

## Physique statistique

M. Philippe NOZIÈRES, membre de l'Institut  
(Académie des Sciences), professeur

Le cours n'a pas eu lieu.

### ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES

P. NOZIÈRES anime le groupe de physique théorique de l'Institut Laue Langevin à Grenoble, auquel sont venus s'adjoindre les théoriciens de l'ESRF (Laboratoire du rayonnement synchrotron). L'ensemble comprend une douzaine de physiciens confirmés qui effectuent des séjours de durée limitée, de un à cinq ans, et qui travaillent dans des domaines très divers. Le groupe constitue un pôle d'attraction important, vers lequel convergent de nombreux visiteurs étrangers. Un séminaire théorique est organisé chaque semaine, couvrant tous les thèmes de la physique de la matière condensée. Environ cinquante séminaires ont été tenus pendant la dernière année académique.

En 1994-1995 l'activité du groupe ILL portait sur les sujets suivants :

— *Systèmes unidimensionnels* : Généralisation de l'Ansatz de Bethe aux systèmes contenant des défauts ou impuretés. Application au modèle t-J et recherche d'autres modèles exactement solubles (P. BARES). Méthodes de bosonisation pour un système fini : effets de bord. Oscillations de Friedel et application aux expériences de conductance (A. GOGOLIN).

— *Systèmes mésoscopiques* : courants persistants en présence d'impuretés, relation avec le mouvement dissipatif d'une particule quantique (A. GOGOLIN). Evaluation du temps de passage par effet tunnel à travers une barrière (T. MARTIN).

— *Corrélations fortes* : transition supraconductrice en deux étapes de  $\text{UPt}_3$  : effet de l'anisotropie hexagonale et paramètre d'ordre mixte (V. MINEEV). Interaction des polarons dans les cristaux ioniques dopés, possibilité d'une cristal-

lisation (P. QUEMERAIS). Fluctuations quantiques d'un système de spins 1 avec anisotropie uniaxiale et champ transverse, application aux phases chirales frustrées (B. TOPERVERG).

— *Problèmes d'impuretés* : couplage entre l'effet Kondo pour une impureté magnétique et l'effet Jahn-Teller : formation d'états cohérents (A. GOGOLIN).

— *Physique des surfaces et formation de structures* : Instabilités de croissance des eutectiques : rupture de la symétrie de parité et inclinaison des lamelles. Sélection de longueur d'onde (K. KASSNER). Effet de l'électromigration sur la croissance des surfaces vicinales ; mise en paquets des marches cristallines (A. PIMPINELLI). Lois d'échelle pour la densité et la taille des terrasses en croissance épitaxiale (A. PIMPINELLI).

— *Vésicules* : fluctuations thermiques des membranes et relation d'Einstein (E. KATS). Etudes numériques de la formation de trous. (B. FOURCADE).

L'activité personnelle de P. NOZIÈRES a porté sur les thèmes suivants :

### 1. *Frottement solide*

Les lois phénoménologiques gouvernant le frottement « solide sur solide » sont dues à Coulomb, il y a deux siècles (en fait l'essentiel se trouve dans les carnets de Léonard de Vinci !). Le rôle de la plasticité dans la géométrie des contacts locaux a été souligné par Tabor vers 1950. Les développements récents concernent la relaxation « accrochage-glisement » (« stick-slip »), avec une motivation surtout géophysique (mouvement des deux lèvres d'une faille). Les très belles expériences du groupe de l'ENS montrent la présence de précurseurs logarithmiques, avec une loi d'échelle reliant les frottements statique et dynamique. On observe en outre un spectre de bruit très caractéristique en  $1/f$  qu'il convient d'expliquer.

