

100 ANS

7 IDÉES NEUVES  
pour le XXI<sup>e</sup> siècle

SCIENCE & VIE

Quand les nouveaux savoirs bousculent les anciens dogmes.  
Une grande série de "Science & Vie", à retrouver chaque mois.  
Ce mois-ci : **La physique fondamentale**

Leçon n° 5

# Penser information plutôt que réalité

PAR MATHILDE FONTEZ

Saisir le réel, comprendre de quoi est constituée la matière du monde, comment se déploie l'espace autour de nous, et quel est le ressort du temps qui passe : tels sont les objectifs avoués de la physique fondamentale. Or, les réponses théoriques apportées au cours du XX<sup>e</sup> siècle, malgré d'incroyables succès, décrivent une réalité totalement contradictoire. Le monde à notre échelle ne suit pas les mêmes règles que celui de l'infiniment petit. Une incompatibilité telle que de plus en plus de physiciens envisagent un tournant radical : toutes ces belles théories ne décriraient pas la réalité du monde, mais la manière dont notre esprit s'efforce d'en percer les mystères. D'objective, la physique deviendrait subjective. Et la réalité du monde lui-même à tout jamais insaisissable...

**C**ela semble une évidence : le rôle des physiciens est de regarder le monde matériel le plus précisément possible et de le décrire sous la forme de lois mathématiques. Voici vingt-quatre siècles que ce grand programme de description de la nature a été fixé. Quatre cents ans avant notre ère, déjà, le philosophe grec Démocrite, inventeur du concept d'atome, soutenait que la vérité est à chercher au fond de l'abîme de la matière, dans les qualités des corpuscules qui la composent. Ce programme, que l'on peut qualifier de réaliste, atteint son sommet au début du XX<sup>e</sup> siècle. D'abord quand Albert Einstein formule le contexte spatio-temporel dans lequel toutes les choses matérielles s'ébattent. Mais surtout lorsque Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Max Planck et quelques autres physiciens découvrent les lois de la mécanique quantique qui régissent les atomes, électrons et tous les corpuscules de matière... Une théorie qui allait, dans les décennies suivantes, permettre de dévoiler le bestiaire des particules, avec la découverte du boson de Higgs en juillet 2012 en guise d'apothéose.

Le fait est pourtant là : dans une pirouette vertigineuse, de plus en plus de spécialistes de cette physique du microscopique sont en train de se convaincre qu'elle ne parle pas du tout de la réalité matérielle de notre monde. Ses lois ne décriraient pas les mouvements des choses dans l'espace et le temps, mais les contraintes qui régissent notre regard posé sur elles. Désormais, c'est avec le concept de "bits", ces informations élémentaires qui prennent la forme de 0 et de 1, inventées dans les années 1940 pour décrire le fonctionnement des ordinateurs, que les scientifiques explorent le corpus de la physique quantique, qu'ils le reconstruisent et lui donnent un sens. Et ils s'aperçoivent que par-

ler d'information pour manier la physique quantique s'avère incroyablement efficace. A tel point que nombre d'entre eux en viennent à penser que l'information serait la notion fondamentale à partir de laquelle toute la théorie pourrait être refondée, enfin, sur des bases solides.

### LE PROGRAMME RÉALISTE ÉBRANLÉ

Ce ne serait donc pas le photon (particule de lumière) ou la molécule qui serait formalisé dans la représentation mathématique de la théorie quantique, ni le comportement des atomes ou des électrons qui serait décrit par la célèbre équation de Schrödinger... mais l'information dont on dispose sur ces phénomènes. Ainsi, toutes les propriétés quantiques seraient à l'image de la vitesse ou de l'arc-en-ciel : elles caractériseraient non pas l'objet lui-même, mais le couple formé par l'objet et celui qui l'observe. Ce pas de côté peut paraître un jeu intellectuel gratuit... Il faut, au contraire, le voir comme la plus sérieuse remise en question du programme réaliste multimillénaire. Et comme l'une des plus profondes révélations sur le lien que tout un chacun tisse avec le monde qui l'entoure.

