

Composition de Physique, filière MPI (X)

Le sujet, intitulé *Effets quantiques dans les rebonds de neutrons*, proposait de décrire et modéliser une étude expérimentale publiée en 2002 (V.V. Nesvizhevsky *et al.*, *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Nature, 415,297-299, 2002) dans laquelle des neutrons rebondissent sous l'effet de la gravité sur une plaque horizontale. Ce travail réalisé à l'institut Laue-Langevin à Grenoble a permis de déceler des effets quantiques lorsque les rebonds sont de très faible hauteur, ce qui représente la première observation en laboratoire d'un phénomène alliant gravitation et mécanique quantique.

Ce sujet était centré sur la mécanique du point et la mécanique quantique. Il nécessitait une mise en pratique des notions acquises en première et deuxième années des classes préparatoires relatives à ces deux thèmes, à savoir pour la mécanique du point matériel (*quantité de mouvement d'un point matériel, énergie cinétique, énergie mécanique, mouvement conservatif, mouvement dans un champ de pesanteur constant, équations horaires du mouvement et loi de composition des vitesses lors d'un changement de repère*) et pour la mécanique quantique (*Relation de de Broglie, principe d'incertitude d'Heisenberg, Equation de Schrodinger à une dimension dans un potentiel V , fonction d'onde, états stationnaires et calcul des niveaux d'énergie*). Le sujet permettait également de tester les connaissances des candidat(e)s sur l'analyse dimensionnelle et les lois de Snell-Descartes. Il se composait de trois parties distinctes de difficultés assez comparables et qui pouvaient être traitées de manière relativement indépendante. L'énoncé du problème était précédé d'un texte introductif d'une quinzaine de lignes. Les valeurs numériques des constantes physiques utiles pour mener à bien les calculs demandés étaient données.

La première partie du problème, intitulée *Réflexion d'un neutron sur une paroi* modélisait l'interaction quantique d'un neutron avec une paroi. La deuxième, *Ralentissement des neutrons*, se focalisait sur les techniques permettant de ralentir les neutrons rapides issus d'un réacteur nucléaire, par paliers successifs, jusqu'à des vitesses de quelques mètres par seconde. La troisième et dernière partie, *Rebonds gravitationnels et effets quantiques*, étudiait leurs rebonds sous l'effet de la gravité. Les objectifs de chacune de ces parties étaient spécifiés dans la partie introductive de l'énoncé.

Chaque partie du problème comportait des questions de cours ou d'application directe du cours ainsi que quelques questions nécessitant une réflexion plus approfondie. Quelques applications numériques et des estimations d'ordre de grandeur étaient demandées ainsi que l'analyse de trois figures expérimentales tirées de l'article étudié. Une grande majorité des candidat(e)s a pu aborder chacune des trois parties du problème.

Pour les 288 candidat(e)s (toutes nationalités confondues) ayant passé l'épreuve la moyenne est de 9,20/20 avec un écart type de 3,61.

Le tableau ci-dessous résume la répartition des notes obtenues par les 288 candidat(e)s :

Tranche	Nombre de copies	pourcentage
$0 \leq N < 4$	17	6.0 %
$4 \leq N < 8$	95	33.0 %
$8 \leq N < 12$	108	37.5 %
$12 \leq N < 16$	57	19.7 %
$16 \leq N \leq 20$	11	3.8 %

Remarques générales :

Comme chaque année, il nous semble important de rappeler quelques règles générales, qui bien qu'évidentes restent toujours méconnues de nombreux(ses) candidat(e)s:

- Soigner son expression écrite et ne pas rédiger dans un langage approximatif, indigne de futur(e)s ingénieur(e)s. Eviter les erreurs grammaticales et orthographiques qui nuisent véritablement à la lecture et à la compréhension des explications données pour justifier un raisonnement ou un résultat. De telles erreurs affectent nécessairement l'évaluation globale de la copie.
- Bien s'appliquer, ne pas négliger la forme et la tenue générale de sa copie et produire une écriture déchiffrable afin de faciliter le travail du correcteur.
- Bien lire le texte d'énoncé de chaque question et notamment analyser la signification des verbes employés, afin de comprendre le niveau de la réponse attendue. Par exemple *Rappeler une expression* ne nécessite pas de la démontrer.
- Vérifier systématiquement l'homogénéité des résultats obtenus. Cette démarche permet souvent de s'affranchir d'erreurs stupides, comme par exemple des erreurs typographiques.
- Présenter un résultat numérique avec les unités physiques correctes et indiquer explicitement ces unités. Veiller à ce que le nombre de décimales significatives données soit en adéquation avec la précision des données numériques fournies par l'énoncé.
- Toujours justifier les hypothèses faites et invoquer les principes appliqués lors d'un raisonnement. Des résultats obtenus sans aucune justification ne sont pas considérés valides. Penser à définir de manière très explicite les variables introduites pour mener à bien un calcul.
- Ne pas négliger les applications numériques demandées car celles-ci constituent une part importante du nombre total de points attribués dans l'évaluation finale.

- Les questions demandées ne sont pas un commentaire de texte et les réponses ne doivent pas être une paraphrase de celui-ci. Pour chaque question, une réponse argumentée, s'appuyant sur un raisonnement physique rigoureux est attendue. Ne pas hésiter pour ce faire à s'appuyer quand cela semble utile sur des schémas explicatifs.

Commentaire détaillé de l'épreuve.

Partie I- Réflexion d'un neutron sur une paroi

1 Question de cours. Un nombre très important de candidat(e)s ne connaît pas la formule de de Broglie. Il est vraiment affligeant de constater que de nombreux(ses) candidat(e)s n'ont aucune idée de l'ordre de grandeur de la taille d'un atome.

2 Question de cours avec un taux de bonnes réponses très important.

3 Question bien traitée.

4 Question bien traitée. Quelques candidat(e)s sont resté(e)s bloqué(e)s dans leurs calculs car ils/elles n'ont pas utilisé le fait que l'onde transmise se propage uniquement dans le sens des x croissant et que donc sa fonction d'onde ne comporte pas de terme de la forme e^{-ikx} .

5 Peu de bonnes réponses à cette question simple.

6 Les mauvaises réponses à cette question résultent d'une erreur sur la définition de l'angle θ probablement liée à une lecture trop rapide de l'énoncé.

7 Question très peu abordée avec un faible taux de réponses correctes. Les erreurs principales proviennent soit d'une erreur sur la définition du coefficient de réflexion $R=r^2$ soit sur une erreur de calcul faite à la question 4 sur l'expression du coefficient r (la fonction d'onde pour $x < 0$ s'écrivant $\psi(x)=e^{ikx} + re^{ikx}$).

8 Question discriminante. Beaucoup d'erreurs dues à une mauvaise interprétation de l'angle θ dont la définition était pourtant explicitée dans l'énoncé.

Partie II- Ralentissement des neutrons

Première étape : échange d'énergie avec des atomes

9 Question bien traitée. Quelques candidat(e)s font une erreur de signe sur le terme v' due à une lecture trop rapide de l'énoncé.

10 Le bilan d'énergie est écrit correctement dans l'immense majorité des copies.

11 De bonnes réponses dans l'ensemble mais relativement peu de commentaires physiques accompagnateurs.

12 Un nombre très restreint de candidat(e)s a pensé étudier la valeur du rapport $\frac{v'}{v}$ en fonction de la valeur de A, étape nécessaire pour répondre correctement à la première partie de cette question.

13 Question ne présentant aucune difficulté mais nécessitant une expression analytique correcte du rapport $\frac{v'}{v}$, établie à la question 10.

14 Question de cours. Les trois modes de transferts thermiques sont connus de l'immense majorité des candidat(e)s, cependant beaucoup d'entre eux considèrent à tort que la conduction est le mode inopérant à basse température.

15 Beaucoup de réponses fantaisistes. Seules quelques rares copies indiquent que l'inconvénient de travailler à très basse température provient de l'absence de convection dans un solide, rendant l'évacuation de la chaleur produite par les neutrons très difficile.

