Radio, ondes, électrons, et physique quantique

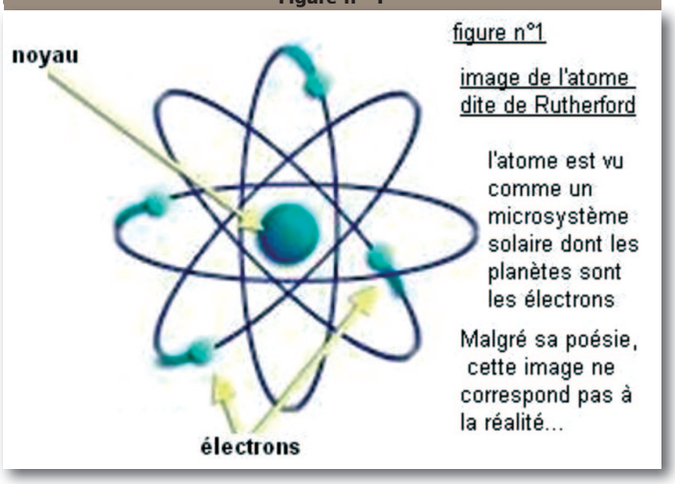
Jean-Pierre Bourdier, **F6FQX**

Au collège et au radio-club, le monde microscopique nous a été expliqué en deux images :

• les ondes, « choses immatérielles » s'étalant progressivement dans tout l'espace (image due à Hertz en 1890), produites par les électrons, « mini-boules de billard » bien localisées, comme des cailloux jetés dans l'eau et provoquant des vagues qui s'étalent sur toute la mare

• les atomes, systèmes solaires en miniature : un noyau-soleil au centre, des électrons-planètes tournant autour, du vide entre ces particules (image due à Rutherford en 1911).

Figure n° 1



Ces images sont simples et pratiques car elles évoquent des phénomènes macroscopiques auxquels nos sens sont habitués, phénomènes obéissant aux lois de la physique classique (celle de Galilée et de Newton). Mais le monde microscopique obéit à une autre physique, dite quantique ; née dans le premier tiers du 20ème siècle, non encore achevée aujourd'hui, elle seule est capable d'expliquer le fonctionnement de bien des objets devenus courants : semi-conducteurs, ordinateurs, CD et DVD, lasers, IRM, etc. Le but de cet article est d'expliquer, sans aucune formule mathématique, quelques principes de la physique quantique, en se concentrant sur électrons et ondes radio, les deux «objets quantiques préférés» des OM (pour une approche plus « maths », cf. bibli n°1).

1 / Les origines : des phénomènes observés que la physique classique n'expliquait pas :

• l'analogie avec la relativité

Une théorie scientifique est valable tant qu'elle peut expliquer des phénomènes observés et, quand ce n'est plus le cas, il faut en trouver une autre. C'est ce qui se passa vers 1900 quand on constata que la lumière, onde électromagnétique parmi d'autres, allait à la même vitesse quel que soit le référentiel : la mécanique de Galilée et de Newton ne permettait pas d'expliquer ça ; la théorie de la relativité devait prendre la relève (cf. bibli. n°6).

Un processus comparable allait se produire, un tout petit peu plus tard, avec la physique quantique : la plupart des phénomènes microscopiques étaient inexplicables avec les lois connues, y compris celles de Maxwell ou, plus surprenant, même avec celles de la relativité.

