

Magnétisme nucléaire

M. Anatole ABRAGAM, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

Le cours n'a pas eu lieu.

PUBLICATIONS

— *Spectrométrie par croisement de niveaux en physique du muon* (C.R. Acad. Sc., t. 299, série II, n° 3, 1984).

— *Ordre magnétique nucléaire des spins de ^{169}Tm dans TmPO_4* (C.R. Acad. Sc., t. 299, série II, n° 9, 1984), avec V. BOUFFARD, C. FERMON, G. FOURNIER, J. GREGG, J.F. JACQUINOT, Y. ROINEL).

MISSIONS ET CONFÉRENCES

Conférence invitée au Colloque Ampère, Zürich, septembre 1984.

Conférence invitée au Colloque C.N.R.S. en l'honneur de Alfred Kastler, Paris, janvier 1985.

Participation au colloque sur les « armes dans l'espace » organisé par l'Académie Pontificale, Rome, janvier 1985.

Conférence invitée à la Conférence Gordon sur la Résonance Magnétique, Wolfeboro (E.U.), juin 1985.

DISTINCTIONS

Doctorat honoris causa du Technion de Haïfa (Israël).

ACTIVITÉS DU LABORATOIRE

Le laboratoire de Magnétisme Nucléaire dirigé par M. Anatole ABRAGAM constitue au Commissariat à l'Energie Atomique un groupe du Service de Physique du Solide et de Résonance Magnétique du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay.

Il comporte quinze chercheurs dont trois boursiers de thèse et un visiteur étranger, un ingénieur chimiste et huit techniciens.

Les activités du laboratoire au cours de l'année 1984-1985 sont résumées ci-dessous.

a) *Relaxation spin-réseau dans le phosphate de thulium*

Dans le champ cristallin tétragonal de TmPO_4 , l'ion Tm^{3+} est un ion de Van Vleck : son état électronique fondamental est un singulet orbital non magnétique avec un état excité à faible distance énergétique. Ces deux états se mélangent partiellement sous l'effet du couplage Zeeman électronique ou du couplage hyperfin avec le noyau de ^{169}Tm . Le premier effet donne naissance au magnétisme de Van Vleck, le second à un magnétisme dit pseudonucléaire, beaucoup plus important que le magnétisme nucléaire. Ces effets sont très anisotropes : ils sont environ 25 fois plus importants perpendiculairement à l'axe c que parallèlement à cet axe.

La relaxation spin-réseau de l'interaction Zeeman pseudonucléaire de ^{169}Tm a été étudiée dans une gamme de températures comprises entre 50 mK et 2,2 K, et dans des champs magnétiques perpendiculaires à l'axe c , compris entre 15 mT et 5,5 T. Aux plus basses températures et pour un champ supérieur à 1 T, le temps de relaxation T_1 est inversement proportionnel au champ H . Ceci s'interprète de façon cohérente par un effet direct fortement ralenti par l'engorgement des phonons (phonon-bottleneck), lié à un élargissement de la raie proportionnel au champ, dû à l'inhomogénéité du champ de Van Vleck.

(Y. ROINEL, J.F. JACQUINOT, C. FERMON, J. GREGG, V. BOUFFARD)

b) *Etude de la résistance de Kapitza du vanadate d'holmium*

L'ion Ho^{3+} est un ion de Van Vleck, et la structure cristalline de HoVO_4 est la même que celle de TmPO_4 . On a étudié en bas champ la relaxation des spins de ^{165}Ho de la façon suivante : le cristal est immergé dans la phase diluée ^3He - ^4He d'un cryostat à dilution et l'on produit une température de spin initiale très inférieure à celle du bain par désaimantation adiabatique.

