

# Collège de France

---

**Physique quantique** | Serge Haroche

---

## Physique quantique

**Leçon inaugurale prononcée le jeudi  
13 décembre 2001**

*Quantum Physics*

**Serge Haroche**

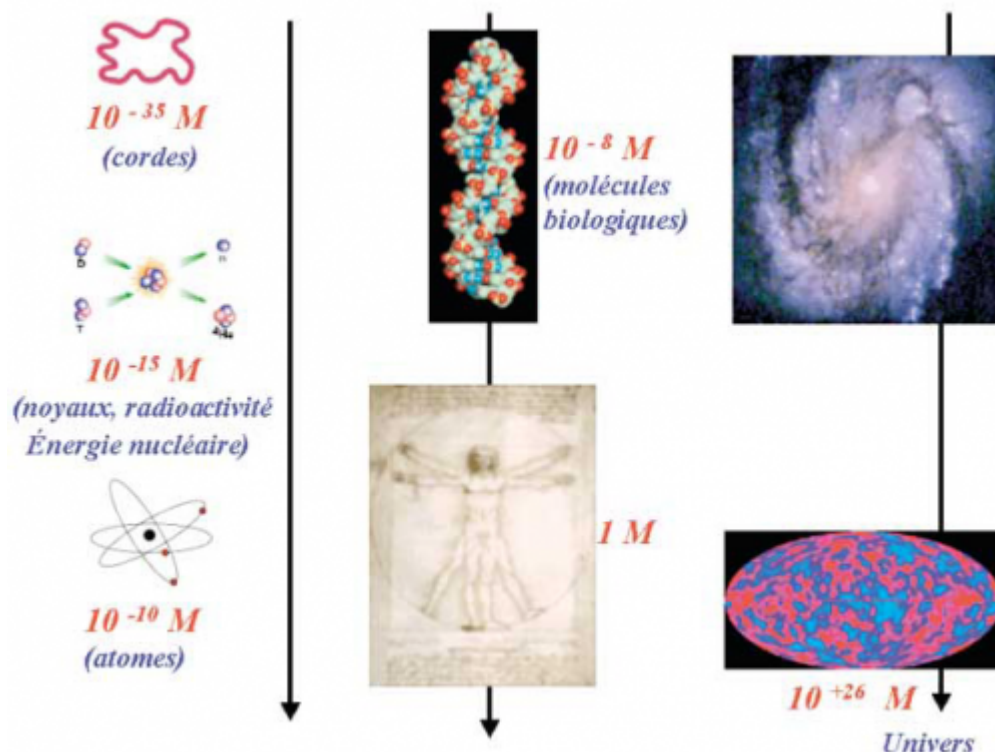
### Texte intégral

- 1 Monsieur l'Administrateur,  
Mes chers collègues,  
Mesdames, Messieurs,
- 2 « Personne ne comprend vraiment la physique quantique ». Ce jugement du physicien Richard Feynman exprime une vérité paradoxale sur la théorie scientifique qui a révolutionné notre compréhension de la nature et enrichi de façon extraordinaire nos moyens d'action et d'information sur le monde. Dans cette

leçon, je vous parlerai de physique quantique en tentant de résoudre ce paradoxe. Et si je n'y parviens pas, la boutade de Feynman nous laissera au moins la consolation d'être en nombreuse compagnie.

- 3 De l'infiniment petit à l'infiniment grand, couvrant plus de soixante ordres de grandeur de dimension spatiale, la théorie quantique est invoquée, tant pour décrire les vibrations encore largement mystérieuses des cordes microscopiques qui pourraient être les constituants élémentaires de l'Univers, que pour rendre compte des fluctuations du rayonnement micro-onde qui nous parvient des confins du cosmos. Entre ces deux extrêmes, se trouvent tous les objets du monde qui nous entoure (fig. 1). Ajoutez vingt zéros aux dimensions des cordes hypothétiques que je viens d'évoquer et vous avez la taille d'un noyau atomique, siège de la radioactivité et de l'énergie nucléaire. Encore cinq zéros et voici l'atome, noyau lié à son cortège d'électrons par la force électromagnétique, ainsi que les molécules simples, petits assemblages d'atomes qui se font et se défont suivant les lois de la chimie. Deux ou trois ordres de grandeur de plus et nous atteignons les biomolécules, où la vie se manifeste au niveau le plus élémentaire. Encore six à neuf ordres de grandeur et nous voici dans la gamme des dimensions du centimètre à la dizaine de mètres, celle de l'échelle humaine, avec sa diversité d'objets, solides, liquides et gaz formés de milliards de milliards de milliards d'atomes. De notre échelle à celle des objets astronomiques – planètes et étoiles où règne la force de gravitation – ajoutez encore huit ou neuf zéros. Il faut enfin compter seize ordres de grandeur supplémentaires pour achever, à travers l'exploration des galaxies, notre voyage jusqu'aux confins de l'Univers.

### Figure 1



Des cordes hypothétiques microscopiques (en haut à gauche) aux fluctuations du rayonnement cosmique (dont la carte relevée par le satellite COBE est montrée en bas à droite), la physique quantique doit rendre compte de phénomènes sur plus de soixante ordres de grandeur de dimension spatiale.

- 4 Sur le chemin vertigineux que nous venons de parcourir, la physique doit décrire et expliquer une variété infinie de phénomènes. Certains sont connus empiriquement depuis longtemps, d'autres ont été découverts au cours du siècle dernier grâce au développement de puissants moyens d'investigation. Aux confins de l'infiniment petit ou de l'infiniment grand, d'autres enfin posent encore des questions non résolues. Mais il en est peu dont certains aspects au moins ne soient éclairés par la théorie quantique, dont les succès ont été éclatants au cours du siècle dernier. Les théoriciens évoqueront sans doute la description extrêmement précise qu'elle donne des interactions entre les électrons et les photons dans le cadre de l'électrodynamique quantique. Ils noteront l'accord quantitatif remarquable qu'on y observe entre expérience et théorie. Ils parleront aussi de l'unification de trois des quatre forces fondamentales – l'électro-

magnétique, les forces nucléaires faible et forte – dans un formalisme unique qui révèle les symétries profondes de la nature. Ils mentionneront encore les tentatives prometteuses d'inclure la gravitation dans cette unification, en développant une théorie quantique des cordes. Ils insisteront sur l'universalité de la physique, conséquence remarquable des propriétés de la théorie quantique. Celle-ci explique le spectre du rayonnement émis par l'hydrogène dans les lampes à décharge de nos laboratoires, mais aussi dans l'espace interstellaire. La chimie quantique s'applique aux réactions dans l'éprouvette du chimiste, mais aussi à celles qui se produisent dans les grains de poussière intergalactique où se font et se défont des molécules dont le rayonnement est capté par nos télescopes après des millions d'années de voyage à travers l'espace. Évoquons enfin la cosmologie et le rapprochement entre les infiniment petit et grand, stimulé par la théorie quantique qui souligne la profonde similitude entre les phénomènes qui se sont passés à l'origine de l'Univers dans un milieu d'une densité et d'une chaleur difficiles à imaginer et ce qui se produit au cours des violentes collisions entre particules dans nos accélérateurs géants.

\*

- 5 La physique quantique ne se contente pas de décrire avec précision la structure de la matière. Par la connaissance approfondie qu'elle nous donne des phénomènes qui s'y produisent, elle nous fournit des moyens d'action, de calcul et de diagnostic d'une puissance et d'une précision auparavant inimaginables. Voyez le petit ordinateur portable que j'utilise pour la présentation de cette leçon. Si vous en exploriez les entrailles, vous découvririez sous le clavier un petit boîtier protégeant une plaque de silicium de quelques centimètres de côté où se trouve imprimé un labyrinthe de circuits électriques. Ces circuits relient des empilements de matériaux semi-conducteurs, minuscules transistors constituant autant de petites portes logiques. Les propriétés de ces matériaux sont régies par des lois quantiques (« effet tunnel », « principe d'exclusion de Pauli », etc.). C'est l'exploitation de ces lois qui

permet d'effectuer des calculs programmables d'une très grande complexité. Les principes de l'ordinateur sont connus depuis longtemps. La capacité de stocker de l'information et de calculer remonte au moins à la machine de Pascal (fig. 2). Le principe de la programmation des calculs peut être attribué à Babbage qui, au XIX<sup>e</sup> siècle, avait imaginé une machine complexe formée de rouages et d'éléments mécaniques assemblés entre eux. Le développement de l'industrie électrique dans la première moitié du siècle dernier a conduit à remplacer les circuits mécaniques par des lampes à vide et à réaliser ainsi les premiers ordinateurs de l'époque moderne. Les machines que Léon Brillouin, professeur au Collège de France, contribua à développer aux États-Unis dans l'immédiat après-guerre (fig. 2), étaient cependant des armoires énormes et peu fiables, nécessitant un entretien permanent par une armée de techniciens. Et leurs performances étaient très inférieures à celles du petit ordinateur moderne que j'évoquais à l'instant (fig. 2). C'est la découverte des transistors et la possibilité de les intégrer en nombre gigantesque dans un matériau semi-conducteur qui a permis l'explosion des applications de l'ordinateur. Ses principes logiques auraient pu être compris d'un homme du XIX<sup>e</sup> siècle, mais sa réalisation pratique est tributaire d'une technologie inconcevable pour un esprit pré-quantique.

