

6. Rapport relatif à la composition de physique

Généralités et commentaires portant sur l'ensemble du sujet

La composition de physique, « Ondes en mécanique classique et quantique : cohérence, paquets d'onde et confinement » porte sur deux aspects de la physique ondulatoire : la notion de cohérence joue un rôle clef dans l'interprétation des phénomènes observés.

Dans la première partie, la cohérence temporelle et la cohérence spatiale d'une source électromagnétique sont étudiées en prenant appui sur l'analyse d'expériences d'interférences. Une application des paquets d'ondes mécaniques à l'interprétation du sillage d'un bateau est également proposée.

Dans la seconde partie, quelques aspects de la mécanique quantique sont discutés : dualité onde corpuscule pour la lumière et les particules élémentaires, confinement d'une particule dans un puits de potentiel, d'abord infini, puis fini et asymétrique et finalement dans un double puits.

Cette épreuve a été construite de telle sorte que les deux parties, classique et quantique, soient indépendantes. Néanmoins l'esprit de l'épreuve est de montrer comment la mécanique quantique s'intègre dans l'ensemble des sujets qui sont au programme de l'agrégation de physique.

Une première notion unificatrice est la cohérence temporelle d'un paquet d'ondes. Celle-ci donne lieu à la fois à la relation entre largeur spectrale et durée de vie d'un train d'ondes et, au travers de la relation de dispersion, à celle entre l'extension spatiale et la largeur spectrale en vecteur d'onde de ce paquet. En utilisant la relation de de Broglie, ces expressions conduisent directement aux relations de Heisenberg. Pour une particule confinée dans un puits de potentiel, la conséquence est un spectre discret des niveaux d'énergie : une particule confinée sur un domaine a , aura une quantité de mouvement minimale, $\geq \sim \frac{h}{a}$. Cet effet, purement quantique, se retrouve pour toute forme de confinement (harmonique, coulombien....) et est à l'origine, notamment, du caractère discret des spectres de raies des atomes et molécules.

Cette relation étroite entre confinement et spectre d'énergie est illustrée de façon plus précise en remplaçant le puits infini par un puits de profondeur finie : la fonction d'onde d'une particule possède une amplitude non nulle à l'extérieur du puits, dans la partie interdite à une particule classique du point de vue de l'énergie. La particule est donc moins confinée et en conséquence l'énergie du premier niveau est réduite. Le puits semi-infini, étudié en section 2B est donc très riche en phénomènes physiques, à la fois généraux et spécifiques à la modélisation du noyau de deutérium.

Dans la dernière partie, le puits semi-infini est remplacé par un puits double qui sert à illustrer plusieurs phénomènes de la physique quantique. La particule peut passer d'un puits à l'autre par effet tunnel et cette « délocalisation » permet, une fois de plus, la réduction de l'énergie du niveau fondamental par rapport au cas du puits infini. Cette « oscillation de Rabi » est à l'origine du fonctionnement du maser à ammoniac dont on obtient ainsi un modèle simple. Cette récupération d'énergie par délocalisation donne lieu à une force d'attraction entre les deux puits. Dans ces conditions, si on permet à la distance D entre les puits de varier, on obtient un modèle phénoménologique de la cohésion moléculaire. On montre ainsi l'existence d'une énergie de cohésion purement quantique qui vient de la délocalisation de la particule entre les deux puits. Ce modèle s'applique, par exemple, à la molécule H_2 dans l'approximation de Born-Oppenheimer.

Globalement, la physique classique (partie 1) et la physique quantique (partie 2) ont sensiblement rapporté le même nombre de points aux candidats. De plus, les deux parties sont abordées dans un grand nombre de copies.

En ce qui concerne la partie 1, le début 1.A.1 fait souvent l'objet de bonnes réponses. Mais celles obtenues à propos du rôle de la polarisation et des résultats de l'expérience d'Arago sont trop souvent décevantes.

La section B met davantage de candidats en difficulté. S'il est vrai que la description du paquet d'ondes spectralement étroit est correctement étudiée dans un certain nombre de bonnes copies, la stationnarité de la phase et le problème de Kelvin sont rarement abordés.

La situation est un peu la même pour la partie 2. Le début (section A et section B jusqu'à B.2.4) est convenablement traité mais la résolution graphique arrête souvent les candidats. La section C n'est malheureusement abordée que dans quelques rares copies.

Commentaires spécifiques

Partie 1

A1.1 Le théorème de Malus et le phénomène de stigmatisme sont souvent évoqués, mais la nature des ondes à la sortie du laser ou au niveau des sources secondaires est rarement précisé. Cela conduit les candidats, en A1.1d à ne s'intéresser que trop rarement à la dépendance en $1/r$ de l'amplitude des ondes sphériques. Par ailleurs, la lame semi-réfléchissante divise l'énergie par 2 sur chaque voie sur laquelle l'amplitude n'est donc divisée que par un facteur $\sqrt{2}$.

