

cnrs

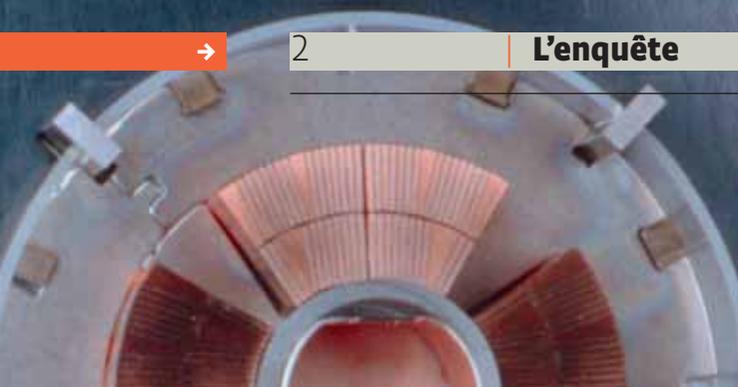
le journal

Tiré à part du
n° 255
avril 2011

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

LA SUPRACONDUCTIVITÉ prend son envol





Refroidis à des températures extrêmes, certains matériaux acquièrent une surprenante propriété : ils deviennent supraconducteurs. Rare exemple où la physique quantique s'applique à grande échelle, la supraconductivité est aujourd'hui au centre de très nombreuses recherches. Dans les laboratoires, on tente de mieux cerner son origine, on étudie de nouveaux matériaux supraconducteurs, on explore le phénomène à l'échelle du nanomètre, on lui cherche sans cesse de nouvelles applications. Pour célébrer les 100 ans de sa découverte, *CNRS Le journal* vous plonge dans le monde étonnant de la supraconductivité.

UNE ENQUÊTE DE MATHIEU GROUSSON



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

La supraconductivité prend son envol



01



Une révolution qui venait du froid **3** |
Des matériaux très prometteurs **6** |
Surprises à l'échelle nano **10** |



Une révolution qui venait du froid

Il y a tout juste cent ans, un étonnant phénomène chamboulait tout ce que l'on savait jusqu'alors sur l'électricité. Ou plutôt sur la résistance des matériaux à la laisser passer. Car, même les fils électriques les plus conducteurs qui soient gâchaient une partie de cette énergie en la transformant en chaleur. Jusqu'à ce que, en 1911, un physicien hollandais voit littéralement "disparaître" la résistance électrique du mercure! Pas dans n'importe quelle condition cependant : à une température frisant le **zéro absolu**. La supraconductivité était née et semblait concerner de très nombreux métaux et alliages. Un siècle plus tard, elle représente un marché de près de 4,5 milliards d'euros¹.

Pour expliquer le phénomène, nul besoin de faire appel à une transformation du matériau induite par le froid. La supraconductivité trouve son origine dans le comportement des électrons de la matière et, pour la comprendre, il faut avoir recours à la physique quantique. Au fil des ans, les recherches vont révéler bien d'autres propriétés surprenantes. En particulier, supraconductivité et magnétisme ne font pas bon ménage : un supraconducteur exclut tout champ magnétique que l'on veut lui imposer de

01 Détection de particules, analyse de la matière, lévitation... La supraconductivité a de très nombreuses applications.

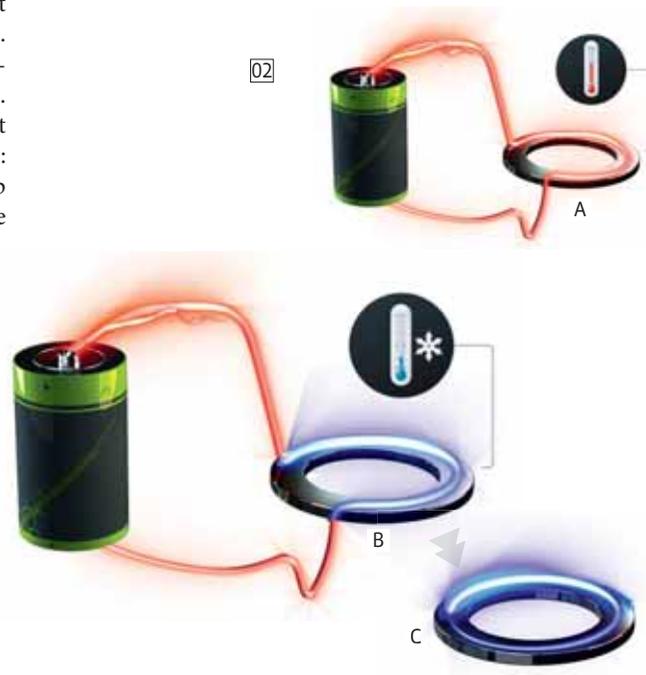
02 Dans un circuit électrique, une pile crée du courant en mettant les électrons en mouvement. Ceux-ci entrent en collision avec les défauts du conducteur : ils cèdent leur énergie au matériau qui s'échauffe, et ralentissent (A). C'est l'origine de la résistance électrique. Dans un supraconducteur, cette résistance est nulle (B). Le courant électrique continue à circuler indéfiniment, même quand la pile est débranchée (C).

ZÉRO ABSOLU
Température égale à $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, la plus basse qui puisse exister dans l'Univers et à laquelle toutes les particules sont immobiles. Seuls les effets quantiques se manifestent.

l'extérieur. C'est l'effet Meissner, du nom de son découvreur (lire l'encadré p. 4). « C'est d'ailleurs cette capacité qui fait qu'un supraconducteur est tout autre chose qu'un simple conducteur idéal », rappelle Georges Waysand, du Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel-Pays d'Apt², spécialiste de l'histoire de la supraconductivité.

UN COURANT ILLIMITÉ

Disparition de la résistance électrique et exclusion des champs magnétiques, ces deux propriétés principales de la supraconductivité sont à l'origine de nombreuses applications. Il suffit d'injecter du courant dans une bobine de fil supraconducteur pour le conserver indéfiniment. Ou que le courant dans cette bobine soit d'une intensité colossale pour qu'il génère un champ magnétique tout aussi important, sans risque de surchauffe. Ou encore qu'un aimant soit



© INFOGRAPHIE : J. MERCIER/CNRS

LES DATES CLÉS

1911

H. Kamerlingh Onnes, physicien hollandais, s'intéresse à la résistance électrique des métaux à très basse température.

Surprise : au-dessous de $-268,95\text{ }^{\circ}\text{C}$, la résistance du mercure tombe brusquement à zéro!