## Figure 2



*Machine à calculer  
mécanique de Pascal  
(1642)*



*Calculateur à  
lampes ENIAC  
(1946)*

*Ordinateur portable  
(2001)*



Trois générations de calculateurs. La technologie quantique a permis la miniaturisation de l'ordinateur et toutes ses applications dans la vie quotidienne.

- 6 Le laser est un autre exemple d'invention basée sur un effet quantique, omniprésente dans notre vie quotidienne. Je me souviens de l'émerveillement que suscitaient chez le jeune étudiant que j'étais les premiers lasers émettant leurs faisceaux directifs de lumière intense et monochromatique. Le spectacle est aujourd'hui banal, mais jusque dans les années soixante du siècle dernier, on n'avait rien vu de semblable. La lumière était depuis des temps immémoriaux une onde rebelle, malaisée à diriger, à concentrer, difficile à faire osciller à une fréquence bien définie. Le laser a changé cela et nous a permis de domestiquer le rayonnement en exploitant les propriétés de l'émission stimulée des atomes, établies par Einstein aux débuts de la théorie quantique. Les lasers ont maintenant une infinité d'usages, des plus triviaux aux plus sophistiqués. Que l'on pense à la reproduction des sons enregistrés sur les disques compacts, aux lecteurs des codes-barres des caisses de supermarchés, à la microchirurgie ou aux télécommunications par fibres optiques.

- 7 Une autre application importante de la physique quantique concerne la mesure précise du temps. Les atomes de chaque élément émettent et absorbent la lumière à des fréquences caractéristiques, immuables et bien définies. Cette propriété quantique fondamentale a conduit à fonder la mesure du temps non plus sur les oscillations sujettes à perturbations de pendules, de ressorts ou de cristaux de quartz, ou même sur les mouvements des astres eux aussi fluctuants malgré leur régularité apparente, mais sur les oscillations de variables physiques associées aux électrons atomiques. Ainsi sont nées des horloges qui définissent à présent le temps avec une précision de l'ordre de la seconde sur des ères géologiques. Ce sont ces horloges atomiques qui, synchronisées entre elles et embarquées sur des satellites, envoient des signaux aux appareils récepteurs du Global Positioning System (GPS). La mesure des instants d'arrivée de ces signaux permet de déterminer par triangulation la position des récepteurs avec une précision ultime de quelques centimètres. Ces appareils sont devenus des équipements standard de navigation, et personne ne s'étonne plus d'être ainsi dirigé, depuis le ciel, avec cette extraordinaire précision.
- 8 L'imagerie médicale par résonance magnétique (IRM) nous fournira un dernier exemple de technologie basée sur la compréhension de processus quantiques. Les images IRM sont en fait produites par la convergence de trois technologies quantiques, menées à un remarquable niveau de sophistication. Un champ magnétique puissant produit par des bobines supraconductrices (première technologie quantique) et des séquences de champs de radiofréquence convenablement agencées mettent en résonance les moments magnétiques des noyaux de nos atomes (autre effet que seule la physique quantique permet d'expliquer). Les signaux émis par ces noyaux sont enfin traités et transformés en images par des ordinateurs puissants, constitués de matériaux dans lesquels les effets quantiques, nous l'avons dit, jouent également un rôle essentiel. On peut ainsi, par exemple, reconstituer en trois dimensions l'intérieur de notre cerveau,

et même suivre l'évolution de l'activité cérébrale qui modifie les signaux émis par nos protons. La pensée, ou du moins sa manifestation matérielle, devient ainsi visible.

\*

- 9 Quels points communs trouve-t-on à toutes ces inventions fondées sur la compréhension de phénomènes microscopiques ? L'étude de ces phénomènes n'était, au départ, jamais motivée par les applications qui allaient en résulter, au terme d'un cheminement souvent fortuit. Ce qui stimule la recherche est avant tout la curiosité gratuite, le besoin de comprendre la nature intime des choses. Les applications ne viennent qu'ensuite, et souvent là où on ne les attend pas. Lorsqu'en 1960 le premier laser est apparu, nul ne savait à quoi il servirait. On l'appelait alors – en ne plaisantant qu'à moitié – « une solution à la recherche d'un problème ». Ni le laser, ni l'ordinateur portable, ni l'IRM n'auraient jamais pu naître d'une programmation utilitariste. Il y a un autre aspect commun à ces inventions. Toutes ont conduit à des instruments que nous utilisons avec l'indifférence blasée qu'apporte l'habitude, sans avoir conscience que leur fonctionnement dépend de phénomènes microscopiques subtils. L'étude de ces phénomènes ne fait toujours pas partie de la culture générale de l'honnête homme du début de ce siècle. À la fin de ses années de lycée ou même de classes préparatoires scientifiques, un élève sera familier des pendules, ressorts, poulies et autres machines mécaniques. Il connaîtra la loi d'Ohm et le bonhomme d'Ampère. En un mot, il aura des lumières sur ce qui a fait le succès de la première révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle – la machine à vapeur et le moteur électrique – la physique de Galilée, Newton et Maxwell. Il aura une idée assez précise de ce qui se passe sous le capot du moteur de sa voiture, mais pas sous celui de son ordinateur. Il y a là un paradoxe, sur lequel nous reviendrons, de l'enseignement général qui s'est figé en France, comme dans la plupart des autres pays, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.
- 10 Que les appareils que je viens de décrire soient incompréhensibles à un esprit classique apparaît clairement si



on évoque les débats qui se sont déroulés, dans une atmosphère *fin de siècle* similaire à celle que nous avons connue récemment, entre les scientifiques qui s'interrogeaient dans les années 1890 sur le devenir de la science. Imaginant le monde futur, ils avaient entrevu le transport aérien, le développement de l'automobile ou du cinéma, voire les voyages dans l'espace, autant de prolongements naturels de la physique classique. Personne n'avait pensé au micro-ordinateur, à l'imagerie médicale, au GPS ou au laser qui sembleraient sans doute relever de la magie à un physicien de 1900 revenant parmi nous. Marcelin Berthelot, le grand chimiste du Collège de France, fut en 1894 sollicité pour parler à la fin d'un banquet de l'avenir de sa discipline. Il décrivit pour l'an 2000 un monde où les aliments seraient tous réalisés par synthèse chimique, affranchissant notre civilisation des pénibles travaux des champs. Même s'il n'était hélas pas si loin de prévoir certains aspects de notre alimentation moderne, il faut bien reconnaître que sa vision était un peu courte. Il n'avait prévu aucun des développements extraordinaires de la chimie, par exemple la manipulation et la synthèse de molécules nouvelles à visée thérapeutique, ou encore le pilotage des réactions chimiques par la lumière laser. Il est vrai qu'il ne croyait pas vraiment à l'existence des atomes.

- 11 Lord Kelvin émit à la même époque une affirmation restée célèbre, dont je citerai l'esprit plus que la lettre : « À part deux petits nuages qui continuent d'obscurcir notre horizon, nous comprenons à peu près tout des phénomènes lumineux et thermiques. » Cette phrase reflète la pensée dominante de la physique de l'époque, influencée par Ernst Mach, qui estimait que si l'on pouvait, dans un système physique, mettre en relation de façon quantitative les seules observables macroscopiques mesurables (courant, tension électrique, température, pression, etc.), on en avait tout compris. Qu'il existât une réalité atomique sous la surface des choses, certains tels Boltzmann avec sa thermodynamique statistique en avaient la prémonition ou la conviction, mais qu'il s'agît d'une réalité objective et non d'une simple commodité de

pensée restait une question âprement débattue. L'autre aspect intéressant de l'affirmation de Lord Kelvin est l'allusion aux deux petits nuages. L'un fait référence à l'éther, milieu hypothétique censé baigner la Terre et dont l'expérience récente de Michelson venait de mettre en évidence les propriétés contradictoires ; l'autre à certaines anomalies de la répartition de l'énergie dans les corps chauffés et dans la lumière qu'ils émettent, révélées par des mesures de calorimétrie de plus en plus précises. Que Lord Kelvin ait senti qu'il y eût, dans deux expériences apparemment marginales, un problème pour la science de son époque est remarquable. Il avait clairement vu d'où allait venir le grand changement. L'un de ces nuages devait mener à la révolution relativiste d'Einstein et l'autre à celle des quanta, qui nous intéresse plus particulièrement dans cette leçon. L'anomalie dans le rayonnement des corps chauffés devait bientôt conduire Planck à formuler le principe de la quantification des échanges d'énergie entre matière et radiation, mettant en marche la révolution quantique, avec toutes les conséquences que j'ai rappelées.

