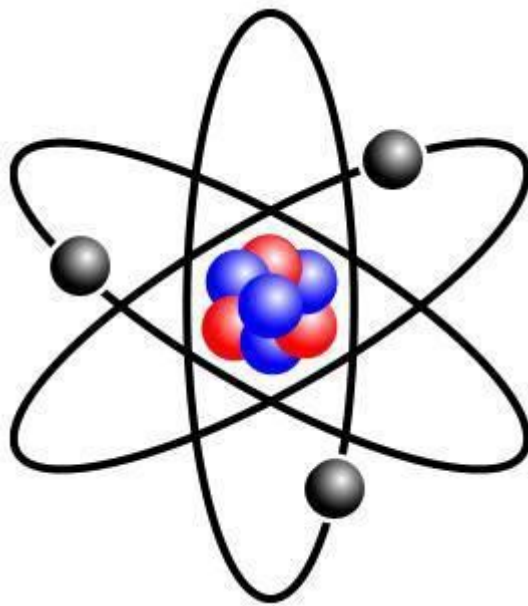


En Toute simplicité...

Physique



Mécanique quantique

N° P9 ed012021

Auteur: Alain Bellevergue

al.bellevergue@orange.fr

Malicia et Neurino sont deux amis qui aiment particulièrement discuter de sujets les plus variés, de la physique à l'économie en passant par les mathématiques, rien ne les arrête. Malicia, un peu plus jeune est curieuse de tout. Futée ses questions parfois inattendues, permettent d'éclairer les sujets traités sous des angles surprenants.

Elle joue le rôle du candide et n'a qu'un souhait : comprendre.

Neurino possède une plus grande expérience et il aime transmettre ses connaissances notamment à son amie Malicia. Il joue le rôle du professeur.

Nos deux compères, en toute simplicité et en toute complicité, nous emmèneront explorer des sujets divers et toujours passionnants.

Le monde est mystère, nous sommes un mystère et l'homme cherche inexorablement à percer le fonctionnement de son univers. Il bâtit les théories les plus folles pour expliquer le monde, et quand il pense avoir atteint son but, de nouvelles découvertes viennent bousculer ses certitudes.

La physique est l'une des sciences qui obsède les esprits les plus ardens. De l'infiniment petit à l'infiniment grand, les lois de la nature rythment l'expansion des galaxies et règlent la valse des électrons.

Bien sûr, qui dit physique, dit aussi mathématiques. Les matheux pourront se faire plaisir, mais que les autres se rassurent, nos amis Malicia et Neurino développeront les conclusions des calculs dans ce qu'ils ont de plus remarquables sans torturer, outre mesure, vos méninges.

Partons à l'aventure et laissons la parole à **Malicia et Neurino**.

Aujourd'hui : **La mécanique quantique.**

Une approche de la physique dans laquelle on s'aperçoit que l'énergie se propage par petits paquets.

Ajoutons à cela, le comportement très spécial des particules qui arrivent à emprunter plusieurs chemins dans le même temps ! Voilà de quoi attiser la curiosité de notre amie Malicia.



L'effet photo-électrique.

Malicia : Bonjour Neurino, mes parents souhaiteraient s'équiper en énergie solaire que leur conseillerais-tu ?



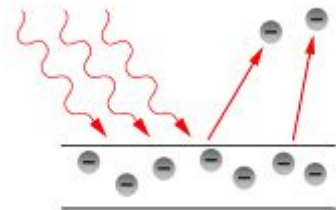
Neurino : Bonjour Malicia, oh ! très vaste question. Est-ce pour produire de l'eau chaude ou de l'électricité ?

Malicia : Pour produire de l'électricité, et EDF rachèterait le surplus. Il s'agit de panneaux solaires photovoltaïques.

Neurino : Il faut alors que tu saches que l'endroit où tes parents installeront les panneaux solaires devra bénéficier d'un bon éclairage, car ce sont les photons qui produisent l'électricité et non la «chaleur» du Soleil.

Malicia : Les photons : ces grains de lumière qui n'ont pas de masse.

Neurino : En effet, ce sont ces grains de lumière qui vont arracher les électrons à la matière. Les électrons qui vont ensuite former un courant électrique.



Malicia : Cela fonctionne sur tous les matériaux ?

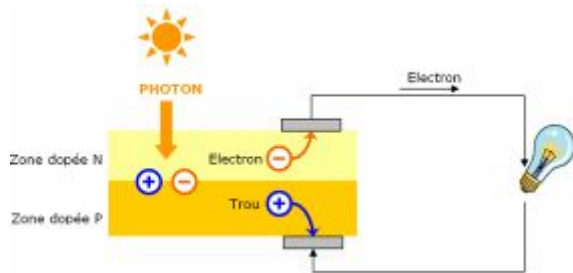
Neurino : C'est un matériau généralement semi-conducteur dopé négativement.

Malicia : Dopé ? En plus négativement ! Nous revoilà sur le tour de France.

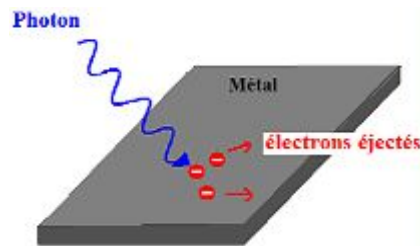
Neurino : En fait cela signifie que l'on injecte dans des matériaux qui ont 4 électrons sur la couche périphérique, comme le silicium, des matériaux qui en ont 5. Cet électron «supplémentaire» peut alors se libérer plus facilement.



Malicia : Je vois, et une fois libérés, comment faire circuler ces électrons ?



Neurino : C'est là toute l'astuce, on colle de l'autre côté une autre couche de semi-conducteur, cette fois-ci dopée positivement, c'est-à-dire avec des matériaux n'ayant que 3 électrons sur la couche périphérique. Cela crée une différence de potentiels V qui accélère les électrons.



Malicia : Formidable, mais comment s'est-on aperçu que l'on pouvait produire de l'électricité avec de la lumière ?

Neurino : Cela a été découvert en 1887 par Heinrich Rudolf Hertz, en éclairant une lame de zinc chargée négativement, et Albert Einstein fut le premier à en proposer une explication, en utilisant le concept de quantum, initialement introduit par Max Planck.

Malicia : Code «Quantum» ? C'est de plus en plus mystérieux !

Neurino : Rassure-toi, la physique utilise souvent des mots pompeux pour des notions qui sont en fait assez simples. Cela signifie que l'énergie de la lumière se propage en paquets de valeur $h \cdot f$ (h constante de Planck et f sa fréquence ou sa couleur).

Encore plus simplement, chaque photon contient une énergie finie de quantité $h \cdot f$.

Malicia : N'est-ce pas pour cela que l'on parle de mécanique quantique ?

Neurino : En effet, l'électron absorbe l'énergie du photon, et quand cette énergie, c'est-à-dire quand sa longueur d'onde, ou si tu préfères sa couleur est suffisante, l'électron se libère avec une vitesse v .

Malicia : Tu dis $h \cdot f$ donc au plus f est élevée, au plus il y a de l'énergie, peut-on dire que la lumière bleue a plus d'énergie que la lumière rouge ?

Neurino : Bravo Malicia, je vois que tu as

Quelques formules pour les matheux

L'énergie d'un photon est donnée par la formule de Planck : $E = h \cdot f$

$$h \approx 6,62606957 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

W est l'énergie minimum nécessaire pour extraire un électron : $E > W$

lorsqu'il est extrait l'électron à une vitesse v et une énergie cinétique : $\frac{1}{2}mv^2$.

m : masse de l'électron :

$$9,109\,382 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

bien retenu notre causerie sur la lumière. Oui, plus la fréquence est élevée, plus les quanta* sont énergétiques. C'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles les rayons gamma issus des réactions nucléaires ou du cosmos sont extrêmement dangereux.

Malicia : Alors si je comprends bien il faut une «quantité» $h \cdot f$ pour libérer un électron de l'atome ! Dis-moi Neurino, il me vient une idée saugrenue, admettons que j'apporte de l'énergie à un atome mais sans que les électrons se détachent... et que j'arrête. Cet atome aura emmagasiné de l'énergie...comment va-t-il la restituer ?

