

Physique mésoscopique

M. Michel DEVORET, professeur

1. Enseignement au Collège

1.1. Leçon inaugurale (31 mai 2007)

Elle s'intitulait : « De l'atome aux machines quantique » et présentait le domaine de la physique mésoscopique.

Depuis la découverte de l'atome, nous divisons la nature en deux mondes. L'un tend vers l'infiniment grand : c'est le monde macroscopique des objets comportant un nombre très élevé d'atomes. L'autre tend vers l'infiniment petit : c'est le monde microscopique des particules, tels les électrons et les noyaux. Le mouvement des objets macroscopiques, directement accessible à nos instruments de mesure et de contrôle, est régi par les lois de la mécanique classique, qui à tout instant, autorisent à analyser et à corriger ce mouvement aussi finement que l'on veut. Les particules microscopiques, en revanche, obéissent aux lois de la mécanique quantique, qui associent toute prise d'information sur leur trajectoire à un minimum de perturbation incontrôlable de cette trajectoire. Se trouve ainsi posé le problème de l'observation et du contrôle des systèmes microscopiques.

Ce qui rend fascinante la mécanique quantique, c'est que le caractère chaotique et désordonné qui semble émerger de ce principe d'incertitude est plus que compensé par l'ordre créé par un autre principe quantique, le principe d'interférence. Selon ce dernier, un système confiné ne peut adopter que des états d'énergie discrets, au sens discontinu du terme, ce qui introduit en mécanique une digitalisation naturelle. En conséquence, quand un tel système est plongé dans un environnement bruyant, il peut, à la différence du système classique, rester ordonné, si l'énergie moyenne du bruit est notablement inférieure à l'écart entre ses niveaux discrets. Cette régularité se manifeste par exemple dans l'indiscernabilité des atomes, propriété essentielle, qui est à la base de la chimie et de la science des matériaux. Mieux encore, si on prend soin de l'interroger subtilement, le système quantique peut révéler lequel de ses états il occupe sans transiter, la

perturbation associée se trouvant rejetée dans une variable dépourvue d'influence sur les niveaux d'énergie.

Est-il dès lors possible de combiner les avantages des deux mondes ? Peut-on profiter de l'accessibilité et de la maniabilité des objets complexes du monde macroscopique, tout en bénéficiant de l'ordre subtil quantique qui règne dans le monde microscopique ? Grâce au progrès des techniques de miniaturisation, de refroidissement et de traitement des signaux rapides, il est devenu aujourd'hui possible de réaliser des systèmes participant des domaines à la fois macroscopique et microscopique. Ce sont les systèmes que l'on appelle « mésoscopiques » : ils fonctionnent quantiquement mais leur grand nombre d'atomes leur donne la complexité nécessaire pour former un kit de construction quantique, comparable à un jeu de Lego. Ils préfigurent ainsi ce que pourraient être de véritables machines quantiques, du type de l'ordinateur quantique. De telles machines pourraient par exemple faire reculer les limites du traitement de l'information, en faisant appel à un minimum d'énergie et de temps, et permettre la miniaturisation des transistors jusqu'au stade moléculaire. Peut-être même parviendraient-elles à utiliser certains phénomènes spécifiques de la mécanique quantique, comme l'intrication, pour réaliser des opérations inaccessibles aux machines classiques. Ou peut-être mettront-elles en évidence, au-delà d'un certain seuil de complexité, d'hypothétiques déviations des lois quantiques, lesquelles pour l'instant n'ont jamais été prises en défaut ?

1.2. Cours de l'année 2007 : « Électrons et photons »

Ce cours d'introduction à la Physique mésoscopique comprenait deux leçons données les 7 et 14 juin 2007. Son but était de discuter une sélection de concepts de base dans ce domaine et de comparer leur traitement avec les approches employées en Physique atomique.