Adopter ce nouveau paradigme, c'est en effet changer radicalement de point de vue sur ce que disent les lois les plus fondamentales de la physique. C'est se convaincre que la mécanique quantique ne décrit pas les propriétés absolues des choses matérielles, mais leurs propriétés relatives à l'esprit qui les perçoit. Qu'elle ne représente pas la nature, mais l'écran pixellisé au travers duquel nous la regardons. Que ce que l'on croyait jusqu'ici rattaché à la réalité serait en fait principalement lié à notre volonté de l'observer. Comme si on avait voulu s'approcher trop près de la matière et que celle-ci s'était finalement échappée, sans qu'on s'en aperçoive vraiment. Vertige... →

## Alors que la physique se



▲ AU XVII<sup>e</sup> SIÈCLE, GALILÉE PRÔNE UNE DÉMARCHE MATÉRIALISTE.

Pour le savant italien, père de la physique, c'est par l'observation et l'expérimentation directe sur la nature, le monde matériel, que la science peut progresser.



*donnait pour but de décrire la réalité matérielle...*

## Mécanique quantique

Claude Cohen-Tannoudji,  
Bernard Diu, François Lalot

ÉDITIONS DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Hermann - ÉDITIONS DES SCIENCES ET DES ARTS

### ... EN DÉCRIVANT UN MONDE BASÉ SUR L'ÉVOLUTION DE PARTICULES...

À partir de l'équation de Schrödinger, les physiciens peuvent désormais prédire avec une précision incroyable le comportement des particules, ces éléments constitutifs de la matière et de l'énergie.

### ... QUE DES ACCÉLÉRATEURS NE CESSENT DE CONFIRMER

Durant tout le XX<sup>e</sup> siècle, les physiciens construisent un modèle standard qui rassemble toute la matière, dans ses échelles les plus infinitésimales. Un modèle qui n'a cessé d'être confirmé par les accélérateurs de particules.



### ... QUE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE POUSSE À SON PAROXYSMES...

Dans les années 1920, une poignée de lois empiriques décrit tous les phénomènes microscopiques.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t)$$

→ Comment en est-on arrivé là? Comment le programme réaliste peut-il être remis en question de façon aussi violente? Lors de sa découverte dans les années 1920, la mécanique quantique semblait bel et bien décrire le monde réel. On y parlait d'atomes, de photons, d'électrons... Son corpus mathématique était capable de prédire des phénomènes observables, tels que les interférences, l'émission de lumière ou la naissance de courants électriques dans un matériau.

## DEUX MONDES INCOMPATIBLES

Certes. Mais les premières alertes, les premières failles dans le grand programme réaliste attiraient déjà l'attention des spécialistes. D'abord, ils savaient leur théorie sans fondement : à la différence de la relativité générale, monument d'Einstein qui peut être entièrement dérivé à partir de quelques axiomes (comme celui imposant aux lois physiques d'être les mêmes pour tous les observateurs), la mécanique quantique est un édifice totalement empirique, truffé de postulats *ad hoc* qui ne reposent sur aucun principe fondamental...

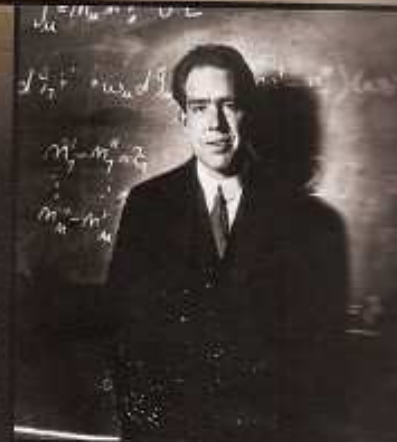
Mais le plus gênant était ailleurs. Car ils ne pouvaient nier que les propriétés du monde microscopique décrites par ces équations paraissaient incompatibles avec celles du monde macroscopique. Ainsi, suivant les lois quantiques, une particule se trouve dans plusieurs endroits et plusieurs états en même temps, jusqu'à ce qu'elle soit observée. Et alors, elle se réduit aléatoirement à un seul état, suivant des lois de probabilités précises. La quantité de mouvement, la position et toutes les caractéristiques des particules sont donc multiples, et ne deviennent uniques qu'au moment où on les regarde... tout cela alors que la table, la chaise, la pomme et toute la matière à notre échelle ont bel et bien une position, une énergie, une couleur fixées. Voilà qui pose un sacré problème de cohérence. "Par