*un quantum - des quanta.

L'énergie portée par un électron de charge e aux bornes d'un système délivrant un potentiel V est : eV

e : charge de l'électron :

$$-1,602\,176\,53 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Donc au déclenchement du phénomène :

$$h \cdot f = \frac{1}{2} m v^2 = eV$$

Ce qui permet de déterminer la constante de Planck, et les autres constantes.

Le corps noir - Les quanta.

Neurino : Ma petite Malicia, je reconnais bien là tes questions pertinentes. C'est une longue histoire qui va nous emmener dans les arcanes de la mécanique quantique. Je vais répondre à ta question en 2 temps en explorant les corps noirs puis l'atome de Bohr.

Malicia : Je suis confuse, nous voilà repartis pour une nouvelle aventure. Je suis toute ouïe.



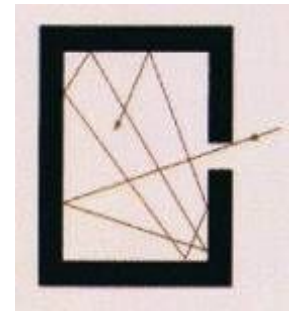
Neurino : Poursuivons, en effet, quand on excite un atome on lui apporte de l'énergie, en l'éclairant, en le chauffant, en lui infligeant des décharges électriques. Il va restituer cette énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques. Les mesurer constitue tous les travaux de Planck sur le corps noir.

Malicia : Mais quels travaux étranges ce brave Planck exerçait-il, et qui plus-est sur un mystérieux corps noir ?

Neurino : C'est cela, moque-toi, un corps noir est en fait un matériau qui absorbe toute l'énergie qu'on lui apporte et qui la restitue sous forme de rayonnements.

Malicia : Comme une forme de radiateur, mais pourquoi noir ?

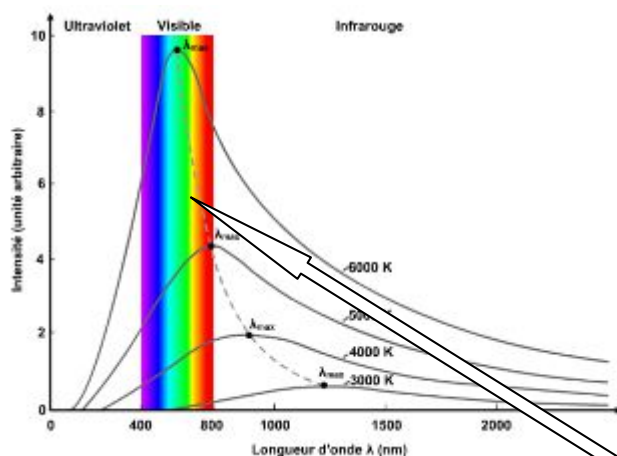
Neurino : Si l'on veut, j'aurais plutôt dit un four, et noir car le noir absorbe tous les rayonnements y compris la lumière visible, et en effet, on va mesurer la restitution de l'énergie en observant les photons réémis par un petit trou percé dans ce four.



Malicia : Et que va-t-on y voir par ce petit trou ?

Neurino : Beaucoup de choses, d'abord, qu'en le chauffant le corps noir, allait émettre des ondes électromagnétiques dont l'intensité du rayonnement était proportionnelle à la température du matériau. (Loi de Stefan-Boltzmann)

Malicia : Ce qui semble logique, «rien se crée, rien se perd»...



Pour chaque courbe maintenue à température constante, le graphe vous indique l'ensemble des fréquences réémises et leur intensité. ($f = c / \lambda$)

Neurino : Mais plus «subtil», plus le corps est chauffé plus le rayonnement émet vers les fréquences élevées.

Malicia : Ce qui s'appelle «chauffer à blanc».

Neurino : Exactement, tu ne crois pas si bien dire. Quand par exemple le fer passe de sa couleur rouge à presque blanc, dans la forge. Regarde bien ce graphique. Tu vois cela sur le graphique en observant la courbe qui relie les pics correspondants aux intensités maximales. (loi de Wien).

Malicia : En fait, à une longueur d'onde max correspond une température.

Neurino : Bien vu, c'est d'ailleurs de cette façon que l'on mesure la température des étoiles, plus une étoile tire vers le bleu, plus elle est chaude. Mais observons maintenant une des courbes principales.

Malicia : Autrement dit, le corps noir est maintenu à température constante, et l'on mesure l'intensité lumineuse rayonnée à chacune des fréquences.

Neurino : En effet, et son interprétation a donné du fil retordre. C'est Planck, en établissant «la loi de Planck» qui arriva à la conclusion suivante :

La matière ne peut émettre l'énergie radiante que par quantités finies proportionnelles à la fréquence.

Malicia : Et nous voilà à notre fameux $E = h \cdot f$ et les quanta. Mais comment arrive-t-il à cette conclusion ?

Neurino : Tu remarques dans la loi de Planck que l'intensité lumineuse donc l'énergie restituée à température constante ne dépend que de la fréquence.

Un peu de formules pour les matheux

Loi de Stefan-Boltzmann

L'intensité du rayonnement est proportionnelle à la température :

$$I = \sigma T^4$$

(σ = constante de Boltzmann
 $= 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$)

Loi du déplacement de Wien

Le produit de la longueur d'onde correspondante à l'intensité max par la température est constant.

$$\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

Loi de Planck

$$I_f = 2hf^3 c^{-2} / (e^{(hf/kT)} - 1)$$

$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$: constante de Planck ;

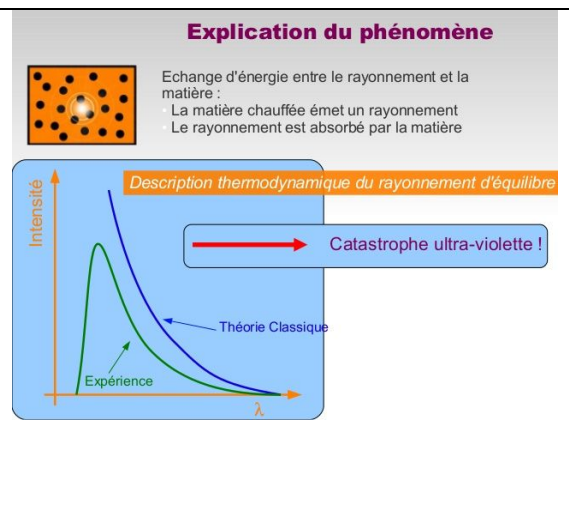
$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/s}$ constante de Boltzmann

c : célérité f : fréquence

Malicia : Oui : $I_f = 2hf^3 c^{-2} / (e^{(hf/kT)} - 1)$, plus la fréquence est élevée (la longueur d'onde petite) plus I est élevée

Neurino : Et non ! Justement, les mesures expérimentales montrent bien que l'on passe par un maximum avant de redescendre alors qu'effectivement la théorie classique de l'époque ne savait pas expliquer et parlait d'une imaginaire catastrophe ultra violette pour les fréquences élevées !

Malicia : Et la loi de Planck, correspond parfaitement aux relevés expérimentaux. Je n'avais pas bien vu le dénominateur en $e^{(hf/kT)}$, désolée.



Neurino : En effet et la seule façon d'interpréter ces courbes expérimentales est de considérer qu'à l'intérieur du corps noir la distribution de l'énergie se fait de façon discontinue par paquets « $h \cdot f$ ».

Planck lui-même admettra difficilement cette réalité.

Malicia : Ce sont ces « paquets » qui deviendront les photons d'Einstein

Neurino : Oui les quanta qu'Einstein reprendra et appellera photons.

Ondes ou particules.

