

## COMENTAIRE PHYSIQUE QUANTIQUE ARTP

### D1 TITRE

je vais essayer dans la  $\frac{1}{2}$  heure qui m'a été attribuée d'évoquer avec vous quelques uns des phénomènes de la physique quantique, dont la caractéristique principale est qu'ils sont parfaitement incompréhensibles pour le sens commun

L'immense professeur et prix Nobel de physique Richard Feynman, avait pour habitude de dire à ses étudiants de première année : « Ne soyez pas effrayés par ce que je vais vous expliquer pendant les sept ans que nous allons passer ensemble, je n'y comprends rien moi-même »

### D2 LA PHYSIQUE QUANTIQUE (lire la diapo)

Quelle est donc cette science mystérieuse à peine évoquée en terminale S ?

### D3 L'ATOME DE RUTHERFORD

Pour commencer nous allons retracer très rapidement l'histoire de l'atome :

Définie par Démocrite 400 ans avant JC comme la plus petite partie sécable de la matière, (ce qui se dit atome en grec) cette conception étonnamment pertinente, fut abandonnée jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle.

Pour Ernest Rutherford, prix Nobel de chimie en 1908, considéré par ailleurs comme le père de la physique nucléaire, l'atome est comparable à un système solaire où l'attraction gravitationnelle est remplacée par l'attraction électrique. La masse et la charge positive étant concentrées dans un noyau central (analogue au Soleil), autour duquel graviteraient (comme des planètes) des électrons de charge négative.

Cette analogie planétaire particulièrement séduisante, avait cependant un défaut de taille.

En effet, une charge électrique dont le mouvement n'est pas rectiligne uniforme, mais accéléré (ce qui est le cas d'un mouvement circulaire même à vitesse constante) émet un rayonnement et perd de l'énergie ; condamnant les électrons à s'écraser sur le noyau en moins d'un cent milliardième de seconde.

Il est évident que cela pose un tel problème que nous ne serions pas là pour en parler

### D4 L'ATOME DE BOHR

Intrigué par cette anomalie, le physicien danois, Niels Bohr, s'inspirant des travaux de Planck, va s'en affranchir, en postulant que le rayon de l'orbite circulaire des électrons ne peut varier de façon continue, et qu'il faut lui assigner des valeurs discrètes.

C'est à dire que les électrons ne peuvent graviter que sur des orbites bien précises mais à partir d'une orbite dite fondamentale en dessous de laquelle les électrons ne peuvent descendre. Chaque électron peut sauter sur l'orbite supérieure si on lui fournit l'énergie néces-

saire (sous la forme d'un photon) ou descendre sous l'orbite inférieure en rendant de l'énergie (également sous la forme d'un photon).

Sur le dessin on voit une représentation symbolique du carbone 12 avec 2 électrons sur la couche K et 4 électrons sur la couche L

## D5 LE MODEL DE DE BROGLIE

Intervient en 1924 Louis de Broglie, (prix Nobel de physique en 1929), qui soutient une thèse de doctorat sur « la nature ondulatoire de l'électron »

Cette théorie posait les bases de la mécanique ondulatoire. Elle fut soutenue par Einstein, confirmée en 1927 par les expériences de diffraction des électrons de Clinton Davisson et Lester Germer, et surtout généralisée par les travaux d'Edwin Schrödinger.

## D6 L'ATOME SELON HEISENBERG- SCHRODINGER- DIRAC (tous les 3 indépendamment prix Nobel de physique)

Dans cette conception révolutionnaire, en fait beaucoup plus proche de la réalité, la représentation graphique traditionnelle avec ses couches ou ses orbite, n'a plus qu'un intérêt pédagogique. On conçoit l'atome comme un noyau entouré d'un nuage électronique, sachant qu'on ne sait pas où se trouve l'électron recherché, ni quelle est la nature de sa trajectoire éventuelle. On sait seulement que la probabilité de le trouver à une certaine distance du noyau est proportionnelle à la densité de ce nuage.

La nouvelle physique suggère donc qu'il faut abandonner une quelconque représentation réaliste de l'atome pour considérer le phénomène plutôt comme une identité mathématique

## D7 L'ATOME VIDE

Le schéma à l'écran de l'atome d'hydrogène, illustre une autre incroyable réalité : La matière n'est en fait que vide profond, qu'on ne peut toutefois pénétrer du fait des forces électromagnétiques. Ce qui ne semble pas être le cas pour les étoiles à neutron où la densité est telle que protons, neutrons et électrons peuvent se combiner pour devenir des sortes de noyaux neutres où une cuiller à café de matière pèserait des centaines de millions de tonnes.