On observe que le signal de RMN de ^{165}Ho , proportionnel à l'inverse de la température de spin, décroît *linéairement* au cours du temps jusque très près de sa valeur d'équilibre thermique. Ceci s'interprète de la façon suivante : par suite d'un fort couplage spins-phonons et d'une diffusion spectrale rapide des phonons du cristal, ceux-ci acquièrent une température égale à celle des spins. La variation de température du réservoir spins plus phonons s'effectue ensuite par un échange d'énergie entre cristal et bain liquide, limité par la résistance de Kapitza. Tant que la température du cristal est notablement inférieure à celle du bain, la vitesse de variation de l'énergie des spins est une constante proportionnelle à la puissance 4^e de la température du bain, et inversement proportionnelle à la capacité énergétique des spins (soumis à des interactions Zeeman et quadrupolaire). Un accord quantitatif avec ces prévisions a été obtenu pour des températures comprises entre 43 et 91 mK, et des champs compris entre 10 et 80 mT.

La valeur de la résistance de Kapitza que l'on en déduit :

$$R_k = 1,8 \times 10^{-6} T^{-3} \text{ cm}^2 \text{ K}^4 \text{ sec. erg}^{-1}$$

est en assez bon accord avec la théorie, compte tenu de l'inadaptation d'impédance acoustique entre cristal et bain.

(J.F. JACQUINOT, Y. ROINEL, J. GREGG, C. FERMON, V. BOUFFARD)

c) *Ordre magnétique nucléaire et diffraction de neutrons dans LiH*

Lorsqu'un cristal de LiH a son axe (100) parallèle à un fort champ extérieur, la désaimantation en champ élevé des spins nucléaires polarisés conduit à l'apparition d'antiferromagnétisme nucléaire, de structure différente suivant que la température de spin est positive ou négative.

On a mesuré par diffraction de neutrons la polarisation des sous-réseaux de protons en fonction de la température de spin. Les résultats, en accord qualitatif avec les prévisions théoriques, semblent toutefois dénoter une inhomogénéité de la température de spin dans l'échantillon.

On a également entrepris une étude par diffraction de neutrons du diagramme de phase champ-entropie à température de spin négative. La théorie prévoit à chaque entropie l'existence de deux champs critiques, entre lesquels existe une phase mixte formée de domaines paramagnétiques et de domaines antiferromagnétiques. Les expériences n'ont permis de détecter que le champ critique supérieur entre la phase paramagnétique et la phase mixte. L'impossibilité d'observer la transition entre phase mixte et phase antiferromagnétique peut être due à la distribution des champs dipolaires moyens dans l'échantillon parallélépipédique.

On a tenté d'y remédier en préparant des échantillons plats elliptiques, dont la forme diffère peu de celle d'un ellipsoïde. Ces échantillons n'ont pas permis d'obtenir des polarisations dynamiques nucléaires suffisantes pour produire un état antiferromagnétique.

(Y. ROINEL, V. BOUFFARD, C. FERMON)

d) *Ordre magnétique nucléaire dans HoVO_4*

On a participé, au Clarendon Laboratory de l'Université d'Oxford, à une étude de l'ordre magnétique en champ nul de ^{165}Ho dans HoVO_4 . Les spins nucléaires sont polarisés en champ élevé par relaxation spin-réseau, puis soumis à une désaimantation adiabatique. L'état ordonné est étudié en observant la variation de la fréquence de résonance quadrupolaire de ^{51}V dans le champ interne produit par les moments magnétiques augmentés de ^{165}Ho . Pour la transition $\pm 7/2 \rightarrow \pm 5/2$ de ^{51}V , un déplacement de fréquence de l'ordre de 8 kHz est observé dans l'état antiferromagnétique de ^{165}Ho .

(R.G. CLARK, J. GREGG, Y. ROINEL)

e) *Etude de l'hélium 3 solide*

La grande amplitude des mouvements de point zéro des noyaux de ^3He , liée à la répulsion à courte distance entre les cortèges électroniques atomiques confèrent au solide des propriétés quantiques particulières, telles que l'existence d'interactions d'échange à deux, trois et quatre spins et la présence d'ondes de lacunes.

