

Physique 2006 – Corrigé

Ce corrigé est proposé par Brahim Lamine (Maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie); il a été relu par Stéphane Ravier (Professeur en CPGE) et Jean-Julien Fleck (doctorant en astrophysique à l'Université Louis Pasteur).

Ce sujet, relativement long et varié, comporte onze parties numérotées de A à K, largement indépendantes les unes des autres. Même s'il ne comporte pas de difficultés particulières d'ordre technique ou calculatoire, il contient des parties (I et J en particulier) assez difficiles qui demandent une bonne compréhension de la physique et une bonne culture scientifique.

Les neuf premières parties forment un tout cohérent aboutissant à la spectroscopie de l'effet Zeeman dans l'atome de Thomson.

- La première partie comporte uniquement des questions d'histoire des sciences sur J.J. Thomson et l'élaboration du modèle atomique.
- Le modèle de Thomson est développé dans la deuxième partie et a pour but le calcul des fréquences de résonance de l'électron.
- Dans la partie C, qui est très proche du cours, on étudie les propriétés générales d'une onde électromagnétique plane et en particulier on introduit le vecteur de Poynting.
- Vient ensuite une partie relativement simple du problème, qui s'attache à redémontrer des résultats généraux sur le rayonnement dipolaire.
- Les résultats précédents sont alors appliqués au modèle de l'atome de Thomson dans la partie E où l'on discute en particulier la conséquence sur la stabilité du modèle atomique.
- Une conséquence expérimentale importante des résultats précédents est étudiée dans la partie F dans laquelle on s'intéresse à la diffusion Rayleigh par un atome de Thomson pour expliquer le bleu du ciel.
- L'effet Zeeman est finalement abordé dans la partie G. La bonne compréhension de celle-ci demande d'avoir bien assimilé les résultats obtenus dans les parties précédentes. On montre en particulier que l'effet Zeeman crée une levée de dégénérescence des fréquences de résonance.
- La partie H porte essentiellement sur l'optique et envisage la spectroscopie de l'effet Zeeman à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air. Différents résultats classiques sur le Michelson sont demandés en début de partie, puis l'énoncé analyse la spectroscopie de Fourier pour les raies Zeeman étudiées précédemment.
- Enfin, la partie I, essentiellement de l'électronique, propose un schéma permettant d'amplifier sans bruit le signal provenant du photomultiplicateur disposé à la sortie du Michelson de la partie H. L'étude s'achève par le calcul du décalage Zeeman introduit sur une vapeur d'hydrogène soumis à un champ magnétique.

La partie J traite de l'effet Joule et de l'effet Thomson dans un conducteur. La dernière partie, quant à elle, est une partie pédagogique sur la notion de lumière et de diffraction en Terminale S. Il est conseillé de ne pas y passer plus d'une heure.

INDICATIONS

- A.3.b Écrire la conservation de l'énergie.
- B.1 Penser au théorème de Gauss.
- B.2.b Rester en coordonnées cartésiennes et déterminer $x(t)$ et $y(t)$. Reconnaître une courbe de Lissajous.
- B.3.b L'énergie potentielle d'une charge q dans un potentiel V s'écrit $E_p = qV$. Déterminer $V(r)$ à l'intérieur de l'atome et en déduire l'énergie potentielle.
- C.2.a Vérifier que l'expression proposée vérifie l'équation de propagation en \vec{E} .
- C.2.b Utiliser l'équation de Maxwell-Faraday $\vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$.
- D.2 Comparer l'effet sur la valeur de \vec{E} d'un déplacement de l'ordre de la longueur d'onde λ le long du vecteur d'onde, puis transversalement au vecteur d'onde.
- D.4 La puissance est donnée par le flux du vecteur de Poynting moyen $\langle \vec{R} \rangle$.
- E.2 Montrer à partir de l'expression du champ \vec{E} de la partie D que sur l'axe (Oz) le dipôle p_x (respectivement p_y) crée un champ selon \vec{e}_x (respectivement \vec{e}_y).
- E.3.b Exprimer p_0 en fonction de \mathcal{E}_M puis remplacer son expression dans P_R . Ne pas oublier qu'il y a deux dipôles.
- F.2.a Chercher, en notation complexe, une solution sous la forme $\underline{z}(t, x) = \underline{z}_0(x) e^{i\omega t}$.
- F.5.a Écrire que l'énergie $P_i(x)dt$ qui rentre en x est égale à l'énergie $P_i(x+dx)dt$ qui sort en $x+dx$ à laquelle il faut ajouter l'énergie rayonnée $P_{RNS} dxdt$ par la tranche d'épaisseur dx .
- F.5.c Comparer l'épaisseur d'atmosphère traversée par la lumière du soleil, en pleine journée et au coucher du soleil, avec les distances $\ell_{400 \text{ nm}}$ et $\ell_{800 \text{ nm}}$. On peut prendre comme épaisseur de l'atmosphère une valeur typique de 50 km.
- G.3.a Reconnaître que $i\dot{x} - \dot{y} = i(\dot{x} + i\dot{y})$.
- G.4 Montrer que le dipôle $p_z(t)$ ne crée pas de champ sur l'axe (Oz). Écrire le champ créé par les dipôles $p_x(t)$ et $p_y(t)$ sur l'axe (Oz). Ajouter ces deux contributions et regrouper les termes qui ont la même fréquence. Conclure.
- H.3.a Faire le symétrique du miroir M_1 par rapport à la séparatrice S_p .
- H.3.b Considérer la valeur de l'ordre au centre, puis déterminer l'angle d'incidence correspondant au premier ordre entier en partant de l'ordre au centre.
- H.5.c Utiliser la même méthode qu'à la question H.4.b.
- I.2.b Utiliser le théorème de Millman aux entrées + et - de l'AO3.
- I.3.b Comparer RC au temps t_R .
- I.3.c L'AO est en régime saturé. Écrire les conditions pour avoir $s_4 = \pm V_{\text{sat}}$.
- J.1.c Écrire que la variation d'énergie d'un élément de volume $d\tau$ est la somme de l'énergie échangée avec l'extérieur et de l'énergie absorbée par effet Joule.
- J.3.a Reprendre le bilan précédent en ajoutant la puissance échangée par effet Thomson, qui s'écrit en corrigeant la faute de l'énoncé, $dP_T = -hIdT$ avec $h > 0$ pour le cuivre lorsque I circule dans le sens des températures croissantes.