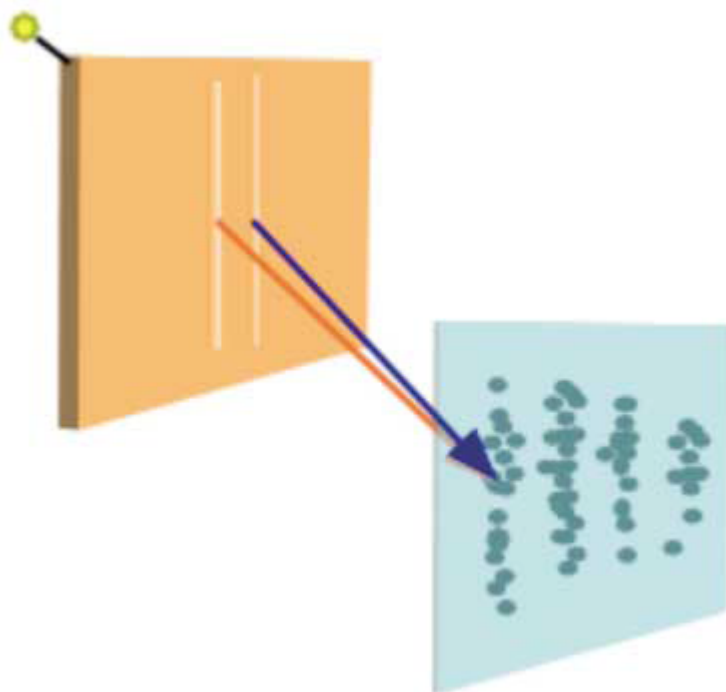
\*

- 12 J'ai évoqué les succès de la théorie quantique, sa puissance prédictive, son altérité radicale avec la physique qui l'a précédée, mais je n'ai pas encore dit ce qu'elle était vraiment. Parler de façon qualitative des concepts quantiques est une gageure qui nous renvoie au commentaire de Feynman rappelé au début de cette leçon. La physique quantique, après un siècle de succès éclatants, reste en fait largement déroutante car elle repose sur des concepts profondément contraires à l'intuition classique. Son principe fondamental est celui de la « superposition des états ». Il nous dit que lorsqu'un système peut exister dans plusieurs états différents, alors il peut également se trouver *à la fois* dans tous ces états, comme suspendu entre plusieurs réalités. Par exemple, l'électron unique du plus simple des atomes, l'hydrogène, se trouve dans une superposition d'une infinité de positions possibles autour de son noyau, le proton. L'ensemble de ces positions se

répartit dans un volume dont les dimensions sont d'environ un angström. Cela ne veut pas dire cependant que l'électron soit un objet dilué comme une sorte d'ectoplasme. Si l'on cherche à mesurer sa position en l'éclairant avec un rayonnement de longueur d'onde très petite, agissant comme une sonde locale précise, on le trouvera en un point ou en un autre, parfaitement localisé. Ce point sera cependant aléatoire, *a priori* imprévisible, différent d'une mesure à l'autre effectuées sur des atomes identiques.

- 13 Le nuage de points correspondant à la superposition initiale est décrit mathématiquement par un tableau de nombres complexes, correspondant chacun à un point. Ce tableau résume toute l'information que l'on peut avoir sur l'électron. Le carré de l'amplitude de chacun de ces nombres nous donne la probabilité de trouver l'électron au point correspondant. Ce tableau porte le nom de « fonction d'onde » et son évolution dans l'espace et le temps est régie par la fameuse équation de Schrödinger, analogue à celle satisfaite par une onde classique, acoustique ou électromagnétique. Il s'agit cependant ici non pas d'une onde matérielle ou lumineuse, mais d'une onde de probabilité abstraite. Sur cet exemple simple se trouvent réunis tous les aspects paradoxaux de la théorie quantique : dualisme entre les descriptions ondulatoire et corpusculaire de la matière ; caractère irréversible de toute mesure qui perturbe de façon fondamentale l'objet mesuré ; nature statistique de la théorie enfin, qui ne permet de prévoir que les probabilités de résultats de mesure sur un système physique, renonçant au déterminisme absolu de la physique classique. Dans le monde quantique, « Dieu joue au dés » comme le remarquait Einstein pour s'en attrister.
- 14 Le principe de superposition conduit directement au phénomène d'interférence d'ondes de matière, que Feynman considérait comme la *quintessence* de l'étrangeté quantique. Une expérience simple, celle de l'interféromètre de Young, illustre ce phénomène (fig. 3).

### Figure 3



Les interférences de Young réalisées avec des particules matérielles expriment la quintessence de l'étrangeté quantique.

- 15 Des particules sont envoyées une à une à travers un écran percé de deux fentes et leur position est ensuite détectée dans un plan parallèle à celui de l'écran par les impacts qu'elles y produisent. On observe ainsi un réseau de franges brillantes où les points s'accumulent, séparées par des lignes sombres où aucune particule n'arrive. Vous allez voir cette figure d'interférence se construire littéralement sous vos yeux, par accumulation des impacts successifs. Il s'agit de l'enregistrement d'une expérience réalisée récemment avec des atomes à l'Université de Tokyo. Ce phénomène paraît simple si c'est une onde que l'on étudie. Les deux fentes la décomposent en effet en deux ondes partielles dont les amplitudes, de même signe, s'ajoutent sur les franges brillantes et, de signes contraires, s'annulent sur les lignes sombres. C'est d'ailleurs ainsi que l'on interprète depuis longtemps cette expérience lorsqu'elle est réalisée avec des ondes lumineuses.
- 16 On sait cependant depuis le début du siècle dernier que toute lumière peut également se décrire comme un flux de corpuscules, les photons (il s'agit encore du dualisme onde-corpuscule appliqué ici non plus à un système matériel mais

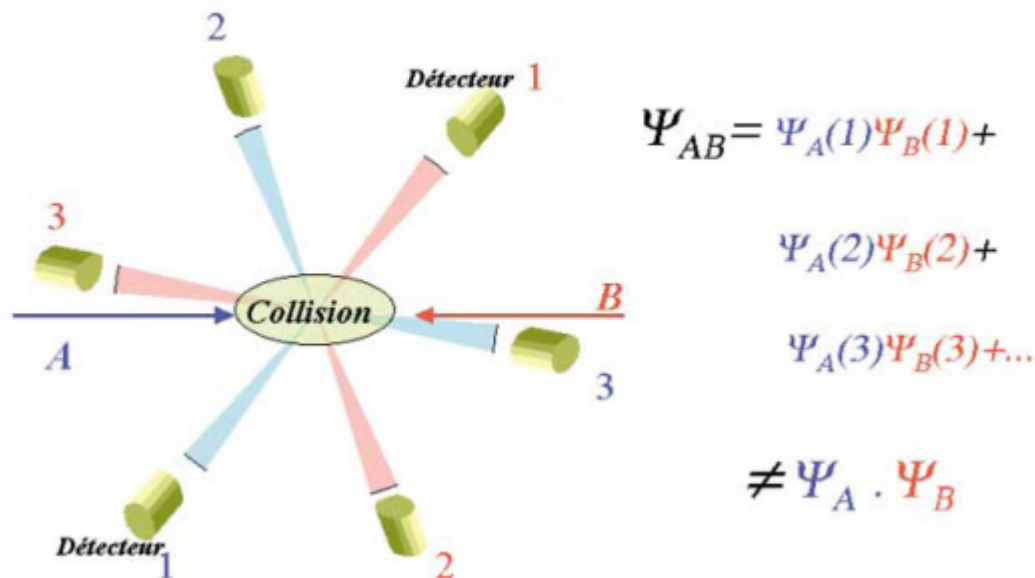
au rayonnement). Comment comprendre alors cette expérience ? Comment l'interpréter surtout lorsque, comme vous le voyez ici, elle est réalisée avec des particules matérielles, des atomes traversant un à un l'appareil ? Chaque atome nous dit alors, de façon apparemment contradictoire : « je suis une particule, voyez mon point d'impact discret sur l'écran » et en même temps, « je suis une onde, voyez ces belles interférences » ! Il faut bien admettre alors que chaque atome traverse en fait l'appareil à travers les deux trous à la fois, sans choisir l'un ou l'autre, dans l'étrange superposition d'états décrite par la physique quantique. Cette expérience suffit à mettre en évidence la surprenante logique du monde microscopique. Pour déterminer la probabilité d'un événement, il faut combiner des amplitudes qui peuvent se soustraire aussi bien que s'ajouter. Il en résulte qu'un événement, l'arrivée d'un atome sur une ligne sombre, est moins probable lorsque le système dispose de deux chemins indépendants pour y aboutir que lorsqu'il n'en a qu'un seul !

17 Les aspects ondulatoire et corpusculaire correspondent en fait à deux descriptions du monde qui ne sont pas contradictoires, mais complémentaires, selon l'expression de Niels Bohr. L'aspect ondulatoire, avec les interférences associées, n'est en fait observé que si rien dans le dispositif expérimental ne permet de déterminer le chemin suivi par la particule. Si l'on cherche à déterminer ce chemin, il faut modifier l'appareillage, y introduire un élément capable de détecter par quelle fente la particule est passée. En interagissant avec la particule, ce détecteur va alors la perturber suffisamment pour faire disparaître les franges. L'aspect corpusculaire domine alors. Ainsi, la propriété *onde* ou *corpuscule* n'est pas intrinsèque. C'est une propriété de la particule en relation avec l'appareillage spécifique utilisé dans chaque expérience.

