

## PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI

Principe fondamental de la mécanique quantique, selon lequel certaines particules (les fermions) ne peuvent occuper à plusieurs le même état quantique.

Ce principe permet de comprendre la structure en couche de la répartition électronique dans les atomes, ainsi que la structure en bandes des niveaux d'énergie dans les solides.

De façon plus surprenante, il intervient aussi dans la structure des certaines étoiles (les naines blanches), conduisant au phénomène de pression de dégénérescence. s'effondrer sous l'effet de la gravitation.

Cependant, lorsque l'étoile est trop massive, le principe d'exclusion ne tient plus et alors l'étoile s'effondre en un trou noir.

*« La théorie quantique eut parmi ses premiers objectifs de comprendre la stabilité des édifices atomiques. En effet, un « électron classique » (non-quantique) pourrait orbiter à une distance arbitraire d'un « noyau classique ». Rayonnant de l'énergie électromagnétique, il pourrait se rapprocher indéfiniment du noyau, perdant dans cette chute une quantité d'énergie ... infinie ! La théorie quantique, en corrélant l'extension spatiale d'un électron à son énergie cinétique (inégalités d'Heisenberg), interdit une telle catastrophe et assure l'existence d'atomes stables, dont l'énergie ne peut descendre en dessous d'un certain plancher absolu (niveau fondamental). Mais Pauli fit remarquer, dès les années 1925, que cette stabilité individuelle des atomes, si elle est nécessaire, ne suffit en rien à assurer la stabilité de la matière. (...) Si le principe de Pauli n'intervenait pas pour tenir les électrons à distance mutuelle, la matière serait incomparablement plus concentrée, d'autant plus que la quantité en serait plus grande. (...) Ajoutons enfin que le rôle du principe de Pauli ne se borne pas à assurer l'existence de la matière, mais conditionne toutes ses propriétés électroniques détaillées, en particulier la conductivité ou la semi-conductivité des matériaux qu'utilise la technologie électronique. »*

Jean-Marc Lévy-Leblond dans « La quantique à grande échelle », article de l'ouvrage collectif « Le monde quantique »

- Les fermions ne peuvent coexister dans le même état (principe de Pauli)
- Les électrons sont des fermions et ont un spin  $\frac{1}{2}$  ou  $-\frac{1}{2}$
- Pour chaque énergie autorisée par la solution précédente, il y a 2 états possibles (dégénérescence due au deux spins possibles)

### Qu'est-ce que le principe de Pauli ?

Le principe d'exclusion de Pauli affirme que deux fermions (par exemple électron ou proton) de même nature (par exemple deux électrons) ne peuvent jamais se trouver exactement dans le même état physique (par exemple avec le même état de spin). Le spin signifie que chaque électron peut être considéré comme un minuscule aimant qui est affecté d'un moment magnétique de rotation.

Tout est parti d'un constat : la matière ne peut pas se concentrer à l'infini contrairement à la lumière. Deux électrons ne peuvent pas s'attirer au point de se toucher. D'où vient cette répulsion qui fait que notre doigt est repoussé par les atomes de la table ? Du principe de Pauli ! On pourrait même appeler ce principe une force de répulsion. Elle est plus forte que l'attraction universelle des masses ou que l'attraction électromagnétique entre charges opposées.

D'où vient que l'attraction ne soit pas suffisante, même au sein d'étoiles très massives pour forcer des atomes à se contracter et à rapprocher leurs fermions ? Du principe de Pauli.

Le principe d'exclusion de Pauli qui stipule qu'un fermion ne peut pas prendre la même place qu'un autre fermion est donc absolument essentiel, principe fondateur de l'espace matériel, d'une position occupée ou non, niveau d'énergie piégé par une liaison électrique et qui fait masse.

Mais quelle est la racine même du principe de Pauli ? Il ne découle pas simplement du fait que les particules soient quantifiées mais du fait que le vide soit quantifié comme nous allons le voir ensuite...

En 1925, Wolfgang Pauli proposa ce principe selon lequel les électrons ne peuvent pas se trouver au même endroit dans le même état quantique. Par la suite, ce principe est généralisé à tout fermion (ou particule de spin demi-entier), tel que le proton, le neutron, le neutrino et les quarks. Ce principe devint ensuite un théorème de la mécanique quantique relativiste, élaborée par Dirac en 1930 : les particules de spin demi-entiers sont des fermions et ils obéissent à la statistique de Fermi-Dirac, donc au principe d'exclusion de Pauli.

