

Épreuve Physique C (6h) - Session 2022

Concours PSI de l'ENS Paris

Jury : Tom Bienaimé, Jules Fillette, Raphaël Lopes.

Descriptif du sujet :

Le sujet de cette session étudie l'interaction entre un atome et le champ électromagnétique. L'atome est décrit par un dipôle électrique oscillant créé par un électron et un noyau élastiquement lié. Le sujet étudie la dynamique de ce dipôle lorsque celui-ci est couplé au champ électromagnétique.

Le fil conducteur du sujet est l'étude de l'émission spontanée. Après avoir montré la nécessité d'un amortissement des oscillations du dipôle atomique par des arguments énergétiques dans le modèle de Thomson, le sujet va chercher à comprendre comment on peut décrire l'émission spontanée en terme de couplage de l'atome au champ électromagnétique. Il présente donc une succession de modèles de l'interaction atome-champ de plus en plus complexes, jusqu'à trouver une description qui permette de modéliser correctement la dynamique de l'émission spontanée. Les modèles intermédiaires sont l'occasion d'étudier différents phénomènes de physique atomique dans autant de sous-parties largement indépendantes.

L'introduction commence avec le modèle de Thomson. Le sujet propose d'étudier la dynamique de l'électron dans ce modèle, de calculer le champ rayonné, et montre par des considérations énergétiques que le rayonnement de l'atome doit induire un amortissement du mouvement de l'électron en un temps caractéristique que l'on peut calculer.

Dans la partie 1, on traite cet amortissement en introduisant une force de friction phénoménologique. Il est alors possible d'étudier l'interaction d'un atome avec une onde plane, puis de montrer que la lumière induit une force sur le centre de masse de l'atome lorsque le champ électromagnétique n'est pas uniforme.

Dans la partie 2, on cherche à interpréter l'amortissement du dipôle comme un échange de photons entre l'atome et le champ. La partie 2.1 étudie les modes propres d'une cavité optique. La partie 2.2 étudie l'interaction de l'atome avec un mode unique de la cavité. On montre alors que la dynamique ne présente pas d'amortissement. On en déduit que ce modèle est trop simpliste. La partie 2.3 montre l'analogie entre l'interaction d'un atome et d'un mode et le couplage de deux oscillateurs harmoniques. En généralisant le résultat à la dynamique d'un oscillateur harmonique couplé à un grand nombre d'oscillateurs, on comprend que, pour décrire l'amortissement du dipôle atomique, il faut considérer son couplage à un grand nombre de modes. La partie 2.4 permet de retrouver la dynamique d'amortissement du dipôle en étudiant le couplage de l'atome à l'ensemble des modes du champ électromagnétique de l'espace libre. On retrouve alors le taux de d'amortissement que l'on avait calculé en introduction par le modèle de Thomson. Jusqu'ici, la description du couplage atome-champ est complètement classique. Dans la partie 2.5, on montre que cette description classique ne permet pas de décrire l'interaction entre un atome et un grand nombre de photons. Pour cela,

le sujet introduit le formalisme quantique en utilisant l'analogie entre les amplitudes de probabilité des états quantiques et l'amplitude des oscillations mécaniques du modèle classique. On peut ainsi calculer la dynamique quantique et comparer le résultat à une courbe expérimentale obtenue dans l'équipe de Serge Haroche.

Remarques générales :

Pour cette session, 489 copies ont été rendues, la moyenne est de 9,01 avec un écart-type de 4,04. La note la plus haute est 20, la plus basse vaut 3. L'épreuve a permis de classer de manière correcte les candidats et en particulier les meilleures copies dont 62 s'échelonnent entre 14 et 20. La plupart des questions ont été abordées, malgré la longueur du sujet. Beaucoup de candidat.es ont exploité à bon escient la division du sujet en sous partie indépendantes, se raccrochant notamment à la question 16 puis à la 24 avant de faire souvent un bond important jusqu'à la question 47.

Nous énumérons ici des remarques générales sur l'épreuve et sa correction :

- Le soin apporté à une copie influence fortement l'opinion du correcteur sur celle-ci. Une copie bien organisée, une écriture lisible, des résultats soulignés ou encadrés, facilitent le travail d'évaluation du correcteur. Si des passages doivent être rayés, il convient de le faire proprement.
- De manière générale, une lecture attentive de la question et de l'énoncé en général, est indispensable pour répondre de manière satisfaisante. Des réponses fausses liées à une lecture superficielle s'observent dans de nombreuses copies.
- La réponse aux questions qualitatives doit être claire et précise. Il faut citer explicitement les arguments pertinents, en nommant les lois physiques utilisées, les phénomènes physiques en jeu, ...
- Les questions calculatoires difficiles ne sont pas les seules à être valorisées par le barème. Les questions qualitatives, les applications numériques et les tracés de courbes le sont aussi lorsqu'elles sont difficiles et traitées par peu de candidats. Le nombre de chiffres significatifs dans une application numérique fait partie intégralement de la question.
- Une question est considérée comme fausse dès qu'une expression est inhomogène dans le résultat ou dans un calcul intermédiaire.
- Les réponses non justifiées aux questions simples ou dont le résultat est donné sont comptées comme fausses. De nombreux candidats continuent de ne pas justifier leur réponses, mais nous avons constaté une augmentation de la proportion de copies où les réponses sont justifiées.

Les justifications n'ont pas besoin d'être longues, et peuvent souvent se ramener à quelques mots pour citer une loi physique ou le document utilisé. D'ailleurs, répondre trop longuement à une question en mettant toutes les informations que le candidat connaît de manière non-pertinente est contre productif en raison de la perte de temps occasionnée.