*définition, une théorie fondamentale qui régit toute la matière doit nous en fournir une image cohérente. Or, force est de constater que pour la physique quantique, ce n'est pas le cas, souligne Franck Laloë, physicien au laboratoire Kastler-Brossel, à Paris. Celle-ci soutient que, chaque fois que nous étudions un système quantique, il faut supposer que le reste du monde ne l'est pas – à savoir, tout cet environnement serait classique, c'est-à-dire régi par les lois héritées de Newton. Cette interprétation de la théorie quantique suppose donc l'existence d'une frontière entre deux mondes : le système quantique d'une part, l'observateur classique d'autre part. Mais où se situe cette frontière? Et surtout, comment ces deux mondes peuvent-ils coexister au sein d'une théorie qui a vocation à décrire tous les objets physiques – ne serait-ce que parce qu'ils sont tous constitués d'atomes!"*

Le problème était sérieux. Mais l'efficacité des équations quantiques pour prédire les résultats des mesures était telle que personne ne pouvait douter de la théorie. Il fallait donc l'admettre : le monde de l'infiniment petit était

## ... elle se focalise maintenant

peuplé de phénomènes différents de ceux du monde à l'échelle humaine. Et il ne restait qu'à dessiner précisément la limite entre les deux. Ainsi certains fondateurs de la théorie adoptèrent-ils une posture qui, alors, convint à tout le monde : le monde macroscopique est classique, tandis que le monde microscopique est quantique. La différence entre les deux n'est qu'une question d'échelle. Et sous l'influence de ces géants, tout fébriles qu'ils étaient d'exploiter les nouvelles équations pour décrire le comportement des particules, les physiciens laissèrent de côté la grande question de savoir de quoi parle la physique quantique. "Tais-toi et calcule!", aurait ordonné, selon →



### ^ VERS 1920, NIELS BOHR ALESTE SUR LA SPÉCIFICITÉ QUANTIQUE.

Grand architecte de la théorie, le savant danois prévient qu'il ne faut pas en faire une interprétation purement réaliste : "Cette théorie décrit pas le monde, mais ce que l'on en voit."



## sur les informations qui proviennent du monde

### QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT

Edited by John Preskill, Nima Arkani-Hamed and Kenneth Brane



#### ▲ ... QUI VEUT QUE LE MONDE DÉPEND DU REGARD PORTÉ SUR LUI...

Depuis, de nombreux travaux n'ont cessé de souligner le rôle clé joué par l'observateur.

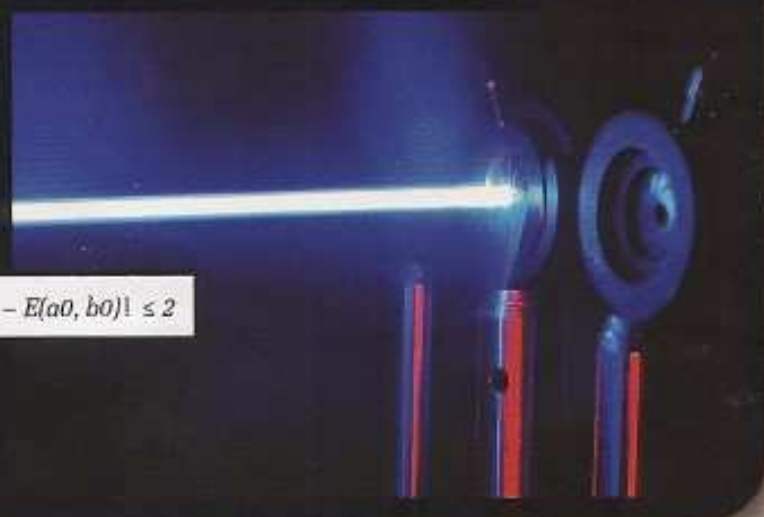
#### ✓ ... CE QUI CHANGE LA NATURE DE LA "RÉALITÉ"...

Extraite du corpus quantique, l'inégalité de Bell révèle que le monde quantique est irréconciliable avec notre "réalité" classique : certains objets peuvent être reliés par-delà l'espace et le temps.

#### ✗ ... QUI N'EST, EN FAIT, QUE L'INFORMATION QU'ELLE TRANSMET

De quoi penser que l'objet de cette physique, la plus fondamentale de toutes, n'est pas le monde, mais les informations qu'il nous transmet. La quantique devient une métaphysique : ses lois ne régissent pas les choses, mais notre regard.

