

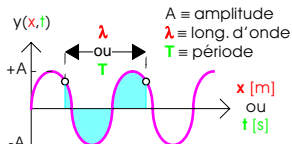
# Des faits !

## La non-discernabilité des quantons de même espèce

### • Débat historique sur la "vraie" nature de la lumière

Au XVII<sup>e</sup> siècle, à partir des **phénomènes optiques élémentaires** deux conclusions apparemment opposées sont tirées: les modèles ondulatoire et corpusculaire (cf. [1] §IV).

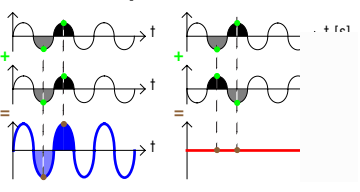
- Huygens choisit l'**hypothèse ondulatoire** héritée d'Aristote (- IV<sup>e</sup>), de Léonard de Vinci et de Galilée, par analogie avec le son: celui-ci est une vibration mécanique dans un fluide ou un solide, sans transport de matière à distance. Pour la lumière, il postule l'existence d'un fluide lumineux baignant toute chose et baptisé "éther". Il serait composé de particules microscopiques, très dense, d'une grande dureté (vitesse élevée) et d'une importante élasticité (faible résistance): deux propriétés contradictoires!



- Newton, plus nuancé, opte pour l'**hypothèse corpusculaire** héritée d'Empédocle (- v<sup>e</sup>) et de Descartes, tout en reconnaissant l'existence d'une périodicité de certains phénomènes lumineux. Cette 1<sup>re</sup> tentative de conciliation entre les deux modèles fut écartée par ses disciples, malgré une difficulté croissante à expliquer la **diffraction** et de nouveaux phénomènes optiques comme la **polarisation** découverte par Malus (1808) ou les **interférences** mises en évidence par Young (1802).

### • L'expérience des deux fentes de Young: "1 + 1 = 0" parfois!

Young constate que la lumière **diffractée** par deux fentes percées dans un écran opaque, produit dans la zone d'intersection, des franges alternativement sombres (lumière + lumière = obscurité !) et brillantes. Il met ainsi en évidence la notion d'**interférence constructive/des-structive** (cf. figure) qui résulte de la **superposition** de deux ondes plus ou moins déphasées. Au XIX<sup>e</sup> l'optique ondulatoire s'implante définitivement, malgré un concept d'éther dont on ne parvient pas à prouver l'existence (cf. poster n°1).

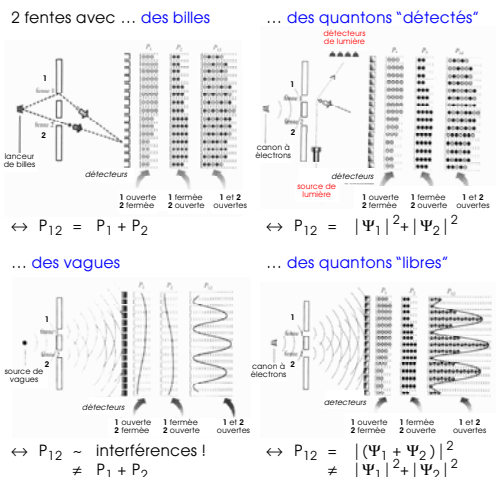


Notre existence

### • L'étrangeté quantique: 1/ la complémentarité

A partir du postulat de De Broglie " $\lambda = h/p$ " (cf. poster 2), on peut attribuer à tout objet matériel ayant une impulsion "p", une **onde de probabilité**  $\Psi$ . Cette seconde nature est vérifiée en montrant que les quantons "de matière" sont dotés de propriétés spécifiquement ondulatoires, telle la **diffraction** ou l'**interférence**. C'est à la suite d'un accident de laboratoire, que Davisson et Germer obtinrent la 1<sup>re</sup> image de diffraction (1925) à l'aide d'électrons traversant un cristal de nickel dont la structure avait été altérée (cf. [2] §1.8). Depuis, l'expérience des deux fentes a été moult fois répétées avec succès (cf. [0] §4; [3] p.26 ss): le record actuel est détenu avec des molécules de 256 atomes (Zeilinger, 2004).

