

Le vide est-il vraiment vide ?

(suite et fin)

La physique classique ne pouvant pas expliquer complètement l'équilibre thermique du rayonnement du corps noir, "radiateur intégral", qui produit en son enceinte les radiations dans toutes les fréquences, Max Planck a introduit la notion d'échange par "grains", qu'il a dénommés *quanta*, de l'énergie entre le rayonnement et la matière.

La radiation de fréquence ν ne peut céder à la matière, ou recevoir d'elle, que des quanta d'énergie $E_\nu = h\nu$. Chaque quantum d'énergie forme un tout insécable pour les échanges. Sa valeur en énergie dépend de la valeur de la fréquence de la radiation, et elle est déterminée par la constante universelle h , la *constante de Planck*, dénommée aussi *quantum d'action*.

Niels Bohr a créé la première théorie quantique, en imaginant la façon de lier la radiation quantifiée à la structure des atomes :

Il postule que les électrons constitutifs décrivent autour du noyau des orbites quantifiées en énergie. Dans la conception classique, un électron décrivant une telle orbite devrait rayonner, et ainsi perdre, de l'énergie. Mais Bohr postule que les orbites sont stables : l'électron demeure sur son orbite tant qu'une action externe n'intervient pour l'en déloger.

Deuxièmement il postule que l'électron peut passer d'une orbite d'énergie $E_1 = h\nu_1$ à l'orbite d'énergie $E_2 = h\nu_2$, l'atome émettant un photon d'énergie $E_1 - E_2$ si $E_1 > E_2$, et l'atome absorbant un photon d'énergie $E_2 - E_1$ si $E_1 < E_2$.

Cette première théorie de Bohr heurtait la physique classique, mais elle a permis de donner une explication détaillée du tableau des éléments chimiques, de Mendéléev.

On a commencé à mieux comprendre après que Louis de Broglie eut eu l'idée d'associer une onde à l'électron, et que Davisson et Germer eussent mis en évidence, à la suite d'un accident de laboratoire, l'existence d'interférences produites par ces ondes.

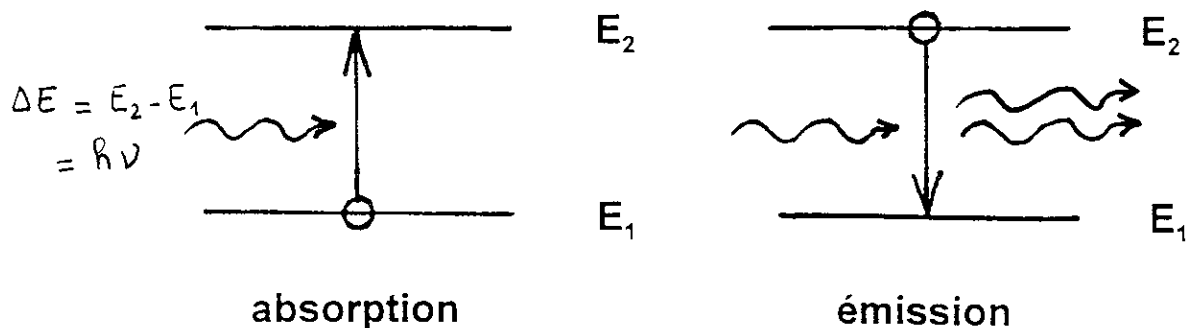
Appliquant cette nouvelle notion à la structure atomique, Erwin Schrödinger a pu calculer les niveaux d'énergie quantifiés occupés par les électrons. Ceux-ci dans l'atome ne se comportent plus alors seulement comme des particules, mais aussi comme des ondes stationnaires liées à l'atome, et demeurent caractérisés dans leurs niveaux énergétiques par la fréquence ν du niveau occupé. Ils n'ont plus de trajectoires, et donc ne sont plus astreints, par les règles classiques, à rayonner de l'énergie.

On explique alors le phénomène d'émission, ou d'absorption d'un photon par un atome : la superposition de deux états oscillants, de fréquences $\nu_1 > \nu_2$, produit une oscillation (battement) de fréquence $\nu_1 - \nu_2$. L'électron change alors de niveau avec émission ou absorp-

tion par l'atome d'un photon ayant la fréquence du battement.