A1.2 et A1.3 Beaucoup de candidats n'ont pas une représentation simple du fonctionnement des polariseurs ou de la loi de Malus associée. Il en résulte des réponses confuses. En outre, même parmi ceux qui connaissent ce fonctionnement, peu donnent des résultats corrects pour l'expérience d'Arago, même s'ils obtiennent une expression correcte de l'éclairement en sortie, après P1, P2 et P3. La notion même de trains d'onde semble être mal connue ou mal maîtrisée.

A2.1 On attend des réponses précises afin de parvenir à la notion de localisation à l'infini des interférences en lame d'air en évitant tout calcul fastidieux. Peu de candidats savent répondre à cette exigence de rigueur et de précision, d'où, dans une très large mesure, l'impossibilité de conclure. La description du réglage de l'interféromètre de Michelson est très rarement menée avec méthode et précision. Cet appareil est pourtant d'usage courant, en particulier à l'épreuve de montage. Et ce flou dans la démarche ne peut que desservir les candidats lors d'une utilisation concrète de cet appareil.

A2.2 Cette question est rarement abordée dans l'ensemble. Seuls les profils de raies sont bien connus.

B1.1 La décomposition du paquet d'ondes en porteuse et modulante est souvent mal comprise, ce qui montre qu'il en est de même de la notion de vitesse de groupe. Il est toutefois à noter que quelques excellentes copies révèlent une compréhension profonde du lien qui existe entre largeur temporelle et largeur spectrale.

Partie 2

A1c L'expérience qui vient à l'esprit le plus fréquemment est l'effet photo-électrique. Mais on ne doit pas ignorer la physique du corps noir pour lequel l'hypothèse quantique de la lumière résout le problème de la divergence de la densité d'énergie à haute fréquence quelle que soit la température.

A2c Trop souvent, les candidats font maladroitement intervenir la vitesse de la lumière dans le calcul de la quantité de mouvement.

A3c Il est essentiel de procéder à une interprétation probabiliste. L'addition des amplitudes des fonctions d'onde permet de justifier l'obtention d'interférences et l'allure de la densité de probabilité. On associe ainsi la nature corpusculaire pour les impacts individuels et la nature ondulatoire pour expliquer l'obtention de ces figures.

A6 et A7c Les parties 6 et 7 sont convenablement faites. Mais la relation de Heisenberg énergie temps met souvent les candidats en difficulté : peu d'entre eux identifient Δt comme le temps de passage d'une particule à un endroit donné. Cette notion est étudiée avec davantage de précision dans la partie A8. Rappelons une interprétation classique de Δt : c'est le temps de passage d'un paquet d'ondes.

B1.1 Historiquement, l'expérience de Frank et Hertz est la preuve définitive de la nature discrète des niveaux d'énergie électronique des atomes. Mais les expériences de spectroscopie montrant des raies d'émission et d'absorption discrètes sont également très convaincantes.

B1.3 Avec le confinement de la particule, un état $p=0$ est exclu. En posant $\Delta x=a$, on obtient le bon ordre de grandeur pour le niveau fondamental. On voit donc que l'incertitude de Heisenberg et le spectre discret sont intimement liés. Le fait qu'une particule dont les caractéristiques sont celles de l'électron, piégée dans un puits dont la taille a un ordre de grandeur atomique, ait un premier niveau d'énergie de quelques électrons-volts n'est pas dû au hasard.

B2.1c L'effet de peau qui est dû à la dissipation d'énergie dans un conducteur réel n'est pas un bon exemple, même s'il est effectivement choisi dans un autre domaine de la physique. Or, nous avons à faire à un effet de pénétration virtuelle. Il faut envisager la réflexion frustrée d'une onde électromagnétique et la pénétration « virtuelle » d'une onde évanescente.

B2.3 L'existence d'un seuil existe s'explique ainsi : pour une valeur faible de V_0 , le prix à payer en énergie cinétique pour localiser la particule dans le puits est trop forte. Ce n'est que pour $V_0 > W$ qu'un état lié peut apparaître. Pour cette valeur W de V_0 , la longueur de « localisation » x_0 diverge.

B2.5 L'énergie de liaison, $V_0 - E_1$ est mal identifiée.

B2.6c On trouve systématiquement $E_1 < E_1^0$ pour V_0 fini car x_0 est fini. Ceci est, une fois de plus, un effet purement quantique.