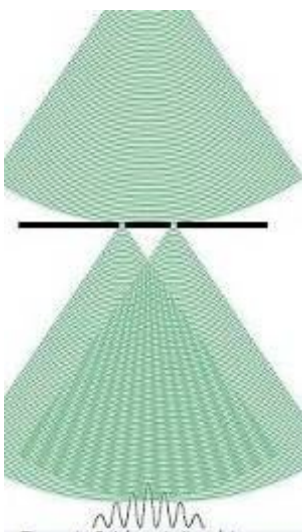
Neurino : Je t'ai présenté un peu les éléments dans le désordre, pour faciliter la compréhension. Poursuivons si tu veux bien, par une formidable ambiguïté, qui aujourd'hui n'est toujours pas totalement levée.

Malicia : Oh là là, je m'attends au pire ! Quelle est cette question angoissante ?

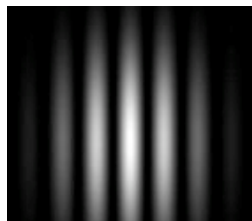
Neurino : La voici : la lumière se propage-t-elle sous forme d'une onde ou sous forme d'une particule ?



Malicia : Si je reprends mes cours d'optique, le caractère ondulatoire de la lumière ne fait aucun doute, et d'ailleurs dans notre causerie sur la lumière (cahier P2) tu me l'as très bien démontré.



Neurino : Parfaitement, et très concrètement quand une source lumineuse principale monochromatique du type : $A \cos(\omega t + \varphi)$ donc ondulatoire se divise en 2 sources secondaires qui interfèrent dans 2 fentes dites de Young, on obtient des franges d'interférences comme celles-ci.



Je te passe les calculs trigonométriques longs et fastidieux

Malicia : La lumière est donc une onde.

Neurino : Tu as pourtant vu, pour le corps noir, et notamment pour l'effet photo électrique que la notion de photon était bien démontrée.

Malicia : La lumière aurait-elle une double vie ?

Neurino : On peut dire cela, tantôt elle se comporte comme une onde, tantôt elle se comporte comme un flux de particules.

Malicia : En fait on n'en connaît pas encore la nature ?

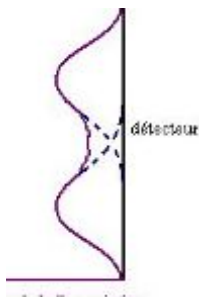
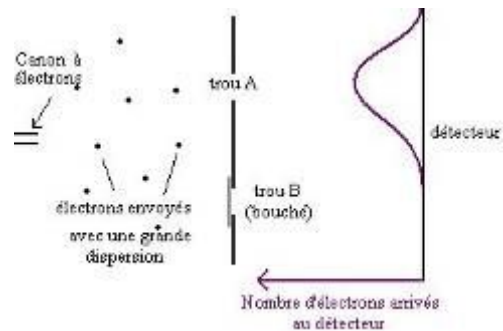
Neurino : Je vais te l'avouer : ça dépend, mais je te réserve une plus grande surprise.

Malicia : Vite, vite, je veux savoir...

Neurino : OK, reprenons nos fentes de Young, mais remplaçons la source lumineuse par un canon à électrons qui se dispersent allègrement, et tiens, bouchons l'une des fentes, que constatons nous ?

Malicia : Là c'est simple, une partie des électrons passe par la fente. Il y a accumulation des impacts devant la fente laissée ouverte.

Neurino : Parfait c'est logique, et maintenant faisons l'inverse, bouchons la fente A et ouvrons la fente B.



Malicia : C'est encore très simple, il y a accumulation des impacts devant la fente B.

Neurino : Et maintenant ouvrons les fentes A et B.

Malicia : La logique voudrait que ce soit l'addition des impacts des 2 situations précédentes, comme sur mon dessin, mais tel

que je te vois sourire 😊 j'ai un terrible doute...



Neurino : Effectivement, tu peux, nous n'avons pas, en effet cette figure mais les mêmes franges d'interférences que pour la lumière.

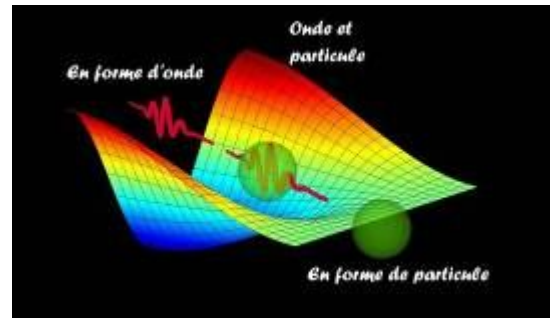
Malicia : Ça alors ! Les électrons se comportent comme une onde.

Neurino : Et plus fort encore, tu peux les envoyer un par un, comme des particules individuelles, les franges d'interférences se recomposent.

Malicia : Ce ne sont donc pas les interactions des électrons entre eux qui occasionnent les interférences, mais bien une mystérieuse «nature ondulatoire» comme pour les photons, une double nature ! Incroyable !

Mais quand donc l'électron se comporte-il en particule et quand se comporte-il en onde ?

Neurino : Là est toute l'ambiguïté et la magie de la mécanique quantique qui nous le verrons ne s'applique qu'aux particules ou aux systèmes simples de particules. Mais pas, par exemple, à de la chevrotine, si l'on remplaçait le canon à électrons par un fusil.



Malicia : Dans ce cas ce serait bien l'addition, rassure-moi ?

Neurino : En effet, par contre les électrons, comme les photons, n'occupent pas dans l'espace **une place déterminée**. Autrement dit, ils occupent tout l'espace. On est sûr de leur localisation **qu'une fois observés ou arrivés** et recomposés sur une cible. Nous y reviendrons (**retiens bien cela**).

Malicia : Que sont ces corpuscules très étranges ? Mais alors dans notre expérience des 2 fentes ...tant qu'ils ne sont pas arrivés sur la cible, donc en fait observés, si on ne sait pas où ils sont, on ne peut pas dire par quelle fente ils sont passés.

Neurino : Non, car se demander par quelle fente passent les électrons est une question dépourvue de sens en physique quantique, en effet, à ce moment les électrons ne sont pas des particules mais des ondes et elles empruntent tous les chemins disponibles à la fois.

Malicia : Bizarre, bizarre...

Neurino : Tu as dit Bizarre ? On peut le dire et pourtant maintes fois expérimentés. Et si je peux me permettre une interprétation : au stade des particules il y a différents états d'énergie. Dans le canon les électrons sont des particules massives de masse m , de charges $-e$. Une fois émis du canon les électrons sont démontés en ondes et il faut que ces ondes rencontrent une cible ou un photon envoyé par un observateur pour se recomposer en électron.

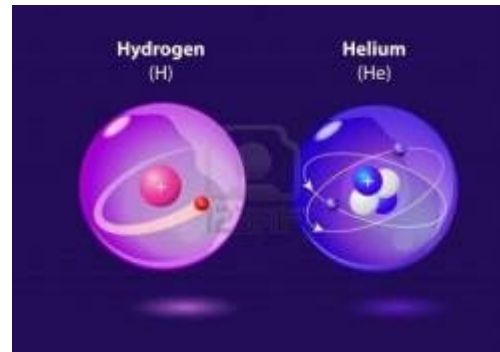
Malicia : C'est pour cela que l'électron peut en quelque sorte « passer » dans les 2 fentes à la fois...mais ce que peut faire un électron ou un photon qui est une particule élémentaire, évidemment ne peut pas le faire une balle de fusil.

L'atome de Bohr - L'atome d'Hydrogène

Neurino : Tu as raison cela n'est valable que pour les particules et nous y reviendrons mais je voudrais que nous examinions ou réexaminions, avant le modèle de Bohr.

Malicia : Pourrions nous voir comment se comporte l'électron quand il est encore lié à son atome ?

Neurino : Oui et ce sera aussi l'occasion pour répondre à ta question sur la restitution de l'énergie par l'atome excité. Selon le modèle de Bohr, les atomes sont organisés en mini système planétaire. Les électrons gravitent en orbites circulaires autour d'un noyau constitué de protons et de neutrons.



Malicia : L'atome d'hydrogène est composé d'un seul proton central et d'un seul électron périphérique, celui-ci a donc une vitesse v et comme il est situé à une distance r du centre, on peut en déduire qu'une force centrifuge $F = mv^2/r$ tend à l'extraire de l'atome.