Le principe d'exclusion se applique uniquement aux fermions, qui forment états quantiques antisymétriques et ont spin demi-entier, et qui comprennent protons, neutrons et électrons, les trois particules qui composent la matière ordinaire. Il ne est pas valable pour les bosons, qui forment états quantiques symétriques et avoir spin entier. Le principe est la base pour la compréhension de la plupart des caractéristiques distinctives de la matière.

Chacun sait que la physique a découvert que la matière, comme la lumière, est constituée de « grains » appelés particules. La matière serait appelée fermions, c'est-à-dire particules obéissant à la règle de Fermi qui empêche les particules de même état de s'agglomérer du fait du « principe de Pauli ». Les fermions sont de deux types : leptons (comme l'électron) ou quarks (constituant des neutrons et des protons). La lumière – expression employée ici pour regrouper toutes les particules dites d'interaction – serait formée de bosons, c'est-à-dire de particules qui obéissent à la règle de Bose qui concerne des particules qui ont tendance à s'agglomérer dans un état commun.

La négation de la gravitation poussant l'atome à se concentrer sur lui-même est le principe de Pauli (qui est un principe quantique de répulsion selon lequel deux particules de matière ne peuvent se trouver au même endroit dans le même état contrairement à deux corpuscules de lumière). Ce principe de Pauli est donc l'une des propriétés par lesquelles la matière s'oppose à la lumière. La lumière se concentre sans limite et pas la matière. C'est le principe de Pauli qui cause l'impénétrabilité de la matière et qui nous donne cette impression illusoire de compacité et de continuité de la matière.

Pourquoi le principe de Pauli empêche la matière de se concentrer ? Un électron résidant sur une couche supérieure est instable et pourrait tomber à un niveau inférieur en émettant un photon. Ceci est rendu impossible par le principe d'exclusion de Pauli qui implique que deux particules comme les électrons puissent occuper le même état quantique.

La démonstration de ce principe repose sur ce que l'on nomme parfois la seconde quantification ; non seulement les états des particules sont quantifiés mais les particules qui caractérisent les champs d'interaction répondent-elles aussi à une quantification.

Le principe de Pauli est lié aux propriétés du vide quantique. La preuve ? Ce principe d'exclusion est lié au spin du fermion, propriété qui est dans le nuage qui entoure la particule de Fermi, nuage constitué de particules et d'antiparticules virtuelles du vide quantique.

La notion de spin a été introduite par Pauli en décembre 1924 pour l'électron afin d'expliquer un résultat expérimental qui restait incompréhensible dans le cadre naissant de la mécanique quantique non relativiste : l'effet Zeeman anormal. L'approche développée par Pauli consistait à introduire de façon ad-hoc le spin en ajoutant un postulat supplémentaire aux autres postulats de la mécanique quantique non relativiste (équation de Schrödinger, etc.). L'existence du spin fut également suggérée en 1925 par les physiciens américains d'origine néerlandaise Samuel Abraham Goudsmit et George Eugene Uhlenbeck. Les deux physiciens remarquèrent que certaines particularités des spectres atomiques ne pouvaient être expliquées au moyen de la théorie quantique de

l'époque. En considérant un nombre quantique supplémentaire — le spin de l'électron — Goudsmit et Uhlenbeck pouvaient fournir une explication plus complète des spectres atomiques. Bientôt, la notion de spin s'étendit à tous les quantons, en particulier aux électrons, aux protons, aux neutrons et aux antiparticules.

Que se passe-t-il quand une particule de matière s'approche à une vitesse suffisante d'une autre et qu'elles échangent un photon ? Les deux nuages de polarisation sont contraints de se mêler. Les couches de même signe se rapprochent avec suffisamment d'énergie pour contraindre un dipôle à se rapprocher. Le principe d'exclusion de Pauli provient d'une relation entre la particule et le vide autour. C'est le nuage de polarisation. Deux particules ne peuvent occuper la même position parce que, même si elles ont des charges électriques qui s'attirent, elles ont aussi des nuages polarisation d'électricité qui la repoussent dès que l'on s'approche de trop près. Cela signifie que le champ électromagnétique s'inverse à proximité. Cependant, si deux particules ont des spins opposés, la rotation du nuage de polarisation se fait en sens inverse et les deux particules peuvent s'approcher un peu plus.