La première leçon a commencé par un rappel de la différence entre les constantes universelles, telles le quantum d'action (constante de Planck) et le quantum de charge, et les constantes microscopiques, telles la masse de l'électron et du proton. On a aussi revu les différentes mesures de l'énergie : fréquence d'une transition entre deux niveaux quantiques, différence de potentiel électrochimique entre deux réservoirs d'électrons, température associée aux fluctuations thermiques. Nous avons pu ainsi comparer les échelles d'énergie intervenant dans les systèmes complètement macroscopiques ou microscopiques d'une part, et celles intervenant dans les systèmes mésoscopiques d'autre part. Nous avons évoqué en particulier la propriété importante qu'ont les systèmes mésoscopiques de présenter des effets quantiques même si l'énergie caractéristique des fluctuations thermiques est inférieure à la différence entre niveaux d'énergie des états à une particule, par opposition aux systèmes ordinairement traités en physique quantique. Nous avons ensuite exposé le problème du transport électrique entre deux réservoirs d'électrons séparés par une région où ceux-ci se propagent de

manière quantiquement cohérente. L'introduction de la formule de Landauer a permis de discuter l'hypothèse du caractère indépendant des électrons de transport.

Dans la seconde leçon, nous avons examiné comment le fluide électronique écrante la charge des électrons individuels et nous sommes arrivés à la notion de quasi-particules, excitations fermioniques de basse énergie du fluide électronique qui obéissent au principe d'exclusion de Pauli et qui transportent une charge transverse égale à celle de l'électron, tout en ayant une charge longitudinale fortement écrantée sur un rayon de l'ordre de la distance moyenne entre électrons. À la différence des électrons « nus », les quasi-électrons ont une durée de vie finie car ils peuvent se « désintégrer » en un électron de plus basse énergie accompagné d'une paire électron-trou, ou plus généralement, d'une excitation de caractère bosonique. Cela nous a conduit à discuter les modes plasmoniques d'un fil métallique et leur relation avec les photons ordinaires de la physique atomique. L'image qui émerge de l'examen des excitations élémentaires considérées en physique mésoscopique, que se soient les excitations fermioniques ou bosoniques, est celle de particules effectives habillées par leurs interactions avec de nombreux degrés de liberté. Mais si l'on perd la pureté des particules de la physique atomique, on dispose en revanche d'une flexibilité remarquable dans l'implémentation et le contrôle des interactions entre ces particules effectives. Ce qui introduit le sujet du prochain cours : il portera sur les circuits et les signaux quantiques et traitera des systèmes mésoscopiques bosoniques dans lesquels les interactions entre les photons effectifs sont induites par la non-linéarité de jonctions tunnel Josephson.

1.3. Colloque lié au cours : « *Mesoscopic Physics, Quantum Information and Superconductivity* »

Ce colloque, organisé dans le cadre du Collège, s'est déroulé le 1^{er} juin 2007 à Palaiseau et a réuni 45 participants. Son but était de faire le point sur les nouveaux développements dans le domaine de la supraconductivité mésoscopique. Le programme était le suivant :

Michel Devoret (Yale/CdF) : *Introductory remarks*.

Hermann Grabert (U. Freiburg) : « *Josephson junctions as quantum noise detectors* ».

John Clarke (UC Berkeley) : « *Model for $1/f$ Flux Noise in SQUIDs and Qubits* ».

Irfan Siddiqi (UC Berkeley) : « *Bifurcation amplification and the dynamical Casimir effect* ».

Hans Mooij (TU Delft) : « *Superconducting qubits controlled by flux* ».

John Martinis (UC Santa Barbara) : « *Superconducting qubits controlled by phase* ».

Vincent Bouchiat (CRTBT Grenoble) : « *Carbon Nanotube Based Josephson Junctions and SQUIDS* ».

Serge Haroche (ENS-Paris/CdF) : « *Progressive collapse of field states and QND counting of photons in a superconducting cavity* ».

Christian Glattli (ENS-Paris/CEA) : « *Quantum optics with electron waves* ».

Daniel Estève (CEA-Saclay) : « *Superconducting qubits controlled by charge* ».

