

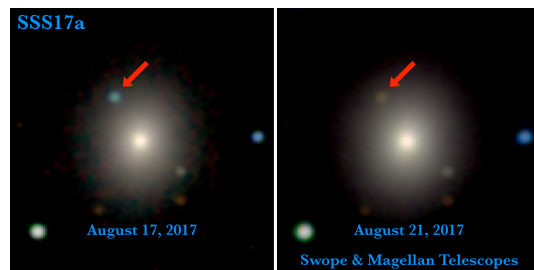
Dans ce numéro

Première observation de la fusion de deux étoiles à neutrons	1
Le tord-méninges	2
Joyeux anniversaire au transistor	2
La permanence du rayonnement des étoiles et le théorème du viriel	3
Nouvelles du département de physique	5
Ma maîtrise sur la supraconductivité	6

Nouvelles scientifiques

Première observation de la fusion de deux étoiles à neutrons Le 16 octobre 2017, la collaboration LIGO-Virgo a annoncé l'observation, pour la première fois, d'ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, et non de deux trous noirs comme dans les cas précédents.

Le 17 août 2017 a été détecté un signal d'ondes gravitationnelles d'une centaine de secondes, bien plus long que dans le cas de la fusion de trous noirs (typiquement une fraction de seconde) : les masses des deux objets sont comprises entre 1,1 et 1,6 fois la masse du Soleil, ce qui correspond à des étoiles à neutrons. Le satellite Fermi de la NASA a enregistré un sursaut gamma dans la même zone du ciel de 30 degrés carrés 1,7 seconde après la fin du rayonnement gravitationnel. Finalement, suite à la localisation précise de la source du phénomène, environ 70 observatoires astronomiques, tant sur Terre que dans l'espace, ont pu prendre le relais, observant ainsi cet événement cosmique sans précédent dans toutes les longueurs d'onde (voir figure). Ainsi, environ 11 heures après la fusion, a été annoncée la découverte d'un nouveau point lumineux situé dans la galaxie NGC 4993, à 130 millions d'années-lumière de la Terre, ce que d'autres groupes ont rapidement confirmé. Plusieurs problèmes astrophysiques fondamentaux sont concernés par cette découverte, notamment la source des sursauts gamma et l'origine d'éléments chimiques lourds comme le plomb, l'or ou le platine. Pour en savoir plus :



Les premiers photons issus de la source d'ondes gravitationnelles SSS17a au sein de la galaxie NGC 4993. L'image de gauche montre SSS17a 11 heures après sa détection par la collaboration LIGO-Virgo. L'image de droite montre l'atténuation du rayonnement de la source 4 jours après sa détection. Crédits : images composites (Auteur : Ryan Foley) dans les domaines optique et IR des observatoires 1M2H/UC Santa Cruz et Carnegie.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.161101>
<http://www.ligo.org/detections/GW170817/press-release/pr-english.pdf>
<https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170817>

Le Nobel de physique 2017 Ce sont Rainer Weiss, Kip Thorne et Barry C. Barish qui ont remporté le prix Nobel de physique 2017, pour leur contribution essentielle au détecteur LIGO et à l'observation des ondes gravitationnelles. Voir à cet effet le [numéro 3, série II, de l'Attracteur](#).

Le tord-méninges

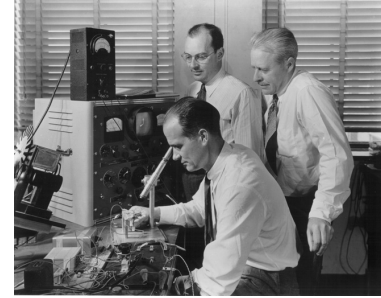
Un circuit électrique affecte la forme d'un icosaèdre, où chaque arête comporte une résistance de 1Ω . Quelle est la résistance équivalente entre deux sommets adjacents? Rappelons que l'icosaèdre comporte 20 faces triangulaires, 12 sommets et 30 arêtes.



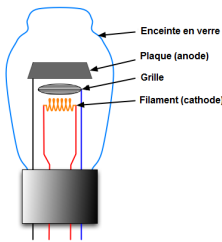
(solution à la fin)

Saviez-vous que...