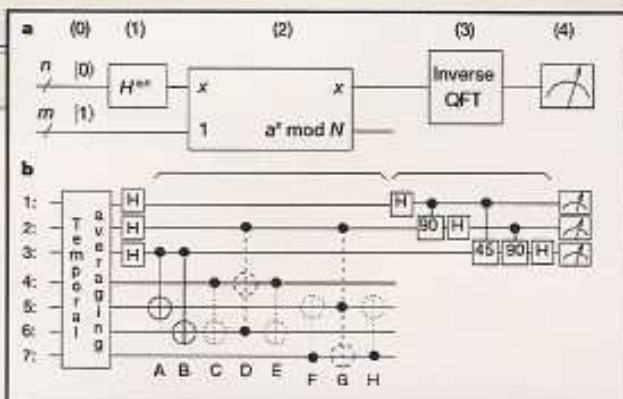
$$|E(a, b) + E(a, b0) + E(a0, b) - E(a0, b0)| \leq 2$$



1982

## Une expérience qui annule l'espace et le temps

A l'Institut d'optique d'Orsay, le physicien Alain Aspect démontre la validité des équations de Bell. Pour la première fois, on observe un phénomène "non local".



1994

## Un algorithme quantique révolutionnaire

Le mathématicien Peter Shor prouve qu'un ordinateur dont les circuits fonctionneraient d'après les lois quantiques pourrait factoriser n'importe quel nombre beaucoup plus facilement qu'un ordinateur classique. De quoi casser la majorité des codes cryptographiques en vigueur.



## Trente ans de découvertes ont conduit à ce renversement

→ la légende, le célèbre physicien américain Richard Feynman. Portés par cette attitude pragmatique, ils découvrirent l'effet laser, caractérisèrent les propriétés des semi-conducteurs, modélisèrent les réactions nucléaires, s'engouffrèrent dans la construction d'une autre puissante théorie, nommée quantique des champs, qui décrit les interactions entre particules, laissant le soin aux philosophes d'harmoniser les concepts du monde. "Il y a trente ans, travailler sur l'interprétation de la physique quantique n'était pas bien vu, témoigne Franck Laloë. C'était considéré comme un sujet philosophique, au mauvais sens du terme."

C'est en 1982 que les choses ont commencé à changer. Dans les laboratoires de l'Institut d'optique, à Orsay, le physicien Alain Aspect prouve expérimentalement une prédiction théorique du physicien irlandais John Bell, datant de 1964, elle-même basée sur un état quantique étrange découvert par Schrödinger en 1935, et baptisé intrication: "Deux particules peuvent se

former en un lieu, mélangées l'une à l'autre, puis se séparer, partant l'une à gauche, l'autre à droite, tout en restant fusionnées", explique Alexei Grinbaum, théoricien au Commissariat à l'énergie atomique. Dès lors, si on change l'état de l'une d'entre elles (par exemple, si on la force à prendre une certaine énergie), l'autre subira aussitôt ce changement d'état, et ce même si les deux particules sont éloignées de plusieurs kilomètres. Avec de la lumière et des polariseurs, Alain Aspect démontre qu'une fois unis, deux objets quantiques n'en constituent qu'un même si on les sépare, conformément à l'étrange prédiction quantique.

### PAR-DELÀ L'ESPACE ET LE TEMPS

"Les limites spatiales ne jouent aucun rôle!", martèle Alexei Grinbaum. L'état global d'un système composé ne se trouve pas dans un endroit donné, il n'a aucune attache spatiale. Il n'est placé ni avec le premier sous-système, ni avec le second, mais en quelque sorte avec les deux à la fois, quelle que soit

la distance qui les sépare." Ainsi, tout se passe comme si l'une des composantes d'un duo de particules éloignées de centaines de kilomètres savait instantanément ce qui est en train d'arriver à l'autre, comme si une sorte de relation immatérielle subsistait par-delà l'espace et le temps. Le programme réaliste prend un sacré coup: "Pour expliquer l'intrication, on ne peut raconter aucune histoire qui se déroule dans l'espace et le temps", résume Nicolas Gisin, de l'université de Genève. Et à part en prédire l'existence, la mécanique quantique ne dit rien de ce phénomène: "L'équation de Schrödinger exprime une loi dynamique: elle décrit l'évolution dans le temps des systèmes quantiques, décrit ainsi Alexei Grinbaum. Mais l'intrication n'est pas une évolution dans le temps. Elle est présente à chaque instant et par-delà l'espace. Elle ne peut donc pas être décrite par l'équation de Schrödinger."

