

LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS

La physique quantique passe pour être extrêmement complexe. Je vais pourtant essayer ici de vous l'expliquer d'une manière très simple - et très fun ! - à travers une drôle d'histoire dont les rebondissements - quantiques - ne manqueront pas de vous surprendre et de vous passionner...

1 Le chat de Schrödinger

L'autre jour, je me baladais en ville lorsque j'entendis une série de miaulements déchirants, provenant d'une petite maison donnant sur la rue. "Un chaton abandonné", pensais-je. "Pauvre bête". N'écoutant que mon bon cœur, je sonnais à la porte. Pas de réponse, mais les miaulements reprurent de plus belle. Je m'enhardis à pousser la porte qui n'était pas fermée. L'intérieur était obscur.

"Il y a quelqu'un ?" Demandais-je, interdit, sur le seuil.

- Fermez cette porte ! Cria alors une voix d'homme. Le chat va s'enfuir !
- Excusez-moi, répondis-je. Je ne voulais pas vous déranger...
- Attrapez ce chat ! Cria-t-il alors. Il est devant vous !

Mes yeux s'étant alors accoutumés à l'obscurité, je parvins à distinguer en effet un chaton qui tentait de se glisser entre mes jambes pour sortir. En me baissant vivement, j'arrivai à l'attraper. Le chaton miaula derechef.

- Ah merci ! Dit l'homme. Ce satané chat va me rendre fou ! Mais Entrez, je vous prie.

Je fis un pas en avant, et distinguai un homme d'âge mur qui me souriait.

- Je ne me suis pas présenté, reprit-t-il. Erwin Schrödinger, physicien quantique.
- Enchanté, dis-je, en lui tendant le chaton. Qu'est-ce que c'est, un physicien quantique ?
- Voulez-vous m'aider à le mettre dans cette boîte verte, là-dedans ? Me demanda-t-il sans me répondre.

Je regardai autour de moi. Jamais je n'avais vu un intérieur aussi étrange. Quel bric-à-brac ! On aurait dit un laboratoire, plein d'appareils étranges et de câbles électriques courant en tous sens. Mais il y avait effectivement dans la pièce une sorte de congélateur dont la porte munie d'une imposante serrure de coffre-fort était ouverte, et qui contenait effectivement une boîte verte posée sur un rayon. La chose bizarre, c'était le gros pistolet, solidement fixé, pointant vers l'intérieur de la boîte, dont la gâchette était reliée à un gros appareil bizarre. Tout ça dans un congélateur !

- Vous voulez vraiment mettre ce chat là dedans ? Mais pourquoi ce pistolet ?

Schrödinger me regarda comme si j'étais le dernier des idiots. Sans répondre, Il posa le petit chat dans la boîte, en referma prestement le couvercle, et enfin referma le congélateur, sans toutefois le verrouiller à clef. Enfin, il daigna me parler.

- Mais pour prouver ma théorie, jeune homme ! La théorie quantique ! Vous voyez, Dès que j'aurais appuyé sur ce bouton (Il y avait en effet un gros bouton rouge sur le congélateur, avec une étiquette marquée «armement du système» !)... un compteur Geiger va commencer à compter les radiations émises par le plutonium que contient cet appareil, et au premier tic l'arme devrait tuer le chat. Mais comme personne ne peut l'observer...

- Quoi ? Criaï-je. Vous allez tuer ce pauvre chat ? Mais vous êtes un monstre !

- Mais non jeune homme ! Ce chat va simplement se retrouver dans état quantique superposé. Dans l'un des états il sera vivant, dans l'autre mort. Mais comme ce caisson de mon invention (il désigna le congélateur) est absolument hermétique et ne laisse passer aucune radiation ni aucune vibration, nous n'aurons aucun moyen de le savoir ! Vous allez voir (il appuya sur le bouton rouge).

- Je ne comprends rien à ce que vous racontez. Tout ce que je vois, c'est que vous allez tuer ce chat. Et avec du plutonium en plus !

- Non, non, il n'y a que quelques atomes de plutonium dans l'appareil. Il peut se passer des jours avant que l'un d'eux ne se désintègre. C'est sans danger. Sauf pour le chat, parce que le pistolet tirera si cela arrive. (Il sourit. Ma parole, il sourit !) Mais cela sera sans conséquence car il n'y aura pas d'observateur pour le savoir. Vous comprenez ?

- Non. Ou plutôt si. Vous êtes complètement timbré !

Je me mordis la langue. Dire à un fou qu'il est fou, c'était sûrement dangereux. Je commençai à reculer vers la sortie. Mais Schrödinger sourit à nouveau.

- Ah, je vois. Vous ne connaissez rien à la théorie quantique !

- Euh... Non, balbutiai-je.

- Je vais vous expliquer. Nous avons le temps, je pense au moins vingt-quatre heures avant que le système ne se déclenche.

- Bon, dis-je, rassuré.

- A moins que ce ne soit dans une seconde.

- Quoi ? Mais vous venez de dire...

- Jeune homme, la désintégration bêta d'un noyau de plutonium est parfaitement imprévisible. Sa demi-vie est de vingt-quatre mille ans. Seulement, j'ai mis suffisamment d'atomes dans la machine pour qu'en moyenne un atome se désintègre toutes les vingt-quatre heures. Mais c'est une moyenne, bien sûr.

- Bien sûr, dis-je, n'osant le contredire.

- Mais mon dispositif est bien plus astucieux. Voyez-vous, si le chat est tué par le pistolet, il deviendra plus lourd à cause du poids de la balle dans son corps, et j'ai muni la boîte d'un système de pesée qui ouvrira le couvercle. En revanche s'il est vivant, la boîte restera fermée et il ne pourra pas sortir de la boîte verte. De sorte que la seule façon pour lui de sortir de la boîte est d'être tué.

- Mais c'est monstrueux !

- Mais non. Tant que nous n'ouvrons pas ce caisson, nous n'avons aucun moyen de le savoir et le chat se trouve dans la superposition d'état « vivant et dans la boîte » ou «

mort et hors de la boîte ».

- Je ne comprends rien à ce que vous dites. Qu'est-ce que c'est que ce congélateur bizarre ? Et Pourquoi a-t-il une serrure ?
- Un congélateur ? Grand Dieux non ! Ce caisson ré-vo-lu-tion-naire (je pouvais entendre chaque syllabe) que j'ai inventé est un container quantique absolument isolé de toute influence physique ! Il est imperméable à toutes les radiations, même aux rayons X, il est impossible, absolument impossible, de savoir ce qui se passe à l'intérieur ! Et la serrure est là pour que personne ne l'ouvre ! D'ailleurs je vais le fermer et en jeter la clef, dit-il en tendant le bras vers la serrure.
- Attendez, dis-je précipitamment car un plan venait de germer dans mon esprit embrumé. Qu'est-ce que c'est qu'une superposition d'états ?

Schrödinger abandonna son geste et se tourna vers moi, prenant instantanément l'air du prof ravi d'expliquer son invention au béotien que j'étais.

- Je vais vous expliquer. Asseyez-vous, jeune homme (il désigna un fauteuil hors d'âge qui trônait dans un coin de la pièce, entre un énorme isolateur électrique d'où sortaient des câbles d'un diamètre conséquent, et une sorte de lessiveuse toute cabossée). Voyez-vous, reprit-il, la matière n'est ni onde ni corpuscule, elle est les deux. Comme la lumière.
- ???
- Bon, reprit-il en voyant mon air ahuri, je reprends doucement. Vous savez que la lumière est une onde ?
- Bien sûr.
- Comment le savez-vous ?

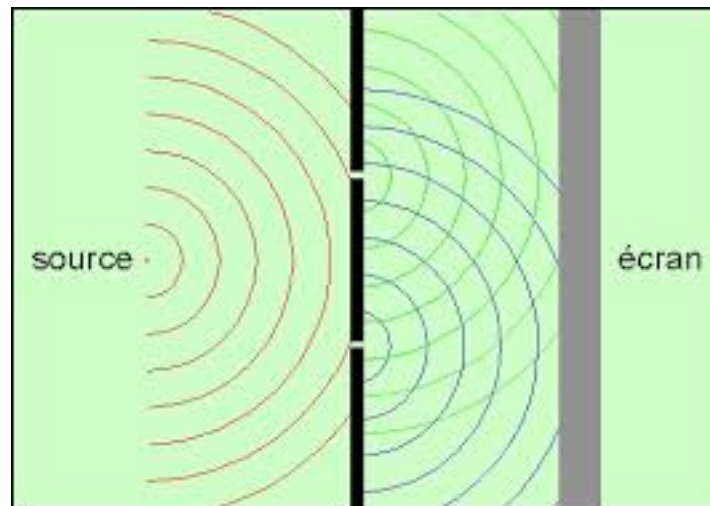
Des souvenirs de lycée que je croyais à jamais perdus affluèrent dans mon esprit. Il y avait cette petite fille oubliée, queue de cheval à la sortie...

- Elle interfère ! M'exclamai-je. La lumière peut créer des interférences. Comme les vagues sur l'eau, précisais-je, tout fier. Donc la lumière est une onde.
- Bien ! C'est ce que tout le monde croyait jusqu'en 1905, année où un certain Albert Einstein, celui de la relativité, oui, montra que l'effet photoélectrique ne peut s'expliquer que si la lumière est formée de corpuscules minuscules et sans masse, que l'on a appelé photons. L'effet photoélectrique, poursuivit-il sans m'en laisser poser la question, c'est celui qui fait marcher les panneaux solaires électriques. Les photons, en tombant sur les atomes de silicium de ces panneaux, les bousculent et leur arrachent leurs électrons. Et ces électrons sont récupérés par des fils, ce qui crée...
- De l'électricité ! J'ai compris ! Mais alors, la lumière n'est pas une onde ?
- Si ! Mais elle est aussi formée de photons. Elle est les deux. Et il n'y a pas que la lumière !
- Que voulez-vous dire ?
- Eh bien, les physiciens de cette époque se sont demandés si les électrons, que l'on croyait être une sorte de particule, n'étaient pas eux aussi, à leur façon, des ondes. Et ils l'ont prouvé !
- Mais comment ? Demandais-je. On peut faire interférer des électrons ?
- Bien sûr ! Les physiciens font ça tous les jours ! D'ailleurs...

Il se leva, alla vers une sorte de vieille télé à tube pourvue d'un écran rond, et pressa un

interrupteur. Sur l'écran, je vis apparaître des lignes vertes, qui se déformèrent, en créant une sorte de moirage comme celui qu'on peut voir en regardant la lumière du jour à travers deux fins voilages superposés.

- Voila ! Dit-il. Aussi vrai que je m'appelle Erwin Schrödinger,



je viens de créer une figure d'interférence avec des d'électrons. Ils sont issus de ce canon à l'électron, là, à l'arrière du tube, et ils bondissent vers l'écran. Mais entre le canon et l'écran, il y a une plaque métallique qui est pourvue de deux petites fentes très rapprochées. De sorte que seuls les électrons qui peuvent passer à travers ces fentes arrivent sur l'écran cathodique, où ils frappent des atomes particuliers qui émettent en retour la lumière que vous pouvez voir. C'est le même principe que les télévisions d'autrefois, à celui près qu'ici il y a ces deux fentes. Si je referme une des deux fentes... (Il bascula un levier sur le côté du tube)... Que voyez-vous ?

- Juste une grosse tache uniforme de lumière verte.

- Et idem si je ferme l'autre fente. Il faut que les deux soient ouvertes pour voir la figure d'interférence. C'est ce qu'on appelle l'expérience des fentes d'Young. Vous voyez, continua-t-il, les électrons eux aussi sont à la fois onde et particule ! Et De Broglie a montré que cela ne vaut pas que pour les électrons, mais pour toutes les particules, tous les atomes, tout ce qui est soi-disant matériel est aussi formé d'ondes ! Même vous et moi ! Même le chat !

- Bon, dis-je, je veux bien. Mais quel rapport avec votre histoire de superposition d'état ?

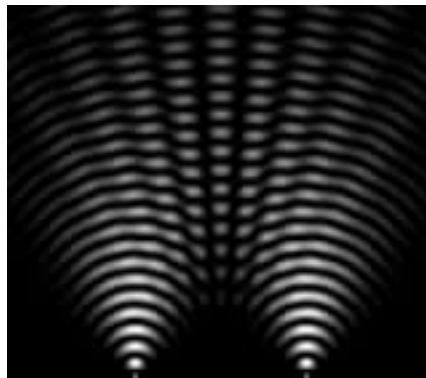
- Ah, fit-il, rayonnant, c'est là une des merveilles de la nature. Avec un canon à électron ordinaire, il y a normalement des milliards d'électrons qui sont émis à chaque seconde, ce qui est suffisant pour produire des interférences. Mais ce canon-ci est un peu particulier. En réduisant la tension, comme ceci... (il tourna un gros bouton), je peux faire en sorte que le canon envoie les électrons un par un. Voila. Que voyez-vous ?

Je me penchai en avant

- Rien du tout, dis-je. Je ne vois rien. L'écran est noir.
- Oui ! Car un seul électron n'a pas assez d'énergie pour qu'on puisse voir la lumière qu'il provoque en arrivant sur le revêtement de l'écran. On ne voit rien !
- Et c'est ça que vous appelez une merveille de la nature ?
- Attendez, dit, il, théâtral. Il faut mettre un appareil photo en face de l'écran.

Se retournant, il alla chercher dans un recoin un appareil photographique qui devait dater du XIXe siècle, le genre qu'on voit dans les westerns, en bois, avec le soufflet en cuir et tout. Il l'installa soigneusement en face de l'écran noir. Je faillis pouffer de rire. Il ressemblait de plus en plus à Doc, le professeur foldingue de Retour vers le futur.

