

Une affaire de «plomberie»

Pour un plombier expérimenté, la prostate serait sans doute qualifiée de travail d'apprenti, parce que l'urètre, qui part de la vessie, la traverse. Cette configuration a peut-être des avantages que l'on ignore encore, mais elle entraîne des troubles urinaires chez les hommes âgés, tels une fai-

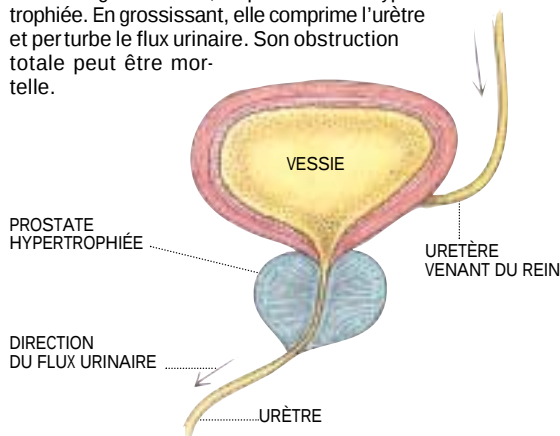
blesse du jet urinaire et un besoin fréquent d'uriner. Les femmes ont aussi des problèmes de «plomberie», notamment d'incontinence. L'évolution aurait évité bien des désagréments aux hommes et aux femmes si elle avait imaginé quelques modifications anatomiques simples.

LA PROSTATE DE L'HOMME Vue latérale

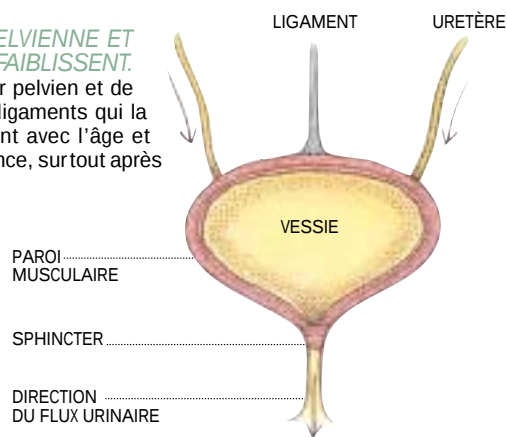
LA VESSIE DE LA FEMME Vue de face

Défauts

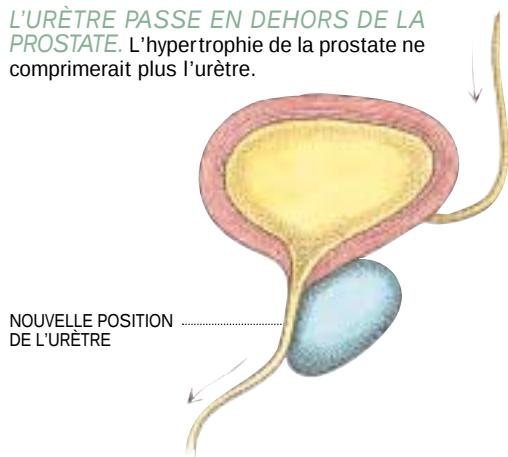
RÉTRÉCISSEMENT DE L'URÈTRE. Chez un homme âgé sur deux, la prostate est hypertrophiée. En grossissant, elle comprime l'urètre et perturbe le flux urinaire. Son obstruction totale peut être mortelle.



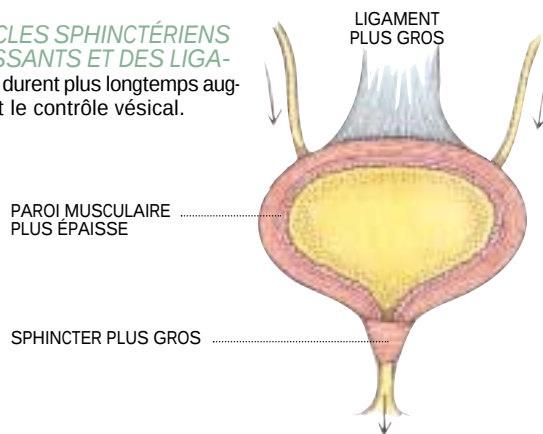
LA MUSCULATURE PELVIENNE ET LES LIGAMENTS S'AFFAIBLISSENT. Les muscles du plancher pelvien et de la vessie, ainsi que les ligaments qui la soutiennent, se relâchent avec l'âge et entraînent une incontinence, surtout après plusieurs grossesses.



L'URÈTRE PASSE EN DEHORS DE LA PROSTATE. L'hypertrophie de la prostate ne comprimerait plus l'urètre.



DES MUSCLES SPHINCTÉRIENS PLUS PUISSANTS ET DES LIGAMENTS qui durent plus longtemps augmenteraient le contrôle vésical.



Solutions

Jay Olshansky est professeur à l'Université de Chicago, où travaille aussi Bruce Carnes. Robert Butler est président du Centre international de longévité, à New York.

D'Arcy WENTWORTH THOMPSON, *On Growth and Form*, Expanded edition, 1942. (Reprinted by Dover Publication, 1992).

Stephen Jay GOULD et W.W. NORTON, *The Panda's Thumb : More Reflections in Natural History*, 1980.

Richard DAWKINS et W. W. NORTON, *The Blind Watchmaker : Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design*, 1986.