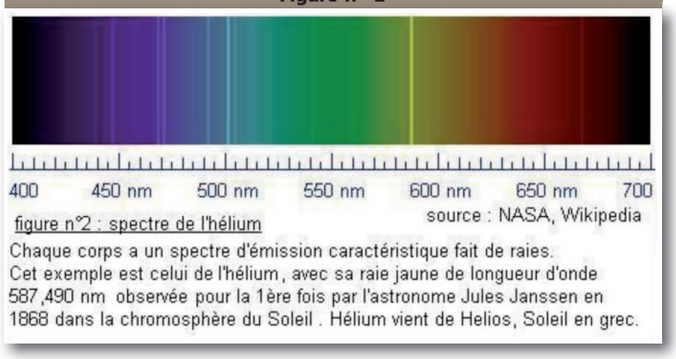
• le phénomène dit du corps noir

Les forgerons savent qu'en augmentant la température d'un morceau de métal, il passe du noir au rouge foncé, au rouge clair, au blanc bleuté : la couleur dépend de la température et non de la chaleur apportée, ce que la thermodynamique classique ne pouvait expliquer.

• les raies spectrales (le « code barres » des corps simples)

Les soudeurs savent que la flamme du chalumeau a une couleur différente suivant qu'on y brûle du méthane, de l'acétylène, de l'hydrogène, etc. L'analyse spectrale révèle ainsi une sorte de code barres caractéristique du corps considéré, ce que la thermodynamique classique ne pouvait pas expliquer non plus (cf. figure n°2).

Figure n° 2



• l'effet photoélectrique

En éclairant certaines structures métalliques, on produit un courant électrique, dont l'intensité dépend non de l'énergie de la lumière, mais de sa couleur ; là encore, un fait inexplicable par les lois classiques.

• la stabilité des atomes

Enfin, alors qu'au début du 20ème siècle, la structure atomique de la matière, proposée par Leucippe dès –400 a.J.C., était finalement admise, l'image de systèmes solaires en miniature avec des électrons tournant autour d'un noyau (cf. figure n°1) séduisait, mais n'expliquait pas la stabilité avérée de la matière : une charge électrique tournante rayonnerait (donc perdrait) de l'énergie, et finirait par tomber sur le noyau en une fraction de seconde.

2/ Dans le monde microscopique, presque tout est discontinu :

• le quantum d'électricité (électron)

Joseph John Thomson (Nobel 1906), lors d'expériences sur les rayons cathodiques, découvre en 1897 que l'électricité est formée de corpuscules, qu'on appellera plus tard électrons.

Cette découverte clôt un vieux débat sur la nature continue (comme une onde par exemple) ou discontinue de l'électricité. Chaque électron transporte une quantité élémentaire, ou quantum, de charge électrique (en latin, quantum signifie quantité et a pour pluriel quanta),

• le quantum d'énergie et le quantum de rayonnement électromagnétique (photon)

Max Planck (Nobel 1918) explique en 1900 le rayonnement du corps noir par le fait que ses échanges d'énergie avec l'environnement ne sont pas continus mais sous forme de quanta ; il ne va toutefois pas jusqu'à quantifier le rayonnement lui-même, ce que fera Einstein (Nobel 1921) qui, en découvrant l'aspect corpusculaire de la lumière (et du rayonnement électromagnétique en général), expliquera non seulement le rayonnement du corps noir mais aussi l'effet photoélectrique.

Ce quantum de lumière sera appelé photon à partir de 1926.

• dans l'atome, tout ou presque est affaire de quanta

Encore de nos jours, dans des publications grand public, on voit l'atome dépeint comme une sorte de système solaire avec un noyau pour étoile et des électrons pour planètes, la force de Coulomb tenant lieu de gravitation (cf. figure n°1). Cette vision était celle que Rutherford (Nobel 1908) proposa en 1911. Les travaux de Bohr (Nobel 1922), en particulier, ont invalidé cette vision en montrant que les électrons sont disposés à des distances du noyau qui ne peuvent prendre que des valeurs bien précises, correspondant à des niveaux eux-mêmes précis d'énergie. Le passage d'un électron d'un niveau à un autre se fait en absorbant ou en émettant un photon dont l'énergie, et donc la fréquence, est précise : les raies du spectre d'un corps, véritable code barres, trouvaient ainsi leur explication. En 1925, Pauli (Nobel 1945) découvrira le principe d'exclusion qui a pour effet de fixer le nombre maximum d'électrons par niveau (2 pour le premier, 8 pour le second, etc.). On parle désormais d'orbitale plutôt que d'orbite de l'électron, pour désigner sa position la plus probable, à niveau d'énergie donné (l'idée qu'un électron tourne sur une orbite autour du noyau n'ayant finalement pas de sens).

