

10 Rapport relatif au problème de physique

Le sujet proposé en 2004 aborde certains aspects d'une branche de la physique des solides, appelée physique mésoscopique, qui s'est considérablement développée depuis le début des années 1980. Elle s'intéresse aux phénomènes essentiellement quantiques qui se produisent dans les métaux ou les semiconducteurs à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique. Les énormes progrès réalisés dans l'élaboration des matériaux ainsi que dans les technologies de fabrication de dispositifs électroniques de taille nanométrique ont permis l'observation expérimentale de nombreux effets quantiques originaux à l'échelle mésoscopique. Parmi ces effets, on peut citer la quantification de la conductance, les phénomènes de localisation ou l'électronique à un électron qui sont abordés dans ce problème mais également l'effet Hall quantique entier ou fractionnaire qui a donné lieu à l'attribution de deux prix Nobel dans les vingt dernières années.

Le problème aborde deux aspects essentiels de la physique mésoscopique :

- le premier est lié à la nature ondulatoire des électrons. Lorsque la taille du système étudié devient plus petite que la longueur de cohérence de phase électronique, on observe des effets de quantification de la conductance, étudiés partie B et des effets d'interférences qui conduisent aux phénomènes de localisation étudiés partie C.
- le second, lié à la quantification de la charge électronique et au phénomène de blocage de Coulomb, est appelé électronique à un électron et est étudié partie D.

Remarques générales

Même si le jury a eu le plaisir de corriger quelques excellentes copies où l'ensemble du problème est abordé avec une compréhension manifeste de la physique des systèmes considérés, le niveau général n'est pas satisfaisant. On trouve en particulier un nombre important de copies au contenu indigent compte tenu de la durée de l'épreuve.

Une analyse un peu rapide peut conduire à attribuer ce résultat décevant au fait que la mécanique quantique est présente pour la première fois dans la quasi-totalité du problème. Il s'agit toutefois uniquement de l'aspect ondulatoire ; les problèmes plus délicats, par exemple liés à la mesure, ne sont pas concernés. La partie C présente en particulier une analogie très forte avec l'optique ondulatoire, mentionnée dans le texte, qui aurait dû permettre aux candidats de se raccrocher à une physique plus familière. Enfin, la partie D, indépendante des autres, concerne l'électrostatique et la thermodynamique classique ; elle ne fait pas intervenir la mécanique quantique, mais elle n'est pas mieux traitée que le reste du problème lorsqu'elle a atteint.

Il semble que les résultats un peu décevants enregistrés à cette épreuve témoignent plutôt d'une certaine incapacité des candidats à réagir devant un problème inconnu ou à savoir reproduire dans un domaine les raisonnements ou les méthodes que l'on a l'habitude d'utiliser dans un autre. Ce sont pourtant les aptitudes correspondantes que doit notamment tester le problème. Celui-ci présente une assez grande variété de raisonnements sans difficultés techniques majeures, les calculs étant courts et relativement simples dans l'ensemble.

Afin de faciliter la progression dans le problème, beaucoup de résultats intermédiaires sont donnés dans l'énoncé. Les correcteurs prêtent alors une attention toute particulière à la façon dont ces résultats sont établis. Or, de nombreuses tricheries volontaires et systématiques sont constatées ; cela ne peut que nuire à l'impression générale laissée par une copie.

Remarques à propos des différentes parties du problème

▪ **La partie A** présente une description semi-classique standard du transport électronique dans les gaz bidimensionnels d'électrons. Les effets d'interférences quantiques ne sont pas pris en compte et l'influence des processus de diffusion sur les propriétés de transport est décrite par l'équation de Boltzmann dans l'approximation du temps de relaxation.

Cette partie, souvent traitée de manière satisfaisante, fait quand même apparaître un certain nombre de lacunes graves. En particulier, la dualité onde-corpuscule semble très mal connue. Ainsi, pour déterminer la longueur d'onde de Fermi des électrons, une majorité de candidats utilise la relation de dispersion du photon. L'ensemble des applications numériques fait par ailleurs apparaître un manque total de maîtrise des ordres de grandeur attendus : on trouve par exemple des longueurs d'onde électronique de l'ordre de 10^{24} m, des temps de relaxation de l'ordre de 10^{30} s, des énergies de Fermi de l'ordre du MeV, sans parler des vitesses de Fermi parfois nettement supérieures à la vitesse de la lumière ...

