

Questionnements et découvertes
autour de l'atome le plus simple de l'univers

Filière MP

Partie I- Modèle historique de Bohr de l'atome d'hydrogène (1913)

Q 1. Force électrique :

$$\vec{f}_e = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r$$

Q 2. Théorème de quantité de mouvement (avec $\vec{v} = v \vec{u}_\theta$) :

$$m_e \vec{a}_e = m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r = m_e \frac{dv}{dt} \vec{u}_\theta - m_e \frac{v^2}{r} \vec{u}_r$$

La projection suivant \vec{u}_r donne :

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r m_e}} \quad (1)$$

Q 3.

$$\vec{L} = \vec{OM} \wedge m_e \vec{v} = r \vec{u}_r \wedge m_e v \vec{u}_\theta = m_e v r \vec{u}_z \Rightarrow L = m_e v r$$

soit :

$$L = \sqrt{\frac{m_e e^2 r}{4\pi\epsilon_0}}$$

Q 4. Énergie potentielle :

$$\vec{f}_e = -\vec{\text{grad}} E_p = -\frac{dE_p}{dr} \vec{u}_r \Rightarrow E_p(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

L'énergie cinétique : $E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$ et d'après l'équation (1), on trouve :

$$E_c = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{E_p}{2}$$

Q 5. $L = n\hbar$, soit :

$$L^2 = \frac{m_e e^2 r_n}{4\pi\epsilon_0} = n^2 \hbar^2 \Rightarrow r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} n^2 = a_B n^2 \quad \text{avec} \quad a_B = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$$

Q 6. Énergie mécanique :

$$E_n = E_c + E_p = \frac{E_p}{2} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 a_B} \times \frac{1}{n^2} = -\frac{R_y}{n^2} \quad \text{avec} \quad R_y = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 a_B}$$

Q 7.

$$a_B = 52,919 \text{ pm} \quad \text{et} \quad R_y = 13,606 \text{ eV}$$

Q 8.

$$v_n = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n m_e}} = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_B m_e}} \times \frac{1}{n} = \sqrt{\frac{2R_y}{m_e}} \times \frac{1}{n}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{R_y}{m_e}} = 2,1877 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et} \quad \frac{v_1}{c} \ll 1 \Rightarrow \text{Le mouvement de l'électron est non relativiste.}$$

Q 17.

- Au niveau $n = 2$ correspond 2 sous-niveaux d'énergie : $E_{2,0}$ et $E_{2,1}$.
- Au niveau $n = 3$ correspond 3 sous-niveaux d'énergie : $E_{3,0}$, $E_{3,1}$ et $E_{3,2}$.

Q 18.

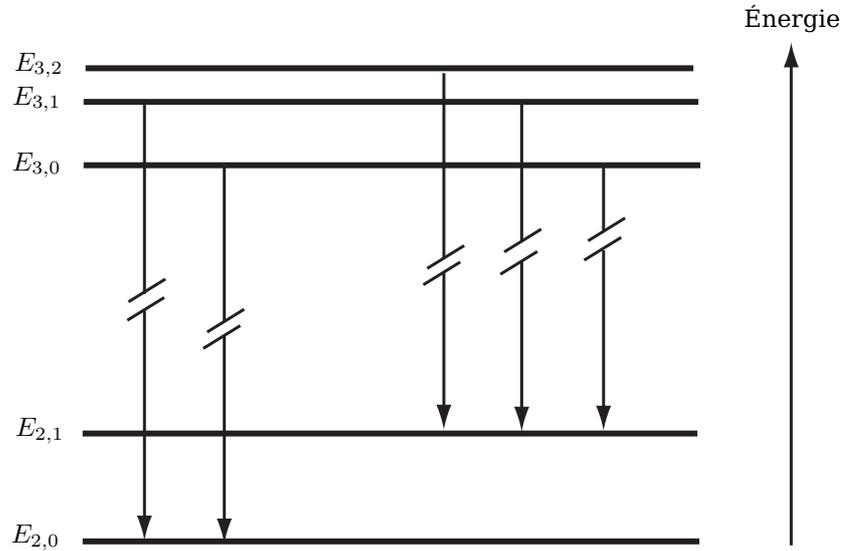


Figure 1 Structure fine simplifiée de la raie H_α

$$E_{n,l} = -\frac{R_y}{n^2} \left(1 + \frac{\alpha^2}{n^2} \left(\frac{n}{n+l} - \frac{3}{4} \right) \right)$$

$$\Delta E_f = E_{2,1} - E_{2,0} = -\frac{R_y}{4} \left(-\frac{\alpha^2}{4} \right) = \boxed{\frac{\alpha^2 R_y}{16} = 4,52 \cdot 10^{-5} \text{ eV}}$$