2. Enseignement en dehors du Collège

Février 2007 : Série de quatre cours donnés au laboratoire de la compagnie NTT (Nippon Telegraph & Telephone Corp.), Atsugi, Japon. Ils portaient sur les qubits supraconducteurs et étaient intitulés : « *Quantum-mechanical Radio-electrical Circuits* », « *Bifurcation Read-Out of Superconducting Qubits* », « *Amplification of Quantum Noise : Observation of Dynamical Casimir Effect* », « *Quantum Voting and Generalization of Bell's Inequalities* ».

3. Activité de recherche

3.1. Signaux et circuits quantiques (avec Nicolas Bergeal, Flavius Schakert, Michael Metcalfe, Rajamani Vijay, Vladimir Manucharyan)

Le phénomène d'amplification des signaux électriques par un composant électronique actif est à la base d'un grand nombre d'applications dans tous les domaines de la physique. Les limites ultimes d'un amplificateur sont soumises à un principe dérivé de la relation d'incertitude de Heisenberg : un amplificateur préservant la phase ajoute au moins un bruit dont l'énergie correspond à un demi-photon à la fréquence du signal. En revanche, aucune limitation n'intervient pour un amplificateur qui ne mesure qu'une composante d'un signal ou que son énergie. Le but de notre recherche est de montrer que l'on peut effectivement atteindre en pratique le régime où le bruit d'un amplificateur « utile » n'est limité que par le bruit quantique, et de vérifier les prédictions théoriques concernant le bruit ajouté au signal. Nous travaillons dans le régime micro-onde avec des fréquences de signaux aux alentours de $f = 10\text{GHz}$ et des températures $T \ll hf/k \sim 500\text{mK}$. Nous utilisons des résonateurs micro-ondes supraconducteurs dans lesquels est placé un milieu non-linéaire purement dispersif basé sur des réseaux de jonctions tunnel Josephson pompés par irradiation micro-onde. La limite quantique devrait être atteinte du fait de l'absence de dissipation parasite dans ce type de système, tout en préservant une bande passante de l'ordre de 1GHz et un gain de l'ordre de 30dB . Cette année, nous avons réalisé et mesuré une première version de ce type d'amplificateur basé sur un modulateur en anneau Josephson. Le gain mesuré dépasse 40dB . La mesure du bruit est en cours et les résultats préliminaires indiquent qu'il s'approche au moins d'un facteur 2 de la limite quantique.

Nous appliquerons ensuite ce dispositif au comptage des paires de Cooper pour la fermeture du triangle de la métrologie quantique, projet qui fait actuellement dans notre groupe l'objet d'une étude de faisabilité.

3.2. Électronique moléculaire (avec Markus Brink, Michael Metcalfe, Rajamani Vijay, Vladimir Manucharyan)

Le nanotube de carbone métallique mono-paroi constitue le fil électrique mésoscopique par excellence : on peut le voir à la fois comme une macromolécule de structure atomique bien déterminée et comme un fil métallique dont le diamètre a pratiquement été rétréci à la limite ultime puisqu'il ne possède que deux canaux de conduction électronique (quatre si l'on compte la dégénérescence de spin). Dans ce sujet, la chimie rejoint l'électronique. Nous avons entrepris cette année la mesure de l'inductance de ce fil moléculaire par des techniques de transport micro-onde. Le but de ce travail est de vérifier que cette inductance est bien d'origine cinétique et qu'elle possède la valeur prédite par la théorie, basée sur les propriétés des orbitales p du carbone. Le premier résultat de ce travail est la mise au point d'une nouvelle technique de lithographie qui permette l'implémentation d'un résonateur micro-onde tout en étant compatible avec la croissance des nanotubes sur le substrat.