3/ Les êtres microscopiques ne sont pas ceux qu'on croit qu'ils sont :

• ni onde ni particule, plutôt les deux à la fois, mais jamais en même temps

Dans le monde macroscopique, « un corpuscule » et une « onde » sont deux « choses » de nature très différente : c'est un peu comme « l'archer du violon » et « la musique du violon » (cf. figure n°3), l'archer est un objet matériel situé à tout instant en un endroit précis de l'espace, la musique est immatérielle et se répand dans tout l'espace en étant capable de diffraction et d'interférences avec d'autres sons (ce qui fait la beauté de la musique).

Dans le monde microscopique, les deux concepts se confondent : une onde est aussi une particule, comme l'a montré Einstein (onde électromagnétique et photon sont deux aspects d'une même chose) et, plus étrange encore, une particule est aussi une onde comme l'a montré Louis de Broglie (Nobel 1929) en découvrant la nature ondulatoire de l'électron. Cette dualité onde-particule a un côté d'autant plus insolite qu'il est impossible de l'observer simultanément : lors d'une expérience donnée, on constatera que le même « objet observé » est une onde ou un corpuscule, mais jamais les deux simultanément.

Figure n° 3

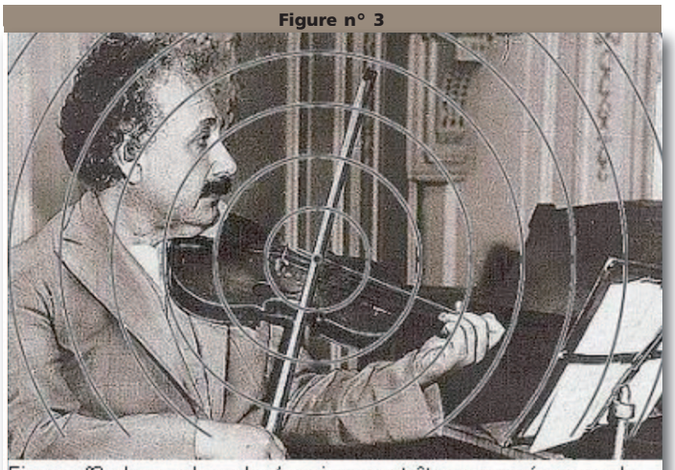


Figure n°3 : le couple archer/musique peut être comparé au couple électron/onde. En physique classique, archer et électron sont des objets matériels localisés dans l'espace, musique et onde sont immatérielles et remplissent peu à peu tout l'espace. Or, le couple électron/onde ne relève pas de la physique classique mais de la quantique, selon laquelle toute onde est particule et réciproquement.

Des auteurs d'ouvrages de vulgarisation (cf. bibli. n°5) comparent cela à la capture d'animaux au bord d'un étang dans le brouillard : ceux qui chassent capturent des oiseaux, ceux qui pêchent capturent des poissons, bien que tous attrapent en fait les mêmes animaux, dont la vraie nature leur est invisible tant qu'ils ne les ont pas capturés…

Certains physiciens « quantistes » sont allés jusqu'à dire qu'un phénomène n'existait que quand il était observé ; n'admettant pas ce point de vue, Einstein aurait un jour dit à Bohr «j'aime à penser que la Lune est là, même quand je ne la regarde pas », et Bohr aurait répondu « si vous ne la regardez pas, comment pouvez-vous affirmer qu'elle est là ? »

• le monde microscopique est certes observable, mais « avec indétermination » :