La distinction entre classique et quantique se trouve bouleversée. Il ne s'agit plus, pour les physiciens, de



< 1997

### Un lien quantique qui résiste sur 10 km

Nicolas Gisin (université de Genève) maintient le lien d'intrication entre deux particules, l'une envoyée à Bernex, l'autre à Bellevue, 10 km plus loin. Plus personne ne doute de l'ampleur de cette spécificité purement quantique.

de perspective...



> DEPUIS 2000

### Un corpus refondé sur la notion d'information

A partir de quelques principes fondamentaux tirés de la théorie de l'information, des chercheurs démontrent des pans entiers des lois quantiques, qui demeureraient purement empiriques. Au point de découvrir de nouveaux phénomènes, inimaginables jusqu'ici.

trouver la limite entre le micro et le macro, mais entre des phénomènes matériels, qui semblent se déployer dans l'espace et le temps, et d'autres, immatériels, qui s'affranchissent de ces contextes physiques. John Bell, le premier, avait souligné que les lois de la mécanique quantique impliquent l'existence de ces phénomènes dits "non locaux", qui ne se passent pas dans l'espace. Avec l'expérience d'Aspect, le clou est définitivement planté: l'intrication s'impose comme "la" caractéristique de la physique quantique, la vraie différence entre le monde décrit par l'équation de Schrödinger et celui vu à travers les lois de Newton. Et donc, le point à creuser pour interpréter la théorie...

Et cette caractéristique promet aussitôt de nombreuses applications. En effet, les physiciens se rendent rapidement compte que ce lien entre deux particules distantes pourrait jouer le rôle d'un canal de communication: il permettrait par exemple de téléporter des états quantiques d'un endroit à

l'autre et de s'assurer que des messages cryptés ne seront pas violés; ou, en informatique, de faire des calculs massivement parallèles. En bref, il pourrait permettre de manipuler l'information de manière radicalement nouvelle.

#### DÉCRIRE L'ACCÈS À L'INFORMATION

Information: le mot est lancé. Et les physiciens quantiques s'en emparent. Ils s'approprient la théorie probabiliste élaborée par l'ingénieur américain Claude Shannon dans les années 1940 pour coder et manipuler des informations sous la forme de 0 et de 1 (les bits), et l'adaptent aux lois quantiques. Ainsi, en 1994, le mathématicien Peter Shor, de la société américaine AT&T, montre qu'un ordinateur qui manierait des bits quantiques, des "qubits", pourrait factoriser les nombres beaucoup plus efficacement qu'une machine classique. Un an plus tard, Benjamin Schumacher, du Kenyon College dans l'Ohio (Etats-Unis), introduit un codage qui permet aux particules quantiques de devenir une ressource pour faire du

calcul et coder des messages. "En cinq ans, l'algorithme de Shor a montré la supériorité du calcul quantique, tandis que dans les laboratoires, des pièges à atomes ou à ions nous offraient la possibilité de manipuler les particules une par une, rappelle Nicolas Gisin. Un nouveau domaine de recherche était né: l'information quantique."

Et c'est dans ce terreau fertile que l'idée a peu à peu germé, au début des années 2000: les physiciens s'aperçoivent que ce point de vue informationnel, ces qubits, peuvent servir à formuler des axiomes fondamentaux, des principes pour la mécanique quantique. En supposant que dans notre monde, l'information subit certaines contraintes, et en essayant de voir à quoi ressemble une théorie qui ne décrit pas la réalité elle-même, mais notre accès à l'information, des dizaines de physiciens, comme Lucien Hardy depuis l'Institut Perimeter au Canada, Alexei Grinbaum, à Paris, ou Jeffrey Bub, à l'université du Maryland (Etats-Unis), se mettent à redémontrer des →

→ parties de la théorie quantique... Leurs succès font l'effet de révélations fracassantes (voir *S&V* n° 1019, p. 58, et n° 1057, p. 68).

Les principes sur lesquels ces théoriciens fondent cette reconstruction du corpus sont très variés. Exemples : "les systèmes qui ont la même capacité de charge d'information ont les mêmes propriétés"; "il existe une quantité maximale d'information pertinente qui peut être extraite d'un système"; "il est impossible de cloner parfaitement une information contenue dans un système physique dont l'état est inconnu"... Mais une fois fixés comme postulats de départ, tous réussissent de façon très élégante à faire directement émerger les lois quantiques.

