10. Rapport relatif au problème de physique 2008

Le problème de physique porte cette année sur le magnétisme (para ou ferro) des nanocristaux, et la mesure de ce magnétisme par des microsondes à effet Hall. Ces dernières années, les outils technologiques ont en effet permis la fabrication et le contrôle de nanocristaux aimantés à l'échelle nanométrique, ce qui a permis la mesure du magnétisme de ces nano-objets.

Ce sujet aborde naturellement dans sa première partie le problème de la mesure à bas bruit du magnétisme par une sonde de Hall.

Dans la seconde, il propose d'interpréter deux résultats expérimentaux récemment établis (voir références en notes dans l'énoncé) :

- dans la question 5, la mesure de la susceptibilité magnétique d'un composé paramagnétique par résonance paramagnétique électronique ;
- dans la question 6, la mesure de l'anisotropie magnétique dans les nanocristaux ferromagnétiques de Fe_8 .

Ce problème - à large spectre - permet aux candidats de mettre à profit leurs compétences dans les domaines suivants : électromagnétisme (y compris magnétisme), électronique, physique quantique et physique statistique. Il est construit sur une base de 6 questions indépendantes, ce qui permet aux candidats d'exprimer pleinement leurs capacités dans les domaines de leur choix.

Les correcteurs ont eu la satisfaction de voir se dégager un nombre conséquent de très bons candidats (70 copies sont créditées d'une note supérieure à 15/20), et finalement de classer efficacement les candidats admissibles.

Remarques d'ordre général

Comme à l'accoutumée, il est prévu que des applications numériques rapportent un certain nombre de points, pourvu que l'unité soit précisée et le nombre de chiffres significatifs raisonnable. Beaucoup de candidats ont négligé ces questions, peut-être pour gagner du temps, mais sacrifiant ainsi des points faciles à obtenir.

C'est pourquoi le jury rappelle l'importance des applications numériques. Non seulement elles rapportent des points, mais elles permettent aussi, après analyse de l'ordre de grandeur du résultat obtenu, de juger de la validité d'une formule théorique. De ce fait, elles sont complémentaires de l'analyse dimensionnelle. Correctement mise en œuvre, celle-ci aurait d'ailleurs permis à un grand nombre de candidats de ne pas écrire des résultats qui n'ont aucun sens. Les fautes d'homogénéité sont en effet sévèrement sanctionnées.

Il s'avère qu'il n'est pas très rentable pour un candidat de se disperser en essayant de grappiller des points par ci par là en commençant une multitude de questions sans aller jusqu'au bout. Il est bien plus payant de traiter les questions dans leur ensemble, chacune d'entre elles pouvant rapporter un nombre de points conséquent. Cela nécessite bien sûr concentration et rigueur. Ces candidats obtiennent ainsi un juste « retour sur investissement » parce qu'ils perçoivent mieux l'intérêt des phénomènes étudiés et le sens du sujet qui les guide efficacement. Dans les meilleures copies, plusieurs questions sont entièrement traitées.

Des phénomènes relevant de la physique quantique figurent dans les questions II et VI. Celles-ci sont bien réussies dans un grand nombre de copies, ce qui prouve que des efforts ont été consentis par les candidats

pour s'approprier au moins les rudiments de cette partie essentielle de la physique. Aujourd'hui, la physique quantique est quotidiennement mise en œuvre dans les laboratoires de recherche. Elle est appelée à jouer un rôle grandissant dans le matériel « grand public », du fait du développement des nanotechnologies.

Remarques portant plus spécifiquement sur la première partie

I. La première question fait appel à des connaissances de base en électromagnétisme et ne demande que des calculs élémentaires. Elle est réussie par une large majorité des candidats. Il n'en reste pas moins que le nombre de copies dans lesquelles le calcul du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique n'est pas maîtrisé est inquiétant. Et il apparaît que, sauf exception, les candidats n'ayant pas réussi la première question, n'ont pas fait mieux ensuite.

II. Les résultats sur la deuxième question (qui a été également abordée par la quasi totalité des candidats) sont moins homogènes. L'étude porte sur la sonde de Hall, sa structure et ses propriétés conductrices. Les aspects quantiques sont limités aux notions de bande d'énergie et de densité d'états, concepts très généraux que l'on ne peut pas ignorer.

À la satisfaction des correcteurs, et peut-être grâce à un énoncé très progressif et détaillé, ces concepts paraissent relativement maîtrisés dans un grand nombre de copies.

En revanche, le jury est surpris par le nombre de candidats incapables de mener à bien le calcul de la matrice de conductivité qui est relativement élémentaire.

III. La troisième question traite du bruit de mesure, facteur limitant la résolution. Le candidat doit mener à bien des calculs plus importants que dans le reste du sujet. Cette question est peu souvent abordée et, lorsqu'elle l'est, c'est de manière superficielle, comme si les candidats s'auto-censurent sur un sujet qu'ils connaissent mal.

En réalité, seules deux ou trois sous-questions demandent un développement important. Et finalement, l'ensemble de cette question exige surtout un peu de concentration et est abordable sans connaissance particulière. D'ailleurs, une très large majorité des candidats qui s'y sont attaqués a été généreusement récompensée.

IV. Cette question IV aborde le magnétisme et son origine quantique. Le début permet de discriminer les candidats sur leurs connaissances de base dans ce domaine. Le magnétisme de la matière peut se comprendre en effet à partir du magnétisme des atomes et de leur moment cinétique total. Les candidats parvenus à la fin de cette question sont largement récompensés grâce aux nombreuses applications numériques qui rapportent des points.

Remarques portant sur la deuxième partie

V. L'expérience décrite à la question 5 est assez bien traitée par un bon nombre de candidats, exception faite de la « détection synchrone ». Trop souvent, pour un moment magnétique placé dans un champ magnétique, les expressions de l'énergie et celle du moment du couple exercé sur lui sont ignorées. Le phénomène de résonance paramagnétique électronique est complexe mais peut être facilement mis en équation. Mais, même dans le cas où il ne l'est pas, le résultat donné dans l'énoncé permet d'aller plus loin dans cette question. Finalement, quelques très bonnes copies abordent avantageusement le traitement du bruit de mesure.

VI. La question VI envisage le problème du magnétisme quand les barrières d'énergie ne peuvent plus être franchies grâce à l'agitation thermique. Dans ce cas, le nombre quantique du macro-spin ne peut évoluer que lors du croisement de niveaux quantiques. Le début fait appel à quelques notions élémentaires de mécanique quantique, comme les valeurs et vecteurs propres d'opérateurs, ainsi que la levée de dégénérescence au croisement de deux niveaux. Les correcteurs sont satisfaits du nombre de candidats qui abordent cette question et se félicitent du fait qu'ils s'en sortent en général très bien.

Cette question, la plus originale du problème, permet finalement de donner une valeur numérique aux paramètres d'anisotropie du magnétisme contenus dans l'opérateur hamiltonien. La deuxième moitié est rarement abordée.