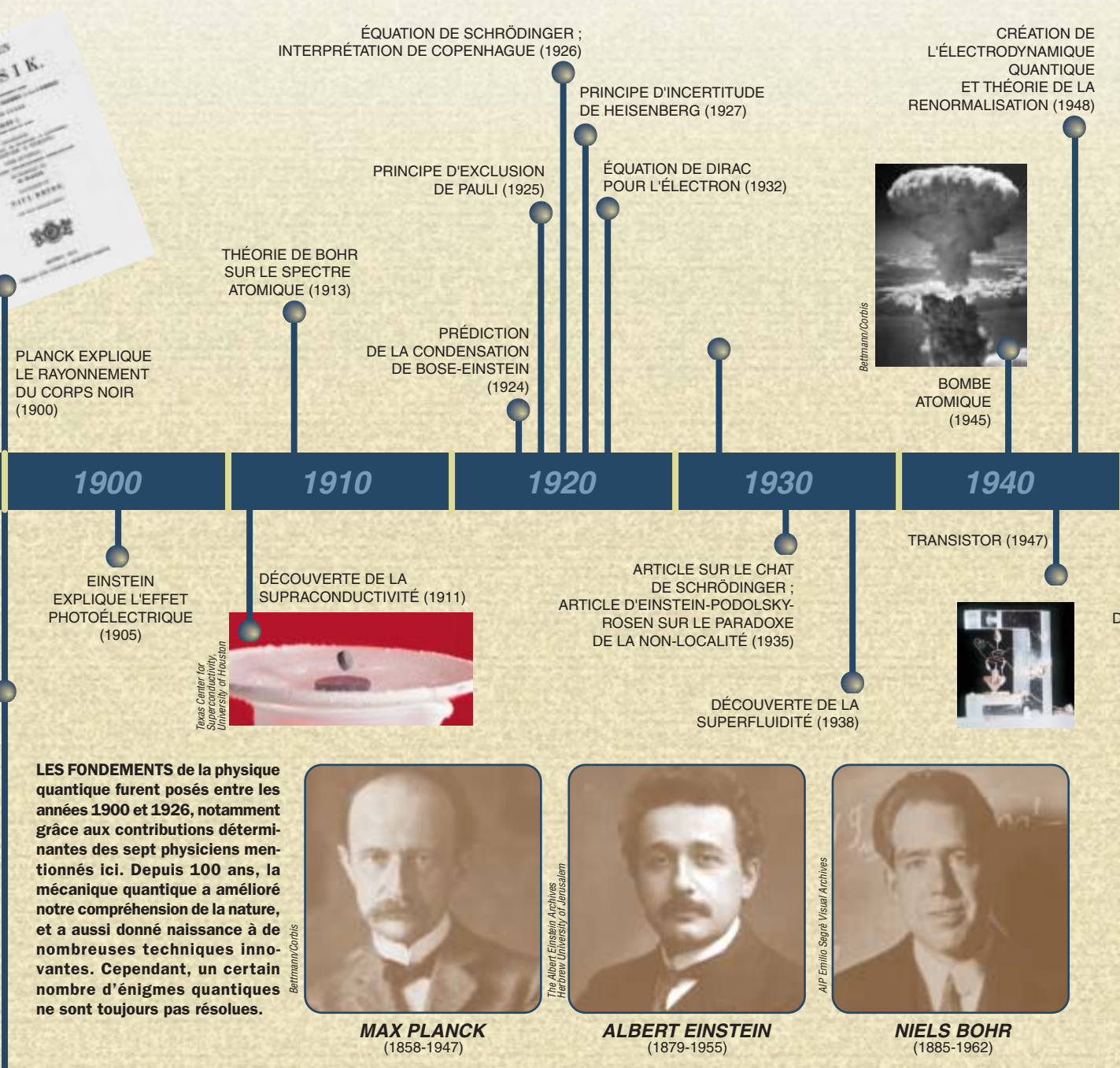
Elaine MORGAN, *The Scars of Evolution : What our Body Tell Us about Human Origins*, Souvenir Press, 1990. (Reprinted by Oxford University Press, 1994.)

Randolph M. NESSE et George C. WILLIAMS, *Why We Get Sick : The New Science of Darwinian Medicine*, 1994.

100 ANS de mystères quantiques

MAX TEGMARK • JOHN ARCHIBALD WHEELER

Alors que la théorie quantique fête son centième anniversaire, les succès spectaculaires le disputent aux énigmes persistantes.



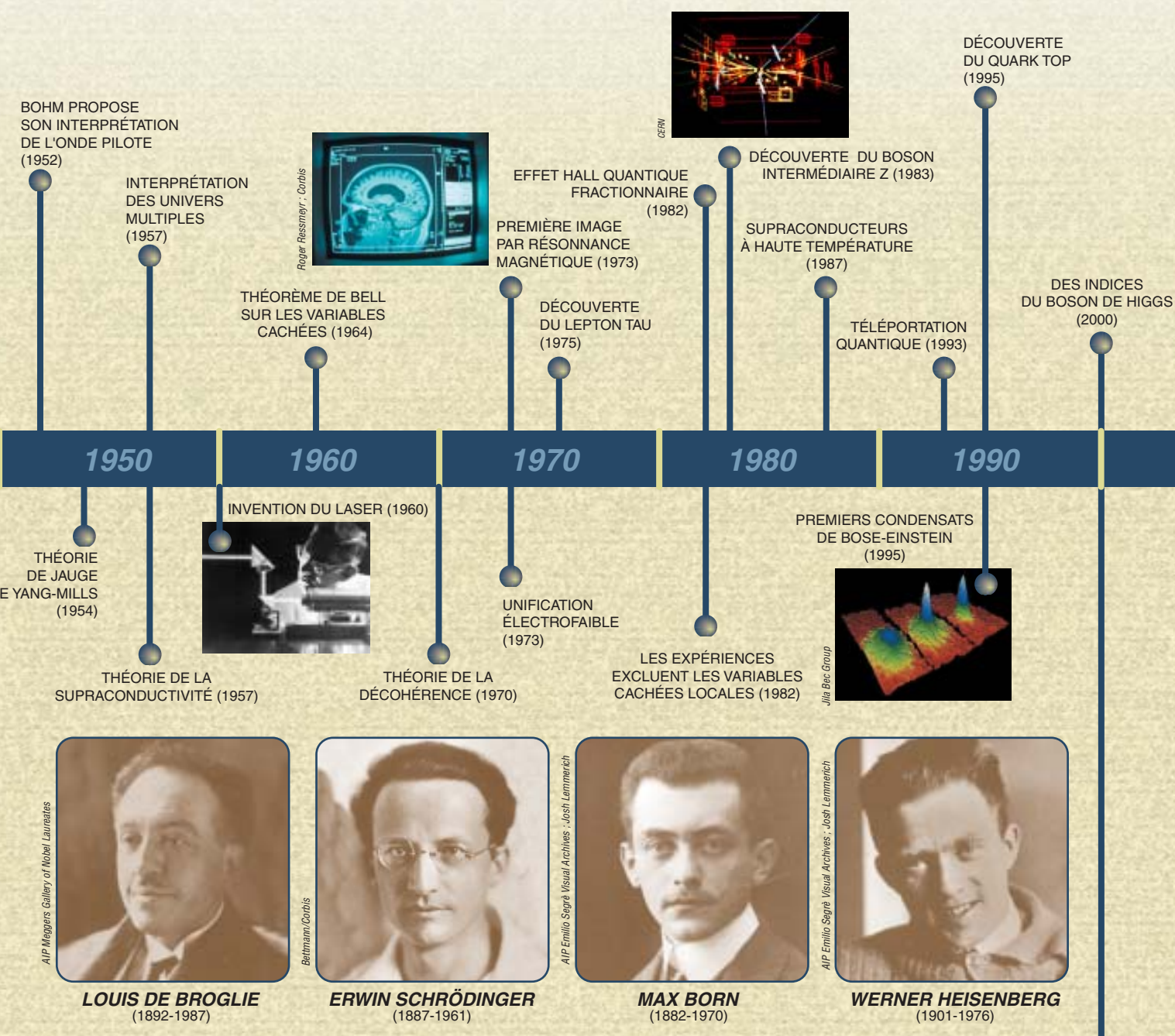
« **D**’ici quelques années, toutes les grandes constantes physiques auront été estimées... Le seul travail qui restera alors aux hommes de sciences sera d’améliorer leurs précisions. » Tandis que, dans le brouhaha des commentaires sur les réussites du siècle passé, nous entrons dans le XXI^e siècle, cette citation semble d’actualité... à ceci près qu’elle est due au physicien écossais James Maxwell qui la prononça, en 1871, pour inaugurer son cours à l’Université de Cambridge ; il exprimait le sentiment général des physiciens de son temps. Trente ans plus tard, le 14 décembre 1900, Max Planck

publia sa formule sur le spectre du corps noir : le premier coup de la révolution quantique était tiré.