18 Le principe de superposition prend une forme encore plus déconcertante dans des systèmes constitués de différentes parties qui interagissent entre elles, puis se séparent. Considérons le cas de deux atomes de même masse et de vitesses opposées, qui se choquent, puis s'éloignent l'un de

l'autre (fig. 4). Des détecteurs sont disposés tout autour du point de collision pour en observer le résultat. Conformément au principe de superposition, chaque atome va, avant toute mesure, se trouver suspendu entre des états associés à des vitesses de directions différentes, et finalement un des détecteurs, de façon aléatoire va enregistrer un *clic*, « choisissant » ainsi la vitesse finale de l'atome. De façon remarquable, les clics associés aux deux atomes vont toujours être émis par deux détecteurs opposés. Les physiciens classiques reconnaîtront que ceci est une conséquence de la conservation de l'impulsion globale du système. Il y a cependant quelque chose de surprenant dans la corrélation parfaite entre deux événements fondamentalement aléatoires qui se produisent dans deux régions différentes de l'espace. Mathématiquement, la fonction d'onde du système apparaît comme une somme de termes correspondant à chacun des résultats possibles de cette expérience de corrélation. Dans chaque terme, les contributions venant de chacun des atomes forment un produit. La fonction d'onde globale ne peut cependant pas se séparer en un produit de deux fonctions d'ondes d'atomes indépendants. En d'autres termes, chaque atome n'a, avant d'être détecté, plus de fonction d'onde propre. Il n'y a plus qu'une fonction d'onde non séparable pour l'ensemble du système. C'est ce que l'on appelle *l'intrication quantique*. Il en résulte que ce qui se passe dans un coin de l'univers sur l'un des atomes est inextricablement *intriqué* à ce qui arrive à l'autre atome dans un autre coin de l'univers, et cela quelle que soit la distance entre eux ou le type de mesure que l'on effectue. Cette propriété a beaucoup troublé Einstein lorsque, avec ses collaborateurs Podolsky et Rosen, il l'a en 1935 analysée pour la première fois. Le lien immatériel à distance entre deux particules décrit par ce type de fonction non séparable exprime ce que l'on appelle, depuis, le paradoxe EPR.

#### Figure 4



L'intrication quantique de particules séparées par une grande distance conduit au paradoxe EPR.

- 19 La notion d'intrication est en fait liée à celle de complémentarité évoquée plus haut. Chercher à déterminer la trajectoire d'un atome dans un interféromètre nécessite, nous l'avons vu, de le coupler à un détecteur qui enregistre une information en évoluant dans deux états différents suivant que l'atome passe par un chemin ou l'autre. On éclairera par exemple les deux fentes avec un faisceau de lumière laser et les photons seront diffusés par chaque atome dans deux directions différentes suivant qu'il passe par une fente ou l'autre. Ce couplage entre l'atome et le photon entraîne une intrication entre leurs états respectifs. L'atome ne possède alors plus une fonction d'onde qui lui soit propre : il n'y a plus vraiment d'onde susceptible d'interférer. C'est l'intrication de la particule au détecteur, produite par la mesure de sa trajectoire, qui explique la disparition des franges.
- 20 Évoquons une autre conséquence essentielle du principe de superposition, en parlant maintenant de systèmes formés de particules identiques. La notion d'identité prend un sens beaucoup plus profond dans le monde quantique que dans celui de la physique classique. Pour illustrer ce point, supposons qu'une particule soit enfermée dans une boîte, dans un état bien défini. Par un dispositif dont les détails importent peu, proposons-nous de déposer une autre particule identique

à la première dans la boîte, puis de les détecter l'une après l'autre. L'expérience classique analogue pourrait être faite par un épargnant qui, ayant un franc (ou un euro) dans un coffre, en dépose un second, avant de les dépenser un à un. Peut-il savoir si les euros qu'il dépense le sont dans l'ordre où ils ont été épargnés ou dans l'ordre inverse ? Même si la question semble ne pas avoir beaucoup d'intérêt – pratique ou économique –, rien n'empêcherait en principe notre épargnant classique d'observer avec une caméra placée dans la boîte la suite des opérations, ou de peindre les deux euros de couleurs différentes et de déterminer ainsi l'ordre de sortie des pièces. Cette possibilité est en revanche interdite au compteur de particules microscopiques et la notion même d'ordre des événements n'a pour lui aucun sens. La détection finale des deux particules résulte donc d'un processus de superposition de deux chemins totalement indiscernables. Sa probabilité s'obtient, d'une façon analogue à l'expérience de Young, en ajoutant les amplitudes associées aux deux possibilités, puis en élevant cette somme au carré.

- 21 Pour un certain type de particules, les fermions (dont les électrons sont un exemple), les deux amplitudes partielles sont de signes opposés et se soustraient donc comme dans le cas des franges noires de l'expérience de Young, annulant la probabilité finale. Il est donc tout simplement impossible de déposer les deux particules dans la boîte. C'est le fameux principe d'exclusion de Pauli, qui interdit à deux électrons d'être dans le même état, une mauvaise nouvelle pour les épargnants d'électrons, mais un principe très heureux pour la diversité de notre monde. Cette propriété joue en effet un rôle fondamental pour expliquer la structure des atomes et des molécules, toutes les lois de la chimie, et donc aussi les principes de la biochimie sur lesquels s'est bâtie la vie. En un mot, tous les électrons d'un système physique doivent se répartir sur autant d'états quantiques différents, donnant au système une richesse de structures et de combinaisons qui n'existerait pas s'ils étaient des particules classiques capables de s'accumuler dans un petit nombre d'états. Le monde serait



beaucoup moins varié si les électrons n'étaient des fermions et la physique serait sans doute moins favorable à notre existence. Il est probable, par exemple, que nous passerions tous à travers le sol de cette salle. C'est parce que les électrons de mes semelles se refusent à être au même point que ceux du sol sur lequel je me tiens que celui-ci exerce sur moi la force de réaction salutaire qui me maintient devant vous. La discernabilité des objets solides, le fait qu'il existe entre eux des frontières bien marquées, est ainsi – paradoxalement – une conséquence de l'indiscernabilité fondamentale des fermions dont ils sont composés. D'autres conséquences – moins triviales – du principe d'exclusion conditionnent les propriétés des matériaux, métaux et semi-conducteurs, si riches, comme nous l'avons vu, en applications pratiques.

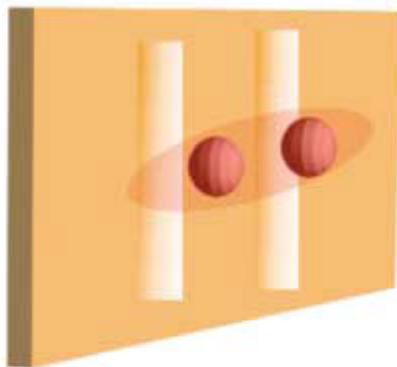
22 Pour d'autres particules, les bosons, les amplitudes associées aux identifications classiques des particules dans notre boîte s'ajoutent au lieu de se soustraire. Non seulement il est alors possible de les accumuler dans un même état, mais la probabilité d'y parvenir est plus grande que dans le cas classique. Les bosons ont un comportement grégaire et leurs propriétés collectives sont différentes de celles des fermions ou de celles d'un gaz classique de particules. La lumière ne serait pas ce qu'elle est si les photons n'étaient de grégaires bosons. Un certain nombre de phénomènes remarquables liés aux propriétés des bosons ont été découverts au  $xx^e$  siècle. La superfluidité de l'hélium liquide est une conséquence du caractère bosonique de cet atome. La supraconductivité de certains métaux à basse température – le fait qu'ils conduisent l'électricité sans s'échauffer et permettent ainsi de réaliser des électro-aimants puissants dont nous avons vu l'utilité pour l'IRM notamment – est due au fait que les électrons s'accouplent en paires se comportant comme des bosons, et non plus comme des fermions. Le phénomène de condensation dans un même état quantique d'un gaz de bosons, prévu dès 1924 par Bose et Einstein, a été observé en 1995 dans une expérience spectaculaire effectuée sur des atomes de Rubidium refroidis à une température d'une fraction de

millionième de degré absolu. Cette expérience a ouvert la voie à des recherches sans doute riches d'applications futures. Le prix Nobel vient de couronner ces travaux.

\*

- 23 La physique quantique est essentielle à la description des phénomènes à l'échelle atomique ou subatomique. Elle est aussi, nous venons d'en voir des exemples, nécessaire à la compréhension de phénomènes collectifs macroscopiques. À cette échelle, cependant, les effets quantiques ne se manifestent en général que de façon indirecte, pour ainsi dire voilée. Nul n'a vu une boule de billard passer par deux trous à la fois (fig. 5). On a même du mal à imaginer ce qu'un tel phénomène pourrait signifier. On peut d'ailleurs penser que c'est parce que notre intuition s'est forgée à l'observation de phénomènes macroscopiques où les superpositions quantiques n'apparaissent pas, que celles-ci nous semblent si difficiles à concevoir. Notre cerveau, programmé par notre expérience personnelle aussi bien que par l'évolution darwinienne, « comprend » les collisions de boules de billard, pas celles d'électrons ou d'atomes.
- 24 Il y a là un paradoxe qui nous ramène au jugement de Feynman. Pourquoi les objets macroscopiques, en particulier les appareils de mesure, se comportent-ils de façon classique ? Ces objets sont pourtant constitués d'atomes qui, séparément, ont des comportements quantiques marqués. Comment ces comportements disparaissent-ils à l'échelle macroscopique ? Comment l'apparence classique du monde émerge-t-elle des lois quantiques sous-jacentes ? C'est là – à la frontière floue entre le microscopique et le macroscopique – que s'est posé historiquement et se pose toujours le problème le plus délicat de l'interprétation de la théorie.

## Figure 5



*Pas de boule de billard passant  
simultanément par deux  
fentes...*

*...ni de chat  
suspendu entre la  
vie et la mort...*



Comprendre l'apparence classique du monde macroscopique et la non-existence des superpositions d'états macroscopiques est le grand problème d'interprétation de la physique quantique.