Deuxième étape : élimination des neutrons rapides par un guide

16 Question bien traitée.

17 Taux important de réponses satisfaisantes.

18 La construction géométrique et l'utilisation du théorème de Pythagore sont correctes dans l'immense majorité des copies. Malheureusement un nombre assez faible de candidat(e)s pense à effectuer un développement limité à l'ordre 1 en $\frac{z}{R}$ permettant d'obtenir l'expression simplifiée $x = \sqrt{2zR}$.

19 L'expression de l'angle θ en fonction de x et R est correcte dans la plupart des copies, cependant peu de candidat(e)s parviennent à la simplifier en utilisant l'expression approchée $x = \sqrt{2zR}$, obtenue à la question précédente.

20 Commentaires similaires à la question 19.

21 La plupart des copies ont considéré que la réflexion ne s'effectuait que sur le bord extérieur du dispositif. La majeure partie de ces copies a alors bien compris que l'angle d'incidence ne variait pas d'un rebond à l'autre et que le neutron pouvait ainsi rebondir jusqu'à la sortie. Les quelques rares et très bonnes copies ayant discuté la possibilité pour le neutron de rebondir sur le bord intérieur ont bien compris que lors de la réflexion sur le bord intérieur du

tube, l'angle avec la paroi est plus petit que pour la réflexion s'étant produite précédemment sur le bord extérieur, et que donc le neutron est également réfléchi.

22 Peu de bonnes réponses dans la mesure où il fallait avoir répondu correctement à la question 20 pour parvenir à la bonne expression analytique.

23 Question très peu abordée. Il est vraiment dommage que des candidat(e)s ayant obtenu à la question 22, l'expression analytique correcte de la vitesse critique n'aient pas jugé opportun d'effectuer l'application numérique, pourtant très simple à réaliser.

24 Question d'analyse dimensionnelle qui s'est révélée assez discriminante. Seulement 10% des copies a abordé cette question et y a répondu de manière satisfaisante.

25 Question discriminante puisqu'elle nécessitait une réponse correcte à la question 24

Troisième étape : ralentissement par une turbine

26 La plupart des schémas représentant la trajectoire des neutrons sont satisfaisants sur le fond, mais sur la forme ils sont trop souvent peu soignés.

27 Question peu abordée et donc discriminante.

Partie III- Rebonds gravitationnels et effets quantiques

Étude du mouvement classique

28 Exercice d'application standard auquel l'immense majorité des candidat(e)s a très bien répondu. L'erreur la plus observée est l'absence du préfacteur $\sqrt{2}$ dû à une mauvaise écriture de l'énergie cinétique.

29 L'erreur la plus observée dans les rares copies ne parvenant pas à l'expression correcte de la durée entre deux rebonds successifs est l'absence du préfacteur 2. Cette erreur résulte de la prise en compte uniquement de la durée de descente du neutron mais pas celle de son ascension.

30 Question bien traitée.

31 Peu de bonnes réponses à cette question très peu abordée.

Échelles associées aux effets quantiques

32 Question peu abordée. Les deux erreurs les plus fréquentes dans l'expression du potentiel V sont une erreur de signe et l'oubli du facteur z .

33 De bonnes réponses pour la minorité de candidat(e)s ayant traité cette question.

Étude quantique des rebonds

34 Quelques candidat(e)s astucieu(ses)x, ayant des doutes sur la validité de leur réponse à la question précédente, sont néanmoins parvenu(e)s au résultat final en appliquant directement le principe fondamental de la dynamique au flotteur.

35 Peu de réponses correctes.

36 Question peu examinée par les candidat(e)s dans la mesure où il fallait pour y répondre avoir traité correctement les questions 24 et 25.

37 Question peu traitée et rarement de manière complète avec une discussion sur la forme des fonctions d'onde pour un potentiel infini et les valeurs correspondantes de leurs niveaux d'énergies. Peu de candidat(e)s note la différence principale : est que dans le cas de l'article, la taille du paquet d'ondes augmente avec l'énergie.

38 Question très peu abordée. La plupart des réponses données ne sont pas satisfaisantes.

39 Question peu traitée. La plupart de ceux/celles l'ayant abordée ont bien compris qu'il fallait comparer pour le neutron la durée entre deux rebonds successifs à celle du temps passé entre les deux plaques.