La tâche est encore loin d'être achevée. Car déduire les états quantiques à partir de quelques principes n'a vraiment rien d'évident : les chercheurs doivent expliquer pourquoi ces états sont décrits par des nombres complexes, et non par d'autres entités arithmétiques ; tracer les contours de l'espace mathématique qui les abrite ; retrouver la structure de leurs transformations et la loi de leur évolution... qui sont tous des éléments disjoints.

## AU-DELÀ DES ÉQUATIONS CENTENAIRES

A tel point que depuis quelques années, les physiciens délaissent la grande entreprise de reconstruction globale pour se focaliser sur des morceaux du corpus quantique. Ils posent certains principes physiques tout en en modifiant d'autres, dans l'espoir de pouvoir relier des principes fondamentaux à des éléments de la structure

de la mécanique quantique. Avec cette méthode, une équipe internationale de théoriciens est ainsi parvenue, il y a trois ans, à traduire dans le langage informationnel le fameux théorème de Bell par qui le scandale est arrivé. Vue ainsi, la prédiction du physicien irlandais signifie juste que, dans une communication, on ne peut pas gagner plus d'information qu'il n'en a été envoyé ! Et grâce à Jonathan Oppenheim, de l'University College de Londres, et à Stephanie Wehner, de l'université nationale de Singapour, le principe d'incertitude d'Heisenberg lui-même peut être interprété avec l'information : cette règle théorique qui postule que toutes les propriétés des objets quantiques ne peuvent être bien définies au même moment est directement reliée à la quantité de non-localité, c'est-à-dire à la force de ce lien qui unit les objets quantiques par-delà l'espace.

Preuve de la fécondité de ce changement de paradigme : les physiciens, pour la première fois, commencent même à aller au-delà des équations centenaires, jouant avec les règles quantiques d'une façon qu'il était, dans le programme réaliste, impossible d'envisager. "Nous avons trouvé qu'il existe des intrications entre trois systèmes quantiques. C'est un phénomène totalement nouveau, que l'on ne peut pas réduire à l'intrication de deux composantes, relate le physicien autrichien Anton Zeilinger. Et nous avons ensuite observé expérimentalement que si l'on retire l'une des composantes pour n'en considérer que deux, il se passe quelque chose d'étonnant : ces deux sous-systèmes

se trouvent dans un état classique, ils ne sont plus intriqués !" Ainsi, les physiciens découvrent au sein même du formalisme de la mécanique quantique des propriétés mathématiques inédites. "On commence à dresser une typologie des états, raconte Alexei Grinbaum. En vingt ans, nous avons fait un chemin incroyable. On n'avait que le mot 'intrication' et, maintenant, on a développé des méthodes pour la quantifier."

Pas une année ne se passe sans qu'une conférence soit organisée sur le thème de l'information quantique. Les publications scientifiques qui

## ... qui va bouleverser

traitent de ce sujet paraissent chaque mois, trouvant leur place dans les plus prestigieuses revues. "L'interprétation informationnelle ne cesse de gagner du terrain", assure Anton Zeilinger, qui, lors d'une conférence sur les fondements de la mécanique quantique en juillet 2011, a recensé que 76 % des physiciens présents jugeaient cette approche légitime pour aborder la quantique. "C'est une thématique très chaude, confirme Carlo Rovelli, de l'université de Marseille. La grande conférence de physique de cet été lui sera consacrée. Le prestigieux concours d'essais scientifiques de l'Institut d'étude des questions fondamentales, qui vient de s'achever, avait pour titre 'It from bit, or bit from it?', que l'on peut traduire approximativement par : toute chose provient-elle de l'information ou toute information provient-elle des choses ?

La liste des jalons de cette grande entreprise de reconstruction ne cesse de s'allonger. Tel Einstein qui, en dérivant les équations de Lorentz à partir de principes, écrivit la relativité restreinte, les physiciens spécialistes de l'information quantique reconstruisent pierre après pierre, formule après formule, le corpus découvert dans les

## EN SAVOIR PLUS

Oubliez les manuels et les ouvrages classiques, muets sur le sujet. Vous pourrez par contre suivre un pionnier de cette révolution (*Mécanique des étirements*, Alexei Grinbaum, à paraître début 2014), détailler pas à pas les raisonnements (*L'Impensable Hasard*, Nicolas Gisin, voir p. 127), ou vous envoler vers des sommets philosophiques (*De l'intérieur du monde*, Michel Bitbol, Flammarion, 2010).