Depuis, 100 ans se sont écoulés, plusieurs mystères persistent, et des débats continuent à agiter la communauté scientifique : quelles sont les conséquences de la mécanique quantique dans des domaines tels que le calcul quantique, les univers parallèles, la conscience ou encore la nature même de la réalité physique ? Sur le plan pratique, nous mesurons mal à quel point les apports pratiques et scientifiques de la mécanique quantique sont immenses : environ 30 pour cent de la production de l’Europe et des États-

Unis dérivent d’inventions qui en sont issues ; cela va des semi-conducteurs des circuits intégrés aux lasers en passant par les lecteurs de disques compacts et l’imagerie médicale par résonance magnétique, etc.

En 1871, les physiciens avaient toutes les raisons d’être optimistes. La mécanique classique et la théorie de l’électromagnétisme avaient stimulé la révolution industrielle, et ils avaient l’impression que leurs équations fondamentales pouvaient décrire la quasi-totalité des systèmes physiques. À quelques petits détails fâcheux près... Ainsi, quand ils calculaient le spectre de la lumière émise par un objet chaud

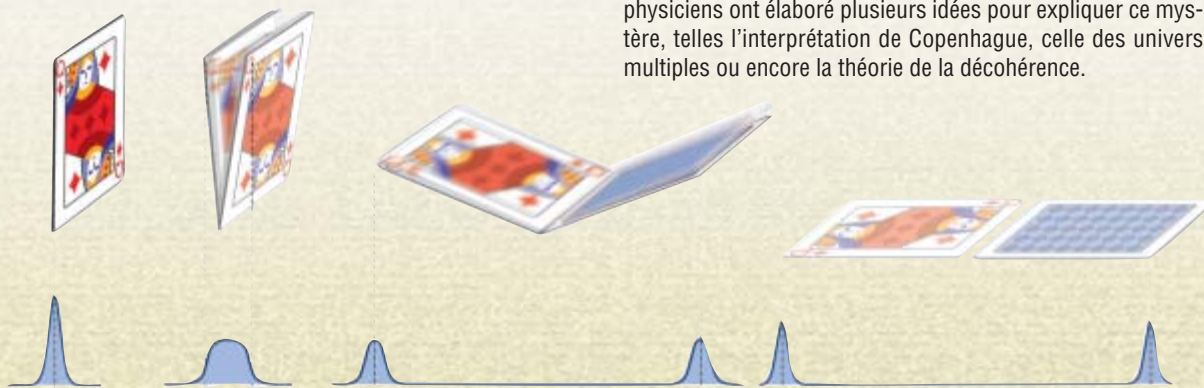


Des cartes quantiques

Interprétée du point de vue quantique, la chute d'une carte à jouer est un phénomène mystérieux.

En théorie quantique, une carte parfaite posée sur la tranche tombe des deux côtés à la fois quand on la lâche ; une fois tombée, elle est dans un état de superposition. La fonction d'onde quantique de la carte (*en bleu*) passe uniformément et continûment de l'état d'équilibre instable (*à gauche*) à un état final d'équilibre aux caractéristiques étonnantes (*à droite*) : la carte y est présente sur ses deux côtés à la fois ! En pratique,

une telle expérience est impossible avec un objet macroscopique, telle une carte, mais ce type de situations a été mis en évidence avec des particules, des électrons, des atomes et même avec des objets plus gros. Quelle est la signification de telles superpositions quantiques d'états ? Pourquoi n'en observons-nous pas dans notre monde macroscopique ? C'est là le mystère central de la mécanique quantique. Avec le temps, les physiciens ont élaboré plusieurs idées pour expliquer ce mystère, telles l'interprétation de Copenhague, celle des univers multiples ou encore la théorie de la décohérence.



Laurie Grace

(un corps noir) en se plaçant dans le cadre classique, ils ne retrouvaient pas le spectre mesuré. Les calculs prédisaient même une absurde «catastrophe ultraviolette», c'est-à-dire une intense émission de rayons ultraviolets et X, susceptible d'aveugler quiconque regarderait, par exemple... un poêle !

Le désastre de l'hydrogène

Dans un article daté de l'année 1900, Planck donna l'expression correcte du spectre du corps noir. Toutefois, sa démonstration s'appuyait sur une hypothèse tellement étrange que lui-même la renia pendant plusieurs années : il avait dû admettre que son corps noir n'émettait de l'énergie que par petites bouffées, par «quanta». Cette singulière hypothèse allait se révéler extrêmement fructueuse. En 1905, Albert Einstein poussa l'idée un peu plus loin. Il voulait expliquer l'effet photoélectrique, utilisé aujourd'hui dans les cellules photoélectriques et dans les capteurs des caméras numériques (CCD) : il supposa que le rayonnement électromagnétique transporte, lui aussi, l'énergie par petits grains, les photons.

Dès 1911, les physiciens furent confrontés à une autre difficulté : Ernest Rutherford les avait convaincus que les atomes sont constitués d'électrons

en rotation autour de noyaux chargés positivement, à la façon de minuscules systèmes solaires. Toutefois, la théorie classique de l'électromagnétisme de Maxwell stipulait qu'une particule chargée en mouvement perd de l'énergie par rayonnement. Ainsi, les électrons en orbite autour du noyau auraient dû perdre leur énergie en moins d'un millionième de millionième de seconde et être «aspirés» par le noyau. Impossible, puisque les atomes d'hydrogène sont stables. C'était le pire des camouflets que la physique avait jamais subi, puisque l'électromagnétisme prédisait la durée de vie des atomes d'hydrogène avec une erreur de 40 ordres de grandeur !

En 1913, le Danois Niels Bohr vint travailler avec Rutherford à l'Université de Manchester, et trouva une explication qui, une fois encore, faisait appel aux quanta. Il postula que le moment angulaire des électrons ne pouvait prendre que certaines valeurs bien précises, ce qui confinait les électrons sur quelques orbites discrètes (aux énergies bien précises). Les électrons ne peuvent plus libérer de l'énergie qu'en sautant de leur orbite vers une orbite inférieure : ils émettent alors un photon. Ce modèle expliquait aussi la stabilité de l'atome d'hydrogène : un électron parvenu sur l'orbite la plus

basse y reste, car il ne peut plus sauter sur une orbite d'énergie inférieure.

Ce «modèle de Bohr» expliquait non seulement la stabilité atomique, mais aussi la structure du spectre de cet élément, c'est-à-dire les fréquences spécifiques d'émission des atomes d'hydrogène excités. Il s'appliquait aussi à l'hélium, mais seulement quand cet atome était dépourvu de l'un de ses deux électrons.

De retour à Copenhague, Bohr reçut une lettre de Rutherford l'enjoignant de publier ses résultats. Il répondit à Rutherford que personne ne le croirait tant qu'il n'aurait pas réussi à expliquer le spectre de tous les éléments. «Bohr, vous expliquez l'hydrogène et vous expliquez l'hélium, et l'on vous croira pour le reste», insista Rutherford.