Q 19.

$$E_{3,1} - E_{2,0} = \frac{hc}{\lambda_a} = hc\sigma_a \quad \text{et} \quad E_{3,1} - E_{2,1} = \frac{hc}{\lambda_b} = hc\sigma_b$$

$$\Rightarrow hc(\sigma_a - \sigma_b) = E_{2,1} - E_{2,0} = \Delta E_f \quad \text{ou} \quad \boxed{\Delta\sigma = \frac{\Delta E_f}{hc} = 0,364 \text{ cm}^{-1}}$$

Q 20.

$$\lambda_m = \frac{1}{\sigma_m} = 656,3 \text{ nm} , \text{ il s'agit de la couleur ROUGE}$$

L'écart relatif :

$$\boxed{\frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_m} = 2,36 \cdot 10^{-5}}$$

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_m} \right)_{\text{doublet sodium}} = 10,2 \cdot 10^{-4} > \frac{\Delta\sigma_{exp}}{\sigma_m}$$

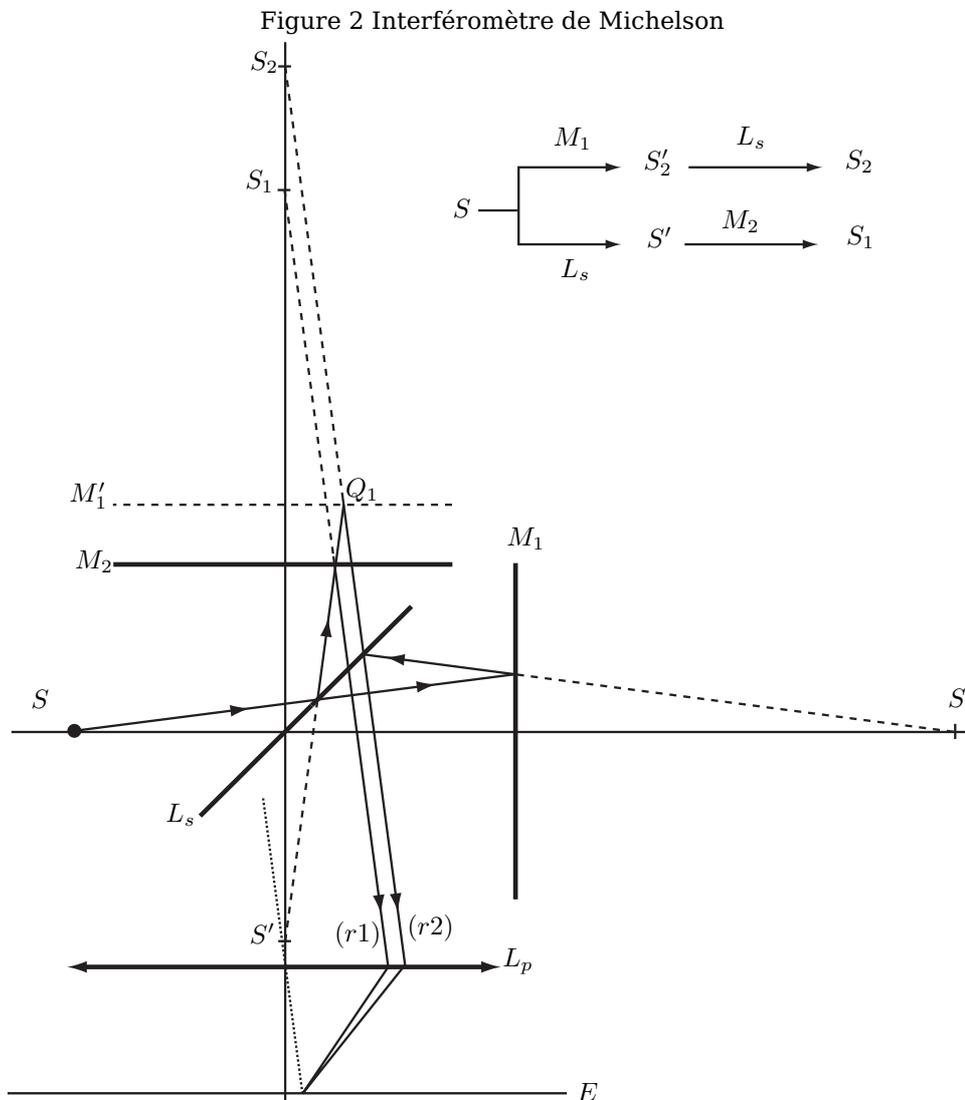
Partie V- Résolution interférométrique d'un doublet spectral

Q 21. Les lames qui compose L_s sont :

- la séparatrice (*fixe*) :
 - permet d'assurer la division d'amplitude afin d'avoir un coefficient de transmission et de réflexion égaux à $1/2$.
 - est une lame semi-réfléchissante (*semi-argentée*).
 -
- la compensatrice (*mobile-réglable*) :
 - est de même épaisseur que la séparatrice (5 à 10 mm).

