

Physique 1

Présentation du sujet

Cette épreuve est consacrée à l'étude, théorique puis expérimentale, de l'interaction de Van der Walls entre deux atomes de Rubidium placés dans des états très excités dits « de Rydberg ». À l'aide du modèle du dipôle électrostatique au programme de PCSI, on aboutit, dans la première partie, aux expressions théoriques de l'énergie potentielle et de la force d'interaction de Van der Waals entre deux atomes de rubidium. Puis, dans une deuxième partie, on s'intéresse aux niveaux d'énergie et à la polarisabilité d'atomes de sodium « de Rydberg » après avoir déterminé les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène dans le cadre du modèle de Bohr. Enfin, dans une troisième et dernière partie, on étudie une méthode de mesure de l'énergie potentielle d'interaction de Van der Waals pour une paire d'atomes de rubidium dans des états de Rydberg, piégés par des pinces optiques laser.

Chacune de ces trois parties est progressive, contient de nombreuses questions de cours ou des applications directes. Seule la deuxième partie propose une question ouverte basée sur une approche documentaire.

Analyse globale des résultats

Le sujet, bien que de longueur raisonnable, relativement progressif et sans trop de difficulté n'a pas été abordé en totalité par de nombreux candidats : les résultats sont décevants, d'autant plus que la longue et exceptionnelle période de révision due à la crise sanitaire aurait pu être favorable aux candidats dans leur apprentissage, leur consolidation de leur savoir et savoir-faire. On pouvait s'attendre à ce que le cours soit mieux maîtrisé que lors des sessions précédentes. Nous saluons à cette occasion le travail remarquable de tous nos collègues qui, au cours de ces deux ou trois années mais surtout durant cette période difficile de crise sanitaire, ont toujours soutenu les étudiants afin qu'ils donnent le meilleur d'eux-mêmes avec une bienveillance remarquable.

Bien présenter, bien rédiger, bien justifier sont des compétences minimales indispensables que doit avoir un candidat à ce concours, de même que l'honnêteté intellectuelle (la malhonnêteté intellectuelle est jugée avec sévérité par le jury, avec une incidence négative très forte sur la note finale). La présentation des copies est globalement satisfaisante ; ont été sanctionnées celles qui ressemblent davantage à un brouillon qu'à une œuvre d'un étudiant motivé par une bonne note... heureusement de telles copies ont été peu nombreuses.

Une minorité de candidats pense à valider les résultats : tests d'homogénéités, de variation des paramètres, confrontation avec des valeurs numériques connues. Et pourtant, ces points sont valorisés ! À chaque résultat, à chaque application numérique, un commentaire est toujours le bienvenu et est toujours valorisé. De plus, cela aide le candidat à s'imprégner du sujet et à mieux le comprendre.

Nombreux sont les candidats à ne répondre que partiellement aux questions, notamment lorsque celles-ci contiennent plusieurs sous-questions.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Les candidats armés d'une bonne connaissance du cours, d'un bon sens physique et d'une bonne maîtrise des techniques habituelles de calcul (déterminer une réponse en régime permanent sinusoïdal forcé à l'aide de la notation complexe, calculer des ordres de grandeur, réaliser des applications numériques en respectant le nombre de chiffres significatifs...) ont obtenu une bonne voire une excellente note à cette épreuve. Un candidat peut utiliser ses connaissances en électrostatique, en mécanique du point, en

physique ondulatoire dans le domaine électromagnétique de façon générale puis plus précisément dans le domaine des lasers. Il est inutile d'apporter des connaissances hors-programme pour réussir cette épreuve ! Ainsi, vu la structure du sujet, un candidat, moyen ou faible, peut se relancer régulièrement et se remettre en confiance : c'est pourquoi il est conseillé de parcourir le sujet en première lecture dans son intégralité. Toutes les données numériques de l'énoncé sont fournies avec trois ou quatre chiffres significatifs, ce qui ne laisse pas de doute quant au nombre de chiffres significatifs attendu pour l'écriture du résultat d'une application numérique.

I Étude de la force de Van der Waals

I.A –

Q1. Trop peu de candidats connaissent la définition rigoureuse d'un dipôle électrostatique et nombre d'entre eux la confondent avec celle d'un dipôle magnétique, voire avec celle d'un dipôle electrocinétique.