Heisenberg (Nobel 1932) a exprimé cela en 1927 par des inégalités, dont la plus célèbre est celle qui relie la position d'une particule et sa vitesse : plus sa position est connue précisément, moins sa vitesse l'est, et réciproquement ; et cela ne résulte pas de la précision des mesures, mais du caractère dual (onde et particule) de l'objet quantique. Schrödinger et Dirac (prix Nobel conjoint 1933) formalisèrent mathématiquement ce comportement : un objet quantique est analysable par une « fonction d'onde » (cf. bibli. n°1) qui représente, entre autres, la probabilité de trouver l'objet à un endroit plutôt qu'à un autre. Aucune image ne correspond à cela dans le monde macroscopique, puisque la probabilité est alors de 100% là où est l'objet et de 0% ailleurs… ; c'est pourtant vérifié dans le monde microscopique tous les jours, par exemple dans les diodes tunnel ou dans la fusion nucléaire de l'hélium solaire.

• le monde microscopique est celui de la superposition d'états quantiques :

Dans le monde macroscopique un objet ne peut être simultanément dans deux états différents, mais dans le monde quantique si ! Le choix entre ces états est fait de façon aléatoire par la nature, ce que n'admettait pas Einstein, déterministe convaincu, qui disait à ce propos « Dieu ne joue pas aux dés ! » ;

Une illustration de cette bizarrerie est le chat de Schrödinger (cf. figure n°4) : un chat est mis dans une boîte avec un gaz létal qui se libère si une désintégration a lieu ; or, on sait qu'au bout d'un temps donné, cette désintégration a 50% de chances d'avoir eu lieu ; dans quel état est alors le chat, mort ou vivant ? La physique quantique répond : il est les deux à la fois, vivant à 50%, mort à 50% ; **ce n'est que quand on observe le chat (en ouvrant la boîte), qu'il est soit mort soit vivant… Auparavant, il est les deux à la fois.**

Figure n° 4

figure n°4 : Schrödinger a imaginé une expérience (fictive!) dans laquelle un chat mis dans une boîte a, au bout d'un temps donné, 50% de chances d'être vivant et autant d'être mort . Si le chat était un objet microscopique, la physique quantique dit que le chat est à la fois mort et vivant tant qu'on n'ouvre pas la boîte…

Einstein a passé les 20 dernières années de sa vie à combattre ce point de vue et à affronter son vieil ami Bohr, considérant que cela signifiait que certaines variables restaient à découvrir et donc que la physique quantique était inachevée… Une des conséquences de ce principe de superposition d'états quantiques est ce qu'on appelle l'intrication, qui fait que deux

particules générées avec une forte relation (par exemple deux photons à polarisations corrélées) restent interdépendantes, même si elles sont très loin l'une de l'autre : les deux particules forment en fait un « même ensemble quantique », et toute mesure sur l'une renseigne aussi sur l'autre. Le débat sur ce point entre les deux titans de la physique que furent Einstein et Bohr, ne fut finalement tranché qu'en 1983, par une expérience d'Alain Aspect (médaille d'or 2005 du CNRS, prix Wolf 2010, médaille Albert Einstein 2012, probablement futur Nobel). L'intrication était avérée : Bohr avait raison et Einstein avait tort !

• il y a consensus sur l'efficacité de la physique quantique, mais pas sur son interprétation :

La physique quantique a prouvé son efficacité d'un point de vue théorique (elle a permis de décrire non seulement l'électromagnétisme, c'est-à-dire en particulier le comportement des électrons et des photons, mais aussi celui des particules issues du noyau de l'atome (protons, neutrons, gluons, quarks, neutrinos, etc.), voire de molécules entières. D'un point de vue plus « grand public », elle l'a prouvée par les nombreuses applications qui font partie aujourd'hui de notre quotidien d'habitants des pays développés : transistors, ordinateurs, lasers, DVD, téléphones portables, etc.