En physique quantique, l'expérience des deux fentes s'exprime en termes d'onde de probabilité. Lorsque cette onde atteint la plaque, une partie passe par la fente 1 ( $\Psi_1$ ) et une partie par la fente 2 ( $\Psi_2$ ), tout comme des vagues! Les deux ondes diffractées qui émergent des fentes, selon le principe de superposition ( $|\Psi_1 + \Psi_2|^2$ ), produisent la figure d'interférences observée sur l'écran. Elle représente la distribution de probabilité de détection des électrons individuels sur l'écran ( $P_{12}$ ). L'**étrangeté quantique** tient à ce que le comportement d'un unique électron est celui d'une onde tant qu'on ne cherche pas à le détecter. Dès l'instant où on l'observe, l'électron se réduit à un corpuscule, perd sa capacité à interférer et la figure correspond à celle obtenue avec des billes ( $|\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$ ). Ainsi, la double nature des quantons (**complémentarité**) et l'interprétation probabiliste des ondes  $\Psi$  conduisent inéluctablement à la fin à la fois du déterminisme et de l'objectivité classique (cf. [4] §1.9).



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

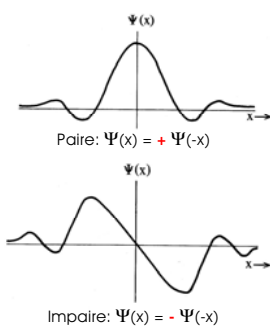
# Leur interprétation ?

### • 5 leçons à tirer de l'expérience des deux fentes

1/ Toute mesure apparaît comme une interaction entre l'objet microscopique mesuré et l'appareil de mesure macroscopique (complément 4b: **décohérence**). 2/ Les propriétés attribuées à un quanton dépendent des caractéristiques du dispositif dans lequel il évolue (poster n°2: analogie de l'arc-en-ciel). 3/ Aucune expérience ne montre un quanton se comportant simultanément comme une onde et comme une corpuscule, mais il est nécessaire d'invoquer ces deux images pour traduire l'ensemble des résultats possibles (**complémentarité**). 4/ Dans l'intervalle séparant deux mesures, il est impossible d'attribuer, même "en pensée", une trajectoire définie au quanton (cf. chaos & fractale). 5/ L'idée "classique" (**déterminisme** de Laplace) selon laquelle les conditions initiales et les forces mises en jeu suffisent à déterminer le futur d'un quanton et même de l'Univers, est réduite à néant.

### • L'étrangeté quantique: 2/ la non-discernabilité

Les quantons possèdent une seconde caractéristique étrange: tels des clones parfaits, ils sont, pour une espèce donnée (électron, photon, ...), rigoureusement identiques et par conséquent, non-discernables (cf. [4] §II.9; [5] §5). **Cela implique** qu'échanger deux quantons ne modifie pas l'état physique, donc la probabilité du **vecteur d'état** exprimée par le carré:  $|\Psi(x)|^2$ . Dans ce cas, l'onde  $\Psi(x)$  elle-même sera donc, soit une fonction symétrique (paire) correspondant à un comportement "**grégaire**" (**statistique de Bose-Einstein**), soit une fonction antisymétrique (impaire) correspondant à un comportement "d'ermite" (**statistique de Fermi-Dirac**).



a-t-elle

## un SENS?

### • 5 leçons à tirer de la non-discernabilité

1/ Même "en pensée", les quantons ne sont pas étiquetables (**non-discernabilité**). 2/ Cette propriété fondamentale, spécifiquement quantique, s'exprime mathématiquement au travers d'une parfaite symétrie des **vecteurs d'état** (complément 2c) lors d'une permutation des quantons, mais à un signe près (symétrie paire ou impaire). 3/ **La différenciation matière - interaction** (complément 3c) réside dans le fait que les quantons "de matière" sont des **fermions** (symétrie impaire) alors que les quantons "d'interaction" sont des **bosons** (symétrie paire). 4/ La symétrie impaire des fermions est à l'origine du **principe d'exclusion** de Pauli (1925) et garantit l'**existence macroscopique de la matière** (tableau de Mendeleïev, 1869). 5/ La symétrie paire des bosons traduit le caractère superposable des interactions et génère de spectaculaires conséquences (étoile à neutron, rayonnement du corps noir, supraconductivité, superfluidité, effet LASER, condensats de Bose-Einstein, etc...).

### • En guise de conclusion provisoire

La physique quantique a provoqué de profondes ruptures avec les concepts classiques. La **complémentarité** peut se traduire par l'analogie du cylindre: un quanton (par nature cylindrique) ne nous apparaît que sous deux projections orthogonales, soit un cercle (onde), soit un rectangle (corpuscule), mais jamais de travers. La **non-discernabilité** assure la cohésion de l'Univers: « c'est de l'identité absolue qu'est née la différenciation ! (Pagels) ».