Avec C. CAROLI un premier effort a été fait pour construire un modèle semi-microscopique rendant compte du glissement d'un patin sur un substrat. On suppose l'existence d'aspérités sur les deux pièces en présence, qui créent un *potentiel de piégeage*  $V$  lorsqu'elles se font face. Chaque piège actif est caractérisé par une variable de configuration  $\rho_i$  qui mesure le décalage des deux aspérités; le potentiel  $V$  peut être répulsif ou attractif. En régime dynamique on balaye tous les  $\rho_i$  de  $-\infty$  à  $+\infty$  : la moyenne est temporelle. En régime statique seule subsiste la moyenne de configuration.

Chaque piège répond *élastiquement* au potentiel  $V$ , engendrant ainsi une interaction entre les pièges. Si les pièges sont distants cette interaction est faible et on peut la négliger en première approximation. Le problème « à un site » reste néanmoins non trivial, car pour des matériaux « mous » il peut conduire à un régime de *multistabilité*, et donc d'*hystérésis*. On montre facilement que pour un système monostable en régime quasi statique la force de frottement moyenne est

nulle (en situation d'équilibre local l'énergie ne peut être dissipée). Ce sont précisément les discontinuités dues à l'hystérésis qui sont responsables du frottement. Le coefficient de frottement dynamique  $\mu_d$  est directement relié à l'aire du cycle d'hystérésis, exactement comme dans l'hystérésis magnétique d'un matériau ferromagnétique. Si la vitesse de tirage est assez lente on peut envisager un saut anticipé par activation due au bruit : on explique ainsi en partie les dérives logarithmiques observées.

En régime statique le patin recule pour annuler en moyenne la force de traction. Le coefficient  $\mu_s$  nécessaire pour redémarrer est alors égal à  $\mu_d$  : il faut reconstruire la distribution stationnaire des variables de configuration  $\rho_i$ . Pour expliquer le fait d'expérience  $\mu_s > \mu_d$  il faut faire appel à une relaxation *plastique* des pièges. On crée ainsi une autre source de corrections logarithmiques et l'on explique les lois d'échelle reliant  $\mu_s$  à  $\mu_d$ , suggérées par l'expérience.

Bien que faible l'interaction élastique entre les pièges joue un rôle important du fait de sa longue portée. Pour des pièges multistables en régime statique elle crée une *longueur d'écran*  $\lambda_D$  limitant la portée de toute perturbation élastique (qu'elle soit due à un autre piège ou à une action extérieure). Cet effet d'écran disparaît en régime dynamique stationnaire ; chaque site qui décroche crée alors sur tous les autres un *bruit* de la variable de configuration  $\rho_i$ , qui peut à son tour enclencher des décrochements secondaires — d'où l'idée de « décrochements en cascade », probablement responsables du spectre de bruit observé. (Ici encore l'analogie avec le bruit Barkhausen des matériaux ferromagnétiques est évidente). La théorie de ces cascades est encore à l'état d'ébauche car pour éviter les divergences une analyse fine des corrélations temporelles est nécessaire. De même il reste à démontrer que l'interaction entre sites peut induire une multistabilité pour des matériaux « durs » monostables à l'échelle du site unique (il apparaît alors une taille minimum pour ces amas multistables). Ces points ne mettent pas en cause l'essence du modèle : le frottement solide est un phénomène d'hystérésis, avec toutes les complications de sauts activés et d'interactions qui y sont associées.

## 2. Surfaces et croissance cristalline

L'influence des déformations élastiques sur la forme et la croissance des cristaux est en général négligée. L'an dernier un mécanisme de mise en paquets des marches cristallines, fondé sur le couplage élastique entre marches et adatoms, avait été mis en évidence. Plus généralement une marche crée sur le substrat une *force résultante* non nulle lorsque la surface est soumise à un effort uniaxe (par exemple en courbant l'échantillon). Deux marches distantes de  $d$  ressentent une interaction  $\approx \text{Log}d$ . Cette interaction détruit les facettes, produisant un raccord anguleux de deux profils exponentiels. Cet effet pourrait expliquer certaines observations au microscope électronique sur la surface du silicium.