L'image de la matière qui résulte de ces études est ainsi résumée par l'astrophysicien Cassé dans « Du vide et de la création » :

*« Au centre de la nuée du virtuel est encore un virtuel, d'ordre plus élevé. Et ces électrons et positons doublement virtuels s'entourent eux-mêmes de leur propre nuage de corpuscules virtuels, et cela ad infinitum. (...) L'image quantique qui en résulte est un électron (...) protégé par des rangs successifs de photons virtuels (...) L'électron n'est plus l'être simple qu'il était. (...) Il s'habille de vide fluctuant. De même, chaque proton est dépeint comme un microcosme concentrique où s'étagent les différents niveaux de virtualité. Au centre est la particule réelle, sa garde rapprochée est constituée par des particules et antiparticules les plus massives (énergétiques) et donc les plus éphémères, bosons W et Z, paires proton-antiproton et photons gamma. Le second cercle contient les couples positon-électron et les photons de 1 MeV environ. A la périphérie flottent les photons d'énergie déclinante. Chaque particule virtuelle, comme précédemment, s'entoure de son cosmos virtuel et chacune à son tour fait de même et cela indéfiniment. Le vide est constitué d'un nuage virtuel flottant de manière aléatoire. L'activité frénétique autour du moindre électron, du moindre proton, nous éloigne à jamais de l'image paisible que la plupart des philosophes attribuent au mot « vide ». (...) Aucune particule, même « au repos », ne jouit de la pleine tranquillité. (...) ce que nous appelons communément « force » est, selon la pensée quantique, un phénomène collectif causé par l'échange d'innombrables particules virtuelles. (...) Concrètement, la création simultanée d'un électron et d'un positon peut être réalisée au moyen de rayons gamma d'énergie supérieure à 1,022 MeV (deux masses d'un l'électron). (...) Le « réel » est produit à proximité de « réel », à partir du virtuel. Le vide est donc l'état « zéro particule réelle ».*

Le principe d'exclusion de Pauli joue un rôle essentiel dans un grand nombre de phénomènes physiques. L'un des plus importants, et celui pour lequel il a été initialement formulée, concerne la structure du nuage d'électrons d'atomes. Un atome électriquement neutre contient un nombre d'électrons égal à celui des protons du noyau. Comme les électrons sont des fermions, le principe d'exclusion leur interdit d'occuper le même état quantique.

Par exemple, considérons un atome d'hélium neutre, ce qui a deux électrons associés. Les deux électrons peuvent occuper plus le niveau d'énergie orbitale acquisition spins opposés. Cela ne viole pas le principe de l'exclusion, depuis le spin est une partie de l'état quantique de l'électron, de sorte que les deux électrons occupent différents états quantiques. Toutefois, le spin peut prendre que deux valeurs différentes. Dans un atome de lithium, qui contient trois électrons, la troisième électrons ne peut pas rester dans les orbitale 1s, et est forcé d'occuper une partie de l'énergie plus élevés orbitale. De même, les éléments suivants occupent plus de sous-niveaux avec des niveaux croissants de l'énergie. Les propriétés chimiques d'un élément dépendent en grande partie sur le nombre d'électrons présents dans le niveau électronique la plus externe.

Le principe de Pauli explique la stabilité de la matière sur une grande échelle. Les molécules ne peuvent pas être arbitrairement poussés l'un contre l'autre, puisque les électrons de chaque molécule ne peuvent pas entrer dans le même état des électrons d'une autre molécule - ce est la raison pour la durée de répulsion présent dans le potentiel de Lennard-Jones.

Astrophysique fournit la démonstration la plus spectaculaire de cet effet, sous la forme de naines blanches et des étoiles à neutrons. Dans ces deux types d'objets astronomiques, les structures atomiques habituels sont perturbés par une énorme force de gravitation, ce qui laisse les constituants de la matière pris en charge uniquement par « pression de dégénérescence" produit par le principe d'exclusion. Cette forme exotique de la matière est connue comme matière dégénérée. Dans les naines blanches, les atomes sont séparés de la pression de dégénérescence des électrons. Dans les étoiles à neutrons, qui montrent forces gravitationnelles encore plus intense, les électrons sont fusionnés avec les protons pour former des neutrons, qui produisent une pression de dégénérescence encore plus grande.

© <http://matierevolution.fr/spip.php?article3616>