- 25 Schrödinger a illustré ce problème en décrivant la célèbre expérience du chat qui porte son nom (fig. 5). Il a imaginé une situation dans laquelle un atome enfermé dans une boîte avec un chat serait utilisé pour le mettre dans une superposition de deux états dramatiquement différents, un état où l'animal serait vivant et un état où il serait mort. Si l'on admet que le chat peut être décrit par une fonction d'onde bien définie (et l'on touche là, comme nous le verrons, à un aspect crucial du problème), une telle situation doit pouvoir directement résulter de l'application des lois quantiques au système « atome + chat ». Personne n'a cependant jamais observé une telle situation burlesque ni vu d'interférences associées aux superpositions entre chat mort et vivant. Pourquoi ces interférences disparaissent-elles au niveau macroscopique ? La réponse à cette question fait intervenir la notion fondamentale de *décohérence*. La situation que nous avons schématisée à l'extrême a négligé un élément essentiel. Notre chat ne peut être isolé du reste du monde. Le chat – comme en général tout système macroscopique – est couplé à un environnement

complexe constitué, dans le cas particulier qui nous intéresse ici, de très nombreuses molécules et de photons thermiques. Et notre chat s'intrique très vite avec cet environnement et ne peut donc être décrit par un état quantique propre. Les molécules et photons qui l'entourent évoluent très rapidement dans des états quantiques différents suivant que le chat est vivant ou mort. Une information sur l'état du chat fuit ainsi dans l'environnement, détruisant les interférences quantiques qui seraient associées à la superposition de ces deux états, de la même façon que le détecteur de trajectoire de l'expérience de Young fait disparaître les franges. La décohérence qui tend à rétablir l'apparence classique du monde, est ainsi une conséquence de la notion de complémentarité et de l'intrication inévitable des systèmes complexes à leur environnement.

\*

- 26 Décrire la physique quantique avec des mots et des images forgés par l'expérience classique du monde macroscopique présente des limites et des dangers. Le premier de ces dangers, inhérent à l'exercice imposé d'une leçon inaugurale, est d'apparaître trivial aux spécialistes, et incompréhensible aux autres. Mais il y a un autre écueil plus profond, qui guette l'auditoire non spécialisé. C'est celui d'attribuer à la physique quantique un caractère flou. Associer des ondes et des particules dans un être apparemment hybride, pourrait évoquer ces monstres mi-hommes mi-bêtes qui peuplent la statuaire des églises romanes. Et faire penser que la physique quantique a un caractère mal défini, ce que renforce d'ailleurs l'emploi inapproprié d'expressions comme « indétermination » et « incertitude » quantiques. Rien n'est cependant plus loin de cette physique qui donne du monde une description d'une incroyable précision, qui s'accompagne d'une universalité, d'une stabilité des formes et des structures dont la physique classique ne sait rendre compte.
- 27 Mais pour accéder à cette description, il faut abandonner les images inadaptées et s'immerger dans la structure mathématique de la théorie, qui est d'une grande élégance et

d'une grande simplicité. La notion de superposition d'états, si floue en termes classiques, est simplement associée à la linéarité mathématique de la théorie, au fait que les états de n'importe quel système quantique sont décrits par des vecteurs d'un espace abstrait qui se somment et se combinent suivant des règles d'algèbre linéaire simple. Une fois ces règles définies, la théorie décrit sans ambiguïté tous les phénomènes. Les notions vagues pour le non-initié de superpositions, d'interférences, de complémentarité ou d'intrication en apparaissent comme des conséquences évidentes. Une nouvelle logique, différente de celle du monde classique, mais parfaitement cohérente, se dévoile. Il faut cependant, pour accéder à cette simplicité, faire un effort d'abstraction important. Et le rapport entre observation concrète et théorie est plus indirect qu'en physique classique. C'est sans doute la combinaison de ces deux aspects – la nécessité d'un formalisme abstrait et l'éloignement apparent entre observation directe et théorie – qui rend la physique quantique difficile à enseigner à un niveau élémentaire.

\*

- 28 Dans le monde microscopique, on n'accède au concret que par un cheminement ardu que les fondateurs de la théorie ont eu à parcourir. Ils ont dû se livrer à un formidable travail de détective, en suivant quelques intuitions géniales suggérées par des observations indirectes du monde microscopique (intuition des ondes de matière avancée par de Broglie en 1923 ou encore celle du principe d'exclusion de Pauli en 1925). Le formalisme mathématique de la théorie s'est ensuite élaboré, en 1925-1926, dans les travaux de Heisenberg, Schrödinger et Dirac. Pour discuter de la théorie nouvelle, ses fondateurs s'appuyaient souvent sur des « expériences de pensée », dans lesquelles ils s'imaginaient manipulant des électrons, des atomes ou des photons dans des situations simples et dépouillées de toutes les complications non essentielles, en essayant d'illustrer directement les notions quantiques et de les mettre à l'épreuve de la logique. La figure 6 montre un

dessin de la main de Bohr, représentant sa fameuse « boîte à photons ».

**Figure 6**

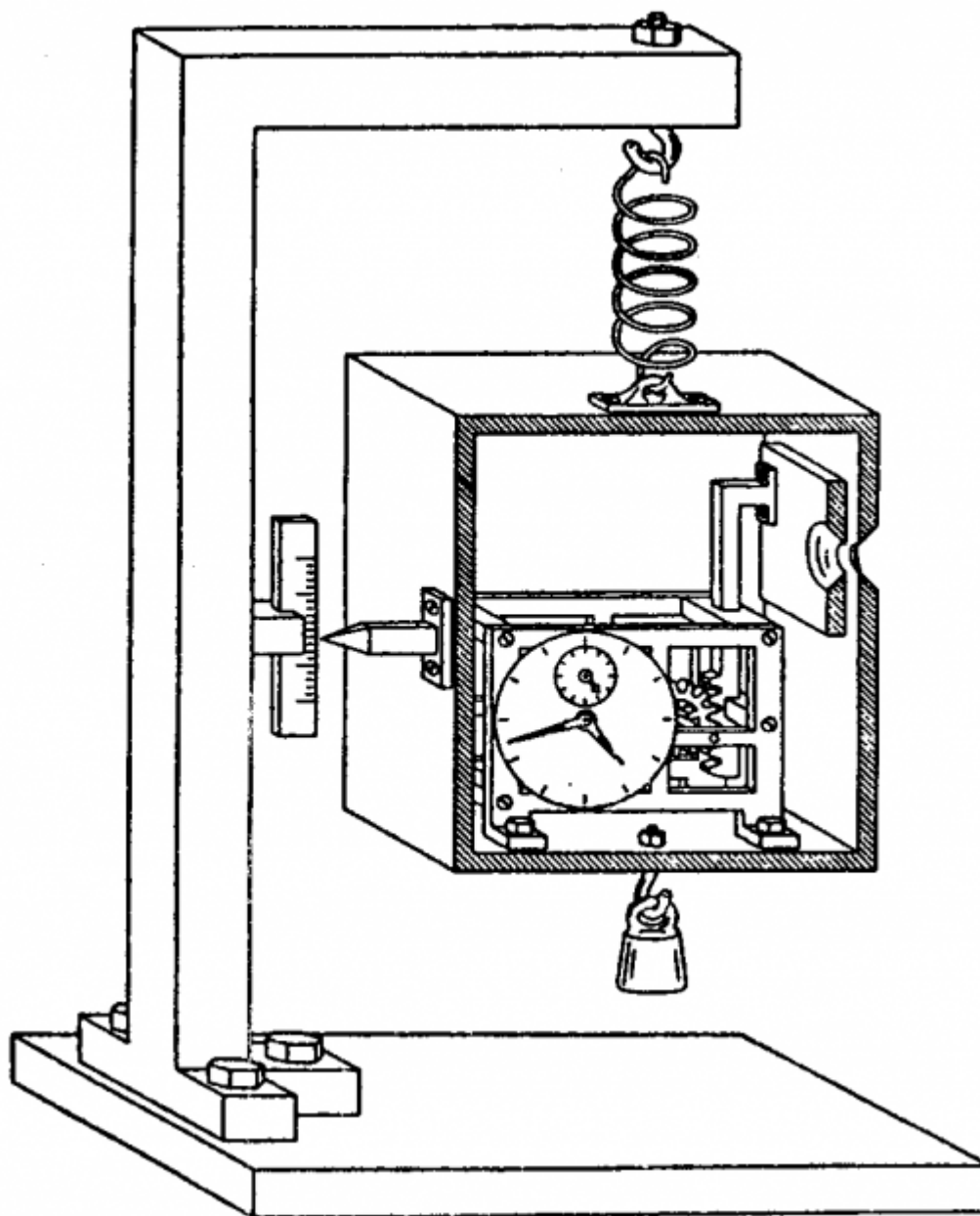


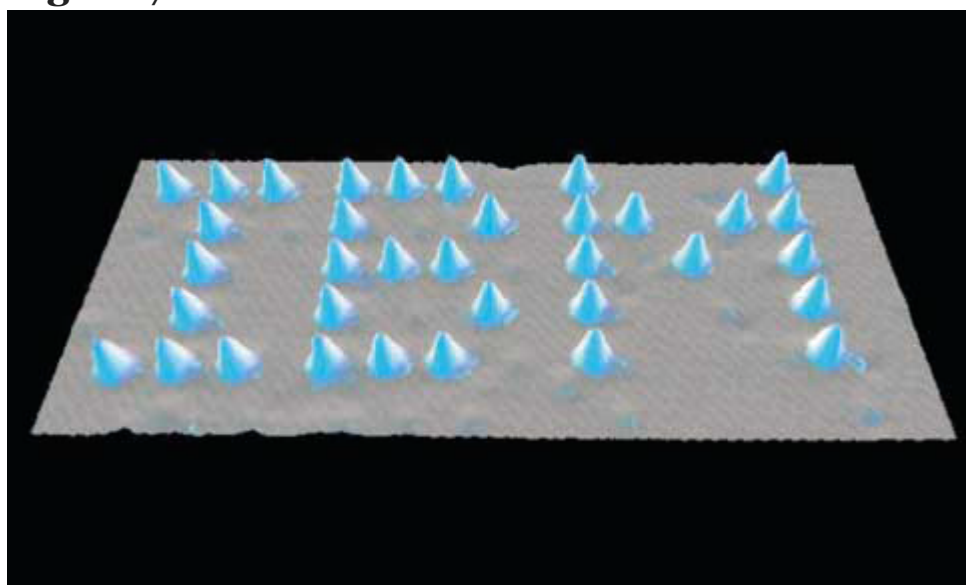
Schéma de Bohr illustrant son « expérience de pensée » de la boîte à photons (Niels Bohr Archive, Copenhague).