Ces mouvements quantiques ont été étudiés dans un premier temps par leur influence sur la relaxation de l'énergie Zeeman nucléaire vers le réseau. Ces études ont permis de préciser la dynamique du couplage Zeeman-échange ainsi que les divers modes de relaxation de l'échange : couplage aux ondes de lacunes, processus à un phonon observé très récemment au laboratoire, couplage aux dislocations du réseau ou aux impuretés d'hélium 4.

La connaissance de ces mécanismes a permis de réaliser des expériences préliminaires de désaimantation adiabatique du solide. Pour un volume molaire $V \simeq 24,2 \text{ cm}^3$ on atteint par désaimantation adiabatique une température de 3 mK, en partant de l'équilibre thermique à environ 10 mK dans un champ de 8 T.

Bien que l'existence d'échange à 3 et 4 spins dans ^3He solide soit physiquement très plausible et rende bien compte des propriétés d'ordre magnétique, aucune expérience n'a jusque là confirmé de façon formelle l'existence de tels échanges multiples. On a entrepris une expérience de mise en évi-

dence directe de l'existence d'échange à 4 spins par mesure de la pression du solide à l'équilibre thermique à température et champ magnétique variables. On peut montrer théoriquement que la variation de pression due à l'existence d'une polarisation nucléaire finie est proportionnelle à l'énergie d'échange. Cette variation de pression devrait comporter un terme proportionnel au carré de la polarisation, provenant des échanges à 2 et 3 spins, plus un terme proportionnel à la puissance quatrième de la polarisation, caractéristique de la présence d'échange à 4 spins.

Les expériences, très délicates, sont actuellement en cours.

(E. SUAUDEAU, M. BERNIER)

f) *Pseudomagnétisme nucléaire*

L'existence d'une partie dépendant du spin dans l'amplitude de diffusion neutron-noyau, produit une précession du spin du neutron à la traversée d'une cible nucléaire polarisée. Ceci permet de définir une induction pseudomagnétique et, pour chaque noyau, un moment pseudomagnétique μ^* , proportionnel à la partie dépendant du spin de l'amplitude de diffusion neutron-noyau.

La mesure systématique des moments pseudomagnétiques μ^* a été étendue à un certain nombre d'isotopes nouveaux. Ainsi, dans des échantillons métalliques isotopiquement enrichis, dans lesquels les spins nucléaires acquièrent rapidement leur polarisation d'équilibre thermique par relaxation spin-réseau, on a mesuré les moments pseudomagnétiques μ^* de ^{67}Zn , ^{203}Tl , ^{205}Tl et ^{207}Pb . Dans des poudres de silicium amorphe, on a produit des polarisations dynamiques de ^{29}Si supérieures à 10 %, ce qui a permis de mesurer son moment μ^* .

(H. GLATTLI, J. COUSTHAM, A. MALINOVSKI)

g) *Etude d'effets quantiques macroscopiques dans les jonctions Josephson à basse température*

Une jonction Josephson est un système linéaire très simple jusqu'à basse température, et pour des dimensions de jonction suffisamment petites, il n'y a qu'un seul degré de liberté : la différence de phase supraconductrice. Cette différence de phase est une variable macroscopique décrivant le mouvement en bloc de plus de 10^{10} paires de Cooper intercorrélées. On élabore actuellement une installation expérimentale destinée à mesurer l'effet tunnel quantique macroscopique de cette différence de phase, effet tunnel qui est responsable du passage à très basse température de l'état supraconducteur à

l'état dissipatif. Le but de l'expérience est d'étudier l'influence sur l'effet tunnel de la friction due à une impédance en parallèle avec la jonction, et de la comparer aux prévisions théoriques.