Mais la superposition de deux états ne se produit pas sans intervention. Elle est produite dans l'irradiation créée par des photons d'énergie $h(\nu_1 - \nu_2) = h\nu$ (positive) venant réagir avec les nuages électroniques des atomes. On obtient ainsi *l'émission et l'absorption stimulées*. Les deux possibilités de l'émission ou de l'absorption du photon ont la même probabilité. Si l'on expose une multitude d'atomes à l'incidence de ces photons, on trouvera que les électrons sont distribués également dans les deux états.

Transitions stimulées:



Il y a aussi le phénomène de *l'émission spontanée*. En ce cas les électrons tombent sur les états d'énergies les plus basses. Cela se passe même sans aucune irradiation externe. Ce phénomène ne pouvait pas être expliqué, mais il existe. On pouvait imaginer que les électrons sont attirés vers les états d'énergie inférieure par l'interaction électromagnétique avec le noyau. Mais cela n'est pas le cas, puisqu'ils se trouvent dans des états stables. Ils "sont à l'aise dans cet état confortable, et n'ont aucun désir d'en sortir, à moins d'y être contraints !" Nous allons voir que c'est le vide *quantique* qui contraint l'atome à cette émission spontanée.

Suivez-moi dans cette étonnante histoire : Erwin Schrödinger, s'intéressant lui aussi au corps noir, mais en appliquant à sa recherche l'équation qu'il a établie pour calculer la fonction d'onde ¹, a pu préciser que les états énergétiques des photons dans l'enceinte du corps noir ont les énergies $E_n = (n+1/2) h\nu$. Ce résultat est en accord avec le postulat de Planck : les énergies sélectionnées pour l'oscillateur représentant le corps noir sont séparées par $E = h\nu$. Mais ce qui est nouveau, c'est que *le vide le plus poussé devient un corps noir contenant, dans toutes ses parties, des photons résiduels de toutes les fréquences, car $(1/2) h\nu = h(\nu/2) = h\nu'$.*

Ce résultat remarquable est une nécessité théorique, au même titre que celle des *inégalités de Heisenberg* : ce sont des *conséquences inéluctables des postulats fondamentaux de la physique quantique*.

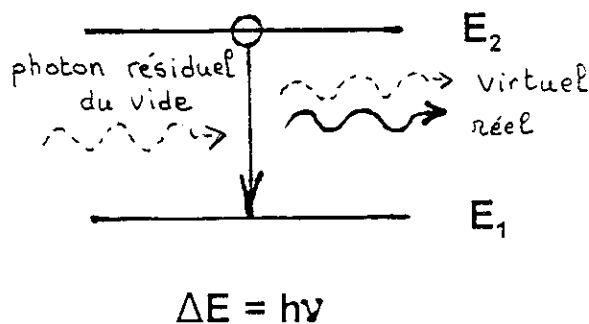
¹ [N.D.L.R.] La fonction d'onde $\Psi(M)$ d'un objet quantique définit, en chaque point M de l'espace, l'amplitude de la probabilité de localisation de cet objet (supposé ponctuel).

Il faut ainsi renouveler la notion du vide : *le vide quantique est le corps noir à la température du zéro absolu, où son énergie est la plus basse possible, sans être nulle.* Le vide quantique est encore ainsi un état limite du corps noir, sous-jacent à tous les états de vide accessibles à l'observateur : le plus poussé étant le vide intergalactique, précédé en moins poussé par le vide interstellaire, que le laboratoire ne permet pas d'atteindre expérimentalement.

