

Des faits !

Le principe d'Indétermination de Heisenberg

• Introduction historique

La 1^{re} révolution quantique (1900 à 1927) s'est déroulée en plusieurs étapes (cf. [1] §VIII). Pour caractériser théoriquement l'énergie "E" émise par un objet incandescent, Planck postule (1900) que les échanges entre la matière et une lumière de fréquence "f" ne peuvent se faire que de façon discontinue, par *quantum* d'énergie: $\Delta E = h \cdot f$ où *h* est une constante. Einstein impose (1905) de quantifier le rayonnement électromagnétique lui-même (composé de PHOTONS) et explique ainsi l'effet photoélectrique (cf. complément 4a).

Puisque la lumière présente des caractéristiques corpusculaires, De Broglie propose (1924) symétriquement de doter la matière de propriétés ondulatoires, en attachant à toute particule de quantité de mouvement *p* ($= m \cdot v$), une longueur d'onde: $\lambda = h/p$. Il fonde ainsi la quantification des orbitales, introduite par Bohr (1913) pour justifier son modèle atomique.

• L'étrangeté quantique: le QUANTON (notion développée via le poster n° 3)



En physique quantique on considère comme "objet" non plus la particule ou l'onde, mais une entité "mixte" aux propriétés tout à la fois **contradictoires** et **complémentaires**, qui se manifeste expérimentalement tantôt comme une **corpuscule**, tantôt comme une **onde**: le QUANTON (cf. [2] §7; [7] §1.4). L'onde associée Ψ est solution de l'équation de Schrödinger (1926) et décrit une probabilité de présence (espace) ou d'avènement (temps).

Notre

existence

• Le principe d'indétermination de Heisenberg

Une des conséquences de la relation de De Broglie, que l'on peut réécrire " $p \cdot \lambda \equiv p \cdot x = h$ ", est qu'il est impossible de distinguer un objet avec plus de précision que la longueur d'onde du rayonnement employé pour le localiser (via un microscope). En effet, quand un photon rencontre un quanton, il y aura obligatoirement un transfert d'impulsion "p" d'autant plus grand que "λ" est petit. Par conséquent, si on diminue "λ", et donc l'incertitude spatiale "Δx", on augmente l'incertitude impulsienne "Δp" tel que:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \text{constante non nulle qui vaut } h/4\pi \text{ selon Heisenberg.}$$

Un raisonnement similaire s'applique au couple "énergie & durée" ($E/f \equiv E \cdot t = h$), et peut être généralisé à tout couple d'observables conjuguées (cf. thm de Noether, [3] p. 222). Ce principe fondamental (cf. [4] §5; [5] §2) s'exprime au travers de nombreuses inégalités:

$\Delta p \cdot \Delta x \geq h/4\pi$ où $p \equiv mv$ est la quantité de mouvement et x est la position d'un quanton. Cette inégalité signifie, par exemple: un quanton au repos ($\Delta p = 0$) se trouve n'importe où ($\Delta x \sim \infty$); l'avenir d'un quanton précisément localisé en un temps donné ($\Delta x = 0$) est non prévisible ($\Delta p \sim \infty$); etc ...

$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ où E est l'énergie et Δt est la durée d'un phénomène. Cette inégalité signifie, par exemple: une interaction d'énergie précise ($\Delta E = 0$) se déroule n'importe quand ($\Delta t \sim \infty$); l'énergie d'un quanton à un instant précis ($\Delta t = 0$) est non prévisible ($\Delta E \sim \infty$); l'existence de *particules virtuelles* permettant de quantifier les interactions (cf. complément 2b); etc ...

Le principe d'indétermination synthétise l'essence même de la vision quantique (cf. [6] §1.5-8; [7] §1.12-13). Tout d'abord, il exprime de manière condensée l'étrangeté quantique. Ensuite, il conduit naturellement à la propriété fondamentale de *non-commutativité*. Enfin, il permet d'établir l'équation de Schrödinger (cf. [2] §7) qui définit l'évolution spatiale et temporelle de l'onde Ψ d'un quanton ou d'une *superposition d'état* (cf. poster n°4).

Emergence d'un paradigme qui « réenchante » le monde.

Leur interprétation ?