- La plaque photographique, expliqua-t-il d'un ton doctoral, possède la propriété d'accumuler la lumière. Plus le temps de pose est long, plus on voit des détails obscurs. Vous savez ça, j'espère ?
- Oui, oui, dis-je précipitamment.
- Bon ! Cet appareil est une version très perfectionnée... (je faillis pouffer à nouveau en jetant un œil à l'antiquité)... modifiée par moi en utilisant le procédé polaroid de développement instantané. De sorte que nous allons pouvoir voir immédiatement ce que l'appareil a pu capter. Attendons encore un peu... Voilà ! (il souleva un volet de bois et en sortit une plaque photographique de dix centimètres de côté). Que voyez-vous ?
- Une grosse tache blanche floue sur fond noir.
- Oui, parce que j'avais fermé une des deux fentes. Maintenant, je vais recommencer, en ouvrant les deux fentes. (Il remit une plaque dans l'appareil, appuya sur le déclencheur et attendit une minute avant de ressortir la plaque). Voilà, Cette fois, que voyez-vous ?



Une figure d'interférence !

- Oui ! Une figure d'interférence créée par des électrons, qui sont pourtant passés un par un dans les fentes ! Or, soit un électron est passé dans l'une des fentes, soit dans l'autre. Et souvenez-vous, si une fente est fermée, il n'y a pas d'interférence. Alors d'où vient cette figure ?

- Euh...
- La seule explication, c'est que chaque électron a interféré avec lui-même, et qu'il est passé *par les deux fentes à la fois*, en se comportant comme une onde.

Je restai sans voix.

- La théorie quantique explique ce phénomène ainsi : On pourrait penser que

l'électron, au moment de frapper l'écran, peut se trouver dans deux états possibles, selon qu'il est passé par la fente numéro un ou par la fente numéro deux. Mais pour que l'interférence puisse se produire, il se trouve en réalité dans un mélange, une superposition de ces deux états. C'est cela qui permet de passer par les deux fentes à la fois.

- Mais à quoi ça sert ? Demandais-je.
- A quoi ça sert ? A quoi ça sert ? Gronda-t-il comme si j'avais proféré une énormité. Sachez que la théorie quantique est la plus précise de toutes les théories physiques ! Qu'elle n'a jamais, malgré tous les efforts des physiciens, pu être prise en défaut ! Qu'elle permet d'expliquer tous les phénomènes qui ont lieu aux échelles microscopiques, absolument tous ! Que sans elle nous n'aurions pas de circuits intégrés, d'ordinateurs, de panneaux solaires, de centrale nucléaires, de lasers, de lecteurs CD, de fours à micro-ondes, de matières plastiques, de...
- OK, OK. Dis-je. Ne vous énervez pas, Doc (j'avais dit « Doc » malgré moi. Ça eut l'air de lui plaire car il sourit). Mais je ne vois pas le rapport avec votre chat.
- Eh bien, c'est pourtant évident : si tout ce qui est matériel est également de nature ondulatoire, toute particule, tout atome, toute matière peut être préparée de telle manière qu'elle se trouve dans plusieurs états superposés susceptibles d'interférer avec eux-mêmes. On a pu le prouver avec des électrons, et avec des atomes et même de petites molécules. D'ailleurs, les électrons autour d'un atome n'ont pas réellement de position définie. Ils forment une sorte de nuage autour du noyau, et ils sont constamment à tous les endroits à la fois, avec des probabilités bien définies toutefois. On ne peut pas parler de position, ou de quantité de mouvement, pour une particule, mais seulement de densité de probabilité de présence. Ces probabilités sont calculables avec une énorme précision, grâce à mon équation, l'équation de Schrödinger ! (Il marqua une pause, pour me laisser sans doute le temps d'assimiler la génialité de cette équation)... Mais personne ne peut dire où se trouve un électron à un instant donné. La question même n'a pas de sens.
- Je ne vois toujours pas...
- Vous allez comprendre, si vous me laissez parler.

Je me le tins pour dit et restai coi.

- Vous voyez, reprit-il, il est très facile de produire des particules, des photons ou des atomes qui sont dans une telle superposition d'état. Il y a même un effet boule de neige : quand une particule qui se trouve dans un tel mélange d'états heurte une autre particule ou un atome, l'ensemble se trouve immédiatement dans une nouvelle superposition d'état, et on peut calculer très précisément les probabilités de présence du nouvel ensemble à tel ou tel endroit. On appelle cela la fonction d'ondes : c'est une sorte de champ associé à chaque particule, ou groupe de particules, et qui s'étend dans l'univers tout entier. La valeur de ce champ, de cette fonction d'onde, en un point donné de l'espace, détermine la probabilité que l'objet considéré soit précisément en ce point. Mais il y a un hic...

J'étais un peu largué.

- Ah ? Lequel ? Demandais-je néanmoins.
- Où cela s'arrête-il ? Dans notre expérience des deux fentes, Juste avant de frapper l'écran, l'électron se trouve dans une superposition des deux états « passé par la

première fente » et « passé par la deuxième ». Quand il frappe l'écran, l'écran prend à son tour deux états possibles. Et le photon qui est émis par cet écran et qui arrive à la plaque photographique la met aussi dans deux états possibles. Idem pour notre œil lorsque nous contemplons la plaque, et pour nous même ! Et Pourtant, nous voyons bien, en regardant l'écran ou la photo, l'endroit où se trouvait l'électron. En un seul point. Alors qu'il devrait être partout ! S'il était diffusé un peu partout, il n'y aurait pas de figure d'interférence au final. Vous comprenez ?

- Euh...

- Dès qu'on sait par où l'électron est passé, que ce soit parce qu'on a fermé une des deux fentes ou parce qu'on a tenté d'observer par d'autres moyens son passage près de l'une ou l'autre des deux fentes, l'interférence disparaît. L'expérience a été faite. Dès qu'on fait une mesure de la position, même indirecte, on trouve une valeur bien définie. L'interférence s'effondre. La superposition d'états s'effondre. La seule solution, c'est que l'acte d'observation par un observateur provoque la réduction de la fonction d'onde, qui s'étendait dans tout l'espace, à un seul point, celui où l'observateur a vu l'électron. Le seul acte de mesure par un observateur perturbe toutes les probabilités, instantanément, dans tout l'espace, et les réduit à zéro sauf en un seul point. Vous comprenez ?

-

- J'avoue que c'est un peu compliqué...

- Revenons à notre chat. Dans ce container quantique, le congélateur si vous voulez, rien ne sort ni ne rentre. Rien ne nous permet de savoir ce qui s'y passe. Il n'y a pas d'observateur. Donc pas de réduction du paquet d'ondes. Tout ce qui est dans un état quantique superposé dans ce container reste dans un état superposé. Y compris le chat !

- Ça suffit, dis-je. Vous commencez à me soûler avec vos expériences à la noix.

Bondissant soudain sur mes deux pieds, je couru vers le congélateur et je l'ouvris. Le chaton me sauta dans les bras, ronronnant.

- Vous voyez ! S'écria Schrödinger. Il est vivant ! Vivant, et hors de la boîte ! Mais c'est impossible ! Impossible ! (Il réfléchit un moment avant de reprendre) ... Sauf s'il se trouve dans une superposition d'état ! Mais oui ! Je suis sûr que la boîte contient son double, mort ! Mais si j'ouvre la boîte, la fonction d'onde va se contracter et le chat vivant disparaîtra ! Quel dilemme ! Ah, il faut savoir...

- N'ouvrez pas cette boîte ! Criais-je. Je vous l'interdit !

Je refermai le congélateur et tournai la clé dans la serrure pour le verrouiller. Puis, tenant la clé dans une main et le chaton dans l'autre, je me ruai au dehors.

- Jeune homme ! Cria Schrödinger. Ne partez pas ! Revenez ! Il faut que je sache !

Mais je détalai sans demander mon reste. Et rentrai chez moi dare-dare, sans être suivi.

Et voilà. Depuis, je suis propriétaire d'un petit chaton qui est peut-être dans une superposition d'états quantique, et qui peut disparaître à tout moment pour se retrouver instantanément, mort, dans une boîte verte au fond d'un congélateur. Mais ça ne m'inquiète pas plus que ça. Il est trop mignon. Je l'ai appelé Erwin.

C'est pas fini ! L'histoire continue ! Cliquez ici--> [La suite : Le principe](#)

LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS (2ème partie)

2. Le principe d'incertitude et l'intrication

Résumé de [l'épisode précédent](#) : Après une rencontre avec un individu étrange appelé le professeur Schrödinger, je me suis retrouvé propriétaire d'un chaton, rescapé d'une expérience de physique quantique bizarre au cours de laquelle, selon le prof, le chat serait à la fois vivant et mort...)

Plusieurs jours se passèrent et je finis par oublier le Doc Schrödinger et sa théorie quantique. Erwin est maintenant un jeune chat vif et n'a pas du tout l'air de se trouver dans une superposition d'états quantiques. Je finis par me convaincre qu'il avait trouvé un moyen d'ouvrir la boîte verte sans se faire tirer dessus. C'est en revenant chez moi un beau soir, que je compris que quelque chose de bizarre venait de se passer : Pour m'accueillir, il n'y avait plus un chat, mais deux, identiques au poil près !

- Ça alors ! Erwin, tu as un frère jumeau ? M'étonnais-je. Lequel des deux est-tu ?

Ils étaient vraiment identiques. Mais leur comportement était bizarre. Ils bougeaient sans cesse, comme s'ils avaient été piqués par une puce. Je tentais alors d'en attraper un. A ma grande surprise, l'autre accéléra, et disparut à toute vitesse, en passant à travers le mur !

- Ça alors ! M'exclamais-je en reposant le chat par terre.

Mais je n'étais pas au bout de mes surprises. A peine avais-je reposé le jeune chat qu'il se mit à gigoter. Aussitôt, l'autre chat réapparut, courant lui aussi en tous sens ! Je tentai de l'attraper. C'est le premier chat qui disparut alors à toute allure ! Je réitérai l'expérience plusieurs fois : chaque fois que j'attrapai un chat, l'autre accélérât fantastiquement et s'évanouissait dans un mur, le sol ou même le plafond ! La seule manière de les avoir tous les deux, c'était de les laisser danser la gigue sans chercher à les attraper ou à restreindre leurs mouvements. Et le pire, c'est qu'ils n'avaient pas l'air d'aimer ça ! Ils miaulaient comme si une mouche les avait piqués. Merde, que faire ?

Il était clair que l'expérience bizarre à laquelle le doc Schrödinger avait soumis Erwin n'avait pas été sans conséquences. Il fallait que je retourne le voir, de toute urgence ! Mais comment transporter deux chats dont l'un s'évanouit dans la nature dès que je saisis l'autre ? Soudain, j'eus une idée.

Claquant la porte, je quittai mon domicile et me ruai à l'animalerie du coin. J'achetai deux grandes cages, du genre de celles qu'on utilise pour les hamsters, avec une grande

roue à l'intérieur. Je les ramenai à la maison, attrapai un des deux chatons (faisant disparaître l'autre), et le mis dans la cage, où il se mit à courir dans la roue. L'autre chaton réapparut ! J'eus toutes les peines du monde à le faire entrer dans la seconde cage, sans l'attraper. Enfin, j'y parvins. J'avais maintenant deux chats qui tournaient follement, chacun dans sa cage, de manière parfaitement synchronisée.

Attrapant les deux cages, je me ruais chez le doc et sonnai à sa porte.

- Ach ! Fit-il en ouvrant. Je vous reconnais ! C'est vous qui avez saboté ma belle expérience !
- Euh, oui, excusez-moi, je suis désolé, mais j'ai besoin de votre aide. Vous voyez ces deux chats ?

Schrödinger haussa les sourcils.

- Diable ! S'exclama-t-il. Il y en a deux !
- Eh oui, j'ai découvert le second il y a une heure à peine. Mais ils sont vraiment bizarres. Il est impossible d'en attraper un sans que l'autre ne disparaisse. C'est vraiment...
- Bizarre, acheva-t-il. Mais oui ! Je comprends tout !
- Vous avez bien de la chance !
- Mais entrez, jeune homme, dit-il en s'effaçant pour me laisser entrer chez lui.

La pièce était dans un état encore pire que celui dans lequel je l'avais trouvée la fois précédente. Elle était remplie du sol au plafond d'appareils compliqués d'apparence archaïque. Le congélateur était encore là. Ouvert.

- Comment avez-vous fait pour l'ouvrir ? C'est moi qui ai la clé !
- C'est vous qui me l'avez volée, vous voulez dire !
- Euh... Excusez-moi, mais je voulais seulement vous empêcher de tuer ce chat !
- Oui, oui. Bon, laissons cela. Posez ces cages par terre, voulez-vous ? Bon, continua-t-il tandis que je m'exécutais, j'avais le double de la clef. Mais je l'avais oubliée au fond d'un tiroir ! C'est seulement aujourd'hui que je m'en suis souvenu. J'ai alors ouvert le container et...
- Un instant, l'interrompis-je. Vous voulez dire que... Le deuxième chat... C'est à cause de vous ?

A son tour, il parut gêné.

