

# Les promesses des fermions de Majorana

Manuel Houzet, Julia Meyer et Pascal Simon

**Chapo :** Les particules exotiques postulées par Ettore Majorana trouvent un écho considérable en physique du solide. Plusieurs laboratoires ont annoncé l'observation de fermions de Majorana dans des structures supraconductrices qui pourraient former la base d'un ordinateur quantique très stable.

**Contexte :** En 1937, le physicien italien Ettore Majorana prédit une nouvelle particule qui serait sa propre antiparticule, le fermion de Majorana. Aucune particule élémentaire de la sorte n'a encore été identifiée. En revanche, la physique des solides permet de réaliser des « quasi-particules » avec des propriétés plus riches que leurs constituants élémentaires. Ce sont de telles quasi-particules avec des propriétés similaires aux fermions de Majorana dont la découverte a été annoncée.

Près de 80 ans après sa disparition, les travaux d'Ettore Majorana continuent d'inspirer les chercheurs. En général, quand une particule rencontre son antiparticule, les deux se désintègrent. Dans son dernier article [1], Ettore Majorana prédit qu'une particule élémentaire pourrait être sa propre antiparticule. Il suffirait alors que deux telles particules se rencontrent pour s'annihiler. Ces spéculations auraient des conséquences majeures en physique des particules et en cosmologie. Cependant, aucune particule élémentaire n'a été identifiée comme fermion de Majorana à ce jour.

La physique des solides offre un terrain alternatif pour créer des quasi-particules avec des propriétés similaires. En effet, les propriétés de la matière sont dues aux électrons. Ceux-ci interagissent entre eux et avec les vibrations du réseau cristallin formé par l'ensemble des atomes d'un solide. Par conséquent, les électrons ont des comportements collectifs. Il est alors plus commode de décrire ces comportements comme étant ceux d'une « quasi-particule » émergente, plutôt que la somme d'une multitude de comportements individuels des électrons. Souvent, ces quasi-particules ont des propriétés très similaires à celles des électrons dont elles sont issues. Mais il arrive aussi qu'elles aient des propriétés très différentes. C'est, en particulier, le cas pour les quasi-particules de Majorana récemment observées. Nous allons voir que ces quasi-particules possèdent des propriétés encore plus fascinantes que celles envisagées par Majorana, qui intéressent des entreprises comme Microsoft dans la quête d'un ordinateur quantique.

Pour comprendre l'origine de ces nouvelles quasi-particules, il faut introduire la notion d'antiparticule dans les solides. Dans les métaux, les électrons, qui sont des fermions, occupent tous des états quantiques différents (c'est le principe de répulsion de Pauli). Ils remplissent donc tous les états disponibles jusqu'à une certaine énergie, appelée énergie de Fermi. On dit qu'ils forment une mer de Fermi. Les excitations de cette mer sont les quasi-particules. On distingue alors les « électrons » créés au-dessus de la mer de Fermi et les « trous » créés en dessous (Fig. 1a). Comme un trou correspond à l'absence d'un électron, il se comporte comme un « anti-électron » de charge opposée à celle de l'électron.

Pour observer des fermions de Majorana, il faut se pencher sur le cas particulier des matériaux supraconducteurs. Dans ces matériaux, les électrons se regroupent par paires. Il faut fournir une énergie finie pour briser ces paires et exciter des quasi-particules, qui sont des superpositions d'électrons et de trous. En deçà de cette énergie, il existe un gap, c'est-à-dire une région inaccessible aux quasi-particules (Fig. 1b).

La situation devient encore plus intéressante lorsque les propriétés des supraconducteurs varient dans l'espace, par exemple au bord de ces matériaux. Dans ce cas, des états localisés peuvent apparaître dans le gap. Typiquement ces états apparaissent par paires d'énergies finies et opposées par rapport à l'énergie de Fermi. Toutefois, dans certains supraconducteurs, il apparaît un unique état avec une énergie égale à l'énergie de Fermi. On parle alors de supraconducteurs topologiques, car l'état reste piégé, donc stable, à cette énergie aussi longtemps que le gap supraconducteur ne se refermera pas.