Il y a 70 ans cette année, le 23 décembre 1947, trois scientifiques et ingénieurs des laboratoires Bell au New Jersey (John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain) ont fait la démonstration, devant les administrateurs du laboratoire, d'un dispositif à base de germanium appelé **transistor** et destiné à remplacer dans l'électronique les « lampes » (ou triodes) utilisées depuis le début du XX^e siècle. Rappelons que dès l'invention de la télégraphie sans fil par Marconi dans les dernières années du XIX^e siècle, le problème de l'amplification des signaux électriques s'est posé. Comment transmettre de l'information via des ondes radio si on ne peut pas convertir les faibles signaux électriques détectés en signaux audibles? Comment utiliser le téléphone d'un bout à l'autre du pays si le signal électrique est atténué par la résistance des lignes de transmission avant de parvenir à son destinataire?



Shockley, Bardeen et Brattain



source : wikipédia

La première solution pratique à ce problème a été brevetée en 1907 par l'Américain Lee deForest : la **triode**. Il s'agit d'un tube évacué comportant un filament chauffé (cathode) qui émet des électrons, d'une plaque (anode) qui les collecte et d'une grille métallique, située entre les deux, qui permet à une troisième électrode de contrôler le passage des électrons de l'anode vers la cathode. Ce dispositif ingénieux permet à une faible tension appliquée à la grille de faire varier de manière importante un courant entre la cathode et l'anode, donc d'amplifier un signal. La triode a permis à la radio et à la téléphonie d'exister et était omniprésente dans les appareils électroniques jusque dans les années 1970. Ses principaux défauts étaient sa taille (de l'ordre du centimètre au moins), la chaleur qu'elle dégageait et sa fragilité (pensez à une ampoule électrique traditionnelle).

Les scientifiques des laboratoires Bell ont eu l'idée (et d'autres avant eux, avec moins de chance et de soutien) de remplacer les électrons qui se déplacent dans un gaz raréfié (la triode) par des électrons qui se déplacent dans un matériau solide, un semiconducteur. Le germanium fut utilisé en premier, mais assez tôt on se rendit compte que le silicium était supérieur. Le premier transistor (dit à « point de contact » et illustré ci-contre) était un prototype à la fois grossier et délicat dont la fragilité n'était guère prometteuse. Quelques années plus tard, Shockley inventa le transistor bipolaire qui, lui, sonna à terme le glas de la triode. Les premières radios portatives apparurent au milieu des années 1950, commercialisées par une obscure compagnie japonaise appelée *Sony*.



Fait intéressant, la compagnie AT&T (propriétaire des laboratoires Bell) jouissait d'un quasi-monopole de la téléphonie aux États-Unis, à la condition tacite de ne pas se lancer dans d'autres secteurs de l'économie. C'est ce monopole contrôlé qui lui a permis de financer ses énormes laboratoires de recherche, qui employaient jusqu'à 12 000 PhD (en génie, physique et chimie). Les laboratoires Bell sont à l'origine non seulement du transistor, mais aussi du laser, de la radio-astronomie, des caméras CCD, de la théorie mathématique de l'information, du système UNIX (dont Linux et MacOS sont des variantes), des langages C et C++. Huit prix Nobel ont été accordés pour des découvertes issues de ces laboratoires^a. En raison des conditions qui lui étaient imposées, Bell a dû livrer la technologie du transistor aux entreprises intéressées au début des années 1950. Shockley, désireux de voler de ses propres ailes, quitta Bell et fonda sa propre compagnie sur un terrain familial dans ce qui allait devenir Silicon Valley en Californie. Ses premiers associés juniors, mécontents de sa gestion des affaires, quittèrent sa compagnie à leur tour. Parmi eux, Bob Noyce et Gordon Moore fondèrent *Intel* en 1968, la compagnie à l'origine du microprocesseur. Un microprocesseur comporte aujourd'hui des milliards de transistors (d'un type différent des premiers transistors, il va sans dire). Le fragile dispositif dont l'invention fut relatée par le New York Times le 1^{er} juillet 1948 dans un obscur article sur les «nouvelles de la radio» (après une description de la programmation artistique de la semaine) a mené à une transformation profonde de l'économie mondiale et est à l'origine des technologies actuelles de l'information et des télécommunications. Certains estiment que les secteurs qui en dépendent directement représentent le quart du P.I.B. de la planète. Qu'y avait-il en première page du New York Times ce jour-là ? Personne ne s'en souvient...

