



*Séance solennelle de l'Académie des sciences / 11 octobre 2011
Discours des nouveaux Membres sous la coupole de l'Institut de France*

Physique mésoscopique : intrusion de la mécanique quantique dans les circuits électroniques

Hélène Bouchiat

Les propriétés d'un circuit électrique au niveau le plus élémentaire comme la loi d'Ohm, font parti de notre réalité quotidienne. Toutefois lorsqu'on s'intéresse au transport électronique à des échelles de plus en plus petites les lois physiques qui décrivent les circuits électriques macroscopiques usuels cessent d'être valable.

Cela se produit dès que l'on considère des systèmes d'une taille telle que se manifeste le caractère quantique ondulatoire des électrons. Ces électrons ne peuvent alors plus être décrits par des particules classiques mais par des fonctions d'onde cohérentes sur l'ensemble du circuit électronique considéré. L'existence d'interférences entre ces ondes électroniques obéissant à la mécanique quantique modifie profondément les lois de l'électricité telles qu'on les connaît dans les systèmes classiques.

On est donc amené à introduire une longueur dite longueur de cohérence de phase qui est la longueur caractéristique du transport mésoscopique. On sait depuis longtemps que la conductivité d'un métal est limitée par les chocs que subissent les électrons sur les imperfections du matériau considéré. Il existe plusieurs types de collisions qui affectent de façon très différentes les ondes électroniques. Les collisions dites élastiques sont reliées à la présence d'impuretés statiques dans le matériau considéré. Elles modifient les ondes électroniques qui ne sont plus des ondes planes comme cela serait le cas dans le vide mais ne nuisent pas à leur cohérence. Par contre les collisions inélastiques qui font intervenir un échange d'énergie irréversible entre un électron du circuit et son environnement limitent la cohérence de phase. Autrement dit, les collisions élastiques jouent le même rôle que les rochers qui modifient la figure d'interférences des ondes à la surface d'un lac alors que les collisions inélastiques détruisent ces interférences au même titre qu'un coup de vent. Ces collisions inélastiques qui limitent la cohérence de phase électronique deviennent de plus en plus rares à basse température. La longueur de cohérence de phase, peut ainsi en dessous de 1 degré Kelvin (température mesurée à partir du zéro absolu) atteindre quelques microns et être bien supérieure au libre parcours moyen élastique, longueur parcourue entre deux collisions élastiques. On possède un outil pour moduler la phase de ces interférences électroniques de articles chargées dont il n'existe pas vraiment d'équivalent pour les particules neutres, (photons, atomes), il s'agit du champ magnétique dont le potentiel vecteur se couple directement à la phase des électrons. En particulier les interférences quantiques dans un circuit annulaire donnent lieu à des oscillations périodiques de la résistance mesurée en fonction du champ magnétique qui sont une signature directe de la présence d'interférences quantiques dans ce circuit (effet Aharonov Bohm).

A partir du moment où dans les années 80 il est devenu possible de fabriquer des circuits de taille inférieure au micron et de les mesurer à très basse température en dessous de 1 degré Kelvin, les physiciens se sont posés la question de la définition de la conductance ou de la résistance d'un circuit mésoscopique quantiquement cohérent. Il n'est en effet plus possible d'affirmer que les tensions aux bornes de deux circuits mis en série s'ajoutent, ni additionner les courants de circuits en parallèle. Les notions de résistance et de conductance doivent être repensées mais aussi celles d'inductance de capacité etc...C'est toute l'électronique qu'il faut reconstruire en prenant en compte les lois de la mécanique quantique.

Un élément fondamental à prendre en compte pour déterminer la réponse de ces circuits quantiquement cohérents à une excitation électromagnétique est le couplage avec les générateurs de courant ou de tension et les appareils de mesure qui sont des sources de décohérence. Ainsi le même circuit suivant la manière dont il est connecté peut se comporter, de façon extrêmement différente. Lorsque la transmission des contacts est importante, on peut le considérer comme un guide d'onde électronique caractérisé par ces différents modes de transmission. Au contraire lorsque la transmission des électrodes de mesure est très faible et s'effectue par effet tunnel à travers une barrière de potentiel (couche d'oxyde ou autre), les porteurs sont fortement confinés dans le système électronique considéré. On mesure alors une conductance non nulle uniquement si l'énergie des électrons injectés par les appareils de mesure coïncide avec celle des niveaux d'énergie discrets du système électronique étudié qui se comporte alors comme un atome artificiel appelé boîte quantique. Une mesure de conductance permet ainsi de réaliser la spectroscopie des niveaux d'énergie de la boîte.

