Zeitschrift: Studia philosophica : Schweizerische Zeitschrift für Philosophie = Revue suisse de philosophie = Rivista svizzera della filosofia = Swiss journal of philosophy

Herausgeber: Schweizerische Philosophische Gesellschaft

Band: 12 (1952)

Artikel: Les particules fondamentales de la physique contemporaine

Autor: Saini, Hugo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-883344

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.07.2025

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

Les particules fondamentales de la physique contemporaine

par Hugo Saini

A Georges Mottier,
en hommage posthume

Introduction

Pour les physiciens et les chimistes, la matière est tout ce que nous pouvons voir et toucher. Ce livre, cet arbre, ce volcan ainsi que les gaz, fumées et vapeurs qu'il répand dans l'atmosphère, cette rivière, cette maison sont de la matière. Mais la qualité essentielle de celle-ci est d'avoir un poids. La matière est ce que l'on peut peser. D'une manière plus exacte et plus scientifique, les physiciens pensent que ce qui caractérise fondamentalement la matière est son inertie, ou si vous préférez sa masse, grandeur qui peut être mesurée avec la balance. Cette matière se présente à nos sens sous forme solide, liquide ou gazeuse.

Les chimistes, au cours de leurs recherches ont reconnu, dans les objets qui nous sont fournis par les règnes minéral, végétal et animal, la présence de plus de six cent mille corps différents. En analysant la composition et la structure de ces différentes matières, ils ont trouvé que cette multitude de corps était toujours formée de *substances simples* qu'on a appelées des éléments chimiques. Ceux-ci sont au nombre d'une centaine. L'élément qui porte le numéro un est l'hydrogène. C'est le corps le plus léger. Le dernier élément naturel, le nonante-deux, est l'uranium dont on parle tant; quant aux éléments de nonante-trois à cent, ils ont été créés par synthèse en Amérique ces dernières années. Ces éléments naturels sont donc les substances simples, élémentaires, avec lesquelles tout l'univers sensible est construit. On retrouve la plupart d'entre eux dans les étoiles et je rappelle que l'élément numéro deux, l'hélium, a d'abord été découvert sur le soleil, d'où son nom, lors de l'observation spectroscopique de l'éclipse solaire de 1868. Ce n'est

qu'en 1895 que Sir William Ramsey le mit en évidence sur notre terre en analysant la clévéite qui est un minerai d'uranium.

Vous voyez qu'au point de départ, il y a un de ces réalismes, peut-être un peu grossiers, dont parle Platon dans le *Théétète*; un de ces réalismes qui fait que nous ne reconnaissons pour l'être que ce que nos yeux voient et que nos mains saisissent. Aussi Socrate ne manque-t-il pas d'avertir Théétète: «Aie donc l'œil ouvert et veille à ce qu'aucun des non-initiés ne nous entende. Ce sont des gens qui n'accordent l'être qu'à ce qu'ils peuvent à pleines mains étreindre: les actions, les genèses, tout ce qui ne se voit point, ils se refusent à l'admettre au partage de l'être.» Les physiciens modernes ne peuvent pas se reconnaître dans cette classe des non-initiés. Bien que partis d'un réalisme naïf, ils aboutissent, comme nous le verrons, à un idéalisme que Platon n'aurait peut-être pas désavoué. La matière grossière s'évanouit, il ne reste plus qu'un jeu subtil entre des particules (concepts), les unes plus ou moins fugitives, les autres d'une permanence relative.

*

Qu'est-ce que la matière ? De quoi est-elle faite ? Est-elle simple ou composée ? Ces questions ont, depuis la plus haute antiquité, hanté tous les hommes qui pensent. Il y a vingt-cinq siècles environ, sous le ciel ensoleillé de la Grèce immortelle, les premiers physiciens, à l'aube de la pensée rationnelle, jetaient les bases de l'*Atomisme philosophique et métaphysique*. Pour ces lointains précurseurs, pour Leucippe de Milet, pour Démocrite d'Abdère, et encore pour Epicure d'Athènes dont l'œuvre a inspiré le poète Lucrèce, la matière, le monde et l'univers sont faits de petites particules ultimes: les atomes. *Ces atomes, soumis au «hasard» ou à la «nécessité», sont simples, durs, indivisibles et éternels. Ils se meuvent dans le vide et les Epicuriens disaient qu'ils sont doués de clinamen, mystérieuse propriété qui leur permet de dévier de leur trajectoire pour s'unir finalement entre eux et donner naissance aux choses.*

Dans le Timée, Platon – que l'on pourrait proposer comme patron des physiciens théoriciens – se propose de construire le monde avec les quatre éléments imaginés, dit-on, par Empédocle d'Agrigente, la terre, l'eau, l'air et le feu. En bon géomètre, Platon attribue à ces éléments des formes géométriques composées d'un assem-

blage de triangles; il construit ainsi les fameux solides platoniciens: le cube (six faces), le tétraèdre (quatre faces), l'octaèdre (huit faces), l'icosaèdre (vingt faces) et le dodécaèdre pentagonal (douze faces). Le tétraèdre est attribué au *feu* mobile; à la *terre* qui est la plus difficile à mouvoir des quatre espèces, le cube doit convenir; enfin, *l'eau* doit être structurée par l'icosaèdre et *l'air* par l'octaèdre. Le Démiurge se servit du dodécaèdre pentagonal, qui est la figure idéale, pour le *Tout*, quand il en dessina l'arrangement final. «Or, dit Platon, toutes ces figures, il convient de les concevoir si petites que, dans chaque genre, aucune ne puisse jamais, à cause de sa petitesse, être perçue par nous individuellement. Au contraire, lorsqu'elles se groupent, les masses qu'elles forment sont visibles. Et, pour ce qui touche les rapports numériques concernant leurs nombres, leurs mouvements et leurs autres propriétés, il faut toujours considérer que le Dieu, dans la mesure où l'être de la nécessité se laissait spontanément persuader, les a partout réalisés de façon exacte et a ainsi harmonisé mathématiquement les éléments.»

Ce sont ces mystérieux rapports numériques que les physiciens du XXe siècle devaient découvrir!

*

Ce travail est une réponse à une question qui, bien souvent, m'a été posée par des amis ou des collègues dont l'activité de l'esprit est plutôt orientée du côté des lettres ou de la poésie, question qui précise avec toute l'acuité voulue le fond du problème: «A la suite de quelles expériences et de quelles démarches de leur pensée, les physiciens contemporains sont-ils arrivés à la certitude que la matière est faite d'atomes?»

Afin de mettre ordre et clarté dans cette réponse, j'examinerai d'abord les faits qui se produisent à l'échelle humaine, puis ceux, plus complexes, qui se déroulent à l'échelle atomique.

I. LES PHÉNOMÈNES A L'ÉCHELLE HUMAINE

Les premiers faits expérimentaux qu'il faut connaître sont certainement ceux qui furent observés, à la fin du XVIIIe siècle et au commencement du XIXe par Antoine-Laurent *Lavoisier*, par Louis-

Joseph *Proust* et John *Dalton*, par Joseph-Louis *Gay-Lussac* et Amadeo *Avogadro*. Ils constituent le point de départ – à notre échelle humaine – de la théorie moléculaire et atomique de la matière. On me permettra donc de rappeler très brièvement de quoi il s'agit.

Il résulte des travaux de Lavoisier, effectués vers 1785, que la matière se transforme au cours des réactions chimiques, mais qu'elle ne disparaît pas; même si, comme c'est le cas dans une combustion, elle cesse d'être visible à nos yeux; elle peut changer totalement d'aspect et de propriétés, mais on en retrouve toujours le même poids. Ainsi, la masse des corps formés au cours d'une réaction chimique est la même que la masse des corps initiaux qui ont participé à la réaction. C'est la *loi de la conservation de la matière*. Lavoisier l'a aussi formulée sous forme d'aphorisme en disant: «Rien ne se perd, rien ne se crée.» Cette loi a été vérifiée des milliers de fois par des pesées très précises. Ainsi, lorsqu'on brûle 12 grammes de carbone pur, il faut fournir 32 grammes d'oxygène pour cette opération, et l'on obtient toujours 44 grammes d'anhydride carbonique; le petit morceau de diamant qu'on vient de brûler a été transformé en un gaz incolore par sa combinaison avec l'oxygène. L'énoncé de ce fait, si on le généralise, entraîne immédiatement la proposition suivante: lorsque des éléments chimiques se combinent pour former un composé défini, le rapport des masses des divers éléments entrant en jeu est toujours le même. C'est la loi découverte par Proust et par Dalton. Lors de la synthèse de l'eau, il faudra toujours unir 8 grammes d'oxygène à un gramme d'hydrogène, pour obtenir 9 grammes d'eau. Si l'on prenait 10 grammes d'oxygène, il y aurait un gramme de cette substance de trop qui n'entrerait pas en réaction et qui resterait à l'état d'oxygène.

Il peut aussi arriver que deux éléments se combinent en différentes quantités pour former des composés distincts. L'oxygène et l'azote, par exemple, peuvent donner plusieurs corps différents. Les chimistes appellent protoxyde d'azote le composé pour lequel 16 grammes d'oxygène se combinent à 28 grammes d'azote. Le suivant, l'oxyde d'azote, exige que 32 grammes d'oxygène se fixent sur les 28 grammes d'azote. Et si l'on combine respectivement 48 grammes, 64 grammes et 80 grammes d'oxygène, toujours à 28 grammes d'azote, on forme encore trois autres composés qui sont l'anhydride nitreux, le peroxyde d'azote et l'anhydride nitrique.