Comment prouver expérimentalement l'existence de ce vide quantique ? Une expérience a été proposée par Casimir : Dans une enceinte où l'on produit le vide expérimental le plus poussé qui soit réalisable, on aura disposé, face à face, deux miroirs parallèles. Le vide quantique sous-jacent au vide effectivement réalisé fournit toutes les fréquences photoniques, et il s'établit les ondes stationnaires définies par leur intensité nulle aux noeuds, sur les miroirs, pour toutes les fréquences ν telles que la longueur d'onde soit $\lambda_n = c/\nu_n = 2d/n$, où d est la distance entre les deux miroirs, n prenant toutes les valeurs entières, soit $\nu_n = nc/2d$. Les photons libres, qui ont abandonné cette liberté pour former les ondes stationnaires, ne peuvent plus compenser la pression de radiation exercée par les photons libres, de même fréquence, sur les plans opposés aux faces des miroirs. D'autre part les ondes stationnaires n'exercent pas d'action sur les miroirs puisque, l'intensité de l'onde y étant nulle, les photons ne réagissent pas avec eux. Il en résulte une force d'attraction entre les deux miroirs. Si l'on refait l'expérience avec une distance $d' < d$, les ondes stationnaires produites ont les fréquences $\nu'_n = nc/2d'$, et comme $d' < d$, ν'_n est supérieure à ν_n , et par conséquent la force d'attraction augmente quand la distance d diminue. L'expérience vérifie effectivement ce phénomène, *ce qui prouve l'existence du vide quantique.*

Nous pouvons maintenant revenir au phénomène de l'émission spontanée des atomes . C'est l'existence du vide quantique qui permet de l'expliquer : les photons résiduels de ce vide quantique, par interaction avec les photons de l'atome, leur fournissent l'impulsion nécessaire pour qu'ils quittent leur niveau d'équilibre, et alors ils descendent jusqu'au niveau d'énergie minimale, quand celui-ci n'est pas déjà occupé, car les électrons sont des *fermions*, assujettis au *Principe de Pauli*, d'après lequel tout état quantique d'énergie ne peut être occupé que par un seul fermion.

Transition spontanée:



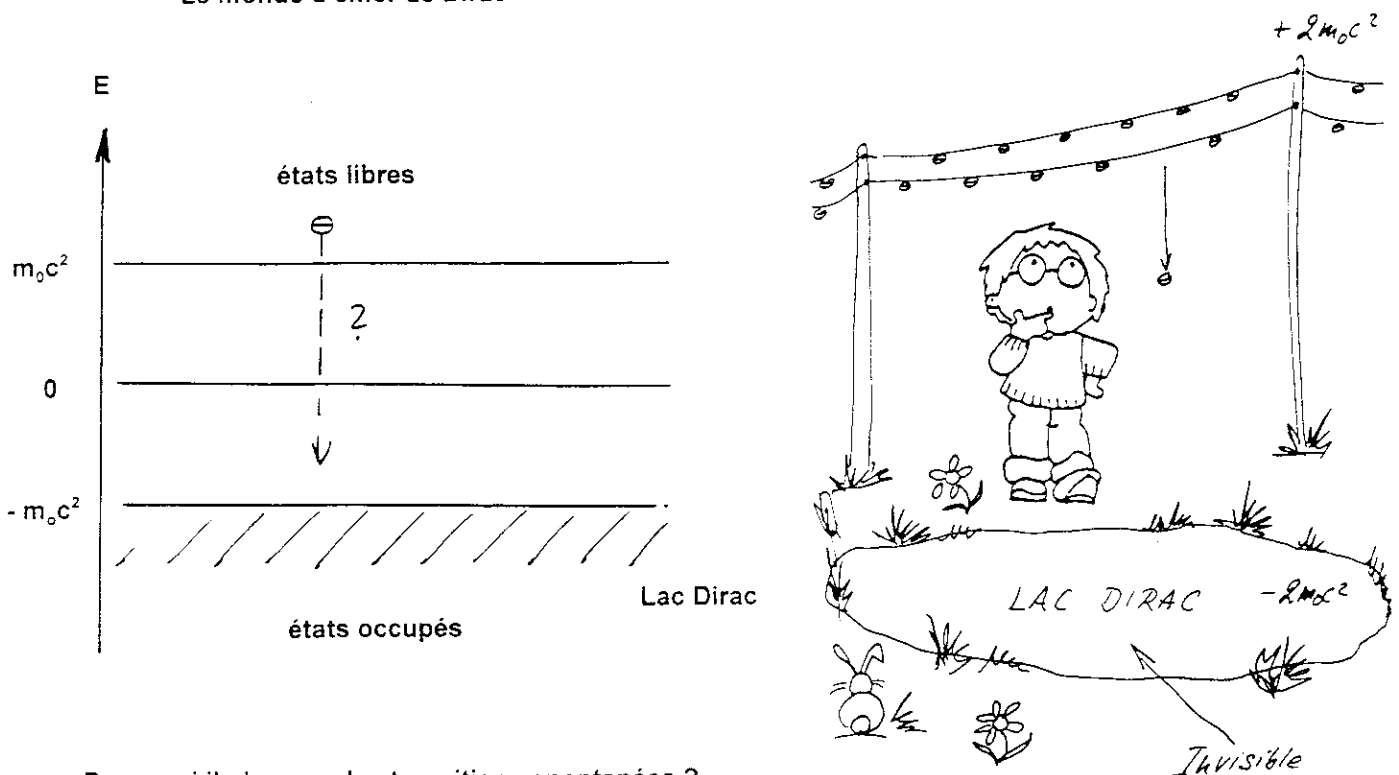
Toutefois les énergies de ces photons résiduels du vide quantique ne sont pas suffisantes pour permettre à un électron atomique de quitter son niveau stable pour monter à un niveau d'énergie supérieure. L'expérience permet aussi de vérifier que l'émission spontanée diminue quand on réduit la distance entre les miroirs, comme le prévoit la théorie, puisqu'alors une quantité d'énergie plus importante du rayonnement libre ($\nu'_n > \nu_n$) entre les miroirs a disparu.

