

Rapport des correcteurs du concours PSI Physique 2023

Jury : Matthieu Delbecq, Raphaël Lopes, Arthur Marguerite

1 Description du sujet

Le sujet de cette session est le contrôle d'électrons uniques avec ce que l'on appelle des boîtes quantiques (boîtes à électrons) qui peuvent être couplées à un résonateur micro-ondes. Ce couplage entre boîtes quantiques et résonateurs micro-ondes permet des mesures d'électrométries ultrasensibles. Ce sujet est lié à des travaux de recherche d'actualité [1].

Le sujet est divisé en trois parties. Les parties 1 et 2 introduisent les concepts de boîte à électrons et de résonateur à micro-ondes. Ces concepts sont ensuite combinés dans la partie 3 pour discuter d'une mesure expérimentale de précision. Il n'est pas nécessaire que les candidats aient obtenu les résultats des parties 1 et 2 pour aborder la partie 3.

La première partie concerne la boîte à électrons. Il s'agit ici de comprendre le caractère particulaire et ondulatoire du système. En section 1.1 le caractère particulaire est mis en évidence par la notion de charge dans un îlot capacitif. L'objectif principal est d'étudier le mouvement des charges individuelles à travers l'îlot en fonction de la différence de tension à ses extrémités. Tout est basé sur des circuits électroniques classiques. A ce stade, les candidats peuvent déjà interpréter quelques données expérimentales de l'article [1]. En section 1.2 le caractère ondulatoire est introduit en considérant que les électrons se comportent comme des ondes planes. Même si l'équation de Schrödinger est utilisée, les candidats n'ont besoin que de solides notions de physique ondulatoire. La densité de courant est introduite. En considérant la propagation entre deux diffuseurs d'électrons placés sur une ligne de longueur L , on retrouve une physique de modes propres.

La partie 2 traite la transmission dans un guide d'ondes. Les candidats étudient d'abord la ligne de transmission coaxiale qui, dans la pratique, est utilisée pour transporter le signal vers le résonateur micro-ondes. Le formalisme utilisé est appliqué au cas d'une ligne de transmission coaxiale de longueur finie, et les modes propres de ce résonateur sont déduits. Des calculs d'impédance sont utilisés pour modéliser la ligne de transmission par un résonateur RLC. Les candidats sont ensuite initiés au facteur de qualité interne qui sera utilisé dans la dernière partie.

La partie 3 conduit à une application concrète des concepts développés dans les parties 1 et 2, en particulier la possibilité d'utiliser une boîte à électrons avec un résonateur à micro-ondes pour mesurer avec une grande précision la compressibilité de la boîte à électrons, c'est-à-dire sa capacité à accumuler des charges. Les candidats sont confrontés à la mesure de phase en tant que méthode appropriée pour une mesure de haute précision (un concept applicable à tout système physique).

Ce sujet est lié à la Ref. [1], dont les résultats expérimentaux sont progressivement présentés aux candidats. Cette expérience récente a permis d'accéder pour la première fois à la dynamique de l'effet Kondo.

Référence

[1] M. M. Desjardins et al., Nature volume 545, pages71–74 (2017)

2 Remarques générales

Pour cette session, 485 copies ont été rendues, la moyenne est de 9.14 avec un écart- type de 3.67. La note la plus haute est 20, la plus basse vaut 0. L'épreuve a permis de classer de manière correcte les candidats et en particulier les meilleures copies dont 50 s'échelonnent entre 13.75 et 20. La plupart des questions ont été abordées, malgré la longueur du sujet (sur l'ensemble des copies, 90% de ces questions ont été traitées correctement au moins une fois). Beaucoup de candidat.es ont exploité à bon escient la division du sujet en sous partie indépendantes, se raccrochant notamment à la question 18 puis à la 38 puis 57, et dans une moindre mesure à la question 65. 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 ou l'élément de réponse à certaines questions était donné dans d'autres questions antérieures. Clairement, trop de candidats n'ont pas pris le temps de correctement lire chaque question et sont donc passés à côté de ces questions.
- 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.
- Le jury a relevé un manque net de notions d'ordre de grandeur dans les questions d'application numériques. Ainsi une seule copie mentionne que la dimension du circuit calculée de 10^{-26} m semble trop petite (erreur de calcul), alors que c'est onze ordre de grandeurs plus petit qu'un noyau atomique (de nombreuses copies ont fait la même application numérique erronée sans faire de remarques) !
- 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.

