

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Révisseuses: Maud Bruguère, Anne-Rozenn Jouble

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Lucas Gierczak

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuel

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Charline Buché

Cheffe de produit: Eléna Delanne

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétariat général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:
William Rowe-Pirra

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements

Pour la Science – 19 rue de l'Industrie – BP 90053

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)

France métropolitaine: 79 euros – Europe: 95 euros

Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressés par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Italie

Taux de fibres recyclées: 0%

« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau »: Ptot 0.008kg/tonne

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.



10-32-2813 / Certifié PEFC / pefc-france.org



LOÏC MANGIN
Rédacteur
en chef adjoint

Le pantalon de Schrödinger

En juin 2001, un hebdomadaire vantait une invention des laboratoires Haggard, installés à Dallas, aux États-Unis: le «pantalon de Schrödinger». L'objet, quantique, serait simultanément un vêtement décontracté et une tenue de soirée. Pratique! Las, la parution était *The Onion*, un journal parodique américain. Nos pantalons resteront longtemps classiques. Cependant, qu'un tel média s'empare d'un sujet *a priori* difficile d'accès en dit long sur les promesses et les attentes que suscite la physique quantique.

Et cette fois, elles sont bien réelles. Nous sommes bien à l'aube d'une révolution quantique, la deuxième en fait. La première était fondée sur la meilleure compréhension du comportement des électrons, des atomes, de la lumière... et s'est traduite par la mise au point de toute l'électronique moderne, des GPS, de l'IRM, des lasers et des ordinateurs classiques, et même par la première détection d'ondes gravitationnelles.

Un bilan somme toute plus qu'honorable, mais peut-être bien mince par rapport aux espoirs mis en la seconde révolution quantique. Celle-ci se développe sur les propriétés les plus contre-intuitives de la physique quantique, la superposition d'états et l'intrication. Une fois maîtrisés ces phénomènes, et ils le sont de plus en plus, ce numéro en atteste, c'est, entre autres, tout le paysage de nos communications (le pilier de notre civilisation), ordinateurs et internet, qui en sera bouleversé. La face du monde en sera assurément changée.

À côté de ces applications annoncées, l'histoire nous rappelle que chaque révolution comporte son lot d'imprévus, de surprises, d'idées folles qui se concrétisent et envahissent notre quotidien. Alors pourquoi pas un «pantalon de Schrödinger»... ■

SOMMAIRE

POUR LA
SCIENCE
HORS-SÉRIE

N° 107
Mai-Juin 2020

La nouvelle RÉVOLUTION QUANTIQUE

Constituez
votre collection
de *Hors-Séries*
Pour la science
Tous les numéros
depuis 1996

pourlascience.fr



P. 6

Repères

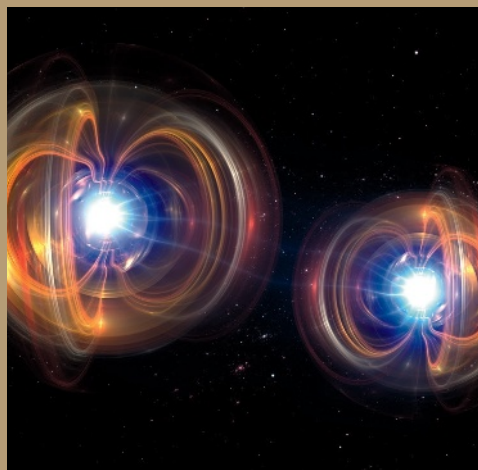
Définitions, grands principes, schémas...
l'indispensable pour apprécier ce numéro.

P. 10

Avant-propos

ALAIN ASPECT

« J'étais loin d'imaginer
cette explosion d'idées
d'applications autour
de l'intrication ! »



UN MONDE TOUJOURS PLUS QUANTIQUE...

P. 16

Une efficacité déraisonnable ?

Étienne Klein et Carlo Rovelli

Centenaire, la physique quantique
est au cœur des technologies modernes.