Depuis l'acte fondateur de la physique quantique, le fameux 5^e Conseil de Solvay (24-29 oct. 1927 à Bruxelles), et sur la base des faits avérés résumés dans la conclusion ci-dessous, de très nombreuses interprétations ont été émises (cf. [0] §5; [5] §4; [6] §1.13; [7] §1.14).

• Interprétation "orthodoxe" de l'Ecole de Copenhague (1927)

Cette interprétation consiste à s'en tenir aux faits, sans se préoccuper de leur implication: « Il est faux de penser que la but de la physique est de trouver comment est faite la nature. La physique est seulement concernée parce que l'on peut dire sur elle (Bohr, 1927) ». L'onde Ψ est une *amplitude de probabilité*, dont le carré exprime, soit la présence d'un quanton, soit la réalisation d'un événement (Born, 1926). La quintessence du formalisme quantique, étant d'appliquer à tout objet le *principe de superposition*, un état ou une interaction est en fait représenté par un *vecteur d'état* ou de *transition* (cf. [3] §5-6; [8] p. 73).

• Interprétation du "réalisme non physique" de B. d'Espagnat (1979-94)

Pour les insatisfaits du « calcule et tais-toi » qui veulent rester "réalistes", il y a l'interprétation du "réalisme non physique" de B. d'Espagnat. Celui-ci postule que la réalité véritable ne correspond pas à ce que l'on peut voir, mesurer, toucher: la RÉALITÉ est donc VOILÉE. L'analogie de l'arc-en-ciel est éclairante. Vous pourriez tout d'abord croire qu'il s'agit d'un objet solide dont les deux extrémités reposent sur le sol. Puis vous constatez que, lorsque vous bougez, il bouge avec vous. Est-ce à dire que l'arc-en-ciel est une illusion, une création de votre esprit? Non, bien sûr, son existence dépend de la présence de gouttes d'eau dans l'atmosphère et de la réfraction des rayons lumineux. Toutefois des caractéristiques importantes de l'arc-en-ciel, telles que sa position et sa vitesse, dépendent de vous et de votre déplacement. La situation est identique pour les quantons dans la conception du réalisme non physique.

a-t-elle

un SENS?

• Conclusion synthétique des posters "physique"

Résumons les faits incontestés, accumulés en plus de cent ans d'expérimentation et de modélisation, de prévision et de vérification en physique (cf. [0] p. 125):

- **poster n°2: le principe d'indétermination de Heisenberg** nous enseigne qu'une incertitude fondamentale existe dans l'Univers au niveau des quantons. Les notions de trajectoire d'un quanton individuel (p. ex. orbitale d'un électron) ou de planification d'une interaction (p. ex. désintégration radioactive ou émission d'un photon) échappent à toute détermination et sont rétives à toute prédiction.
- **poster n°3: l'étrangeté quantique et la non-discernabilité des quantons** nous montrent que les fondements de la matière ne sont pas des objets matériels.
- **poster n°4: l'existence d'une dimension non locale dans l'Univers** a été démontrée expérimentalement. Ainsi dans certaines conditions, deux quantons doivent être considérés comme une entité unique (*intrication*), quelle que soit la distance les séparant.

Par conséquent, nos concepts traditionnels concernant le temps, l'espace (posters n°1 et 4) les objets, les trajectoires, la causalité (posters n°2 à 4) ne s'appliquent plus au niveau microphysique. Le monde qui nous entoure, celui des phénomènes, ne peut être décrit sans tenir compte de la façon dont nous l'observons (*décohérence*).

• Pour aller plus loin

cf. compléments

- [1] J.-Cl. Boudenot, "Histoire de la Physique et des Physiciens", Ellipses, 2001.
- [2] P. Atkins, "Le doigt de Gallée", Dunod, 2004.
- [3] G. Cohen-Tannoudji & M. Spiro, "La Matière-Espace-Temps", Fayard, 1986.
- [4] G. Gamow & R. Stannard, "Le Nouveau monde de M. Tompkins", Le Pommier, 2002.
- [5] R. Gilmore, "Alice au pays des quanta", Le Pommier, 2006.
- [6] H. Pagels, "L'univers quantique", InterEditions, 1985.
- [7] B. Hoffmann & M. Paty, "L'étrange histoire des quanta", coll. Points Sciences, Ed. Seuil, 1981.
- [8] E. Klein, "Petit voyage dans le monde des quanta", coll. Champs, Ed. Flammarion, 2004.