Neurino : Parfait Malicia, donc pour le maintenir en équilibre, il faut une autre force et en l'occurrence comme l'électron et le proton sont des particules chargées nous en avons 2 forces que tu connais ma chère Malicia...

Malicia : La force de gravité découverte par Newton $f = G m_e M_p / r^2$, m_e et M_p étant les masses respectives de l'électron et du proton et la force de coulomb $F = e^2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$, e^2 car l'électron et le proton sont de même charge mais inversée... mais au fait, laquelle de ces forces est la plus importante ?

Neurino : De très loin la force de Coulomb, ce qui permet de négliger la force de gravité.

Malicia : Dis-moi Neurino, un électron de masse m_e avec une vitesse v , n'aurait-il pas une énergie cinétique $= 1/2 * m_e v^2$ donc à fortiori l'atome n'aurait-il pas une énergie totale ?

Applications Numériques

Masse du proton

$$M_p = 1,67262158 * 10^{-27} \text{ Kg}$$

Masse de l'électron

$$m_e = 9,1 * 10^{-31} \text{ kg}$$

Charge électron

$$e = - 1,6.10^{-19} \text{ C}$$

Rayon orbita

$$r = 5,3. 10^{-11} \text{ m} = a_0$$

Neurino : Encore bravo Malicia, J'attendais cette réflexion, il possède effectivement une énergie totale qui est la somme de son énergie cinétique + l'énergie potentielle. L'énergie potentielle est celle résultante de la force de coulomb.

$$E_p = \int F_c dr = (e^2 / 4\pi\epsilon_0 \int -dr/r^2) = - e^2 / 4\pi\epsilon_0 r$$

(1/r est la primitive de -1/r²)

Malicia : Merci, donc

$$E_c = 1/2 * m_e v^2, v = (rF/m_e)^{1/2}$$

$$\text{Alors } E_c = e^2 / 8 \pi \epsilon_0 r$$

$$\text{et } E_t = E_c + E_p = - e^2 / 8 \pi \epsilon_0 r$$

Neurino : Exactement, ici l'important est de retenir que notre atome d'hydrogène dans son état fondamental, soit son plus bas niveau d'énergie ou dans son état le plus stable donc pour $r = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ est à l'état d'énergie :

$$E = -13.6 \text{ eV}$$

Force de gravité :

$$f = G m_e M_p / r^2 \approx 9.8 \cdot 10^{-43} \text{ N}$$

Force de coulomb

$$F_c = e^2 / 4\pi\epsilon_0 r^2 \approx 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

Considérablement + forte.

Sur cette orbite a_0

Vitesse de l'électron

$$v = (rF/m_e)^{1/2}$$

$$v = 2.2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Soit 2200 km par seconde

Énergie cinétique

$$E_c = m_e v^2 / 2 =$$

$$2.2 \times 10^{-18} \text{ Joules} = 13.6 \text{ eV}$$



Malicia : On va peut être enfin savoir comment évolue ce système planétaire quand on va exciter cet atome, serait-ce le grand chaos ?

Neurino : Pas tout à fait, mais le petit monde va s'agiter et je pense que tu as suffisamment d'éléments pour essayer de deviner. Je vais t'aider. L'atome va absorber l'énergie par quantités entières, comme pour le corps noir. Comment peut-il faire ?

Malicia : Voyons, il faut donc trouver des orbites de l'électron qui correspondent à des états d'énergie particuliers.

Neurino : C'est en effet cela, et pour ce faire, Bohr postule que :

$$m_e v r = n h / 2\pi$$

Malicia : On retrouve la constante de Planck et un nombre entier ce qui semble logique mais pourquoi $m_e v r$?

Neurino : C'est un postulat, cela ne s'explique pas, mais $m_e v r$ est le moment cinétique orbital, qui correspond à la quantité de mouvement, pour un mouvement de rotation et par définition la variation de quantité de mouvement, correspond à la variation d'énergie que l'on cherche à quantifier c'est donc assez logique.

Malicia : En posant $E_c = 1/2 * m_e v^2$ et $m_e v r = n h / 2\pi$ on trouve

$$r_n = h^2 n^2 / e^2 m_e \pi = a_0 n^2 \text{ et } E_n = -e^4 m_e / 8 \epsilon^2 h^2 n^2 = -E_0 / n^2$$

$$a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \quad E_0 = -13,6 \text{ eV}$$

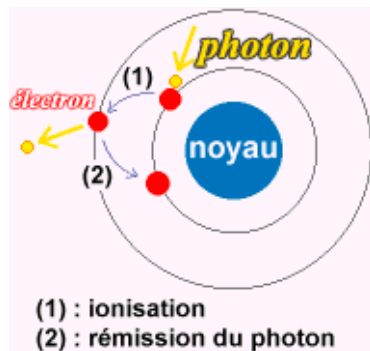
Neurino : Tes calculs sont bons et en faisant varier n on trouve les différentes orbites et niveaux d'énergie.

N	1	2	3	4	5
$E_n = -E_0/n^2$	-13,6	-3,40	-1,51	-0,850	-0,544
$r_n = a_0 n^2$	a_0	$4a_0$	$9a_0$	$16a_0$	$25a_0$

Et ainsi de suite, lorsque n devient très grand, E_n tend vers 0 et r_n tend vers $+\infty$, en fait l'électron quitte l'atome qui devient un ion.

Malicia : Donc si je résume, l'électron change d'orbite et saute sur une orbite très particulière s'il reçoit une quantité d'énergie précise.

Les caprices de l'atome d'hydrogène



Neurino : Oui mais l'atome est capricieux et n'accepte que des quantités d'énergie correspondantes aux changements de niveaux.

Malicia : Tu veux dire qu'en dehors de ces quantités il ne se passe rien ?

Neurino : Très exactement, il faut donc lui fournir de l'énergie, de manière à envoyer cet électron sur la couche numéro 2, puis 3, puis 4, 5, 6, 7, etc. Pour l'envoyer sur la couche no.2, il faut lui fournir précisément $(-3,4 + 13,6) = 10,2$ eV, sur la couche no 3 $(-1,51 + 13,6) = 12,09$ eV. Pour l'envoyer sur les couches supérieures, il faut des énergies qui se rapprochent de plus en plus de la limite de 13,6eV.

Malicia : C'est comme s'il entrait en résonance pour certaines valeurs.

Neurino : J'aime bien l'image, et effectivement pour d'autres quantités d'énergie différentes de ces niveaux mais plus petites que 13.6 eV l'atome ne les absorbe pas, et ne réagit pas.

Malicia : Tu as le vraiment le don pour préserver le suspens... une question reste sans réponse et je suis certaine que tu l'as fait exprès.

Neurino : C'est un peu vrai ! Ne serait-t-elle pas ? Que se passe-t-il si on dépasse 13.6eV ?

Malicia : Je le savais ! Mais je crois deviner, dans ce cas l'électron quitte l'atome.



Neurino : C'est encore bien vu, en effet dans ce cas l'atome absorbe toute l'énergie supérieure à -13.6 eV, et l'électron quitte l'atome qui devient un simple ion. Mais je vais te poser une autre question importante à laquelle, avec ce que nous avons vu, je pense, tu peux répondre. Réfléchis-bien : avec quelle vitesse l'électron quitte -t-il l'atome ?



Malicia : Tu me fais trop d'honneur. Voyons, voyons. Si on apporte à l'atome une énergie E supérieure à 13.6eV, il y a au moins 13.6eV, qui doivent servir à arracher l'électron et donc $E-13.6$ à mettre cet électron en mouvement hors de l'atome donc à lui apporter une nouvelle énergie cinétique.

Neurino : Tu es sur le bon chemin, continue...

Malicia : Donc l'électron quitte l'atome avec une vitesse v tel que :

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = E - 13.6$$

Donc $v^2 = 2 (E - 13.6) / m_e$ aux unités près.

Neurino : Bravo c'est bien cela, tu es douée ! Revenons maintenant à l'autre question : comment l'atome revient-il dans son état fondamental ?