4. Publications

1. Boaknin E., Manucharian V., Fissette S., Metcalfe M., Frunzio L., Vijay R., Siddiqi I., Wallraff A., Schoelkopf R. and Devoret M.H., *Dispersive Bifurcation of a Microwave Superconducting Resonator Cavity incorporating a Josephson Junction*, [Cond-Mat/0702445], Submitted to Physical Review Letters.
2. Manucharian V., Boaknin E., Metcalfe M., Fissette S., Vijay R., Siddiqi I. and Devoret M.H., *RF Bifurcation of a Josephson Junction : Microwave Embedding Circuit Requirements*, [Cond-Mat/0612576] Phys. Rev. B **76**, 014524 (2007).
3. Schuster D.I., Houck A.A., Schreier J.A., Wallraff A., Gambetta J.M., Blais A., Frunzio L., Johnson B., Devoret M.H., Girvin S.M., Schoelkopf R.J., *Resolving Photon Number States in a Superconducting Circuit*, Nature (London) **445**, 515-518 (2007) [Cond-Mat/0608693].
4. Metcalfe M., Boaknin E., Manucharyan V., Vijay R., Siddiqi I., Rigetti C., Frunzio L., and Devoret M., *Measuring a Quantrium Qubit With The Cavity Bifurcation amplifier*, [Cond-Mat/0706.0765], Submitted to Physical Review.
5. Boulant N., Ithier G., Meeson P., Nguyen F., Vion D., Esteve D., Siddiqi I., Vijay R., Rigetti C., Pierre, F. and Devoret M., *Quantum Nondemolition Readout Using a Josephson Bifurcation amplifier*, Phys. Rev. B **76**, 014525 (2007).

6. Koch J., Yu T.M., Gambetta J., Houck A.A., Schuster D.I., Majer J., Blais A., Devoret M.H., Girvin S.M., Schoelkopf R.J., *Introducing the Transmon : a new superconducting qubit from optimizing the Cooper Pair Box* [Cond-Mat/0703002], to appear in Phys. Rev. A.

7. Devoret M., *De l'atome aux machines quantiques*, Leçon inaugurale, Édition Collège de France, Fayard, 2007 (en préparation).

5. Conférences

5.1. Exposés donnés sur invitation

Février 2007 : International Conference on Quantum Information, Nara, Japon.

Mars 2007 : Niels Bohr Colloquium, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Danemark.

Juin 2007 : Journées Supraconductivité, École Polytechnique, Palaiseau.

Juillet 2007 : Congrès de la Société Française de Physique, Grenoble.

5.2. Organisation de congrès et ateliers : Gordon Research Conference « Quantum Information Science ».

Cette conférence, co-organisée avec R. Schoelkopf, s'est déroulée du 15 au 20 avril 2007 au centre Il Ciocco, à Barga en Toscane et a réuni environ une centaine de participants. Les conférenciers invités étaient (par ordre de participation) : Isaac Chuang (MIT, USA), Nicolas Gisin (U. Geneva, Switzerland), Gaetan Messin (IOTA, Palaiseau), Hans Briegel (U. Innsbruck, Austria), Rainer Blatt (U. Innsbruck, Austria), Dietrich Leibfried (NIST, Boulder, USA), Christopher Monroe (U. Michigan, USA), Hans Mooij (TU Delft, The Netherlands), Yasunobu Nakamura (NEC Tsukuba, Japan), Leo Kouwenhoven (TU Delft, The Netherlands), Amir Yacoby (Harvard, USA), Go Yusa (NTT, Japan), Misha Lukin (Harvard, USA), Wolfgang Wernsdorfer (Neel Lab, Grenoble), Jack Harris (Yale, USA), Jean-Michel Raimond (ENS Paris), Konrad Lehnert (JILA/Colorado University, USA), Atac Imamoglu (ETH Zurich, Switzerland), Hideo Mabuchi (Caltech, USA), Eugene Polzik (Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark), Philippe Grangier (IOTA, Palaiseau), Peter Zoller (U. Innsbruck, Austria), Immanuel Bloch (U. Mainz, Germany), David DeMille (Yale, USA), Dieter Meschede (U. Bonn, Germany), Jakob Reichel (ENS Paris), Joerg Schmiedmayer (U. Heidelberg, Germany), Michael Trupke (Imperial College, England).

6. Participation à des groupes de travail

Printemps 2007 : groupe de travail du Commissariat à l'Énergie Atomique : « Matérialisation de l'information », organisé par J.-Ph. Bourgouin.