Groupe de branche de PHYSIQUE du LCC en collaboration avec le prof. Jean Staune

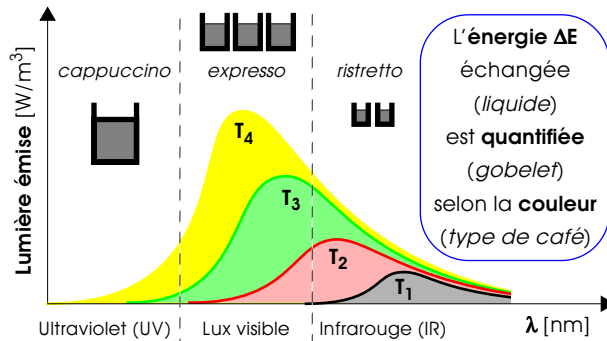
N°2 A suivre...

Complément 2a

L'émission d'un corps incandescent: l'analogie du distributeur de café

Imaginons un distributeur qui possède des quantités limitées d'eau pour le café et de plastique pour leurs gobelets. Supposons que l'on veuille optimiser la distribution, sachant que le rapport eau/plastique est très grand pour un *cappuccino*, moyen pour un *expresso* et très petit pour un *ristretto*. L'optimum consiste à minimiser les extrêmes au profit du milieu.

En 1900, Planck applique un raisonnement analogue pour justifier un modèle théorique (loi du corps noir) qui colle parfaitement aux courbes expérimentales jusqu' alors incompréhensibles. La figure, avec des températures $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$, illustre bien l'expression "chauffé à blanc".



L'interaction lumière - matière s'effectue via des petits paquets (quantum) d'énergie "ΔE" fonction de la couleur. La lumière émise et sa longueur d'onde (λ) correspondent respectivement au nombre et au type de cafés; l'UV (petit λ donc grand ΔE), le visible et l'IR (petit ΔE) correspondent respectivement au grand *cappuccino*, à l'*expresso* et au petit *ristretto*.

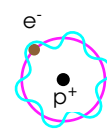
Quantum d'énergie échangé: $\Delta E = h \cdot f = hc / \lambda$

Notons que l'explication plus "sérieuse" de Planck fut longtemps considérée comme un artifice de calcul et non comme une révolution majeure!

Complément 2c

Onde ET corpuscule: le QUANTON - Quelques applications

Le "virus" quantique, après avoir radicalement transformé notre perception de la lumière (cf. complément 2b) s'attaqua à l'autre aile de l'édifice classique: la matière.

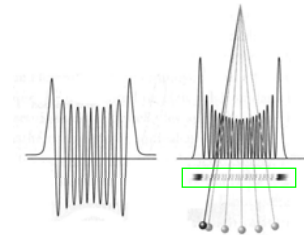


Dans un 1^{er} temps, Bohr (1913) propose de quantifier les orbites électroniques pour sauver son modèle atomique "planétaire": l'électron est accompagné d'une **onde-pilote** qui lui impose des **orbites** séparées (en quantifiant le moment cinétique, $L_n = h \cdot n$ tq $n \in \mathbb{N}^*$). Dans un 2^e temps, De Broglie (1923) étend ce compagnonnage contre-nature à tout système matériel (des électrons, aux planètes).

Corpuscule	-	Onde
énergie	=	h · fréquence
impulsion	=	h / long. d'onde

Le carré de l'amplitude de l'onde de matière (appelée aujourd'hui *vecteur d'état* et solution de l'équation de Schrödinger), exprime la probabilité de trouver le système dans une région donnée. La dualité de la matière rejoint celle de la lumière: les QUANTONS possèdent simultanément des caractéristiques ondulatoires et corpusculaires, mais aucun instrument ou expérience ne peut "matérialiser" les aspects d'onde et de particule simultanément (principe de complémentarité de Bohr, 1925).

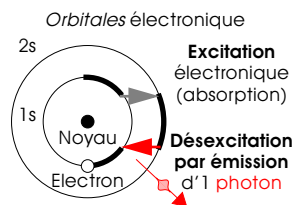
Un *vecteur d'état* typique est celui d'un pendule qui oscille avec une faible énergie (cf. [2] p. 252). Le carré (à droite) de la fonction d'onde (à gauche) donne la probabilité (barre grisée) de trouver le pendule. Le pendule se déplace de manière saccadée correspondant à des "sauts énergétiques" quasi indétectables ($\sim 10^{-34}$ J). L'amplitude est maximale aux extrémités de la trajectoire, ce qui s'accorde avec le comportement familier.