Malgré les premiers succès de l'idée quantique, les étranges règles de quantification embarrassaient les physiciens du début des années 1920, car aucune loi générale ne s'appliquait. En 1923, Louis de Broglie en proposa une dans sa thèse de doctorat. Il considérait que les électrons et les autres particules se comportent comme des ondes stationnaires. De telles ondes, tout comme les oscillations d'une corde de guitare, ont des fréquences discrètes (quantifiées), c'est-à-dire qui ne prennent que des valeurs bien précises. L'idée était

tellement inhabituelle que le jury d'examen sollicita des avis extérieurs. Consulté, Einstein donna un avis favorable, et la thèse fut acceptée.

En novembre 1925, Erwin Schrödinger vint donner un séminaire à Zurich sur les travaux de Louis de Broglie. Quand il eut terminé, Peter Debye lui demanda : « Vous parlez d'ondes, mais où est l'équation d'onde ? » Schrödinger se mit au travail, et c'est alors qu'il élaborait sa célèbre équation, devenue le fondement de tant de domaines de la physique moderne. Peu de temps après, Max Born, Pascual Jordan et Werner Heisenberg donnèrent une formulation équivalente de la théorie quantique, sous forme matricielle. Une fois ces solides fondements mathématiques établis, la mécanique quantique fit des progrès fulgurants. En quelques années, les physiciens expliquèrent une multitude de résultats expérimentaux, y compris dans les spectres d'atomes plus compliqués et dans les réactions chimiques.

Que signifiait tout cela ? Quelle était cette « fonction d'onde », que décrivait l'équation de Schrödinger ? Aujourd'hui encore, ce concept de la mécanique quantique est controversé.

Born avait compris que la fonction d'onde devait être interprétée en termes de probabilités. Quand les expérimentateurs déterminent la position d'un électron, la probabilité qu'ils le trouvent en un endroit donné dépend de l'amplitude de la fonction d'onde en ce lieu (en fait, du carré de cette amplitude). Ainsi, le hasard semblait érigé au rang de loi de la nature. Einstein appréciait peu cette idée et il exprima sa préférence pour un Univers déterministe par cette célèbre formule : « Je ne peux pas croire que Dieu joue aux dés. »

Chats bizarres et cartes quantiques

Schrödinger lui aussi était réticent. Les fonctions d'onde décrivaient des combinaisons d'états différents, que l'on nomme des superpositions. Un électron, par exemple, pouvait se trouver dans une superposition de plusieurs localisations. Schrödinger fit remarquer que si des objets microscopiques, tels que des atomes, peuvent se trouver dans des superpositions, il pourrait en être de même pour des objets macroscopiques, puisque ceux-ci sont constitués d'atomes. Pour illustrer cette

idée, il imagina une expérience, restée célèbre depuis, où un dispositif pervers tue un chat si (et seulement si) un atome instable se désintègre. Comme l'atome radioactif va se trouver dans une superposition d'un état désintégré et d'un état non désintégré, il produit un chat à la fois vivant et mort, en superposition des deux.

On peut imaginer une variante simple de cette expérience imaginaire. Vous prenez une carte à jouer que vous placez en équilibre sur la tranche. En physique classique, une telle carte reste, en principe, indéfiniment en équilibre. En revanche, l'équation de Schrödinger prédit que la carte tombera en quelques secondes (quels que soient vos efforts pour la maintenir en équilibre) et, qui plus est, qu'elle tombera des deux côtés à la fois dans une superposition d'un état « vers la gauche » et d'un état « vers la droite ».

Bien sûr, en physique classique, la carte tombe aléatoirement soit vers la droite, soit vers la gauche, mais jamais à la fois « vers la droite et vers la gauche », comme semble l'indiquer l'équation de Schrödinger. Manifestement, un système aussi macroscopique qu'une carte « refuse » de rester dans un état de superposition quantique. Il y a là une contradiction apparente qui est au cœur de l'un des principaux mystères de la mécanique quantique.

L'interprétation de la mécanique quantique dite « de Copenhague » est née des discussions qui eurent lieu entre Bohr et Heisenberg à la fin des années 1920 ; elle traite le mystère quantique en question en supposant que les observations ou les mesures ont un rôle très spécial. Tant que l'on n'observe pas la carte qui tombe, sa fonction d'onde évolue en obéissant à l'équation de Schrödinger. Les physiciens qualifient cette évolution régulière et continue d'« unitaire ». Le caractère unitaire de l'évolution produit une superposition quantique qui fait tomber la carte à la fois vers la droite et vers la gauche ; toutefois, au moment où l'on observe le système, la fonction d'onde subit un changement brusque vers un des états interprétables classiquement. C'est ce que l'on appelle la réduction de la fonction d'onde. Un observateur voit la carte dans un état bien défini (soit à droite, soit à gauche) et, dès lors, seule la composante de la fonction d'onde correspondant à cet état classique subsiste. Tout se passe comme si la nature sélectionnait au hasard l'un des états possibles, selon une probabilité imposée par la fonction d'onde.

L'interprétation de Copenhague fournissait une « recette » étonnamment efficace pour des calculs dont

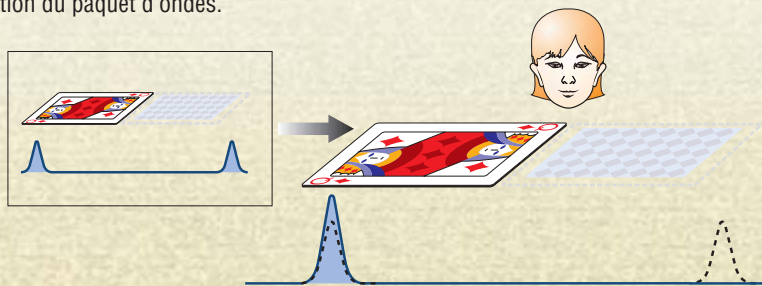
L'interprétation de Copenhague

IDÉE : Les observateurs voient des résultats au hasard ; les probabilités correspondantes sont données par la fonction d'onde.

AVANTAGE : On n'observe qu'un unique résultat, et il est observable.

INCONVÉNIENT : On suppose l'existence d'un mécanisme de « réduction » de la fonction d'onde, sans qu'aucune équation précise quand et comment il se met en place.

Quand nous mesurons l'état d'un système placé dans une superposition quantique de deux états observables, nous obtenons l'un ou l'autre des deux états de la superposition, et la probabilité est imposée par la fonction d'onde. Une personne pariant que la carte tombe vers la droite a une chance sur deux de gagner. Les physiciens acceptent cette interprétation avec pragmatisme, même si elle implique que la fonction d'onde change brusquement, subissant une réduction du paquet d'ondes.



Laurie Grace

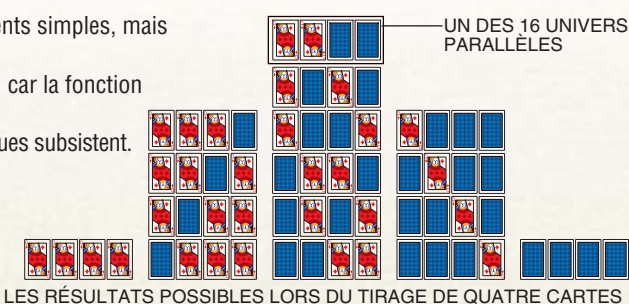
L'interprétation des univers parallèles

IDÉE : Les superpositions apparaissent comme des événements simples, mais aux yeux d'habitants d'univers parallèles.