- Oui. Bon. Donc quand j'ai ouvert le container, j'ai découvert que le compteur Geiger avait bien enregistré une désintégration, mais le revolver n'avait pas tiré, parce que j'avais oublié de le charger ! Quel distrait je fais ! J'ai alors ouvert la boîte verte, et le chat était encore là !
- Quoi !!!
- Heureusement que j'avais mis de la nourriture dans la boîte, hein ? Sinon il serait mort de faim. Mais à peine avais-je essayé de l'attraper, qu'il s'est évanoui en passant à travers le plafond ! C'est incroyable ! Et c'est chez vous qu'il a... Atterri alors ? Diable ! Il a dû synchroniser ses coordonnées spatio-temporelles avec celles de son double

intriqué, je ne vois pas d'autre explication !

- Doc, je ne comprends rien à ce que vous dites.

Schrödinger me regarda comme si j'étais le dernier des idiots. Puis il haussa les épaules.

- C'est vrai, j'oublie toujours que vous êtes un béotien. Bon alors je vais tenter de vous expliquer ça simplement. Il n'y a pas deux chats, il en a qu'un seul.

- Vous voulez dire que le second chat est une illusion, c'est ça ?

- Non, non ! Le second chat est tout aussi réel que l'autre. En réalité ils sont le même chat. C'est comme si on le voyait en double. Si vous en tuez un, l'autre mourra.

- Mais c'est terrible !

- C'est pour cela qu'ils remuent sans cesse, poursuivit-il, ignorant mon exclamation. On ne peut pas mesurer simultanément leur position et leur vitesse avec une précision arbitraire, à cause du principe d'incertitude.

- Vous ne pourriez pas arrêter de parler chinois ?

- Le principe d'incertitude, articula lentement le physicien, dit que l'on ne peut pas mesurer avec une précision arbitraire deux variables couplées telles que la position et la quantité de mouvement, l'angle de rotation et le moment angulaire, ou encore l'énergie et le temps.

- Là, ça n'est plus du chinois, c'est de l'hébreu.

-

Mmm. Considérez un électron. Comme je vous l'ai déjà dit, il est à la fois onde et particule. Si vous essayez de savoir où il se trouve exactement, disons en lui envoyant un photon à un endroit précis, l'onde s'étale, de sorte que vous ne pouvez plus mesurer précisément dans quelle direction il se déplace. Et si vous essayez de mesurer sa vitesse avec précision, vous avez besoin d'enregistrer son temps de passage entre deux endroits différents, à des moments différents et donc vous ne pouvez plus connaître sa position exacte à chaque instant. Vous me suivez ?

- Disons que c'est... de l'allemand.

- Ach ! Dit Schrödinger. L'allemand est une jolie langue pour faire de la physique !

- Certainement, certainement, acquiesçai-je, ne voulant pas le contrarier.

- Pour une raison mystérieuse, probablement à cause du plutonium que contient mon appareil, notre chat semble dédoublé, et de plus il se comporte comme une particule, probablement un proton. Il est impossible de mesurer simultanément sa position et sa vitesse. Vous comprenez ?

- Oui ! C'est beaucoup mieux quand vous parlez français.

- Je suis sûr que si je tentais d'en immobiliser un, l'autre acquerrait aussitôt une vitesse formidable et on le verrait s'éloigner à la vitesse de la lumière...

- Doc ! C'est exactement ce qui s'est passé chez moi ! J'ai essayé de les attraper tous les deux, mais...

- Ya, Ya ! Vous foyez, j'ai raison !

J'avais déjà remarqué que lorsqu'il s'excitait, il prenait un accent allemand de plus en plus prononcé. Je devais tenter de le calmer un peu.

- Mais qu'est-ce qu'on peut faire ?

- Ce qu'on peut faire ? Ce qu'on peut faire ? Mais des expériences !

- Des expériences ?

- Mais oui ! Ce chat quantique est un trésor fabuleux pour la physique ! Fous fous

rendez compte ? C'est extraordinaire ! Normalement, les phénomènes quantiques ne sont observables qu'à l'échelle microscopique ! Or ici, nous avons un chat quantique ! Je dois prévenir tous mes collègues ! Bohr, Heisenberg, Dirac, Pauli, Einstein, Podolsky et Rosen !

- Doc ! Criaï-je, scandalisé. Il n'est pas question de ça ! Il faut le rendre à son état normal !

Schrödinger haussa les sourcils en signe d'incompréhension. Puis il se détendit.

- Natürlich, ya ! Mais comment foulez-vous que je fasse sans étudier d'abord ce chat ?
- Fou... Vous voulez dire que vous ne savez pas ce qu'il faut faire ?

Pour toute réponse, le vieux physicien se dirigea vers une cafetière qui trônait de manière incongrue sur une paillasse de chimiste, entre deux rangées de cornues en verre et d'alambics en cuivre.

- Café, jeune homme ? Avec un peu de schnaps, c'est délicieux, vous savez ?

Pourquoi pas, après tout. J'acquiesçai. Il me servit, m'invita à m'asseoir dans l'unique fauteuil, et prit place sur une sorte de transformateur cylindrique, qui bourdonnait de manière inquiétante.

- Voyez-vous, dit-il, les deux images de ce chat sont intriquées. Ils partagent la même fonction d'onde.

- Qu'est-ce que cela veut dire ?

- Cela veut dire qu'ils possèdent des propriétés qui sont différentes de celles qu'on obtiendrait avec deux chats réels, même parfaitement identiques. L'intrication est un phénomène quantique fascinant. On peut expérimentalement l'obtenir avec des photons simultanés issus d'un même atome. Les photons sont alors corrélés...

- Je suis désolé, mais vous recommencez à parler chinois.

- Décidément, il faut tout vous expliquer, à vous. Vous n'avez jamais été à l'école ?

- Si, mais je ne suis pas physicien.

- Personne n'est parfait. Ach. Bon, vous connaissez l'origine de la lumière ?

- L'origine de la lumière ?

- Oui. Celle du soleil, d'une ampoule électrique, d'une LED, toutes les sources de lumières.

- Euh...

- Les photons sont émis par les électrons des atomes. Lorsque un atome est excité, parce qu'il a été chauffé par exemple, ses électrons sont instables, et ils peuvent se désexciter spontanément en émettant un photon de lumière, revenant ainsi à un état stable.

- Je ne savais pas.

- Vous êtes bien ignorant. Bon. Dans certains cas, avec des lasers, on peut placer le nuage électronique qui entoure un atome dans un état doublement excité. Peu importe ce que cela veut dire, continua-t-il en voyant mon air ahuri. Ce qu'il faut retenir, c'est que cet atome va alors émettre deux photons d'un seul coup, dans deux directions opposées.

Je ne voyais pas du tout où il voulait en venir.

- Oui, et alors ?
- Alors ces deux photons sont étranges. Ils sont intriqués. Les mesures que l'on fait sur l'un conditionnent instantanément l'état de l'autre, comme s'il n'y avait qu'un seul photon. Comme notre chat.
- Ah ! Je vois. Ou plutôt, je ne vois pas du tout. Qu'est-ce qu'un état intriqué ?

Schrödinger sourit.

- Je vais vous donner une analogie. Imaginez que j'envoie chaque jour deux lettres à deux de mes collègues, disons Bohr et ce petit prétentieux d'Einstein. Dans chaque enveloppe, je ne mets qu'un bout de papier, portant soit le signe « + » soit le signe « - ». Je choisis au hasard un des deux signes et je l'envoie à Bohr, puis j'envoie le même signe à Einstein. Tous les jours, pendant des années. Si un jour Bohr et Einstein se rencontrent, ils pourront comparer la série des signes qu'ils ont reçus l'un et l'autre, et ils constateront que les deux séries sont aléatoires, mais parfaitement corrélées. Chaque fois que l'un a reçu « + », l'autre a reçu « + » et vice-versa.
- Oui, et alors ?
- Alors ça, c'est une corrélation, mais ce n'est pas une intrication. L'intrication quantique, c'est beaucoup plus étrange que cela.

Je ne sais pas pourquoi, une phrase que j'avais lue quelque part apparut brusquement dans mon esprit : *Deux cœurs qui ont interagi dans le passé ne peuvent plus être considérés de la même manière que s'ils ne s'étaient jamais rencontrés. Marqués à jamais par leur rencontre, ils forment un tout inséparable.* Je sentais que j'étais sur le point de comprendre quelque chose. Mais Schrödinger continua à parler. L'impression disparut.

- Considérons un photon de lumière. Nous connaissons parfaitement sa vitesse, donc imparfaitement sa position parce après tout, c'est aussi une onde. Les seules choses que nous pouvons mesurer, ce sont sa fréquence, qui est proportionnelle à son énergie, et sa polarisation.
- Sa quoi ?
- Vous n'avez jamais fait de photographie ? De la vraie photographie, avec un véritable appareil reflex et pas un téléphone de merde ?
- Si, avouai-je.
- Alors vous savez qu'on peut mettre devant l'objectif un filtre polarisant. Ce filtre est formé d'une myriade de petites rainures parallèles, qui ne laissent passer que les photons qui vibrent dans le même sens, disons verticalement. Si vous positionnez un second filtre polarisant derrière le premier, mais orienté à quatre-vingt-dix degré du premier, donc horizontalement, vous allez bloquer presque tous les photons. C'est le principe des lunettes de soleil polarisantes.

Admettons, pensais-je.

- Oui, et alors ?
- Alors il se trouve que l'on ne peut mesurer la polarisation que dans une direction à la fois, disons verticale ou horizontale, mais pas les deux. Pour mesurer la polarisation d'un photon, il faut le faire passer à travers un filtre polarisant orienté, disons verticalement, puis le faire tomber sur une cellule photoélectrique et mesurer l'énergie reçue. Vous obtenez alors l'intensité de la polarisation verticale, pour simplifier soit « + » soit « - »

». Mais vous ne pouvez plus mesurer l'intensité de la polarisation horizontale, parce que le photon, en passant à travers le filtre vertical, a acquis une polarisation strictement verticale et que sa fonction d'onde dans le sens horizontal a été réduite à zéro. En fait, il est impossible de connaître exactement à la fois la polarisation horizontale et la position verticale d'un seul photon. C'est une des conséquences du principe d'incertitude. Vous me suivez ?

- Euh...

- Juste avant la mesure, le photon est dans un état superposé « horizontal Plus vertical » avec des coefficients qui donnent la probabilité de le trouver dans l'un ou l'autre état. Mais dans le cas de deux photons corrélés, ou intriqués, émis simultanément par le même atome, les polarisations des deux photons sont toujours obligatoirement identiques. Si l'un est vertical, l'autre est aussi vertical et vice-versa. Et nous avons alors un paradoxe.

- Lequel ? Demandai-je, un peu perdu, mais intéressé néanmoins, même si je ne voyais pas encore le rapport avec la choucroute, et encore moi avec le problème des deux chatons.

- Eh bien, avec un premier appareil, nous allons mesurer l'intensité de la polarisation horizontale du premier photon. Et avec un second appareil, éventuellement très loin du premier, nous allons mesurer l'intensité de polarisation verticale du second photon. Nous avons alors un moyen de déterminer à la fois la polarisation verticale et la polarisation horizontale, ce qui est impossible d'après le principe d'incertitude !

Mouais, pensais-je, mais quel rapport avec la choucroute ?

- Mais en réalité, poursuivit Schrödinger, le principe d'incertitude est toujours respecté. L'expérience ne marche pas. Ou en fait elle marche trop bien. Le fait expérimental, vérifié des centaines de fois, est que chaque fois qu'on trouve que l'un des photons est polarisé verticalement, l'autre est toujours polarisé verticalement lui aussi et la mesure de polarisation horizontale donne toujours zéro. Et vice-versa. Il est impossible en pratique de mesurer les polarisations dans les deux sens, même avec un appareillage conçu exprès pour ! C'est comme si, dès que je trouve que l'un des deux photons est vertical, l'autre acquérait toujours instantanément une polarisation verticale. Et ce, quelle que soit la distance entre les deux appareils. Vous voyez en quoi cela ressemble à mon expérience avec les enveloppes que j'ai envoyées à mon grand ami Bohr et à ce petit con prétentieux d'Einstein ?

- Euh... Eh bien non.

Schrödinger leva les yeux au ciel.

- Comment vous faire comprendre ? Reprenons depuis le début.

Cette fois, c'est moi qui levais les yeux au ciel.

- Supposons, reprit Schrödinger, ignorant ma mimique, que j'envoie à mon ami Bohr une lettre contenant deux petites enveloppes marquées « H » et « V ». A l'intérieur de chaque petite enveloppe, je mets un papier contenant soit le signe « + » soit le signe « - », en choisissant au hasard à chaque fois. Il peut y avoir deux « + », ou deux « - », ou un « + » et un « - », je choisis au hasard pour chacune des deux enveloppes. L'astuce, c'est que j'ai muni ces deux petites enveloppes d'un dispositif astucieux qui fait que dès qu'on

ouvre une des deux enveloppes, le contenu de l'autre sera immédiatement effacé, de sorte que Bohr pourra seulement connaître le contenu de l'une des deux enveloppes. En terme quantiques, il ne pourra connaître que le résultat d'une seule mesure de polarisation. Vous me suivez ?

- A peu près.

- Maintenant, j'envoie à ce fumiste d'Albert Einstein une autre lettre, contenant elle aussi deux petites enveloppes marquées « H » et « V », munies du même dispositif, chacune contenant un papier dans lequel j'ai écrit exactement les mêmes signes que ceux que j'ai envoyés à Bohr. Si l'enveloppe « H » envoyée à Bohr contenait « + », l'enveloppe « H » d'Einstein contiendra « + », et réciproquement. Et le lendemain, je recommence. J'envoie à nouveau deux lettres contenant chacune deux enveloppes. Et ainsi de suite.

Il reprit son souffle.