Un Anglais, John Dalton, énonça vers 1804 la loi généralisant cette constatation: Il existe un rapport simple entre les différentes masses d'un élément A (ici l'oxygène) qui se combine à une masse constante d'un autre élément B (ici l'azote). Dans l'exemple que j'ai choisi, chacun peut voir immédiatement que les différentes masses d'oxygène qui s'unissent à la même masse d'azote sont entre elles dans les rapports 1, 2, 3, 4 et 5. Dalton eut alors l'idée que chacun des éléments devait être formé par un très grand nombre de particules très petites, toutes identiques pour un élément donné. Ces particules devaient être insécables – on pouvait donc les appeler des atomes – et elles devaient rester inchangées au cours des diverses réactions chimiques. «Tous les changements que nous pouvons produire consistent à séparer des particules (atomes) qui sont dans un certain état de cohésion ou de combinaison, ou encore à lier entre elles celles qui étaient auparavant séparées[1].»

Grâce à cette théorie des atomes chimiques, une explication claire et cohérente des lois est immédiate. On comprend pourquoi les rapports des masses des constituants doivent être des nombres rationnels, généralement simples. (Un nombre est rationnel lorsqu'il est entier ou égal au quotient de deux nombres entiers.) Nous saisissons pourquoi les cinq composés de l'azote, mentionnés plus haut, doivent être obtenus en combinant successivement aux atomes d'azote un atome d'oxygène pour former le premier corps, puis deux atomes d'oxygène, puis trois, quatre et cinq.

Les chimistes sont actuellement d'accord pour dire qu'un atome est la plus petite masse d'un élément pouvant entrer en réaction. *Provisoirement*, on peut, si cela est nécessaire, se le représenter comme une petite sphère compacte. Pour un élément déterminé, tous les atomes chimiques auront la même masse et seront indestructibles.

Dans un composé, l'eau par exemple, les atomes des éléments s'unissent pour former des molécules. Ainsi, la molécule d'eau sera constituée par deux atomes d'hydrogène et un d'oxygène. La molécule devient alors la plus petite partie d'une espèce chimique pure pouvant exister à l'état libre. Les molécules d'un composé bien défini seront toutes identiques, elles auront une masse qui est la somme des masses des atomes qui la composent. Cette notion de

---

[1] «A new system of Chemical Philosophy», 1808.

molécule a été imaginée par l'Italien Amadeo Avogadro lorsqu'il chercha à comprendre les résultats obtenus par le Français Gay-Lussac. Celui-ci en étudiant les combinaisons des éléments à l'état gazeux – l'azote et l'hydrogène ou l'hydrogène et l'oxygène – remarqua, lorsque deux éléments gazeux se combinent pour former un composé, qu'ils ne le font pas seulement selon un rapport constant en poids, mais aussi selon un rapport constant, simple et rationnel, en volume. Peu d'années après ces expériences, Gay-Lussac établit encore que le coefficient de dilatation des gaz sous l'action de la température est constant et le même pour toutes les substances gazeuses. Réfléchissant à ces résultats et constatant que les gaz différents se comportent de la même manière, Avogadro fut contraint d'énoncer une hypothèse qui donnait la clé de la composition atomique d'une molécule : des volumes égaux de gaz différents pris dans les mêmes conditions de température et de pression devaient contenir le même nombre de molécules. Cet énoncé ne fut universellement admis qu'en 1880 ; aujourd'hui il constitue une des lois fondamentales de la structure atomique de la matière. Dans la pensée d'Avogadro, c'était ce nombre constant de molécules par unité de volume – le même pour toutes les substances différentes pourvu qu'elles fussent à l'état de gaz – qui devait être responsable du comportement identique des différents gaz. A partir du XXe siècle, les physiciens furent assez heureux et assez habiles pour mesurer ce nombre par des méthodes très variées. A la suite de ces mesures, les physiciens et les chimistes pensent que les molécules et les atomes ont le même degré de réalité que celle que les historiens attribuent à Napoléon 1er ou à Monsieur Vincent Auriol.

Les rapports numériques simples et rationnels qui sont l'essence des lois présidant à la composition des différentes substances matérielles – et cela aussi bien pour les masses, les volumes gazeux et les volumes des cristaux – doivent s'interpréter en admettant que la matière est formée de particules, les atomes et les molécules, de dimensions et de masses bien définies capables de s'unir entre elles.

Il existe donc, au niveau des réactions chimiques habituelles et pour chaque élément, un plus petit corpuscule commun – l'atome – en dessous duquel on ne peut pas descendre. S'il n'y avait pas de plus petite particule, le physicien se trouverait placé dans la même situation que le mathématicien lorsqu'il cherche à définir les différentes espèces de nombres et à comprendre le continu mathé-

matique. Celui-ci n'est jamais rempli puisqu'on ne peut pas trouver de plus petit nombre immédiatement inférieur ou un plus grand nombre immédiatement supérieur à un nombre donné quelconque. Par exemple, il est impossible de trouver un nombre qui précède immédiatement le nombre 2; car entre 1,999999 et 2,000000 vous pouvez encore placer une infinité d'autres nombres. Par suite, le rapport entre deux nombres quelconques, pris au hasard parmi les nombres réels, peut n'être ni simple ni rationnel et on ne peut établir aucune loi. On peut même affirmer que si l'on prend les deux nombres du rapport vraiment au hasard, on ne formera presque jamais de rapport rationnel, car dans l'ensemble des nombres réels, les nombres irrationnels sont *infiniment* plus nombreux que les nombres rationnels.

Ainsi, à la question: la matière est-elle continue ou au contraire est-elle construite de particules en nombre très grand, mais fini, l'expérience répond: la matière n'est pas continue, car les corps ne sont pas divisibles à l'infini et il existe une plus petite particule qui est l'atome chimique.

Dans la seconde partie, je montrerai que ces molécules et ces atomes ne sont pas immobiles. La matière qui nous semble inerte et stable est, en fait, constituée par des molécules sans cesse en mouvement, dont la vitesse a été directement mesurée. En outre, les atomes ne sont ni compacts, ni insécables comme le pensaient, au siècle dernier, les fondateurs de l'atomisme expérimental. Il existe, à l'échelle atomique, des particules fondamentales – les constituants des atomes – possédant des propriétés inhabituelles à notre niveau humain.

II. LES PHÉNOMÈNES A L'ÉCHELLE ATOMIQUE

1. La diffusion révèle le mouvement désordonné des molécules.

Voici la brève description d'une très belle expérience que chacun devrait avoir vue au moins une fois dans sa vie. Si l'on place un cristal coloré, du sulfate de cuivre qui forme des cristaux bleus, au fond d'un récipient rempli d'eau, on observe après quelques heures que le cristal s'effondre. Une teinte bleue se répand peu à peu dans

toute l'eau. Quelques semaines plus tard, les molécules «bleues» du cristal, bien qu'environ dix fois plus lourdes que celles de l'eau, se sont répandues, par diffusion, dans tout le liquide. Les molécules d'eau, par leur vive agitation, ont frappé le cristal et l'ont lentement démoli. Puis, après cette démolition, les molécules bleues ont été, sous l'action de l'agitation moléculaire, éparpillées dans tout le récipient.

Un phénomène analogue, mais beaucoup plus rapide, s'observe si l'on met deux gaz en présence. C'est la célèbre expérience de Claude-Louis *Berthollet* qui «vit», pour la première fois, au siècle dernier, la diffusion du gaz carbonique dans l'hydrogène. Il avait mis en communication un ballon rempli d'hydrogène avec un autre ballon rempli de gaz carbonique. Bien que plus de vingt fois plus massives et placées en bas, les molécules de gaz carbonique se répandirent spontanément parmi celles d'hydrogène. La diffusion finit par produire un mélange homogène. Il en est de même des solides. En superposant des blocs métalliques de quelques centimètres de hauteur, en ayant la précaution de faire un bon contact à la surface de séparation, on constate, après quelque temps, que les deux métaux ont diffusé l'un dans l'autre. Si l'on superpose de l'étain sur du plomb, on peut déceler une zone de diffusion de quelques millimètres où l'on trouve des atomes de plomb et des atomes d'étain.

Ce mouvement spontané et permanent des molécules peut fort bien déplacer des particules plus grosses (microscopiques). C'est le mouvement brownien, observé pour la première fois en 1827 par le botaniste Robert *Brown*. En regardant au microscope de la fumée contenue dans une petite boîte, éclairée latéralement par un faisceau lumineux très intense et très fin, on aperçoit un fourmillement de petites particules brillantes sur un fond noir. Ce sont les grains de fumée qui sont soumis aux chocs très nombreux des molécules de l'air. En suivant pendant un certain temps un de ces granules, on le voit se «dandiner», aller et venir comme un homme ivre. L'œil émerveillé peut suivre pendant des heures ces particules dans leurs mouvements désordonnés. Mon maître de géologie, le professeur Léon Collet, remarquait combien il est émouvant d'observer ces mouvements dans l'inclusion liquide de certains cristaux de quartz; cette agitation perpétuelle est là depuis la formation de la croûte terrestre, depuis des millions d'années.