De telles expériences apparaissaient d'ailleurs comme totalement irréalisables. Schrödinger, influencé peut-être encore par la pensée de Mach, affirmait jusque vers 1950 que le comportement d'atomes isolés resterait à tout jamais inobservable. Il serait donc stupéfait par les expériences bien réelles de manipulation d'objets quantiques isolés que les

progrès de la technologie – établie sur les concepts quantiques – permettent maintenant de réaliser.

- 29 On peut grâce au microscope à effet tunnel « voir » des atomes et des molécules, les déplacer sur la surface d'un cristal et s'en servir pour fabriquer des structures à l'échelle du milliardième de mètre, comme les trois lettres formées d'atomes que vous voyez sur la figure 7.

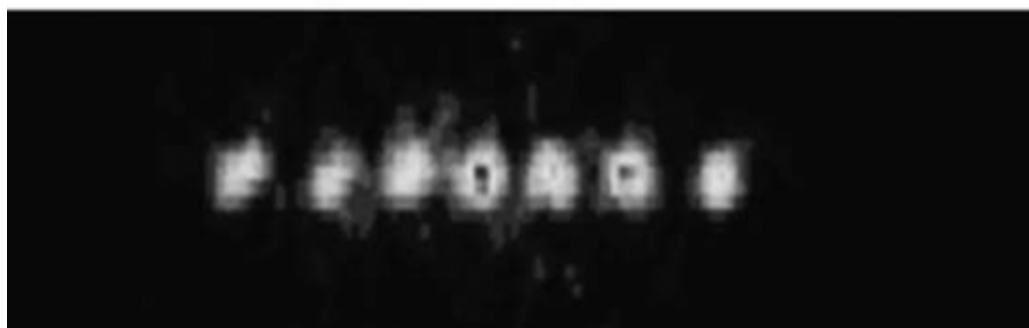
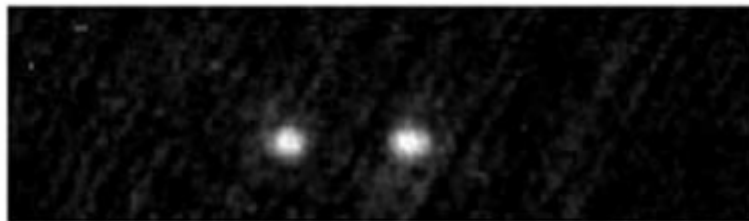
**Figure 7**



Le microscope à effet tunnel permet l'écriture à l'échelle atomique (photo IBM Almaden Research Center).

Écrits à cette échelle, tous les livres de la Bibliothèque nationale tiendraient sur la surface d'un timbre ! On peut aussi piéger des atomes un à un en les laissant suspendus dans le vide, soutenus par un jeu subtil de forces électromagnétiques. On peut à l'aide de faisceaux de lumière laser manipuler ces atomes, les préparer dans des états quantiques bien définis et observer leurs sauts quantiques. Voici quelques images de tels atomes, observés par la détection de la lumière laser qu'ils diffusent (fig. 8).

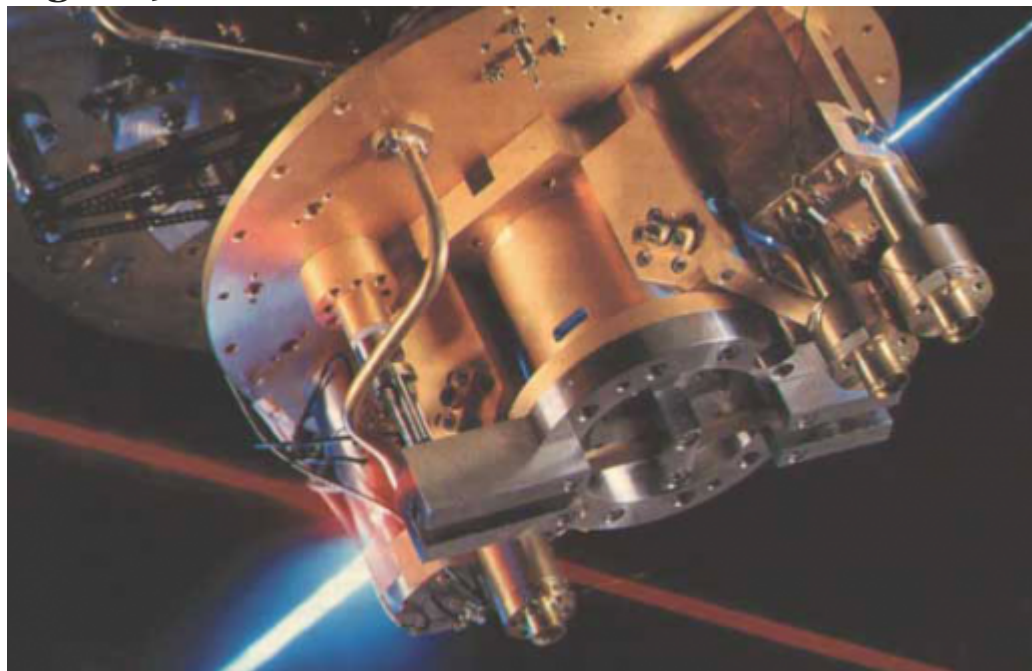
**Figure 8**



Voir et manipuler des atomes un à un : fluorescence de un, deux... sept atomes piégés (photo : Université d'Innsbruck).

On sait aussi produire des photons un à un, les intriquer entre eux ou encore les piéger individuellement dans une boîte pendant une fraction de seconde et les observer sans les détruire. Le montage que nous utilisons à l'École normale supérieure pour réaliser ces expériences de « boîte à photons » bien réelles est montré sur la figure 9. En manipulant ainsi ces particules, on illustre de façon concrète les fondements de la théorie quantique. Les interférences quantiques, la complémentarité, l'intrication, la décohérence se dévoilent pour ainsi dire directement dans ces expériences de pensée devenues bien réelles. Mais ces expériences ouvrent aussi la voie à une science nouvelle que l'on pourrait appeler le *traitement quantique de l'information*. C'est de ce sujet, qui fera l'objet de mes cours les prochaines années, que je parlerai pour conclure la partie scientifique de cette leçon.



**Figure 9**

La « boîte à photons » de l'ENS permet la réalisation d'expériences de pensée et la démonstration d'opérations simples de traitement quantique de l'information (photo : Steve Murez).

\*

- 30 Tous les signaux que nos machines informatiques échangent sont codés sous forme d'éléments discrets, les bits, qui sont à l'information ce que les atomes sont à la matière. Chaque bit peut prendre deux valeurs, 0 ou 1. Une séquence de bits décrit une lettre de l'alphabet, un texte, un morceau de musique, une image. L'interaction des bits entre eux permet de les additionner, de les multiplier et de réaliser par combinaison les calculs les plus complexes. Dans nos ordinateurs ou dans nos fibres optiques de télécommunication, les bits sont portés par des courants ou des faisceaux de lumière associés à des flux macroscopiques d'électrons ou de photons. Ce sont des bits classiques. La manipulation de systèmes microscopiques nous permet à présent d'envisager des machines où les bits seraient portés par un seul atome ou un seul photon, possédant deux états quantiques que l'on peut toujours appeler 0 et 1. On ouvrirait ainsi la voie, en principe, à un stockage extrêmement dense de l'information. Mais il y a plus.

Les bits quantiques peuvent, contrairement aux bits classiques, exister dans des superpositions des valeurs 0 et 1. La manipulation contrôlée des atomes et des photons apporte ainsi à la théorie de l'information la dimension nouvelle de la logique quantique, celle d'un monde où, contrairement à l'adage repris par Musset, une porte peut être ouverte *et* fermée, un chat à la fois vivant *et* mort, un bit prendre en même temps les valeurs 0 *et* 1.