- (parallèle à la séparatrice) permet de compenser la différence de marche supplémentaire dûs aux réflexions sur les miroirs et la séparatrice.

Q 22. Q 23.



Q 24. Les franges d'interférences observées sur l'écran sont des anneaux concentriques ! On les appelle les franges d'égale inclinaison ou de Haidinger.

Q 25. Différence de marche :

$$\delta(C) = 2e$$

Q 26.

$$p_1 = \frac{\delta}{\lambda_1} = \delta\sigma_1 \quad \text{et} \quad p_2 = \frac{\delta}{\lambda_2} = \delta\sigma_2$$

Q 27. Il ya brouillage pour $p_1 - p_2$ est un-demi entier ! On pose $p_1 - p_2 = n + 1/2$ avec $n \in \mathbb{N}$.

$$p_1 - p_2 = \delta_n(\sigma_1 - \sigma_2) = \delta_n \Delta\sigma = n + \frac{1}{2}$$

$$D_\delta = \delta_{n+1} - \delta_n = \frac{1}{\Delta\sigma}$$

◇ L'état (2, 1, 1/2) :

$$E_{SO,2,1,1/2} = -\frac{g_e \alpha^2 R_y}{24}$$

◇ L'état (2, 1, 3/2) :

$$E_{SO,2,1,3/2} = \frac{g_e \alpha^2 R_y}{48}$$

◇ $E_{SO,n=2}^{min} = E_{SO,2,1,1/2}$ et $E_{SO,n=2}^{max} = E_{SO,2,1,3/2}$

$$\Delta E_{SO,n=2} = \frac{g_e \alpha^2 R_y}{16}$$

Après l'analyse de Thomas :

$$\Delta E_{SO,n=2} = \frac{1}{2} g_e \frac{\alpha^2 R_y}{16} = \frac{\alpha^2 R_y}{16} = \Delta E_f$$

Partie VII- Encore plus fin (!) : la structure hyperfine du niveau fondamental de l'atome d'hydrogène

Q 36. Pour $\lambda = 21,1 \text{ cm}$:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = 1421,8 \text{ MHz} ; \quad (\text{choix de } 1420 \text{ MHz})$$

L'écart en énergie :

$$\Delta E_{hf \text{ exp}} = h\nu = 588,0 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$$

Q 37. L'unité du moment magnétique dans le Système International est $\text{A} \cdot \text{m}^2$.

$$\mu_B = g_e \frac{e\hbar}{4m_e} = 0,929 \cdot 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad \text{et} \quad \mu_N = g_p \frac{e\hbar}{4m_p} = 1,41 \cdot 10^{-26} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Q 38. Le champ magnétique ressenti par l'électron dû au proton par son moment magnétique de spin (**Document 1-** avec $\theta = \pi/2$ et $\vec{u}_\theta = -\vec{u}_z$) :

$$\vec{B}_{p \rightarrow e} = \frac{\mu_o \mu_N}{4\pi a_B^3} (-\vec{u}_z)$$

La transition quantique est entre les deux états :

○ État de spins parallèles. L'énergie potentielle magnétique :

$$E_{para} = -\vec{\mu}_B \cdot \vec{B}_{p \rightarrow e} = \frac{\mu_o \mu_N \mu_B}{4\pi a_B^3}$$

○ État de spins antiparallèles. L'énergie potentielle magnétique :

$$E_{anti} = -\vec{\mu}_B \cdot \vec{B}_{p \rightarrow e} = -\frac{\mu_o \mu_N \mu_B}{4\pi a_B^3}$$

L'écart énergétique entre les deux niveaux hyperfines... :

$$\Delta E_{hf, \text{classique}} = E_{para} - E_{anti} = \frac{\mu_o \mu_N \mu_B}{2\pi a_B^3}$$

Q 39.

$$\Delta E_{hf} = \frac{16}{3} \Delta E_{hf, \text{classique}} = 0,094281973 \cdot 10^{-23} \text{ J} = 588,0 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$$

La valeur trouvée est bien cohérente avec celle de $\Delta E_{hf, \text{exp}}$!!

Q 40. L'exemple de transition hyperfine intervenant dans la définition d'une unité SI est celle entre les deux niveaux hyperfines de l'état fondamental de Césium ^{133}Cs : La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à une telle transition, soit une fréquence de 9192631770 Hz.