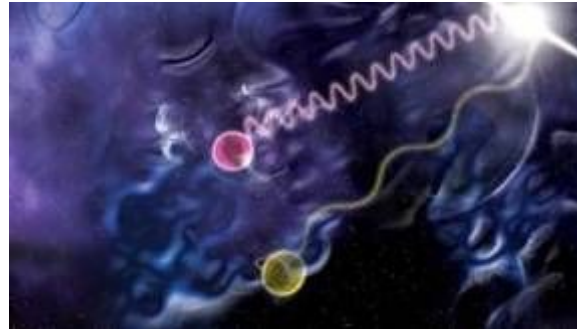
Malicia : En effet, quand l'électron aura atteint une orbite supérieure correspondant à un état d'énergie précis, alors l'atome n'est pas dans son état stable. N'aura-t-il pas tendance à revenir dans son état fondamental ?

Neurino : Si bien sûr, et ce retour a intrigué de nombreux savants. N'aurais-tu pas une idée de la façon dont se fait ce retour à l'état fondamental.

Malicia : Je présume que si l'aller s'est fait par quantités précises le retour doit se faire de la même façon.

Neurino : Tu présumes bien, l'état excité dure moins d'une seconde et le retour à l'état fondamental se fait par l'émission de photons, donc de quanta par l'électron correspondant à la perte d'énergie et le changement d'orbite tel que. $\Delta E = h * f$.

Malicia : En fait sous forme de rayonnement électromagnétique ou par l'émission de photons de fréquence f



Neurino : Plus exactement par l'émission de raies selon le nombre d'orbites à descendre mais en suivant des règles qui dans un premier temps ont été approchées **expérimentalement** qui sont les suivantes :

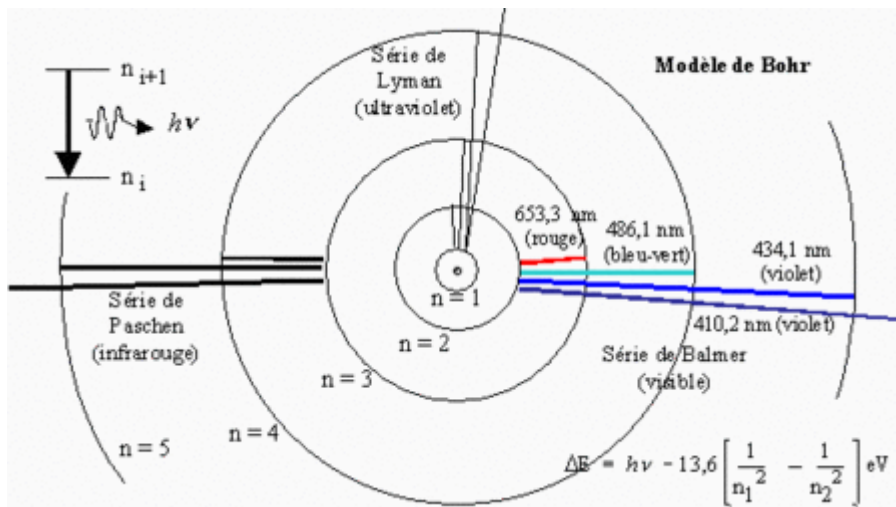
Ces spectres ont été découverts par LYMAN (dans l'ultra Violet) pour le retour à l'état fondamental. Par BALMER (dans le visible) pour le retour au niveau 1. Par PASCHEN, BRACKETT et PFUND (infra rouge) pour les niveaux suivants. Ils ont montré que les fréquences des raies émises vérifiaient une relation appelée "règle de RITZ" :

$$\boxed{1/\lambda = 10979708 (1/n_1^2 - 1/n_2^2)} \quad 1/\lambda = f/c = \Delta E/hc$$

Le nombre 10979708 est appelé : constante de RYDBERG

n_1 et n_2 deux nombres entiers positifs correspondant aux niveaux des couches à descendre tels que $n_2 > n_1$

Pour $n_1 = 1$, on aura une série de raies appelée la Série de LYMAN pour $n_1 = 2$, la Série de BALMER, etc.



Malicia : Donc si je comprends bien l'hydrogène émet de la lumière lorsqu'il revient vers son état fondamental.

Neurino : Ou à un état intermédiaire comme le montre ce schéma.

Malicia : Par exemple si je descends du niveau 4 au niveau 2 donc de -0.85eV à -3.4 eV l'électron émet $= (3.4 - 0.85) \text{ eV} = 2.55 \text{ eV}$

Neurino : Sachant qu'un $\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ joules

Malicia : je perds $\Delta E = 2.55 \times 1.6 \times 10^{-19}$ joules $= h \cdot f$ donc $f = 615 \times 10^{12}$ la raie dans le visible correspondant au bleu vert à $\lambda = 486.1 \text{ nm}$

Neurino : Tu peux aussi vérifier que dans ce cas $n_1 = 2$ et $n_2 = 4$ donc que $1/\lambda = 10979708(1/n_1^2 - 1/n_2^2) = 2058695.25$ donc $\lambda = 486\text{nm}$ ce qui correspond bien à la raie bleu-vert.

Vois-tu la raie rouge ?

Malicia : Oui celle qui correspond au passage du niveau 3 au niveau 2 de 653 nm

Neurino : C'est la raie rouge baptisée H α des nébuleuses lesquelles contiennent principalement de l'hydrogène atomique que l'on identifie grâce à cette raie.



Nébuleuse d'Orion

Malicia : En fait le spectre d'émission des atomes est comme une carte d'identité car je présume que cela ne se limite pas à l'hydrogène.



Neurino : En effet, par exemple c'est ce même principe qui est utilisé pour l'éclairage orange des lampes à vapeur de sodium.

Malicia : Me voilà moins bête, mais c'est quand même curieux cette constante de RYDBERG, elle doit bien correspondre à quelque chose.

Neurino : On ne peut rien te cacher, revenons à l'énergie $E_n = -e^4 m_e / 8 \epsilon^2 h^2 n^2$

Malicia : Donc on peut dire que :

$$E(1) = -e^4 m_e / 8 \epsilon^2 h^2 n_1^2 \text{ et } E(2) = -e^4 m_e / 8 \epsilon^2 h^2 n_2^2$$

Neurino : Donc $\Delta E = E(2) - E(1) = e^4 m_e / 8 \epsilon^2 h^2 (1/n_1^2 - 1/n_2^2)$ et $\Delta E/hc = R(1/n_1^2 - 1/n_2^2) = e^4 m_e / 8 \epsilon^2 ch^3 (1/n_1^2 - 1/n_2^2)$

Malicia : Donc R la constante de Rydberg vaudrait : $e^4 m_e / 8 \epsilon^2 ch^3$

Neurino : Soit après calcul : 10973740

Malicia : Mais ce n'est pas la même valeur que la valeur expérimentale....

Neurino : Eh bien oui, le modèle de Bohr n'est pas parfait, le centre de gravité proton-électron n'est pas exactement centré, nous avons négligé les phénomènes quantiques et nous sommes dans l'atome le plus simple. Tu imagines les atomes plus complexes avec des centaines d'électrons....



Malicia : Ne sois pas aussi abattu, Neurino. C'est déjà un beau résultat ! Allez, allez ça va aller mieux...ne déprime pas.

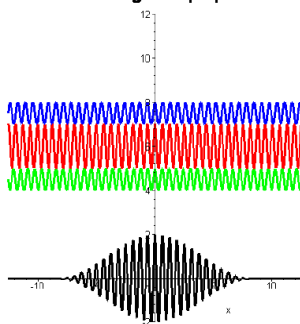
Neurino : Je ne suis pas découragé, mais cela signifie simplement que ce modèle est incomplet. Nous n'avons pas tenu compte de plusieurs points importants sur les phénomènes corpusculaires : leur nature ondulatoire, l'impossibilité de localiser les électrons. Te souviens-tu de l'impossibilité de dire par quelle fente de Young les électrons sont passés ?

Malicia : Effectivement à ce moment, il semblerait que les électrons sont des ondes et passent dans les 2 fentes à la fois.