## < COMMUNICATION

### *Crypter les messages*

Grâce au phénomène d'intrication, les physiciens ont mis au point une nouvelle façon de transmettre les messages, totalement inviolable : en envoyant des photons ou des atomes intriqués à deux interlocuteurs, ils leur donnent la possibilité de partager une clé de codage sans que celle-ci passe par un canal de communication. Cette technique de cryptage d'une sécurité absolue est d'ores et déjà utilisée pour certaines communications bancaires.

## de nombreux domaines

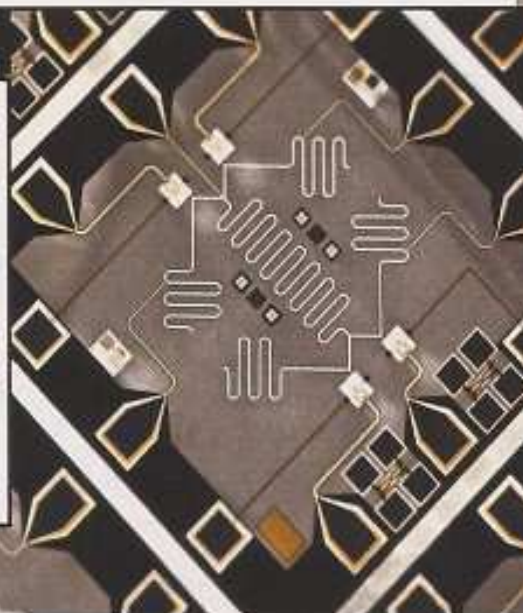
années 1920 pour en faire une théorie de principe. L'information s'impose comme le nouveau langage pour faire de la physique quantique. On ne parle plus d'atomes ni d'électrons, ni même d'infiniment petit... mais de qubits et de communication. Irrésistiblement, le programme réaliste se voit supplanté par un autre, informationnel.

Révolutionnaire, cette mue de la physique quantique reprend en réalité une lointaine discussion entamée au XIX<sup>e</sup> siècle, dans le cadre de la thermodynamique. Pour relier ces lois de la matière macroscopique que sont la chaleur, l'énergie et la température, décrites par la thermodynamique, aux mouvements microscopiques des molécules, le physicien autrichien Ludwig Boltzmann prônait en effet dès les années 1870 ce même pas de côté épistémologique : travaux statistiques à l'appui, il montrait que la notion d'entropie, centrale en thermodynamique, pouvait être interprétée comme une mesure du désordre, de la confusion... et donc de la quantité d'information inconnue sur la position et la vitesse de chacune des molécules du système. Cette science de la vapeur, de la chaleur, de l'industrie, cette science ô combien matérialiste se trouvait →

## > INFORMATIQUE

### *Résoudre des calculs insolubles*

Des composants électroniques et des algorithmes exploitant les spécificités quantiques commencent à voir le jour. De quoi résoudre les problèmes les plus complexes : optimisation de centres logistiques, conception de nouveaux avions, etc.



## < CONNAISSANCE

### *Rendre enfin l'Univers cohérent*

Débarassée de son objectif de réalisme, la mécanique quantique peut enfin, après un siècle de malentendus, réconcilier le physicien et le philosophe. En étudiant l'Univers à partir de cette nouvelle approche, de premiers résultats ont déjà émergé. La physique renoue avec son rôle d'origine : donner du sens.

→ sortie du grand programme réaliste ! Et ce n'est pas tout : il en a été de même avec la théorie de la relativité restreinte. Quelques années seulement après avoir été formulée par Einstein, sa dimension informationnelle a été reconnue — elle peut être vue comme la formalisation des contraintes que notre volonté de discerner les lois de la nature impose à notre regard. Ce point de vue ne s'est cependant jamais vraiment imposé, et elle est restée l'archétype de

la relativité générale. De plus, en partant du principe que la théorie décrit toutes les informations qui peuvent être captées par un observateur, l'approche informationnelle offre enfin une solution pour étudier un système de l'intérieur... Et on ne peut regarder l'Univers du dehors ! De ces travaux menés tous azimuts, des résultats ont déjà émergé. Ivan Agullo et son équipe de l'université de Louisiane (États-Unis) viennent, il y a quelques mois,

