

10. Rapport relatif au problème de physique

Le problème porte sur la condensation de Bose-Einstein (C.B.E.) d'un gaz atomique.

Les premiers résultats théoriques concernant ce sujet ont été obtenus par Einstein au début du vingtième siècle sur un gaz parfait d'atomes libres. La C.B.E. en milieu dilué a été observée expérimentalement pour la première fois en 1995 dans un gaz d'atomes de rubidium piégés. Cette découverte spectaculaire a été récompensée par le prix Nobel de Physique 2001.

Le problème comporte deux parties très largement indépendantes.

La première traite du ralentissement et du refroidissement d'atomes neutres, puis de leur piégeage dans un champ magnétique inhomogène. Les résultats, souvent fournis par l'énoncé, peuvent être obtenus à l'aide d'un formalisme classique.

La seconde partie fait appel à la physique quantique. Les aspects thermodynamiques de la C.B.E. sont d'abord envisagés en considérant un gaz d'atomes piégés dans un piège magnétique harmonique anisotrope. La fin du problème est consacrée à l'étude des propriétés des condensats de Bose à l'aide notamment de l'équation de Gross-Pitaevskii. L'utilisation de celle-ci, analogue à l'équation de Schrödinger, permet de prendre en compte les interactions entre atomes tout en conservant une description du condensat en termes de fonction d'onde.

Le lecteur intéressé par le sujet pourra étudier les cours dispensés au Collège de France entre 1982 et 2002 par le professeur C. Cohen-Tannoudji (<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/>)

1. Remarques générales :

Peu de candidats sont parvenus à une compréhension globale du problème. Le jury note avec plaisir la présence d'excellentes copies mais espérait de meilleurs résultats. En particulier, il attendait mieux de la première partie du problème car elle reprend des résultats qui devraient être bien connus.

Il faut attirer l'attention des candidats sur le soin qu'ils doivent apporter à la rédaction de leurs copies. Bien entendu, le fond est essentiel ; pour autant, la forme ne doit pas être négligée, surtout par de futurs enseignants. Le jury déplore s'être trouvé en présence de copies dans lesquelles l'écriture est presque illisible, l'orthographe incertaine, les questions traitées dans un ordre aléatoire et certains résultats perdus au milieu de calculs mal menés. Toutes ces insuffisances sont autant de handicaps incontestables. Il faut donc inciter les candidats à traiter le problème dans l'ordre et à éviter de « picorer » sans chercher à saisir la logique d'ensemble. Enfin, les questions doivent être clairement séparées, les résultats importants entourés, l'orthographe et la grammaire soignées.

On attend d'un professeur agrégé qu'il maîtrise les bases de la physique. Ce n'a pas été le cas dans toutes les copies. En particulier, la détermination de la dimension d'une grandeur est souvent incorrecte (à noter que la confusion entre « dimension » et « unité » est assez fréquente). Il faut également être capable de donner un résultat numérique ou un ordre de grandeur avec un nombre approprié de chiffres significatifs et éviter de donner sans commentaire critique des résultats d'applications numériques qui sont manifestement faux de plusieurs dizaines d'ordres de grandeur. Des erreurs dans l'écriture des équations de Maxwell, dans la description de l'effet Doppler, dans l'expression de l'énergie d'un photon, faisant intervenir une masse, une expression non homogène de l'énergie magnétique, ... sont autant d'indices d'une formation insuffisante en physique ou d'un manque de concentration lors de l'épreuve.

Les outils mathématiques de base sont très souvent malmenés. Les mêmes incorrections reviennent fréquemment, ce qui amène le jury à faire les remarques qui suivent :

- Un vecteur ne peut pas être égal au gradient d'un vecteur.
- L'algèbre des nombres complexes est souvent insuffisamment maîtrisée. $\text{Re}(\underline{a})$ désignant la partie réelle du nombre complexe \underline{a} , il n'est pas vrai que $\text{Re}(\underline{a}\underline{b}) = \text{Re}(\underline{a})\text{Re}(\underline{b})$.
- Une erreur fréquemment rencontrée dans la première partie du problème concerne le calcul de la polarisabilité α : de nombreux candidats écrivent que la valeur moyenne sur une période temporelle de $\exp(2i\omega t)$ est égale à $1/2$. C'est évidemment faux. Il est délicat d'utiliser la notation complexe dans des expressions qui ne sont pas linéaires par rapport aux grandeurs oscillantes. Mais ce résultat semble permettre de "retrouver" facilement l'expression donnée par l'énoncé (à un signe près, bien vite escamoté). Cela confirme le fait que l'utilisation de la représentation complexe est soumise à des règles strictes qui ne sont pas maîtrisées.
- Il est maintenant admis que dans les textes imprimés, pour des raisons de facilité typographique, les vecteurs soient notés en caractère gras plutôt que surmontés d'une flèche. Cela permet de les distinguer des scalaires. Or, dans les copies manuscrites, souvent, rien ne distingue les nombres des vecteurs. Pour ces derniers, il faut donc utiliser la flèche traditionnelle.

Rappelons aux futurs candidats que les correcteurs se montrent très sévères face à la "malhonnêteté intellectuelle". Il est illusoire de croire qu'une suite d'incohérences ou qu'un changement de signe ou de facteur numérique frauduleux permettant d'arriver au "bon" résultat puissent échapper à la vigilance du correcteur. Une copie dans laquelle figurent de telles mystifications est évidemment sanctionnée.

2. Remarques sur la première partie du problème.

Forces radiatives.

Cette partie se propose de retrouver l'expression de la force qui s'exerce sur un atome plongé dans un champ laser.