3 Remarques spécifiques

- Q1 : Question bien traitée dans l'ensemble mais beaucoup de candidats ne savent pas ce qu'est le travail d'une source de tension.
- Q4 : Presque aucun candidat n'a pensé au principe de minimisation de l'énergie et presque tout ceux qui ont traité cette question ont considéré à tort que l'énergie électrostatique devait être constante.
- Q5 : De nombreux candidats ayant correctement traité la Q1 n'ont pas réutilisé leur calcul du travail des sources de tension pour calculer la variation d'énergie dans les électrodes.
- Q10 : Peu de candidats ont malheureusement abordé cette question qui a pourtant été bien traitée par ceux qui l'ont abordé.
- Q12 : La réponse à cette question était donnée dans l'énoncé de la Q8. Trop peu de candidats l'ont vu.
- Q15 : Question plutôt bien traitée dans l'ensemble.
- Q16 : Il s'agissait d'utiliser l'équation de Poisson et des arguments de symétries pour montrer que les conditions aux limites dans les deux situations étaient les mêmes. Certains candidats ont tenté de calculer explicitement le champ électrique, en vain, dans les deux situations.
- Q17 : Il fallait voir dans un premier temps que la capacité plan-fil était le double de la capacité fil-fil puis faire l'application numérique. Étonnamment trop peu de candidat ont même essayé de faire l'application numérique.
- Q18 : Question plutôt bien traitée dans l'ensemble. Le jury a accepté les réponses où les amplitudes des ondes n'était pas complexes.
- Q19 : Question plutôt bien traitée dans l'ensemble mais un certain nombre de candidat ont inversé le sens du courant dans la partie à droite du diffuseur.
- Q21 : Question plutôt bien traitée dans l'ensemble. Le jury a compté juste même en absence de définition des coefficients R et T.
- Q22 à Q24 : Questions plutôt bien traitées dans l'ensemble à l'exception de la partie sur le solénoïde.
- Q25 : Le calcul se faisait à partir du résultat donné dans la question précédente et en notant que les ondes entrantes devenaient les ondes sortantes lorsque renversées du temps, et réciproquement.
- Q26 : Il fallait exploiter les propriétés de la matrice de diffusion (unitaire et symétrique) qui étaient données dans les questions précédentes.
- Q27 : Pour répondre à cette question, il faut connaître la définition de la phase d'une onde, les fonctions d'onde étant données dans l'énoncé. Les deux réponses $\pm kx$ ont été acceptées.
- Q28 : Le jury a valorisé les copies où un schéma clair et le raisonnement associé ont été produit, même si le résultat final était incorrect.
- Q30 : On pouvait répondre à cette question sans avoir fait les précédentes en remarquant qu'il s'agit d'un problème de mode stationnaire 1D avec les mêmes conditions aux limites au 2 extrémités, comme pour une corde ou un tuyau avec des ondes acoustiques.
- Q31 : Les candidats ayant abordé cette question l'ont bien traitée, il suffisait de connaître la définition de la vitesse de groupe.
- Q37 : Peu de candidats ont tenté de faire l'application numérique alors que la formule était donnée et ceux qui l'ont fait ont presque tous utilisé des Volts et non des électronvolts, trouvant une longueur de 10^{-26} m, sans aucun commentaire.

- Q38 : Les candidats se sont raccrochés à cette question qui entamait la deuxième partie. Plutôt bien réussie même si des candidats n'ont pas fait de différence entre ϵ et ϵ_0 .
- Q39-Q45 : Questions plutôt bien traitées dans l'ensemble et qui se suivent. Lorsque la question N est correctement traitée, la question $N + 1$ est également correcte en générale.
- Q46 : La justification des expressions est bien faite par les candidats qui s'y attaquent mais ils oublient ensuite très souvent que le même facteur $1/4$ qu'ils viennent de calculer apparaît pour les mêmes raisons dans le calcul des énergies stockées dans les dipôles.
- Q47 : On retrouve ici l'équation des télégraphistes.
- Q49 : Peu de candidats arrivent à faire le développement limité bien qu'ils aient la bonne expression de γ et que les hypothèses du développement limitées soient données dans l'énoncé.
- Q50-Q51 : Questions plutôt bien traitées dans l'ensemble.
- Q52 : La réponse étant donnée dans l'énoncé, le jury a été particulièrement attentif à la démonstration du résultat demandé.
- Q53 : Il fallait voir que la géométrie change (donc les conditions aux limites) mais pas les équations différentielles.
- Q54 : idem à la Q52.
- Q55 : idem à la Q30.
- Q57 : Les candidats se sont raccrochés à cette question qui a été très bien traitée dans l'ensemble.
- Q59 : Le jury a bien fait attention à la justification et a valorisé les copies qui montraient un raisonnement physique cohérent.
- Q60 : Question plutôt bien traitée dans l'ensemble.
- Q61 : Il fallait voir que le couplage se faisait par deux conducteurs qui ne se touchent pas. Peu de candidats reconnaissent ce dipôle. Trop de candidats n'ont pas justifié leur réponse, qu'elle soit correcte ou non.
- Q62 : Il s'agissait de faire un passage de deux dipôles en série à deux dipôles en parallèle. Peu de candidats ont réussi, même dans le cas général sans considérer la nature de chaque dipôle. Le jury a compté juste le calcul dans le cas général ou dans le cas particulier de la situation physique étudiée.
- Q63 : Les candidats ayant correctement répondu à la Q61 ont répondu correctement ici.
- Q64 : Le jury a valorisé les raisonnements cohérents avec les réponses précédentes, mêmes si celle-ci étaient fausses. Un port de couplage capacitif diminue le facteur de qualité, de même une résistance le ferait aussi par dissipation.
- Q65 : Il fallait voir la charge sur l'ilôt est toujours à l'équilibre sur le temps caractéristique du résonateur, ce qui a été assez peu correctement traité. Le raisonnement sur la dimension de $e^2\chi$ a été plutôt bien fait.
- Q66-Q70 : Peu de candidats ont abordé ces questions mais ceux qui l'ont fait ont plutôt bien réussi. Pourtant ces questions pouvaient être traitées sans avoir fait les questions des sous-parties précédentes. Ces questions ont mis en valeur les bonnes copies.
- Q71 : Beaucoup de candidats ont tenté de justifier en utilisant l'aspect ondulatoire de l'électron et sa probabilité de présence sur l'ilôt. Il s'agissait en fait d'un problème de moyennage temporel de la présence de l'électron sur l'ilôt qui est relié au taux de transfert de charges vers l'ilôt Γ .