

Le cinquantième de la théorie BCS de la supraconductivité

Philippe Nozières (nozieres@ill.fr)

Institut Laue-Langevin, 6 rue Jules Horowitz, 38000 Grenoble

Cet article reprend le texte de la conférence de Philippe Nozières, présentée le 11 juillet 2007 au Congrès général de la SFP à Grenoble, pour commémorer le cinquantième anniversaire de la théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer de la supraconductivité. Ces trois chercheurs se sont vus collectivement attribuer le prix Nobel de Physique 1972 pour cette théorie, habituellement appelée « théorie BCS ».

L'article célèbre de Bardeen, Cooper et Schrieffer, paraît en décembre 1957. Une brève lettre donnant les idées essentielles et le principe de la fonction d'onde sort en avril 1957. Je suis à l'époque thésard à Princeton avec David Pines, proche collaborateur de John Bardeen (ils viennent d'écrire un long article ensemble sur l'interaction électron-phonon). Le *preprint* de la lettre arrive donc tôt à Princeton, vers octobre-novembre 1956. Avec David, nous nous plongeons dedans avidement : je me vois encore refaisant l'algèbre à ma manière (la lettre ne donne aucun calcul détaillé) ! Dans sa forme originale, l'article propose une fonction d'onde étrange, qui superpose des états avec un nombre total de particules différent : or, ce nombre est fixé (« conservé » dans le langage des théoriciens) pour un système isolé – bizarre ! Mais les calculs sont simples et se prêtent à de multiples applications : atténuation ultrasonore, RMN, etc... L'accord avec les expériences disponibles est impressionnant.

Pour mesurer l'impact de cet article sur la communauté scientifique, il faut revenir en arrière et faire un peu d'histoire. La superfluidité de l'hélium et la supraconductivité restent mystérieuses, véritable épine dans la physique de la matière condensée. Les plus grands noms s'y sont frottés, avec des conflits d'une rare violence. Fritz London a compris dès 1936 la nature quantique du phénomène. Réfugié à Paris à l'Institut Henri Poincaré en 1937, il sent l'importance de la condensation de Bose-Einstein pour l'hélium 4, mais il ne sait la formuler que pour le gaz idéal, beaucoup trop naïf. Dans les supraconducteurs, personne ne pense à l'importance des paires d'électrons – et pourtant London sent bien que superfluidité et supraconductivité sont un seul et même phénomène. Ce regard visionnaire est ignoré par Lev Landau, pour qui la phénoménologie des propriétés thermodynamiques et du modèle à deux fluides est seule importante – il est vrai qu'elle est d'une grande efficacité ! L'origine profonde de ces effets révolutionnaires reste un défi sans réponse. Dans les années 50, Frölich propose une alternative intéressante, fondée sur les ondes de densité de charge qu'il a inventées avec Peierls, qui pourraient piéger les porteurs libres et les entraîner avec elles. Cela n'a rien à

voir avec la supraconductivité, mais l'effet existe et sera découvert un demi-siècle plus tard – par Pierre Monceau en particulier. En tout cas, cela allume la curiosité de Pierre Aigrain, qui me fait lire ces articles !

Pourtant, les ingrédients sont déjà là ! En 1947, Bogoliubov a fabriqué une théorie des liquides de bosons dilués très simple avec, en arrière-plan, l'hélium 4 superfluide. Il remplace l'opérateur création par un scalaire, une autre manière de mélanger des états ayant des nombres de particules différents. Une algèbre très simple dégage un spectre d'excitations discret $\omega(q)$, qui rappelle les idées de Landau. Avec le temps, cette simple hypothèse deviendra le concept central de la superfluidité : le condensat de Bose-Einstein est un état *cohérent*, où toutes les particules condensées ont la même fonction d'onde, avec la même phase : un tel « blocage de phase » assure la rigidité de la fonction d'onde macroscopique. Concrètement, la condensation de Bose-Einstein d'un gaz parfait minimise l'énergie cinétique en mettant toutes les particules dans l'état le plus bas – mais les premiers états excités sont tout près : « fractionner » le condensat ne coûte presque rien ! Une répulsion entre particules change la situation du tout au tout, car l'énergie d'échange de Fock n'existe qu'entre états différents. Pour des bosons, cette énergie d'échange est positive, contrairement aux fermions pour lesquels elle est négative. Fractionner un condensat coûte donc une énergie *macroscopique*. Mais phase et nombre de particules sont des variables conjuguées, un peu comme le temps et la fréquence en physique classique : bloquer le déphasage d'un point à l'autre implique une fluctuation des densités – c'est la clef du transport superfluide sans dissipation. Personne ne réalise ce fait essentiel en 1947, même pas Bogoliubov je le crois – ni Landau, qui ne respecte guère ce genre de théorie.

