

Physique-chimie 1

Présentation du sujet

Une particule peut être enfermée dans un volume restreint dans des situations naturelles ou des expériences de laboratoire. Suivant la taille de cette boîte de confinement, le traitement adapté peut relever d'une approche classique ou quantique. Les aurores boréales et australes sont directement liées au confinement des particules chargées par le champ magnétique terrestre qui est l'objet d'une première partie du sujet. Le mouvement électronique est d'abord analysé dans un champ magnétique uniforme afin de fixer les ordres de grandeur. Une modélisation d'un champ non uniforme permet ensuite de comprendre le piégeage magnétique. Une seconde partie traite l'aspect quantique du confinement à travers l'exemple d'un puits de potentiel harmonique à une dimension spatiale pour mettre en place les éléments fondamentaux d'un traitement quantique. Pour un puits tridimensionnel, la prise en compte de l'interaction magnétique va lever la dégénérescence des niveaux énergétiques. La spectroscopie d'absorption est un outil de choix dans l'étude expérimentale de confinements dans ces boîtes nanométriques. Dans une dernière partie, une étude statistique basée sur la relation de Maxwell-Boltzmann analyse l'influence de la température sur la transition quantique-classique pour un oscillateur harmonique.

Analyse globale des résultats

Le sujet est dense et alterne des questions qualitatives, des analyses proches du cours et des questions plus délicates à résoudre. Le pourcentage de réussite (moyenne des candidats ramenée au total de la partie) atteint 33% pour l'étude du mouvement dans un champ magnétique uniforme. Ce résultat est globalement décevant à la fois pour la mise en forme de certains calculs élémentaires mais aussi pour les questions qualitatives qui débutent cette partie. Ce pourcentage tombe à 14% dans le cas d'un champ non uniforme, qui comporte plusieurs questions ouvertes. Dans les meilleures copies, une nette tendance à oser aborder des questions ouvertes se précise. La mécanique quantique, qui constitue une grosse seconde partie, ne fait pas mieux avec également 14% de réussite. Elle apparaît donc clairement comme la grande perdante de cette épreuve. Par contre la partie statistique basée sur des questions proches du cours a souvent été bien — voire très bien — traitée avec un pourcentage de réussite de 29%.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Les questions ouvertes

Le problème comporte trois questions non guidées clairement identifiées dans l'énoncé. Le jury attend une explicitation claire de la démarche de résolution retenue. Les paramètres physiques pertinents doivent être précisés ainsi que leur valeur numérique, qui est parfois laissée à l'initiative du candidat. Toute démarche est acceptée à condition d'être bien structurée et de rester physiquement cohérente. Les trois questions « ouvertes » sont de difficultés très variables.

I.C.6) Confinement magnétique terrestre Cette question a assez souvent été abordée pour le point a). Ceci n'est pas très surprenant dans la mesure où les questions préliminaires mettent clairement le candidat sur les rails d'une stratégie de résolution. La sous-question b) a été rarement traitée ; une estimation grossière sans calculs était pourtant possible.

II.A.2e) Propriétés optiques de la boîte Dans cette question, on attendait une synthèse des questions précédentes assortie d'une critique sur la validité du modèle retenu. Très peu de candidats ont dépassé le stade du constat d'un domaine de linéarité sans le mettre en perspective des questions préliminaires.

II.A.3) Anisotropie de la boîte quantique Cette question de très haut niveau de difficulté n'a été traitée par aucun candidat de manière un tant soit peu satisfaisante.

I.A – Aurores polaires terrestres

Cette série de questions qualitatives exploitent un texte placé en début de problème « La magnétosphère de la Terre ». Il ne s'agit pas de paraphraser l'auteur, mais de s'appuyer sur les éléments donnés pour s'approprier la situation physique que le problème se propose d'étudier. Le résultat est quasi désastreux : les explications physiques sont trop souvent farfelues sans aucune consistance physique. Le vent solaire est très mal compris. La relation de cause à effet n'apparaît qu'exceptionnellement. Précisons qu'une comparaison de carte de champ ne peut se borner à une vague affirmation du type « ça ressemble ». Il fallait expliciter les analogies et les différences. De telles questions sont pertinentes pour évaluer la compréhension physique des candidats en préambule au développement d'un calcul.

I.B – Mouvement d'un électron dans un champ magnétique stationnaire et uniforme

Cette première partie très progressive devait a priori donner de bons résultats. Le résultat est relativement mitigé. La comparaison quantitative relative des interactions électroniques et gravitationnelles doit reposer sur des grandeurs de même nature : on ne peut comparer une force à un champ. Même si le raisonnement attendu est un raisonnement sur les ordres de grandeur, une grandeur physique possède toujours une unité ! Le cas pourtant élémentaire d'une vitesse initiale colinéaire au champ magnétique n'a pas toujours été correctement traité. Contrairement à ce qu'une lecture hâtive de l'énoncé pouvait laisser penser, la résolution des équations du mouvement en coordonnées cartésiennes n'était pas strictement imposée. La maîtrise de ce calcul a été valorisée tout comme l'établissement de l'expression du rayon en coordonnées polaires. L'équation cartésienne de la trajectoire pouvait s'en déduire. Il faut néanmoins constater qu'en pratique c'est le calcul en cartésiennes qui a été le mieux mené.