En dénombrant ces granules, comptés à différentes hauteurs, le Français Jean *Perrin* a pu, au début du siècle, savoir combien il y a de molécules dans un volume déterminé. De très nombreuses autres méthodes ont toutes donné le même résultat. Aussi sait-on aujourd'hui que dans un centimètre cube de gaz pris à l'état normal (0 degré centigrade et pression de 76 centimètres de mercure), il y a un nombre n de molécules représenté par

$n = 27000000000000000000$ (soit $27 . 10^{18}$ molécules).

La vitesse de ces molécules est la plus grande dans les gaz, état où les molécules sont libres. Elle est plus petite dans les liquides et les solides, où les corpuscules sont fortement liés. Dans les conditions normales, la vitesse moyenne de la molécule d'hydrogène est voisine de deux kilomètres à la seconde, celle de la molécule d'oxygène, dont la masse est seize fois plus grande, est voisine de cinq cents mètres par seconde.

2. La division en couches minces donne une première limite pour les dimensions des molécules.

Il existe plusieurs procédés pour obtenir de la matière en couches très minces, pour former un film. Les batteurs d'or savent préparer des feuilles si minces qu'elles n'ont plus qu'un dix-millième de millimètre d'épaisseur (10^{-5} centimètre). Mais une autre technique beaucoup plus élégante consiste à verser une goutte d'huile végétale sur de l'eau. L'huile s'étale et finit par faire une couche si ténue qu'elle n'a plus qu'une seule épaisseur de molécules. On aurait un effet analogue, c'est une comparaison grossière, en vidant un sac de billes sur une table. Chacun comprend que l'on peut ainsi obtenir une seule couche de billes. C'est bien ce qui se passe avec les molécules. Connaissant le volume de la goutte et la surface qu'elle forme, il n'est pas difficile de déterminer l'épaisseur de la couche, épaisseur qui est très voisine du diamètre d'une molécule. La molécule de trioléine, un des constituants de l'huile d'olive, étalée sur de l'eau a une épaisseur de 0,0000001 centimètre (10^{-7} cm).

D'autres procédés qu'il est inutile de décrire ici, d'autres mensurations, ont montré que le diamètre d'un atome donné est de l'ordre de 0,00000002 centimètre ($2 . 10^{-8}$ cm). Alignés, il faudrait en mettre bout à bout environ cinquante millions pour obtenir une longueur d'un centimètre. Enfin, il est clair que la connaissance du nom-

bre et des dimensions d'un atome ou d'une molécule peut encore permettre de déterminer leur masse. Ainsi, l'atome d'hydrogène a un diamètre voisin de 0,00000001 centimètre (10^{-8} cm) et une masse de 0,000000000000000000000000167 gramme ($1{,}67 . 10^{-24}$ gramme).

3. Le passage du courant électrique dans les solutions liquides (les électrolytes) ou dans les gaz permet de dire que l'atome et la molécule sont porteurs de charges électriques.

Lorsqu'une certaine quantité d'électricité, amenée par deux électrodes, traverse un bain contenant un sel de cuivre par exemple, l'expérience montre qu'un dépôt de ce métal a lieu sur l'électrode négative. L'Anglais Michaël *Faraday* a trouvé la loi de ce phénomène. Il existe un rapport constant – encore une fois! – entre la masse de la substance déposée sur les électrodes et la quantité d'électricité qui a traversé la solution. Dans la perspective atomique, il faut voir que la même particule transporte à la fois une masse matérielle et une charge électrique; cela découle immédiatement de la loi de Faraday. De plus, cette charge électrique peut se séparer de l'atome et se fixer sur un autre atome.

On appelle *ion* un atome qui a gagné ou perdu une ou plusieurs charges électriques. Il existe des ions positifs et des ions négatifs.

A la fin du siècle dernier, à partir de 1880, l'idée de la structure atomique de l'électricité était dans l'air. C'est le physicien anglais Johnstone *Stoney* qui formula le plus clairement l'hypothèse d'un atome d'électricité porteur d'une charge électrique - unité bien définie. On a donné le nom d'*électron* à cet atome d'électricité. L'expérience montre que l'électron porte une charge négative.

4. Les célèbres mesures de l'Américain Robert Andrew Millikan effectuées au début du siècle donnent la valeur de la charge électrique de l'électron.

A la même époque, notre concitoyen Ch.-Eug. *Guye* mesurait, dans son laboratoire, à l'Université de Genève, la variation de la masse de ces particules en fonction de leur vitesse. Le savant genevois vérifia ainsi l'exactitude de la fameuse formule d'Einstein de l'équivalence de la masse et de l'énergie qui est à la base des travaux sur l'énergie atomique.

Des milliers de mesures ultérieures ont solidement établi que les ions – soit dans un liquide, soit dans un gaz – sont des atomes qui

ont gagné ou perdu un petit nombre d'électrons. L'atome a donc une structure complexe, il contient un certain nombre d'électrons.

Cet électron – ou atome d'électricité – se présente comme un objet aux propriétés singulières. Sa masse est très petite puisqu'elle est 1837 fois plus petite que celle de l'atome d'hydrogène qui est l'atome le plus léger. Sa valeur est: masse = 0,000000000000000000000000000091 gramme (soit $9{,}1 \,.\, 10^{-28}$ gramme). La charge électrique qu'il porte est telle qu'il faut que six milliards de milliards d'électrons passent en une seconde pour faire un courant électrique d'un ampère.

Si l'on a pu déterminer avec beaucoup de patience et d'ingéniosité la charge et la masse de cet électron, on ne sait rien, par contre, de ses dimensions. Il est bien évident que la théorie de l'électricité permet de calculer le diamètre à donner à une sphère qui porterait la charge électrique d'un électron; on trouve un ordre de grandeur de 10^{-13} centimètre, soit cent mille fois moins que le diamètre d'un atome, c'est le diamètre classique de l'électron. Mais on n'a aucun moyen de mesurer directement les dimensions de cette étrange particule. L'électron a-t-il un diamètre ou est-il ponctuel ? On ne le sait pas. Les deux hypothèses conduisent d'ailleurs chacune à un groupe distinct de difficultés, difficultés non encore parfaitement surmontées.

5. L'analyse de la composition du rayonnement émis par un corps incandescent, un four ou un astre par exemple, a permis en 1900, à Max Planck, et en 1905, à Albert Einstein, d'affirmer que la lumière, elle aussi, a une structure atomique.

Les grains de lumière, appelés photons, ont une masse qui est proportionnelle à leur fréquence, c'est-à-dire à leur «couleur», mais ils ne portent pas de charge électrique. La flamme d'une bougie en émet chaque seconde environ un milliard de milliards. La masse du photon responsable de la couleur violette est deux fois plus grande que celle du «photon rouge». Quant à la masse des photons formant les rayons X et les rayons gamma des corps radioactifs, elle est cent mille à plusieurs millions de fois celle des photons rouges.

Ainsi, la lumière présente, à côté de son aspect ondulatoire qui est un phénomène continu, un aspect corpusculaire. Je précise ici que ce qui caractérise une onde est la possibilité d'obtenir des interférences, c'est-à-dire des zones, dans l'espace, où il y a alternativement de la lumière et de l'obscurité. Le *fading*, familier aux audi-

teurs de la radio, est une interférence qui se déroule au cours du temps. D'autre part, ce qui caractérise une particule, un grain, un corpuscule, c'est le fait d'avoir une masse et une vitesse et de pouvoir donner un choc, élastique ou non, contre un autre corpuscule.

C'est parce que la lumière présente ces deux phénomènes typiques d'interférence et de chocs, qu'on lui attribue un aspect ondulatoire et un aspect corpusculaire. Le choc direct d'un photon contre un électron libre et immobile, avec toutes les caractéristiques d'un choc mécanique (conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie), a été mis en évidence, pour la première fois en 1923 par l'Américain Arthur *Compton*. Il employa pour cette remarquable expérience les rayons X durs du molybdène qu'il dirigea sur les électrons du graphite. Dans cette expérience, la masse du photon incident était environ vingt-cinq fois plus petite que celle de l'électron choqué.

L'aspect corpusculaire du photon s'affirme d'autant plus que sa fréquence, c'est-à-dire son énergie, est plus grande. Les photons de la lumière sensible à notre œil, du rouge au bleu, produisent de magnifiques phénomènes d'interférences, mais leur effet corpusculaire, vu leurs très petites masses, est très peu marqué. Les rayons X, dont la masse est cent mille fois plus grande, offrent, avec la même facilité, de belles figures d'interférences et de beaux effets corpusculaires; les rayons gamma du radium, d'une masse beaucoup plus grande encore, manifestent davantage leur effet corpusculaire et donnent très difficilement, avec les moyens connus, des phénomènes d'interférences. Enfin, dans les rayons cosmiques, les énergies des particules sont tellement grandes, et le nombre de celles-ci est si petit, que seul l'aspect corpusculaire se manifeste. Ainsi, à l'une des extrémités du spectre, là où il y a beaucoup de photons de faible énergie, c'est l'aspect ondulatoire qui prédomine, et c'est ce qui se passe avec la lumière qui nous est familière; mais à l'autre extrémité du spectre, il y a très peu de photons et ceux-là sont de très grande énergie: c'est alors l'aspect corpusculaire qui apparaît. Si notre œil était sensible à ces photons durs, notre vision du monde serait très différente de celle que nous en avons. C'est précisément cette vision que le physicien tâche de reconstituer lorsqu'il a compris ce que sont les photons et leurs propriétés.