a. Bardeen, Shockley et Brattain ont remporté le prix Nobel de physique en 1956. Bardeen a partagé un deuxième prix Nobel de physique (le seul exemple d'un doublé en physique) en 1972 pour la théorie de la supraconductivité. Les laboratoires Bell ont périclité depuis l'abandon du monopole et la division de la compagnie Bell en plusieurs compagnies filles, imposée par la justice américaine en 1984.

Article de fond

La permanence du rayonnement des étoiles et le théorème du viriel

Chaleur et température : deux notions initialement confondues Jusqu'au milieu du XVIII^e siècle, on a confondu les notions de chaleur et de température. Par exemple, on graduait les thermomètres en "degrés de chaleur"... C'est le physicien et chimiste écossais Joseph Black (1728-1799) qui en 1760 introduisit précisément la notion de capacité thermique, c'est-à-dire la capacité qu'a une substance d'absorber la chaleur. Depuis, la chaleur est vue comme un transfert d'énergie entre deux corps résultant de leur différence de température.

La température, finalement, peut être définie de plusieurs manières : i) comme nous venons de le souligner, par l'équilibre des transferts thermiques entre plusieurs corps, ii) à partir de l'entropie (en thermodynamique et en physique statistique) ou encore, iii) comme fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules (en théorie cinétique des gaz).

Interactions à courtes et longues portées, capacité thermique Dans un gaz, si chaque paire de particules est le siège d'une interaction dont l'énergie potentielle décroît moins vite avec la distance r qu'une exponentielle $\exp(-\kappa r)$ (avec κ une constante positive), on dit que l'interaction est à *longue portée*. Un gaz ordinaire est plutôt caractérisé par des interactions à *courtes portées*. On constate qu'un tel gaz a alors tendance à s'échauffer quand on lui communique une énergie $\Delta Q > 0$, et son élévation de température



associée $\Delta T > 0$ peut donc servir à déterminer la quantité de chaleur absorbée. La capacité thermique C de ce corps, définie par le rapport $C = \Delta Q / \Delta T$, est donc positive.

En revanche, si des interactions à longue portée sont présentes (par exemple si l'énergie potentielle d'interaction décroît en $r^{-\alpha}$, avec $\alpha > 0$), il peut arriver que certains concepts fondamentaux soient apparemment en défaut. Par exemple, une étoile (vue comme un ensemble de particules massives en interaction gravitationnelle de potentiel en r^{-1}) présente, dans sa globalité, la particularité d'avoir tendance à s'échauffer quand elle perd de l'énergie et inversement à refroidir lorsqu'on lui donne de l'énergie ! Tout se passe comme si, globalement, la capacité thermique d'une étoile était négative...

C'est cette caractéristique, en plus de la condition d'équilibre dynamique entre la gravité et les forces de pression (gazeuse, radiative ou de dégénérescence), qui assure la permanence du rayonnement stellaire et donc fait des étoiles des objets observables sur de longues échelles de temps. Si une étoile avait au contraire tendance à s'échauffer suite à un apport d'énergie, comme dans un gaz ordinaire, la moindre perturbation la ferait exploser par emballement des réactions nucléaires dans le cœur, ou au contraire refroidir jusqu'à ce que les réactions thermonucléaires en son sein cessent, la rendant dans les deux cas ultimement invisible.

Dans ce qui suit, nous allons dans un premier temps démontrer le théorème du viriel, théorème qui nous permettra de comprendre pourquoi le bilan énergétique total d'une étoile diffère d'un gaz à capacité thermique positive, et ensuite nous nous servirons de ce résultat pour expliquer la permanence de son rayonnement.

