

Rapport sur l'épreuve de Physique B du Concours 2023

Mesure de la constante de structure fine

(d'après un manuscrit trouvé au Laboratoire Kastler-Brossel)

(Correcteurs : Bruno Deremble, Ivan Dornic, Christophe Winisdoerffer)

Le sujet de cette épreuve permettait aux candidats d'aborder différents aspects apparaissant dans le contexte de la détermination expérimentale la plus précise à ce jour de la constante de structure fine par interférométrie atomique, en se basant pour partie sur un très bel article de recherche paru très récemment [Morel *et al*, Nature **588**, 61–65 (2020)]. Les considérations d'incertitude constituaient ainsi le fil rouge de l'épreuve, et permettait de couvrir des thématiques de mécanique, de mécanique quantique et d'optique gaussienne.

Composé de deux parties essentiellement indépendantes (comme explicitement précisé dans l'énoncé) chacune comprenant une vingtaine de questions (pour 45 au total), la grande majorité des candidats a abordé les deux tiers du sujet avec des fortunes diverses, quand la poignée encore plus congrue qu'habituellement des tous meilleurs réussissait à le traiter presque dans son intégralité très correctement, comme le montre la répartition suivante des notes sur les 1432 copies, avec une moyenne globale de 9.46 et un écart-type de 3.71 :

0 < Nb. de notes ≤ 4 : 82 (6%)

4 < Nb. de notes ≤ 8 : 449 (31%)

8 < Nb. de notes ≤ 12 : 550 (38%)

12 < Nb. de notes ≤ 16 : 276 (19%)

16 < Nb. de notes ≤ 20 : 75 (5%)

Signalons aussi que les copies provenant des centres étrangers se sont aussi révélées significativement meilleures (presque un point de moyenne en plus) que les copies ramassées en France métropolitaine.

De notre point de vue, ce très intéressant problème de physique — comme le rappelait la citation de Feynman mise en exergue dans l'introduction — ne comportait pas de difficultés techniques ou calculatoires insurmontables. En revanche, les ressources que les candidats devaient mobiliser pouvaient très fortement différer d'une question à la suivante, allant ainsi d'une simple « question de cours » à une discussion exigeant de mettre en œuvre un raisonnement beaucoup plus abouti. Le sujet exigeait donc de la part des préparateurs qu'ils se prêtent au jeu de quitter leur « zone de confort » pour réellement appréhender la physique du problème, exercice auquel seule une minorité a accepté de se livrer.

C'est pourtant sur cet effort intellectuel que le caractère discriminant du sujet s'est révélé, les meilleures copies étant celles dans lesquelles les candidats ne se sont pas satisfaits de répondre uniquement aux jalons qui permettaient à tous de reprendre pied dans le problème ou de partir à la « chasse aux points ».

Ce sujet s'est donc révélé particulièrement discriminant, en mettant en évidence les nombreuses lacunes accumulées par malheureusement beaucoup trop de candidats, même sur des points qui n'auraient dû poser aucun problème, et qui les ont fait peu à peu perdre pied au fur et à mesure qu'ils avançaient dans l'énoncé.

Avant de rentrer dans le détail des commentaires question par question, mentionnons quelques faits saillants que nous avons relevés, parfois à notre effarement :

- très peu de candidats ont été capables de discuter convenablement les problématiques d'incertitude, que ce soit en ce qui concerne l'écart normalisé entre deux valeurs « expérimentales » (dès la question préliminaire Q.1) ou pour ce qui relevait de la formule de propagation des incertitudes. Il s'agit pourtant d'une compétence mise en avant dans les « nouveaux » programmes, dont les candidats ne sauraient faire l'économie. Signalons pour finir qu'une fraction extraordinairement faible des candidats semble avoir suffisamment conscience pour le mentionner explicitement que les valeurs de de vitesse de la lumière ou celle de la constante de Planck sont fixées par la définition métrologique du système d'unités actuelles...
- dans la sous-partie « Courbure du front d'onde et impulsion d'un photon », de très nombreux candidats ont cherché à répondre à ces questions en invoquant les équations de Maxwell. Il est regrettable de constater cette confusion entre ce qui relève du caractère transverse d'une onde et les propriétés associées à une surface équiphase (discussion qui existe, indépendamment du caractère vectoriel ou scalaire de l'onde considérée) ; évoquer à cette occasion le théorème de Malus n'est à ce titre pas forcément le plus opportun, car il y est question de rayon lumineux et de chemin optique plus que de vecteur d'onde et de phase ;
- lorsqu'il est demandé aux candidats d'établir une formule dont l'expression est donnée dans le sujet, on ne saurait faire l'économie de justifier, avec la plus grande rigueur, chaque étape-clef de la démonstration ;
- faut-il encore rappeler ici qu'une copie ne peut ressembler à un brouillon, et que ce n'est pas au correcteur à chercher des éléments de réponse parmi des ratures ou à interpréter des caractères illisibles ;
- Finalement, il semble que trop de préparateurs aient fait littéralement l'impasse sur une partie du programme certes abordée en fin d'année : la mécanique quantique. Comment expliquer autrement qu'à la Q.6.a si peu d'entre eux aient été capables de retrouver (ou simplement de donner) la définition des états stationnaires en mécanique quantique ?