Il faut remarquer que l'existence du vide quantique est essentielle pour la stabilité de l'Univers. Nous n'existerions pas matériellement sans le vide quantique, car alors il n'y aurait pas d'émission spontanée dans les atomes, qui se trouveraient toujours dans tous les états d'excitation possibles. L'équilibre thermodynamique de l'Univers serait impossible.

Il y a une autre propriété, encore plus étonnante, que la physique quantique impose absolument : Erwin Schrödinger avait cherché, pour la fonction d'onde, une équation prenant en compte la relativité einsteinienne. Cette équation ne permettait pas de trouver une solution pour la fonction d'onde dans l'espace-temps. Cela provenait de la non-linéarité de l'équation. C'est Paul Maurice Dirac qui a réussi, par un procédé astucieux, à linéariser l'équation relativiste de Schrödinger, qui devient ainsi l'équation de Dirac. En résolvant son équation, Dirac a découvert que l'électron doit avoir un spin, et que l'atome doit posséder des états d'énergie négative!

Il faut alors expliquer pourquoi les électrons ne descendent pas dans ces niveaux d'énergie négative, puisque l'énergie minimale est rejetée à une valeur négative illimitée. C'est encore le Principe de Pauli qui sauve la situation : il suffit de supposer que *les niveaux d'énergie négative sont déjà occupés par des électrons*.

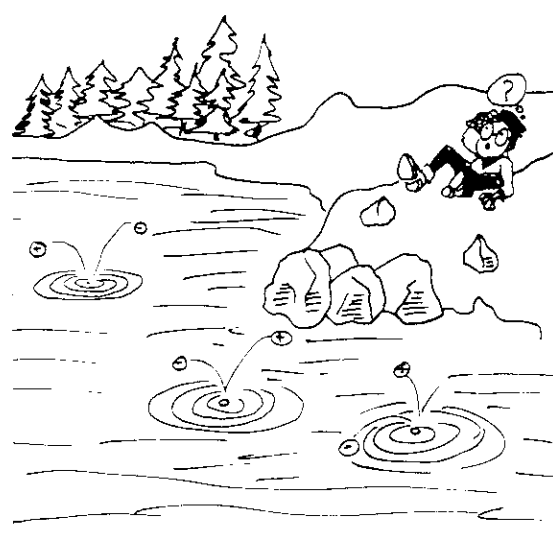
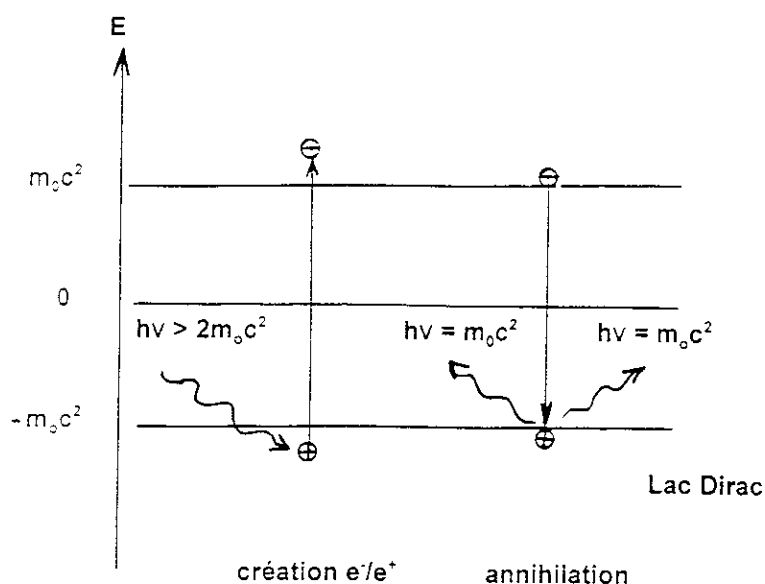
Le monde d'enfer de Dirac