Q2. Il est souvent préférable de passer la question plutôt que de proposer une réponse farfelue ou hors de propos. Donner comme exemple de dipôle électrostatique « un grain de riz » ou « une résistance électrique » montre tout de suite au jury que le candidat n'a pas compris le sujet. La molécule d'eau est trop peu souvent citée, alors que c'est l'exemple emblématique. De plus, l'atome d'hydrogène ne peut pas être considéré comme un dipôle électrostatique, sauf s'il est soumis à un champ électrique extérieur.

I.B –

Q3. Souvent bien traitée, cette question a parfois été la source de réponse clairement inhomogènes : « $p \ll 1$ » ou « $p \ll OM$ »...

Q4. Attention aux erreurs de calcul sur des dérivées simples et aux erreurs de signe.

Q5. Peu de candidats connaissent l'allure des lignes de champ, obligatoirement orientées, par cœur. Pourtant, il existe des pistes : on peut imaginer la direction et le sens de la force électrostatique que subirait une charge ponctuelle positive placée autour du dipôle, ou regarder la direction et le sens du champ en $\theta = 0, \theta = \pi/2$ ou $\theta = \pi$ à partir des expressions littérales trouvées à la question précédente.

I.C –

Q6. La plupart des candidats n'explique pas avec rigueur la notion de « dipôle induit » et se sont contentés de paraphraser l'énoncé. La confusion entre « dipôle induit par un champ extérieur » et « dipôle rigide dans un champ extérieur » a été fréquemment rencontrée : il s'agissait ici d'étudier le comportement d'un atome sous l'effet d'un champ électrique extérieur. Un schéma montrant la déformation, sous l'effet d'un champ électrostatique, d'un nuage électronique atomique autour du noyau correspondant chargé positivement et le vecteur moment dipolaire résultant suffisait quasiment à répondre à la question.

La dimension d'une grandeur (α en l'occurrence) ne permet pas de conclure sur son signe. Beaucoup de candidats ont pris la norme de la relation vectorielle, et en ont conclu que $\alpha > 0$... une norme est nécessairement positive !

De même ce n'est pas parce que le moment dipolaire augmente avec le champ que ces deux grandeurs sont nécessairement proportionnelles !

Q7. Un nombre non négligeable de candidats n'a pas pensé à calculer le champ électrique pour en déduire la force électrique. L'application du théorème de Gauss est généralement maîtrisée, mais la rédaction laisse à désirer. Notamment, il faut savoir identifier la source du champ électrique, l'étude de ses symétries aboutissant à un renseignement sur la direction du champ, l'étude de ses invariances aboutissant à un renseignement sur la dépendance du champ. En symétrie sphérique c'est une erreur de dire que le *vecteur* champ électrique ne dépend que de la coordonnée r .

Q8. La charge ne possédait ici qu'une unique position d'équilibre définie par une relation vectorielle et non scalaire, insuffisante.

Q9. Question généralement bien traitée, mais un commentaire stipulant que α était de l'ordre de grandeur du volume d'un atome était le bienvenu.

I.D –

Q10. Les raisonnements proposés étaient en général flous. Une série de schémas montrant deux noyaux avec leur nuage électronique, et leur devenir en présence d'un dipôle instantané, aurait permis de bien répondre à la question, en montrant que le sens physique a été compris.

Q11. Cette question n'a quasiment jamais été traitée avec rigueur.

Q14. Encore une fois, attention aux erreurs de calcul !

II Atomes de Rydberg

II.A –

Partie bien réussie dans l'ensemble mais...

Q15. Trop nombreux sont les candidats semblant penser qu'un mouvement circulaire est nécessairement uniforme ou qu'un mouvement à force centrale est nécessairement circulaire uniforme. D'autres ont tenté de démontrer que le mouvement était circulaire, mais ce n'était pas la question !

Q17. Certains candidats pensent (à tort !) que le moment cinétique est une « grandeur classique ». « Classique » voulait dire ici « non quantique » et pas « non relativiste ». D'ailleurs, l'utilisation de la constante de Planck n'est pas une justification recevable de l'aspect quantique d'un modèle ! Et attention encore une fois à ne pas paraphraser l'énoncé : nombreux sont les candidats qui se sont contentés de *répondre* « parce que ça utilise une théorie classique mais aussi une théorie quantique ».