- Ach, c'est ici que cela se corse. Bohr, en recevant l'une de mes lettres, disons la numéro 91, va devoir choisir laquelle des deux petites enveloppes il pourra ouvrir, puisque le contenu de l'autre se détruira aussitôt. Il choisit donc au hasard, disons l'enveloppe H. Et il note le résultat que contient l'enveloppe, disons « 91 : H+ ». Comme j'ai choisi au hasard ce que j'allais mettre dans chaque enveloppe, le résultat est parfaitement aléatoire. Einstein, de son côté, fait de même. Il note, disons « 91 : V- ». Là aussi, cela lui semble dû au hasard. Mais lorsque, plus tard, après avoir reçu des centaines de lettres, ils comparent leurs résultats, ils sursautent car cela leur semble magique.

- Comment cela ?

- Tout d'abord, pour chacune des lettres pour lesquelles ils ont choisi la même petite enveloppe (H ou V), les signes + et - qu'elles contenaient sont les mêmes. C'est normal, se disent-ils, nous recevons les résultats de mesures sur deux photons intriqués donc les mesures de polarisations sont identiques. Mais s'ils ont choisi des enveloppes différentes, les signes sont opposés ! Si pour la lettre 18 Bohr avait choisi l'enveloppe H, et noté « 18 : H+ » alors Einstein, en ouvrant l'enveloppe V de la lettre 18, verrait qu'elle contient le signe « - » ! Ceci parce que la mécanique quantique interdit de mesurer à la fois une polarisation verticale et horizontale ! Comme ils ont choisi au hasard, chacun de leur côté, et sans se concerter, quelle enveloppe ils allaient ouvrir, cela leur semble magique ! Comme si le fait que Bohr choisisse une des enveloppes déterminait instantanément le contenu de l'enveloppe qu'Einstein s'apprêtait à ouvrir de son côté !

- C'est très joli, dis-je. Mais quel rapport avec mon chat ?

- Et la nature est vraiment comme ça ! Poursuivit Schrödinger sans me répondre et visiblement emporté par son sujet. Toutes les expériences le confirment, quelle que soit la distance entre les deux mesureurs de polarisation ! Notez que cela ne permet en aucun cas à Bohr d'envoyer un message codé à Einstein, parce les enveloppes qu'il ouvre, pour lui, ont un contenu parfaitement aléatoire. Et réciproquement.

- Oui, mais pour mon chat ?

- Ah oui, le chat ! Eh bien, il faut considérer que nous avons deux chats intriqués. Pour eux, la position et le mouvement sont les deux variables corrélées, de la même manière que les deux polarisations de nos photons sont leurs deux variables corrélées. Pour les « désintriquer », si vous me permettez cet aphorisme qui est en fait un euphémisme, à mon que ce ne soit un apophtegme, voire un apophtegmorisme,...

- Au fait, au fait !
- Eh bien, il faudrait mesurer simultanément leur position et leur vitesse, ce qui est apparemment impossible. Sauf...
- Sauf ?
- Si nous les refroidissons suffisamment. Le froid les ralentirait, et permettrait peut-être de les rapprocher suffisamment pour...

Je jetai un œil suspicieux vers le congélateur qui trônait toujours au centre de la pièce.

- Vous n'allez pas les remettre la dedans ?

Il sursauta.

- Grand Dieux, non ! Je pensais à un refroidissement quantique, bien entendu !
- Un refroidissement quantique ? Qu'est-ce que c'est ?
- Pour refroidir encore davantage les atomes d'un gaz très froid, on les éclaire avec un laser qui a presque la fréquence que leur fréquence naturelle d'émission ou d'absorption, juste un peu en dessous. Lorsque l'atome se rapproche du laser, la fréquence lumineuse que l'atome perçoit est, du fait de l'effet doppler, un peu supérieure à sa fréquence vu par un observateur fixe et devient égale à la fréquence naturelle de l'atome. Il absorbe alors un photon, ce qui le ralentit, donc le refroidit. Mais... (il réfléchit) Pour notre chat, cette fréquence serait bien trop élevée. Et puis un laser de cette puissance le tuerait. Non. Il y a peut-être un autre moyen. *Vous jouez au ping-pong ?*

© <http://sboisse.free.fr/science/physique/physique-quantique-pour-les-nuls-2.php>

LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS (3ème partie)

3. L'équation de Schrödinger et les amplitudes quantiques

Résumé des [épisodes précédents](#) : suite à une étrange expérience, menée par le prof Schrödinger, je me suis retrouvé propriétaire de deux chats très bizarrement intriqués, identiques en tout point puisque selon le prof ils seraient en fait le même chat, dédoublé. Le prof pense avoir trouvé un moyen de reconstituer le chat unique d'origine, et pour cela il me demande abruptement si... Je joue au ping-pong !)

Quelle question, en un moment pareil ! Il était vraiment fou, pensais-je.

- Moi, j'y joue, poursuivit-il. Mais c'est difficile sans partenaire. Ach, je crois qu'il m'en reste une ou deux. Vous, allez libérer les deux chats pendant ce temps.
- Une ou deux quoi ?

Sans répondre, il se dirigea vers une surface horizontale située dans le fond de la pièce, recouverte d'un drap sale et encombrée d'un bric-à-brac hétéroclite d'objets divers, parmi lesquels je reconnus une lunette astronomique, un réveil matin mécanique, un autre électrique, un démarreur de voiture, une antenne parabolique, et un parapluie

dont il ne restait que les baleines.

Sans ménagement, il tira fermement sur le drap, envoyant tous les objets par terre, et découvrit une moitié de table de tennis de table. Je l'entendis grommeler.

- Où sont-elles, déjà ? J'étais sûr d'en avoir deux. Eh bien, que faites-vous à me regarder ? Libérez ces deux chats !

Sursautant, je me dirigeai vers les cages et ouvrit les deux portes. Les deux chats en sortirent vivement, et se mirent à tourner en rond, chacun selon son propre cercle.

- Ach ! Je les ai trouvées ! s'écria Schrödinger. Les voilà !

Il tenait deux balles de ping-pong dans la main. Il exultait.

- Savez-vous, jeune ignorant, qu'un électron est mille huit cent trente-six fois plus léger qu'un proton ?

- Non, je n'en savais rien et qu'allez-vous faire avec cette balle de ping-pong et quel rapport avec les chats ?

- Eh bien chaque balle est mille huit cent trente-six fois plus légère qu'un chat, naturellement.

- Naturellement.

Cette fois, j'en suis sûr, il est complètement dingue, pensais-je.

- Si les chats sont comme des protons intriqués, alors chaque balle de ping-pong est comme un électron. De sorte que si nous intriquons ces balles avec les chats, nous créerons, ach, comment dire, l'équivalent d'une molécule de dihydrogène. Le problème, c'est de résoudre l'équation pour la molécule « chats intriqués plus balles de ping-pong ». Diable !

- Quelle équation ?

- *Mon* équation, jeune homme ! L'équation de Schrödinger, la plus célèbre équation de la physique !

- Ah, vous voulez dire $E = MC^2$? Je pensais que c'était Einstein.

Schrödinger fit une moue dégouttée.

- Peuh ! La petite équation de ce coq prétentieux ne vaut pas une roupie de sansonnet face à la mienne ! La sienne permet de faire des bombes atomiques, la mienne fait fonctionner la matière, elle décrit toutes les particules atomiques, tous les atomes, toutes les molécules ! c'est quand même plus important, non ?

- Certes, dis-je. N'osant le contredire. Et que dit cette équation ?

- Elle s'écrit, en simplifiant un peu : $E \psi = H \psi$!

E psi = H psi ? Pensais-je. Ça n'a pas l'air terrible.

- On doit pouvoir simplifier par psi pour trouver $E = H$, non ? Hasardais-je.

Qu'avais-je dit là !

- Ignorant ! Se désola-t-il. Ignorantus, ignorantum, ignoranta ! On ne peut rien simplifier du tout ! C'est une équation *différentielle*, jeune homme !
- Et ça veut dire quoi, ça ?
- En voici la version complète, dit-il en traçant quelques signes cabalistiques sur le tableau :

$$H(t) | \psi(t) \rangle = i\hbar \frac{d}{dt} | \psi(t) \rangle$$

- Cette équation, reprit-il, permet de calculer la fonction d'onde, psi (Ψ), à partir de l'énergie E du système et de son Hamiltonien H, qui est un opérateur aux dérivées partielles... Bon laissons tomber, ajouta-t-il en voyant ma totale incompréhension. Disons que, grâce à elle, on peut déterminer avec une totale précision toutes les probabilités quantiques, telle que la probabilité que le système soit dans tel ou tel état, celle que son énergie soit ceci est cela, etc. On peut calculer la trajectoire de toutes les particules, et en particulier celles des électrons autour d'un atome ou dans une molécule. Cette petite équation qui n'a l'air de rien possède une puissance inouïe, jeune homme !
- Si vous le dites...
- D'ailleurs je vais vous en faire la démonstration, grandeur nature !

Sans crier gare, il lança les deux balles de ping-pong vers les des deux chatons, qui continuaient à danser la gigue. A ma grande surprise, les balles de ping-pong semblèrent s'animer d'elles-mêmes. Elles accélérèrent d'un coup, et se mirent à décrire à toute allure, presque en vrombissant, une trajectoire en huit autour des deux chats qui semblèrent se calmer en retour. Ils ne bougeaient presque plus, se contentant de tourner doucement sur eux-mêmes. Le soulagement était visible dans leurs yeux, et ils cessèrent de miauler.

- Doc ! M'exclamais-je. Quel est ce prodige ?
- Quel nom avez-vous donné à ce chat, disiez-vous ? Demanda-t-il tout à trac au lieu de me répondre.
- Je l'ai appelé Erwin, et je ne vous l'avais pas encore dit, Répondis-je.
- Erwin ? Joli nom, je trouve, dit Erwin Schrödinger. Eh bien, je vous présente une molécule d'Erwinium.
- Quoi ??
- Ces chats sont comme des noyaux atomiques, des protons, et pour eux ces balles de ping-pong sont des électrons. Elles les lient ensemble comme dans une vraie molécule.
- Ping-pong vous voulez dire
- Non, ping-ping, parce qu'en réalité il n'y a qu'un seul chat. C'est d'ailleurs ce qui me trouble. Il faut absolument que je calcule l'Hamiltonien de ce système, afin de déterminer la fonction psi...
- L'Hamil quoi ? et qu'est-ce que cette fonction psi dont vous parlez sans cesse ?
- La fonction psi, jeune homme, mais c'est la fonction d'ondes ! (Et il y avait du respect dans sa voix pendant qu'il disait cela). C'est elle qui fixe la valeur de l'onde en tout point

de l'espace-temps !

- Mais de quelle onde parlez-vous ?
- L'onde d'amplitude de probabilité de présence, bien sûr !
- Je ne comprends plus rien.
- Vous vous souvenez qu'en mécanique quantique, chaque particule, chaque groupe de particules, chaque objet, peut se comporter comme une onde ?
- Oui, je me souviens.
- L'onde fixe les probabilités de présence. On ne peut déterminer que des probabilités. Par exemple la probabilité qu'un électron soit ici ou là, ou possède telle ou telle énergie, ou soit dans tel ou tel état. Vous me suivez ?
- Oui, je sais cela.
- Mais l'onde ne donne pas directement les probabilités. Pour les obtenir, il faut d'abord calculer la fonction psi. Pour cela on se sert de mon équation, jeune homme, pas de celle de ce morveux d'Einstein. Puis il suffit de prendre le carré de son module pour obtenir une probabilité.
- C'est du chinois.

Schrödinger soupira.

- Cette fonction psi prend des valeurs qui peuvent être réelles ou complexes, c'est-à-dire avec une partie imaginaire, comme la racine carrée de -1. On appelle ces valeurs des amplitudes de probabilité. Ensuite, le carré du module, ou de la valeur absolue, si vous préférez, de l'amplitude donne la probabilité cherchée. Vous avez compris ?
- C'est du japonais.

Schrödinger re-soupira.

- Supposons que je calcule, avec mon équation cela va sans dire, cette fameuse fonction psi pour l'Erwinium formé par nos chats intriqués et les deux balles de ping-pong. Avec elle, je peux déterminer les amplitudes pour que les chats soient dans tel ou tel niveau d'énergie. Supposons que je trouve que l'amplitude pour que le premier chat soit immobile à un instant donné est de 0,4 ; que l'amplitude pour que le second soit immobile au même moment est de moins 0,6 ; et que l'amplitude pour que les deux balles soient immobiles est de 0,2. Supposons que nos trois amplitudes sont indépendantes, ce qui n'est pas vrai, mais passons. Comment trouver la probabilité que les deux chats et les balles soient tous simultanément immobiles ?
- Oui, comment ?
- En mécanique classique, on prendrait le carré des amplitudes pour obtenir des probabilités, puis on ferait le produit des trois probabilités, soit $(0,4 \times 0,4) \times (-0,6 \times -0,6) \times (0,2 \times 0,2)$, et on trouverait 0,002304 : une probabilité d'à peu près zéro virgule deux pour cent pour que les deux chats et la balle soient immobiles.
- Pas terrible.
- Mais la nature ne fonctionne pas comme cela. L'univers obéit en réalité à la mécanique quantique, pas à la mécanique classique. Ceci parce que, tout comme des ondes qu'elles sont en réalité, les amplitudes interfèrent ; Comme des vagues sur la mer, elles s'ajoutent et se retranchent. Ce que nous devons faire en réalité, c'est calculer l'amplitude totale d'abord, et la mettre au carré seulement ensuite.
- Ah ! Fis-je.
- Ach ya ! Dans mon exemple, l'amplitude totale est donc $0,4 - 0,6 + 0,2 = 0$!