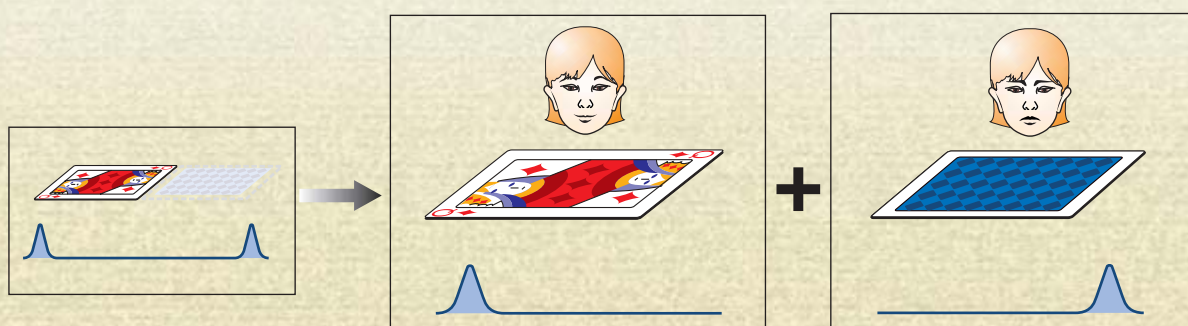
AVANTAGES : L'équation de Schrödinger s'applique toujours, car la fonction d'onde n'est jamais réduite.

PROBLÈMES : L'idée est étrange, et certaines difficultés techniques subsistent.

En l'absence d'une réduction du paquet d'ondes, l'équation de Schrödinger prévoit que la personne qui regarde une carte à jouer dans un état superposé entre elle-même dans une superposition de deux états mentaux : un état heureux où elle a gagné son pari et un état malheureux où elle a perdu. Ces deux composantes de la fonction d'onde totale (celle du système carte-personne) évoluent de façon indépendante, comme si elles appartenaient à deux univers parallèles. Quand l'expérience est répétée, les habitants de la majorité des uni-



vers parallèles voient tomber la carte du côté face environ la moitié du temps. L'arrangement des cartes (*en haut à droite*) montre les 16 univers parallèles obtenus lors du tirage simultané de quatre cartes.



les prédictions s'accordaient avec précision aux résultats des expériences. Toutefois, on se demandait vaguement si une équation encore inconnue ne décrivait pas quand et comment la réduction se produit. Certains physiciens interprétaient l'absence de cette équation comme l'indication d'une erreur de la mécanique quantique, laquelle serait bientôt remplacée par une théorie meilleure comblant ce manque. Aussi, plutôt que de s'appesantir sur les conséquences ontologiques des équations, la plupart des physiciens passèrent outre pour se consacrer à de multiples applications passionnantes ou aux problèmes non résolus de la physique nucléaire.

Cette approche pragmatique se montra fructueuse. Grâce à la mécanique quantique, on put prédire l'antimatière, comprendre la radioactivité (et maîtriser l'énergie nucléaire), expliquer le comportement des solides, tels les semi-conducteurs (d'où est née l'électronique), prévoir la supraconductivité, décrire les interactions de la lumière et de la matière (aboutissant à la découverte des lasers) ou celles

des ondes radio et des noyaux d'atomes (conduisant à l'imagerie médicale par résonance magnétique), etc. De nombreux succès de la théorie quantique font intervenir l'un de ses prolongements : la théorie quantique des champs ; cette théorie est le fondement de la physique des particules, et ce depuis l'origine jusqu'aux défis expérimentaux actuels que sont les oscillations de neutrinos, la recherche du boson de Higgs et la supersymétrie.

Des univers parallèles

Après une telle moisson de succès, il devint clair, au début des années 1950, que la théorie quantique était bien plus qu'un bricolage théorique temporaire. Ainsi, vers le milieu de la décennie, Hugh Everett, à l'Université de Princeton, décida de réexaminer le postulat de la réduction du paquet d'ondes dans sa thèse de doctorat. Il poussa l'idée quantique à sa limite en se demandant ce qui se passerait si l'évolution de l'Univers restait unitaire. En effet, si la mécanique quantique suffit pour décrire

l'Univers, l'état de celui-ci peut être représenté par une fonction d'onde (d'une extraordinaire complexité). Pour Everett, cette fonction d'onde devait évoluer d'une façon déterministe, ce qui excluait le mystérieux phénomène non unitaire de la réduction du paquet d'ondes : Dieu ne jouerait pas aux dés.

Au lieu de subir une réduction, les états de superposition d'un système microscopique s'amplifieraient rapidement au cours de la mesure jusqu'à donner des superpositions macroscopiques. Ainsi, la carte quantique évoquée plus haut serait vraiment à deux endroits à la fois. En outre, une personne qui la regarderait entrerait elle aussi dans une superposition de deux états mentaux différents, chacun ayant perçu l'un des résultats. Si vous aviez parié que la reine tomberait à l'endroit, vous vous retrouveriez dans une superposition d'un état de satisfaction et d'un état de déception. La brillante idée d'Everett a été de dire que les observateurs de ce monde quantique, aussi déterministe que schizophrène, percevraient pourtant la bonne vieille réalité univoque à

La décohérence, ou comment le quantique devient classique

IDÉE : Même d'infimes interactions du système étudié avec son voisinage immédiat suffisent à dissiper rapidement le caractère quantique d'un état de superposition.

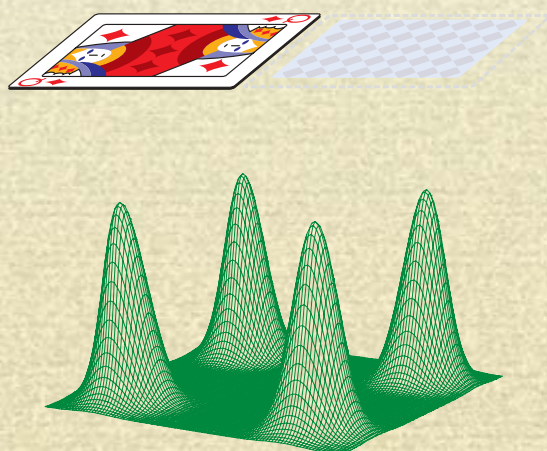
AVANTAGES : Cette idée peut être testée expérimentalement. Elle pourrait expliquer pourquoi le monde environnant nous apparaît classique et non quantique.

AVERTISSEMENT : Le phénomène de décohérence n'élimine pas le besoin d'une interprétation de la mécanique quantique, par exemple l'interprétation de Copenhague ou celle des univers parallèles.