### 3. Effet Kondo multicanal

Une impureté magnétique couplée antiferromagnétiquement aux électrons d'un métal piège un électron à basse température pour réduire son spin  $S$  : c'est l'effet Kondo. Si  $S = 1/2$  on obtient une structure non magnétique et un comportement standard de liquide de Fermi. La situation est différente si les électrons ont un degré de liberté interne (« saveur ») pouvant prendre  $n$  valeurs. Dans le cas « surécranté »  $n > 2S$  les limites de couplage faible et fort sont également répulsives : le comportement à  $T = 0$  correspond à un couplage intermédiaire avec des lois en puissances très inhabituelles. Ce point fixe singulier n'existe que si les  $n$  saveurs sont dégénérées : toute anisotropie entraîne un crossover vers un liquide de Fermi habituel (la ligne isotrope est une séparatrice).

Il existe une solution exacte dans le cas isotrope, fondée sur l'Ansatz de Bethe. Les mêmes résultats peuvent s'obtenir de façon approchée par une méthode dite de « bosonisation ». Mais ces techniques ne sont pas transparentes et elles s'appliquent mal au cas anisotrope. Avec M. FABRIZIO et A. GOGOLIN nous avons pu généraliser au cas canonique  $S = 1/2$ ,  $n = 2$  une approche perturbative développée par Anderson et Yuval dans le cas  $n = 1$ . L'idée est d'établir une correspondance terme à terme entre deux modèles : le problème Kondo avec son couplage d'échange  $J$  d'une part, un modèle d'état résonnant avec couplage local  $U$  d'autre part. Les deux modèles sont équivalents lorsque les déphasages  $\delta_J$  et  $\delta_U$  ont une relation bien définie. Si  $\delta_U = 0$  on obtient une « limite de Toulouse » soluble qui éclaire la physique de l'état fondamental (à l'époque cette démarche avait marqué une étape essentielle). La généralisation au cas  $n = 2$  est subtile, mais elle marche à la fois pour les cas isotrope et anisotrope. On obtient facilement toutes les quantités thermodynamiques (entropie, chaleur spécifique, susceptibilité magnétique), et l'on peut décrire la transition entre hautes et basses températures. Il y a en fait *deux* régions de transition, l'une à la température Kondo où l'impureté s'écrante, l'autre lorsqu'une faible anisotropie se développe pour reconstruire un liquide de Fermi. En particulier on comprend parfaitement l'entropie résiduelle  $(\text{Log}2)/2$  au voisinage du point fixe isotrope. Le comportement sous champ magnétique est un peu délicat car il faut veiller à combiner les facteurs de Landé de l'impureté et des électrons : on obtient ainsi l'évolution de la susceptibilité. On peut aussi calculer la « susceptibilité de saveur », directement mesurable dans les modèles d'impuretés quadrupolaires où le spin joue le rôle du canal. Cette analyse perturbative n'est pas en complet accord avec d'autres méthodes récemment publiées : étant simple et contrôlée elle paraît difficilement contestable.

### 4. Liquides de Fermi et de Bose

La transition métal-isolant de Mott dans une bande de Hubbard répulsive demi remplie correspond à la condensation de Bose de paires électron-trou tri-

plets en coin de zone (état antiferromagnétique « SDW »). Le problème est identique à la transition supraconductrice dans le cas attractif. Cette rupture de symétrie est-elle inévitable ? Peut-on avoir des bosons qui ne soient pas superfluides ? Peut-on avoir un isolant (avec un gap) sans ordre SDW ? Le contre exemple classique est la chaîne unidimensionnelle : en fait il ne prouve rien car la disparition de l'ordre à longue distance (supraconducteur ou SDW) est alors due à la nature continue de la symétrie brisée (la phase du paramètre d'ordre « tourne » lentement, sans affecter son module qui fixe le gap). Cette analyse est confirmée par la solution exacte du modèle de Hubbard sous aimantation finie, et aussi par une analyse directe des fluctuations de phase macroscopiques (par exemple pour une chaîne de bosons).