Cette stabilité s'explique par la nature exotique de cet état : il est en fait constitué de deux quasi-particules localisées à des bords opposés du matériau, comme s'il était coupé en deux (Fig. 2) : on parle de caractère demi-fractionnaire. Ce sont de telles quasi-particules que l'on peut identifier aux fermions de Majorana, car elles se comportent comme leur propre antiparticule. Leur « protection topologique » aux bords du matériau constitue un de leurs attraits. Cependant, leur caractère demi-fractionnaire est un concept absent pour les particules prédites par Ettore Majorana qui leur confère des propriétés bien plus spectaculaires.

L'état formé par les deux quasi-particules de Majorana spatialement séparées peut être occupé ou vide. Un tel système quantique à deux niveaux forme un bit quantique, ou « qubit », qui est l'élément de base pour encoder de l'information dans un ordinateur quantique. Contrairement à d'autres réalisations de qubits possibles, celui-ci est non-local grâce à la séparation spatiale de ses deux constituants. Il est donc bien plus robuste vis-à-vis des perturbations – généralement locales – qui pourraient effacer l'information.

L'enjeu est aujourd'hui de produire, observer et manipuler ces quasi-particules de Majorana. Le modèle le plus simple d'un système où ils pourraient être réalisées a été proposé par le physicien russo-américain Alexei Kitaev en 2001 [2] (Fig. 2). Il correspond à une chaîne d'électrons sans degré de liberté interne. Il n'y a pas de matériau connu qui serait décrit par ce modèle. Mais il existe des astuces pour obtenir les mêmes propriétés en combinant différents matériaux.

Pour réaliser expérimentalement une chaîne de Kitaev, il faut que les électrons qui la constituent n'aient pas de degré de liberté interne. Or en temps normal, deux spins différents existent pour les électrons. Il faut donc se débarrasser de l'une des deux espèces d'électrons. On pourrait appliquer un fort champ magnétique qui privilégie les électrons dont le spin est aligné avec le champ. Mais celui-ci aurait pour effet principal de détruire la supraconductivité dans la plupart des matériaux. On parvient à résoudre ce problème en enrobant un nanofil semiconducteur (par exemple de l'arséniure d'indium) avec de l'aluminium, un supraconducteur utilisé couramment dans les expériences à basse température. Le nanofil hérite alors des propriétés supraconductrices grâce à l'effet de proximité, tout en bénéficiant de ses propres caractéristiques. Ainsi, dans un matériau

dans lequel les électrons se déplacent avec une vitesse qui dépend de l'orientation de leur moment magnétique, la dégénérescence de spin pourra être levée avec un faible champ magnétique, préservant ainsi la supraconductivité.

Dans ces conditions, les expérimentateurs détectent l'apparition de quasi-particules de Majorana à énergie nulle en mesurant un courant à très basse tension à travers un contact métallique placé à l'extrémité de l'échantillon. Contrairement aux supraconducteurs usuels, où le gap (Fig. 1b) empêche la circulation d'un courant en-dessous d'une tension de polarisation seuil, la présence d'une quasi-particule de Majorana au bord de l'échantillon permet à un courant de passer dans un supraconducteur topologique à très basse tension. Plusieurs observations compatibles avec cette signature ont été publiées [3,4]. L'intérêt des chercheurs se déplace désormais vers des manipulations de ces quasi-particules de Majorana, qui peuvent être induites par des grilles électrostatiques et des flux magnétiques, et qui apporteront des signatures convaincantes de leur nature demi-fractionnaire.

Pour réaliser un ordinateur quantique, il faut disposer d'un grand nombre de qubits - et donc de quasi-particules de Majorana. Pour cela, un seul nanofil ne suffit pas et différentes structures bien plus complexes ont été proposées. C'est dans le contexte de la manipulation de l'information que le potentiel des quasi-particules de Majorana se révèle : l'information peut être manipulée en échangeant leurs positions [5]. On réalise ainsi des opérations quantiques sur ces qubits. Ces opérations peuvent être vues comme un jeu de bonneteau quantique - impossible à réaliser avec les particules usuelles - où on déplace des billes cachées sous des gobelets, sans soulever ces derniers. Cette perspective de construire un ordinateur quantique topologiquement protégé explique l'engouement pour ces nouvelles quasi-particules (voir encadré).