### • Pour aller plus loin

Cf. compléments

[1] J.-Cl. Boudenot, "Histoire de la Physique et des Physiciens", Ellipses, 2001.  
 [2] B. Hoffmann & M. Paty, "L'étrange histoire des quanta", coll. Points Sciences, Ed. Seuil, 1981.  
 [3] E. Klein, "Petit voyage dans le monde des quanta", coll. Champs, Ed. Flammarion, 2004.  
 [4] H. Pagels, "L'univers quantique", InterEditions, 1985.  
 [5] G. Cohen-Tannoudji & M. Spiro, "La Matière-Espace-Temps", Fayard, 1986.

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

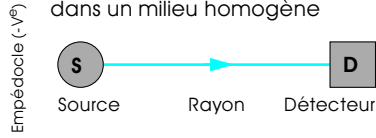
N°3 A suivre...

# Complément 3a

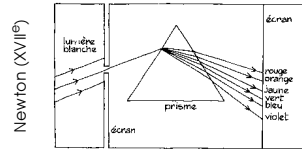
## Nature de la lumière: phénomènes optiques élémentaires

### Phénomènes mettant en évidence l'hypothèse "corpusculaire":

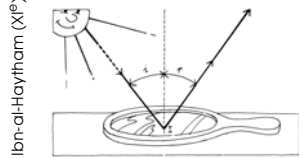
- Propagation **rectiligne** dans un milieu homogène



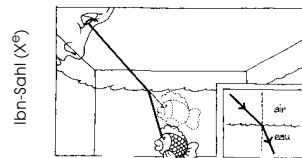
- Dispersion** par un prisme



- Réflexion** sur une surface réfléchissante

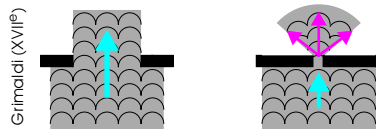


- Réfraction** pour un dioptre air - eau

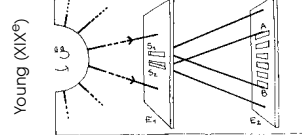


### Phénomènes mettant en évidence l'hypothèse "ondulatoire":

- Diffraction** par 1 trou



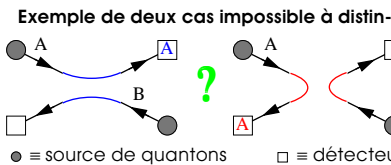
- Interférence** via 2 fentes



# Complément 3b

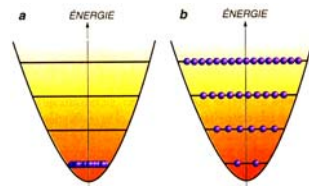
## Psychosociologie des quantons: deux comportements fondamentaux

Supposons qu'à un instant donné une particule "A" occupe la position "r<sub>1</sub>" et une particule "B" (identique à "A") la position "r<sub>2</sub>". Comme en physique quantique, la mesure de la position d'un quanton entraîne immédiatement une incertitude sur sa vitesse (*principe d'indétermination*), il est impossible de "suivre pas à pas" les trajectoires des particules, et par conséquent, de distinguer les deux cas présentés par la figure ci-contre.



Pour exprimer cette limitation intrinsèque, on considère le *vecteur d'état global*  $\Psi(r_1, r_2)$ . En général, l'état physique d'un système reste inchangé, si les quantons sont échangés, puisqu'on ne peut pas les distinguer l'un de l'autre. De même, la probabilité  $P_{12} = |\Psi(r_1, r_2)|^2$  qu'une particule se trouve en  $r_1$  et l'autre en  $r_2$  est invariante quand on échange  $r_1$  et  $r_2$ , donc  $\Psi(r_2, r_1) = \pm \Psi(r_1, r_2)$  où "+" est le cas symétrique et "-" le cas antisymétrique. Dans le cas de particules n'interagissant pas, les deux seules combinaisons qui laissent la fonction  $\Psi$  inchangée sont:  $\Psi(r_1, r_2) = \Psi_A(r_1) \cdot \Psi_B(r_2) \pm \Psi_A(r_2) \cdot \Psi_B(r_1)$ . Ces deux cas sont réalisés dans la nature: le cas symétrique "+" correspond aux *bosons*, quanton de *spin entier* tel le photon. Le cas antisymétrique "-" correspond aux *fermions*, quanton de *spin demi-entier* tel l'électron. Supposons que deux fermions identiques soient dans le même état physique, c'est-à-dire que  $\Psi_A = \Psi_B$ . Alors  $\Psi(r_1, r_2) = 0$ , la probabilité de cet état est nulle. Autrement dit, des fermions identiques ne peuvent pas coexister dans le même état physique: ce comportement "d'ermite" est le *principe d'exclusion de Pauli* (1925). Les bosons, au contraire, apprécient de coexister dans le même état quantique: ce comportement "grégaire", à très basses températures, conduit au *condensat de Bose-Einstein*.