## D8 PREMIERE CONSTATATION

Nous serions donc en quelque sorte un assemblage d'identités virtuelles.

## D9 LA LUMIERE EST UNE ONDE

Maintenant parlons de la lumière.

La lumière n'est qu'une petite partie du spectre électromagnétique qui va des rayons gamma de très haute énergie aux ondes radio. Et en ce sens c'est bien une onde.

## D10 LA LUMIERE EST UNE ONDE, OUI MAIS !(lire la diapo)

Il y a l'effet photo-électrique qui ne peut se comprendre que si la lumière se compose de quanta d'énergie.

## D11 DU COTE ONDE(lire la diapo)

Expérience des fentes de Young

Prenons l'hypothèse que la lumière est une onde

## D11 DU COTE CORPUSCULES

Maintenant, si on remplace la source lumineuse par un canon qui tire des micro-billes à travers les deux fentes, donc de "vraies" corpuscules, on n'obtient aucune figure d'interférence, mais, comme on peut s'y attendre, simplement une zone plus dense, en face des fentes.

On réinstalle notre source lumineuse dont on diminue l'intensité primaire de manière que la lumière soit émise photon par photon. (on sait le faire), alors le comportement de la lumière devient inexplicable.

a) Avec une seule fente ouverte, on envoie nos photons un par un, les photons vont produire chacun un impact quasi ponctuel bien localisé sur la plaque photo et à la fin donner le même type de zone dense que pour le canon à billes.

b) On rouvre les deux fentes, et petit à petit, la zone d'interférence se reconstitue, avec des franges identiques à celles de la première expérience; la lumière reprend son comportement ondulatoire. Et on ne peut faire autrement que de conclure que le photon passe par les deux fentes à la fois

Mieux, si on dispose un système qui observe ce qui se passe, le photon se comporte seulement comme un corpuscule et jamais comme une onde.

## D12 GENERALISATION DE LA DUALITE ONDE-PARTICULE

La métaphore du cylindre montre que selon qu'on l'éclaire radialement ou axialement il se manifeste soit par un disque soit par un rectangle

On peut cependant se demander pourquoi ce postulat de dualité onde/particule semble ne pas s'appliquer aux objets macroscopiques. La réponse est dans la formule  $\lambda = h / p$ , car la quantité de mouvement  $p$  sera extrêmement grande par rapport à  $h$  et l'aspect ondulatoire sera indécélable.

Dans la vie quotidienne (par exemple pour une boule de pétanque de 1 Kg, lancée à 10 m/s), c'est la composante corpusculaire qui prévaut. On peut aisément calculer que la longueur d'onde de la composante ondulatoire serait de  $6,6 \times 10^{-33}$  m.

### D13 EFFET TUNNEL ET RADIOACTIVITE ALPHA

Nous avons vu qu'une particule pouvait être manifeste comme une onde. En optique ondulatoire, quand une onde rencontre un dioptré, une partie de l'onde est transmise à travers le dioptré, l'autre partie est réfléchi. Cette particularité se retrouve dans le comportement d'une particule vu par la physique quantique.

Considérons par exemple un électron qui se heurte à un potentiel positif. En mécanique classique, il ne franchit la barrière que si son énergie est supérieure au potentiel de la barrière.

En mécanique quantique, si son comportement se trouve en mode ondulatoire, il y a une probabilité qu'il passe la barrière même avec une énergie normalement insuffisante,

C'est l'effet tunnel,

Le physicien russe Geoge Gamow a montré en 1928 que la radioactivité alpha n'était autre que la sortie par effet tunnel d'une particule alpha d'un noyau lourd, La frontière du noyau constituant un barrière de potentiel que la particule alpha franchit avec une probabilité dépendant du type de noyau. Plus la probabilité est faible, plus la demi-vie du noyau est longue.

### D15 LA SUPERPOSITION D' ETATS

La superposition d'états qui est en fait à l'origine de la plupart des apparentes incongruités de la physique quantique, dit par exemple qu'un électron peut se trouver à plusieurs endroits à la fois, que sa vitesse peut être de 1000km/s et en même temps 2000km/s, et bien d'autres fantaisies de ce genre...

C'est en fait ce qui se passe dans l'expérience des double fentes de Young; la vérité est que la particule (quelle que soit sa nature) prend en même temps tous les chemins possibles)

Curieusement cet indéterminisme disparaît dès que l'on fait une mesure, c'est à dire qu'une fois observé, l'objet reprend un comportement classique.

Le chat de Schrödinger      Explication:

La désintégration d'un atome radioactif n'est prévisible qu'au sens statistique; On ne sait jamais si un atome radioactif va se désintégrer dans 5 mn ou dans 5000 ans. Ce que l'on appelle la mi-vie d'une substance radioactive, n'est que probabilité. Sauf qu'au niveau quantique toutes les ondes de probabilité sont toutes présentes en même temps.