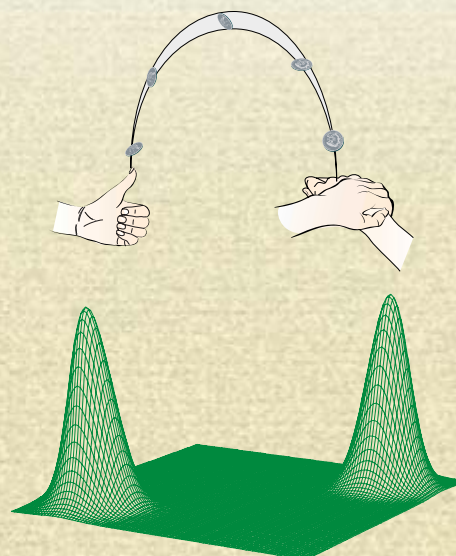
L'incertitude statistique qu'engendre un état de superposition quantique (*à gauche*) diffère de celle qu'engendre une situation classique, comme un tirage à pile ou face (*à droite*). Cela se traduit formellement par un objet mathématique qu'on appelle opérateur densité. Ainsi, la fonction d'onde d'une carte quantique dans un état superposé se déduit d'un opérateur densité à quatre pics. Deux d'entre eux représentent la probabilité

quantique de voir la carte tomber soit pile soit face ; les deux autres pics indiquent que les deux derniers états peuvent en principe interférer, mais l'état quantique reste cohérent. En revanche, l'opérateur densité d'un tirage à pile ou face ne présente que les deux premiers de ces pics, ce que l'on interprète en disant que la pièce est soit pile soit face, même si l'on n'a pas encore vérifié.

INCERTITUDE QUANTIQUE

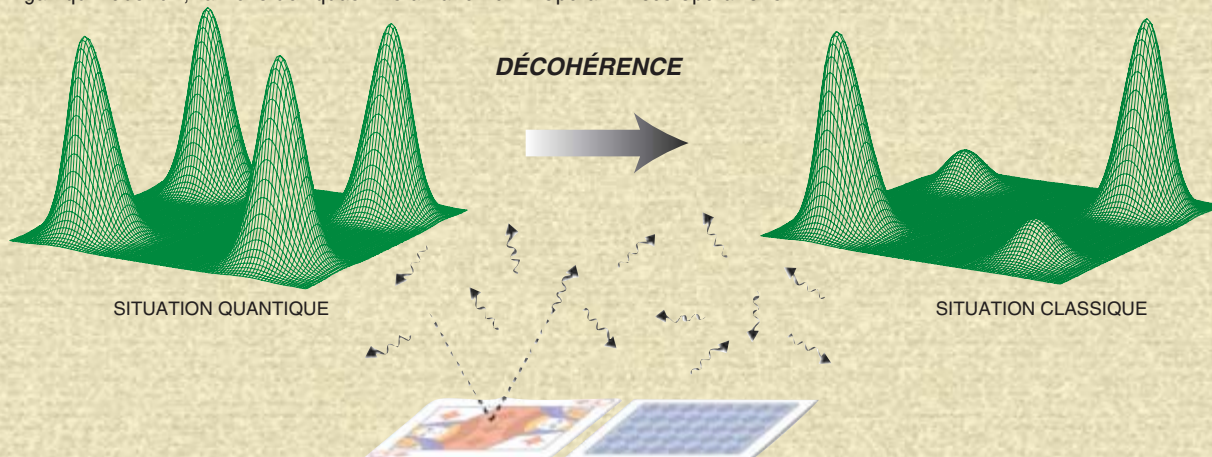


INCERTITUDE CLASSIQUE



La théorie de la décohérence révèle qu'une interaction, même infime, avec l'environnement, par exemple la réflexion d'un unique photon sur la surface de la carte ou une molécule de gaz qui rebondit, fait évoluer quasi instantanément l'opé-

teur densité d'un système quantique vers une forme très proche de l'opérateur densité classique d'un tirage à pile ou face. L'équation de Schrödinger s'applique tout au long de ces opérations.



laquelle nous sommes accoutumés. Qui plus est, ils observeraient un hasard apparent, obéissant à des lois de probabilité classiques.

Le point de vue d'Everett – de son vrai nom, la formulation des états relatifs – est plus connu sous le nom d'interprétation des univers parallèles de la mécanique quantique, car chacune des composantes d'un état mental superposé ne perçoit que le monde auquel elle appartient. Selon Everett, il n'y aurait jamais de réduction de la fonction d'ondes, mais, à chaque mesure, l'Univers se scinderait en autant d'univers parallèles qu'il est possible, chaque univers parallèle correspondant à une valeur particulière de la grandeur mesurée. Ce point de vue simplifie la théorie sous-jacente en évacuant le postulat de réduction du paquet d'ondes, mais il y a un prix à payer pour cette «simplification» : outre qu'elle paraît impossible à tester, il peut sembler difficile d'admettre que l'observateur lui-même se scinde en plusieurs observateurs différents, à chaque mesure qu'il effectue, et que les différentes perceptions de la réalité sont toutes aussi réelles les unes que les autres.

Ces travaux passèrent inaperçus pendant près de 20 ans. Trop de physiciens espéraient encore qu'une théorie plus pertinente serait découverte, qui rendrait au monde sa nature classique, et exclurait les bizarreries telles que des objets macroscopiques se trouvant à deux endroits à la fois. Une nouvelle série d'expérience brisa ces espoirs.

Pouvait-on remplacer l'apparent hasard quantique par une grandeur, certes inconnue, mais qui caractériserait les particules, une variable cachée ? John Bell, théoricien du CERN, montra que, si tel était le cas, le résultat de la mesure de certaines grandeurs serait différent de ce que prévoit la mécanique quantique. De nombreuses années s'écoulèrent avant que les physiciens ne disposent de la technique nécessaire pour faire les expériences correspondantes et n'excluent la possibilité des variables cachées.

En 1978, l'un d'entre nous (John Archibald Wheeler) proposa l'expérience du «choix retardé», qui fut réalisée avec succès en 1984 : elle mettait en évidence un nouvel aspect quantique du monde qui défie la conception classique. Dans cette expérience, un photon peut se trouver en deux endroits simultanément, mais on peut

aussi choisir, après coup, si ce photon était en un seul endroit ou aux deux à la fois. Une autre expérience, achevée en 1982, celle d'Alain Aspect et de ses collègues de l'Institut d'optique théorique et appliquée d'Orsay fut également décisive pour enterrer les théories à variables cachées. Dans cette expérience, un atome excité émet deux photons quand il se désexcite, et l'on mesure la polarisation de ces photons créés ensemble ; les résultats des mesures sont corrélés, et les corrélations observées sont plus fortes que celles prévues par les théoriciens dans l'hypothèse des variables cachées.

La décohérence, censure quantique

L'expérience de Stern et Gerlach, où des photons ou des électrons traversent deux fentes et produisent des interférences était tenue par le physicien américain Richard Feynmann pour «la mère de tous les effets quantiques» ; elle a été reproduite avec des objets volumineux, tels des atomes, de petites molécules et, plus récemment, des fullerènes (des molécules 60 atomes de carbone, arrangés en «ballon de football»). Le groupe d'Anton Zeilinger, à Vienne, a même envisagé de reconduire l'expérience avec un virus. Une réalité incontournable ressort de toutes ces expériences : l'étrangeté quantique est bien réelle, que cela nous convienne ou non.