Le théorème du viriel Ce théorème essentiel dans l'étude des systèmes gravitationnellement liés peut s'énoncer ainsi : *Dans un système isolé gravitationnellement, lié et en équilibre dynamique, l'énergie totale est toujours la moitié de la moyenne temporelle de l'énergie potentielle.* Pour démontrer ce résultat, considérons N masses ponctuelles m_i ($i = 1 \dots N$) de vecteurs position \mathbf{r}_i relativement à une origine O arbitraire, et de quantités de mouvement $\mathbf{p}_i = m_i \mathbf{v}_i$ avec $\mathbf{v}_i = \frac{d\mathbf{r}_i}{dt}$; considérons ensuite la quantité

$$\Lambda \equiv \sum_i \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r}_i$$

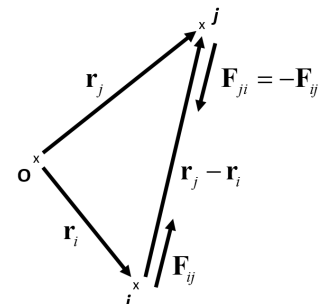
Les particules constituantes sont essentiellement, pour des étoiles ordinaires comme le Soleil (assimilables, dans la très grande partie de leur volume, à un gaz parfait), des électrons, des protons, des noyaux d'hélium et quelques rares noyaux plus lourds. On peut calculer $d\Lambda/dt$ de deux manières :

$$\frac{d\Lambda}{dt} = \sum_i \left(\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} \cdot \mathbf{r}_i + \mathbf{p}_i \cdot \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\sum_i m_i \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} \cdot \mathbf{r}_i \right) = \frac{d}{dt} \sum_i \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (m_i r_i^2) = \frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2}$$

avec $I = \sum_i m_i r_i^2$, le moment d'inertie total du système de particules. Remarquons que $\sum_i \mathbf{p}_i \cdot \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \sum_i m_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i = 2K$, où K est l'énergie cinétique totale du système. Il est possible de mettre en relation K avec la température absolue moyenne T de l'étoile (dans l'approximation du gaz parfait monoatomique et en vertu du théorème d'équipartition de l'énergie), $K = \frac{3}{2} N k_B T$ avec k_B la constante de Boltzmann. Finalement, en utilisant la deuxième loi de Newton ($\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \mathbf{F}_i$), on peut donc écrire l'identité dite de Lagrange-Jacobi :

$$2K + \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i = \frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2}$$

Dans un système isolé, les seules forces présentes sont les forces d'interaction gravitationnelle. En utilisant la troisième loi de Newton, on peut alors écrire



Interaction entre les particules i et j . \mathbf{F}_{ij} représente la force exercée sur la particule i par la particule j . Ici, $\mathbf{F}_{ij} = \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij}$ avec $\mathbf{r}_{ij} \equiv (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) / r_{ij}$.



(voir figure) :

$$\sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) = -\frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}} = U$$

où U est l'énergie potentielle gravitationnelle totale. Finalement, en faisant la moyenne temporelle de l'identité de Lagrange-Jacobi on obtient :

$$\frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle = \langle 2K \rangle + \langle U \rangle$$

Pour un système périodique, nous aurions naturellement $\left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle_{\text{période}} = 0$ mais, en pratique, même pour un système non strictement périodique, en faisant la moyenne sur une durée suffisamment longue, il est possible de montrer que

$$\left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle_{t \rightarrow \infty} = 0$$

On a donc obtenu le théorème du viriel :

$$2 \langle K \rangle + \langle U \rangle = 0$$

Permanence du rayonnement stellaire Dans toute la suite, nous considérons une étoile en équilibre dynamique, c'est-à-dire dont chaque couche réalise un équilibre entre les forces de gravité et les forces de pression. À l'intérieur d'une étoile, l'énergie totale $\langle E \rangle = \langle K \rangle + \langle U \rangle$ peut néanmoins varier pour deux raisons : 1) un rayonnement de puissance L s'échappe de la surface (il s'agit de la *luminosité* de l'étoile, directement conditionnée par la valeur de la température de sa surface), et 2) les réactions nucléaires dans le cœur dégagent une puissance calorifique Q (fortement croissante avec la température T_c qui règne dans le cœur, typiquement $Q \propto T_c^4$ pour une étoile de type solaire). À tout instant, on a donc $d \langle E \rangle / dt = Q - L$ ou encore, en vertu du théorème du viriel, $d \langle K \rangle / dt = L - Q$.