L'expression mathématique de l'énergie du photon est le produit de sa fréquence par une certaine constante trouvée par Planck.

Cette constante de Planck, représentée par la lettre h, est souvent désignée sous le nom de quantum élémentaire d'action. Sa valeur numérique, qui est extraordinairement petite avec nos unités usuelles, a pour valeur $h = 6{,}55 \,.\, 10^{-27}$ erg. seconde.

Cette constante joue un rôle fondamental dans la détermination des processus responsables de l'émission ou de l'absorption de la lumière par un atome. Un atome ne peut pas émettre, absorber ou échanger de l'énergie en quantités quelconques, mais seulement par quantités, par paquets, par quanta précisément déterminés par la constante d'action de Planck et la fréquence. Cette mystérieuse constante a ouvert des horizons nouveaux et inattendus surtout depuis que Werner *Heisenberg* en a fait la base de ses relations d'incertitude.

6. Les rayons X nous ont appris, à la suite des travaux de Charles Glower Barkla et de Henry G. Moseley, combien il y a d'électrons dans un atome.

De plus, ces rayons, grâce à leur pénétration profonde, ont permis de «voir» l'arrangement des atomes dans la matière à l'état solide, c'est-à-dire dans les cristaux. Enfin, les rayons X ont encore permis de se rendre compte de la façon dont les électrons étaient disposés à l'intérieur des atomes des divers éléments et de connaître leurs niveaux d'énergie.

7. La radioactivité naturelle des éléments lourds, découverte faite par les Français Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie, a permis aux physiciens anglais du célèbre laboratoire Cavendish de Cambridge, Sir Ernest Rutherford, C. T. R. Wilson et H. Geiger de compter directement les atomes un à un, et de suivre leur trajectoire dans l'air.

Le phénomène radioactif a encore montré que l'atome contient, en plus des électrons négatifs, un noyau porteur de charges positives. Les mesures de Rutherford et de ses collaborateurs ont donné les dimensions de ce noyau et la valeur exacte du nombre de charges positives qu'il renferme. On a trouvé ainsi qu'il y a autant de charges positives dans le noyau que d'électrons négatifs dans l'atome considéré. L'atome, dans son état normal, forme ainsi un édifice électriquement neutre. Ayant mesuré le nombre de ces charges pour tous les atomes, on s'est aperçu que l'hydrogène avait un atome formé d'un seul électron et d'un noyau porteur d'une seule charge

électrique. C'est l'atome numéro un. L'élément suivant, l'hélium, a un atome qui contient deux électrons et un noyau qui porte deux charges positives. L'atome numéro nonante-deux, l'uranium, a un édifice atomique très compliqué puisqu'il contient 92 électrons et que son noyau renferme 92 charges positives.

Mais, demanderez-vous, en quoi consiste la radioactivité ? Un élément radioactif, le radium pour fixer les idées, émet spontanément un rayonnement capable d'impressionner la plaque photographique, de traverser des écrans métalliques minces et d'ioniser les gaz, c'est-à-dire de les rendre conducteurs de l'électricité. L'analyse minutieuse de ce rayonnement a révélé qu'il était complexe. Il est formé par un flot de noyaux d'hélium – appelés particules alpha – lancés à des vitesses de l'ordre de vingt mille kilomètres par seconde. Ce rayonnement contient encore un flot d'électrons – les rayons bêta – lancés à des vitesses pouvant dépasser cent mille kilomètres par seconde et un rayonnement gamma de même nature que les rayons X et la lumière.

Au moyen d'une balance électromagnétique spéciale, Rutherford mesura la masse d'une particule alpha, c'est-à-dire d'un noyau d'hélium. Il trouva que cette masse était presque la même que celle de l'atome d'hélium tout entier. Un autre savant anglais, Francis William *Aston*, consacra une bonne partie de son activité à mesurer avec une balance perfectionnée la masse des noyaux des autres atomes. Le résultat montra que les noyaux avaient très sensiblement la même masse que l'atome tout entier. Résultat évident puisque la masse des électrons est très faible comparée à celle d'un atome.

Rutherford étudia aussi le parcours des particules alpha dans l'air et dans divers écrans. Ces noyaux d'hélium, de grandes vitesses, sont comparables à de minuscules projectiles. Ils peuvent traverser une couche d'air de dix centimètres d'épaisseur. Le volume et le nombre des atomes étant connus, il est nécessaire que les particules alpha traversent des centaines de milliers d'atomes avant de s'arrêter. Ce passage ne pourrait pas se faire si l'atome était compact ; l'atome doit être un édifice lacunaire. De plus, les grands angles de la déviation subie par les particules alpha montrent que les noyaux sont de très petites dimensions et portent tous des charges électriques de signe positif.

Le moment est donc venu, car nous avons maintenant les données nécessaires, de montrer comment un atome est schématique-

ment construit. En effet, il ne suffit pas de voir se dérouler sous nos yeux une expérience de physique, si belle soit-elle, pour comprendre clairement ce qui se passe. Il est encore nécessaire d'inventer, d'imaginer un schéma théorique qui permette d'interpréter ce que l'on expérimente. Au niveau du monde atomique, l'esprit créateur va jouer pleinement son rôle. Remarquons enfin que ces schémas sont des représentations qui ont, avec l'atome, le même rapport que celui qui peut exister entre le plan d'une ville et cette ville elle-même, avec toutes ses particularités, son animation et la beauté de ses habitants. Mais si le plan est bien fait, s'il est exact, on peut s'orienter sans erreur dans une ville inconnue. Il en est de même pour les schémas et les théories de l'atome. Ils doivent permettre de s'orienter au milieu de faits d'une réelle complexité et même de prévoir des propriétés ou des effets non encore découverts. Le but suprême du travail du physicien théoricien est de calculer à l'avance des résultats qui seront vérifiés par des expériences ultérieures.

8. Depuis le début du XXe siècle, différents modèles d'atomes ont été proposés. Le premier d'entre eux fut imaginé par J. J. Thomson, savant qui contribua à la découverte de l'électron et qui fut le premier à déterminer directement la masse des atomes pris séparément.

Mais il appartenait à Sir Ernest Rutherford, riche des nombreux résultats acquis par l'étude du comportement des particules alpha (noyaux d'hélium) à travers la matière, l'air et de nombreux autres corps, de donner un modèle d'atome qualitativement exact. Pour ce savant, un atome est formé par un noyau central de petites dimensions, tandis que les électrons sont répartis autour de ce noyau dans une région relativement grande qui correspond au volume atomique total. Le noyau est porteur des charges positives et de la presque totalité de la masse; les électrons périphériques, par leur nombre égal à celui des charges positives, rendent électriquement neutre l'édifice atomique.

D'après cette vue, l'atome d'hydrogène est formé d'un noyau très simple portant une charge positive et une unité atomique de masse, c'est le proton. Il est accompagné à une certaine distance par un seul électron. C'est l'atome numéro un. L'atome numéro nonante-deux, l'uranium, a un noyau portant 92 charges positives. Dans sa périphérie, les 92 électrons, placés dans des conditions d'énergie parfaitement connues, assurent la stabilité de ce système.

Si le modèle proposé par Rutherford est qualitativement exact, il est malheureusement dynamiquement instable, car les électrons devraient tomber sur le noyau, lorsque l'atome émet de la lumière. C'est le très grand physicien danois Niels *Bohr* qui proposa, en 1913, un modèle qui semble, après quelques retouches ultérieures, devoir être le modèle définitif. L'idée de Bohr est que les électrons périphériques ne peuvent pas se trouver à des distances quelconques du noyau. Ils sont, bien au contraire, obligés de tourner sur des orbites bien déterminées où la constante d'action de Planck joue un rôle fondamental.

Les retouches ultérieures apportées par les idées récentes de Louis de *Broglie*, de *W. Heisenberg* et d'*E. Schrödinger* consistent, essentiellement, à rendre les trajectoires beaucoup plus floues qu'une simple courbe, en ce sens que l'électron ne se trouve plus sur une ligne bien définie, mais semble être réparti en un nuage tout autour du noyau. L'expérience a en effet montré, par l'analyse de la diffusion des rayons X tombés sur un atome déterminé, qu'un électron périphérique pouvait se trouver un peu n'importe où autour du noyau; il existe cependant une probabilité très grande pour que cet électron soit au voisinage immédiat de l'orbite calculée par N. Bohr.

Un atome qui reçoit de l'énergie est capable de rayonner de la lumière. Celle-ci peut appartenir au spectre visible, ou aux domaines ultra-violet, infra-rouge, ou encore à celui des rayons X. Des milliers de travaux, échelonnés sur une quarantaine d'années, faits avec des appareils d'une sensibilité inconcevable à un profane, ont permis de déterminer l'état dans lequel se trouvent les électrons périphériques et cela pour tous les atomes des nonante-deux éléments naturels. En d'autres termes, on connaît aujourd'hui, grâce à la lumière qu'ils émettent, la structure électronique de tous les atomes ainsi que l'énergie qu'il faut fournir à l'un d'eux pour arracher un électron: pour créer un ion.

Bien plus, un principe énoncé par Wolfgang *Pauli*, en 1925, le *principe d'exclusion* explique parfaitement pourquoi les nonante-deux éléments forment des familles ayant des propriétés physiques et chimiques bien définies.