L'amplitude, donc la probabilité, est nulle ! Les chats et les balles ne pourront jamais s'immobiliser !

- Mais c'est terrible !
- C'était juste un exemple, s'empressa de me rassurer Schrödinger. Ce qu'il faut maintenant, c'est calculer les vraies amplitudes, et donc les probabilités, pour le système formé par notre molécule d'Erwinium. Ach Ya ! Et tant qu'à faire, je vais calculer l'amplitude pour que les deux chats fusionnent et ne fasse plus qu'un !

Un mince espoir se fit jour en moi.

- Vous pourriez faire ça ? Demandai-je.
- Natürlich ! Ach ! Il me faut un stylo et du papier beaucoup de papier !

Il se leva, et ouvrit une petite porte que je n'avais pas remarquée dans le fond du labo.

- Mon bureau, jeune homme !

Je jetai un œil à l'intérieur. C'était une grande pièce, aussi grande que le labo, mais littéralement remplie de papiers et de livres, qui formaient des piles instables allant parfois jusqu'au plafond. Schrödinger se fraya difficilement un passage entre les piles vacillantes et poussiéreuses, et en revint triomphalement avec un antique stylo plume et une épaisse rame de papier.

- Euh... Vous n'avez pas d'ordinateur ?
- Un ordinateur ? Et pourquoi faire ?
- Mais pour faire tous ces calculs ! A la main, ça va prendre en temps fou !
- Peuh ! Les ordinateurs, c'est bon pour ces physiciens de pacotille du CERN, qui traficotent bêtement des tonnes de données issues de leurs accélérateurs de particule afin de prouver l'existence de leur fichu boson de Higgs, qui découle pourtant tout naturellement de ma théorie ! Non, jeune homme, le papier c'est bien plus sûr !
- Mais... Ça va vous prendre combien de temps ?
- Le temps qu'il faudra, jeune homme ! Asseyez-vous, prenez un autre café avec du schnaps !

Beaucoup de café-schnaps plus tard, la nuit était tombée depuis longtemps et je la tête me tournait. Je m'endormis.

© <http://sboisse.free.fr/science/physique/physique-quantique-pour-les-nuls-3.php>

LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS (4ème partie)

4. Le spin. Bosons et Fermions. Le principe de Pauli

Résumé des [épisodes précédents](#) : Le prof Schrödinger pense avoir trouvé un moyen de « désintriquer » mon chaton qui s'est mystérieusement dédoublé. Pour cela, il doit faire une

montagne de calculs...)

C'est un cri de désespoir de Schrödinger qui me réveilla en sursaut.

- Ach ! Teufel ! Donnerwetter ! Che n'y arrive pas ! Il y a quelque chose que che ne gomprens pas !

Pour qu'il se laisse aller ainsi à son accent allemand, la situation devait être grave. J'ouvris les yeux, et découvris le prof, debout, se tenant la tête à deux mains. Par terre, un amoncellement de feuilles de papier froissés, couverts de signes mathématico-cabalistiques s'étalait à ses pieds.

- Doc, que se passe-t-il ?
- Il se passe que mes calculs démontrent que le principe d'exclusion de Pauli empêche les deux chats de refusionner !
- Ah ? Et c'est quoi, ça, le principe d'exclusion de Pauli ?
- C'est celui qui interdit à deux fermions de se trouver au même endroit en ayant exactement les mêmes propriétés.
- Voilà que vous recommencez à parler chinois.

Schrödinger eut l'air surpris.

- Vous n'allez pas me dire que vous n'avez jamais entendu parler des bosons et des fermions ?
- Eh bien... Non.
- Tous les objets matériels, les particules, les atomes, etc., peuvent être classés en deux catégories. Ceux qui ont un spin demi-entier, ce sont les fermions. Et ceux qui ont un spin entier, ce sont les bosons.
- Là, c'est du japonais. C'est quoi, le spin ?
- Le spin, mon jeune ami, est la plus mystérieuse quantité de la théorie quantique.

C'est sûr, ça m'aidait beaucoup.

- Bon, et alors ?
- To spin, en anglais, ça veut dire « tourner sur soi-même ».
- Comme nos deux chats ?

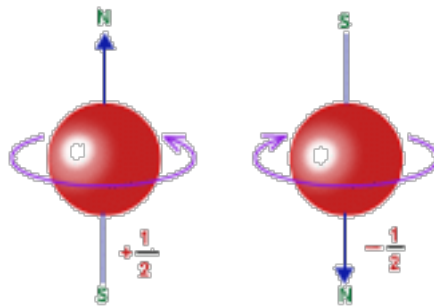
Je désignai les deux chatons qui continuaient à tourner lentement sur eux même, indifférents aux balles de ping-pong, pardon, de ping-ping, qui vrombissaient autour d'eux.

- Ya, exactement ! Le spin est une quantité qui mesure l'énergie de rotation d'une particule sur elle-même. Mais le spin est en réalité un vecteur, qui pointe dans le sens de l'axe de rotation. Imaginez un proton, par exemple. Il tourne sur lui-même, comme une toupie. Il faut imaginer le spin comme un vecteur, une flèche imaginaire issue du centre du proton. La longueur du vecteur est proportionnelle à la vitesse de rotation. La direction du vecteur est celle de l'axe de rotation.

Je tentai d'imaginer ce qu'il me décrivait.

- Je vois, dis-je. Mais en quoi est-ce si mystérieux ?
- Il se trouve que le spin est, comme toutes les valeurs représentant une énergie, quantifié.
- Quantifié ?
- Toutes les énergies sont quantifiées. C'est cela qui a donné son nom à la théorie quantique.
- Et ça veut dire quoi, quantifié ?
- Ça veut dire que les valeurs que peut prendre l'énergie ne sont pas continues. Elles doivent être des multiples entiers d'une minuscule énergie fondamentale. Cette énergie est une constante physique que l'on désigne habituellement par la lettre h. C'est le physicien Max Planck qui a découvert cela, en 1900. En son honneur, on appelle cette unité d'énergie fondamentale la constante de Planck.

Admettons, pensais-je.



- Le spin des atomes est très important, parce que c'est lui qui détermine les champs magnétiques. Tout ce qui est magnétique vient du spin. Dans un morceau de Fer, par exemple, si les directions des spins sont distribuées au hasard, le champ magnétique résultant est nul. Mais si on aimante le fer, on force en fait les spins à pointer plus ou moins dans la même direction. Plus il y a d'atomes qui ont des spins parallèles, plus le champ magnétique sera intense. On obtient...
- Un aimant dis-je. D'accord.
- Gut ! Vous commencez à comprendre. Mais il y a un truc bizarre avec le spin.
- Lequel ?
- Le spin est particulier, parce que c'est un vecteur. Non seulement son intensité est quantifiée, mais sa direction aussi.
- Qu'est-ce que cela veut dire ?
- Ach, on ne peut pas mesurer directement la direction du spin. On peut seulement mesurer une de ses composantes à la fois, dans une seule direction.
- Ah oui ?
- Oui. Prenons un proton, par exemple. Vous savez ce qu'est un proton ?
- Oui. L'une des particules qui composent le noyau des atomes. Ils sont faits de protons et de neutrons.
- Bien ! Vous n'êtes peut-être pas si ignorant, après tout.

Je souris.

- Pour mesurer le spin d'un proton, on le fait passer entre deux aimants parallèles, disons placés horizontalement, et on regarde dans quelle direction il est dévié. On obtient l'intensité de la composante horizontale du spin. Puis on le fait passer entre deux aimants verticaux, et on mesure la déviation résultante, qui nous donne la composante verticale.

- Je comprends.

- Le résultat bizarre de l'expérience, c'est que les déviations qu'on observe sont toujours les mêmes. La composante horizontale du spin vaut toujours soit +1, soit -1 (en unités de $h/2$) jamais zéro. Idem pour la composante verticale. Si les particules étaient comme des toupies, et si on recommence l'expérience des milliards de fois, il devrait y avoir des cas où le spin est strictement horizontal, et on devrait avoir une déviation nulle dans le sens vertical. Ou même, si le spin était tout simplement un peu « penché », on aurait des cas où la composante verticale serait, disons 0.5, ou $1/3$. Mais non, c'est toujours -1 ou +1.

Cette histoire de +1 et -1 me disait vaguement quelque chose. L'expérience que Schrödinger avait faite envoyant des lettres à Bohr et Einstein...

- Ça n'aurait pas un rapport avec ce truc dont vous m'avez parlé hier, à propos de la polarisation des photons ?

Schrödinger se détendit.

- Bien sûr ! Les photons de lumière ont aussi un spin. Pour les photons, le spin, c'est la polarisation ! Ça peut paraître impossible au premier abord...

- Ah ? Pourquoi ?

- Parce que les photons ont une masse nulle. Comment pourraient-ils avoir une rotation sur eux même, alors ? Mais, parce qu'ils vont à la vitesse de la lumière, ils ont quand même une énergie. Cette énergie vaut précisément h fois leur fréquence, où h est la constante de Planck. S'ils ont une énergie, ils ont un spin. Dans le cas d'un photon, l'orientation du spin est précisément la direction dans lequel l'onde « vibre », si vous voulez. Et parce que les photons sont des bosons, leur spin, leur polarisation si vous voulez, vaut toujours +1 ou -1.

Encore cette histoire de bosons et de fermions.

- C'est quoi, un boson ou un fermion ?

- Pour les bosons, comme le photon, le spin vaut toujours +1 ou -1, en unité de h , la constante de Planck. Si vous préférez, il vaut toujours $+h$ ou $-h$. Pour les fermions, comme l'électron ou le proton, le spin est toujours un multiple entier de $h/2$.

- Bon, et alors ?

- Et alors, il se trouve que mon équation, l'équation de Schrödinger, ya, admet des solutions qui sont très différentes pour les bosons et les fermions. En particulier, elle permet de démontrer qu'il est impossible que deux fermions soient dans le même état quantique. C'est ce que l'on appelle le principe d'exclusion de Pauli.

- Et avec le décodeur, ça veut dire quoi ?

- Un décodeur ? -ce que c'est ?

Tiens, c'était à mon tour de lui expliquer quelque chose. Pour une fois...

- Vous savez bien, ça permet de regarder la télé en clair, canal plus, par exemple.
- Jeune homme, sachez que je ne regarde jamais la télé ! Ces lucarnes infernales ne diffusent que des sornettes !

Bon, inutile d'insister, pensais-je.

- Revenons à nos moutons, dis-je, ou plutôt à nos chatons. Vous dites que c'est ce principe de Pauli qui vous turlupine tant ? Si c'est juste un principe, ne peut-on passer outre ?
- Mein Gott ! Quelle idée ! On ne peut passer outre aux principes de la mécanique quantique ! C'est elle qui fait fonctionner l'univers ! De plus, le principe de Pauli est très utile !
- Ah oui ?
- Souvenez-vous, jeune homme. Les électrons sont des fermions. Autour d'un même atome, on ne peut pas trouver deux électrons dans le même état quantique !
- Ça y est, vous recommencez à parler chinois.

Schrödinger soupira.

- Jeune homme, dit-il avec lassitude, vous savez sans doute que les atomes sont habituellement entourés d'électrons qui tournent autour, comme les planètes autour du soleil ?
- Oui, bien sûr, dis-je.
- Eh bien, cette image est complètement fausse. Les électrons sont des particules quantiques.
- Et alors ?
- Et alors, leur énergie est quantifiée. Donc, on ne peut les trouver qu'à des distances bien définies autour du noyau atomique, chacune correspondant à un niveau d'énergie. De plus, le principe d'incertitude dit, que puisqu'on connaît leur énergie, on ne peut connaître leur position à un instant donné. C'est absolument impossible ! Les électrons sont partout à la fois. Leur onde, puisqu'ils sont aussi des ondes, englobe toute une sphère autour de l'atome.
- Je vois, dis-je. C'est comme un oignon. Les électrons forment des sphères concentriques. Dans chaque sphère, il est impossible de dire où ils sont.
- Et comme ils sont électriquement chargés, si nous tentons de rapprocher deux atomes, les sphères qui les entourent vont se repousser. C'est ce que l'on appelle la force électromagnétique. Elle est très puissante. Par exemple, c'est elle qui vous empêche de vous enfoncer à travers le plancher de cette pièce, et ce malgré la gravitation qui vous tire vers le bas.
- Quoi ?
- Mais oui ! Les électrons des atomes de vos pieds sont repoussés par ceux des atomes du plancher.
- Ça alors !
- Bon. Vous commencez à avoir une image plus claire de l'atome ?
- Je crois que j'ai compris.
- Et bien, vous vous trompez à nouveau.
- Quoi ? Redis-je.
- La question est : combien d'électrons peut-il y avoir dans chacune des couches de

l'oignon ?

- Je ne sais pas, dis-je. Un seul ?
- Non ! C'est ici que le principe de Pauli intervient. Il dit, souvenez-vous, qu'il ne peut pas y avoir deux fermions dans même état quantique. (Il marqua une pause). J'attends votre question, dit-il.
- Euh... c'est quoi, un état quantique ?
- Bonne question ! C'est un ensemble de nombres entiers qui permettent de distinguer deux électrons. Par exemple, nous savons que l'énergie est quantifiée. C'est pourquoi les électrons s'organisent en couches concentriques. Mais il y a aussi le spin...
- Ah oui, m'exclamai-je, rayonnant. Il ne peut prendre que les valeurs +1 et -1 !
- +1/2 et -1/2, dans le cas d'un fermion, corrigea-t-il. Donc dans chaque couche, nous pouvons avoir au maximum...
- Deux électrons ! M'exclamais-je. L'un avec un spin positif, l'autre négatif ! Ainsi, leurs états quantiques sont différents !
- Bien raisonné, jeune homme, mais c'est encore faux !
Diable ! Pensais-je.
- Mais pourquoi, demandais-je.
- Parce que ce serait vrai si les électrons s'empilaient vraiment en sphères concentriques, Mais ce n'est pas le cas...