A. LE MODÈLE ATOMIQUE DE THOMSON

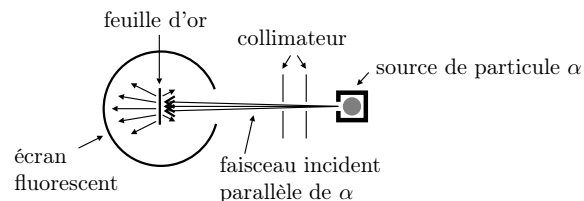
A.1 Les principaux travaux de Joseph John Thomson (1856-1940), disciple de Maxwell, se situent vers 1900 et concernent l'étude de la conduction dans les gaz et la structure des atomes. On peut citer les principales découvertes de J.J. Thomson :

- 1897 – découverte de l'électron, en s'appuyant sur des travaux du Français Jean Perrin. Il obtient le prix Nobel en 1906 pour cette découverte ;
- 1904 – mesure de la charge de l'électron ;
- 1907 – mise au point du modèle de Thomson étudié dans ce problème ;
- 1913 – mise en évidence du principe du spectromètre de masse. Le développement d'un vrai instrument sera réalisé par Francis William Aston en 1919.

A.2 Même si la notion remonte au Grec Démocrite, cinq siècles avant J.-C., c'est la découverte de l'électron, par J.J. Thomson, qui va profondément modifier le concept de l'atome après 2400 ans de débats scientifiques houleux. Les développements du modèle atomique vont ensuite rapidement se succéder pour aboutir au modèle actuel :

- 1911 – Ernest Rutherford, disciple de Thomson, réfute le modèle de son maître en mettant en évidence expérimentalement l'existence d'un noyau dont la taille est beaucoup plus petite que celle de l'atome (voir la question suivante). Il développe le modèle planétaire classique de l'atome.
- 1913 – Le physicien danois Niels Bohr affine le modèle planétaire en introduisant une quantification du moment cinétique des électrons, qui implique une quantification des orbites. Son modèle résout le problème de stabilité de l'atome de Rutherford et rend compte des spectres observés expérimentalement sur l'atome d'hydrogène. Il est amélioré par Sommerfeld en 1916, puis par Uhlenbeck, Goudsmit et Pauli en 1926.
- 1919 – Découverte du proton par Rutherford.
- 1926 – Edwin Schrödinger résout, à l'aide de la mécanique quantique naissante, le problème de l'atome d'hydrogène. L'électron est considéré comme un nuage délocalisé en couche autour du noyau. On peut considérer que la conception de l'atome est globalement comprise à partir de cette date et constitue le modèle communément admis aujourd'hui.
- 1932 – Découverte du neutron par Chadwick. Cette découverte ne révolutionne pas la notion de l'atome mais ouvre la voie de la physique sub-atomique.

A.3.a L'expérience de Rutherford consiste à bombarder une feuille d'or à l'aide de particules α émises par une source radioactive.

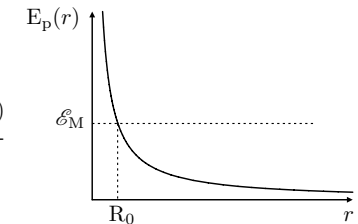


Rutherford observe qu'une très large partie du jet passe à travers la feuille d'or en se trouvant simplement dévié dans toutes les directions, et qu'une faible partie seulement fait demi-tour. Il en déduit que les atomes sont essentiellement faits de vide.

L'étude de la distribution angulaire des particules α déviées a permis de montrer que la répartition de charge dans l'atome est quasi-ponctuelle, avec un potentiel en $1/r$, en contradiction totale avec le modèle de Thomson qui prévoit un potentiel en r^2 , comme on le voit plus loin dans ce problème.

A.3.b L'énergie mécanique $\mathcal{E}_M = 7,7$ MeV des particules α se conserve. À l'endroit où la particule α fait demi-tour, son énergie mécanique se réduit à l'énergie potentielle électrostatique puisque son énergie cinétique est nulle. La particule α étant constituée de deux protons et deux neutrons, son énergie potentielle électrostatique d'interaction avec le champ créé par un noyau d'or situé à une distance r s'écrit

$$E_p(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(2e) \times (Ze)}{r}$$



La conservation de l'énergie $\mathcal{E}_M = E_p(R_0)$ nous permet d'obtenir l'expression de la distance minimale d'approche R_0 :

$$R_0 = \frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0\mathcal{E}_M} \approx 3,0 \times 10^{-14} \text{ m}$$

soit une distance d'approche $R_0 \approx 30$ fm.

Les particules α s'approchent d'une distance nettement plus petite que la taille d'un atome qui est de l'ordre du rayon de Bohr :

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} \approx 0,53 \text{ \AA}$$

Ce résultat est en accord avec le fait que le noyau est beaucoup plus petit que la taille de l'atome en lui-même.