La perte d'énergie de la particule chargée par rayonnement est un excellent exemple de malversations mathématiques et physiques. Très souvent le signe est omis dans l'écriture du théorème de la puissance cinétique, mais il réapparaît opportunément dans l'équation différentielle. Plus ou moins consciemment, les étudiants ont confondu le carré de la norme de l'accélération avec le carré de la vitesse radiale. Une telle attitude a bien entendu été lourdement sanctionnée et peut jeter le discrédit sur le reste de la copie.

I.C – Mouvement d'un électron dans un champ magnétique stationnaire et non uniforme

La mise en évidence d'une composante radiale du champ magnétique pour une symétrie de révolution est un second exemple de cette démarche mathématique peu rigoureuse, mais opportuniste, pour démontrer à tout prix une relation donnée. Le rapport gyromagnétique associé à un mouvement électronique quasi circulaire autour d'un tube de champ magnétique a été bien traité lorsqu'il a été abordé. La suite de questions de cette partie débouchait sur deux questions ouvertes : les bons candidats ont tenté souvent avec succès de se lancer dans une explication semi quantitative de la première. Une telle attitude doit être largement encouragée.

II.A – Confinement d'électrons dans une boîte quantique

Afin d'illustrer le confinement dans un cadre classique, l'énoncé demandait deux exemples dans deux domaines différents. Un oscillateur mécanique harmonique ou non a souvent été présenté, mais l'exploitation est restée trop souvent incomplète. Peu d'étudiants ont profité de l'analogie électrique induite par une dynamique oscillatoire.

Le jury a vu une très grande variété de l'équation de Schrödinger pourtant exigible dans le cadre des nouveaux programmes dans la filière MP. Si on peut à la rigueur manifester une indulgence relative pour des erreurs de signe, l'omission du caractère complexe de cette équation fondamentale de la physique ne pouvait que déboucher sur une lourde sanction. Prendre une équation à coefficients réels montre à l'évidence que l'étudiant n'a rien compris aux phénomènes quantiques. Le sens physique de la fonction d'onde demande d'utiliser des termes précis. Elle ne représente pas directement la densité de probabilité de présence du quanton.

Concernant le caractère stationnaire d'un état quantique, il ne suffisait pas de définir un tel état par une expression à variables séparées donnée par l'énoncé, mais il fallait clairement préciser que la densité de probabilité était indépendante du temps dans ce cas. Pour déterminer les paramètres statistiques, qui découlent de la fonction d'onde de l'oscillateur harmonique quantique, il était judicieux d'utiliser le formulaire donné en fin d'énoncé.

La relation d'indétermination spatiale d'Heisenberg permet d'évaluer l'énergie de l'état fondamental en minimisant l'énergie par rapport à l'extension caractéristique Δx . Malheureusement tous les candidats ou presque « oublient » le terme d'énergie potentielle dans l'expression de l'énergie. L'équation de Schrödinger à deux dimensions spatiales n'a pas posé de problème pour ceux qui la connaissait pour une variable de position.

Très peu d'étudiants ont pu citer des exemples concrets de boîtes quantiques nanoscopiques (d'après la figure 4) pourtant essentielles dans les nanotechnologies. La spectroscopie d'absorption n'est pas clairement comprise par la très grande majorité des candidats. Un pic d'absorption n'est que rarement analysé comme une transition entre deux niveaux quantiques. Dans ce contexte, les questions ouvertes qui ont suivi ont été boudées dans l'ensemble des copies.

II.B – Oscillateur harmonique quantique en équilibre thermique

Cette petite partie reprend les capacités exigibles du programme à travers des questions sans difficultés particulières. De ce fait, les étudiants qui l'ont abordé ont souvent traité l'ensemble de la partie.

Conseils aux candidats

Comme à l'accoutumée, le jury attire l'attention des étudiants sur l'importance d'une lecture attentive de l'énoncé afin de localiser les questions simples et progressives, qui ne sont pas forcément en début de partie. De même, il est judicieux de prendre connaissance des relations ou du formulaire indiqués souvent en fin d'énoncé. Les questions qualitatives permettent de s'assurer de l'appropriation des situations physiques par le candidat. Elles ne doivent pas être traitées de manière superficielle car elles peuvent conditionner la compréhension de pans entiers du problème.

Les questions ouvertes sont l'occasion de valoriser votre capacité d'analyse. Le barème tient largement compte du caractère chronophage de ces questions et de la clarté de la présentation de votre démarche.

Il faut bien distinguer les spécificités des divers domaines de la physique rencontrés durant votre formation. Il n'y a pas la physique « classique » d'un côté et une physique « moderne » dans lequel

on trouve un mélange très confus de quantique, de relativité, ou encore de statistique. Dans ce contexte, il faut utiliser le vocabulaire adapté de manière rigoureuse.

Conclusion

Ce problème était dense. Il fallait faire preuve d'une certaine vitesse d'exécution appuyée sur une maîtrise solide des éléments fondamentaux abordés en cours. On ne peut construire sur la base d'une connaissance fragmentaire et superficielle des définitions, des relations fondamentales et des techniques mathématiques de base. Ne pas comprendre ce point essentiel revient à s'exposer à une lourde sanction sur des épreuves de ce type. Les meilleures copies ont récompensé ces efforts réguliers tout au long des deux années de préparation. Par contre, de trop nombreuses copies témoignent d'énormes lacunes qui sont le reflet d'un travail beaucoup trop superficiel.