Signalons par ailleurs que de nombreux candidats ne réalisent pas que pour un système bidimensionnel, résistance et résistivité ont la même dimension. Cela conduit à de nombreuses erreurs.

▪ **La partie B** établit la quantification de la conductance d'un conducteur quantique en régime balistique (absence de diffusion). Il s'agit de dénombrer correctement la contribution au courant des électrons injectés par les réservoirs. Peu de candidats peuvent mener à bien cette entreprise. Par ailleurs, de nombreuses réponses totalement inexactes sont obtenues à la question sur l'analogie des réservoirs pour les photons : laser (souvent), photodiode à semi-conducteur et même « accélérateur de particules (boson de Higgs) » ... Que penser des réponses fournies par un tel candidat aux questions de ses futurs élèves ?

▪ **La partie C** propose une étude des effets du désordre dans un conducteur quantique. On s'intéresse dans un premier temps (parties I et II) à l'influence d'une impureté, modélisée par une barrière de transmission T , sur la conductance d'un conducteur quantique cohérent. Il s'agit ici de reproduire les raisonnements de la partie précédente dans un cas un peu plus complexe. La notion de transmission pour une barrière de potentiel est en général bien connue même si, pour beaucoup de candidats, la relation $|r|^2 + |t|^2 = 1$ traduit la conservation de l'énergie !

On s'intéresse ensuite à un conducteur quantique incohérent en présence de désordre (partie C). On commence par étudier le cas de 2 impuretés séparées d'une distance plus grande que la longueur de cohérence de phase des ondes électroniques. Il s'agit là d'un problème analogue à celui d'un interféromètre de Fabry-Pérot pour lequel la longueur de la cavité serait plus grande que la longueur de cohérence temporelle de la lumière. Les candidats qui ont remarqué cette analogie profonde ont souvent bien traité cette partie. On généralise ensuite au cas d'un conducteur macroscopique contenant un grand nombre d'impuretés et on montre que l'approche utilisée permet de retrouver la loi d'Ohm. Peu de candidats ont su attribuer un sens physique correct à la longueur L_0 définie dans cette partie. La relation $L_0 v(1-T) \approx 1$ montre qu'il s'agit de la distance au bout de laquelle un électron a une probabilité 1 d'avoir été réfléchi. On peut donc identifier L_0 au libre parcours moyen de l'électron.

La partie D reprend les raisonnements de la partie précédente dans le cas d'un conducteur cohérent. Là encore, l'analogie avec l'optique est profonde. Cette partie met en évidence les effets de localisation forte et de localisation faible.

▪ **La partie D**, totalement indépendante des autres, concerne l'électronique à un électron. Elle aborde dans un premier temps (sous-partie I) les effets associés à la quantification de la charge électronique, en particulier le blocage de Coulomb. Cette partie, ne faisant pas intervenir de mécanique quantique, donne

des résultats très décevants. Les calculs élémentaires reliant les charges des capacités aux tensions appliquées sont en général mal faits. Aucun candidat ne parvient à démontrer la forme du potentiel thermodynamique à minimiser pour trouver l'équilibre du système. Il s'agit pourtant là d'une application directe des 2 premiers principes de la thermodynamique dans un cas certes différent du gaz parfait, mais relativement simple.

La sous-partie II envisage l'application des effets de blocage de Coulomb à la réalisation d'un électromètre extrêmement sensible appelé transistor à un électron. Elle n'est abordée que par un tout petit nombre de candidats qui ont montré là une compréhension assez fine des phénomènes physiques mis en jeu. La fin de cette partie étudiant les performances expérimentales d'un tel dispositif ne l'est jamais.

Conclusion

La mécanique quantique a auprès des étudiants une réputation bien établie : elle est surprenante, difficile, les calculs sont lourds et l'interprétation en est délicate. Il est permis de penser que certains candidats sont en quelque sorte partis « battus ». Pourtant, l'essentiel du sujet est accessible, toutes les parties étant d'un abord aisé, les difficultés arrivant progressivement.

Pour conclure, le jury rappelle que la mécanique quantique est une partie importante de la physique. Beaucoup d'étudiants l'ont longtemps cantonnée à la physique de l'atome ou à l'interprétation de la liaison chimique. En réalité son importance conceptuelle et pratique est maintenant telle qu'un scientifique, quelle que soit sa discipline, ne devrait plus en ignorer les aspects élémentaires. Et il est souhaitable qu'un lauréat de l'agrégation de physique ait une connaissance plus poussée du sujet même s'il n'est pas directement amené à l'enseigner.