© BURINDY LIBRARY COLLECTION; HUNTINGTON LIBRARY; COURTESY AIP; E. SEGRE VISUAL ARCHIVES

1913

Le physicien hollandais reçoit le prix Nobel de physique pour ses travaux sur la liquéfaction de l'hélium et sur l'étude des propriétés de la matière aux basses températures. La supraconductivité n'est alors qu'une curiosité de laboratoire.

ANNÉES 1920

La mécanique quantique révolutionne la physique. Les solides deviennent le banc d'essai de cette nouvelle théorie, qui établit en 1928 l'existence d'électrons libres dans les métaux, responsables de leur conductivité électrique.

1933

Les physiciens allemands W. Meissner et R. Ochsenfeld découvrent une autre propriété fondamentale des supraconducteurs : ils excluent hors de leurs frontières un champ magnétique que l'on voudrait leur imposer de l'extérieur, (c'est le diamagnétisme).



© AIP; E. SEGRE VISUAL ARCHIVES

1935

F. London, physicien allemand exilé à Paris, fournit une première théorie de la supraconductivité : « Un supraconducteur se comporte comme un seul gros atome diamagnétique. »



1950

En Russie, V. Ginzburg et L. Landau améliorent la théorie de London en l'appliquant au passage de l'état conducteur ordinaire à l'état supraconducteur.



1956

J. Bardeen, L. N. Cooper et J. R. Schrieffer, trois physiciens américains, décrivent le mécanisme responsable de la supraconductivité : l'appariement des électrons. C'est la théorie BCS. Ils reçoivent le prix Nobel de physique en 1972.

1960

Le Norvégien I. Giaever montre que des électrons peuvent franchir une barrière d'oxyde entre deux supraconducteurs. Cet effet dit tunnel va donner naissance à toute l'électronique supraconductrice.

1986

Les physiciens J. G. Bednorz et K. A. Müller découvrent de nouveaux supraconducteurs à base d'oxydes de cuivre, les cuprates, dont la température de transition est jusqu'à cinq fois plus élevée que le record observé dans un métal. Le paysage de la supraconductivité en est totalement bouleversé.

2008

L'équipe du Pr H. Hosono, de l'Institut de technologie de Tokyo, découvre les pnictures, des composés à base de fer. Ils peuvent devenir supraconducteurs à des températures plus élevées que celles observées dans les métaux, mais ils ont des propriétés différentes de celles des cuprates.

© DEP. OF PHYSICS, UNIV. OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN, COURTESY AIP E. SEGRE VISUAL ARCHIVES

placé au-dessus d'un supraconducteur pour tout bonnement... léviter. À la clé, ce sont les domaines de l'énergie, des transports, des télécommunications, de la sécurité, des technologies pour la santé, mais aussi les recherches en physique, en astronomie, en neurologie, en géologie et en archéologie qui peuvent bénéficier des supraconducteurs.

Sans oublier tous les apports fondamentaux qui ont totalement renouvelé la physique de la matière condensée. « Depuis les années 1980, le nombre d'articles dans lesquels le mot supraconducteur est cité n'a fait qu'augmenter », indique Julien Bobroff, du Laboratoire de physique des solides³, à Orsay. Cela étant, « aucune des théories de la supraconductivité ne permet de prédire, a priori, si un composé sera

supraconducteur, commente Georges Waysand. D'où, en parallèle des efforts théoriques, une recherche souvent empirique, éventuellement intuitive et parfois involontaire, qui a mené à la découverte de nouveaux supraconducteurs. »

CE N'EST QU'UN DÉBUT

Ceux-ci, qui répondent aux noms insolites de cuprates ou de pnictures, ont la particularité d'exprimer leur supraconductivité à des températures plus élevées que celle des métaux. À présent, les chercheurs espèrent comprendre d'où vient cette supraconductivité à haute température (lire p. 6) pour pouvoir l'améliorer, et pourquoi pas trouver des supraconducteurs à température ambiante, qui ne nécessiteraient plus de réfrigération. L'avenir semble donc prometteur.

LA SUPRACONDUCTIVITÉ, COMMENT ÇA MARCHE ?

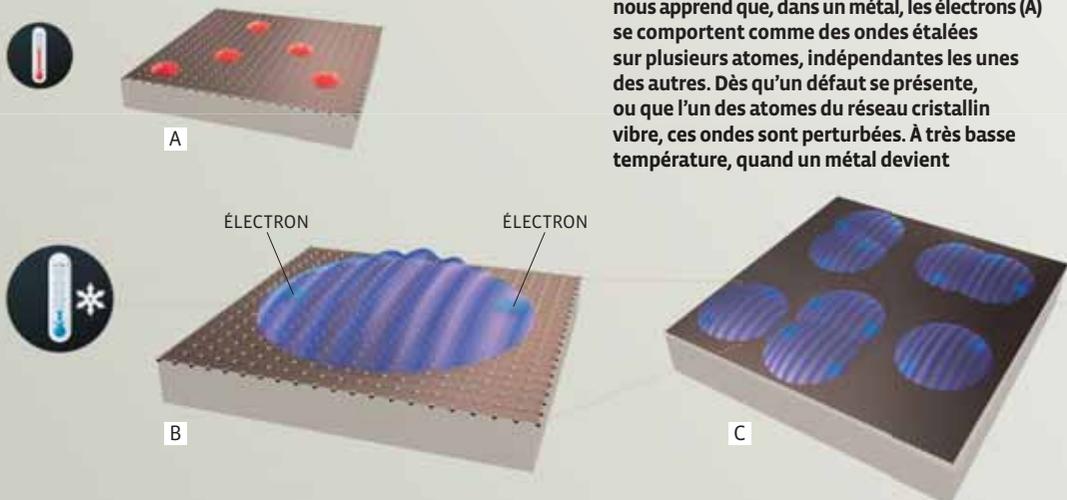
Un phénomène magnétique...

Un aimant (ici en gris métallisé) génère autour de lui un champ magnétique qui traverse tout matériau non magnétique comme la pastille noire. Quand la pastille noire devient supraconductrice à basse température, celle-ci expulse le champ magnétique. Cela crée alors une force sur l'aimant et le fait léviter : c'est ce qu'on appelle l'effet Meissner.