Il est donc impossible de dire: la désintégration s'est produite OU la désintégration ne s'est pas produite. la seule façon de définir l'état en question est de dire qu'il est « superposé ». Du coup, puisque le chat est causalement lié à la source radioactive, ce chat n'est ni

mort ni vivant mais mort+vivant. Et la situation ne prend un sens physique classique que lorsqu'on ouvre la boîte

## D17 ÉQUATION LA SUPERPOSITION D'ÉTATS

Métaphore personnelle

Imaginons un boîte opaque dans laquelle un dé à jouer 6 faces ultra léger en polystyrène flotte et tourne librement dans tous les sens sous l'action d'un jet d'air qui le maintient en apesanteur. Imaginons que la boîte possède un obturateur devant lequel se trouve un appareil photo prêt à se déclencher.

Cet obturateur ne s'ouvre que sous 2 conditions : 1) Une face complète du dé se trouve devant l'obturateur ET 2) le déclencheur de l'appareil photo a reçu un top d'ouverture.

Si la deuxième condition n'est pas remplie, on n'a aucune idée de la face du dé qui pourrait éventuellement se trouver en face de l'obturateur. On ne peut parler que de l'ensemble des 6 faces. La physique quantique parlerait d'une amplitude de probabilité.

Si la deuxième condition est remplie, l'appareil photo va prendre une photo d'une face et d'une seule que l'on connaîtra en regardant la photo. La physique quantique dirait qu'il y a eu réduction du paquet d'ondes

Finalement le monde subatomique se comporte un peu comme la destinée humaine; car celle-ci dépend tout au long de la vie d'une succession de circonstances forcées ou choisies à chaque fois parmi un grand nombre de possibilités

Richard Feynman disait que sa méthode de calcul ne consistait en rien d'autre que de faire la somme de toutes les histoires possibles.

## D19 LA CORRELATION QUANTIQUE

Mais il y a pire, l'intrication quantique et sa conséquence la corrélation quantique que je ne vais pas vous décrire ici pour ne pas vous assommer ;. mais dont l'explication simplifiée se trouve dans mon mémoire pour ceux que ça intéresse,

Je vais me contenter de vous raconter son histoire

L'histoire commence en 1927 lorsque deux bandes rivales avec à leurs têtes Albert Einstein et Niels Bohr, s'affrontent dans un débat d'idées qui va durer jusqu'à la mort d' Einstein.

Cette histoire est connue sous le nom de paradoxe EPR ;

E pour Albert Einstein, P pour Boris Podolsky, R pour Nathan Rosen.

La bande de Bohr est appelée aussi École de Copenhague

Le début du conflit a lieu pendant le congrès de Solvay de 1927 à l'hôtel métropole à Bruxelles,

Les théories de l'école de Copenhague pour qui tout n'est que probabilité répondant aux équations d'ondes de Schrödinger et au principe d'incertitude d' Heisenberg, ne convainquent pas Einstein qui dit que ces théories sont incomplètes. Il ne veut pas en particulier entendre parler de la corrélation quantique issue de l'intrication de plusieurs particules.

Pour lui il existe forcément ce qu'il appelle des variables cachées qui font que ces corrélations n'ont rien d'extraordinaire,

De plus, même s'ils sont séparés par de grandes distances, les deux objets ne sont pas indépendants et il faut les considérer comme un système unique. Le fait d'agir sur l'un provoque instantanément la même action sur l'autre, même si nos deux objets sont séparés par des années-lumière. Violant ainsi la loi relativiste qui dit que rien ne peut aller plus vite que la lumière.

Cette réalité stupéfiante va alimenter les débats de la communauté scientifique, jusqu'à ce que 30 ans après, un physicien nord irlandais du nom de John Stewart Bell met au point un modèle théorique appelé « les inégalités de Bell » dont [la diapo n°17](#) donne le principe et qui est destiné à démontrer le bien fondé de la critique du groupe EPR.

Mais les moyens techniques de l'époque ne permettent pas de réaliser l'expérience avec la rigueur nécessaire. D'ailleurs celle-ci ne sera mise au point qu'en 1972 avec nombre de débâcles : Une fois les inégalités de Bell étaient démontrées une fois on démontrait le contraire.

Il faudra attendre 1982 où une équipe française dirigée par Alain Aspect démontre par une expérience remarquable que les variables cachées du groupe EPR ne sont pas nécessaires et qu'ainsi Einstein avait tort.

[D 18 \(lire la diapo\)](#)

[D19 \(lire la diapo\)](#)