d'uranium...



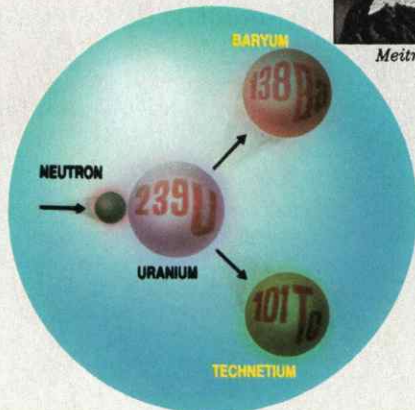
Hahn



Strassman



Meitner



## 33. UNE GOUTTE D'URANIUM

...Et Niels Bohr interpréta cette réaction en décrivant le noyau d'uranium comme une goutte liquide : en recevant un supplément d'énergie, la goutte se déforme et la répulsion coulombienne entre protons de même charge l'emporte sur les forces nucléaires : il y a fission...