... et électrique

À l'échelle microscopique, la physique quantique nous apprend que, dans un métal, les électrons (A) se comportent comme des ondes étalées sur plusieurs atomes, indépendantes les unes des autres. Dès qu'un défaut se présente, ou que l'un des atomes du réseau cristallin vibre, ces ondes sont perturbées. À très basse température, quand un métal devient



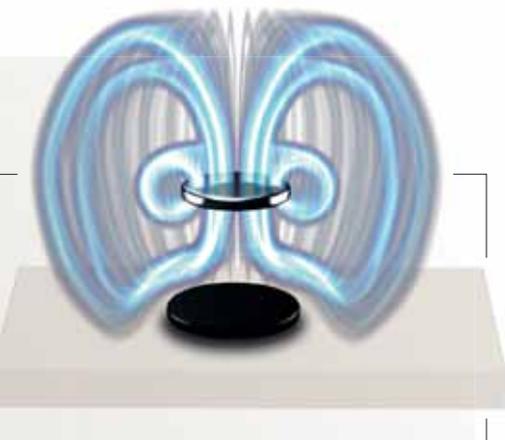
LA SUPRA, ÇA SERT À...

Et c'est sans compter la convergence récente du champ des supraconducteurs avec celui des nanotechnologies, et tout le cortège de nouveaux effets à comprendre et à exploiter qu'elle va engendrer. Si bien qu'en cette année anniversaire, la supraconductivité, stimulant la recherche fondamentale en même temps qu'elle laisse entrevoir la possibilité de formidables applications, est encore bel et bien dans sa prime jeunesse !

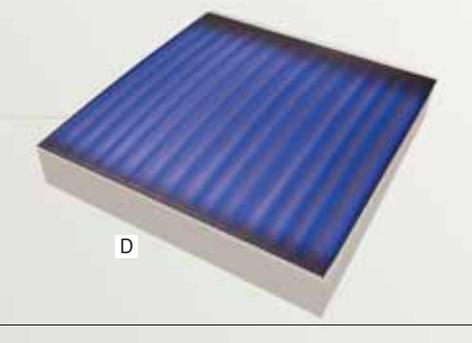
1. Source Conectus (Consortium of European Companies Determined to Use Superconductivity).
2. Unité CNRS/Université Nice-Sophia Antipolis/Observatoire de la Côte d'Azur.
3. Unité CNRS/Université Paris-Sud-XI.

CONTACTS :

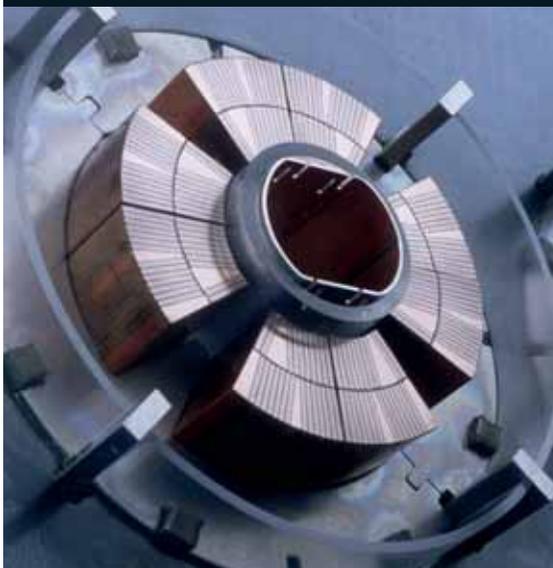
Julien Bobroff
> bobroff@lps.u-psud.fr
Georges Waysand
> waysand@orange.fr



supraconducteur, ses électrons s'associent par paire (B). Toutes les paires d'électrons (C) se superposent alors les unes aux autres pour former une seule onde quantique qui occupe tout le matériau (D). Cette onde tout à fait particulière devient insensible aux défauts du matériau : ils sont trop petits pour la freiner dans son ensemble. La résistance électrique a disparu.



© INFOGRAPHIES : J. MERCIER/CNRS



© L. GUIRAUD/CERN

→ Les aimants supraconducteurs du LHC génèrent un champ magnétique qui concentre les faisceaux de particules.

ACCÉLÉRER LES PARTICULES

La supraconductivité est un des piliers de la technologie des grands accélérateurs de particules. Sans elle, le LHC du Cern, à Genève, ne mesurerait pas 27 kilomètres de circonférence, mais... 110. Autrement dit, il n'existerait pas. En effet, pour accélérer et courber la trajectoire des particules, on fait appel à d'importants champs magnétiques. Ceux-ci sont engendrés par des courants de forte intensité circulant dans des bobines supraconductrices, une propriété qui les préserve de la surchauffe. L'anneau du LHC est ainsi équipé de 7500 kilomètres de câbles supraconducteurs refroidis à -271°C et générant un champ de 8,3 teslas.

CONTACT :

Philippe Lebrun
> philippe.lebrun@cern.ch



© E. LE ROUX/SERVICE COMMUNICATION/CERN

DÉVOILER L'INTIMITÉ DE LA MATIÈRE

Pour mettre en évidence la structure moléculaire d'un échantillon, la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) n'a pas son pareil. Or cette technologie repose sur l'utilisation d'un champ magnétique : plus celui-ci est intense, et plus la mesure est précise. Raison pour laquelle le Centre de résonance magnétique nucléaire¹ de Lyon s'est équipé en 2009 d'un spectromètre possédant un aimant supraconducteur à la limite des technologies actuelles. Plongé dans 1500 litres d'hélium à -271°C et alimenté par un courant de 300 ampères, il délivre le champ record de 23,5 teslas. Et fait le plaisir des chimistes comme des biologistes et des physiciens des matériaux.

1. Unité CNRS/Université de Lyon/ENS Lyon.

→ Pour analyser la structure fine de la matière, ce spectromètre à base de supraconducteurs doit être refroidi à des températures extrêmes.

CONTACTS :

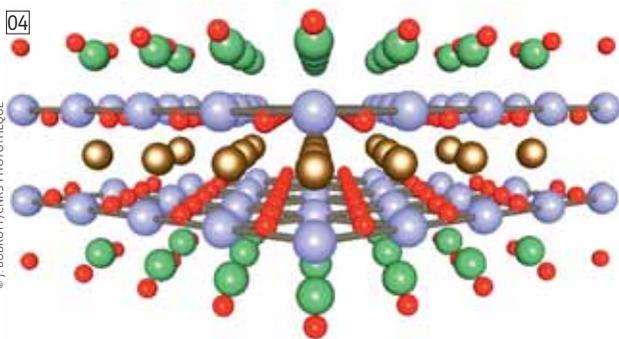
Lyndon Emsley
> lyndon.emsley@ens-lyon.fr
Anne Lesage
> anne.lesage@ens-lyon.fr

Des matériaux très prometteurs



03

© D. COLSON/CNRS PHOTO THÉRIQUE



04

© J. BOBROFF/CNRS PHOTO THÉRIQUE

03 Photo au microscope colorisée d'un cuprate. Cet oxyde de cuivre présente la meilleure supraconductivité connue à ce jour.