P. 26

Pas d'échappatoire pour l'intrication

Ronald Hanson et Krister Shalm

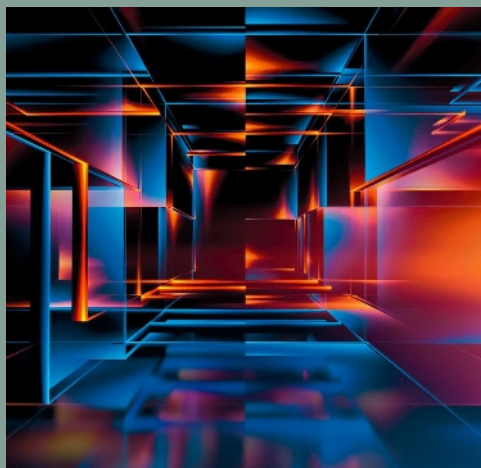
Selon Einstein, des variables cachées expliquent
l'intrication quantique. Il n'en est rien.

P. 36

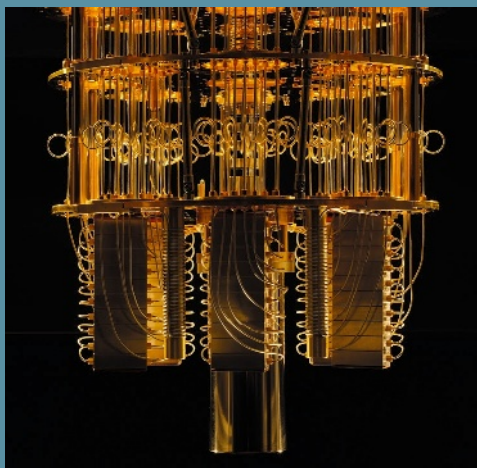
Un pont entre deux mondes

Tim Folger

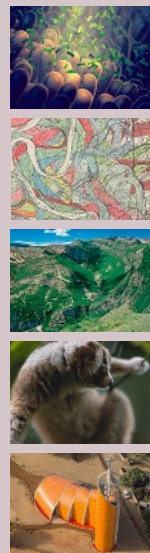
On comprend mieux la transition du monde
quantique à la réalité classique du quotidien.



... MAIS UNE RÉALITÉ QUESTIONNÉE



L'ORDINATEUR ULTIME



RENDEZ-VOUS par Loïc Mangin

P.46

La physique quantique sans gravité

Antoine Tilloy

Et si la gravité n'était pas quantique? Repensons alors les bases de la physique quantique.

P.54

La matrice de l'espace-temps

Clara Moskowitz

L'intrication quantique de bribes d'information est-elle la matrice de l'espace et du temps?

P.60

Le darwinisme quantique à l'heure des tests

Philip Ball

Le darwinisme quantique explique le passage du monde quantique à la réalité classique.

P.66

L'ami de Wigner, un paradoxe mis à l'épreuve

Sean Baillly

Une expérience de pensée aide à mieux comprendre le rôle de l'observateur.

P.78

La course aux qubits

Tristan Meunier

Plusieurs types de structures sont en lice pour équiper les futurs ordinateurs quantiques.

P.86

Suprématie quantique : le guide pratique

Kevin Hartnett

De quoi parle-t-on vraiment lorsqu'on prétend avoir atteint la «suprématie quantique»?

P.92

Une suprématie contestée

Kevin Hartnett

Google et IBM s'opposent sur l'idée de «suprématie quantique». Qui a raison?

P.96 Entretien

Inventer l'internet du futur

Stephanie Wehner par Natalie Wolchover

À quoi ressemblera le réseau qui reliera les ordinateurs quantiques?

P.102 Entretien

«Les Chinois ont mis un grand coup d'accélérateur avec des moyens considérables»

Pascale Senellart-Mardon

P.108

À lire en plus

P.110

Rebondissements

Et si la matière noire n'existait pas? • Collisions, π et ordinateur quantique • Le microbiote, maître ès épigénétique • Le mystère du carbone perdu •

P.114

Données à voir

Et au milieu coule un fleuve

P.116

Les incontournables

Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

P.118

Spécimen

Les ultrasons du loris lent

P.120

Art & Science

Église, termites et coquillages

Petit guide de survie dans un monde quantique



En 1871, les physiciens avaient toutes les raisons d'être optimistes. Avec la mécanique classique et la théorie de l'électromagnétisme, ils pensaient décrire la quasi-totalité des systèmes physiques, à quelques petits détails près... où se cachait le diable ! Ainsi, quand ils calculaient le spectre de la lumière émise par un objet chaud (un corps noir) en se plaçant dans le cadre classique, les résultats prédisaient une absurde « catastrophe ultraviolette », une intense émission de rayons ultraviolets et X, susceptible d'aveugler quiconque regarderait, par exemple, un poêle à charbon ! La solution vint près de trente ans plus tard, quand Max 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 et donner naissance à la physique quantique. En un siècle, elle est devenue la théorie fondamentale des particules de matière constituant les objets de l'Univers et des champs de force animant ces objets. Pour efficace qu'elle soit, elle n'en met pas moins en scène des idées et des concepts parfois déroutants. Petit tour d'horizon.