Pour les questions dont le résultat est une équation, écrire les calculs intermédiaires est souvent indispensable pour justifier ce résultat.

- La rédaction scientifique doit être précise et rigoureuse : les pages de calcul enchaînées sans le moindre connecteur logique sont à proscrire. On attend des candidats d'expliquer leur raisonnement, pas de calculer aveuglément. Cette année encore, le jury a remarqué un nombre significatif de copies assez longues et saturées de calculs mal justifiés, avec une majorité de réponses incorrectes.

Remarques sur les questions du sujet :

- Q2 Le jury a été particulièrement attentif à l'application rigoureuse du théorème de Gauss, précédée d'une étude des symétries et invariances et dont la surface d'application devait être explicitée.
- Q4 & Q5 De nombreux candidats introduisent des formules quantiques à ce stade alors que l'ensemble de la partie était explicitement à traiter dans l'approximation classique.
- Q6 Dans de trop nombreuses copies le produit de \vec{E} et \vec{B} est traité en complexes avant de passer à la valeur moyenne. Le même problème se retrouve d'ailleurs à la question sur F_{mag} plus loin. Le calcul de $\langle \vec{H} \rangle$ ayant abouti, celui de \mathcal{P} n'a pas posé problème.
- Q8 La question invitait simplement à constater que la charge globale de l'atome est nulle de sorte qu'en négligeant l'hétérogénéité du champ \vec{E} l'atome ne subit aucun déplacement.
- Q10 Cette question ne consistait pas à identifier les trois termes proposés dans l'équation (6) mais à identifier toutes les forces en présence et à négliger celles qui devaient l'être (le poids et la composante magnétique) de manière plus quantitative.
- Q11 L'existence même d'un régime stationnaire a rarement été justifiée.
- Q12 À partir de cette question et dans les suivantes, un nombre important de copies n'ayant pas identifié z_0 à $|\vec{r}_\omega|$ progressent avec une puissance complexe sans s'interroger. La spécificité de la *diffusion* qui consiste à renvoyer la lumière dans des directions différentes de celle de l'onde incidente ne semble pas claire pour une majorité de candidats.
- Q22 Il s'agissait de reconnaître la force de pression de radiation. Peu de candidats ont répondu à cette question.
- Q25 Beaucoup de candidats lisent trop rapidement la formule (16) et, confondus par la notation, interprètent $w(z)$ comme une pulsation.
- Q26 Pour tracer qualitativement une courbe il s'agit de considérer les comportements asymptotiques. Plus particulièrement ici, $w \rightarrow w_0$ et tangente horizontale en $z = 0$, puis $w \sim \omega_0 z / z_R$ pour $z \gg z_R$. L'onde plane est obtenue pour $-z_R < z < z_R$ (faible rayon de courbure).

Peu de candidats ont trouvé à quel phénomène physique correspondait la limite $z \gg z_R$ (diffraction).

Q28 Le jury a accepté plusieurs réponses pour cette question. Par exemple, il est possible de croiser deux faisceaux laser ou d'utiliser une onde stationnaire en faisant se réfléchir un faisceau laser sur un miroir (ce qui piège les atomes dans les ventres de ce réseau pour $\omega \ll \omega_0$).

Q29 Aucune démonstration n'était attendue pour cette question (il était par exemple possible de répondre, "la composante tangentielle du champ électrique s'annule sur la surface miroir. La composante normale du champ magnétique s'annule sur la surface miroir.")

Q32 Peu de candidats ont abouti au résultat attendu.

Q33 Question assez bien traitée dans l'ensemble.

Q34 Le point de départ de cette question est de connaître la densité d'énergie électromagnétique

$$\rho_{\text{em}} = \underbrace{\frac{\epsilon_0 E_p^2}{2}}_{\rho_{\text{el}}} + \underbrace{\frac{B_p^2}{2\mu_0}}_{\rho_{\text{mag}}}$$

Q36 Même si la question semble "évidente" au candidat, il s'agit de prendre le temps d'écrire une phrase pour bien justifier sa réponse.

Q39 Dans ce type de question où la réponse est donnée dans l'énoncé, le jury est particulièrement attentif à ce que toutes les étapes du calcul soient présentes et à ce que les approximations soient bien justifiées.

Q42 Très peu de réponses correctes.

Q44 Le jury attache de l'importance (et donc valorise) les discussions des données expérimentales (ici la courbe de la figure 2). Les candidats sont invités à prendre le temps de traiter correctement ce type de question (et ne pas seulement se focaliser sur les questions les plus calculatoires).

Q47 Beaucoup de candidats reprennent le sujet à cette question. Nous constatons beaucoup de bonnes réponses.

Q49 Le jury accepte les réponses qui n'utilisent pas le résultat de la question 46, mais les réponses des questions 38 et 40. En effet, la question 46 suppose $\omega_0 = \omega_1$, ce qui n'est pas encore le cas au niveau de la question 49. Les réponses qui utilisent la question 46 avec $\omega_0 = \omega_1$ sont également comptées juste.

Q52 Le jury valorise les candidats qui identifient un brouillage de la figure d'interférence dû au fait que les $\lambda_n \lambda'_n$ s'ajoutent avec des phases aléatoires dès que $\tau > 1/\Delta\omega$.

Q71 Pratiquement aucun candidat n'a abordé cette question avec sérieux. Cependant, le jury n'attendait pas une discussion très quantitative des données et une discussion avec les bons ordres de grandeur aurait été particulièrement valorisée.