Supposons que l'étoile soit dans le régime quasi stationnaire de son stade dit de la *séquence principale*, par ailleurs le stade le plus long dans l'évolution d'une étoile de type solaire, environ 10^{10} ans. Nous avons nécessairement $d \langle E \rangle / dt \approx 0$: la luminosité L est compensée par la production d'énergie nucléaire Q .

Admettons désormais qu'une petite perturbation fasse légèrement croître la température T_c du cœur, par exemple par un apport de chaleur. En conséquence Q augmente dans le cœur sans que, dans un premier temps, L soit affectée (la migration des photons du centre vers la surface de l'étoile, analogue à un processus de diffusion ou une marche aléatoire, s'effectue sur une bien plus longue échelle de temps, typiquement $\sim 10^5$ ans). La relation $d \langle K \rangle / dt = L - Q$ impose donc la décroissance de $\langle K \rangle$ avec le temps et, donc, une baisse à la fois de la température moyenne T et donc de la production d'énergie Q : ainsi une augmentation minimale de Q est compensée par une diminution, et inversement. Le rayonnement de l'étoile est donc stable relativement à une perturbation thermique.

Fondamentalement, cette stabilité résulte du fait que $\langle E \rangle = - \langle K \rangle$: la présence des forces de gravitation fait que l'énergie totale varie en sens inverse de la température moyenne de l'étoile, comme si la capacité thermique était bizarrement négative...



Nouvelles du département de physique

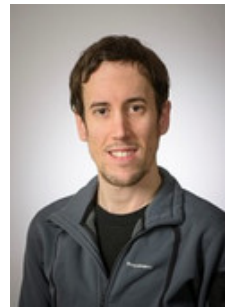
- Le professeur Louis Taillefer s'est vu décerner plusieurs prix en 2017 : le prix de la recherche et de la création, secteur sciences et génie, de l'Université de Sherbrooke, pour ses travaux sur la phase dite «pseudogap» dans les supraconducteurs à haute température critique. Il est aussi le premier Canadien à avoir remporté le *prix commémoratif Simon*, qui honore des chercheurs qui ont contribué de manière importante à la physique des très basses températures. Ce sont les travaux de Louis Taillefer sur les propriétés de transport de courant et de chaleur aux très basses températures (de l'ordre de 10 mK) qui lui ont valu ce prix prestigieux. Enfin, le professeur Taillefer s'est vu accorder une prestigieuse *bourse de recherche Killam* pour la période 2017-2019 par le Conseil des arts du Canada.
- Le professeur Glen Evenbly a remporté le prix *Jeune scientifique* du *29^e congrès sur la physique numérique* (CCP2017) qui s'est tenu à Paris du 9 au 13 juillet 2017. Ce sont ses travaux sur les réseaux de tenseurs, une méthode numérique nouvelle pour étudier les problèmes à plusieurs corps en mécanique quantique, qui lui ont valu ce prix.
- Le professeur Ion Garate s'est vu décerner le prix *tremplin 2017*, secteur sciences et génie, de l'Université de Sherbrooke, en reconnaissance de ses travaux originaux sur la spintronique et les isolants topologiques.



Louis Taillefer



Glen Evenbly



Ion Garate

Ma maîtrise sur la supraconductivité, par Olivier Simard

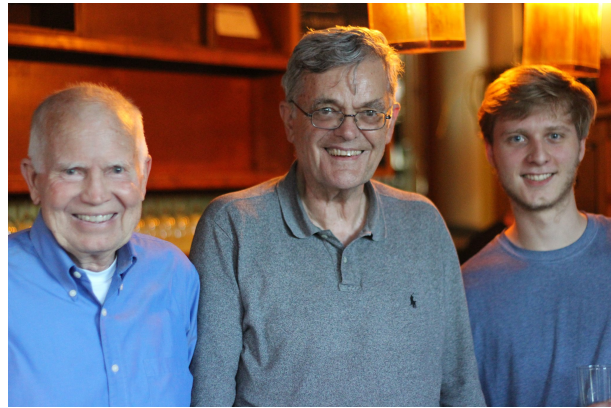
Pourquoi faire une maîtrise en physique? On m'a souvent posé cette question et on me la pose encore... Ce n'est qu'au cours de la deuxième partie de mon baccalauréat que j'ai compris que je ferais des études supérieures en physique. Ma curiosité et mon désir de comprendre les principes physiques fondamentaux qui régissent notre univers m'en ont convaincu. Le dynamisme de la communauté scientifique m'a aussi beaucoup plu; plusieurs événements sont constamment organisés afin de réunir des chercheurs de haut calibre et de favoriser les échanges.