Il est aussi possible de découpler encore plus fortement le circuit quantique de son appareil de mesure en réalisant un couplage purement capacitif ou inductif sans aucun échange d'électrons entre le système étudié et l'appareil de mesure. On observe là encore un comportement très différent. Le même système qui présente une résistance finie en fort couplage avec son appareil de mesure peut présenter dans ces conditions un courant à l'équilibre en l'absence de toute tension. Seul un champ magnétique statique est nécessaire. Un courant permanent dans un circuit sans tension qui ne dissipe pas d'énergie, cela évoque la supraconductivité mais là il s'agit d'électrons parfaitement normaux, subissant des collisions sur des impuretés, sans condensât supraconducteur. Une analogie peut être faite avec le magnétisme orbital des molécules aromatiques qui génèrent elles aussi des boucles de courant à l'équilibre thermodynamique à l'échelle du nanomètre. Les courants permanents mésoscopiques existent quant à eux dans des anneaux atteignant quelque microns de circonférence, la longueur de cohérence de phase. L'aventure des courants permanents a démarré en 1987 pendant mon post-doc où j'ai eu la chance de pouvoir, d'une part travailler avec Laurent Lévy sur une expérience qui a abouti à la première détection de ces courants dans un réseau comprenant un très grand nombre d'anneaux et d'autre part sur la théorie avec Gille Montambaux, ce qui a permis de donner des ordres de grandeur sur les résultats attendus. Depuis ces courants permanents ont aussi pu être détectés dans des anneaux individuels aussi bien que dans des réseaux d'anneaux et continuent cependant à poser des questions fondamentales concernant leur signe qui n'est toujours pas bien compris...

Toujours dans le cadre de ces expériences de transport électronique sans contacts peut aussi se demander quelle est la réponse d'un circuit quantique à un champ magnétique dépendant du temps donc induisant une force électromotrice. Peut on définir l'équivalent d'une conductance dans ce type d'expérience ? A t'elle quelque chose à voir avec celle du système connecté ? Autant de questions fondamentales auxquelles nous nous sommes efforcés de répondre en développant une instrumentation adaptée à base de micro-résonateurs supraconducteurs car il s'agit de mesurer par induction magnétique ou électrique des signaux extrêmement petits.

Une autre manière d'aborder le transport mésoscopique est de coupler les systèmes étudiés à des

électrodes supraconductrices . Comme l'avait montré De Gennes et ses collaborateurs dès les années 60 la supraconductivité de proximité ainsi induite dans un métal normal en contact avec des électrodes supraconductrices est riche en information sur la cohérence du transport dans le métal normal, cette physique a connu un renouveau récemment grâce aux outils à la fois conceptuels et expérimentaux de la physique mésoscopique. En particulier nous explorons maintenant la réponse à une force électromotrice d'anneaux hybrides comportant à la fois une partie normale et une partie supraconductrice couplés à une cavité supraconductrice.

Enfin, outre les micro et nanostructures artificielles à base de métaux ou de semiconducteurs il est devenu aussi possible d'explorer le transport mésoscopique dans des molécules conductrices à base de nanotubes de carbone ou de graphène. La physique du transport dans ces systèmes de faibles dimensionnalité devient alors beaucoup plus complexe et fortement reliée à leur structure atomique. Dans le graphène, couche monoatomique de graphite, les porteurs de charge se déplacent comme s'ils avaient une masse nulle. Dans les nanotubes de carbone constitués d'une feuille de graphène enroulée sur elle même le transport est unidimensionnel et de ce fait très sensible aux corrélations électroniques. On a eu la surprise d'observer outre une supraconductivité de proximité avec des électrodes supraconductrices aussi une supraconductivité intrinsèque, dans certaines situations expérimentales.

Dans ces molécules qui peuvent être suspendues entre leurs électrodes de mesure le transport porte aussi la signature parfois spectaculaire de leurs modes de vibration mécanique.

En conclusion, j'espère vous avoir fait sentir dans quelle mesure le transport mésoscopique donne lieu à des problèmes physiques très riches aussi bien d'un point de vue conceptuel qu'expérimental voire technologique à l'heure où on essaie de diminuer à tout prix les problèmes de dissipation d'énergie dans les circuits électroniques. Ce domaine ne manque pas de paradoxes et de surprises qui le rendent passionnant.

Je voudrais insister maintenant sur le fait que tout ce dont je vous ai parlé ici est le fruit d'un travail collectif qui n'a pu aboutir que grâce à la mise en commun de compétences ainsi que de modes de pensée différents et complémentaires. En particulier je dois énormément outre à Bertrand Reulet mon premier étudiant avec qui nous avons obtenu les premiers résultats sur les anneaux en cavité radiofréquence à Orsay. Alik Kasumov nous a apporté son savoir faire concernant les nanotubes puis des plus jeunes sont arrivés Sophie Guéron, Richard Deblock, Meydi Ferrier qui sont les piliers de l'équipe actuelle. Nous avons eu la chance grâce au M2 de physique des solides d'avoir un grand nombre d'étudiants excellents en particulier Alexei Chepelianskii dont nous avons le plaisir de voir aujourd'hui les travaux reconnus par le prix Armand.

Même si je n'ai pas parlé de mes travaux antérieurs je veux remercier particulièrement Philippe Monod, mon directeur de thèse qui m'a donné le goût de la physique expérimentale avec humour et indulgence pour mes maladresses ainsi que tous les chercheurs du LPS avec qui j'ai travaillé à l'époque dont Jean Pierre Jamet.

Enfin je dois beaucoup à mon époux Vincent spécialiste d'un autre domaine mais dont les compétences sont universelles, à mes 3 enfants pour leur affection et leur gaieté qui ont été depuis leur naissance ma première source d'énergie. Mais le goût de la recherche je le dois à mes parents qui m'ont communiqué avant même que je puisse comprendre vraiment ce dont il s'agissait l'enthousiasme, l'esprit critique et la curiosité intellectuelle qui font avancer la science.