Pourquoi il n'y a pas les transitions spontanées ?

Pauli: Tous les états $E < -m_0c^2$ sont occupés.

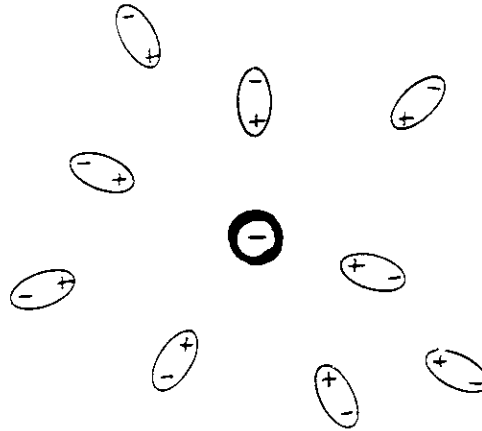
C'est le "lac d'enfer", le *lac de Dirac* ! Sa profondeur énergétique est illimitée, et il est complètement rempli d'électrons ! Mais on ne peut pas les percevoir : ce lac, pour nous, se confond avec le vide. C'est seulement quand un électron s'en échappe que nous percevons un "trou" dans le vide quantique. Ce trou est pour nous un *positron* ou électron négatif, de même énergie de masse que l'électron, mais de charge opposée. On crée un tel "trou" en irradiant le vide par un photon d'énergie $2mc^2$, pour "sortir" l'électron du vide, et fournir l'énergie du positron, la même que celle, mc^2 , de l'électron. Ces positrons se sont effectivement manifestés dans des expériences, qui ont ainsi confirmé la théorie de Dirac. Chaque fois qu'un nouvel objet quantique (- de charge définie et non nulle) a été découvert, au cours des expériences dans le domaine des "particules élémentaires", on a eu affaire par la suite à l'objet quantique de même masse et de charge opposée (son "anti-particule"). La théorie de Dirac a ainsi prédit l'existence de *l'antimatière*. Elle a triomphé parce qu'elle a permis d'expliquer tous les nouveaux phénomènes que l'expérience amène à découvrir.



Le lac de Dirac a des conséquences surprenantes. L'inégalité de Heisenberg, $\Delta E \Delta T \approx h$, permet à l'énergie de prendre une valeur $2mc^2$, sans intervention externe, pendant une durée très courte, et il se forme ainsi constamment, dans le vide quantique, des couples virtuels électron-positron qui s'annihilent très vite. Quand un électron transite, il provoque la polarisation de ces couples virtuels, et le vide est ainsi polarisé autour de l'électron. Les électrons décrivent ainsi des traces tremblotantes, "comme si le vide était un champ de blé, les électrons volant au-dessus, frisant les épis"!

Cette polarisation du vide a pu être prouvée expérimentalement par Lamb : dans l'atome d'hydrogène, elle réagit sur les électrons, et entraîne une légère modification dans la configuration électronique. Ainsi, dans les états $2S_{1/2}$ et $2P_{1/2}$ qui ont le même niveau d'énergie, la polarisation diffère au voisinage des charges, de sorte que les "blindages" qu'elle produit sont un peu différents. Les mesures expérimentales confirment ces différences avec une précision excellente.