Q18. Cette question a été généralement bien traitée et a permis à certains candidats de gagner des points alors que le début de l'énoncé n'avait pas été correctement traité.

Q19. De nombreuses tromperies ont été commises ici : avoir une expression littérale fausse mais donner le résultat correct se trouvant dans le sujet est très mal vu par le correcteur qui assimile cela à de la malhonnêteté intellectuelle ! L'erreur principale sur cette question fut de ne considérer que l'énergie potentielle ou que l'énergie cinétique, au lieu de l'énergie mécanique totale. Il n'y avait aucune ambiguïté quant au nombre de chiffres significatifs attendus : 4 obligatoirement.

Q20. Il fallait justifier que l'état ionisé correspond à une énergie nulle ($n \rightarrow +\infty$).

II.B –

Q21. Chiffres significatifs souvent incorrects ! On rappelle que lorsqu'un entier apparaît dans le calcul (ici à cause de la quantification), celui-ci n'intervient pas dans la précision du résultat du calcul (étant par nature exact).

Q22. Beaucoup d'erreurs sur cette question pourtant simple : beaucoup de candidat ont écrit $\lambda = \frac{hc}{E(n=100)}$ au lieu de prendre en compte la différence d'énergie au dénominateur. Afin d'éviter les erreurs d'arrondis qui se propagent, il est conseillé de toujours pousser le calcul avec un chiffre significatif de plus que le résultat affiché : par exemple « $4 \sim 1 ; \pi \sim 1$ donc $4\pi \sim 1$ » au lieu de « $4\pi \sim 10^1$ ». En l'occurrence, E_I avait été calculé en Q20, en arrondissant à 4 chiffres significatifs. Cet arrondi se propage nécessairement au calcul de λ , n'en donnant qu'un résultat approximatif, sauf s'il avait été calculé avec 5 chiffres significatifs, puis arrondi à 4.

Q23. Beaucoup de candidats ont répondu que le sodium appartenait à la même colonne que l'hydrogène dans la classification périodique. Bien que cela soit juste, cette réponse est insuffisante, le sodium étant placé ici dans un état très excité... Il fallait bien justifier qu'ici tout se passait comme si l'unique électron de valence du sodium très éloigné du noyau (car dans un état très excité) « ne voyait qu'un noyau chargé positivement avec une charge e », comme l'unique électron de valence de l'atome d'hydrogène.

Q24. La question a souvent été bien comprise, mais la réponse mal rédigée, car parfois entachée de sous-entendus. « Si l'atome est plus gros, la transmission diminue. » Certes, mais cela n'explique pas pourquoi. S'agit-il simplement d'un problème d'encombrement, ou y a-t-il un autre argument ? Ce genre de réponse est trop flou.

II.C –

Q26. Les candidats ont visiblement beaucoup de mal avec les analyses de documents. Ils se contentent souvent de paraphraser. Au même titre qu'à la Q24, trop de réponses contiennent des sous-entendus qu'il convient d'expliciter : « la trajectoire de l'électron est une ellipse, donc il apparait un moment dipolaire » ne permet pas au jury de savoir si le candidat a compris le lien logique.

III Mesure de l'énergie potentielle d'interaction de Van der Waals à l'aide d'atomes de Rydberg piégés

III.A –

Q27. Beaucoup ont écrit : « $\cos(\omega t - kz) \approx \cos(\omega t)$ si $kz \ll \omega t$ ». C'est faux !! Prenons $kz = \frac{\pi}{2}$ et $\omega t = 2000\pi$, $\cos(\omega t - kz) = 0$ alors que $\cos(\omega t) = 1$. D'autres ont écrit : « $\cos(\omega t - kz) \approx \cos(\omega t)$ si $z = 0$ ». Certes, mais l'atome ne se restreint pas à un point ici, il faut prendre en compte son extension spatiale. Enfin, certains ont écrit qu'il faut une onde « uniforme » ou « qui ne se propage pas » (sans pour autant qu'elle soit stationnaire ce qui d'ailleurs ne répond pas à la question) !