- 31 La logique quantique promet par exemple d'être très utile en cryptographie, la science de l'échange secret de l'information qui est aussi ancienne que l'histoire de la diplomatie ou de la guerre. Pour se transmettre de façon secrète un message, deux partenaires que les informaticiens ont pris l'habitude d'appeler Alice et Bob, doivent simplement posséder chacun une copie aléatoire de 0 et 1, constituant une clé secrète aussi longue que le message qu'ils cherchent à échanger. Alice, en ajoutant terme à terme à chacun des bits du message un des bits de la clé, produit un texte codé qu'elle envoie à Bob par un moyen de communication public. Bob peut alors soustraire au message les bits de sa clé et ainsi le décoder. Aucun espion, aussi habile soit-il, ne peut le déchiffrer s'il ne possède une copie de la clé. Le partage confidentiel de la clé constitue ainsi le point crucial de l'opération.
- 32 C'est dans ce partage que la physique quantique a son mot à dire. Supposons qu'Alice produise des paires de particules intriquées dans un état de type EPR. Elle garde pour elle un élément de chaque paire et envoie l'autre à Bob. Les deux complices partagent ainsi un ensemble de systèmes quantiques non séparables. S'ils effectuent une mesure sur leurs particules, ils obtiennent chacun une suite aléatoire de 0 et de 1 et leurs deux suites sont parfaitement corrélées, en raison du lien quantique à distance des paires EPR. Si un espion cherche à mesurer la clé, en interceptant les particules envoyées par Alice à Bob, il perturbera nécessairement les corrélations entre leurs mesures, jouant en quelque sorte le rôle d'un environnement qui « décohère » les paires EPR. Il suffira alors à Alice et Bob de contrôler sur un petit échantillon

de la clé qu'aucune décorrélacion n'a eu lieu pour s'assurer du secret de leur ligne de communication. Ce protocole ingénieux a été déjà démontré par plusieurs groupes de recherche, et sa faisabilité prouvée sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Les particules intriquées sont alors des photons se propageant dans des fibres optiques.

33 Un bit quantique est un objet plus subtil que son cousin classique. Curieusement, son état est en général inconnu, et même fondamentalement inconnaissable. Bien sûr, s'il ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1, il n'est pas plus mystérieux qu'un bit classique. Mais que dire s'il est dans une superposition des valeurs 0 et 1 ? Peut-on connaître les amplitudes associées à ces valeurs si l'on n'a pas soi-même préparé le bit ? La réponse de la théorie est clairement *non*. Si l'on cherche à le mesurer, on trouvera la valeur 0 ou 1 avec une probabilité déterminée par ces amplitudes. Le bit sera cependant modifié par la mesure et on ne saura pas quel était son état antérieur. Est-ce à dire qu'un tel bit est inutile ? Là encore, la réponse est *non*. Il peut paraître étrange qu'une information inaccessible puisse être utile, mais c'est cependant le cas. Le bit quantique dans une superposition de 0 et 1 peut s'intriquer à d'autres bits, et donner lieu à des effets d'interférence conduisant à des mesures qui, elles, produiront une information utilisable.

34 Il peut donc être intéressant, même si l'on ne connaît pas son état, de transmettre entre deux points un bit quantique de façon à effectuer à distance des opérations sur lui. L'équivalent de cette opération en informatique classique est le *fax* bien connu. Alice fait lire par une machine une suite de 0 et de 1, qui la transmet par une ligne téléphonique à Bob. L'équivalent quantique est plus subtil à réaliser. Que peut faire Alice si ses bits sont des superpositions de 0 et de 1 qu'elle ne peut lire ? Ici encore l'intrication apporte la solution. De nouveau, Alice et Bob doivent tout d'abord partager un ensemble de paires EPR. Alice fait interagir son partenaire EPR avec chacun des bits qu'elle veut transmettre à Bob et effectue une mesure sur le système ainsi formé. Les corrélations EPR à distance font

que les particules de Bob sont immédiatement affectées par la mesure d'Alice. Il suffit qu'elle lui communique par un moyen classique le résultat de ses mesures pour que Bob puisse, en manipulant ses particules, reconstituer les états initiaux des bits d'Alice. Paradoxalement, ni Alice ni Bob ne connaissent les états de ces bits. Notons également que cette version quantique du fax, contrairement à la procédure classique, détruit l'original. Remarquons enfin que la méthode ne viole pas le principe de causalité. Le transfert d'information requiert en effet une communication classique entre Alice et Bob qui ne peut s'effectuer plus vite que la lumière. Ce procédé de fax quantique, imaginé il y a une dizaine d'année par des théoriciens de l'informatique, a été appelé *téléportation*. Je ne sais ce qui est le plus génial ici, du principe ou du nom choisi, mais le terme, avec sa connotation de science-fiction, a eu un énorme succès médiatique. L'expérience, sous des formes légèrement différentes de celle que je viens de décrire, a été réalisée dans plusieurs laboratoires.

35 Je ne peux achever ce survol sans parler de l'ordinateur quantique, de ses remarquables possibilités théoriques et de ses formidables difficultés de réalisation pratique. Tous les ordinateurs actuels, nous l'avons vu, fonctionnent grâce à une technologie fondée sur les propriétés quantiques des matériaux qui les composent. Les opérations qu'ils effectuent obéissent toutefois à une logique classique. Les portes de leurs circuits sont ouvertes ou fermées, jamais dans une superposition de ces deux états. Dans l'ordinateur quantique, il en irait autrement. On jonglerait avec des bits quantiques dans des superpositions d'états, on tricoterait entre eux de l'intrication. Une machine manipulant de tels bits évoluerait dans une gigantesque superposition d'états et serait ainsi, en un certain sens, équivalente à la somme d'un grand nombre de machines classiques calculant en parallèle. Certains calculs, extrêmement longs à accomplir sur un ordinateur classique, seraient beaucoup plus rapides sur une telle machine. L'exemple à ce jour le plus intéressant est celui de la factorisation des grands nombres, pour laquelle un algorithme

quantique a été découvert il y a quelques années, déclenchant l'engouement actuel pour les recherches sur le calcul quantique. La théorie de ces ordinateurs pose des problèmes subtils. L'information se trouve non pas dans les bits eux-mêmes, mais dans les corrélations qui s'établissent entre eux. Cette information se dévoile, à la fin, dans un signal d'interférence dans lequel les calculs menés en parallèle se trouvent en quelque sorte renforcés les uns par les autres.

- 36 Des opérations élémentaires de portes quantiques et d'intrication programmée de deux, trois ou quatre bits quantiques ont été réalisées récemment avec des atomes et des photons piégés. Des algorithmes simples, impliquant jusqu'à sept bits, ont été démontrés en manipulant par les méthodes de la résonance magnétique les moments magnétiques de molécules simples. Assembler ces éléments entre eux en grand nombre pour réaliser un ordinateur pratique présente cependant des difficultés énormes liées à la décohérence et le rêve du théoricien peut devenir le cauchemar de l'expérimentateur. Ce que l'on cherche à réaliser est en fait un gigantesque chat de Schrödinger calculateur. Le couplage avec l'environnement devient de plus en plus difficile à maîtriser lorsque la taille de la machine augmente. Très vite, l'information va se perdre dans l'environnement et les corrélations subtiles entre les bits quantiques vont se dégrader. Les théoriciens ont certes pu développer des procédés de correction très astucieux, permettant de détecter certains types d'erreur et de rétablir les intrications détruites. En principe, ces méthodes devraient suffire à résoudre le problème de la décohérence, pourvu que chaque élément de la machine atteigne un degré de fiabilité suffisant. En pratique, cependant, personne ne sait s'il existe des systèmes physiques permettant de réaliser ces conditions. Les atomes, les photons ou les molécules des expériences actuelles n'y suffiront certainement pas. On met des espoirs dans d'autres dispositifs, réalisés artificiellement dans des solides ou dans des circuits supraconducteurs. La décohérence dans ces dispositifs reste cependant à évaluer et à maîtriser.

37 Pour établir une analogie avec l'histoire des ordinateurs classiques, je dirai que les dispositifs actuels sont les équivalents des engrenages mécaniques des antiques machines de Pascal ou de Babbage. Leur faible fiabilité rendait impossible l'assemblage de ces éléments en nombre suffisant pour construire un ordinateur efficace. La solution est venue, nous l'avons vu, du transistor semi-conducteur. Existe-t-il dans la nature, attendant d'être découvert, l'équivalent de ce transistor pour l'ordinateur quantique ? Je ne peux répondre à cette question qui relève largement de la science-fiction. Je dirai simplement que si ce transistor fabuleux était découvert, il entraînerait une révolution allant bien au delà de la factorisation des grands nombres. Il permettrait en effet de construire des objets macroscopiques au comportement ouvertement quantique. Le chat de Schrödinger serait parmi nous et la frontière floue entre les mondes classique et quantique abolie. Peut-on prévoir cette révolution pour la fin de ce siècle comme certains s'y hasardent ? Les exemples de prédictions faites dans le passé nous incitent à la prudence. Même si l'ordinateur quantique n'est pas au bout du chemin, le mariage entre théorie de l'information et physique quantique est un champ d'étude passionnant. Les concepts issus de l'informatique vont nous aider à définir de façon quantitative la complexité quantique. La manipulation expérimentale précise de systèmes microscopiques permettra d'approfondir la connaissance de cette complexité. Il y aura des applications de ces recherches, et sans doute pas celles que nous attendons.

\*

38 Au terme de ce voyage à travers la physique quantique, je ne voudrais pas vous laisser une impression trop réductionniste. J'ai essayé de montrer que les lois quantiques sont essentielles à la compréhension de la nature et que la plupart des effets physiques dont nous dépendons dans notre vie quotidienne, depuis les mécanismes de la biologie jusqu'à ceux qu'utilise la technologie moderne, dépendent, à un certain niveau, de processus quantiques. Cela ne saurait cependant signifier que

notre compréhension du monde se réduise à ces concepts, que la physique macroscopique ne soit que la somme d'effets microscopiques. Il existe à l'échelle macroscopique des principes d'organisation de la matière dont il est illusoire de chercher l'explication par un calcul qui suivrait pas à pas l'évolution de chaque atome du système. Il faut adopter d'autres approches qui conduisent, dans la complexité du système étudié, à définir un petit nombre de paramètres essentiels et à ne rendre compte du microscopique sous-jacent que de façon globale. Ces approches font souvent émerger de nouveaux effets. Comprendre la nature nécessite donc l'utilisation d'une combinaison d'outils. Parmi ceux-ci la théorie quantique est nécessaire, elle n'est pas suffisante. Ceci est encore plus vrai lorsqu'on aborde la chimie, la biologie ou les neurosciences, qui font appel à d'autres approches conceptuelles. Je doute par exemple que les lois quantiques puissent, comme certains l'ont avancé, être d'une quelconque utilité pour expliquer les phénomènes cérébraux à l'origine de la conscience.

