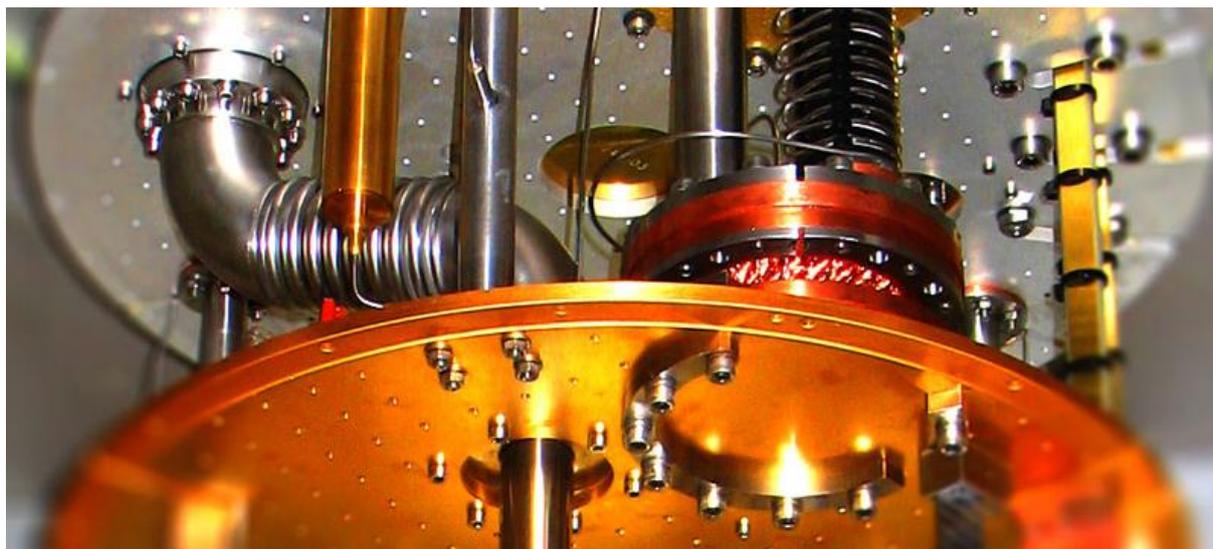


COMMUNIQUÉ DE PRESSE NATIONAL – PARIS LE 9 avril 2020

## Les anyons révèlent leurs propriétés quantiques exotiques

**Des physiciens du Laboratoire de physique de l'ENS (ENS-PSL/CNRS/Sorbonne Université/Université de Paris) et du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (CNRS/Université Paris-Saclay) mettent en évidence les propriétés quantiques exotiques des anyons, particules intermédiaires entre les fermions et les bosons. Leurs travaux font la une de la revue scientifique américaine *Science*.**

**Une nouvelle reconnaissance pour ce laboratoire multi-tutelle récemment créé et un succès collectif pour la dizaine de chercheurs de l'ENS-PSL, de Sorbonne Université et du CNRS à l'origine de cette découverte.**



*Réfrigérateur à dilution utilisé pour atteindre une température de quelques dizaines de MilliKelvins (plus de dix mille fois inférieure à la température ambiante) nécessaire à l'observation des anyons ; ©Hubert Raguez\_ENS-PSL*

### Fermions, bosons et autres quasiparticules exotiques, voyage en terre quantique

Dans notre monde tridimensionnel, la mécanique quantique qui décrit le monde microscopique n'autorise l'existence que de deux types de particules : les fermions et les bosons. Chacun aura entendu parlé de l'électron, la particule élémentaire de la famille des fermions qui assure le transport du courant électrique. Chez les bosons, c'est le photon, la particule élémentaire associée à la propagation de la lumière qui nous est sans doute la plus familière. Les fermions et les bosons ont des comportements collectifs complètement différents. Les premiers tendent à se repousser ou à s'exclure. C'est cette faculté qui permet d'expliquer des phénomènes aussi variés que la structure électronique des atomes, la stabilité des étoiles à neutrons ou bien la différence entre les métaux, conducteurs du courant électrique, et les isolants. Les bosons au contraire, ont tendance à se