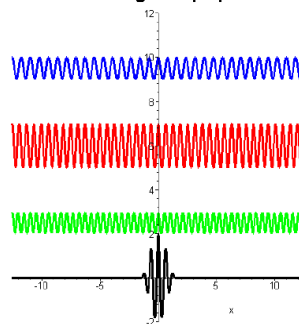
Onde et paquet d'ondes

Neurino : Il est bien là le problème. Nous voulons absolument décrire l'électron comme une particule ponctuelle alors que, et nous l'avons démontré, il lui arrive de se comporter comme une onde. Or dans ce cas, il est impossible de le localiser. Il faut donc appliquer un autre modèle qui tienne compte de cette composante ondulatoire.

Ondes de de Broglie et paquet d'ondes



Ondes de de Broglie et paquet d'ondes



Malicia : En utilisant ces redoutables formules de trigonométrie.

Neurino : On peut aussi utiliser les nombres complexes, ainsi une onde sera de la forme :

$\Psi(t, r) = f(\omega)e^{-i(\omega t - kr)}$ ω est la pulsation = $2\pi f$: f fréquence, $k r$ est le déphasage $k = \omega / v$ v est la vitesse et r la distance.

Malicia : Oh la la, il faut que nous décortiquions un peu tout cela ...d'abord $\Psi(t,r)$ donc une fonction périodique du temps t et de la position r mais de quelle amplitude ?

Neurino : Tu viens de mettre le doigt sur un point capital, certes le phénomène est ondulatoire mais n'est pas dispersée or une onde simple s'étale à l'infini. Afin de contourner ce problème, on superpose une infinité d'ondes, on obtient alors un paquet d'ondes de taille finie, le «paquet d'ondes» appelée aussi «fonction d'onde», **peut ainsi représenter une particule**. Et se s'écrit sous la forme :

$$\Psi(t,r) = \int_{\Omega} f(\omega) e^{-i(\omega t - kr)} d\omega$$

Les graphiques ci-dessus te montrent des exemples de sommes de 3 ondes simples qui forment des paquets finis.

Malicia : C'est donc cette fonction qui représente la particule qui n'est donc vraiment plus localisée puisque c'est une onde, je m'y perds !

Neurino : Voyons Malicia, c'est pourtant bien ce que nous voulions une particule que nous ne savons pas «exactement localiser» que nous savons pourtant «exister» et présente et que nous pouvons décrire avec une fonction d'onde.

Malicia : Oui, j'admets, tu parles aussi de pulsation, $\omega = 2\pi f$ mais quelle fréquence ?

Neurino : Louis de Broglie en 1924 quand il imagina ces ondes fit le rapprochement entre $\Delta E = h \cdot f$ donc $1/f = \lambda$ (la longueur d'onde) = $h/\Delta E$ de la formule de Planck et $\lambda = h/p$ avec $p = m v$ la quantité de mouvement et $v = \Delta\omega/\Delta k$ la vitesse du paquet d'ondes ou de la particule. Tu vois il y a une certaine logique.

Malicia : Je vois, mais dans notre expérience des fentes de Young, quand donc l'électron est il une onde et quand devient-il une particule ?

Neurino : J'oserais-dire tant que tu ne le regardes pas ou qu'il n'est pas localisé ou qu'il n'a pas interagit avec la cible.

Malicia : Serait-il timide ?

Neurino : Ce n'est pas cela mais dès que l'«onde» rentre en interaction avec l'onde du photon envoyé par l'observateur pour l'observer il redevient particule et il n'y a bien sûr, plus d'interférences.

Malicia : Par contre non perturbée la fonction d'onde de l'électron se divise en 2 paquets d'ondes secondaires entre les deux fentes de Young.



Neurino : Qui se recomposent à la sortie et interfèrent donc entre eux, ce qui conditionne l'impact de l'électron sur la cible.

Malicia : Quand l'électron est détecté, se trouve-t-il à un endroit précis dans le paquet d'ondes ?

Neurino : Par définition, non il n'est pas localisable, par contre on démontre que le carré du module de cette fonction d'onde est la densité volumique de probabilité de présence de la particule au point r

$$P(r, t) = \Psi^2(r, t)$$

Malicia : Tu veux dire que s'il était détecté à ce moment et à cet endroit nous aurions cette probabilité de l'y trouver.

Neurino : C'est bien cela et tu pourras vérifier que la probabilité correspond aux schémas d'interférences dessinés sur la cible.

Le coin des matheux

Reprenons la fonction d'onde.

$$\Psi(t, r) = \int_{\Omega} f(\omega) e^{-i(\omega t - kr)} d\omega$$

$$p = \hbar k / 2\pi \text{ et } E = \hbar \omega / 2\pi$$

Donc

$$\partial / \partial t \Psi(t, r) = - \int_{\Omega} i 2\pi E / \hbar f(\omega) e^{-i 2\pi / \hbar (Et - pr)} d\omega$$

Le produit scalaire $p \cdot r = p_x x + p_y y + p_z z$

Donc

$$\partial^2 / \partial x^2 \Psi(t, r) =$$

$$- \int_{\Omega} 4\pi^2 (p_x)^2 / \hbar^2 f(\omega) e^{-i 2\pi / \hbar (Et - pr)} d\omega$$

On obtient les dérivées secondes analogues en x et y et z on additionne pour obtenir :

$$(i\hbar / 2\pi) \partial / \partial t \Psi(t, r) + (\hbar^2 / 4m) \Delta \Psi(t, r) =$$

$$\int_{\Omega} (E - p^2 / 2m) f(\omega) e^{-i 2\pi / \hbar (Et - pr)} d\omega$$

Δ est le laplacien $= \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$

Puisque l'électron se déplace librement

$$E = p^2 / 2m \text{ ou } E = 1/2 (mv^2)$$

Donc :

$$(i\hbar / 2\pi) \partial / \partial t \Psi(t, r) + (\hbar^2 / 4m) \Delta \Psi(t, r) = 0$$

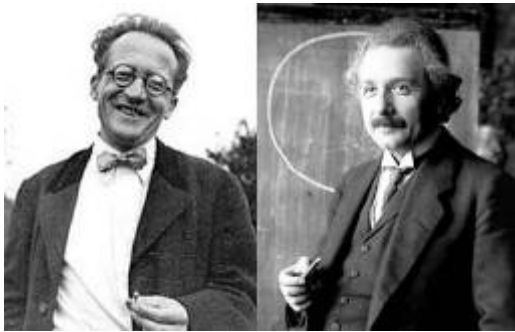
Et

$$(i\hbar / 2\pi) \partial / \partial t \Psi(t, r) = - (\hbar^2 / 4\pi m) \Delta \Psi(t, r)$$

Voici la fameuse équation de **Schrödinger**

L'équation de Schrödinger

Malicia : Tout cela est bien joli, quand les électrons sont des petites billes chargées et pesantes. Ils répondent aux lois de la gravité et de l'électromagnétisme. Mais à quelle loi répondent-ils lorsqu'ils sont des paquets d'ondes.



Schrödinger et Einstein

Neurino : Ça c'est une bonne question. J'oserais dire que c'est le cœur de la mécanique quantique. En fait en 1926 **Schrödinger** propose une équation différentielle qui porte son nom dont la **fonction d'onde** est solution. Cette équation est en quelque sorte l'équivalent de la relation fondamentale de la dynamique utilisée en mécanique classique.

Cette équation est la suivante :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right) \psi(x, t)$$

Malicia : Elle parait compliquée.

Neurino : En fait elle est bâtie sur le principe de la conservation de l'énergie et toutes les expérimentations ne l'ont jamais démentie.

Malicia : Jusqu'à présent !

Neurino : Petite maligne, bien sûr, jusqu'à présent, d'autant plus qu'elle a suscité les plus grandes polémiques, et chez les plus grands. Pour ne pas les nommer, Einstein et Schrödinger eux mêmes étaient septiques. Je te le répète, elle a permis d'expliquer et de prédire les plus grands phénomènes corpusculaires. Notamment de retrouver les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène et cette fois ci sans approximation.

