

intriqués à une température non nulle équivaut à l'étude d'un trou noir dans le cadre de la théorie des cordes. Le fait que des trous noirs soient impliqués montre à quel point ces dualités sont extraordinaires. Personne ne suggère que les phases quantiques de la matière contiennent véritablement des trous noirs ; le lien est plus subtil. Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, est connu pour avoir montré (entre autres choses) qu'à un trou noir est associée une certaine température. Celle-ci se traduit, dans la logique de la dualité, par le fait que le système correspondant de matière condensée est chaud, de sorte que l'onde de densité de spin ou le supraconducteur se transforme en un métal étrange.

Dialogue entre un trou noir et un superfluide

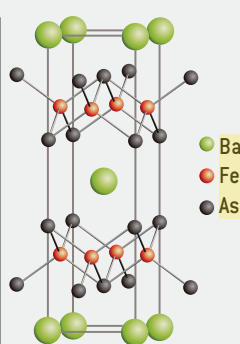
Ces méthodes ont permis de mieux expliquer les métaux étranges et d'autres états de la matière, mais elles ont été surtout utiles pour élucider la transition d'un superfluide à un isolant de Mott – type de matériau qui devrait être conducteur, mais dont les électrons sont bloqués dans des puits de potentiel qui les empêchent de conduire le courant. Un superfluide est analogue à un supraconducteur, si ce n'est qu'il est constitué d'atomes électriquement neutres et délocalisés dans le matériau. Et ce n'est pas la résistance électrique qui devient nulle, mais la viscosité du fluide. Ces dernières années, les expérimentateurs ont développé de nouvelles méthodes pour créer des superfluides artificiels. Ils mettent en place un réseau de lasers qui s'entrecroisent en formant une onde stationnaire périodique et versent dans ce dispositif de grandes quantités d'atomes extrêmement froids. Cela crée des puits de potentiel qui piègent plus ou moins les atomes. Si le potentiel est peu profond, les atomes se comportent comme un superfluide : ils se déplacent librement et sans résistance d'un site du réseau à un autre. Quand les chercheurs augmentent l'intensité du laser, donc la profondeur du potentiel périodique, les effets de corrélation sont augmentés et le superfluide se transforme brutalement en un isolant de Mott.

Au point de transition entre l'état superfluide et l'état isolant, les atomes circulent d'une façon très particulière. Par exemple, quand on supprime la pression externe qui fait se déplacer les atomes, ceux-ci s'immobilisent à une allure qui dépend de la température

Un exemple de métal étrange

À basse température, l'arséniure de baryum et de fer (BaFe_2As_2) change de propriétés en fonction de son dopage. Celui-ci consiste à remplacer une certaine fraction d'arsenic par du phosphore. Si le dopage est faible, le matériau forme un état qu'on nomme « onde de densité de spin ». Un électron du réseau cristallin se trouve entouré avec une plus grande probabilité d'électrons ayant un spin opposé. Dans cette phase, on observe une quasi-périodicité spatiale alternant des spins *haut* et *bas*.

Si la quantité de dopant augmente, la régularité de l'onde de densité de spin diminue. Elle disparaît pour la quantité critique de 30 pour cent d'arsenic



STRUCTURE de l'arséniure de baryum et de fer.

remplacé par du phosphore. Le spin de chaque électron a alors autant de chance d'être *haut* que *bas* sur chaque site du réseau cristallin. L'onde de densité de spin n'existe plus, mais le matériau devient supraconduc-

teur. Cependant, les physiciens pensent qu'il obéit à une théorie semblable à la théorie BCS, si ce n'est que la force attractive entre les paires d'électrons n'a pas pour origine les vibrations du réseau cristallin. Le mécanisme de formation des paires n'est pas encore compris.

La transition entre les phases est nommée point critique quantique. Si on maintient le dopage de 30 pour cent et que l'on augmente la température, une nouvelle phase apparaît, celle des métaux étranges dont la résistance électrique évolue différemment de celle des métaux ordinaires en fonction de la température. Un phénomène d'intrication massif entre ses électrons semble la décrire.

et de la constante de Planck, le paramètre fondamental de la théorie quantique, lequel n'intervient pas dans le comportement des autres phases. Nous avons expliqué ce comportement en imaginant que le fluide critique quantique était l'équivalent par dualité d'un trou noir dans la théorie des cordes.

La dualité a pourtant un inconvénient. Par nature, elle transforme ce qui est complexe en quelque chose de simple. Mais nous ne voulons pas toujours transformer le problème : nous voulons aussi comprendre la complexité en elle-même. La dualité est une boîte noire mathématique qui nous cache les détails des états intriqués ou la façon dont ces états apparaissent dans les matériaux réels. L'explication des mécanismes en jeu en est encore à ses débuts. Pour ceux d'entre nous qui ont l'habitude de réfléchir à la dynamique des électrons dans les cristaux, la théorie des cordes a apporté une nouvelle perspective à la dynamique des états quantiques complexes faisant intervenir l'intrication. Pour les théoriciens des cordes, l'intérêt que nous portions à leur approche a piqué leur curiosité pour les phases des matériaux quantiques, des phénomènes bien éloignés de la physique des commencements de l'Univers ou de ce qui se passe dans les accélérateurs de particules. L'étrange confluence de ces courants de pensée met en lumière d'une façon inattendue l'unité de la nature. ■

L'AUTEUR



Subir SACHDEV est professeur de physique à l'Université Harvard, aux États-Unis.

Il est l'auteur de l'ouvrage *Quantum Phase Transitions* (Cambridge University Press, 2011).

BIBLIOGRAPHIE

S. Sachdev, *What can gauge-gravity duality teach us about condensed matter physics ?*, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 3, pp. 9-33, 2012.

C. V. Johnson et P. Steinberg, *What black holes teach about strongly coupled particles*, *Physics Today*, vol. 63(5), pp. 29-33, 2010.

I. R. Klebanov et J. M. Maldacena, *Solving quantum field theories via curved spacetimes*, *Physics Today*, vol. 62(1), pp. 28-33, 2009.