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

En s'appuyant sur les travaux d'Einstein sur l'effet photoélectrique, Louis de Broglie a postulé que la lumière est constituée d'ondes lumineuses et de corpuscules (des photons). De là est née la notion de dualisme entre onde et particule : tous les objets physiques présentent des propriétés parfois d'ondes et parfois de corpuscules. Les unes ou les autres se manifestent selon le dispositif de mesure.

SUPERPOSITION

Un système microscopique, par exemple un atome – qui est comme la lumière à la fois onde et particule – peut, à l'instar d'une onde, se trouver en plusieurs endroits à la fois ; il peut aussi être en même temps dans des états d'énergies ou de polarisation différentes.

INDÉTERMINISME

Conséquence de la dualité onde-corpuscule, la physique quantique est de nature probabiliste. L'onde associée à une particule est en fait une onde de probabilité (la fonction d'onde) : son intensité correspond à la probabilité de trouver la particule en un endroit ou dans un état donné. Plus encore, le principe d'incertitude de Heisenberg édicte que plus notre connaissance d'une certaine propriété d'un système est précise, plus notre connaissance de certaines autres propriétés du même système sera imprécise. La détermination précise de la position d'une particule, par exemple, implique que celle de sa vitesse devient imprécise.

FONCTION D'ONDE

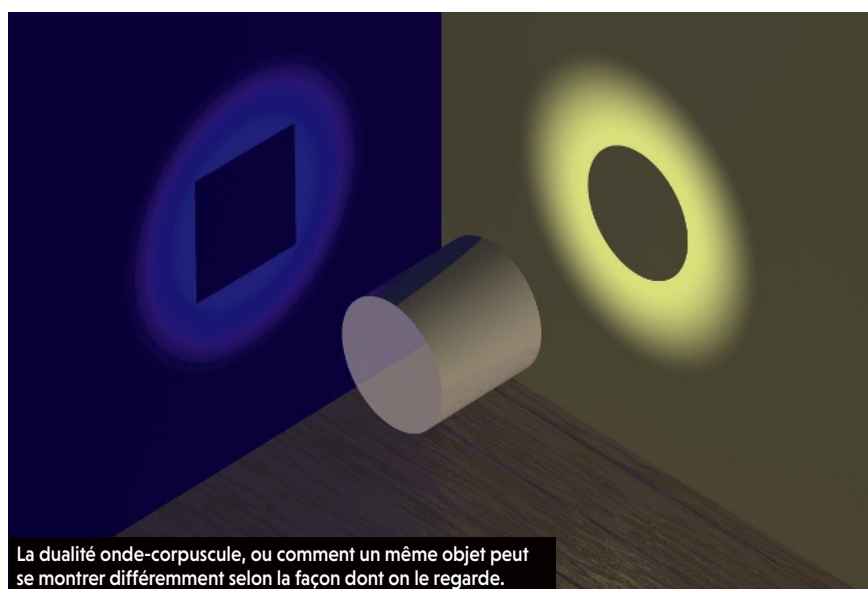
Calculée à partir de l'équation de Schrödinger, elle indique la probabilité de trouver une particule en un point. Ce n'est qu'en faisant la mesure que l'on sait où elle se trouve. Outre la position, cette incertitude concerne également d'autres grandeurs physiques comme la vitesse, l'énergie, le moment cinétique, le spin...

EFFONDREMENT DE LA FONCTION D'ONDE, OU DÉCOHÉRENCE

Une superposition quantique de multiples états ne peut se maintenir qu'avec un système isolé. Toute tentative d'observation ou de mesure d'une particule entraîne automatiquement son effondrement en un état unique, autrement dit le choix d'une possibilité.

INTRICATION

Les parties d'un système quantique ayant interagi, par exemple une paire de photons, restent liées : les mesures faites sur l'une ont un effet immédiat sur les résultats des mesures faites sur l'autre, même quand ces parties sont très éloignées. Les états des deux parties sont corrélés sans qu'aucun signal ne soit échangé entre elles.



La dualité onde-corpuscule, ou comment un même objet peut se montrer différemment selon la façon dont on le regarde.