Q28. Les conditions d'application de la relation de structure du type « $\vec{B} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{E}}{c}$ » doivent être rappelées !

Q29, Q30. De nombreux candidats ne savent pas résoudre une équation différentielle en régime permanent sinusoïdal forcé car la méthode par le passage en complexe n'est pas du tout maîtrisée, à notre grand étonnement ! D'ailleurs, une proportion non négligeable de candidats tentent d'introduire une solution en $\cos(\omega t + \varphi)$ dans l'équation différentielle et ne s'en sortent pas dans leurs calculs.

Q31. Beaucoup de confusion entre puissance moyenne absorbée (due au champ électrique ici) et puissance moyenne de l'onde calculée avec le vecteur de Poynting.

Q32. Des erreurs fréquentes dans les formules de trigonométrie et des confusions fréquence/pulsation.

La fin de cette partie est plutôt bien réussie mais...

Q39. Beaucoup de candidats ont recopié le schéma appris en cours, mais peu ont compris que ce schéma n'était pas du tout à l'échelle ! L'axe des x est très « ratatiné ». Beaucoup pensent que le faisceau est d'abord cylindrique et commence à diverger au bout d'une longueur L_R . Non ! Le faisceau laser diverge dès le début, mais très progressivement, si bien que tant que $x \ll L_R$, le faisceau peut être considéré comme cylindrique. Il n'y a donc pas une zone où le faisceau se propage rectilignement et une autre où il diverge ; il y a une zone où le faisceau peut être considéré comme rectiligne, et une autre où la divergence ne peut plus être négligée.

Q42. Aucun calcul nécessaire ici, il suffit d'utiliser Q36 pour chercher un minimum d'intensité, puis Q37 et Q39.

Q43. Attention à ne pas confondre F' et f' .

III.B –

Q45. Attention à distinguer clairement le rôle de la température et le rôle de la pression.

Q46. Beaucoup de candidats n'ont pas vu/compris que les diagrammes étaient en échelle logarithmique. Lorsqu'on demande de vérifier un modèle physique, dire que les données expérimentales montrent une décroissance comme annoncé par le modèle donc que le modèle est valide est insuffisant, de même que se satisfaire d'une simple observation du fait que les points expérimentaux sont proches de la courbe théorique superposée.

Conclusion

Bien que ce rapport mentionne principalement les écueils à éviter, nous voulons souligner combien nous avons été satisfait devant certaines copies, excellentes aussi bien sur le fond que sur la forme. Que tous leurs auteurs soient remerciés pour avoir donné le meilleur d'eux-mêmes durant cette épreuve et pour nous avoir fait lire de très belles compositions. Nul doute qu'ils sauront relever les défis technologiques du XXI^e siècle après leurs études au sein des grandes écoles et qu'ils auront à cœur de transmettre le fruit de leurs travaux.

Pour tous les candidats, nous nous permettons quelques conseils.

- Un sujet tel que celui-ci illustre l'importance fondamentale de l'apprentissage du cours : beaucoup de points peuvent être glanés facilement en citant ou en appliquant simplement le cours.
- Parcourir l'intégralité du sujet lors d'une première lecture rapide : cela permet de s'imprégner du sujet et de comprendre sa logique et son esprit. Ensuite il faut toujours s'assurer de bien avoir compris un énoncé quitte à le relire plusieurs fois.
- Comme déjà dit dans des précédents rapports, les résolutions de problème doivent être abordées avec plus de méthode. Une simple application de la méthode « scientifique » permet d'aider à formaliser le problème et donc à trouver la bonne réponse !
- Commenter et critiquer de façon pertinente un résultat ou une démarche, même si ce n'est pas explicitement demandé par l'énoncé, est valorisé : cela peut-être une analyse dimensionnelle d'un résultat littéral simple, un calcul d'ordre de grandeur d'un paramètre physique, une vérification de valeur numérique fournie dans l'énoncé, l'explication une hypothèse non fournie par l'énoncé mais nécessaire pour aboutir au résultat demandé...
- Souvent un schéma simple, clair, éventuellement avec des couleurs sera plus apprécié qu'une demi-page d'explications...

En espérant que ces quelques conseils seront utiles aux futurs candidats.