réalisme ? Certains commencent à le croire. D'autres, résolument réalistes, campent sur leurs positions, affirmant qu'une théorie physique doit parler de la matière. Mais beaucoup suggèrent une voie médiane. Contournant cette querelle, ils proposent de prendre l'information comme nouveau constituant élémentaire, non de la matière, mais de la théorie physique censée la décrire. *"La question de savoir si la mécanique quantique décrit le réel ou l'information que l'on a sur le réel est une fausse question, tranche Alexei Grinbaum. Dans un ordinateur, lorsque le disque dur est en panne, on adopte une approche mécanique pour le regarder et le réparer. Mais pour corriger un logiciel, on adopte une approche informationnelle. On est dans un cas semblable avec la mécanique quantique."* Un ordinateur est à la fois des fils, des composants, des électrons... et des données qui transitent. La page de cet article est à la fois du papier, de l'encre... et la fin d'une longue leçon. Points de vue réaliste et informationnel n'ont rien de contradictoire. Ils sont complémentaires. Libre aux physiciens de choisir le langage avec lequel ils décrivent le monde. Le tout est de savoir de quoi on parle. Et de ne pas confondre la trame d'un récit avec celle de la cellulose.

Cent ans après la découverte des lois quantiques, le malentendu commence enfin à se dissiper : elles s'attachent à décrire ce que l'on peut raconter, et non les pages que l'on peut tourner. La physique vit sa deuxième révolution quantique. Une révolution métaphysique. ■

## L'onde de choc pourrait se propager à toute la physique, reconstruisant l'espace, le temps, l'énergie...

la théorie réaliste : la description du contexte spatio-temporel dans lequel s'ébattent les corps matériels...

Aujourd'hui, cette notion d'information frappe de nouveau. Cette fois, elle s'attaque au cœur de la physique. A la théorie la plus précise, la plus fondamentale, à celle-là même qui a semblé un instant marquer l'aboutissement du grand programme réaliste né des questionnements des philosophes grecs sur la matière. Et l'onde de choc pourrait se propager à toute la physique. Car sans attendre la fin de ce débat, des cosmologistes s'attellent déjà à reconstruire l'espace, le temps, l'énergie en termes purement informationnels. *"L'utilité de l'approche informationnelle est énorme en cosmologie et ce, pour une raison simple : il nous est impossible de plonger un instrument de mesure dans le big bang, explique Carlo Rovelli. Or, la physique quantique est faite pour travailler en laboratoire. Elle a été conçue pour prédire les résultats d'instruments de mesure."*

### UNE RÉVOLUTION COSMOLOGIQUE

Les cosmologistes n'ont pas le choix : il leur faut dépasser le cadre de la quantique s'ils veulent pouvoir décrire les premiers instants de l'Univers, les trous noirs et autres cas extrêmes qui mettent en jeu à la fois l'infiniment petit et l'infiniment énergétique décrit par

de calculer des effets observables de la gravitation quantique à boucles dans les fluctuations du fond cosmologique primordial. Quant à Giacomo Mauro D'Ariano et Paolo Perinotti, de l'université de Pavie, en Italie, ils ont dérivé la notion d'espace à trois dimensions directement de principes informationnels. *"Personne n'a encore les idées claires, mais tout le monde a la sensation qu'il y a quelque chose à comprendre avec la notion d'information, reconnaît Carlo Rovelli. C'est une sensation diffuse : quand elle parle avec la mécanique quantique, la gravité donne tout de suite de la thermodynamique... or, la thermodynamique, c'est de l'information. Le problème des trous noirs est un problème d'information. Cette notion va jouer un rôle crucial dans la synthèse encore en chantier."*

Aussi profonde et violente soit-elle, cette révolution laisse perplexe. Faut-il en déduire que le réel entier n'existe que via la mesure, que l'Univers n'a pas d'essence, qu'il n'existe qu'à travers notre regard ? Faut-il en conclure que non seulement les atomes, les molécules, les photons... mais aussi les arbres, les planètes, les hommes, ne sont que des artefacts ? Les pommes ne sont-elles que le fruit de notre cerveau ? Ne tombent-elles que dans les influx nerveux de nos neurones ? La physique doit-elle abandonner ses ambitions de

Le mois prochain  
**Leçon n° 6**

GÉNÉTIQUE

*Penser  
acquis  
plutôt qu'  
inné*