regrouper permettant ainsi d'expliquer certaines propriétés de la lumière ou encore les phénomènes de superfluidité ou de supraconductivité, tous deux liés à la condensation d'un grand nombre de bosons dans un même état. Pour caractériser les comportements quantiques distincts d'un ensemble de fermions et de bosons, on parle de statistiques quantiques fermioniques ou bosoniques.

La situation est complètement différente dans un univers bidimensionnel où d'autres types de quasiparticules exotiques, différentes des fermions et des bosons, peuvent exister. Elles apparaissent dans certains types de conducteurs électriques bidimensionnels dans lesquels les électrons interagissent très fortement entre eux. Les mouvements collectifs des électrons sont alors parfaitement décrits par le déplacement de nouveaux objets élémentaires, les anyons. Au contraire des fermions qui s'excluent complètement, et des bosons qui peuvent tous condenser dans le même état, les anyons peuvent former de petits paquets de particules s'excluant mutuellement.

Si l'existence des anyons et leurs propriétés quantiques, intermédiaires entre celles des fermions et les bosons, ont été prédites théoriquement il y a quarante ans, leur nature fondamentalement différente était restée inaccessible jusqu'ici. Seules certaines de leurs propriétés exotiques avaient pu être observées par les nombreux travaux théoriques et expérimentaux qui leur ont été consacrés. Par exemple, des chercheurs ont dévoilé en 1997 leur charge électrique fractionnaire, c'est à dire égale à une fraction de la charge élémentaire d'un électron.

### **Des physiciens créent les conditions d'observation des anyons**

Pour sonder les propriétés quantiques des anyons, il a fallu revenir au cœur des différences de comportement entraînées par la statistique quantique. Les chercheurs du LPENS, Laboratoire de physique de l'Ecole normale supérieure (ENS-PSL/CNRS/Sorbonne Université/Université de Paris), ont utilisé un collisionneur au sein d'une puce électronique fabriquée par des physiciens du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (CNRS/Université Paris-Saclay). Cette puce permet de réaliser, dans un conducteur électrique bidimensionnel, des collisions entre anyons. Les collisionneurs quant à eux sont les instruments de choix pour caractériser les effets de statistique quantique. Ils permettent aux physiciens, en observant les résultats d'une collision entre deux particules, de quantifier la tendance des quasiparticules à se regrouper ou à s'exclure.

Pour conclure définitivement à l'existence des anyons, ces quasiparticules ni vraiment fermions ni vraiment bosons, les chercheurs ont mis en place des conditions particulières d'expérience. Des conditions susceptibles de préserver les propriétés quantiques des anyons. C'est dans un conducteur microscopique dont le diamètre est comparable à celui d'un cheveu et à des températures ultra basses, plus de dix mille fois inférieures à la température ambiante, que tout s'est joué. Le résultat des expériences a permis de caractériser une tendance des anyons à se regrouper en paquets de particules, un comportement complètement différent de celui des électrons qui leur ont donné naissance et qui correspond au comportement quantique attendu pour des anyons.

Ce sont ces travaux qui font la une aujourd'hui de l'une des plus prestigieuses revues scientifiques mondiales.

### **Vers le calcul quantique topologique**

En élargissant le spectre des particules connues dans les systèmes bidimensionnels, ces résultats sont une avancée remarquable pour la physique fondamentale et pour les scientifiques qui peuvent désormais manipuler des objets élémentaires aux propriétés nouvelles.