L'été dernier, du 24 au 28 mai, j'ai eu la chance de participer, en tant qu'étudiant invité, à l'atelier intitulé *Cracking the enigma of cuprate superconductors* tenu à huis clos à Jouvence, dans le parc du Mont Orford, et regroupant plusieurs chercheurs éminents dans le domaine des supraconducteurs à haute température critique. L'objectif premier de cette rencontre était d'identifier les principaux mécanismes physiques à l'origine du comportement singulier des électrons dans ces matériaux. J'ai pu faire la connaissance de Douglas James Scalapino et de Thomas Maurice Rice (voir photo). Depuis les années 1960, ces physiciens mondialement connus ont grandement contribué à notre

compréhension de la physique de l'état solide, en particulier des phénomènes complexes causés par les interactions entre électrons. Dans les dernières années, Doug Scalapino, professeur émérite à l'Université de Californie à Santa Barbara, a travaillé sur la symétrie de la fonction d'onde des paires de Cooper (voir plus bas). Maurice Rice, professeur à l'ETH de Zürich, a quant à lui élaboré une théorie phénoménologique du «pseudogap» dans les supraconducteurs à haute température critique.

Bon. Je sens que je vous dois quelques explications. Tout d'abord, qu'est-ce que la supraconductivité ? C'est un phénomène quantique se produisant dans certains matériaux, une fois ces derniers refroidis sous une température critique T_c et en présence d'un champ magnétique inférieur à un champ magnétique critique H_c . Découverte en 1911 par Heike Kamerlingh Onnes dans le mercure, elle est caractérisée par la disparition de toute résistance électrique et par l'expulsion des champs magnétiques.

Fondamentalement, la supraconductivité est causée par la formation de paires d'électrons, appelées *paires de Cooper*, en raison d'une force d'attraction effective entre les électrons. Les électrons sont des *fermions*, c'est-à-dire qu'ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions ne peuvent jamais occuper le même état quantique en même temps. Par contre, une paire de Cooper constitue ce qu'on appelle un *boson composite*. Ce type d'objet obéit à une statistique différente de celle des fermions : les bosons peuvent se *condenser* à basse température (sous T_c) dans l'état quantique de plus basse énergie. Les paires de Cooper peuvent alors adopter toutes ensemble un comportement *collectif*, tel des poissons dans un banc de poissons : on dit alors qu'elles forment un *état cohérent macroscopique*. D'un point de vue plus théorique, le condensat de paires de Cooper est associé à l'émergence d'un *paramètre d'ordre* dans l'état supraconducteur, soit un nombre complexe correspondant à la fonction d'onde décrivant toutes les paires de Cooper ensemble. C'est justement ce qu'on appelle la *rigidité de phase* de ce paramètre d'ordre qui dote le supraconducteur de l'habileté de soutenir un super-courant (un courant sans résistance électrique).



Doug Scalapino, Maurice Rice et Olivier Simard

La plupart des supraconducteurs connus avant 1986, qualifiés de «conventionnels», sont à la base des métaux (par les meilleurs métaux, d'ailleurs) et le mécanisme microscopique qui pousse les électrons à former des paires est bien compris depuis 1957, date à laquelle Bardeen, Cooper et Schrieffer ont proposé la fameuse théorie qui porte leur nom et qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1972. Selon cette théorie, ce sont les vibrations quantifiées du cristal (les *phonons*) qui causent l'attraction effective des électrons et la formation des paires de Cooper. La température critique de ces supraconducteurs conventionnels ne dépasse pas quelques degrés au-dessus du zéro absolu.