Malicia : Alors pourquoi donc étaient-ils septiques?

Neurino : Comme nous l'avons vu, lorsque l'électron n'est qu'une fonction d'onde, elle se divise entre les 2 fentes de Young et se recompose pour interférer.

Malicia : Exactement, tu as même dit que $\Psi^2(r, t)$ était la probabilité de trouver l'électron à la distance r .

Neurino : En effet, et je rajoute que si on essaie de le détecter en tentant de l'observer on assiste à un effondrement de la fonction d'onde.

Malicia : Qu'est cela ?

Neurino : Tout simplement les figures d'interférence disparaissent pour laisser place à des figures corpusculaires ordinaires. Il n'y a plus d'interférences.

Malicia : Ou veux-tu en venir ?

Neurino : Cela signifie simplement qu'avant d'être détecté l'électron n'existe pas en tant que tel mais en tant qu'état probabiliste et de fonction d'onde. Le seul moyen de l'en sortir est de tenter de l'observer mais alors la fonction d'onde disparaît ainsi que son état probabiliste.

Malicia : Et une fois observé, il devient déterministe alors qu'il a interféré...il y aurait pas comme un paradoxe.

Neurino : En fait avant d'être observé, notre électron est dit dans un état quantique ou dans plusieurs états dits superposés, ayant chacun une probabilité $P(r, t)$.

Malicia : C'est un peu pour cela que l'on peut «imaginer» qu'il passe par les 2 fentes à la fois...

Le chat de Schrödinger

Neurino : Je veux bien, mais que cela ne reste qu'une image. Pour illustrer, ce que cette superposition d'états avait de déroutant Schrödinger imagina une expérience de pensée.

Malicia : Comme en raffolait Einstein.

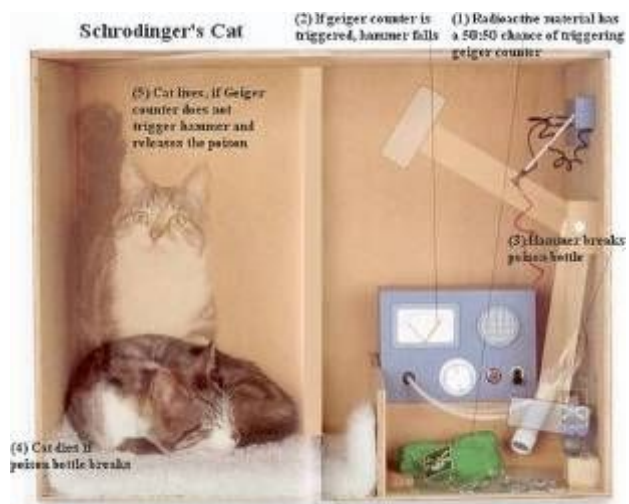
Neurino : Exactement, voilà l'expérience : Schrödinger a imaginé enfermer un chat dans une boîte avec un compteur Geiger qui détecte les particules désintégrées, actionnant un marteau qui va briser une fiole renfermant un poison volatile mortel.

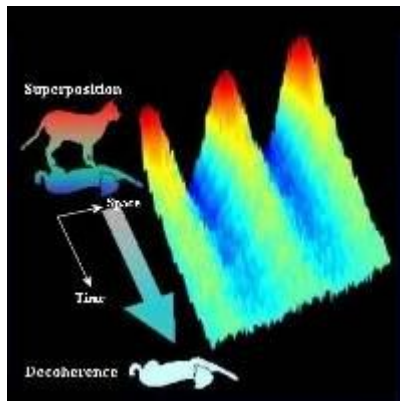
Malicia : Pauvre petite bête...

Neurino : Malicia, ce n'est qu'une expérience de pensée... si le compteur détecte un changement d'état d'une particule atomique enfermée, elle aussi avec le chat.

Mais voilà cette particule est dans un état probabiliste (50% intacte, 50% désintégrée)

Malicia : Et les états sont superposés.





Les particules d'un chat peuvent-elles être décohérées ?

Neurino : En effet, ce qui pimente l'expérience, est que l'état déterministe de notre particule atomique ne sera qu'effectif que si....

Malicia : On l'observe, donc si on ouvre la boîte.

Neurino : En effet, d'où la question le chat ayant son destin lié à la particule, avant d'ouvrir la boîte, est-il dans le même état, vivant et mort ?

Malicia : Au-delà de la cruauté de cette expérience, je ne vois pas comment un chat peut à la fois être vivant et mort ?

Neurino : C'est exactement, ce que voulait montrer Schrödinger et pourtant, comme toutes les applications de la mécanique quantique sont expérimentalement et mathématiquement démontrées, les états superposés existent pour l'électron. Pourquoi, diable, ne les retrouve-t-on pas pour un chat ? Ou un ensemble macroscopique ?

Malicia : J'attends ta réponse, car là j'avoue je n'ai pas d'idée.

Neurino : Beaucoup de physiciens se sont penchés et se penchent encore sur ce paradoxe pour expliquer ce phénomène avec des explications plus ou moins sérieuses. Pour ma part la plus plausible est qu'un ensemble de particules très complexe, comme un chat, composé de milliards de milliards de particules, a trop d'interactions avec l'extérieur pour pouvoir être influencé par une quelconque cohérence ou décohérence de particules, l'amenant dans un état quantique.

Malicia : Voilà qui est bien dit.

Le Paradoxe EPR

Neurino : Oui, mais, je n'ai pas dit que la mécanique quantique ne réservait pas d'autres belles surprises.

Malicia : Chique, des surprises !

Neurino : En effet, les états quantiques superposés entraînent réellement de curieux effets comme «l'intrication» qui lie entre-elles 2 particules.



Malicia : Tu veux dire que toute action sur une particule entraîne automatiquement une réaction de l'autre particule.

Neurino : Oui et cela instantanément, ce qui d'ailleurs contrariait fiévreusement

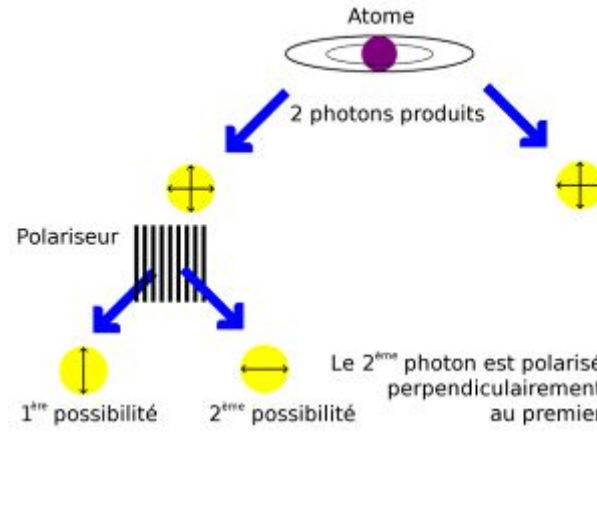
Einstein et l'a opposé à Bohr plus de 20 ans jusqu'à leur mort.

Malicia : Je crois deviner ce qui faisait augmenter la température d'Einstein.

Il ne devait pas admettre qu'un phénomène puisse se propager plus vite que la vitesse de la lumière.

Neurino : Tu as deviné, et avec 2 collègues, Podolsky et Rosen, ils ont monté une autre expérience de pensée que l'on appela le paradoxe EPR.

Malicia : EPR étant les initiales de leurs noms.

 <p>Atome</p> <p>2 photons produits</p> <p>Polariseur</p> <p>1^{re} possibilité</p> <p>2^{me} possibilité</p> <p>Le 2^{me} photon est polarisé perpendiculairement au premier</p>	<p>Neurino : C'est cela, une source lumineuse produit des photons intriqués. Ils sont dans un état superposé, polarisé verticalement et horizontalement. Ces photons sont séparés et envoyés dans des directions différentes. Un polarisateur est introduit dans le chemin de l'un d'eux qui aléatoirement choisit un état.</p> <p>Malicia : Et l'autre réagit comme tu dis instantanément en choisissant aussi un état.</p>
---	--

Neurino : En effet en l'occurrence l'état opposé, et quelle que soit la distance.