Les avancées expérimentales des dernières décennies s'accompagnèrent de progrès théoriques. Les travaux d'Everett avaient laissé sans réponse deux questions essentielles : si le monde contient réellement d'étranges superpositions macroscopiques, pourquoi ne les percevons-nous pas ? Selon quel mécanisme l'un des deux états classiques (carte à l'endroit et carte à l'envers) devient-il observable ?

La réponse à la première question fut apportée en 1970, quand Dieter Zeh, de l'Université de Heidelberg, démontra que l'équation de Schrödinger elle-même engendre une forme de censure. Cet effet a pris le nom de décohérence, par opposition à la cohérence quantique que l'on attribue à un état de superposition quantique. La théorie de la décohérence a été élaborée, notamment par D. Zeh et par Wojciech Zurek, de Los Alamos. Ils ont montré que les superpositions cohérentes ne subsistent que tant qu'elles

restent ignorées du reste du monde. Ainsi, une carte quantique en chute libre subit en permanence des chocs exercés par les molécules d'air et les photons, autant de corpuscules qui «déterminent» en permanence comment la carte tombe, détruisant («décohérant») ainsi la superposition, de sorte que l'on ne peut plus observer celle-ci.

Tout se passe presque comme si l'environnement du système étudié se comportait comme un observateur qui, simplement parce qu'il regarde la carte, réduit la fonction d'onde. Supposez qu'une amie regarde de quel côté tombe la carte sans vous communiquer le résultat. Selon l'interprétation de Copenhague, son observation a réduit l'état de superposition à un état bien défini, et la meilleure description possible de la situation n'est plus celle d'un état quantique de superposition, mais la représentation classique de votre ignorance de ce que votre amie a vu. Plus simplement, les calculs de décohérence montrent qu'un observateur humain (et, par conséquent, une réduction de la fonction d'onde explicite) n'est pas indispensable : une unique molécule d'air, qui rebondit sur l'un des côtés de la carte, suffit. Cette minuscule interaction suffit à faire disparaître la cohérence de l'état superposé et à faire réapparaître une situation classique.

Le phénomène de décohérence explique pourquoi nous n'observons pas de superpositions quantiques dans le monde qui nous entoure. La mécanique quantique ne cesse pas de s'appliquer aux objets qui dépassent une certaine taille critique, mais les systèmes macroscopiques, tels un chat ou une carte, ne sont pas suffisamment isolés pour empêcher la décohérence. En revanche, les objets microscopiques sont plus faciles à isoler de leur environnement, et ils conservent mieux leur comportement quantique.

La décohérence a aussi apporté une réponse à la deuxième question d'Everett : quel mécanisme confère un statut particulier (celui d'état observable) aux deux états classiques (carte tombée vers la droite ou vers la gauche) ? Si nous considérons ces états d'un point de vue strictement quantique, qu'ont-ils de particulier par rapport aux états de superposition ? Pourquoi les univers multiples d'Everett se scindent-ils toujours d'une façon telle que seules les catégories «vers la gauche»

ou «vers la droite», que nous connaissons, apparaissent, mais jamais d'autres? La réponse découle de la théorie de la décohérence : les calculs montrent que ces états classiques sont précisément ceux qui «résistent» à la décohérence, c'est-à-dire que les interactions avec l'environnement laissent la carte sur l'une ou sur l'autre des deux faces, mais amènent un état de superposition vers l'un ou l'autre des états classiques (vers la gauche ou vers la droite).

Décohérence et cerveau

Les physiciens ont pour habitude de diviser l'Univers en deux parties : le système étudié et le reste. En thermodynamique, par exemple, on distingue le corps matériel et son environnement, qui impose les conditions de température et de pression. De même, en physique quantique, le système étudié est séparé du dispositif de mesure, considéré d'un point de vue classique. Cependant, si l'on admet l'évolution unitaire de l'Univers et la décohérence, on doit alors diviser l'Univers en trois parties, chacune d'elles étant décrite par un état quantique : le système étudié, son environnement et l'observateur.

La décohérence, qui résulte des interactions de l'objet étudié avec son environnement, nous empêche de percevoir les superpositions quantiques d'états mentaux. Nos cerveaux sont si intimement liés à leur environnement que, même si nos neurones pouvaient percevoir de telles superpositions, leur décohérence serait inévitable, quasi instantanée. D. Zeh a remarqué que cela justifie *a posteriori* le postulat de la réduction du paquet d'ondes des textes fondateurs de la mécanique quantique, c'est-à-dire que l'on peut faire tous les calculs de probabilité que l'on veut à partir du moment où l'on admet que la fonction d'onde est réduite dès que l'objet est observé. Même si, dans la théorie d'Everett, les fonctions d'ondes ne sont jamais réduites, les physiciens s'accordent à dire qu'en pratique l'effet de la décohérence ressemble étrangement à une réduction du paquet d'ondes.

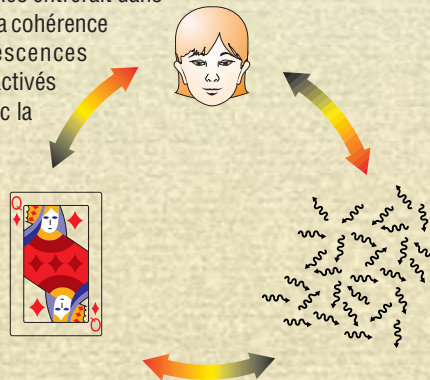
La découverte du phénomène de décohérence, ainsi que la multiplication des démonstrations expérimentales des étranges phénomènes quantiques ont fait considérablement

Scinder la réalité

On peut partager l'Univers en trois parties : l'objet étudié, son environnement et l'observateur dans son état quantique, que l'on nomme le sujet. L'équation de Schrödinger – qui s'applique à l'Univers dans son ensemble – peut être divisée en une somme de termes qui décrivent la dynamique interne de chacun de ces trois sous-systèmes, et de termes qui décrivent leurs interactions. Chacun de ces termes a un effet différent.

Le terme qui décrit la dynamique de l'objet étudié est en général le plus important ; aussi, quand il veut anticiper l'évolution d'un objet, les théoriciens commencent par ignorer les autres termes. Par exemple, on prévoit que la carte quantique sera dans un état de superposition, c'est-à-dire qu'elle tombera à la fois vers la droite et vers la gauche. Dès qu'une observatrice regarde la carte, l'interaction sujet-objet étend la superposition à son état mental, produisant la superposition d'un état de satisfaction parce qu'elle a gagné et d'un état de déception parce qu'elle a aussi perdu. Toutefois, elle ne perçoit jamais la superposition, car l'interaction entre l'objet et son environnement (les molécules d'air et les photons qui rebondissent à la surface de la carte) provoque une décohérence rapide qui fait disparaître la superposition.

Notons que, même si l'observatrice isolait complètement la carte de l'environnement (en faisant l'expérience dans un caisson sous vide, sombre et au zéro absolu), rien ne changerait. Sans doute qu'au moment même où elle regarderait la carte, l'un au moins de ses neurones entrerait dans un état de superposition et perdrait sa cohérence en 10^{-20} secondes. Si les arborescences complexes des neurones qui sont activés dans le cerveau ont quelque lien avec la façon dont s'élaborent nos pensées et nos perceptions – notre conscience –, alors le phénomène de décohérence empêche à coup sûr nos neurones de percevoir des états quantiques superposés. Nos cerveaux mêlent le sujet et l'environnement, et nous empêchent d'échapper à la décohérence.