Le principe d'exclusion de Pauli peut s'énoncer ainsi: «Il est exclu que deux électrons aient les mêmes paramètres mathématiques, l'un d'eux, au moins, doit être différent.» Cela signifie qu'il

ne peut pas exister, à l'intérieur d'un atome déterminé, plusieurs électrons qui soient identiquement dans le même état.

La question à laquelle les physiciens s'attaquent en ce moment est celle de la structure nucléaire de l'atome. C'est dans le noyau que résident la masse et les caractères spécifiques d'un élément, caractères qui différencient un atome d'or d'un atome de plomb. Enfin, c'est dans ce minuscule espace que se réfugie la redoutable énergie atomique. Le diamètre du noyau, tel qu'il a été effectivement mesuré par Rutherford et d'autres chercheurs est environ cent mille fois plus petit que celui de l'atome tout entier. Il résulte de ces mesures que le volume d'un noyau a pour ordre de grandeur

$$v = 0{,}0000000000000000000000000000000000001 \text{cm}^3 (\text{soit } 10^{-36} \text{cm}^3).$$

Les données actuelles permettent de dire, avec *W. Heisenberg*, que le noyau d'un atome est formé uniquement de protons et de neutrons. Le *proton* est un noyau d'hydrogène et le *neutron* un objet qui a sensiblement la même masse que le proton, mais qui est neutre; il ne porte pas de charge électrique. Aujourd'hui, les physiciens sont d'accord pour penser que *proton et neutron sont deux aspects différents d'une même particule appelée le nucléon.* On connaît le nombre exact de protons et de neutrons qui sont contenus dans le noyau de n'importe quel élément.

Le noyau d'un atome radioactif, comme celui du radium, laisse échapper un de ses constituants, particulièrement stable, formé de deux protons et de deux neutrons, qui est une particule alpha ou un noyau d'hélium. Après ce départ, le noyau restant, qui a perdu deux charges positives, n'est plus un noyau de radium, mais bien le noyau d'un nouvel élément appelé Radon. C'est un gaz rare que l'on trouve dans certaines sources.

Ainsi, on le voit, la radioactivité est le nom que l'on a donné au phénomène spontané de transmutation d'un élément. Le radium, d'ailleurs, n'est lui-même qu'un des chaînons d'une grande famille radioactive dont l'ancêtre est l'uranium et le dernier membre le plomb. Plus d'une quinzaine d'éléments intermédiaires, tous engendrés par des transmutations, séparent les deux extrémités de cette intéressante famille.

Grâce aux particules alpha, émises par l'un des corps radioactifs naturels, lancées sur des éléments légers, Rutherford a pu provoquer des transmutations artificielles. Il est ainsi parvenu entre

autres à transmuter de l'azote en oxygène et de l'aluminium en silicium. Aujourd'hui on peut transmuter presque tous les éléments. Ce sont des opérations courantes dans les laboratoires nucléaires.

9. Les transmutations naturelles dues aux rayons cosmiques ou artificiellement obtenues dans les laboratoires ont permis, depuis une vingtaine d'années, de découvrir de nouvelles particules: le neutron, l'électron positif et l'importante famille des mésons.

Les rayons cosmiques sont constitués par un agent ionisant complexe, formé de corpuscules électrisés ou neutres dont l'énergie est très grande: la valeur maximum observée est un million de fois supérieure à celle que développe la scission de l'atome d'uranium. Ce rayonnement cosmique est capable de traverser des écrans de plomb atteignant plus d'un mètre d'épaisseur. Il parvient sur toute la surface du globe terrestre d'une manière régulière et constante, comme une grêle ininterrompue, et cela quels que soient l'heure, le jour ou la saison. L'intensité de ce rayonnement, qui est, au niveau de la mer, de quelques particules par centimètre carré et par minute, ne dépend ni de la position du soleil, ni de celle des étoiles, ni de celle de la voie lactée. On en conclut que ce sont des messagers énigmatiques qui nous viennent du ciel, du cosmos tout entier.

Depuis leur découverte, au début de notre siècle, des milliers de recherches, d'expériences ingénieuses et fort coûteuses ont été faites sur tous les points du globe, à toutes les latitudes, du bord de la mer aux sommets les plus élevés, dans la profondeur des lacs et des mines, jusque dans la haute stratosphère où des ballons spécialement équipés ont atteint des altitudes de près de quarante mille mètres. Des centaines de savants, parmi les plus illustres de toutes les nations du monde, ont travaillé sans répit pour tâcher d'éclaircir la nature et les propriétés de ces rayons.

On sait maintenant que ce rayonnement est formé de deux groupes distincts de corpuscules: un groupe *mou* qui est absorbé par environ dix centimètres de plomb, et un groupe *dur* qui parvient à traverser plus d'un mètre de plomb. Le groupe mou comprend des électrons positifs et négatifs accompagnés par des photons gamma tels que ceux qu'émettent les corps radioactifs. Quant au groupe dur, il est formé par une nouvelle particule qu'on appelle méson. C'est un objet neutre ou électriquement chargé positif ou négatif,

dont la masse est quelques centaines de fois celle de l'électron, d'où son nom d'électron lourd comme on l'a désigné au début, au moment de sa découverte.

Mais par quelles techniques peut-on voir directement ces phénomènes atomiques ? On dispose actuellement pour cela de procédés différents : la chambre de Wilson qui permet de suivre la trajectoire individuelle d'une seule particule, le compteur de Geiger qui signale le passage d'une particule isolée, électron, ion ou photon, et enfin la nouvelle technique des plaques photographiques mise au point par l'Ecole de Bristol sous l'impulsion de *C. F. Powell.*

Voici, en quelques mots, le principe sur lequel repose ces différentes techniques.

Un ion est une molécule ou un atome qui porte un excès de charges électriques ; il existe des ions positifs et des ions négatifs. Dans l'air normal que nous respirons, il y a en moyenne, par centimètre cube, un millier de ces ions, dispersés parmi les vingt-sept milliards de milliards de molécules neutres.

Un électron rapide qui traverse l'air normal laisse derrière lui un sillage formé par une traînée d'ions, à raison d'une cinquantaine de paires par centimètre. Une particule alpha – noyau d'hélium – émise par le polonium à la vitesse de seize mille kilomètres par seconde provoque lors de son trajet dans l'air normal cent cinquante mille paires d'ions sur un parcours de quatre centimètres. Après cette course, la particule alpha, qui a dépensé toute son énergie à créer les ions, s'arrête et se perd au milieu des autres molécules de l'air ambiant.

Les ions ont la propriété de condenser sur eux la vapeur d'eau saturée ; chacun d'eux devient ainsi le centre d'une minuscule gouttelette. Comme il se forme des milliers de ces ions par centimètre, lors du passage d'un corpuscule de grande vitesse, il se forme aussi des milliers de gouttelettes, soit une traînée blanchâtre fugitive, d'aspect laiteux, facile à voir et à photographier. La chambre de Wilson, du nom de son inventeur qui l'a conçue en 1912 déjà, est un dispositif formé par un cylindre plein de vapeur d'eau saturée, dont on peut faire varier brusquement la pression, ce qui provoque la condensation de l'eau sur les ions présents et par suite rend leur trajectoire visible. Aujourd'hui, des chambres automatiques prennent des milliers de photographies par jour et ont ainsi fourni une documentation d'une richesse inouïe. Comme on peut faire des

mesures sur ces clichés, les expérimentateurs parviennent à connaître la nature, la charge électrique, la vitesse et l'énergie des particules qui ont traversé la chambre. Les électrons, dont la masse est environ deux mille fois plus petite que celle du proton, laissent derrière eux une trace, une traînée fine et irrégulière, alors que les protons ou les particules alpha donnent une trajectoire large et quasi rectiligne.

Un autre dispositif pour déceler les particules est le compteur de Geiger. C'est un tube traversé axialement par un fil très fin, porté à un potentiel de deux mille volts environ. Chaque particule qui traverse ce cylindre crée un petit nombre d'ions provoquant une très faible décharge électrique qui, convenablement amplifiée, actionne un compteur enregistreur. On a donc la possibilité de connaître le nombre exact de particules qui passent en un temps donné.

La technique des plaques photographiques met en évidence la trace ionisante laissée par un corpuscule rapide qui a traversé une émulsion sensible spécialement étudiée pour ce genre de recherches. Vues au microscope, ces traces – qui ont été étalonnées – ont le même aspect que celles qui se forment dans la chambre de Wilson. Ces plaques sont placées dans des ballons-sondes qui s'élèvent dans la stratosphère où elles enregistrent les particules cosmiques; elles sont analysées à leur retour sur terre.

C'est grâce à ces extraordinaires techniques que les physiciens ont pu saisir sur le vif la matérialisation d'un photon de grande énergie en une paire d'électrons positif et négatif, ainsi que le phénomène inverse: la fusion d'une paire d'électrons en un ou deux photons d'énergie équivalente. Ils ont également enregistré l'explosion, en une vingtaine de fragments, d'un noyau lourd (argent, brome) sous l'action d'une particule cosmique.

10. Les mésons. – L'existence d'un méson a été prévue théoriquement, en 1935 déjà, il a été réellement découvert grâce à la chambre de Wilson, en 1938, par les Américains C. D. Anderson et S. Neddermeyer.

Les mésons sont, selon la définition de *C. F. Powell*, des particules dont la masse est comprise entre celle de l'électron et celle du proton.