- 39 J'ai insisté dans cette leçon sur les succès remarquables de la physique au cours du dernier siècle. Paradoxalement, ses succès sont parfois utilisés contre elle pour en annoncer la fin. On entend par exemple souvent dire que la biologie a remplacé la physique aux frontières du savoir. L'idée que, ayant accompli son programme, la physique est une science achevée, qui ne serait plus là que pour produire des instruments utiles aux autres sciences, est aussi inexacte aujourd'hui qu'il y a cent ans. Souvenons-nous des deux petits nuages de Lord Kelvin. Nul ne saurait dire si la théorie quantique sous sa forme actuelle est là pour toujours, ou si elle sera remplacée par une autre construction, englobant ses concepts dans un formalisme plus général et plus puissant. Ce qui est sûr, c'est qu'il est toujours présomptueux de sous-estimer les capacités de la nature à nous surprendre. L'incompatibilité présente de la théorie quantique avec la gravitation est peut-être l'un des nuages qui va nous contraindre à remettre l'édifice en cause. Ou peut-être la surprise viendra-t-elle de la cosmologie avec la

masse manquante de l'Univers. Il existe sans doute, même à l'échelle humaine, encore beaucoup de phénomènes insoupçonnés d'organisation du complexe, attendant d'être découverts. Et nul ne sait quelles applications verront le jour, qui nous paraîtraient aussi incroyables qu'un ordinateur portable l'aurait été à Marcelin Berthelot.

\*

40 Décrire l'évolution d'une discipline, poser les questions fécondes qui font avancer la réflexion, rendre compte de l'enthousiasme, mais aussi des doutes et des interrogations de la recherche, voici les buts que vous vous assignez tous, mes chers collègues, dans vos enseignements du Collège de France. La tâche est difficile car – qu'il s'agisse de physique quantique ou d'égyptologie – il n'y a ni recette, ni public captif dont l'assiduité serait encouragée par la poursuite d'un diplôme. Il n'y a que des auditeurs libres, partageant un même intérêt et une même exigence. Chaque professeur aborde cette tâche avec sa personnalité, façonnée par ses rencontres et son expérience singulière. Il est de tradition de conclure une leçon inaugurale en faisant allusion à ce trajet personnel.

41 Je commencerai par évoquer la mémoire de mes parents qui m'ont très tôt encouragé à la réflexion, suivant avec attention mes études même lorsque, devenant scientifiques, elles s'écartèrent des références qui leur étaient familières. Je voudrais aussi parler de celle qui partage ma vie depuis plus longtemps que la physique... Je ne m'attarderai pas sur ces éléments d'histoire personnelle qui relèvent du for intérieur et de la sphère privée. Ce sont là des domaines que la physique, fût-elle quantique, ne saurait éclairer, et que – suivant une division du travail entre nous – étudie précisément depuis longtemps ma femme, Claudine.

42 Je me suis familiarisé avec les atomes à l'École normale dans les années 1960. Venant pour ainsi dire du XIX<sup>e</sup> siècle – je veux dire de l'enseignement classique des classes préparatoires –, je fus immédiatement projeté dans le monde quantique par les cours de troisième cycle de maîtres exceptionnels. Alfred Kastler nous décrivait avec lyrisme la danse des moments



cinétiques atomiques et donnait aux atomes et aux photons une existence quasi-poétique. Jean Brossel nous remettait les pieds sur terre en décrivant les grandes expériences qui ont permis d'établir les concepts quantiques, nous insufflant l'austère passion de la précision. Et Claude Cohen-Tannoudji nous dévoilait avec une clarté et une profondeur extraordinaires le formalisme de la théorie. J'ai gardé le souvenir de trois livres dévorés à cette époque. Le *Mécanique quantique* d'Albert Messiah, où j'ai vraiment compris la profondeur et la beauté de la théorie ; le *Principes du magnétisme nucléaire* d'Anatole Abragam, qui m'a initié au monde subtil des moments magnétiques atomiques ; le cours de physique générale de Feynman, qui fut une illumination. C'était l'époque où s'inventaient les diverses méthodes optiques de manipulation des atomes. Les cours trouvaient immédiatement une illustration dans la réalité de tous les jours du laboratoire de l'ENS où je fis ma thèse sous la direction enthousiaste de Claude Cohen-Tannoudji.

43 J'eus ensuite l'occasion d'être exposé à l'ambiance anglo-saxonne de la recherche à Stanford, dans le laboratoire d'Arthur Schawlow, l'un des inventeurs du laser, où j'accomplis un stage postdoctoral. On était loin de la rigueur théorique des cours que je venais de suivre à Paris. On s'y amusait par contre beaucoup avec ces merveilleux jouets qu'étaient les lasers accordables que les compagnies commerciales de ce qui allait devenir la Silicon Valley fournissaient alors en première exclusivité aux laboratoires californiens. L'enthousiasme d'Art Schawlow était communicatif. Chaque jour, une nouvelle idée jaillissait, souvent farfelue, parfois géniale. Il y eut le premier laser « comestible » le jour où il eut l'idée de faire laser ces horribles gelées alimentaires de couleurs criardes dont il faisait ses délices, mais aussi tant de démonstrations de méthodes spectroscopiques astucieuses, reculant à chaque fois les limites de la précision et de la sensibilité des mesures. Art avait un profond sens de l'humour, que je crois essentiel au maintien d'une saine ambiance dans un laboratoire. « Pour réussir dans

la recherche », disait-il souvent, « il ne faut pas tout savoir sur tout, il suffit de savoir une chose que les autres ignorent ». Cette phrase, énoncée avec sa gentillesse et son rire communicatif, faisait beaucoup pour nous soulager du poids intimidant du savoir universel, si souvent inhibant, soit qu'il décourage, soit qu'il conduise à une attitude trop sceptique sur le monde et les découvertes qui restent à y faire.

44 J'ai eu la chance dans ma carrière d'avoir des étudiants exceptionnels, dont deux sont devenus de proches collaborateurs. Ma présence ici aujourd'hui est pour une large part due à la reconnaissance du travail collectif de l'équipe que Jean-Michel Raimond, Michel Brune et moi-même animons à l'ENS. Je tiens à leur dire publiquement tout le plaisir que j'ai pris au cours de ces années à travailler avec eux dans une atmosphère pleine de confiance, d'esprit critique, d'imagination et d'humour. Je voudrais également mentionner ce que je dois à l'ambiance stimulante de l'ENS, aux échanges avec des collègues qui partagent la même passion de la recherche et de l'enseignement. Sans oublier les étudiants qui, par leur vision toujours nouvelle du monde, nous conduisent à remettre sans cesse en question notre savoir et la façon de le transmettre.

45 Mon métier – c'est un de ses grands avantages – m'a donné l'occasion de faire connaissance de nombreux collègues étrangers et de partager avec eux une même passion, dans la diversité de nos expériences. Certains, qui sont devenus des amis très proches, me font le plaisir d'être ici aujourd'hui. Mon enseignement des prochaines années me donnera, je l'espère, l'occasion d'approfondir encore nos liens. Dans une époque incertaine, où la globalisation des échanges s'accompagne d'espoirs et de craintes inévitablement intriqués, s'il est un domaine où la mondialisation est sans conteste positive et enrichissante, c'est bien celui de la réflexion et de la recherche.

**Auteur**

***Serge Haroche***

# Professeur au Collège de France, chaire de Physique quantique. Prix Nobel de Physique 2012.

*Du même auteur*

**Physique quantique, Collège de  
France, 2004**

**Quantum Physics, Collège de  
France, 2013**

**Introduction in *La matière noire  
dans l'Univers*, Collège de  
France, 2016**

**Tous les textes**

© Collège de France, 2004

Conditions d'utilisation : <http://www.openedition.org/6540>

## ***Référence électronique du chapitre***

HAROCHE, Serge. *Physique quantique : Leçon inaugurale prononcée le jeudi 13 décembre 2001* In : *Physique quantique : Leçon inaugurale prononcée le jeudi 13 décembre 2001* [en ligne]. Paris : Collège de France, 2004 (généré le 24 janvier 2021). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/cdf/527>>. ISBN : 9782722602694. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.cdf.527>.

## ***Référence électronique du livre***

HAROCHE, Serge. *Physique quantique : Leçon inaugurale prononcée le jeudi 13 décembre 2001*. Nouvelle édition [en ligne]. Paris : Collège de France, 2004 (généré le 24 janvier 2021). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/cdf/525>>. ISBN : 9782722602694. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.cdf.525>.

Compatible avec Zotero

# Physique quantique

**Leçon inaugurale prononcée le jeudi  
13 décembre 2001**

Serge Haroche

*Ce livre est cité par*

Liogier, Raphaël. (2017) Convergence(s) et singularité(s): À propos des deux concepts clés de l'eschatologie transhumaniste. *Social Compass*, 64. DOI: [10.1177/0037768616685013](https://doi.org/10.1177/0037768616685013)