Le domaine de recherche a fortement évolué depuis les années 2000. Il a pu se développer grâce à des progrès importants de nano-fabrication d'échantillons de très grande qualité. Même si la route est longue avant un éventuel ordinateur quantique topologique, on peut raisonnablement espérer que les efforts actuels conduiront à des découvertes majeures.

## Références

- [1] Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone, E. Majorana, Nuovo Cimento 14, 171 (1937).
- [2] Unpaired Majorana fermions in quantum wire, A. Y. Kitaev, Phys. Usp. 44, 131 (2001).
- [3] Signatures of Majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices, V. Mourik, K. Zuo, S. M. Frolov, S. Plissard, E. Bakkers, and L. Kouwenhoven, Science 336, 1003 (2012).
- [4] Exponential protection of zero modes in Majorana islands, S. Albrecht, A. Higginbotham, M. Madsen, F. Kuemmeth, T. Jespersen, J. Nygard, P. Krogstrup, and C. M. Marcus, Nature 531, 206 (2016).
- [5] Non-abelian statistics of half-quantum vortices in p-wave superconductors, D. A. Ivanov, Phys. Rev. Lett. 86, 268 (2001).

Définitions : Le spin d'un électron est un moment magnétique intrinsèque qui peut pointer dans deux directions opposées.

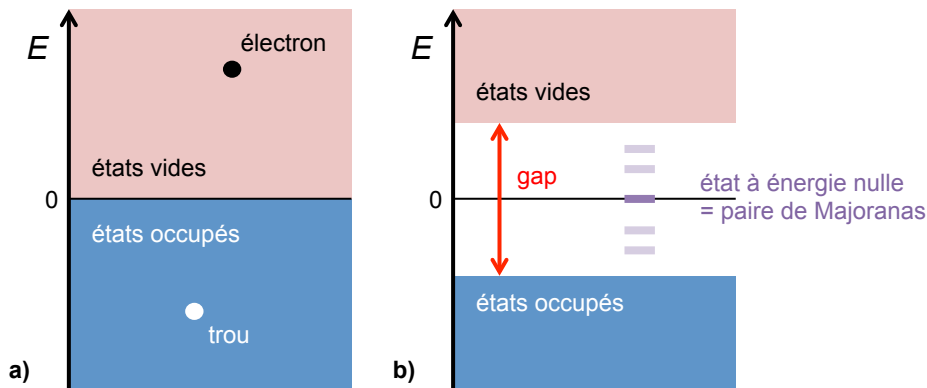


Fig. 1 a) Dans un métal, les états d'énergie négative sont occupés – ils forment une mer de Fermi ; les états d'énergie positive sont vides. Les quasiparticules sont soit des électrons au-dessus de la mer de Fermi, soit des absences d'électrons (ou encore des trous) en dessous. b) Dans un supraconducteur, les états mobiles occupés et vides sont séparés par une région d'énergies inaccessibles (ou gap). Des états localisés peuvent apparaître dans le gap, tout en gardant des énergies opposées. Un supraconducteur topologique est caractérisé par l'apparition d'un unique état d'énergie nulle.

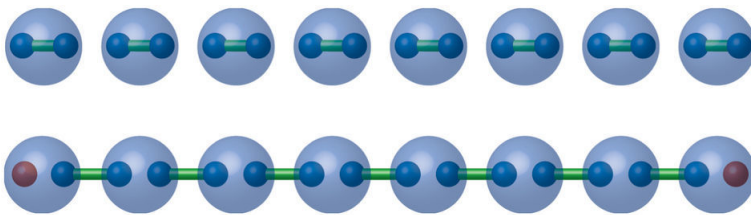


Fig. 2 Le modèle de Kitaev explique la robustesse de l'état d'énergie nulle par sa nature fractionnaire. On peut imaginer chaque électron localisé aux sites voisins d'une chaîne comme la superposition de deux demi-électrons. Dans les supraconducteurs usuels (en haut), les deux demi-électrons d'un même site restent fortement liés. En revanche, dans un supraconducteur topologique (en bas), la liaison est réalisée entre deux demi-électrons de sites voisins. Il reste alors deux demi-électrons libres (ronds rouges) à chaque extrémité de la chaîne : les quasi-particules de Majorana.