04 La structure atomique des cuprates rappelle un mille-feuille.

05 Les 600 condensateurs du LNCMI permettent de générer de puissantes impulsions magnétiques.

06 Cyril Proust prépare le système de mesure dans lequel sont placés les échantillons de matériau supraconducteur.

Pour qu'un métal devienne supraconducteur, il faut que sa température frise le zéro absolu, à $-273,15\text{ °C}$. Or la découverte de matériaux pouvant l'être à des températures plus élevées a secoué le landerneau de la physique. Et si, finalement, la supraconductivité pouvait aussi exister à température ambiante? Transporter de l'électricité sans aucune déperdition ou créer des champs magnétiques intenses sans le recours à de coûteux et encombrants systèmes de refroidissement en fait rêver plus d'un. Mais, avant

d'atteindre ce Graal, encore faut-il comprendre cette supraconductivité dite à haute température. Comprenez "à des températures un peu plus élevées que celles observées jusque-là"...

DES RÉSULTATS DÉCONCERTANTS

Les premiers supraconducteurs à haute température à avoir été découverts, dans les années 1980, sont les cuprates, des composés à base d'oxyde de cuivre. Le record de température de passage à la phase supraconductrice détenu par un

cuprate est aujourd'hui de -135 °C . Dans ce cas, le phénomène est-il identique à celui observé dans les métaux?

Cela fait vingt ans que les physiciens tentent de décrypter cette supraconductivité "non conventionnelle". Les expériences montrent que, comme dans les métaux, il se forme ces paires d'électrons qui conduisent à la disparition de la résistance électrique du matériau (*lire l'encadré p. 4*). Seulement voilà, la formation des paires ne peut pas s'expliquer par la théorie de 1956, la fameuse théorie BCS, applicable aux métaux. Un écueil d'autant plus grand que les physiciens ne comprennent pas plus le comportement des électrons dans les cuprates lorsque ces derniers ne sont pas supraconducteurs. La situation est à ce point déconcertante que Philippe Bourges, du Laboratoire Léon-Brillouin¹, à Saclay, résume ainsi les premières tentatives d'explication de la supraconductivité des cuprates : « Toutes les idées simples auxquelles les gens ont pensé rapidement ont tout bonnement échoué. »

Ces matériaux s'avèrent de fait particulièrement déroutants. Comme l'explique Julien Bobroff, du Laboratoire de physique des solides, à Orsay, « lorsque chaque atome de cuivre d'un cuprate porte un électron, le matériau est totalement isolant à toute température. Or il suffit de retirer un électron d'un atome sur 20, ce



05



que l'on obtient par une modification chimique appelée *dopage*, pour que le cuprate devienne supraconducteur. » Et d'ajouter : « Par ailleurs, à l'état isolant, un cuprate est un matériau magnétique. C'est même une de ses caractéristiques principales. Un supraconducteur conventionnel, entendez métallique, est totalement non magnétique. Dans ces conditions, comment comprendre qu'une infime modification des propriétés électroniques d'un cuprate suffise à le faire passer d'un état magnétique à un état supraconducteur ? »

PLUSIEURS EXPLICATIONS

« Les physiciens sont désormais à peu près d'accord sur les faits expérimentaux. Mais aucun consensus n'existe pour interpréter ce que l'on voit », confie Antoine Georges, du Centre de physique théorique², à Palaiseau. Le théoricien a néanmoins son idée sur la question : « Si cela ne fait pas l'unanimité, il est assez tentant de penser que la formation des paires d'électrons aurait à voir avec le magnétisme. » D'autres chercheurs font remarquer qu'au sein d'un cuprate, les électrons peuvent exister sous différentes configurations, comme il existe plusieurs manières de ranger des oranges sur un étalage, par exemple. Ces différentes configurations pourraient entrer en compétition les unes avec les autres. Il en résulterait une instabilité, que l'apparition de la supraconductivité permettrait de résorber.

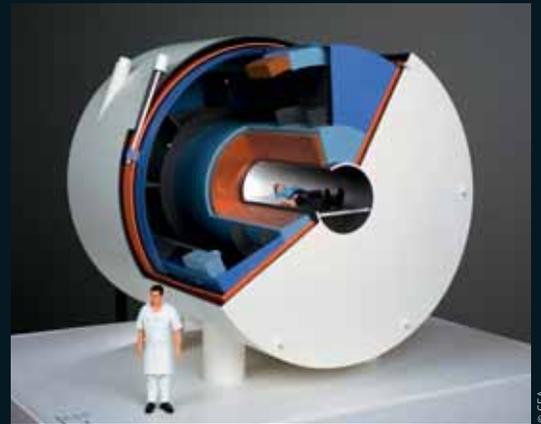
Cyril Proust, du Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI)³, à Toulouse, a apporté un important crédit expérimental à cette idée



© C. FRESILLON/CNRS PHOTO THEQUE - P. DUMAS

IMAGER LE CORPS HUMAIN

À l'hôpital, la supraconductivité se cache au cœur des appareils d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) qui analysent les tissus des patients. Grâce à elle, on peut injecter dans ces instruments d'intenses courants électriques qui vont y perdurer sans faiblir et produire des champs magnétiques stables de 1,5 à 3 teslas. Ceux-ci peuvent même atteindre 7 teslas, voire plus, dans des applications de recherche comme l'IRM de NeuroSpin, la plateforme du CEA consacrée à l'imagerie du cerveau, ou bien celui de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, dont le CNRS est partenaire. Dans un futur proche, certains supraconducteurs pourraient aussi améliorer les performances des antennes qui recueillent le signal émis par les tissus lors d'un examen. Les prototypes du laboratoire Imagerie par résonance magnétique médicale et multimodalités¹ d'Orsay, devraient d'ici peu être commercialisés pour l'imagerie de petits animaux utilisés lors d'études précliniques. 1. Unité CNRS/Université Paris-Sud-XI.