Trop de candidats ont été maladroits dans le calcul et l'utilisation des développements limités et dès la question 1.1.1.b, les erreurs mathématiques sont nombreuses .

Dans la question 1.2.1, la plupart des candidats ont tenté de calculer les forces \mathbf{F}_1 et \mathbf{F}_2 en conservant les notations complexes pour le moment dipolaire et le champ sans prendre de précaution particulière dans le produit de ces deux grandeurs (voir plus haut).

Dans cette partie, il s'avère que les candidats sont souvent désarçonnés par des calculs élémentaires. La dernière question demande aux candidats de mentionner un phénomène naturel où les effets de la pression de radiation se manifestent. Les réponses ont été souvent étonnantes : "aurores boréales", "tremblements de terre", "forme des gouttes d'eau" ...

Ralentissement et refroidissement d'atomes par laser.

Le ralentissement d'un jet atomique et la température d'un gaz d'atomes refroidis estimée à partir du modèle du "refroidissement Doppler" sont successivement abordés.

Cette partie a été plutôt bien traitée. Pourtant, très peu de candidats saisissent le véritable impact de l'effet Doppler sur l'allure de la force de ralentissement (force ayant une valeur notable uniquement au voisinage de $v = -\delta/k$). La température obtenue à partir de ce modèle est très au-dessus de la température observée expérimentalement, ce qui n'a pas troublé bon nombre de candidats. Bien peu ont mis en doute le modèle, et ont proposé de le raffiner.

Le jury a bien conscience qu'il est difficile de demander au candidat plongé dans la résolution du problème d'avoir une attitude critique vis-à-vis du contenu scientifique du sujet proposé. Pourtant, le texte est assez explicite. La remise en cause de la validité d'un modèle lorsque les résultats obtenus par le calcul et ceux obtenus expérimentalement sont en désaccord doit être naturelle chez le physicien. En outre, la situation étudiée est assez étonnante car il n'est pas fréquent que les résultats de l'expérience soient meilleurs que ceux prédits par la théorie.

Piégeage d'atomes neutres.

Seul le piégeage magnétique est abordé dans cette partie. Les calculs demandés sont souvent élémentaires. Encore faut-il connaître l'expression de l'énergie magnétique et savoir effectuer un développement limité à l'ordre 2.

A la fin du paragraphe, les pulsations associées au potentiel harmonique (donné par l'énoncé) sont demandées. Les réponses correctes à cette question pourtant simple ont été rares.

3. Remarques sur la seconde partie du problème.

Condensation dans un potentiel 3D isotrope.

Il s'agit de retrouver le phénomène de condensation et d'estimer la température de condensation pour des atomes piégés, et non plus libres comme dans le calcul "classique" du cours de physique statistique de maîtrise.

La principale difficulté réside dans la compréhension fine de l'expression du nombre N d'atomes, somme de la population de l'état fondamental et de celle des états excités. La comparaison de ces deux populations suivant la valeur de la fugacité Λ permet de retrouver température critique et accumulation dans l'état fondamental. Les calculs de la partie "énergie interne totale" sont plus techniques, et exigent, pour être menés à bien, une réelle habileté.

Description et excitations du condensat.

L'équation de Gross-Pitaevskii permet de prendre en compte les interactions entre atomes condensés tout en conservant une description du condensat par une fonction d'onde. Peu de candidats sont parvenus à cette dernière partie du problème. Les conclusions des calculs, comparées aux résultats expérimentaux, illustrent l'importance des interactions au sein du condensat.

Une analogie hydrodynamique qui termine le problème montre que la mesure de la vitesse du son dans un condensat permet d'estimer la constante de couplage G qui caractérise ces interactions. Cette dernière partie, assez technique, n'a été abordée qu'exceptionnellement.

4. Conclusions.

Le problème, inspiré par de très récents travaux, comporte sans doute des parties assez délicates.

En 2006, un futur professeur de physique ne peut ignorer la mécanique quantique. Le sujet du problème y fait appel.

Pourtant, les auteurs voulaient éviter que le problème repose uniquement sur les physiques statistique et quantique. La première partie a donc été voulue "classique", ce qui devait permettre une approche progressive en terme de difficulté. Le jury espérait ainsi mettre en confiance les candidats encore trop souvent effrayés par la physique quantique avant d'aborder des notions conceptuellement plus délicates, associées à des calculs plus complexes. Malheureusement, il arrive trop fréquemment que

la physique de niveau licence mise en œuvre dans cette première partie ne soit pas suffisamment maîtrisée.

Mais surtout, trop souvent, la progressivité et l'unité du problème n'ont pas été perçues. Or, il est indispensable que les candidats prennent un peu de recul pendant l'épreuve, qu'ils réfléchissent à la signification des résultats qu'ils viennent d'obtenir et qu'ils en fassent une analyse et un commentaire critique. Ce dernier, en particulier, fait souvent défaut alors qu'il est parfois suggéré par l'énoncé, au point qu'il fait presque partie des réponses attendues aux questions posées. Enfin, un minimum de réflexion critique permet de corriger des erreurs manifestes.

Une telle attitude n'est pas possible si le candidat essaie seulement de grappiller des points de ci de là. Plus que le manque de connaissances, c'est ce que regrette souvent le jury.

L'épreuve a permis de bien classer les candidats. Certaines copies sont insuffisantes mais d'autres sont réellement excellentes. Le jury a eu le plaisir de constater que certains candidats ont une connaissance profonde de la physique contemporaine et une dextérité impressionnante dans le maniement des calculs.