La belle image que j'avais dans la tête, celle d'un atome en forme d'oignon, se fissura d'un seul coup.

- Ou du moins, c'est vrai pour la première couche, celle qui est la plus près du noyau. Mais pour les énergies plus élevées, ma belle équation permet d'autres solutions, avec des formes plus complexes qu'une simple sphère. Comme des genres de tétraèdres arrondis, ou même des figures plus complexes. Pour ces figures, qu'on appelle des orbitales, les électrons peuvent avoir un autre nombre quantique, en plus de l'énergie et du spin : leur moment orbital.
- Ah, et c'est quoi, ça ?
- Disons que c'est une partie du spin qu'ils acquièrent en tournant autour du noyau selon une trajectoire qui n'est plus circulaire, ni sphérique, mais plus complexe. Ainsi, sur les couches externes, il peut y avoir plus de deux électrons. Sur la seconde couche, par exemple, c'est huit électrons au maximum. C'est très important, parce que le nombre d'électrons sur la dernière couche, la plus externe si vous voulez, détermine les propriétés chimiques de l'atome. C'est cela qui fait qu'un atome d'hydrogène et un atome de carbone ont des propriétés chimiques très différentes. Voyez-vous, la chimie, c'est aussi de la physique quantique !
- OK, OK. Mais quel est le problème, avec les chats ?

Schrödinger sembla brusquement redescendre sur terre. Son sourire s'effaça d'un coup.

- Ach ! Eh bien dans le cas de la molécule d'Erwinium que nous avons ici (il désigna les deux chats, toujours entourés de leur nuage d'électro-ping-balle), chaque chat joue le rôle d'un proton, donc un fermion. Et le principe de Pauli dit qu'ils ne peuvent se trouver dans le même état quantique ! Il est impossible de les rassembler à nouveau ! C'est une grosse catastrophe ! Tous mes calculs ne servent à rien ! Je suis déshonoré !

La dessus, il sortit un briquet de sa poche, l'alluma, et, théâtralement, mit le feu à tous ses calculs, au risque de provoquer un incendie !

© <http://sboisse.free.fr/science/physique/physique-quantique-pour-les-nuls-4.php>

LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS (5ème partie)

5. La supraconduction, la force nucléaire, et comment on démontre que deux chatons intriqués peuvent former un boson composite !

Résumé des [épisodes précédents](#) : Le prof Schrödinger, désespéré à l'idée que le principe de Pauli l'empêchera à tout jamais de réunir en un seul morceau le pauvre chaton dédoublé par son expérience quantique, vient de mettre le feu à tous ses calculs !

Je restai abasourdi devant la flamme grandissante qui mangeait un à un les précieux calculs du Doc.

- Attendez, dis-je, paniqué Il me vient une idée ! Tout n'est pas perdu !
- Vous, une idée ?
- Oui, dis-je, vexé. Mais pour l'amour du ciel, arrêtez cet incendie !

Schrödinger hésita, puis bondit vers une pile d'objets bizarres (dont un sextant et un électroscope) et en sortit un extincteur, qui, malgré son étiquette « à remplacer avec 1949 » daigna fonctionner encore. Il aspergea de mousse le paquet de feuilles enflammées. L'incendie cessa.

- Dites toujours, dit-il en toussant à moitié, à cause de la fumée. Mais si vous avez essayé de me berner...
- Non, non, dis-je, C'est une vraie idée ! Le rassurai-je précipitamment. Vous dites que les deux chats ne peuvent pas fusionner parce ce sont des fermions, n'est-ce pas ?
- Ya.
- En êtes-vous sûr ?
- Les protons sont des fermions, jeune homme !
- Oui, mais *ça*, dis-je en montrant les chatons, ça ce ne sont pas des protons. Ce sont des *chats*. Et des chats intriqués, même. Avez-vous calculé leur spin ?

Je vis distinctement l'éclair de compréhension sur le visage du prof.

- Donner Wetter ! S'exclama-t-il. Un Boson composite !
- Un quoi ?
- Mais oui ! C'est cela ! Vous êtes un génie, jeune homme !

Il me tendit les deux bras, pris les miens, et se mit à danser autour de moi. *Ca y est*, me dis-je. *Cette fois, il est complètement fou !*

- Bien sûr ! dit-il. Aveuglé par l'idée que chaque chat était l'équivalent d'un proton,

donc un fermion, j'ai cru que le principe de Pauli s'appliquait ! Mais quand on apparie deux fermions, comme nos deux chats, on crée un boson composite ! Et les bosons ne sont pas soumis au principe de Pauli !

- Euh, oui, Doc, mais c'est quoi, un boson composite ?
- Ach ! C'est l'une des merveilles de la nature !
- Vous voulez dire « merveilles » ?
- Mais c'est ce que j'ai dit !
- D'accord, d'accord. Et alors ?
- Souvenez-vous que les fermions ont un spin demi-entier. Imaginons deux protons. Quand vous les collez l'un à l'autre, comme dans un noyau d'hélium, vous obtenez une particule unique, dont le spin est la somme de celui des deux autres particules ! Un spin entier ! Un boson !
- Et alors ? En quoi est-ce si merf... merveilleux ?
- Prenez deux électrons, dit-il. Vous savez que ce sont les électrons qui permettent à l'électricité de s'écouler dans un fil électrique, j'imagine ?
- Oui. Le courant électrique, c'est un mouvement d'électrons.
- Excellent ! Mais comme vous le savez, les électrons sont des fermions. Les noyaux des atomes de cuivre du fil électrique, et leurs propres électrons qui tournent autour, aussi.
- D'accord.
- Alors les pauvres électrons du courant électrique doivent sans cesse éviter les autres fermions, naviguer à travers ce qui est pour eux un véritable labyrinthe, en se cognant sans cesse aux atomes de cuivre, ce qui les ralentit et crée une résistance...
- La résistance électrique ! Dis-je. Je comprends.
- Même les meilleurs métaux conducteurs ont une résistance électrique. Le fil s'échauffe au passage du courant, et une partie de l'énergie est perdue. Mais en fait, précisa Schrödinger, le phénomène de résistance électrique est un peu plus complexe que ce que je viens de décrire. Souvent un premier électron arrive à passer sans rencontrer trop de problèmes, mais son passage bouscule les atomes du métal, qui sont repoussés par lui, s'écartent un peu, et entraînés par leur élan ils se resserrent presque aussitôt dans une sorte de mouvement de balancier, et bloquent le suivant, qui vient cogner dans l'un des atomes, ce qui chauffe le métal. Dans certains métaux toutefois, à très basse température, les électrons se regroupent deux par deux, et parviennent à passer sans rencontrer aucune résistance. C'est ce qu'on appelle la *supraconduction*.

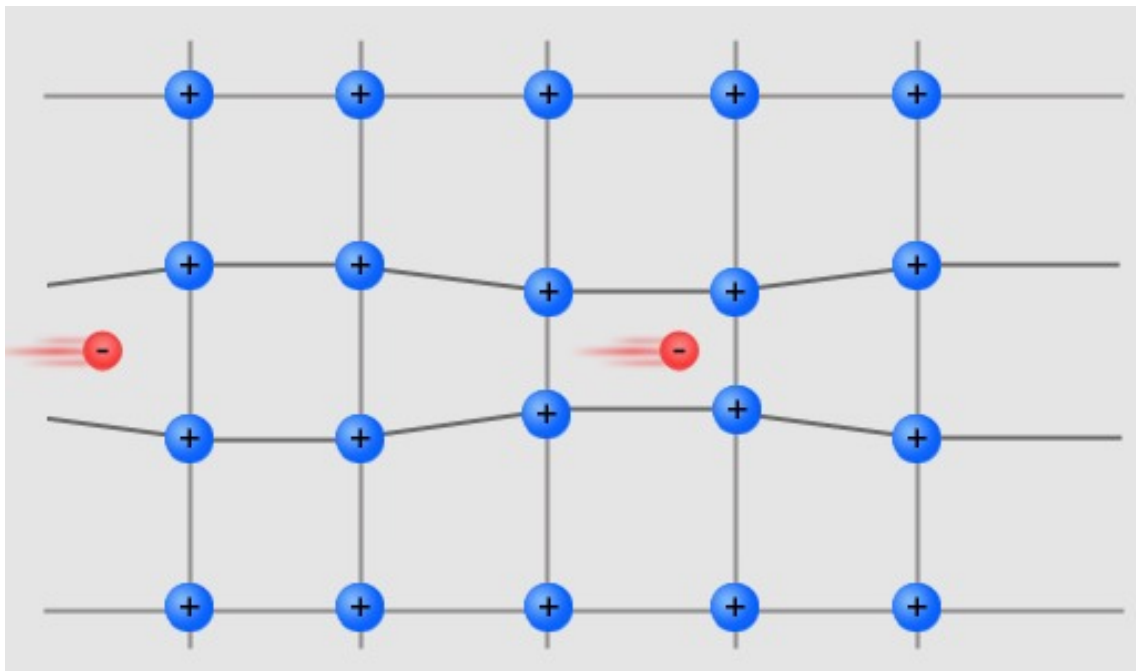
J'avais déjà entendu le mot, mais je n'arrivais pas à visualiser le phénomène.

- Attendez, dis-je. Je ne comprends pas bien. Pourquoi certains électrons seraient ils bloqués en arrivant tous seuls, alors qu'ils ne le seraient pas en arrivant deux par deux ?

Schrödinger sourit.

- Dans un supraconducteur, les électrons sont intriqués deux par deux, formant ce que l'on appelle des paires de Cooper. Dans chaque paire, leurs spins sont antiparallèles : les électrons tournent sur eux-mêmes dans des sens opposés, si vous voulez, bien que cette image soit fautive. l'un des électrons a un spin égal à $+1/2$, l'autre à $-1/2$. De sorte que le spin total est nul. Dans cette configuration, ils forment donc un boson composite. Les deux fermions d'un boson composite ont la même fonction d'onde, parce qu'ils sont intriqués. Vous êtes d'accord ?
- Je suppose.

- Mais dans les paires de Cooper, le spin total des deux électrons n'est pas seulement entier, comme pour n'importe quel boson. Il est nul. A cause de cela, l'énergie totale des deux électrons intriqués est inférieure à la somme de chacun d'eux, pris individuellement. On a donc un double bonus : D'une part, parce que leur énergie est minimale, ils arrivent à passer en bousculant très peu les atomes du métal. Et d'autre part, les deux électrons, parce qu'ils forment un boson, ne sont pas soumis au principe de Pauli : ils peuvent traverser les atomes, en étant déviés certes, mais sans perturber leur délicat arrangement d'électrons en couche d'oignon, ce qui ne les ralentit pas.



Le résultat est, que si les atomes du métal ne vibrent pas trop vite, c'est-à-dire à très basse température, ils n'arrivent pas à enlever aux électrons une quantité d'énergie qui soit au moins égale à h , la constante de Planck : Or toute énergie doit être un multiple entier de cette constante. Donc les électrons conservent 100% de leur impulsion, et arrivent à passer sans aucune perte d'énergie. Dans un câble supraconducteur, la résistance électrique n'est pas seulement très faible : elle est strictement nulle. Si on arrivait à fabriquer des supraconducteurs à température ordinaire, on pourrait ainsi transporter des énergies kolossales sur des distances énormes, sans aucune perte.

- Oui, c'est pas mal. Mais de là à...
- On pourrait par exemple disposer des panneaux solaires au Sahara, et alimenter en électricité toute l'Afrique et toute l'Europe !
- Euh... Il faudrait une sacrée surface de panneaux solaires, non ?
- Un pour cent de la surface du Sahara, cela serait suffisant. Faites les calculs !
- Je vous crois, dis-je précipitamment.
- Malheureusement...
- Malheureusement quoi ?
- Malheureusement les meilleurs supraconducteurs que nous savons fabriquer à l'heure actuelle ne fonctionnent que s'ils sont refroidis à la température de l'Azote liquide : -196 degrés !
- Dommage !
- Oui, c'est très dommage, mais les recherches continuent...

Il est temps de conclure, pensais-je.

- Bien, et pour nos chats ?
- Ach ! Les chats !
- Oui, les chats !
- Eh bien, même si ce sont deux fermions, ils doivent former un boson composite. Dans ce cas, leur Hamiltonien est différent de celui de deux fermions, comme je l'avais supposé initialement. Je dois recalculer la fonction d'onde ψ , donc l'Hamiltonien...
- Euh... C'est quoi, l'Hamiltonien ?

Il me regarda avec surprise.

- Mais je vous l'ai déjà expliqué, jeune homme !
- Je ne crois pas. Ou alors, ajoutai-je, n'osant le contredire, je ne me souviens pas.
- L'Hamiltonien, c'est le H dans ma grande équation, $E\psi = H\psi$. Vous vous souvenez de cela, quand même ?
- Oui, je crois.
- L'Hamiltonien est la transformée de Legendre du Laplacien.
- Voilà que vous remettez à parler chinois !

Il leva les yeux au ciel.