L'idée qu'il puisse exister dans la nature des particules dont la masse est environ deux cents fois celle de l'électron est due au Japo-

nais Hideki *Yukawa*. Il publia une théorie mathématique sur les forces de couplage entre le proton et le neutron. Le méson serait responsable de la cohésion liant les nucléons des noyaux atomiques.

Les actions réciproques de deux électrons l'un sur l'autre se font par l'intermédiaire du champ électromagnétique qu'ils créent autour d'eux. Ce champ présente un aspect corpusculaire: c'est le photon. En d'autres termes, l'interaction entre deux électrons se fait par l'intermédiaire d'un corpuscule qui est le photon.

Une idée semblable doit conduire à l'interprétation de la genèse du méson. Il existe entre les constituants du noyau atomique, les nucléons, des forces de cohésion, des interactions. Un champ particulier – le champ nucléaire – de nature différente du champ Coulombien, préside à ces interactions. Les échanges d'énergie, de charge électrique et de spin[2] entre un proton et un neutron se traduisent précisément par l'émission d'une particule lourde qui est le méson. On peut encore dire: de même que le photon est l'aspect corpusculaire du champ électromagnétique présidant à l'interaction entre deux électrons, le méson est l'aspect corpusculaire du champ nucléaire dans lequel baignent les particules constituant le noyau.

Depuis 1938, époque de la découverte du premier méson, de nombreux travaux ont montré qu'il existe plusieurs types de ces particules lourdes. On a pu dégager, des phénomènes extraordinairement complexes qui se passent dans les rayons cosmiques, l'existence de mésons primaires appelés mésons π, de mésons secondaires, mésons μ, et de mésons neutres encore mal connus.

11. Depuis 1926, les idées de Louis de Broglie et celles d'Erwin Schrödinger, confirmées par de nombreuses expériences, établissent que les corpuscules atomiques ont, comme les photons, un aspect ondulatoire. La lumière et la matière se présentent donc à l'expérimentateur – selon le dispositif expérimental utilisé – soit sous l'aspect d'une onde, soit sous celui d'un corpuscule.

Une *onde* est ce qui donne des interférences. Dans la région de l'espace où ces phénomènes se produisent, il y a alternativement des maxima et des minima d'énergie. Enregistrées sur une plaque photographique, les interférences – obtenues par exemple avec la

---

[2] Le spin est défini au n° 12.

lumière jaune du sodium – se présentent comme une série de bandes, de franges, alternativement claires et obscures. L'aspect et les dimensions de ces figures sont déterminés par le dispositif expérimental choisi. Les belles couleurs des bulles de savon sont dues à des interférences.

Un *corpuscule* est ce qui est capable, vu sa masse et sa vitesse, de donner un choc, une collision, lors de sa rencontre avec un autre corpuscule. Il peut aussi, selon les circonstances et sa nature, laisser derrière lui une trace bien déterminée.

Les électrons traversant, en un jet, une chambre de Wilson, laissent une trajectoire formée de segments plus ou moins rectilignes selon leur énergie cinétique. C'est leur aspect corpusculaire. Le même jet d'électrons, envoyé sur un réseau formé d'une poudre cristalline enfermée dans un tube de papier – dispositif classique pour obtenir des interférences – donne sur une plaque photographique convenablement disposée une famille de cercles concentriques plus ou moins équidistants. Ils montrent l'aspect ondulatoire des électrons.

La dualité «onde et corpuscule» est ainsi établie par l'expérience. Mais il est vraiment bien difficile de se représenter un «être» qui, tantôt, apparaît comme étendu et continu dans tout l'espace environnant et, tantôt, se présente, selon les conditions d'observation, comme un objet quasi ponctuel décrivant une trajectoire bien définie. Sur cette difficile représentation, chaque physicien a sa manière personnelle de voir. Pour *N. Bohr* et d'autres physiciens, ondes et corpuscules sont des aspects complémentaires d'une même réalité.

Il faudrait d'ailleurs examiner de plus près, ce qui ne peut pas être fait dans ce travail, si l'onde lumineuse – qui est une somme d'ondes «électromagnétiques» polarisées – est de même nature que l'onde dite «onde de *de Broglie*» liée aux corpuscules matériels, comme le sont les électrons par exemple.

12. Nous sommes maintenant suffisamment informés pour aborder l'examen des particules actuellement connues et voir quels sont les critères employés par les physiciens pour définir lesquelles de ces particules sont fondamentales.

Ces particules sont: le proton, le neutron, l'électron négatif, l'électron positif ou positon, les photons, les différents mésons et l'hypothétique neutrino.

Les paramètres physiques qui définissent et caractérisent ces particules sont: la masse au repos, la charge électrique, le spin, la vie moyenne, le diamètre apparent, le moment magnétique, l'aspect dans la chambre de Wilson et, enfin, la statistique à laquelle la particule obéit.

Voyons ce que signifient ces différents paramètres.

La *masse* est liée à l'inertie de translation. Il faut une force (force = masse × accélération) pour communiquer une accélération à une masse quelconque. La masse est une notion fondamentale, donc indéfinissable. Ce n'est que par des expériences répétées que ce concept, si abstrait, finit par prendre un sens dans l'esprit du physicien. Pour faire naître ce concept inhabituel, dans la tête des élèves, il faut imaginer beaucoup d'exemples concrets et en extraire lentement la notion de masse, notion qui ne doit pas être confondue avec le poids. L'unité de masse est le gramme. Selon la loi d'équivalence d'Einstein, il y a identité entre la masse et l'énergie: dans un gramme de matière il y a l'équivalent de vingt-cinq millions de kilowattheures, c'est l'énergie produite par la combustion de trois mille tonnes de charbon.

La *charge électrique* est aussi une notion fondamentale indéfinissable et peut-être encore plus abstraite que la notion de masse, car nous n'avons pas de sens électrique. Des forces, autres que celle de la gravitation, historiquement issues de l'ambre frotté, l'*élektron* des Grecs, sont à l'origine de la notion de charge électrique. Cette grandeur est liée à la force et au champ électrique que crée la particule dans son voisinage. La force est obtenue en multipliant la charge par le champ électrique. L'unité de charge électrique est le coulomb ou encore l'ampère-seconde.

Le *spin*[3] est lié à une inertie de rotation. C'est une grandeur de même nature que le moment de la quantité de mouvement d'une masse qui tourne sur un cercle – soit le produit: masse × vitesse × rayon du cercle. L'unité quantique de spin est la quantité $h/2\pi$, où h est la constante de Planck.

Le «*spin de l'électron*» a été introduit en 1925 par deux Hollandais, Georges-Eugène *Uhlenbeck* et Samuel-Abraham *Goudsmit*, pour expliquer la structure de certaines raies spectrales. Si on analyse, avec un spectographe suffisamment dispersif, la lumière émise

[3] De l'anglais: to spin round = tourner.

par certains éléments – le sodium par exemple, qui donne une belle couleur jaune utilisée pour l'éclairage des grandes routes – on constate que cette teinte n'est pas simple, mais qu'elle est formée par le mélange de deux lumières jaunes qui, elles, sont simples. Les longueurs d'ondes de ces deux couleurs sont très voisines puisqu'elles ne diffèrent relativement que d'un millième. En d'autres termes, la raie spectrale du sodium n'est pas simple, elle est double.

Une raie spectrale est l'image optique du niveau d'énergie d'un électron à l'intérieur de l'atome émetteur. Si la raie émise – la couleur – est simple, cela signifie que le niveau énergétique est simple lui aussi. Mais si la raie est multiple – un doublet comme c'est le cas pour le sodium – alors le niveau énergétique est complexe: l'électron responsable de cette lumière possède un terme énergétique propre de même nature qu'une rotation, terme qui est précisément représenté par le spin.

Le spin est une notion énigmatique; il serait faux de se représenter l'électron comme une sphère très petite qui tournerait autour d'un de ses diamètres. Dans l'état actuel de nos connaissances, on ne peut pas et on ne cherche pas à se faire une image trop précise de l'électron, ni de son spin.

Le *moment magnétique* est lié à la présence du spin, ces deux grandeurs apparaissent ensemble. C'est une grandeur qui confère à la particule possédant un spin une propriété magnétique analogue à celle d'un aimant. L'unité de moment magnétique est le magnéton. Pour l'électron, on prend pour unité le «magnéton de *Bohr*» et pour les particules lourdes, comme le proton, on utilise le «magnéton nucléaire» qui est 1837 fois plus petit.

La *vie moyenne* est en rapport avec la durée pendant laquelle la particule existe et peut être observée. L'unité est la seconde de temps.

La *statistique* à laquelle la particule appartient détermine les propriétés globales que présente une grande assemblée de ces particules. S'il s'agit d'électrons, la statistique – de *Fermi-Dirac* – donne les propriétés du courant électrique dans les corps conducteurs. Si l'on envisage les photons, la statistique – de *Bose-Einstein* – détermine les propriétés de la lumière émise par un corps incandescent.

L'*aspect des trajectoires* dans la chambre de Wilson est déterminé par la charge, la masse, la nature et la vitesse de la particule. Les particules non chargées, comme les neutrons, ne laissent pas de

traces directes, mais signalent leur présence par des effets ionisants secondaires. Si la chambre de Wilson est immergée dans un champ magnétique, les trajectoires sont incurvées. La mesure de la courbure permet de connaître certaines constantes de la particule.