### 5. Magnétisme

Un antiferromagnétique sous champ  $B_z$  présente une transition « spin flop » lorsque  $z$  est un axe de facile aimantation (du fait de l'anisotropie). Les deux sous réseaux s'orientent d'abord perpendiculairement à  $z$ , puis se referment progressivement jusqu'à un champ critique où l'aimantation saute à la saturation. Le problème s'enrichit si une anisotropie d'échange vient s'opposer à celle du champ cristallin. Si l'anisotropie favorise le plan  $(xy)$  et l'échange l'axe  $z$  il existe une gamme de champs  $B_z$  pour laquelle un ferromagnétisme dans le plan  $(xy)$  apparaît spontanément. Cet effet inattendu semble observable.

P.N.

### PUBLICATIONS

- 1) P. NOZIÈRES. Bose Einstein condensation. Eds. A. GRIFFIN, D.W. SNOKE, S. STRINGARI. Cambridge University Press, p. 15 (1995).
- 2) P. NOZIÈRES. The Grinfeld instability of stressed crystals. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Spatio-Temporal Patterns in Nonequilibrium Complex Systems, Santa Fé, April 1993. Eds. P.E. CLADIS, P. PALFFY-MUHORAY. **Vol. XXI**, 65 (1994).
- 3) G. DEUTSCHER, P. NOZIÈRES. Cancellation of quasiparticle mass enhancement in the conductance of point contacts : *Physical Review* **B50**, 13557 (1994).
- 4) P. NOZIÈRES. The effect of recoil on edge singularities, *Journal de Physique I*, **4**, 1275 (1994).
- 5) C. DUPORT, P. NOZIÈRES, J. VILLAIN. New instability in molecular beam epitaxy : *Physical Review Letters*, **74**, 134 (1995).
- 6) J. VILLAIN, C. DUPORT, P. NOZIÈRES. Elastic instabilities in crystal growth, *Conférence de Sitges sur les phénomènes non linéaires* (1994).

7) S. BALIBAR, P. NOZIÈRES. Helium crystals as a probe in materials science, *Solid State Comm.*, **92**, 19 (1994).

8) E. ROLLEY, S. BALIBAR, C. GUTHMANN, P. NOZIÈRES. Adsorption of  $^3\text{He}$  on  $^4\text{He}$  crystal surfaces, *Physica*, **B210**, 397 (1995).

9) M. FABRIZIO, A.O. GOGOLIN, P. NOZIÈRES. Crossover from non Fermi liquid to Fermi liquid behaviour in the two channel Kondo model with channel anisotropy, *Physical Review Letters*, **74**, 4503 (1995).

10) M. FABRIZIO, A.O. GOGOLIN, P. NOZIÈRES. Anderson-Yuval approach to the multichannel Kondo problem, *Physical Review*, **B51**, 16088 (1995).

#### CONFÉRENCES DONNÉES PAR P. NOZIÈRES

Rome, Université « La Sapienza », 21 février 1995 : « *Some comments on edge singularities : recoil effects, Anderson-Yuval approach to the multichannel Kondo effect* ».

Paris, Symposium sur les effets radiatifs dans les semiconducteurs, 7 avril 1995 : « *Réflexions sur la transition de Mott* ».

Grenoble, 5 mai 1995 : « *Frottement solide et hystérésis* ».

Princeton, Three Pole Seminar, 10 mai 1995 : « *Dry friction : hysteresis at work* ».

Princeton, Donald Ross HAMILTON Lecture, 11 mai 1995 : « *Is many body physics a settled issue ?* ».

Trente, Università degli Studi, 31 mai 1995 : « *Standing issues in many body physics* ».

Trente, Università degli Studi, 1<sup>er</sup> juin 1995 : « *The physics of steps on crystal surfaces : roughening, growth and stability* ».