Malicia : C'est peut être que ces photons connaissent le résultat à l'avance ?

<p>Neurino : C'est aussi ce que pensait Einstein et il évoquait pour cela des variables cachées. Mais Alain Aspect a depuis démontré expérimentalement en 1981 que les particules intriquées forment bien «un tout» et qu'il faille bien admettre le principe de «non localité» pour ces particules.</p>	<p>Alain Aspect Physicien</p> <p>Alain Aspect est un physicien français, né en 1947, connu notamment pour avoir conduit le premier test concluant portant sur un des paradoxes fondamentaux de la mécanique quantique, le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen. Wikipedia</p> 
---	--

Malicia : C'est quand même difficilement concevable.

Neurino : Et c'est pourtant aussi démontrable mathématiquement. Je t'en fais grâce, car les notions notamment d'espace de Hilbert sont assez complexes.

Malicia : C'est trop de sollicitude !

Neurino : Par contre pour que le tour d'horizon sur cette introduction à la mécanique soit assez complet je souhaiterais te parler d'incertitude...

Malicia : Non Neurino, pas toi, tu souffrirais d'incertitude ?

Neurino : Quel humour ! Il s'agit des inégalités d'Heisenberg, aussi appelées -principe d'incertitude. Ces inégalités démontrent qu'il est impossible de connaître à la fois la vitesse et la position d'une particule. Ou, autrement dit, cela signifie que plus l'on connaît une des deux composantes, moins l'on connaît l'autre.

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h / 4\pi$$

ou

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Malicia : C'est un peu comme les photos, pour obtenir une image nette, il faut une vitesse rapide.

Neurino : C'est moins intuitif, mais il y a de ça : 2 valeurs antagonistes. Mais cette inégalité traduit surtout le fait qu'il est impossible de mesurer simultanément la position et la vitesse d'un objet quantique.

Malicia : Nous voilà revenus aux états superposés.



Neurino : Plus exactement aux états probabilistes de la mécanique quantique, et des effets curieux que cela induit au monde microscopique, comme par exemple l'effet tunnel.

Malicia : Vraiment, ça manquait, tu ne ménages pas tes effets.

Neurino : C'est un métier, je m'applique... une particule peut être représentée par une sphère dans laquelle elle pourrait se trouver en chaque point avec une certaine probabilité.

Malicia : C'est en fait une fonction d'onde.

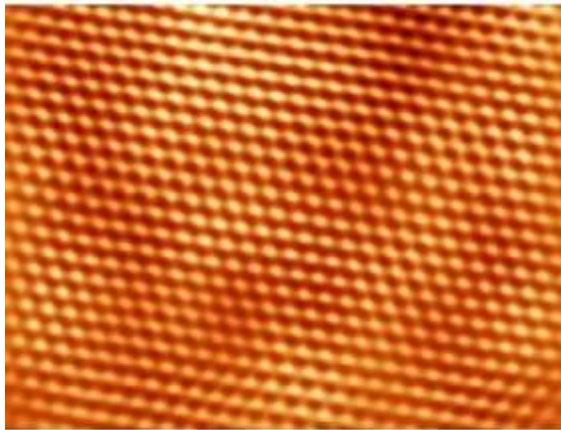
Neurino : Exactement, imaginons maintenant que l'on fasse avancer la sphère contre un mur suffisamment fin, de telle façon que la sphère dépasse derrière le mur. Alors, il existe une probabilité non nulle pour que la particule se retrouve derrière le mur. Il s'agit de l'effet tunnel.

Malicia : Bigre ! On traverse les murs avec la mécanique quantique !

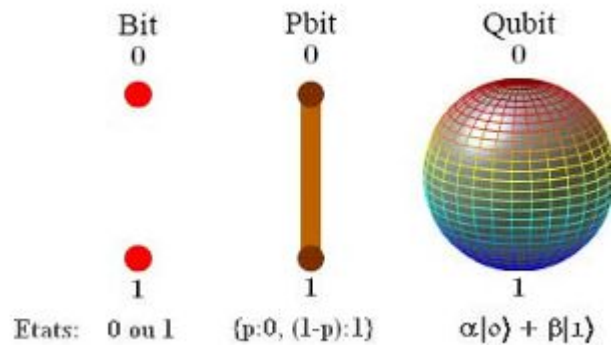
Neurino : Et oui, elle est déroutante hein ? Et pourtant vérifiée chaque jour.

Malicia : Mais quelles sont les applications que l'on doit à la mécanique quantique.

Neurino : Elles sont nombreuses, le laser, le microscope à effet tunnel, l'IRM et surtout il y a des études extrêmement prometteuses sur un système de cryptographie absolument inviolable basée sur le paradoxe EPR et des projets d'ordinateurs quantiques super puissants dont la mémoire serait à base de qubit dont les états seraient non pas binaires mais superposés.



CNRS Atomes vus au microscope à effet tunnel



Le Qubit se compose d'une superposition de deux états de base, par convention nommés $|0\rangle$ et $|1\rangle$ (prononcés : ket 0 et ket 1).

Malicia : Quel est l'avantage ?

Neurino : En tenant compte de l'état superposé des qubit dans les algorithmes de calculs des ordinateurs on accroit considérablement la puissance des ordinateurs

Malicia : Et bien cette plongée dans l'univers quantique me laisse béate et m'envahie de perplexité.

Un petit survol mathématique

L'équation d'un qubit s'écrit : $\alpha \cdot |0\rangle + \beta \cdot |1\rangle$, les coefficients α β étant des nombres complexes vérifiant $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Lors de la mesure de la valeur du qubit, les seules réponses pouvant être obtenues sont 0 ou 1. La probabilité de mesurer l'état 0 vaut $|\alpha|^2$, tandis que celle de mesurer l'état 1 vaut $|\beta|^2$. Après mesure, le qubit se trouve dans l'état mesuré.

Une autre particularité du qubit par rapport à un bit classique est qu'il ne peut être dupliqué. En effet, pour le dupliquer, il faudrait pouvoir mesurer α et β d'un qubit tout en préservant l'état du qubit, de sorte à préparer un autre qubit dans le même état. Ceci est impossible car : Il est impossible de lire un qubit sans le détruire

En revanche, il est possible de *transposer* la valeur d'un qbit sur un autre qbit ,

Neurino : Comme les plus grands de nos physiciens. C'est probablement ce qui se cache au-delà de la mécanique quantique, non pas des variables comme le pensait Einstein mais peut être d'autres dimensions.

Malicia : N'est-ce pas ce que suggère la théorie des super cordes.

Neurino : En effet mais c'est une autre histoire.

Malicia : Merci Neurino pour cette nouvelle aventure.

Neurino : C'est toujours un plaisir de partager ma passion de la physique avec toi.

Malicia : Et bien donc à très bientôt.



Diffusion

J'autorise et j'encourage la diffusion et la reproduction de ces documents.

Je sais qu'ils peuvent rendre service et aider à comprendre des points qui pour certains semblent «nébuleux» et qui pourtant sont en fait relativement simples ! Par contre je vous remercie de bien vouloir me communiquer en retour vos avis, vos remarques, vos critiques tant positives que négatives afin que je puisse apporter toutes les améliorations possibles. Dites-moi quand je vulgarise trop, ou au contraire quand je suis encore trop compliqué...

Alain Bellevergue

Adresse mail pour envoyer avis, pour demander à être sur la liste de diffusion ou demander un numéro déjà paru : al.bellevergue@orange.fr

Bibliographie et Illustrations :

Clipart : <http://office.microsoft.com/fr>

Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org>

Les numéros parus :

P1 : La gravité

P2 : La lumière en couleurs

P3 : Les ondes électromagnétiques

P5 : La relativité restreinte

P6 : La relativité générale

P9 : La mécanique quantique

Les numéros en préparation :

P4 : La lumière onde ou particule ?

P7 : La matière

P8 : L'Univers

M1 : Les nombres

M2 : Les dérivées

M3 : Les intégrales

E1 : La monnaie

E2 : La croissance