La découverte de l'effet isotopique a souligné l'importance de l'interaction électron-phonon. Bardeen montre que celle-ci peut engendrer une attraction entre électrons. Peut-elle surmonter la répulsion coulombienne ? Même aujourd'hui la réponse n'est pas claire – mais en fait, ce n'est pas nécessaire. L'idée que cette attraction peut conduire à des paires d'électrons analogues à un boson fait lentement son chemin. Trois

Australiens, Blatt, Butler et Schafroth, fabriquent une théorie extrêmement compliquée et maladroite d'un tel effet. L'inspirateur est Schafroth qui disparaîtra peu après dans un accident d'avion, mais c'est Butler qui vient aux États-Unis parler de ce travail. Le thésard que j'étais assiste au fond de la salle aux séminaires de l'Institute for Advanced Studies de Princeton. C'était un séminaire de luxe, avec, au premier rang, Oppenheimer (recteur), Pauli, Dyson, Yang, Lee, etc. Le malheureux Butler se fait massacrer par ces messieurs – le thésard n'y comprend pas grand-chose, mais sent instinctivement que l'idée est importante. Les grands hommes sont sans tendresse !

Dans ce contexte, l'article de BCS est une bombe. Son succès est immédiat, les applications pleuvent les unes après les autres. Rien à voir cependant avec le psychodrame des supraconducteurs à haute température critique en 1986. La physique des solides des années 50 regorgeait de sujets passionnants : semi-conducteurs, magnétisme, résonances de tout poil, etc ; la supraconductivité était un exemple parmi d'autres. Les physiciens n'étaient pas en quête de nouveauté et BCS n'a pas été la ruée vers l'or. Mais c'était quand même une révolution – qui soulevait des questions de fond. Elle violait sans scrupule la conservation stricte de la charge, qui pour beaucoup était un

dogme. Des gens aussi respectables que Greg Wentzel entrent en conflit avec John Bardeen, de nouveau sans ménagement. Pourquoi la supraconductivité soulève-t-elle ainsi les passions ? Je n'en sais rien. Hélas, la discussion reste formelle, personne ne réalisant que le blocage de la phase est la clef, rupture de symétrie aussi fondamentale que la symétrie de rotation des *spins* dans un ferromagnétique. C'est là qu'est la révolution *conceptuelle*, presque évidente pour un gaz de bosons. Permettez-moi d'interrompre l'histoire quelques instants, pour expliquer ce point crucial.

Phil Anderson est le premier à sentir l'analogie entre Bogoliubov et BCS, entre bosons et paires de fermions (il formule l'hybridation des électrons et des trous dans un langage analogue à celui des *spins*). Mais la véritable percée est celle de Brian Josephson en 1964, qui donne à la phase son statut de variable physique, pilotant les échanges de charge. Les articles de Josephson sont pour moi des petites merveilles, dégageant toute la physique derrière le formalisme. Là encore, l'acceptation n'est pas immédiate : Bardeen affirmera d'abord que l'effet Josephson ne peut pas exister – même les grands hommes peuvent se tromper ! L'évidence s'imposera très vite. En revanche, personne n'arrivera à convaincre John que la supraconductivité est une variante de la condensation de

Bose-Einstein de paires d'électrons, la physique du blocage de phase étant la même dans les deux cas. Je me souviens lui avoir montré vers 1980 (à Grenoble !) que sa fonction d'onde était exactement celle de Bogoliubov pour un gaz de bosons, où l'on remplace l'opérateur création d'un boson condensé b_0 par celui d'une paire d'électrons ($k \uparrow, -k \downarrow$) dans un état lié de fonction d'onde Φ_k . On retrouve BCS en quelques lignes, en minimisant l'énergie fondamentale par rapport à Φ_k . En prime, on interpole continûment entre condensation de Bose de paires diatomiques à un bout (attraction forte) et BCS à l'autre (attraction faible). John m'aimait bien, et pour me faire plaisir il a marmonné (comme toujours !) "it's very interesting – but, you know, superconductivity has nothing to do with Bose-Einstein condensation of pairs" !