Dans un *gaz de Bose-Einstein* (a), le nombre autorisé de particules par état n'est pas limité, bien au contraire: à très basse température, les particules tendent toutes à occuper l'état fondamental du système (énergie la plus basse). La *statistique de Fermi-Dirac* (b), en revanche, est régie par le principe d'exclusion de Pauli. Le nombre de particules se trouvant sur un niveau d'énergie donné est donc limité. À basse température, les fermions doivent se répartir sur les niveaux d'énergie supérieure (orbitales atomiques).



# Complément 3c

## Les quantons élémentaires: fermions de matière & bosons d'interaction

Dans le modèle standard, la matière ordinaire est constituée des **FERMIONS** de la 3<sup>e</sup> colonne (e, v<sub>e</sub>, u, d) et les 4 interactions fondamentales sont véhiculées par les **BOSONS**.

PARTICULES ELEMENTAIRES de spin 1/2 (Fermions) masse en MeV / c <sup>2</sup> ~ 2·10 <sup>-30</sup> kg			PARTICULES d'INTERACTIONS de spin entier (Bosons): 1 ou 2				
			photon $\gamma$ 0	gluons 8 TYPES 0	W W <sup>+</sup> Z <sup>0</sup> W <sup>-</sup> ~85'000	graviton ? 0	
(ponctuels ?)	tau $\tau$ ~2000	muon $\mu$ ~100	électron e 0.511	-1-e	0	↕	m
	neutrino $\nu_\tau$ > 0 ?	neutrino $\nu_\mu$ > 0 ?	neutrino $\nu_e$ > 0 ?	0	0	↕	> 0 ?
↑ Baryons (3q)	q. beauté b b b ~4'500	q. étrange s s s ~500	quark down d d d 333	-1/3-e	g	↕	m
	q. vérité t t t ~200'000	q. charme c c c ~1500	quark up u u u 330	+2/3-e	g	↕	m
3 Générations			EM	de couleur	faible	gravifique	4 Couplages

# Complément 3d

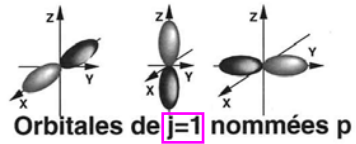
## L'atome et le noyau ? Un grand vide structuré !

Un atome est essentiellement de l'espace vide! Presque toute sa masse est due au minuscule noyau central et l'espace qui l'entoure est occupé par une poignée d'électrons ponctuels. Agrandissons mentalement un atome à la taille d'un terrain de football, le noyau serait un grain de raisin, un des trois quarks constituant un nucléon serait inférieur au diamètre d'un cheveu et la longueur d'onde de la lumière rouge correspondrait à la largeur de la France. **Imaginez encore que vous êtes sur un noyau de la taille de la Terre et que vous contemplez le ciel étoilé: le vide de l'espace n'est pas très différent du vide de l'atome en vous.** Pendant une dizaine d'années, les savants n'ont pu résister à la tentation d'imaginer les électrons comme des planètes autour d'un noyau-étoile (Rutherford et Bohr, 1911). Pourtant, le modèle planétaire est faux et relève de la pure science-fiction! Ainsi que l'a démontré Schrödinger, la source de cette erreur originelle est que les électrons ne sont pas des particules "classiques", mais possèdent des propriétés intrinsèquement ondulatoires (*complémentarité*). Par conséquent, les solutions de sa célèbre équation (1926), les orbitales atomiques (cf. figures), indiquent la probabilité de trouver l'électron en chaque point de l'espace et non la position précise de l'électron à chaque instant.

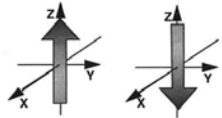
L'expérimentation montra que les nucléons (ainsi que tous les Mesons et Baryons) sont composites. Gell-Mann (1963) proposa une classification basée sur le concept de quarks: entités élémentaires de charges fractionnaires. Les six variétés de quarks ou «saveurs» (cf. complément 3c) possèdent un des trois types de charges fortes ou «couleurs» (rouge, verte ou bleue; sans rapport avec le sens habituel). Ils interagissent par l'échange de gluons colorés (8 types), capables de modifier la «couleur», mais pas la «saveur».

• **SPIN** ≡ quantification des orientations

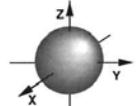
- nombre purement quantique, solution de l'équation de Schrödinger (1926)
- décrit comment change l'objet lors d'un changement de point de vue
- un spin  $j$  correspond à  $n = 2j + 1$  orientations indépendantes



Orbitales de  $j=1$  nommées p



Orientation interne nommée **spin 1/2**



Orbitale de  $j=0$  nommée s