Certaines d'ailleurs semblent très prometteuses pour la recherche en calcul quantique topologique si nécessaire pour avancer vers l'ordinateurs quantique. Un ordinateur du futur dont les opérations de calcul seraient basées sur les échanges de positions d'anyons. Rappelons que les opérations de calcul quantique usuelles sont basées sur la manipulations d'états quantiques dont la fragilité constitue pour l'instant un verrou technologique majeur. Elles pourraient bénéficier des travaux publiés aujourd'hui.

#### À propos de l'équipe de recherche :

Les travaux publiés aujourd'hui dans *Science* ont été conduits par une équipe réunissant des physiciens du CNRS, de Sorbonne Université et de l'Ecole normale supérieure-PSL.

Cette équipe fait partie du groupe de physique mésoscopique du LPENS, un laboratoire de l'ENS-PSL, du CNRS, de Sorbonne Université et de l'Université de Paris. Elle a collaboré pour cette publication avec l'équipe [Phynano du C2N, laboratoire du CNRS et](#) de l'Université Paris-Saclay.

Les travaux de recherche du groupe de physique mésoscopique portent de manière générale sur les règles quantiques du transport du courant électrique dans des conducteurs modèles comme les gaz bidimensionnels d'électrons, le graphène, les nanotubes de carbone, les isolants topologiques ou encore les qubits supraconducteurs. Ils bénéficient du soutien financier du Conseil européen pour la recherche (ERC), de l'Agence nationale pour la recherche (ANR) et du réseau Renatech.

#### Bibliographie :

---



**Fractional statistics in anyon collisions**, H. Bartolomei, M. Kumar, R. Bisognin, A. Marguerite, J.M. Berroir, E. Bocquillon, B. Plaçais, A. Cavanna, Q. Dong, U. Gennser, Y. Jin, G. Fève, *Science*, le 10 avril 2020.

*Digital Cover of Science, 10 APRIL 2020: VOL 368 ISSUE 6487*

#### Contacts chercheurs

---

[Gwendal Fève](#) (Professeur Sorbonne Université au LPENS) | Tél : +33 1 44 32 25 79 | [gwendal.feve@ens.fr](mailto:gwendal.feve@ens.fr)

[Jean-Marc Berroir](#) ( ENS-PSL ; Directeur du Laboratoire de Physique de l'ENS) | Tél : 01 44 32 25 90 | [jean-marc.berroir@ens.fr](mailto:jean-marc.berroir@ens.fr)

#### Contact presse :

---

ENS - PSL | [olen.gaultier@ens.psl.eu](mailto:olen.gaultier@ens.psl.eu)

Sorbonne Université | [claire.de\\_thoisy-mechin@sorbonne-universite.fr](mailto:claire.de_thoisy-mechin@sorbonne-universite.fr)

# Abstract

## Statistique fractionnaire d'anyons dans un conducteur bidimensionnel

*En réalisant une expérience de collision entre excitations élémentaires d'un conducteur bidimensionnel, des physiciens ont pu révéler la statistique fractionnaire d'anyons, intermédiaire entre les statistiques bosoniques et fermioniques. Ces résultats pourraient ouvrir la voie au calcul topologique basé sur l'échange de certaines variétés d'anyons.*

---

Dans l'espace à trois dimensions, les particules élémentaires se divisent exclusivement entre fermions (comme les électrons par exemple) et bosons (comme les photons) selon les propriétés de symétrie de la fonction d'onde décrivant l'état du système lors de l'échange de deux particules. Lors de l'échange de deux fermions, la fonction d'onde acquiert une phase,  $\varphi = \pi$ . En revanche, dans le cas des bosons, cette phase est nulle,  $\varphi = 0$ . Cette différence entraîne des comportements collectifs profondément distincts entre les fermions qui tendent à s'exclure et les bosons qui tendent à se regrouper. La situation est différente dans les systèmes bidimensionnels qui peuvent accueillir des quasiparticules exotiques, appelés anyons, pouvant obéir à des statistiques quantiques intermédiaires caractérisées par une phase  $\varphi$  variant entre 0 et  $\pi$ . L'existence de ces quasiparticules a été prédite, il y a près de quarante ans, dans des conducteurs bidimensionnels où les corrélations entre électrons sont très fortes, comme le régime de Hall quantique par exemple.