Voici maintenant la description et les constantes physiques de ces particules:

Electron. Inventé par Stoney en 1891, l'électron fut effectivement découvert en 1895 par J. J. Thomson sur les ions gazeux des tubes à décharges (tubes analogues aux tubes des réclames lumineuses).

Les «rayons cathodiques» des tubes à décharges ainsi que les «rayons bêta» émis par certains corps radioactifs *sont des électrons.*

Masse «au repos» . . .	$9{,}1 . 10^{-28}$ gramme;
Charge électrique négative .	$1{,}6 . 10^{-19}$ ampère-seconde;
Spin	$\frac{1}{2}(h/2\pi) = \frac{1}{2}$ unité quantique;
Diamètre calculé	10^{-13} centimètre;
Moment magnétique . . .	1 magnéton de Bohr.

Dans la chambre de Wilson, l'électron laisse une trajectoire fine et rectiligne lorsqu'il est très rapide, plus épaisse et sinueuse lorsqu'il est lent.

L'électron obéit au principe d'exclusion de Pauli. En assemblée nombreuse, le comportement des électrons est déterminé par la statistique de Fermi-Dirac.

Lorsque la vitesse d'un électron croît, sa *masse* augmente selon la loi d'équivalence d'Einstein et la *longueur d'onde* de l'onde de «de Broglie» diminue. Pour une vitesse de six mille kilomètres à la seconde, la longueur d'onde de l'électron est du même ordre que celle des rayons X usuels, soit un angström environ (10^{-8} centimètre).

Le courant électrique, qui circule dans nos installations domestiques ou extérieures, est dû à un déplacement d'ensemble d'un très grand nombre d'électrons: il faut qu'il en passe 6,2 milliards de milliards en une seconde pour faire un courant électrique d'une intensité d'un ampère.

Proton. C'est le noyau de l'atome d'hydrogène, atome privé de son électron périphérique. Il fut observé pour la première fois par Eugen *Goldstein*, en 1886, dans les «rayons positifs» des tubes à décharges. En 1922, James *Chadwick* et *E. Rutherford* le virent sortir des noyaux d'azote bombardés par les particules alpha du

radium C. Les premières photographies de cette désintégration de l'azote, dans la chambre de Wilson, sont de 1925.

Masse	$1{,}672 . 10^{-24}$ gramme;
Charge électrique positive .	$1{,}6 . 10^{-19}$ ampère-seconde;
Spin	½ unité quantique;
Diamètre observé	$2 . 10^{-13}$ centimètre;
Moment magnétique . . .	2,79 magnétons nucléaires.
Statistique de Fermi-Dirac	

Le proton laisse, dans la chambre de Wilson, une trace large et rectiligne. Lorsqu'il rencontre un autre proton, le choc donne les deux traces d'une fourche, apparence semblable à celle du choc de deux billes de billard.

Ce sont des protons très rapides, circulant à très haute altitude et entrant en collision avec des noyaux d'azote et d'oxygène qui seraient responsables de la formation des rayons cosmiques avec leur cortège de mésons, d'électrons et de photons.

Remarquons que la masse du proton est 1837 fois plus grande que celle de l'électron. La masse de l'électron au repos est souvent prise comme masse unité.

Neutron. Il a été découvert en 1932 par James *Chadwick* et par les époux *Joliot-Curie*, lors de la désintégration du béryllium bombardé par les particules alpha du polonium. Le noyau de béryllium absorbe la particule alpha, il se forme un noyau de carbone accompagné de l'émission d'un neutron rapide.

Masse	$1{,}675 . 10^{-24}$ gramme;
Charge électrique . . .	nulle;
Spin	½ unité quantique;
Moment magnétique . . .	– 1,91 magnéton nucléaire;
Vie moyenne	quelques minutes.
Statistique de Fermi-Dirac.	

N'étant pas chargé, le neutron pénètre très facilement dans les noyaux atomiques dont il peut provoquer la scission explosive. En outre, cet objet neutre ne produit pas d'ions qui marquent son sillage. Il est donc invisible dans la chambre de Wilson. Cependant, un neutron provoque une collision lorsqu'il frappe un noyau atomique. Ces noyaux sont violemment projetés et deviennent ionisant le long de leur parcours. Lors du choc d'un neutron contre un proton –

dans la vapeur d'eau – seul le proton laisse une trace par les ions qu'il a produits. Les neutrons sont donc, dans la chambre de Wilson, détectés indirectement.

Sa vie moyenne n'est que de quelques minutes; il se transforme spontanément en un proton et un électron.

Photons. Inventés en 1905 par Albert *Einstein* pour expliquer l'effet photo-électrique, les photons furent effectivement découverts, en 1923, par l'Américain Arthur *Compton*.

Le photon ou grain de lumière (ou encore quantum de lumière) est une particule insaisissable qui manifeste sa présence dans les faisceaux lumineux. La vitesse de la lumière, qui est constante dans un milieu déterminé, a pour valeur trois cent mille kilomètres à la seconde dans le vide. Les «rayons gamma», émis par certains éléments radioactifs, sont des photons de grande énergie.

Le photon (corpuscule) et le champ électromagnétique (onde) sont les deux concepts qui permettent aux physiciens de *décrire* cette chose mystérieuse qu'est la lumière.

La *masse* du photon est liée à la fréquence, c'est-à-dire à la «couleur» de la lumière envisagée. Un photon «jaune» a une masse qui n'est que les quatre millionièmes de celle de l'électron. Par contre, les rayons X émis par un tube alimenté sous une tension de cinq cent mille volts sont des photons dont la masse est du même ordre que celle de l'électron.

La *charge électrique* est nulle.

Le *spin* a pour valeur *une* unité quantique.

La *statistique* à laquelle les photons obéissent est celle de Bose-Einstein.

Le photon, étant une particule non chargée, ne laisse pas de trajectoire visible directe dans la chambre de Wilson. Il en est d'ailleurs de même à l'échelle humaine: on n'a jamais vu la lumière; ce que l'on voit, ce sont ou des *objets* lumineux par eux-mêmes – des sources lumineuses – ou des objets éclairés.

Cependant un photon peut communiquer son énergie à un atome qui – si cette énergie est suffisante – expulse alors un électron: c'est l'effet photo-électrique. Le photo-électron expulsé ionise l'air qu'il traverse et laisse une trace, une trajectoire, mise en évidence dans la chambre de Wilson. Ainsi, lorsqu'un faisceau de photons traversent une chambre de Wilson, c'est par un effet secondaire qu'ils manifestent leur passage.

Positon (ou électron positif). Il a été découvert en 1932 par l'Américain *C. D. Anderson* qui étudiait les rayons cosmiques avec la chambre de Wilson. Le premier cliché qui ait permis d'établir l'existence de cette nouvelle particule a été obtenu avec une chambre divisée en deux par un écran de plomb et plongée dans un champ magnétique. Cette technique permit de déterminer avec certitude le sens de propagation et le signe positif de la charge de la particule observée. L'existence d'un électron positif avait été entrevue, en 1930, par l'Anglais *P. A. M. Dirac* qui a fait une théorie relativiste de l'électron.

La charge (au signe près), la masse, le spin et le moment magnétique ont les mêmes valeurs que celles mentionnées pour l'électron. Positon et électron sont donc deux objets électriquement symétriques.

Cependant la vie moyenne du positon n'est pas très longue puisqu'il n'existe que pendant un temps inférieur au millième de seconde. La chambre de Wilson a montré en effet qu'un positon ne tarde pas à rencontrer un électron: ces deux particules fusionnent, s'annihilent et donnent naissance, en disparaissant, à un ou deux photons.

Les physiciens ont aussi découvert le phénomène réciproque. Des clichés ont montré la transformation – la matérialisation – d'un photon gamma d'énergie suffisante en une paire d'électrons positif et négatif. Les trajectoires des deux particules sont généralement symétriques. Au cours de ces deux types de transformations, il y a conservation de l'énergie, de la charge électrique et du spin.

La découverte du positon a permis aux physiciens de saisir sur le vif la transformation de la lumière en matière et réciproquement la disparition de la matière et sa transformation en énergie lumineuse, en photons correspondant à des rayons X durs.

Le positon n'existe pas en permanence, ni à l'état libre, ni emprisonné au sein de la matière. Il est créé et détruit au cours de processus atomiques particulièrement subtils. Inconnu il y a une vingtaine d'années, il joue un rôle fondamental dans le grand jeu où matière et lumière se transforment l'une dans l'autre.

Les mésons. Voici, selon *C. F. Powell* et les élèves de son école, les données actuelles et probablement provisoires de ces nouvelles particules.

Méson π:	Découverte: Powell et collaborateurs, 1947.
Masse	environ 280 fois celle de l'électron;
Charge	positive ou négative, la même que celle de l'électron;
Spin	zéro unité quantique;
Vie moyenne	environ 10^{-8} seconde;
Statistique de Bose-Einstein.	

Le méson «pi» se désintègre et donne naissance au méson «mu» et à un hypothétique neutrino. Sa vitesse est voisine de celle de la lumière.

Méson μ:	Découverte: Anderson, 1938.
Masse	environ 210 fois celle de l'électron;
Charge	positive ou négative, égale à celle de l'électron;
Spin	½ unité quantique;
Vie moyenne	environ 10^{-6} seconde;
Statistique de Fermi-Dirac.	

Le méson «mu» se désintègre en donnant naissance à un électron ou à un positon et à deux neutrinos.