© CEA

→ Maquette de l'IRM de 11,7 teslas du centre NeuroSpin, qui doit être opérationnelle en 2012.

CONTACT :
Luc Darrasse
> luc.darrasse@u-psud.fr



© KURITA KAKU GUMMA

→ Ce train à sustentation électromagnétique de 28 mètres de long et de 30 tonnes peut atteindre la vitesse de 581 km/h.

FAIRE LÉVITER LES TRAINS

581 km/h, c'est la vitesse record atteinte en 2003 par un train à sustentation magnétique. L'idée est simple, en théorie : faire léviter le train quelques centimètres au-dessus des rails afin d'annuler les frottements. Pour cela, on utilise l'effet Meissner (lire l'encadré p. 4) engendré par des bobines et des aimants, dont certains sont supraconducteurs, déployés sur le train et les rails. La technologie est toutefois très coûteuse et contraignante.

STOCKER DE L'ÉNERGIE

Du fait de son absence de résistance électrique, un supraconducteur permet de conserver indéfiniment un courant. Si des recherches ont donc lieu en matière de stockage d'énergie, les spécialistes tentent en parallèle d'exploiter une autre propriété : avec la supra, il est possible de décharger un courant extrêmement rapidement, et donc de délivrer des impulsions électriques très puissantes. On peut ainsi imaginer des lanceurs électromagnétiques capables d'éjecter un projectile avec une vitesse supérieure à celle obtenue avec un canon à poudre, voire de lancer des microsatsellites. Dans le cadre du projet ANR Super-Smes, plusieurs équipes, dont le Consortium de recherche pour l'émergence de technologies avancées¹ et le Laboratoire national des champs magnétiques intenses, tentent de développer de tels dispositifs de stockage magnétiques. 1. Unité CNRS.

CONTACT :
Pascal Tixador
> pascal.tixador@grenoble.cnrs.fr



© P. TIXADOR

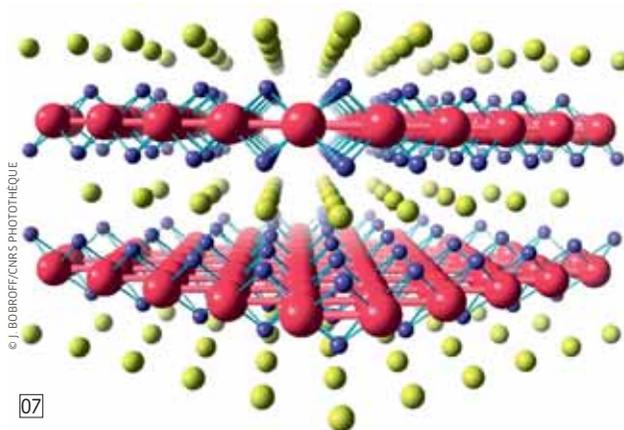
→ Système de stockage de l'énergie à l'aide de supraconducteurs à haute température critique (collaboration CNRS/DGA/Nexans).

en 2007. Ainsi, il a soumis des échantillons de cuprates à des impulsions magnétiques très intenses, capables de supprimer leur supraconductivité. « *Ce faisant, nous avons dévoilé les propriétés que le matériau aurait sans l'établissement d'une phase supraconductrice. Et révélé cet effet de compétition* », indique le scientifique.

Resterait donc à décrire les configurations électroniques en compétition. En forme de rubans? De boucles de courant? Là encore, les hypothèses ne manquent pas. Les expériences menées notamment par Marc-Henri Julien, du LNCMI, ou encore Philippe Bourges, ont révélé l'existence de différentes formes possibles. Formes qu'il est encore très difficile de lier à la supraconductivité.

SYNTHÉTISER LES CONNAISSANCES

Alors, quand les physiciens viendront-ils à bout du mystère de la supraconductivité à haute température? Pour Antoine Georges, « *ce n'est pas pour l'année prochaine, mais il est probable que ce soit pour dans moins de trente ans* ». Philippe Bourges complète : « *Plusieurs dizaines de milliers de papiers ont été publiés sur le sujet. Désormais, il va falloir opérer la synthèse de toutes ces connaissances.* » Et peut-être ainsi parvenir à une théorie complète de la supraconductivité dans les cuprates. Qui pourrait être « *un mélange de tout ce qui a déjà été proposé* », comme le note Alain Sacuto, du Laboratoire



© J. BOBROFF/CNRS PHOTO THÈQUE

07

07 Même si la structure en mille-feuille des pnictures rappelle celle des cuprates, leur physique est totalement différente.
08 Photo au microscope colorisée d'un pnicture, un supraconducteur à haute température critique à base de fer.

08



© D. COLSON/CNRS PHOTO THÈQUE

UN DÉFI THÉORIQUE POUR LES PHYSICIENS

Au milieu des années 1980, les outils théoriques pour décrire les cuprates nouvellement découverts manquent cruellement. De fait, dans un métal standard, les électrons peuvent être considérés comme indépendants les uns des autres. Inversement, les électrons d'un cuprate sont dits très corrélés : ils se gênent, se bloquent les uns les autres et ne se déplacent que collectivement, cette situation introduisant dans leur description de redoutables difficultés

théoriques. Depuis vingt ans, la physique de la matière condensée a donc entrepris une véritable révolution conceptuelle dont les retombées vont bien au-delà des cuprates. Et qui permet aujourd'hui d'appréhender toute la complexité de la matière électronique dans les solides : oxydes, terres rares, actinides... Pour ce faire, il aura fallu jouer comme jamais d'approches complémentaires aussi bien théoriques que numériques. Et emprunter à la chimie aussi bien qu'à la physique

des particules. Preuve que les supraconducteurs à haute température ont véritablement ouvert un nouveau continent physique. En témoigne d'ailleurs la nomination en 2009 d'Antoine Georges, spécialiste des électrons très corrélés, en tant que professeur au Collège de France, à la chaire de physique de la matière condensée.

CONTACT :
Antoine Georges
> antoine.georges@cphpt.polytechnique.fr

matériaux et phénomènes quantiques⁴, ou, selon Cyril Proust, « *une explication nouvelle, unique et commune aux différentes familles de nouveaux supraconducteurs* ».