Ce régime de Hall quantique est obtenu en appliquant un champ magnétique perpendiculaire à la surface d'un gaz bidimensionnel d'électrons. Dans une description quantique du système, l'énergie cinétique des électrons est quantifiée et, pour les champs magnétiques forts (typiquement la dizaine de Tesla), tous les électrons viennent occuper un unique niveau d'énergie. L'énergie cinétique est alors gelée et les interactions entre électrons jouent un rôle dominant, entraînant des corrélations très fortes entre électrons favorables à l'émergence de ces quasiparticules exotiques. Ainsi, les excitations élémentaires du régime de Hall quantique fractionnaire, atteint lorsqu'une fraction  $\nu = \frac{1}{m}$  ( $m = 3, 5, \dots$ ) du premier niveau d'énergie cinétique est occupée, portent une charge fractionnaire  $q = e/m$  et obéissent à une statistique fractionnaire caractérisée par une phase d'échange  $\varphi = \pi/m$ . Leur charge fractionnaire a pu être mise en évidence mais, en dépit de nombreux travaux durant les trente dernières années, aucune signature expérimentale claire de statistique fractionnaire n'a pu être observée jusqu'ici. Ces efforts se sont concentrés sur la réalisation d'interféromètres permettant une mesure directe de la phase  $\varphi$ . Toutefois, l'interprétation de ces expériences est complexe car d'autres contributions se combinent aux effets de statistique. Par ailleurs, les effets de décohérence sont très importants dans ces systèmes fortement corrélés, atténuant très fortement les signatures expérimentales attendues.

En développant une approche différente, basée sur l'étude de collisions d'anyons dans un gaz d'électron bidimensionnel, des physiciens du laboratoire de Physique de l'ENS (LPENS) et du Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N) ont pu mettre en évidence la statistique fractionnaire de ces quasiparticules. Leurs travaux font l'objet d'une publication dans la revue *Science*.

Le collisionneur, fabriqué au C2N (figure A), est une puce électronique d'un gaz d'électron bidimensionnel de très haute mobilité, formé à l'interface d'une hétérostructure de semiconducteur GaAs/AlGaAs, et de dimension caractéristique de quelques micromètres. Des électrodes métalliques déposées à la surface du gaz d'électrons permettent de définir des lames séparatrices appelées contact ponctuels quantiques (CPQ). Deux CPQ (CPQ<sub>1</sub> et CPQ<sub>2</sub> sur la figure) assurent l'émission des quasiparticules vers le CPQ situé au centre de l'échantillon (cQPC sur la figure) et utilisé comme lame séparatrice pour la collision. Les expériences ont ensuite été réalisées au LPENS dans un réfrigérateur à dilution permettant d'atteindre des températures de quelques dizaines de milliKelvins nécessaires à l'observation du régime de Hall quantique fractionnaire. Les collisions sont d'abord étudiées dans le régime de Hall quantique entier (lorsque le nombre  $\nu$  de niveaux d'énergie cinétique occupés est un entier, ici  $\nu = 2$ ). Dans ce régime, les excitations élémentaires sont des électrons obéissant à la statistique fermionique usuelle. Elle se traduit, lors d'une collision, par un effet de dégroupement, les électrons empruntant systématiquement des bras de sortie distincts de la séparatrice. Cet effet, lié au principe d'exclusion de Pauli peut être mis en évidence en mesurant les corrélations des fluctuations de courant en sortie de la lame séparatrice (Figure B). La statistique fermionique se traduit par leur suppression complète. Le résultat observé est complètement différent pour un remplissage fractionnaire  $\nu = \frac{1}{3}$ . La statistique fractionnaire conduit à une suppression de l'effet de dégroupement, les quasiparticules pouvant alors se regrouper en paquets de charge dans un même bras de sortie de la lame séparatrice. Cet effet se traduit par

l'observation de de corrélations négatives des fluctuations de courant (Figure B), en excellent accord avec des prédictions théoriques récentes pour une phase d'échange  $\varphi = \frac{\pi}{3}$  attendue pour  $\nu = \frac{1}{3}$ .