Par contre, les supraconducteurs à base d'oxydes de cuivre (souvent simplement appelés *cuprates*), découverts à partir de 1986, ont des T_c de plusieurs dizaines de degrés (le record étant de près de 150K). Le mécanisme derrière la formation des paires de Cooper doit être radicalement différent. De façon complètement contre-intuitive, ce seraient les très fortes interactions coulombiennes (répulsives) entre électrons qui seraient à l'origine de la supraconductivité dans ces matériaux. L'objectif de mon projet

de recherche de maîtrise est de calculer la rigidité de phase de la fonction d'onde supraconductrice afin d'étudier cette dernière hypothèse. Plus particulièrement, je m'intéresse à l'effet sur la phase du paramètre d'ordre supraconducteur de l'ordre *antiferromagnétique*, soit l'alternance *up-down-up-down...* des spins des électrons situés sur des atomes de cuivre adjacents. Qualitativement, on s'attend à ce que cet ordre affaiblisse la rigidité de la phase des paires d'électrons dans le condensat, ce qui revient à globalement affaiblir la force de la supraconductivité.


Et le «pseudogap», qu'est-ce que c'est? C'est en quelque sorte un précurseur de la supraconductivité dans les cuprates. En abaissant la température, bien avant que la supraconductivité ne s'installe, on assiste à une «désertion» des électrons, comme s'ils faisaient progressivement la grève et participaient de moins en moins à la conduction ou à d'autres phénomènes dans lesquels ils s'impliquent d'habitude généreusement dans les métaux. On soupçonne que les mêmes interactions électron-électron qui causeraient la formation des paires sont aussi à l'origine de ce «pseudogap», de sorte que comprendre l'un, c'est aussi comprendre l'autre. C'est pour cette raison qu'on s'y intéresse.

Voilà, j'espère que je ne vous ai pas trop embêtés. Il faut que je vous laisse, car je dois retourner à mes calculs...

$$V = R_{eq}^{net} \quad \text{ou encore} \quad \frac{5}{2} Ri = R_{eq}^{11} i \quad \text{et donc} \quad R_{eq} = \frac{30}{11} R = \frac{30}{11} \Omega$$

Plusieurs solutions sont possibles. La plus ingénieuse est la suivante : supposons qu'un courant i est injecté à l'un des sommets (appelons-le A) et qu'il est retiré de manière égale par les 11 autres sommets. Comment cela est fait en pratique n'est pas très important ; on peut imaginer un dispositif comportant plusieurs connecteurs qui touchent aux 11 autres sommets et qui s'adaptent de manière à assurer qu'un courant $i/11$ sort de chacun d'eux. À cette situation, superposons une situation complètementaire où un courant i est retiré d'un sommet voisin de A (appelons-le B) et injecté de manière égale dans tous les autres sommets (incluant A). Comme les lois de l'électromagnétisme obéissent au principe de superposition, on peut additionner ces deux situations pour obtenir une situation résultante où un courant $\frac{11}{12}i$ est injecté en A, un courant égal est retiré en B et aucun courant ne sort ni ne rentre par les autres sommets. Le courant qui va de A à B via la résistance qui les relie directement est forcément de $i/5$ dans la première situation, car A possède 5 voisins immédiats symétriquement disposés autour de lui. Dans la deuxième situation, ce courant est encore de $i/5$, dans la même direction, et pour la même raison. Dans la situation résultante, ce courant est donc de $2i/5$. La différence de potentiel entre A et B est donc $V = 2Ri/5$, pour un courant net $i_{net} = \frac{11}{12}i$. La résistance équivalente R_{eq} est donc telle que

Solution au tor-d-ménages

 **Attracteur**
 Département de physique
 2500, boul. de l'Université,
 Sherbrooke (Québec)
 J1K 2R1

physique@usherbrooke.ca
 comité éditorial :
 Y Grosdidier • D Sénéchal
 AM Tremblay • G Vachon
 A Reymbaut

 Retrouvez-nous
 sur Facebook

 UNIVERSITÉ DE
 SHERBROOKE