Cinquante ans après, on peut se demander pourquoi la théorie de BCS a eu un tel retentissement. Bien sûr, elle expliquait pour la première fois un phénomène sur lequel tout le monde s'était cassé les dents. Bien sûr, elle introduisait des concepts novateurs – mais ils n'étaient pas évidents en 1957. Bien sûr, elle ouvrait un champ considérable. Mais elle n'était pas la seule. Je crois personnellement que son succès venait d'une part de sa simplicité, d'autre part de son contact avec l'expérience.



J. Bardeen



L. N. Cooper



J. R. Schrieffer

Les Prix Nobel de Physique 1972, « attribués pour leur théorie collective de la supraconductivité, habituellement appelée théorie BCS ».

John Bardeen (1908-1991). Université de l'Illinois, Urbana (USA).

Physicien des solides majeur du 20^e siècle, lauréat de deux prix Nobel, ses principaux domaines de recherche ont porté sur la conductivité électrique des métaux et des semi-conducteurs, les propriétés de surface des semi-conducteurs, la théorie de la supraconductivité et la diffusion des atomes dans les solides.

Il avait également reçu le prix Nobel de physique 1956 (avec W.H. Brattain et W. Shockley) pour la découverte de l'effet transistor, effectuée en 1947 dans les laboratoires de Bell Telephone.

Leon Neil Cooper (né en 1930). Brown University, Providence (RI, USA).

À l'origine physicien des particules élémentaires, il a été invité en 1955 par J. Bardeen à se joindre à lui, pour s'attaquer au problème théorique posé par la supraconductivité. En 1956, il a montré qu'en présence d'un gaz d'électrons indépendants, deux électrons qui interagissent par un potentiel attractif forment toujours une paire liée, première étape de la construction de la théorie BCS. Plus récemment, il s'est tourné vers les neurosciences. Depuis 1974, il est directeur du Centre des sciences neurologiques de Brown University, centre interdisciplinaire qui a pour mission d'étudier le système nerveux animal et le cerveau humain.

John Robert Schrieffer (né en 1931). University of Pennsylvania, Philadelphie (USA).

Son mémoire de thèse, présenté en 1958, portait sur sa contribution à la théorie BCS (la construction de la fonction d'onde macroscopique). Depuis, il a été directeur de l'Institut de physique théorique de l'université de Santa-Barbara (1984-89), puis professeur à l'université de Floride et directeur scientifique du laboratoire national (US) des champs magnétiques intenses. Ses travaux portent sur la supraconductivité à haute température, les électrons fortement corrélés et la dynamique des électrons sous champ magnétique élevé.

« Pour Jean Perrin, la physique, c'était "rechercher de l'invisible simple derrière le visible compliqué". BCS fournissait un langage pour ce faire. »

P. N.

Bibliographie

L'article fondateur de BCS : J. Bardeen, L.N. Cooper et J.R. Schrieffer, *Phys. Rev.* 108 (1957) 1175-1204.

Livres de base sur la théorie de la supraconductivité :

- B. Tinkham, *Initiation to Superconductivity*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New-York (1996), réédité chez Dover Books on Physics (2004).
- P.G. de Gennes, *Superconductivity of metals and alloys*, Addison Wesley (1972), réédité chez Westview Press (1999).
- J.R. Schrieffer, *Theory of superconductivity*, Benjamin, New-York (1964), réédité chez Westview Press (1971).

On trouve une bonne initiation aux aspects expérimentaux et théoriques de la supraconductivité dans le cours de H. Alloul, *Physique des électrons dans les solides*, Les Éditions de l'École polytechnique, Ellipses, Palaiseau (2007).

L'algèbre était élémentaire, tout un chacun pouvait s'y lancer et récolter des résultats inattendus. Le formalisme était transparent et pouvait s'adapter à une large gamme de situations – d'où l'extraordinaire moisson de résultats concrets que l'on pouvait comparer avec l'expérience. Après les résultats connus, interprétés dans l'article original, sont venues les prédictions des théoriciens, vite vérifiées par l'expérience. Outre l'effet Josephson que j'ai déjà mentionné, pensons à la réflexion Andreev-Saint-James à une interface normal-supraconductrice, qui convertit un électron en trou du côté normal, avec émission d'une paire superfluide qui disparaît dans le condensat (l'article de de Gennes et Saint-James, écrit en français, a longtemps été oublié). Cette réflexion « anormale » est aujourd'hui un outil majeur dans l'exploitation des nanostructures. Un tel foisonnement n'est possible que dans un langage parfaitement maîtrisé. Il n'est de vraie découverte que si elle est aussitôt évidente : j'ai toujours été convaincu que ce principe « d'économie dans la simplicité » était la clef du succès.