La polarisation du vide



L'électron est entouré de couples e^+e^- virtuels

Il y a aussi le spin de l'électron, qui fait qu'il se comporte en dipôle magnétique, de sorte que l'interaction magnétique avec les couples virtuels du vide produit un décalage du dipôle, dont la valeur prévue par la théorie est encore très bien confirmée par les mesures. Cela encore vient confirmer l'existence du vide quantique.

Il y a un effet encore plus curieux du "blindage" de l'électron dans le vide quantique : il masque partiellement, pour un observateur externe, la véritable charge de l'électron. Plus on s'approcherait de l'électron, plus l'effet du blindage dû à la polarisation du vide diminuerait et plus la charge augmenterait pour l'observateur. Et puisque le rayon de l'électron est quasi-nul, sa charge apparaîtrait comme infiniment grande ! Il faut ainsi que la contribution du blindage dû à la polarisation du vide, soit, elle aussi, infiniment grande. La charge de l'électron que nous percevons est ainsi la différence entre deux quantités infiniment grandes. Le vide quantique nous protège donc contre les périls des charges infinies ! La polarisation du vide protège notre existence!

Pour les mathématiciens, la différence entre deux quantités infinies n'est pas calculable, elle est indéterminée. Les physiciens, néanmoins, trouvent le moyen de calculer ici cette différence, par un procédé astucieux, la *renormalisation*². Ils ont obtenu ainsi pour valeur de la charge de l'électron, e , telle que $e^2/hc = 1/137$. C'est-à-dire que $e^2 = 1/137$ en unités h et c .

² [N.D.L.R.] La fonction d'onde doit être *normalisée* (opération parfaitement correcte du point de vue mathématique) pour que la somme, qu'elle permet de calculer, des probabilités de localisation de l'électron dans tout l'espace soit égale à 1, puisqu'il faut bien que l'électron soit quelque part dans cet espace!

La *re*-normalisation (elle, sujette à caution au regard du mathématicien!) est un recours indispensable, pour le physicien, quand la théorie impose des valeurs infiniment grandes à des grandeurs physiques pour lesquelles l'expérience assure des valeurs mesurables.

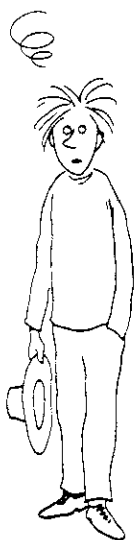
Maurice Dirac disait carrément que ce calcul n'est pas permis. Se référant à l'autorité de la Bible, il considérait que cette faute était la chute de la physique quantique, comme la pomme nous a chassés du Paradis !

Mais la physique ne sait pas comment empêcher cette chute. Il nous faut donc vivre avec cette chute de la physique comme avec la chute du paradis. La pomme de la chute nous a donné la capacité de raisonner. La chute de la physique quantique nous a donné la connaissance du fait que le néant est plus compliqué que ce que nous imaginions auparavant.

Le vide quantique est devenu, entre-temps, plus compliqué encore. Ici nous n'avons eu à envisager que les forces du champ électromagnétique, qui sont produites par l'interaction de l'électron et du photon. Il faut aussi un vide pour les forces nucléaires, qui sont produites par l'interaction des quarks et des gluons. La nature de ce vide *chromodynamique* est encore plus compliquée. Nous n'en discuterons pas ici.

Enfin, quand nous regardons les étoiles du ciel, nous assistons aux grands miracles de l'Univers. Mais il est un autre miracle : comment la lumière qui parvient jusqu'à nos yeux, a-t-elle pu franchir les grandes distance dans l'espace ainsi plein de vide ? L'astronomie est une grande aventure, les yeux dans les yeux.

Roland Szostak



ENDE

Note de la Rédaction : Nous rappelons que ce cet article, dont la première partie a été publiée dans le numéro précédent des Cahiers, est issu de la conférence donnée (en français) par notre ami Roland au cours de l'Université d'été 1976. C'est à la complicité entre Roland, Christian Larcher (pour le premier épisode) et Roger Gouguenheim pour celui-ci que nous devons la présentation finale. Merci à tous les trois.