En revanche, l'interprétation de la mécanique quantique, elle, n'est pas consensuelle :

• d'abord parce qu'elle traite de « choses » n'appartenant pas au monde sensible et que nous ne pouvons connaître « ces choses » que par leurs effets sur d'autres choses (médiateurs macroscopiques d'objets microscopiques) qui sont, elles, accessibles à nos sens : par exemple, les fameuses chambres à fils de Charpak (Nobel 1992) perfectionnant les chambres à bulles de Glaser (Nobel 1960), qui détectent les particules en provoquant condensation ou ionisation d'autres molécules sur leur passage, révélant ainsi ce passage : c'est l'avion à réaction à très haute altitude, donc hors de portée visuelle, mais qu'on « connaît » par la trace de condensation qu'il laisse derrière lui dans la haute atmosphère (cf. figure n°5).

Figure n° 5

figure n°5 : les particules comme les électrons sont trop petites pour être vues directement, même au microscope ; en revanche, leur trajectoire peut être visualisée dans une chambre à bulles par un phénomène de condensation rappelant celui de la trace d'un avion dans la haute atmosphère, qui permet de suivre l'avion sans pouvoir le voir directement.

Or ces médiateurs sont nécessairement interprétés par chaque observateur suivant son imagination : Richard Feynman (Nobel 1965), l'immense expert en électrodynamique quantique relativiste, aurait dit à ses étudiants « ne me demandez pas à quoi ressemblent les champs et tous ces êtres quantiques en général, car c'est comme les anges : chacun les voit à sa façon, et peu importe que les façons soient différentes, si nous savons à quoi ils servent ! ». La seule description consensuelle entre savants est une description mathématique d'un très haut niveau d'abstraction, ce qui ne fait qu'obscurcir la vision que les non-mathématiciens peuvent avoir (de toute façon, assimiler les êtres quantiques à leurs expressions mathématiques, comme on le voit parfois dans certains journaux de vulgarisation, équivaut à assimiler un abonné du téléphone au numéro de sa ligne…).

• ensuite et surtout parce qu'encore aujourd'hui, les physiciens spécialistes eux-mêmes interprètent différemment les phénomènes quantiques ; pour ne citer que deux points de vue extrêmes :

- il y a le point de vue des minimalistes pour qui la physique quantique n'est après tout qu'une manière très évoluée de parler de probabilités ; pour eux, dire que « le chat de Schrödinger est dans deux états quantiques superposés, mort et vivant à 50% chacun » signifie que sur 100 chats soumis (horreur !) à la fameuse expérience, 50 vivront et 50 mourront, la question du sort du chat n°32 étant sans signification.

- il y a le point de vue des « tenants des univers multiples » pour qui notre univers ne cesse de se démultiplier à chaque choix quantique : le chat de Schrödinger, à l'issue de l'expérience, vit dans deux univers parallèles, mort dans l'un, vivant dans l'autre ; une plaisanterie de potache à propos de cette thèse est la suivante : « deux physiciens sont dans un jet qui a subitement une panne grave et va s'écraser ; l'un deux dit à l'autre « crois-tu que nous allons nous en sortir ? » et l'autre répond « ne t'inquiète pas, nous sommes déjà dans d'autres univers où nous n'avons même pas pris l'avion ! »

4/ Quelques applications actuelles et prochaines de la physique quantique :

• **L'effet transistor**, découvert en 1948 et développé par Shockley (Nobel 1956) ; les vieux OM comme moi se souviennent avec nostalgie des années 50 où les appareils de radio étaient tous à lampes, et ne contenaient, tout au plus, que quelques dizaines de tubes, alors qu'aujourd'hui nos transceivers contiennent des milliers de transistors sous forme de circuits intégrés, avec un volume et un poids totaux bien moindres. A quoi ressembleraient votre Smartphone ou votre ordinateur portable avec des tubes à la place des transistors ?