Dans sa forme initiale, la théorie de BCS ne considérait que des ondes planes. C'était un peu l'équivalent de la formule de de Broglie reliant la quantité de mouvement d'une particule à la longueur d'onde de l'onde associée : c'était déjà considérable ! Mais pour être fécond, il fallait passer de l'onde plane à un état quelconque, de de Broglie à Schrödinger, des principes fondamentaux à la « chimie » des supraconducteurs. Parce qu'elle était simple, la théorie BCS s'y prêtait. La fonction d'onde devenait une matrice 2×2 , l'équation de Schrödinger une équation matricielle – élémentaire, mon cher Watson, mais plus délicat à manipuler. Les deux grands noms dans cette voie sont Lev Gor'kov à Moscou et Pierre-Gilles de Gennes à Orsay. Parce qu'il vient de nous quitter tout récemment, permettez-moi de parler un peu plus de l'apport de Pierre-Gilles, de son équipe de jeunes loups qui signait les articles collectivement "Orsay group in superconductivity". Ce sont eux qui ont introduit l'inhomogénéité dans les supraconducteurs. Elle se situait aussi bien aux parois (effets de proximité étudiés par Guy Deutscher et Étienne Guyon, supraconductivité de surface découverte par Saint-James), que dans la masse, au cœur des tourbillons dans l'état mixte des supraconducteurs de deuxième espèce (thèse de Christiane Caroli). Pierre-Gilles avait au plus haut point cet esprit d'économie dont je parlais à l'instant : son œuvre supraconductrice s'inscrit dans la foulée de BCS, mais avec une dimension nouvelle, plus proche des réalités. Le livre qu'il a écrit à l'époque n'a pas pris une ride : contrairement aux Shadoks, pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ?

Comme toutes les théories, BCS ne répondait pas à toutes les questions : c'était une théorie de couplage faible, qui tôt ou tard devait se heurter aux corrélations fortes. C'est vrai de toute la physique des solides : la théorie des bandes de Born, Seitz et bien d'autres est parfaite pour les semi-conducteurs, les solides cristallins simples, etc. Mais elle n'explique pas les effets de corrélations, comme le magnétisme itinérant (séparation des *spins* \uparrow et \downarrow) ou la transition métal-isolant (lorsque le nombre d'électrons par atome est entier, le blocage des fluctuations de valence bloque le transport d'un site à l'autre). BCS a trouvé ses limites en 1986, avec la découverte des supraconducteurs à haute température. Le formalisme de base reste, mais la physique n'est plus la même : leçon d'humilité pour le théoricien, qui doit toujours se remettre en question ! En revanche, la notion d'appariement a débordé vers d'autres domaines, par exemple l'hélium 3 superfluide, cousin proche où les paires ont un moment cinétique interne. La fonction d'onde correspondante devient une variable observable à l'échelle macroscopique, comme l'a démontré Tony Leggett dans une série d'articles superbes. Le concept de paires de fermions condensées intervient même en physique nucléaire : l'appariement des hadrons dans les noyaux, décrit par Aage Bohr, Ben Mottelson et David Pines, est un cousin éloigné, mais tout aussi fécond.

Faut-il célébrer des anniversaires en physique ? Je n'en suis pas convaincu, car bien souvent une « découverte » est l'aboutissement d'une lente maturation où chacun a pris sa part. L'arrivée du finaliste ne serait pas possible sans les errances, voire les échecs de ses prédécesseurs. Honorer l'un et pas les autres n'est pas très juste. Bardeen connaissait très bien les travaux de London ; il lui envoie ses articles avec une lettre d'accompagnement éloquent : "Dear prof. London, you may be interested in the enclosed manuscripts on superconductivity ; they are both based on your approach..." Il connaissait certainement le travail de Bogoliubov sur l'hélium. Je pense personnellement que cela ne l'a pas influencé, car il a toujours récusé toute filiation. Dans ce contexte, la théorie BCS devient une percée majeure, ouvrant une route jusque-là inconnue. C'était l'affaire d'un vieux routier, John Bardeen, d'un post-doc imaginatif, Leon Cooper, qui montre la formation d'un état lié près de la surface de Fermi, si faible soit l'attraction, et d'un thésard brillant, Bob Schrieffer, qui fabrique la fonction d'onde et l'exploite. Étonnante réunion de talents complémentaires, pour une avancée majeure ! Cinquante ans déjà – j'avais 25 ans lorsque j'ai refait l'algèbre de cette fonction d'onde : faites le calcul, l'arithmétique est cruelle ! ■