Complément 2b

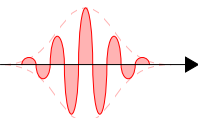
Le rayonnement électromagnétique quantifié: le PHOTON

Le rayonnement du "corps noir" (cf. complément 2a) et l'effet photoélectrique (cf. complément 4a) s'expliquent aisément dès que l'interaction entre la lumière et la matière est comprise comme l'interaction d'un quantum d'énergie (baptisé "photon" par Lewis, 1916) avec un électron (découvert par J. J. Thomson, 1899). Les mécanismes de base sont l'émission ou l'absorption d'un photon par dés/excitation d'un électron atomique "sautant" d'une orbitale à une autre.



Aujourd'hui, on utilise par exemple l'effet photoélectrique pour déclencher l'ouverture de portes (cellule) ou pour améliorer la sensibilité de caméras vidéos (photomultiplicateur).

L'hypothèse d'Einstein, réconciliant les 2 natures de la lumière (ondulatoire et corpusculaire) apparemment irréductibles, mais par essence complémentaires (principe de Bohr, 1925), mit 20 ans pour être acceptée (effet Compton, 1923). Cette réconciliation porte en elle-même un virus qui a contaminé toute la physique "classique", a pénétré au coeur même de la matière et a dissout le concept de particule (cf. complément 2c).



D'un point de vue moderne (théorie quantique des champs), le photon est la 1^{re} "particule messagère" identifiée, porteuse de l'interaction électromagnétique entre les particules électriquement chargées: le proton hydrogène "maintient" son électron en échangeant des *photons dits virtuels* (quanton initialement sans énergie, qui peut exister en "empruntant" au "vide" l'énergie dont il a besoin, mais pendant une durée très brève compatible avec la relation d'Heisenberg $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$, la loi de la conservation d'énergie n'est donc pas réellement violée). Le photon n'a pas de masse (\Rightarrow portée de l'interaction infinie), mais possède un spin entier (\Rightarrow boson).

Complément 2d

Le bazar de la réalité: interprétation...

Cf. [0]§5; [5]§4; [6]§1.13; [7]§1.14

... de "Copenhague"

\rightarrow Bohr, Heisenberg, ... (1927)

« Tais-toi et ... calcule! »

La PQ est efficace. Elle porte non pas sur la réalité, mais sur la connaissance que nous en avons. Le reste est donc vain.

\leftarrow idéalisme kantien

≠ ...

... de "l'arc-en-ciel"

\rightarrow B. d'Espagnat (1979-94)

« On fait ceci, on observe cela »

La réalité est et restera voilée, car elle échappe à l'espace-temps. Le monde "classique" n'est qu'une approximation du réel que la PQ décrit au mieux.

\leftarrow objectivité "faible" & réalisme non physique (platonicien)

≠ RAS

... à inversion temporelle

\rightarrow O. Costa de Beauregard

« L'info remonte le temps! »

Les équations en PQ sont temporellement réversibles. Il n'y a pas de flèche du temps.

≠ paradoxes temporels !!!

FAITS quantiques:

"doubles fentes"
"chat de Schrödinger"
test EPR - effet "tunnel"
"décohérence" - ...

...des Univers parallèles

\rightarrow H. Everett (1957)

« Duplications infinies! »

A chaque mesure ou choix, tout l'Univers se duplique pour permettre à tous les résultats possibles d'exister simultanément.

≠ science-fiction (non réfutable) !

...du potentiel quantique

\rightarrow de Broglie, D. Bohm (1952-59)

« L'onde de guidage! »

Un "champ" sans énergie (i.e. indétectable) et non local, guide instantanément les particules.

\leftarrow objectivité "forte" & matérialisme (var. cachée non locale)

≠ RR (réfèrentiel absolu n'y a pas), particules fantômes, etc... !!!

... à conscience individuelle

\rightarrow E. Wigner (1967)

« La Réalité ultime, c'est notre conscience! »

La "réduction du paquet d'onde" est due à l'action de notre conscience qui façonne le monde.

\leftarrow object. "faible" & dualisme \rightarrow parapsychologie, télépathie !!!

≠ "décohérence" (Zurek 1980) !