On a jusqu'à présent résolu le problème de l'influence de la friction sur les niveaux d'énergie d'une particule dans un potentiel cubique. On vient d'autre part de mettre en évidence le phénomène de repiégeage dans les jonctions Josephson, phénomène étroitement lié au premier retour au point de départ d'une particule animée de mouvement Brownien avec vitesse de dérive.
(M. DEVORET, D. ESTEVE)

PUBLICATIONS DES TRAVAILLEURS DU LABORATOIRE

M. GOLDMAN, *Interference Effects in the Relaxation of a Pair of Unlike Spin-1/2 Nuclei* (*J. Magn. Res.*, 60, 437, 1984).

M. GOLDMAN, *Les Principes Physiques du Magnétisme Nucléaire* (*C.R. Acad. Sci.*, section « La Vie des Sciences », à paraître).

M. GOLDMAN, *Les Principes Physiques de l'imagerie par Résonance Magnétique Nucléaire* (*Bull. Soc. Fr. de Phys.*, 56, 3, 1985).

M. GOLDMAN et C. FERMON, *Computation of Dipolar Fourier Transforms* (*J. Magn. Res.*, à paraître).

A. BRIQUET, J.J. CHAILLOUT et M. GOLDMAN, *Principe d'imagerie par Résonance Magnétique Nucléaire utilisant un champ de polarisation non uniforme* (*C.R. Acad. Sci.*, à paraître).

C. URBINA, J.F. JACQUINOT et M. GOLDMAN, *Rotating Transverse Nuclear Helimagnetism in CaF₂. I - Experimental Study* (*J. Phys. C.*, à paraître).

M. GOLDMAN, J.F. JACQUINOT et C. URBINA, *Rotating Transverse Nuclear Helimagnetism in CaF₂. II - Theoretical approximations* (*J. Phys. C.*, à paraître).

Y. ROINEL, V. BOUFFARD, J.F. JACQUINOT, C. FERMON et G. FOURNIER, *Relaxation and phonon bottleneck of ¹⁶⁹Tm nuclear spins in TmPO₄ : evidence for a direct process?* (*J. Phys.*, à paraître).

M.E.R. BERNIER, *Low Temperature Spin Lattice Relaxation in bcc ³He* (*Proc. 17th Internat. Conf. on low Temp. Phys. LT 17*, North-Holland, 1984, p. 269).

M. GLATTLI et P. MERIEL, *The Problem of ²⁷Al Neutron Spin-Dependent Scattering Length* (*Nucl. Phys.*, A 426, 137, 1984).

H. GLATTLI et P. CALVANI, *NMR Study of CH₄-Kr Mixtures* (Proc. XXIInd Congress Ampère, Zürich Ampère Committee, Dept. of Physics, The University, Zürich, Switzerland, 1984, p. 400).

P. CALVANI et H. GLATTLI, *Orientalional Disordering of an Octupolar Solid : NMR Study of (CH₄)_x Kr (1 - x)* (Alloys. J. Chem. Phys., à paraître).

H. GLATTLI, *Nuclear Polarisation and Neutrons* (Inst. Conf. on Neutron Scattering in the 90's, Jülich, 1985, IAEA-CN-46/081).

N.S. SULLIVAN, M. DEVORET et D. ESTEVE, *Correlation functions in the quadrupolar glass phase of solid hydrogen* (Phys. Rev., B 30, 4935, 1984).

D. BEYSENS et D. ESTEVE, *Adsorption phenomena at the surface of silica spheres in a binary liquid mixture* (Phys. Rev. Lett., 54, 2123, 1985).

M. DEVORET, J.M. MARTINIS, D. ESTEVE et J. CLARKE, *Resonant activation from the zero voltage state of a current-biased Josephson junction* (Phys. Rev. Lett., 53, 1260, 1984).

J.M. MARTINIS, M. DEVORET et J. CLARKE, *Energy leque quantization in the zero voltage state of a current-biased Josephson junction* (Phys. Rev. Lett., à paraître).

R. MIRACKY, M. DEVORET, J. CLARKE, *Deterministic 1/f noise in chaotic current-biased Josephson junctions* (Phys. Rev., A 31, 2509, 1985).