Ces expériences confirment le rôle combiné des fortes corrélations entre électrons et de la dimensionnalité du conducteur pour l'émergence d'anyons aux propriétés intermédiaires entre les fermions et les bosons. Elles pourront être généralisées, dans le futur, à d'autres fraction de remplissage du premier niveau d'énergie (comme  $\nu = \frac{2}{3}, \frac{1}{5}, \dots$ ) pour lesquels d'autres statistiques fractionnaires sont attendues. En particulier, réaliser ces expériences dans le régime non-abélien (au remplissage  $\nu = \frac{5}{2}$  par exemple), régime dans lequel les opérations d'échange de particules ne commutent plus et ne peuvent donc plus être décrite par une simple phase, ouvrirait la voie au calcul topologique basé sur l'échange de ces quasiparticules exotiques.

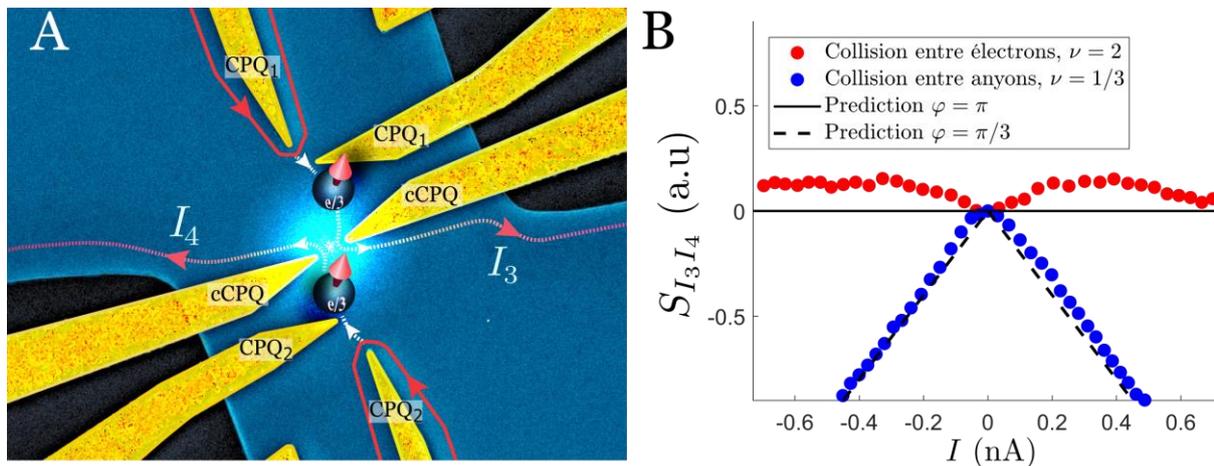


Figure A : Image au microscope électronique (en fausses couleurs) du collisionneur anyonique. Le gaz bidimensionnel d'électrons est représenté en bleu. Les quasiparticules se déplacent le long des canaux de bord (en rouge). Des paires d'électrodes (couleur or) permettent de définir des lames séparatrices appelés contact ponctuels quantiques (CPQ). CPQ<sub>1</sub> et CPQ<sub>2</sub> servent à émettre des quasiparticules qui entrent en collision sur la lame séparatrice centrale cCPQ. Figure B : mesure des corrélations  $S_{I_3 I_4}$  des fluctuations des courants  $I_3$  et  $I_4$  en sortie de lame séparatrice en fonction du courant de quasiparticules incident.