Car, en 2008, un type inédit de supraconducteurs à haute température est entré en scène : les pnictures. Des composés à base de fer dont la température de transition vers la phase supraconductrice peut avoisiner les -220 °C. « *Pendant les six premiers mois, on a cru que leur physique était semblable à celle des cuprates*, relate Julien Bobroff. *Avant de nous rendre compte qu'ils présentaient de nombreuses originalités.* »

Une chance pour les spécialistes, ils ont profité des développements tous azimuts déjà accomplis pour refaire en deux ans ce qui en avait pris vingt

pour les cuprates. D'autant que la physique des pnictures pourrait être un tout petit peu moins complexe que celle de leurs cousins à base d'oxyde de cuivre. Par exemple, une partie importante de la communauté concernée s'attend à découvrir que, dans le cas des pnictures, c'est le seul magnétisme qui permet aux charges électriques de former des paires. Un scénario auquel Julien Bobroff a apporté un argument en montrant pour la première fois, grâce à une expérience de résonance magnétique nucléaire, que magnétisme et supraconduction, étonnamment, peuvent parfois coexister dans un pnicture à l'échelle de l'atome. « *Ce qui n'avait jamais été mis en évidence clairement dans un cuprate* », précise le chercheur.

UNE ROUTE ENCORE LONGUE

Reste à savoir si tout cela permettra de conduire les scientifiques sur le chemin de supraconducteurs à température ambiante. « *Je n'y crois pas vraiment. Et, quoi qu'il en soit, le matériau reste à inventer, problématique pour laquelle les chimistes ont un rôle majeur à jouer* », insiste Philippe Bourges. De son côté, Alain Sacuto est beaucoup plus optimiste : « *C'est une question d'équilibre, à déterminer en travaillant main dans la main avec les chimistes, ce qui, du reste, est une nécessité dans ce domaine nécessitant des matériaux de très grande qualité cristalline. Mais je ne vois pas d'obstacle de principe.* » À moins que de nouvelles difficultés ne se dressent sur la route. La supraconductivité n'est pas avare de surprises...

1. Unité CNRS/CEA.
2. Unité CNRS/École polytechnique.
3. Unité CNRS/Insa Toulouse/Université Paul-Sabatier/Université Joseph-Fourier.
4. Unité CNRS/Université Paris-Diderot.

CONTACTS :

Philippe Bourges
> philippe.bourges@cea.fr
Cyril Proust
> cyril.proust@lncmi.cnrs.fr
Alain Sacuto
> alain.sacuto@univ-paris-diderot.fr

DÉTECTER LES OBJETS CACHÉS

La détection des ondes électromagnétiques possède pléthore d'applications. Mais, dans les hautes fréquences, quelques centaines de gigahertz, elle n'est pas aisée. Les détecteurs les plus sensibles sont basés sur des circuits

supraconducteurs portés à des températures proches du zéro absolu. De tels dispositifs sont à l'œuvre à bord du satellite *Herschel*, opéré par le Cnes, le CEA et le CNRS. Pour étendre le domaine d'utilisation de ces appareils, l'équipe de Jérôme Lesueur, du Laboratoire de physique et d'étude des matériaux de Paris, développe des circuits à base de matériaux supraconducteurs à haute température critique, susceptibles de travailler de -253 à -193 °C, c'est-à-dire avec un système cryogénique assez léger, et jusque dans les fréquences térahertz. À la clé, de nouvelles applications, en particulier dans le domaine de la sécurité. En effet, de nombreuses molécules (polluants, explosifs...) possèdent une signature électromagnétique dans la gamme térahertz. De plus, ces ondes traversent les vêtements et sont donc idéales pour le repérage d'objets dissimulés. Enfin, de tels détecteurs pourraient être utilisés pour la réalisation de caméras capables de voir à travers le brouillard, car certaines ondes térahertz sont très peu absorbées par les molécules d'eau.

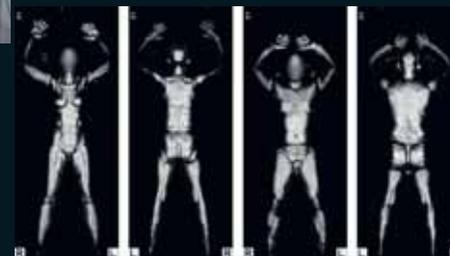


© E. VAN OUDENHARDEN/EPFL/CORBIS

→ L'utilisation des supraconducteurs pourrait améliorer la qualité des systèmes de sécurité, notamment des scanners installés dans certains aéroports.

CONTACT :

Jérôme Lesueur
> jerome.lesueur@espci.fr



© PROVISION

TRANSPORTER LE COURANT

Aujourd'hui, l'acheminement de l'électricité s'accompagne encore d'une perte d'énergie. Si les câbles étaient supraconducteurs, les déperditions seraient infimes, et on pourrait y faire circuler 1000 fois plus de courant. Néanmoins, il ne faut pas s'attendre à une révolution tant qu'on ne saura se passer d'importants dispositifs de refroidissement. À petite échelle, toutefois, la chose est faisable : à Long Island, aux États-Unis, 300 000 foyers sont alimentés par 600 mètres de câbles supraconducteurs à haute température (-196 °C tout de même) fabriqués par la société Nexans. L'avenir industriel de ces câbles, très chers, se situe plutôt dans des marchés de niche, comme celui des limiteurs de courant, sortes de maxifusibles à l'échelle d'un réseau. Dans le cadre du projet Eccoflow, auquel participent l'Institut Néel et le Laboratoire en génie électrique de Grenoble¹, de nouveaux limiteurs supraconducteurs seront bientôt testés à Majorque et en Slovénie.