Partie I. Principe de la mesure de la constante de structure fine

I.1 Lien entre la constante de structure fine et la constante de Rydberg (cinq questions)

Après la question préliminaire, qui exigeait de mobiliser la notion d'écart-type normalisé faisant partie explicitement du programme de CPGE, cette partie permettait aux candidats de « découvrir » la constante de structure fine à travers le modèle de Bohr. Malgré le caractère extrêmement ressassé de ce modèle, les correcteurs ont été surpris de constater que pour de nombreux candidats, c'est le caractère non-relativiste du mouvement de l'électron qui justifie l'adjectif semi-classique et non pas la quantification du moment cinétique. Inversement, très rares sont ceux qui portent un regard critique sur leurs résultats, en discutant par exemple le signe de l'énergie mécanique ou en évoquant le théorème du viriel.

I.2 Mesure de la masse de l'atome de Rubidium 87 (une vingtaine de questions, en cinq sous-parties)

La première sous-partie (Q.4.x et Q.5) était constituée (essentiellement) de questions élémentaires, pour lesquelles des bilans d'énergie et de quantité de mouvement entre état initial et état final permettaient de donner immédiatement les réponses attendues. Mais il est important de rappeler à cette occasion que ce type

de raisonnement impose de définir au préalable le système considéré, et qu'en général, s'il n'aboutit pas, c'est très généralement parce que cette étape préliminaire a été négligée. En revanche, très peu de bonnes réponses ont été données à la question Q.4.d, et pour cause : elle nécessitait d'avoir une compréhension fine de l'effet recherché (disposer de façon « pérenne » d'une fonction d'onde « séparée »), sans lien aucun avec des considérations de sobriété énergétique ou de facilité d'effectuer la transition (un aspect très généralement incorrectement évoqué en l'associant à l'écart d'énergie mis en jeu).

La deuxième sous-partie (Q.6.x à Q.8.x) nécessitait énormément de recul pour pouvoir être réellement comprise, mais les questions étaient suffisamment bien posées pour que les candidats puissent y répondre sans forcément en avoir saisi toutes les subtilités (et notamment ce qui relève de la séparation entre degrés de liberté du centre de masse et électroniques).

Bien évidemment, les concepteurs du sujet n'attendaient pas des candidats qu'ils aient suivi tous les cours de Physique Atomique au Collège de France depuis les années 1960, ou qu'ils maîtrisent les tomes I et II du Cohen-Tannoudji ! Par contre, et comme déjà rappelé, il n'est pas acceptable qu'une notion aussi élémentaire et fondamentale que celle d'un état stationnaire ne soit pas maîtrisée, ou simplement apprise...

Si la quasi-totalité des candidats ont répondu correctement à la Q.7, la Q.8, au-delà des aspects calculatoires, s'est révélée plus discriminante car elle nécessitait de comprendre ce que signifie onde transmise ou onde réfléchie.

La question Q.9 est une question de cours élémentaire, et n'aurait dû poser de difficulté à personne, entre différence de chemin optique évident et coefficients de réflexion et de transmission *en amplitude*.

La troisième sous-partie (Q.10 à Q.14), à nouveau, exigeait une compréhension de la physique sous-jacente extrêmement pointue. Très peu de candidats ont réellement réalisé ce que signifiait l'intégrale *temporelle* qui apparaît dans l'expression de la phase cumulée le long d'une trajectoire, et invoqué en conséquence les arguments corrects permettant d'établir l'expression de la différence de phase (Q.12.b). Cette difficulté n'empêchait pas de répondre convenablement aux questions suivantes (qui faisaient notamment appel à des discussions concernant le traitement des incertitudes, problématique sur laquelle les enseignants de physique-chimie ne sauraient trop insister). En revanche, rarissimes ont été les candidats qui ont abordé avec bonheur les questions Q.14.a,b,c) pour lesquelles il fallait à nouveau avoir compris que c'est l'évolution temporelle de la phase d'une fonction d'onde qui doit être discutée et non pas le caractère conservatif du travail du poids...

Partie II. Effet systématique [...]

II.1 Désalignement du faisceau laser (une question)

Cette question élémentaire a été en général bien traitée. Rappelons qu'on attend d'un candidat qu'il prenne l'initiative d'effectuer un développement limité dans le cas où, à l'évidence, celui-ci est parfaitement adapté.

II.2 Courbure de front d'onde et impulsion d'un photon (trois questions)

Cette partie a été discutée précédemment.

II.3 Effet systématique dans le cas d'un laser de profil gaussien (cinq questions)

Cette partie, essentiellement calculatoire, n'a pas posé de difficultés majeures pour ceux qui l'ont abordée, au-delà du fait qu'elle apparaissait vers la fin du sujet, et que le manque de temps ainsi que la fatigue pouvaient commencer à se faire sentir. À cette occasion, rappelons à nouveau le fait qu'il est infiniment préférable, dans ce type de questions pour lesquelles il s'agit d'établir une formule donnée dans l'énoncé, de

prendre le temps de justifier chacune des étapes d'une unique telle démonstration plutôt que de survoler grossièrement les calculs apparaissant dans plusieurs questions.

II.4 Effet dû aux variations locales d'intensité du laser (cinq questions)

Ces questions reposaient essentiellement sur une interprétation de la figure fournie dans l'énoncé, et une « visualisation » d'une coupe de cette figure pour $z=52$ cm. Elles ont en général été convenablement abordées, même si, le temps pressant, certains candidats ont négligé de donner la justification de certaines de leurs réponses ; pour les questions qui consistent par exemple à choisir entre un signe positif ou négatif, il est évident qu'un minimum d'argumentaire est attendu.