- Mein Gott ! J'oublie toujours que vous ne connaissez rien aux mathématiques de la théorie quantique. So. L'Hamiltonien est un opérateur différentiel - peu importe ce que cela veut dire, ajouta-t-il précipitamment. Il décrit la structure physique du système que l'on veut étudier. Quand on a réussi à calculer l'Hamiltonien, on peut appliquer ma grande équation et calculer la fonction ψ . Mais il faut dire que cet Hamiltonien est, ach, lui-même très difficile à calculer. Très.
- Ça va prendre combien de temps ?

Schrödinger jeta un œil désespéré sur la pile de papier à moitié brûlé, couverts de formules, qui s'étendaient à ses pieds.

- Au moins le double du temps qu'il m'en a fallu pour le calculer dans le cas de deux fermions...

Misère ! Ça lui avait pris toute la nuit.

- ...Et même ainsi, je ne suis pas sûr de trouver comment recomposer nos deux chats en un seul.
- Quoi ?
- Eh bien, il ne suffit pas de calculer la fonction d'ondes. Il faut que je détermine quel genre de perturbation pourra suffisamment affecter la fonction d'ondes de nos chats pour les réunir. Pour cela, il faut recalculer la fonction ψ , donc l'Hamiltonien, pour chaque type de perturbation possible.

Je frémis.

- Euh... Et ça, ça va prendre combien de temps ?

- Au moins un mois, jeune homme.

Un mois !

- Mais ils seront morts, d'ici là ! Je ne sais absolument pas comment on peut les nourrir, vu qu'ils n'arrêtent pas de tourner sur eux même ! Me lamentais-je, en regardant les deux chatons qui semblaient de plus en plus fatigués.
- Et encore, leur spin vaut $1/2$. S'ils avaient un spin entier, ils tourneraient deux fois plus vite.

Nous voilà bien avancés, pensais-je.

- A moins que... Dit-il soudain
- A moins que quoi ?
- A moins que nous arrivions à déterminer sans faire de calculs ce qui les pourrait les réunir à nouveau. Dans ce cas, il suffira de calculer la fonction psi pour cette seule perturbation.
- Ah, Dis-je.

Il y eut un moment de silence.

- Doc, dis-je soudain, je crois que j'ai trouvé.

Je tentai de ne pas voir son expression de franche incrédulité.

- Il me semble que les protons ont une charge électrique positive, dis-je alors.
- Oui, et alors ?
- Alors les particules de même signe se repoussent, non ? Comment voulez-vous les coller l'un à l'autre ?
- C'est vrai, dit-il. La force électromagnétique les empêche de se réunir. Mais je ne vois pas comment passer outre... C'est la force à longue distance la plus puissante de la nature, après tout.
- Mais dans un atome, les protons sont pourtant serrés les uns contre les autres, non ? Comment cela se peut-il ?
- Bonne question, très bonne question ! S'exclama-t-il, rayonnant. Vous devriez faire la physique !

Il me semble que je ne fais que cela depuis un bon moment, pensais-je.

- Dans le noyau d'Hélium, par exemple, poursuivit Schrödinger, il y a deux protons. Ils devraient se repousser. Mais les deux protons ne sont pas tous seuls. Il y a aussi deux neutrons. Et les protons et les neutrons sont liés, par ce qu'ils sont sensibles à l'interaction nucléaire forte.
- Ah, et qu'est-ce que c'est ?
- L'interaction nucléaire forte est l'une des quatre forces fondamentales, à partir desquelles sont issues toutes les autres forces. Ya, il n'existe que quatre forces dans la nature.
- Lesquelles ?
- La plus puissante récit-t-il comme s'il lisait un livre, est l'interaction nucléaire forte.

C'est une force attractive, très puissante, mais à très petit rayon d'action. C'est elle qui lie entre eux les protons et les neutrons dans le noyau atomique. La seconde force est l'interaction électromagnétique. Elle est transportée par les photons. C'est elle qui permet à deux charges de même signe de se repousser, où à deux charges de signe contraire de s'attirer. Elle est également responsable du magnétisme. La troisième force est l'interaction nucléaire faible. Elle intervient très peu dans la vie courante, mais c'est elle qui permet la désintégration des atomes radioactifs. Enfin la dernière force, la moins puissante et de loin, c'est la gravitation. Mais, jeune-homme, dit-il soudain, je ne vois pas en quoi cela nous aide. Nous pourrions certes essayer de former une sorte d'atome d'Hélium avec nos chats...

- Un chatome ! Hasardai-je.
- Si fous foulez. Mais si les chats sont comme des protons, qu'est ce qui pourrait être pour eux comme des neutrons ?

Je n'en n'avais pas la moindre idée. Et visiblement, Schrödinger non plus.

- Et puis, dit-il, ce chatome ne serait pas un chat unique. Ce serait juste un système quantique un peu plus complexe que celui que nous observons ici, donc un système d'équations encore plus difficile à résoudre...

Je contemplai les deux chatons, désespéré. Me voyant les regarder, ils miaulèrent misérablement, tous les deux ensemble, sans cesser de tourner sur eux-mêmes. Soudain, il me vint une idée.

- Doc ! Demandai-je. Pourquoi tournent-ils dans le même sens, la même vitesse ?
- © <http://sboisse.free.fr/science/physique/physique-quantique-pour-les-nuls-5.php>

LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS (dernière partie)

6 : Le magnétisme, et comment la solution surgit enfin !

Résumé des [épisodes précédents](#) : Toutes les tentatives du prof Schrödinger pour calculer la fonction d'onde des deux malheureux chats intriqués, et enfin pouvoir les réunir, semblent vouées à l'échec. Il faut trouver l'idée de génie !

Schrödinger me regarda sans comprendre.

- Oui, Doc ! Pourquoi sans le même sens ?
- Mais... Parce qu'ils ont le même spin, voyons ! Souvenez-vous qu'ils sont le même chat, en réalité !
- Oui, mais ne peut-on... je ne sais pas... Annuler ce spin ?
- Je ne vois pas...
- Moi, si !

Je m'approchai de l'un des chats, me baissai, et saisis l'un des chatons au vol (bizarrement, les balles de ping-pong modifièrent leur trajectoire, s'écartant gentiment

de moi pour me laisser faire). Prestement, je le retournai et le posai sur le dos. Le chat miaula, et se mit à tourner, sur le dos, dans l'autre sens ! Je m'aperçus alors que l'autre chaton s'était lui aussi mit aussi sur le dos, et avait lui aussi changé de sens !

- Que se passe-t-il ? En retournant un chat, l'autre s'est retourné aussi !
- Bien sûr ! Vous avez agi comme un champ magnétique sur deux atomes, et vous avez inversé simultanément leurs deux spins ! remettez-les à l'endroit, vous allez les rendre fous à tourner ainsi sur le dos !

J'attrapai l'autre chat, et le remis vivement à l'endroit. Le premier chat fit de même. Tous les deux avaient à nouveau changé de sens de rotation, revenant à leur sens d'origine.

- Pourquoi est-ce que l'autre se retourne tout seul, Doc ?
- Parce qu'ils sont intriqués, natürlich !
- Ne pourrait-on pas essayer... de bloquer un des chats pendant qu'on retourne l'autre ?
- Ne faites pas cela, malheureux !
- Pourquoi ?
- Parce qu'alors vous détruisez le délicat équilibre de cet atome d'Erwinium, ce chatome si vous voulez ; l'un des chats s'évanouirait dans la nature, et nous aurions toutes les peines du monde à les remettre ensemble dans cette pièce, vous vous souvenez des difficultés que vous avez eu à le faire la première fois ?

Effectivement. Cela me paraissait un siècle auparavant. Pourtant, je tenais à mon idée.

- Doc, dis-je, si nous arrivons à les réunir en un seul chat, ce chat aura quel spin ?
- Eh bien, $-1/2 + 1/2$ égale zéro, natürlich ! Et d'ailleurs nous ne voulons pas d'un chat qui tourne sur lui-même, nein ?
- Nein, natürlich, dis-je. Mais...
- Mais ?
- Eh bien, il faut trouver un moyen de les faire tourner en sens inverse, pour avoir un spin total égal à zéro !

La figure du Doc s'éclaira.

- Ya ya ya ! S'exclama-t-il. Si les spins sont antiparallèles, ils vont s'attirer, et les deux chats fusionneront, en un chat unique de spin zéro ! Oui, c'est cela qu'il faut faire !
- Mais comment ?
- Je ne sais pas, avoua-t-il. Nein, je ne vois pas ! Ach ! A moins de reprendre tous les calculs...

J'hésitais. Il y avait un truc qui ne tournait pas rond.

- Vous avez dit qu'en retournant un des chats, j'avais agi comme un champ magnétique sur un atome. Je ne comprends pas. Pourquoi ?
- Pourquoi quoi ?
- Quel rapport entre le champ magnétique et le spin ?
- Mais enfin, dit Schrödinger, visiblement excédé par mes questions. Le champ magnétique, c'est le spin !

Première nouvelle.

- Je suis désolé, Doc, mais vous n'avez pas encore parlé de ça. Je ne comprends pas. Il me semblait que le spin était lié à la rotation des particules sur eux-mêmes.
- Ya !
- Quel rapport avec le champ magnétique, alors ?
- Cheune homme, vous savez sans doute que lorsqu'une particule électriquement chargée se déplace, cela crée un champ magnétique ?
- Non, je ne savais pas.
- C'est ce qui permet aux électro-aimants, et aux moteurs électriques, de fonctionner. Les électrons sont des particules chargées. Le courant passe, les électrons bougent, champ magnétique ; le courant ne passe pas, les électrons ne bougent plus (en moyenne), pof, plus de champ.
- Pof, dis-je.
- Ya, pof. Et, natürlich, fous allez me dire que vous ne savez pas pourquoi il en est ainsi. Pourquoi le mouvement des électrons crée-t-il un champ magnétique ?
- Tiens, oui, pourquoi ?
- Vous n'êtes peut-être pas physicien, mais vous êtes curieux, jeune homme. C'est bien, ça. La curiosité est la première qualité du scientifique ! Gut.
- Gut !
- Ya, Gut ! Cessez de répéter tout ce que je dis ! Bon. C'est un effet de la relativité restreinte. Celle de ce petit crâneur d'Einstein, ya. Un électron, puisqu'il est chargé électriquement, crée un champ électrique. On peut imaginer ce champ comme des petites flèches qui partiraient de l'électron dans tous les sens, et qui l'entourent selon une forme sphérique, comme les piquants d'un oursin. Mais L'électron est très léger. Lorsqu'il se déplace, il va très vite. Pas à la vitesse de la lumière, mais pas loin. A peu près les deux tiers de cette vitesse. A des vitesses pareilles, la relativité démontre que le champ électrique s'aplatit dans le sens du déplacement. Il n'est plus sphérique, mais ovoïde. Maintenant, on démontre que tout se passe comme si le champ électrique avait acquis une seconde composante, qui n'agit que sur les charges en déplacement. Cette seconde composante, c'est le champ magnétique, ach !
- Ah, dis-je.
- Pour l'amour du ciel, cessez de répéter bêtement ce que je dis !
- Mais, Doc, Je n'ai pas dit « ach », en allemand, j'ai dit « ah », en français !
- Que... Bon. Voyez-vous, ceci explique le champ magnétique créé par le courant électrique. Mais il existe un autre moyen de créer un champ magnétique.
- Lequel ?
- Devinez !
- Là, il m'avait pris par surprise. Je ne voyais pas. Un champ magnétique. Comment créer un champ magnétique sans courant électrique ?
- Un aimant ! M'écriais-je !
- Gut, gut ! Nous avons alors une question intéressante : qu'est-ce qui crée le champ magnétique d'un aimant permanent, dans lequel il n'y a pas de courant électrique ?
- Le spin ?
- Ya ! Vous devenez très bon, jeune homme ! Mais quel spin ?
- Celui des atomes de l'aimant ?
- Soyez plus précis. Un atome, c'est un objet complexe.