1. Unité CNRS/Grenoble INP/Université Joseph-Fourier.

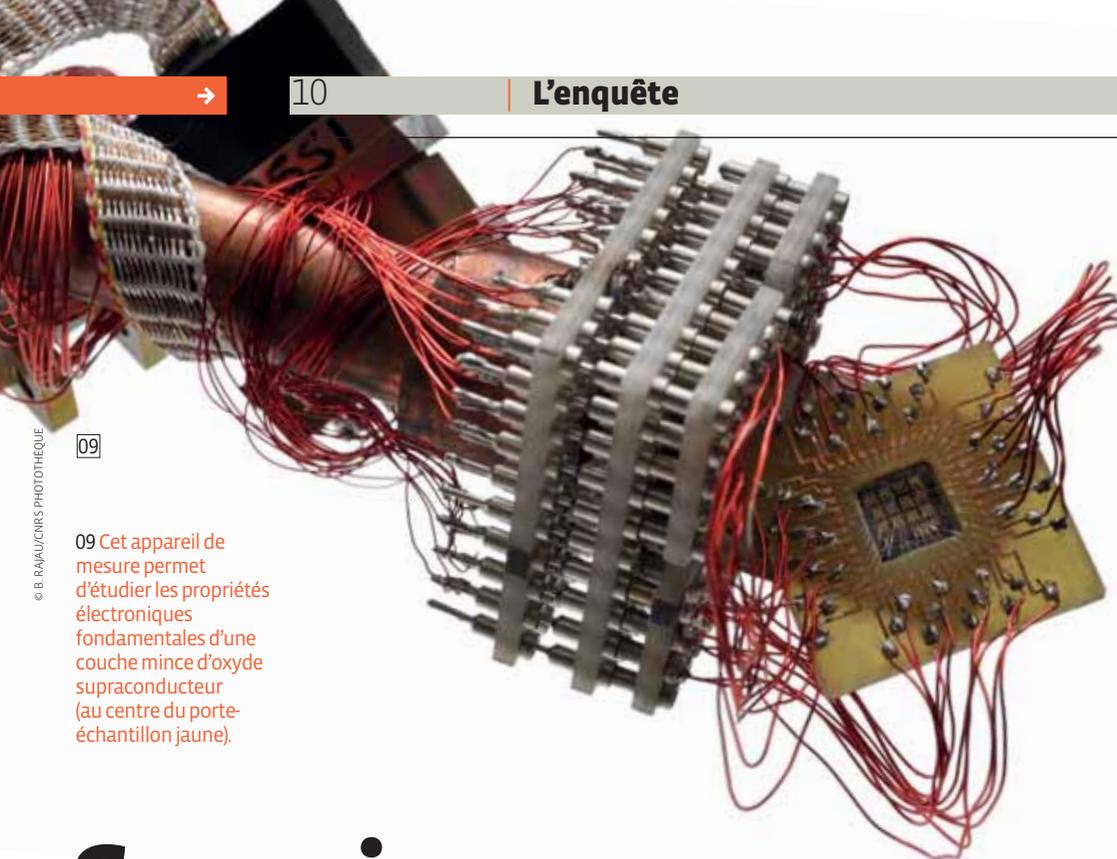
CONTACTS :

Jean-Maxime Saugrain
> jean_maxime.saugrain@nexans.com
Pascal Tixador
> pascal.tixador@grenoble.cnrs.fr

→ Les câbles supraconducteurs (ici ceux de la société Nexans) permettent de transporter l'électricité en minimisant les pertes.



© NEXANS



09

09 Cet appareil de mesure permet d'étudier les propriétés électroniques fondamentales d'une couche mince d'oxyde supraconducteur (au centre du porte-échantillon jaune).

© B. RAJAUC/CNRS PHOTO THÈQUE

Surprises à l'échelle nano

Les physiciens sont loin d'avoir compris l'origine de la supraconductivité dans de nombreux matériaux. Or, révolution nano oblige, les voilà contraints de se poser une nouvelle question : *quid* de ce phénomène pour les objets dont la taille avoisine le millionième de millimètre ? Voire : « *La supraconductivité a-t-elle un sens à cette échelle ?* », s'interroge Hélène Bouchiat, du Laboratoire de physique des solides, à Orsay.

UNE PROPRIÉTÉ CONTAGIEUSE

Dans les matériaux à une ou deux dimensions, les électrons se repoussent si violemment qu'il est difficile d'imaginer qu'ils puissent former ces paires indissociables de l'état supraconducteur

(lire l'encadré p. 4). Pourtant, les chercheurs du groupe de Hélène Bouchiat ont fait une découverte surprenante. Ils ont montré qu'un conducteur, dit moléculaire, de taille nanométrique – nanotube de carbone, graphène, fullerène, brin d'ADN –, dès lors qu'il est connecté à un supraconducteur, peut acquérir lui-même l'étonnante propriété. « *On dit qu'il devient supraconducteur par effet de proximité*, explique la physicienne. *L'état est fragile, car aucune "colle" ne maintient*

les paires électroniques à l'origine de la supraconductivité, mais on l'observe dans un matériau où elle ne se manifeste pas naturellement. »

Et les étonnantes réactions des nanos à la supraconductivité ne s'arrêtent pas là. L'équipe de Dimitri Roditchev, de l'Institut des nanosciences de Paris¹, s'intéresse à l'effet d'un champ magnétique sur des échantillons nanométriques supraconducteurs. Notamment à son effet sur les microscopiques boucles de courant électronique, appelées vortex, qui apparaissent dans le supraconducteur lorsque le champ dépasse une certaine intensité.

FORTE RÉSISTANCE MAGNÉTIQUE

Comme le souligne le chercheur, « *dans le cas de supraconducteurs massifs, la densité de vortex croît avec le champ magnétique et, au-delà d'une certaine intensité, ces vortex sont tellement serrés les uns contre les autres qu'ils finissent par détruire la supraconductivité. Or nous avons constaté que, dans le cas d'un échantillon nanométrique, les vortex peuvent être beaucoup plus proches. Ainsi les nano-supras résistent à des champs de quatre à vingt fois supérieurs.* »

Et les nano-supras n'ont pas qu'un intérêt fondamental. Ainsi, Jérôme Lesueur, du Laboratoire de physique et d'étude des matériaux (LPEM)², à Paris, étudie les propriétés de couches nanométriques de différents oxydes sur un substrat de titanate de strontium. Alors qu'aucun

10



© C. FRÉJILLON/CNRS PHOTO THÈQUE

10 Des échantillons de matériaux supraconducteurs sont placés sous un champ magnétique dans un microscope à effet tunnel afin d'étudier la supraconductivité à l'échelle nanométrique.

11 Des nanotubes de carbone (en rouge) déposés sur un supraconducteur (en noir) acquièrent une supraconductivité par effet de proximité.



© R. DIEBLOCK

de ces matériaux n'est supraconducteur (ce sont même des isolants !), leur interface le devient. Certes, l'effet ne se produit qu'au-dessous d'une température de $-272,85\text{ }^{\circ}\text{C}$, loin de toute possibilité d'applications immédiates. Mais, comme le relève le scientifique, « *cette propriété singulière s'ajoute à celles déjà nombreuses des oxydes en couches minces* ». De quoi stimuler l'imagination des chercheurs alors que la supraconductivité envahit à peine le monde des nanos.