• **Le laser** , (cf. figure n°7), découvert par Charles Townes (Nobel 1964), sans cesse perfectionné, au point que ses progrès successifs ont donné lieu à 9 autres prix Nobel dont le dernier en 2009. Aujourd'hui le laser est devenu très banal (beaucoup d'utilisateurs ignorent que c'est avec ça qu'on lit et grave DVD et CD, ou qu'on lit les codes-barres ; un porte-clés avec laser (pour conférencier) vaut moins de 5 €. Le laser est aussi devenu un puissant instrument de microchirurgie (oculaire en particulier) et de médecine légale (microdissection permettant d'isoler une seule cellule parmi beaucoup d'autres et d'en extraire l'ADN)

Figure n° 6

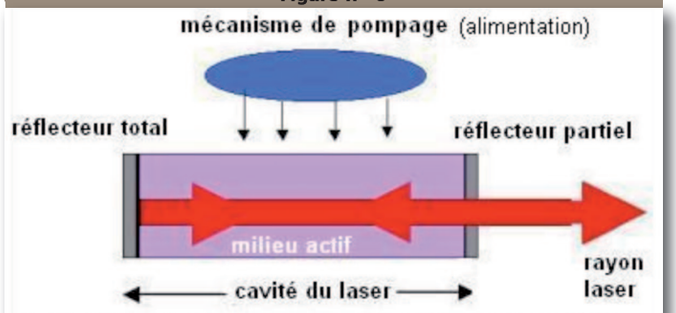


figure n°7 : le principe du laser rappelle celui, connu des OM, d'un étage oscillateur : on rentre de l'énergie "en vrac", on sort de l'énergie "calibrée", entre les deux une cavité résonante où des atomes sont excités et désexcités "en cadence"

• **L'IRM** (imagerie par résonance magnétique), technique d'imagerie médicale permettant d'obtenir des vues 2D ou 3D de l'intérieur du corps, reposant sur le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN) et utilisant les propriétés quantiques des noyaux atomiques. Invention qui valut en 2003 à Paul Lauterbur et Peter Mansfield le Prix Nobel de médecine.

• **Les atomes ultra-froids**, application récente, due à Claude Cohen-Tannoudji (Nobel 1997) qui a permis l'obtention de **tem-**

pératures de l'ordre du millionième de degré Kelvin. Cette technique met en jeu la condensation dite de Bose-Einstein, et permet un contrôle hyperfin des processus physiques (supraconductivité, horloges atomiques variant d'une seconde en 300 millions d'années…, etc.)

• **La cryptographie quantique et l'informatique quantique**, applications qui en sont à leurs balbutiements, mais que certains spécialistes prédisent pour la prochaine décennie et qui feront de leurs homologues actuelles des antiquités, tant leurs puissances seront supérieures.

La physique quantique est une science encore très jeune, quand on songe au temps que les théories antérieures ont nécessité avant d'être industriellement mises en œuvre. Et, depuis sa naissance, elle a été investie par les plus grands physiciens de notre époque (comptez le nombre de prix Nobel cités dans cet article…). Il y a donc fort à parier que ses apports à l'humanité, pourtant déjà immenses dans bien des domaines (santé, savoir, information, énergie, etc.), n'en sont qu'à leur tout-début. Les techniques de communication en particulier ont toutes les chances d'être très directement concernées et de se voir bouleversées : une excellente raison pour le monde OM de s'intéresser au sujet !

Bibliographie :

1 - La physique quantique sans aspirine, J.P. MacEvoy, Oscar Zarate, Editions Flammarion, 2002.
2 - La physique quantique, John Gribbin, Editions Pearson Education Science, 2003.
3 - Alice au pays des quanta, Robert Gilmore, Editions Le Pommier, 2006.
4 - Le monde quantique, Michel Le Bellac, EDP Sciences (préface d'Alain Aspect) , 2010.
5 - Métaphysique quantique, Sven Ortoli, Editions La Découverte, 2011.
6 - quelques-uns de mes articles traitant de sujets en rapport sur mon site :
<http://f6fqx.chez-alice.fr/>