évoluer la perception que les physiciens ont de la mécanique quantique. À l'origine, le postulat de la réduction du paquet d'ondes fut introduit pour expliquer pourquoi les expériences produisent des résultats déterminés et non d'étranges superpositions de résultats. Cette motivation initiale a pratiquement disparu. Qui plus est, personne n'a encore élaboré l'équation qui déterminerait exactement à quel moment cette mystérieuse réduction du paquet d'ondes est censée se produire.

Un petit sondage réalisé en juillet 1999 auprès des participants à un congrès sur l'informatique quantique, à Cambridge, a révélé que l'attitude des physiciens vis-à-vis de la réduction du paquet d'ondes est en train de changer. Parmi les 90 physiciens interrogés, seuls huit déclaraient croire à une réduction explicite des fonctions d'ondes. Une trentaine optè-

rent pour l'interprétation des «univers parallèles» ou pour sa variante des «histoires cohérentes», qui ne font pas appel à la réduction du paquet d'ondes (avec les «histoires cohérentes», on analyse des séquences de mesure et l'on assemble les résultats partiels pour former des «histoires» logiquement cohérentes pour un observateur).

Toutefois, plus de la moitié des physiciens interrogés ont choisi «aucune des réponses» ou «ne sait pas». Une difficulté linguistique explique sans doute en partie ce chiffre élevé. Il est fréquent que deux physiciens adhèrent à l'interprétation de Copenhague sans y accorder le même sens.

Cela dit, le sondage indique clairement qu'il serait temps de réviser les livres de physique quantique. Même si ces ouvrages précisent immanquablement que le principe de réduction du paquet d'ondes est un

**PRIX
«INTERBREW-
BAILLET LATOUR
DE LA SANTÉ» 2002**

**Domaine
d'application :**

L'influenza.

Montant du Prix :

Le Prix s'élèvera à
six millions de francs belges
(6 000 000 BEF –
150 000 EUR).

Le Prix est décerné à une personnalité dont les activités sont axées sur la recherche scientifique et/ou sur les applications pratiques de celle-ci. Le Prix est destiné à reconnaître les mérites du lauréat et à promouvoir la poursuite de ses travaux.

Les candidats peuvent être de nationalité belge ou étrangère.

Les candidatures doivent parvenir à la Secrétaire générale du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à B – 1000 Bruxelles (Belgique) avant le **14 septembre 2001**. La personnalité qui introduit la candidature doit joindre à celle-ci un mémoire sur les mérites du candidat, mémoire rédigé en anglais et comprenant au moins trois pages.

Règlement :

Le règlement est à votre disposition au secrétariat du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à B – 1000 Bruxelles,
Tél. : 02.504.92.11
fax : 02.504.92.92
e-mail : mjsimoen@fnrs.be

postulat fondamental, les physiciens y croient de moins en moins, tout particulièrement ceux qui travaillent sur les ordinateurs quantiques. Cette méthode reste une «recette de calcul» utile, mais on devrait indiquer dans tous les ouvrages destinés aux étudiants que la réduction de la fonction d'onde ne viole probablement pas l'équation de Schrödinger.

**L'avenir
de la théorie quantique**

Après 100 ans d'idées quantiques, de quoi l'avenir sera-t-il fait? Quels mystères subsistent? Même si les discussions sur l'interprétation de la mécanique quantique et sur la nature profonde de la réalité se poursuivent, cette théorie n'est probablement qu'un élément d'une théorie plus globale. Les différentes théories de la physique peuvent être classées sur une sorte d'arbre généalogique où chacune «descend» d'une théorie «fondatrice» plus fondamentale. La théorie quantique des champs et la relativité générale formeraient le tronc fondateur de l'arbre. Les premières branches comprennent la mécanique quantique et la relativité restreinte, qui se ramifient en électromagnétisme, en mécanique classique ou encore en physique atomique. L'informatique, la psychologie ou encore la médecine sont plus loin encore, sur les branches élevées.

Toutes ces théories présentent deux aspects : un ensemble cohérent d'équations mathématiques et des explications qui relient ces équations et les résultats expérimentaux. La mécanique quantique telle qu'on la présente d'ordinaire se présente aussi comme des équations et quelques postulats explicites. Progressivement de nouveaux concepts sont introduits (les protons, les atomes, les cellules, les organismes...) parce qu'ils améliorent la compré-

hension des phénomènes en jeu, sans que l'on doive recourir à des théories plus fondamentales. Ainsi, le rapport du nombre d'équations au nombre de mots nécessaires pour les expliquer diminue à mesure que l'on s'élève dans l'arbre des théories et tend vers zéro dans les domaines appliqués, tels que la médecine ou la sociologie. Au contraire, les concepts proches de la souche de l'arbre évolutif des théories sont essentiellement mathématiques.

Le but ultime des physiciens est de découvrir ce que l'on qualifie en plaisantant de «théorie de tout», une théorie dont toutes les autres se déduiraient. Si une telle théorie existe, elle constituera la racine profonde de l'arbre des théories, la source de la relativité générale et de la théorie quantique. Les physiciens savent notamment qu'il leur manque la «théorie-mère» de la théorie de la gravitation et de la physique quantique.

La théorie du tout ne contient probablement aucun concept, sinon on devrait chercher à l'expliquer d'après une théorie encore plus fondamentale... jusqu'à obtenir la doctrine ultime. Cette dernière serait donc purement mathématique, sans explications ni postulats. Un mathématicien infiniment intelligent en déduirait l'arbre entier des théories d'après les seules équations, avec les propriétés de l'Univers qu'elles décrivent, les caractéristiques de ses habitants et leur perception du monde.

Les 100 premières années de la mécanique quantique nous ont donné de puissantes techniques et ont résolu de nombreux problèmes. Toutefois, les physiciens ont soulevé de nouvelles questions, tout aussi importantes que celles qui restaient ouvertes à l'époque où Maxwell inaugurerait son cours magistral à Cambridge, par exemple la nature de la gravitation et celle de la réalité.

Max TEGMARK est professeur de physique à l'Université de Pennsylvanie. John Archibald Wheeler est professeur de physique émérite à l'Institut des études avancées de Princeton. En 1934-1935, il a travaillé dans le groupe de Niels Bohr, à Copenhague. Il a eu comme étudiants Richard Feynman et Hugh Everett.

Daniel KLEPPNER et Roman JACKIW, *One Hundred Years of Quantum Physics*, Science, vol. 289, pp. 893-898, août 2000.

PLANCK, *Une conscience déchirée*, Editions Belin, 1998.

BEAM LINE, *Special quantum century issue*, vol. 30, n° 2.

Ce numéro du magazine BEAM LINE du laboratoire américain SLAC peut être téléchargé à l'adresse :

www.slac.stanford.edu/pubs/beam-line/pdf/00ii.pdf

A. ZILINGER, *The Quantum Centennial*, in *Nature*, vol. 408, pp. 639-641, 7 décembre 2000.