- Celui des électrons qui tournent autour du noyau ! M'écriai-je, ravi d'avoir trouvé. Ils se déplacent, donc ils créent un champ magnétique !
- Faux ! Dit Schrödinger. Enfin, vrai et faux.
- Comment ça ?
- Ce sont bien les électrons, mais ce n'est pas leur déplacement autour du noyau qui crée le champ principal. Souvenez-vous, les électrons n'ont pas vraiment de position précise. Ils sont partout à la fois, dans leur orbitale propre. On ne peut déterminer que leur probabilité de présence. Mais leur mouvement autour du noyau, si mouvement il y a, n'est pas leur seul mouvement.
- Le spin, hasardai-je.
- Oui, le spin ! Il crée un champ magnétique ! Mais seulement dans les atomes qui ont un nombre impair d'électrons.
- Pourquoi ?
- Parce que dans un atome, les électrons occupent toutes les places possibles, en termes de niveaux d'énergie. Ils se présentent donc avec des spins alternativement positifs et négatifs, ou « haut » et « bas », si vous préférez. Leurs champs s'annulent deux par deux. Il n'y a que si le nombre d'électrons est impair que le dernier électron ne peut pas s'apparier avec un autre et donc la somme totale des spins n'est pas nulle. L'atome est possédé alors ce qu'on appelle un moment magnétique de spin. Vous comprenez ?
- Je crois.
- Mais tous les matériaux faits avec des atomes « impairs » ne sont pas magnétiques, bien sûr. Sinon, le magnétisme serait bien plus répandu qu'il ne l'est. D'où la question que vous allez me poser...
- Pourquoi certains matériaux sont-ils magnétiques et pas les autres ?
- Oui ! c'est cela, la bonne question ! Dans la plupart des matériaux, les atomes sont orientés au hasard. Leurs moments magnétiques pointent dans toutes les directions, et leur champ magnétique total est nul. Mais dans les matériaux dits ferromagnétiques, les atomes sont orientés tous, ou en majorité, dans la même direction. Le champ magnétique, qui résulte de la somme de tous les petits champs des atomes, est alors très fort.
- Qu'est-ce que ces matériaux ont de si spécial, alors ?
- Ach ! Vous apprenez à poser les bonnes questions, je vois ! Mais ce n'est qu'une image commode. Il faut se souvenir que le magnétisme vient des électrons. Le Fer, par exemple, possède 26 protons, donc 26 électrons, un nombre pair. Il ne devrait pas être magnétique !
- Diable !
- Mais le Fer est un métal. Dans les métaux, les atomes sont organisés géométriquement comme une sorte de cristal. Et si vous calculez – avec mon équation, notez bien – la fonction d'onde de tous les électrons du métal, vous obtenez, à cause de cette structure cristalline, un résultat curieux : les électrons des couches atomiques les plus externes sont « libres » ; ils peuvent se balader comme ils veulent dans tout le métal. C'est d'ailleurs pour cela qu'ils conduisent l'électricité. En général, la moitié de ces électrons libres ont un spin « vers le haut », et l'autre moitié « vers le bas ». (Souvenez-vous que le spin est une grandeur quantique, et que quelle que soit la direction dans laquelle on le mesure, on ne trouve que +1 ou -1). L'aimantation globale est donc nulle, c'est le cas du cuivre par exemple. Mais dans le Fer, la structure cristalline particulière des noyaux atomiques force les électrons libres voisins à avoir des spins identiques, alors que normalement ils devraient être opposés pour minimiser l'énergie. C'est une conséquence du principe de Pauli. Lorsque des atomes sont très voisins, les orbitales de

leurs électrons se chevauchent, et, curieusement, leur énergie est minimale lorsque les spins sont parallèles.

- Et alors ?
- Alors si tous les spins étaient parallèles, le Fer devrait naturellement aimanté ! Sauf qu'il ne l'est pas ! Le Fer réagit au voisinage d'un aimant, mais à l'état naturel il n'est pas un véritable aimant !
- Mais... Pourquoi ?
- Parce que tous les cristaux naturels ont des défauts. Des zones de fracture, si vous voulez, dans lesquelles l'orientation des spins change brusquement. Dans un morceau de Fer naturel, il y a une myriade de domaines magnétiques différents. A l'intérieur de chaque domaine, les spins sont parallèles et chacun agit donc comme un minuscule aimant. Mais chaque domaine est un aimant qui pointe dans un sens différent. L'aimantation globale est donc presque nulle !
- Dites donc ! C'est un vrai roman ! Euh... Mais alors, pourquoi les aimants attirent-ils le fer ?
- Tout simplement parce que lorsqu'un morceau de fer est soumis à un fort champ magnétique, les spins tendent à s'aligner dans la direction opposée du champ. Les domaines dans lesquels les spins sont déjà bien orientés forcent, pourrait-on dire, les électrons libres voisins à adapter la même orientation. Il suffit, ach, d'une pichenette pour qu'un domaine entier bascule, que tous ses spins s'orientent dans la direction opposée au champ extérieur. Avec un fort champ magnétique, vous pouvez transformer un morceau de fer en aimant permanent ! Et même si le champ n'est pas assez fort pour cela, les domaines qui sont proches de l'aimant extérieur vont basculer, parce qu'ils sont attirés par lui !
- Pourquoi cette attraction, au fait ?
- Allons jeune homme ! Je croyais vous avoir expliqué qu'en réalité, il n'y a pas de force magnétique ! C'est bel et bien d'une force électrique qu'il s'agit. Les particules qui ont des spins parallèles se repoussent, ceux qui ont des spins antiparallèles s'attirent, c'est tout ! D'ailleurs c'est pour cela que nos chats se repoussent mutuellement et ne peuvent s'assembler...

J'avais presque oublié les chats. Peste !

- Dites, dis-je. Vous dites que nos chats sont comme des protons.
- Deux protons intriqués. Deux images du même proton.
- Oublions cela pour le moment. Et nos balles de ping-pong..
- De ping-ping !
- Si vous voulez. Elles sont comme des électrons.
- Ya. Ensemble, ils forment une molécule de dihydrogène.
- Je me souviens que vous avez déjà dit ce mot. Qu'est-ce que c'est ?
- Une molécule formée de deux atomes d'hydrogène. L'atome d'hydrogène est le plus simple atome de la nature. Il est formé d'un proton et d'un électron.
- Oui, mais qu'est-ce qui différencie deux atomes d'hydrogène d'une molécule de, comment dites-vous ?
- Dihydrogène. Et bien c'est une molécule, c'est tout !
- Je ne comprends pas.
- Qu'est-ce que vous ne comprenez pas ?
- Vous ne comprenez pas ce que je ne comprends pas ? Ou vous faites semblant ?
- Je ne comprends pas pourquoi vous dites que je fais semblant de ne pas comprendre

ce que vous ne comprenez pas.

Dieu du ciel ! On n'en sortira jamais, pensais-je.

- Qu'est-ce qu'une molécule ? Demandais-je.
- Ach ! C'est cela que vous ne comprenez pas ?
- Oui.
- Vous auriez pu le dire plus tôt ! Eh bien, une molécule, c'est un assemblage d'atomes qui sont liés ensemble par leurs électrons, du moins ceux de leur couche la plus externe.
- Comment cela ?

Il soupira.

- Dans une molécule, ces électrons particuliers perdent leur appartenance à un atome particulier. Quand on calcule leur fonction d'onde...
- Avec votre équation, bien sûr !
- Ya, natürlich ! On trouve qu'ils sont répartis tout autour des atomes de la molécule, selon des géométries plus ou moins complexes. Ils empêchent ainsi les atomes de se séparer, et la molécule reste entière.
- Donc notre Erwinium est comme une molécule formée de deux atomes d'hydrogène.
- Ya.
- Dites-moi, l'hydrogène est-il un métal ?
- Normalement, non. A très forte pression, oui, probablement.
- Comment-ça, probablement ?
- La pression nécessaire pour que les atomes d'hydrogène se rapprochent suffisamment pour que les électrons quittent leurs protons respectifs et se mettent à gambader librement dans le métal se chiffre en millions d'atmosphères ! Personne n'a jamais obtenu, et ne pourra jamais obtenir une pression pareille. Toutefois...
- Toutefois ?
- Toutefois il semble que le noyau de la planète Jupiter, la plus grosse planète du système solaire, dont le diamètre est douze fois celui de la Terre, soit entièrement constitué d'hydrogène métallique. Si on pouvait l'extraire, ce serait fabuleux.
- Pourquoi ?
- Parce que tous les calculs montrent que l'hydrogène métallique serait un supraconducteur à température ordinaire.
- Hum !
- Vous, jeune homme, vous avez encore une idée derrière la tête.

Effectivement, j'avais une idée.

- Dites-moi, un proton, c'est tout petit ?
- Oh oui ! A peu près un femtomètre.
- C'est quoi, un femtomètre ?
- Un millionième de nanomètre. Ou un millionième de milliardième de mètre, si vous préférez.
- Whao ! Et un atome d'hydrogène, c'est grand comment ?
- C'est beaucoup plus grand. A peu près d'un dixième de nanomètre. Cent mille fois la taille du proton.
- Cent mille fois !

- Ya, et alors ? Un atome, en réalité, c'est plein de vide !
- Mais alors, si nos chats sont comme des protons, les atomes dont ils sont les noyaux devraient être cent mille fois plus grands qu'eux ! Cent mille fois dix centimètres, cela fait... au moins dix kilomètre de diamètre !
- Diable ! Mais oui !
- Pourquoi sont-ils si proches, alors ? Ils sont à un mètre l'un de l'autre !
- Eh bien... je n'ai pas pu calculer leur fonction d'onde, mais je suppose que c'est parce qu'ils sont intriqués qu'ils sont, pour ainsi dire, comprimés...
- Comme dans le centre de Jupiter, alors ?

Schrödinger sursauta, comme si une mouche l'avait piqué.

- Diable ! Répéta-t-il. Des chatomes intriqués et comprimés ! Mais alors ils sont...
- ...comme une molécule hydrogène métallique...
- ...formant un seul domaine magnétique. Il suffirait alors d'une pichenette pour les diviser en deux sous-domaines de spin opposés ! Il suffit de soumettre l'un des chats à un champ magnétique pointant vers le haut, et l'autre chat à un champ magnétique pointant vers le bas ! C'est génial !

Je baissai modestement la tête. S'entendre dire qu'on est génial par Erwin Schrödinger, cela n'arrive pas tous les jours ! Einstein n'avait visiblement pas eu cet honneur !

- Mais comment faire ? Demandai-je. Comment créer ces deux champs magnétiques opposés ?

- Là où est l'araignée, dit-il.

- Quoi ?

- Dans le plafond !

Allons bon, pensais-je. Voilà qu'il perd la tête à nouveau !

7. Epilogue.

(Résumé de ce qui précède : Schrödinger et moi avons enfin, semble-t-il, trouvé le moyen de ré-intriquer notre chat quantique qui s'était mystérieusement dédoublé. Mais voilà qu'il me dit que la solution se trouve dans une araignée qui serait dans le plafond !)

C'est vous qui avez une araignée dans le plafond, pensais-je. Je le regardai, pris d'une inquiétude grandissante. Il ne semblait vraiment pas dans son état normal. Il était agité de tremblements, un sourire inquiétant ne le quittait pas, et ses yeux étaient fixés vers le plafond. Je suivis son regard. Et alors la lumière se fit.

Le plafond du labo, assez haut il faut dire, était obscur, à peine éclairé par quelques ampoules vacillantes. Tout comme le sol, et tous les murs, il était couvert de gros câbles électriques sommairement accrochés à des pitons qui semblaient juste suffisants pour les soutenir. Pire, il était couvert de toiles d'araignées.

Là où est l'araignée, répétais-je in petto. Il y avait effectivement deux bosses dans ce plafond, deux toiles d'araignées plus grosses que les autres. On aurait dit deux gros cylindres, de près d'un mètre de diamètre chacun.

- Ce sont des électroaimants, précisa alors Schrödinger, qui avait suivi mon regard. Les mêmes que ceux qu'on utilisait autrefois dans les casses automobiles, pour soulever les

voitures. Ils n'ont pas servi depuis longtemps, mais ils sont toujours en état de marche. J'espère que j'aurai assez de puissance...

Plus rien ne pouvait m'étonner dans ce labo digne du plus foldingue des profs mabouls.

- Ach, où donc ai-je mis les commandes ? S'exclama-t-il. Ah, ici !

Il se dirigea vers un mur, déplaça un panneau de bois couverts de feuilles punaisées toutes jaunies et couvertes de formules mathématiques, et découvrit une sorte de compteur électrique munie de deux gros leviers et de quatre autres plus petits. Précautionneusement, il actionna les petits leviers. Apparemment, ils commandaient des moteurs électriques reliés à des filins qui permettaient de déplacer les deux gros électroaimants. Il parvint tant bien que mal à les positionner, chacun au-dessus de l'un des chatons.

- Attention, dit-il. Je vais actionner les aimants !

Je me reculai précipitamment. Schrödinger me fit un clin d'œil, saisit les deux gros leviers, et subitement, les abaissa. Il y eut une sorte de bourdonnement, puis un flash éblouissant accompagné d'un craquement de tonnerre, et brusquement les plombs sautèrent. Je me retrouvai dans le noir !

- Doc ! Criai-je. Est-ce que ça va ?

Silence.

- Doc ! Répétai-je. Vous êtes là ?

Nouveau silence, puis j'entendis le faible miaulement d'un chaton.

- Erwin ! Tu es là ?

Je n'y voyais rien. Puis je me souvins que j'avais un briquet dans l'une de mes poches. Fébrilement, je l'allumai. A la lumière tremblotante, je distinguai un chaton, un seul, qui s'approcha nonchalamment, comme le font tous les chats. Aucune trace de son alter ego. L'expérience avait-elle réussi ? Sur le sol, les deux balles de ping-pong gisaient, immobiles, redevenues deux balles de ping-pong anonymes. Mais Schrödinger restait invisible. J'attrapai le chat, qui se blottit contre moi en ronronnant. Fébrilement, je parcouru l'espace qui me séparait du tableau électrique. Ce dernier fumait. Mais aucune trace de Schrödinger.

- Doc ! Professeur ! Appelai-je encore une fois. Vous m'entendez ?

Je parcouru tout le labo, réussit à réenclencher le disjoncteur, fouillai toute la maison. Je dus me rendre à l'évidence. L'expérience avait réussi, le chaton était de nouveau entier, mais le prof semblait avoir mystérieusement disparu. Que faire ? Au bout d'une heure, je décidai de rentrer chez moi, en emportant Erwin, bien sûr.

Une fois chez moi, après avoir nourri le pauvre chat affamé, j'allumais mon ordinateur,

me connectai à Wikipédia, et découvris à ma grande surprise que Erwin Schrödinger était mort en 1961. Mais alors, qui était l'homme que je venais de quitter ? Un fantôme ? Était-il possible que je j'aie été témoin d'un phénomène de non-localité quantique affectant non seulement l'espace, mais aussi le temps ? Je restai longuement assis devant l'écran, à méditer sur l'incroyable expérience que j'avais vécue. Puis Erwin sauta sur mes genoux, m'invitant à le caresser, câlin, ronronnant de plus belle.

- Tu es vraiment trop mignon, dis-je. Bienvenue dans le monde réel, le monde quantique !