Méson π_0:	Découverte: Bjorkland et collaborateurs, 1950.
Masse	environ 270 fois celle de l'électron;
Charge	nulle;
Spin	nul;
Vie moyenne	environ 10^{-14} seconde;
Statistique de Bose-Einstein.	

Ce méson neutre se décompose en deux photons gamma.

Les expérimentateurs ont encore trouvé d'autres mésons positifs ou neutres, mais leurs constantes physiques ne sont pas encore bien établies. Leur masse semble s'approcher de celle du proton.

Le méson «pi» négatif ralenti dans la plaque photographique est capturé par un noyau auquel il cède son énergie propre. Le noyau explose et la plaque montre une étoile, traces des débris du noyau.

Neutrino. Inventée en 1931 par Pauli, cette particule n'a pas encore été directement observée. Elle reste donc un objet hypothétique.

Masse	voisine de zéro;
Charge	nulle;
Spin	½ unité quantique.

Le neutrino a été imaginé pour que le principe de la conservation de l'énergie et celui de la conservation du spin soient respectés. Ces principes forment, en effet, la base rationnelle de toute la physique contemporaine: sans eux on ne peut plus écrire d'égalités mathématiques et par suite plus de lois.

Ainsi lorsqu'un proton (spin ½) se transforme en un neutron (spin ½) et un positon (spin $^1/_2$), il faut bien qu'il apparaisse encore une particule supplémentaire (spin – ½) pour que l'égalité des spins soit satisfaite.

Cependant, étant donné la très faible masse et la charge nulle du neutrino, il ne semble pas que l'on puisse mettre celui-ci en évidence avec les appareils actuels. Pour le moment, il reste un «être de raison» hypothétique.

A la lecture de cette longue liste de particules – elle n'est d'ailleurs pas complète – le lecteur se sentira peut-être un peu découragé. En effet, il y a une trentaine d'années, on ne connaissait que l'électron et le proton qui semblaient suffisants pour tout expliquer. La multiplicité des particules actuellement connues montre que les phénomènes élémentaires sont extraordinairement complexes.

13. Qu'est-ce qu'une particule fondamentale?

On sait de façon certaine que l'électron est une particule simple. En effet, on a cherché pendant longtemps, en particulier à Genève, par de nombreuses expériences, à mettre en évidence un sous-électron, soit une particule dont la charge électrique serait plus petite que celle de l'électron. On n'a jamais rien trouvé de semblable. On considère donc l'électron comme une particule fondamentale. Son spin a pour valeur une demi-unité quantique. Le proton, lui aussi, est considéré comme une particule fondamentale et son spin a aussi pour valeur une demi-unité quantique.

Lorsque plusieurs de ces particules s'unissent pour former un noyau plus complexe, l'expérience montre que le spin total est la somme algébrique des spins.

Les spins – qui sont représentés par des vecteurs valant ½ unité – s'unissent en se plaçant parallèlement soit dans le même sens, soit en sens opposé. Dans ces conditions, une particule composée, formée d'un nombre pair de constituants de spin ½, aura un spin résultant valant «zéro ou un entier». Si le nombre de composants est impair, le spin sera représenté par un nombre «demi-entier».

Exemple: le spin du noyau du lithium 6 est zéro, celui du noyau du lithium 7 est $^3/_2$.

Cherchant un critère pour définir d'une manière certaine ce qu'est une particule fondamentale – certains disent une particule élémentaire – les physiciens théoriciens semblent être d'accord pour énoncer qu'*une particule est fondamentale si elle possède un spin ayant pour valeur une demi-unité quantique*. Dans ces conditions, l'électron, le proton et le neutron (ou mieux le nucléon) sont des particules fondamentales. Les particules dont le spin est plus grand qu'une demi-unité seraient des particules complexes.

Un autre critère, basé sur la valeur nulle ou non nulle de la «masse au repos» de la particule a récemment été formulé par notre collègue André *Mercier* de Berne. De ce point de vue intéressant, le photon – dont le spin a pour valeur une unité quantique – serait lui aussi une particule fondamentale.

Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut donc prendre pour particules élémentaires – pour les acteurs du drame cosmique! – l'électron et le nucléon, et peut-être aussi le photon. L'avenir dira si les mésons, qui retiennent actuellement toute l'attention des physiciens, sont de nouvelles particules fondamentales ou, au contraire, des aspects différents d'une même particule simple ou complexe.

Le comportement des particules d'une certaine espèce en assemblée nombreuse est régi par des lois statistiques. Les particules qui ont un spin «demi-entier» ont une conduite sociale différente de celle des particules dont le spin prend des valeurs entières. Il y a deux lois statistiques différentes: la loi de Fermi-Dirac qui régit le comportement des particules à spin ½, c'est le cas des électrons et des noyaux à nombre impair de constituants, et la loi de Bose-Einstein valable pour les particules à spin entier (ou nul), tels sont les photons – la lumière – ainsi que les noyaux atomiques formés d'un nombre pair de composants.

Ces lois statistiques de l'atomisme contraignent les physiciens à reconnaître que les particules en assemblée ne sont pas des individus; c'est là un autre aspect du contenu de ces lois. Une particule d'une espèce bien définie, par exemple un électron ou un photon, est un objet qui, en groupe, n'a pas d'individualité permettant de le discerner d'une autre particule de même nature. Une particule n'est donc pas une chose qui ressemble à un individu.

Cette absence d'individualité jointe au double aspect «onde-corpuscule» nécessaires pour décrire les phénomènes atomiques sont des notions qui semblent un peu étranges. Mais les concepts avec lesquels nous pensons ont été lentement construits à l'échelle de nos expériences humaines; certains d'entre eux ne sont plus valables à l'échelle atomique ou à l'échelle astronomique. «Toute notion finit par perdre son utilité, sa signification même, quand on s'écarte de plus en plus des conditions expérimentales où elle a été formée», a dit le physicien Jean *Perrin*. Les physiciens contemporains rejoignent ainsi – à la suite de leurs découvertes – le philosophe *Kant* qui a montré que les concepts de notre esprit, s'étant formés dans les limites de l'expérience, deviennent d'un usage illégitime lorsqu'on les applique à des notions qui, par essence, sont hors de ces limites. Les antinomies de la Raison pure en sont un exemple.

Conclusions

Arrivé au terme de cet exposé, j'espère que le lecteur est convaincu que la matière n'est ni vile, ni méprisable. Elle est formée de particules simples ou composées en mouvements spontanés et permanents. Ces particules naissent et meurent, se matérialisent ou s'annihilent, s'associent, se séparent, ou fusionnent sous l'action de forces complexes électriques et mésoniques pour former l'ensemble des corps et des phénomènes connus. Après un demi-siècle d'efforts, de recherches théoriques et d'expériences minutieuses, en utilisant des appareils d'une haute sensibilité, les physiciens et les chimistes sont parvenus à dénombrer ces particules. Mieux encore, ils en connaissent les avatars, les dimensions, les masses, les vitesses, l'énergie, la durée de vie, les constantes électrique, mécanique, magnétique et certaines des forces qui les unissent.

Je ne sais si l'on peut rattacher ces acquisitions, un peu inquiétantes, cette description objective de la matière, à certaines doctrines philosophiques: au mécanisme de Descartes ou au dynamisme monadologique de Leibniz. Ecoutons Platon: «Rien n'est mieux, déclare Socrate dans le VIIe livre de la *République*, que d'admirer la beauté et l'ordre des mouvements compliqués et variés dont le Ciel nous offre le spectacle; mais la beauté et l'ordre des mouvements sensibles sont très inférieurs à ceux des mouve-

ments réels. Ces mouvements réels se déplacent les uns à l'égard des autres et emportent les corps avec une vitesse réelle ou une lenteur réelle mesurée par un nombre vrai et selon des orbites qui sont toutes véritables ; seulement ces mouvements réels, on ne peut les saisir que par le raisonnement et l'intelligence, non par la vue.»

Ce Réel, les physiciens ont dû, pour l'édifier, dépasser les apparences sensibles et imaginer des notions subtiles et abstraites. Ils ont vu que la notion du réel s'approfondit et s'affine sans cesse. Cette notion dépend et elle évolue en fonction des techniques expérimentales et des progrès théoriques dus au perfectionnement des concepts. Ces deux activités, l'une manuelle s'attaquant directement à la matière, l'autre spirituelle se mouvant sur le plan de la pensée abstraite, sont corrélatives. L'une entraîne l'autre dans un mouvement ininterrompu où la découverte expérimentale est la conséquence des inventions théoriques.

Un dialogue s'établit entre le sujet connaissant et le monde extérieur. L'homme qui cherche interroge la matière avec patience et ingéniosité. La pensée invente une question, le monde extérieur permet la découverte de la réponse. *Le Réel, c'est encore cela, c'est la réponse que nous donnons lorsque nous construisons, sur le plan de l'intelligence et de la raison, ce que nos mains et nos yeux perçoivent.*

Matière, Lumière, Energie, sous la double apparence de particules et d'ondes, régies par des lois qui nous apparaissent de plus en plus compliquées, sont des aspects de l'être. Dans cette perspective, le Nombre, qui permet de prévoir, semble faire partie de l'essence des choses et de notre esprit. Je pense que les atomistes grecs ne renieraient pas ce Réel imaginé par les physiciens d'aujourd'hui. Par leurs travaux, ceux-ci ne sont-ils pas les dignes continuateurs de leurs maîtres helléniques ?