1. Unité CNRS/UPMC.
2. Unité CNRS/ESPCI ParisTech/UPMC.

CONTACTS :

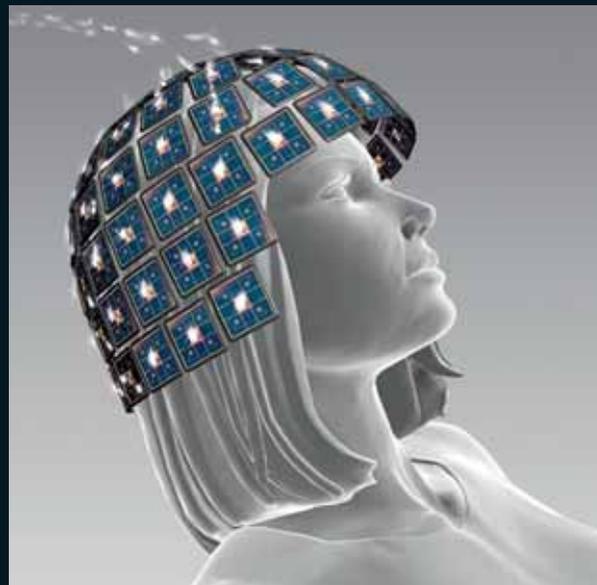
Hélène Bouchiat> bouchiat@ips.u-psud.fr**Jérôme Lesueur**> jerome.lesueur@espci.fr**Dimitri Roditchev**> dimitri.roditchev@insp.jussieu.fr

ENREGISTRER D'INFIMES CHAMPS MAGNÉTIQUES

Voir le cerveau fonctionner en direct : voilà l'une des prodigieuses applications du Squid. De quoi s'agit-il ? Du magnétomètre le plus sensible qui soit, et dont le fonctionnement repose une nouvelle fois sur la supraconductivité. Grâce à lui, on peut enregistrer les minuscules champs magnétiques à la surface du crâne dus à l'activité neuronale, bien qu'ils soient un milliard de fois moins intenses que le champ terrestre. Objet de nombreuses recherches, cette technique – complémentaire de l'IRM, mais spatialement moins précise – permet néanmoins de réaliser une image toutes les millisecondes. La sensibilité des Squid les rend particulièrement adaptés à l'étude du champ magnétique terrestre, avec des applications en paléomagnétisme et en archéologie.

→ Les Squid sont utilisés pour la magnéto-encéphalographie, afin de mesurer l'activité des neurones.

CONTACTS :

Denis Schwartz> denis.schwartz@upmc.fr**Jean-Pierre Valet**> valet@ipggp.fr

© ELEKTVA AB

Pour en savoir +

À LIRE |

La Guerre du froid. Une histoire de la supraconductivité, Claude Matricon et Georges Waysand, Seuil, coll. « Science ouverte », 1994

À ÉCOUTER |

À quand les supraconducteurs à température ambiante ?

Dimitri Roditchev est invité de l'émission *Info sciences* sur France Info (27 mai 2010)
> www.france-info.com/chroniques-info-sciences-2010-05-27-a-quand-les-supraconducteurs-a-temperature-ambiante-447189-81-165.html#

À VOIR |

Les supraconducteurs et leurs fascinantes propriétés (2011, 114 min), conférence de Julien Bobroff
> www.sites.univ-rennes2.fr/webtv/appele_film.php?lienFilm=537

EN LIGNE |

Les événements organisés à l'occasion du centenaire de la supraconductivité sont sur le site du CNRS : Supra 2011.

> www.cnrs.fr/supra2011/

+ WEB

Un album **photo** sur la banque d'images du CNRS et une sélection de **films** sur le catalogue de la vidéothèque.

> <http://phototheque.cnrs.fr>> <http://videotheque.cnrs.fr>

OBSERVER L'INFINIMENT GRAND

La supraconductivité sert aussi à étudier l'Univers. Car, dans certains domaines d'observation, comme l'infrarouge lointain ou le rayonnement millimétrique, l'énergie d'un photon est trop faible pour être détectée par les appareils habituels. Les astrophysiciens utilisent donc des bolomètres, des détecteurs dont la sensibilité est maximale lorsqu'ils sont rendus supraconducteurs. Couramment utilisés sur Terre, de tels instruments sont en plein développement pour les satellites. Ils équiperont par exemple l'instrument *Safari* – dont le projet est piloté par le Centre d'étude spatiale des rayonnements² de Toulouse – installé sur le futur satellite japonais *Spica*, dédié à l'observation de la formation des galaxies et des systèmes d'étoiles. Ou encore sur le satellite *Core*, qui pourrait être l'un des successeurs de *Planck* pour l'étude du rayonnement fossile.

1. Unité CNRS/Université Paul-Sabatier.

CONTACT :

Michel Piat> michel.piat@apc.univ-paris7.fr

→ Le télescope spatial *Spica* embarquera un instrument doté de bolomètres supraconducteurs.



© ESA

cnrs
le journal

Rédaction : 1, place Aristide-Briand – 92195 Meudon Cedex Téléphone : 01 45 07 53 75

Mél : journal-du-cnrs@cnrs-dir.fr Le journal en ligne : www2.cnrs.fr/journal/

CNRS (siège) : 3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16 Directeur de la publication : Alain Fuchs

Directrice de la rédaction : Brigitte Perucca Directeur adjoint de la rédaction : Fabrice Impériali

Rédacteur en chef adjoint : Matthieu Ravaut Chefs de rubrique : Fabrice Demarthon, Charline Zeitoun Assistante de la rédaction et fabrication : Laurence Winter

Rédacteur du dossier : Mathieu Grousson Secrétaire de rédaction : Isabelle Grandrieux Conception graphique : Céline Heun

Iconographe : Cecilia Vignuzzi Couverture : J. Bobroff/CNRS Photothèque Photogravure : Scoop Communication

Impression : Groupe CirclePrinters – 6, route de la Ferté-sous-Jouarre – 77440 Mary-sur-Marne ISSN 0994-7647 AIP 0001309

Dépôt légal : à parution Photos CNRS disponibles à : phototheque@cnrs-bellevue.fr ; <http://phototheque.cnrs.fr/> La reproduction intégrale ou partielle des textes et des illustrations doit faire obligatoirement l'objet d'une demande auprès de la rédaction.

Retrouvez tout le programme
des manifestations sur
www.supra2011.fr ainsi que
de nombreux contenus
ludiques et scientifiques sur
www.supraconductivite.fr



La Supra



dans tous ses états

Événements, conférences, expositions

à l'occasion des **100 ans** de la découverte de la supraconductivité



www.cnrs.fr

