

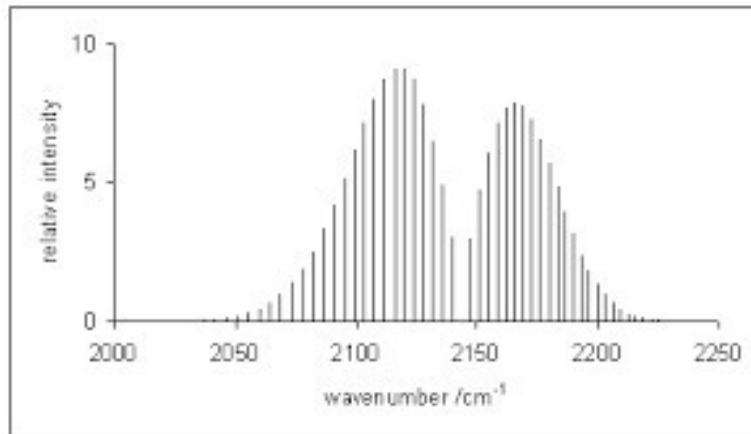
Examen 2019 s2: Physique Atomique et Moléculaire

Jeudi 11 juin 2020

-- TOUT DOCUMENT ET OBJET CONNECTÉ INTERDIT
LES DONNEES NUMERIQUES SONT EN FIN DE TEXTE --

1. Question de cours - spectroscopie ro-vibrationnelle de la molécule CO

1. Expliquer à l'aide d'un schéma énergétique l'allure du spectre donné ci-dessous.
2. Quelle quantité peut être estimée à partir de la séparation des raies ? Donner l'expression littérale correspondante.
3. Donner une explication à la faible différence de séparation des raies autour de 2050 cm^{-1} et autour de 2200 cm^{-1} .
4. Expliquer comment un tel spectre peut être utilisé pour estimer la température de l'échantillon, et donner l'expression littérale correspondante.



2. Structure hyperfine sur les états $n = 2$ du deutérium

Le deutérium est un isotope de l'hydrogène dont le noyau est composé d'un proton et d'un neutron. Le spin nucléaire est égal à 1.

1. Etablir l'expression générale de la correction énergétique due à l'interaction hyperfine à appliquer à un niveau de structure fine (n, l, j donnés). L'interaction hyperfine $H_{HF} = A \vec{I} \cdot \vec{J}$ est considérée comme une perturbation, \vec{I} désignant le spin nucléaire. On définit le moment cinétique total \vec{F} tel que $\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$.
2. Faire le recensement des états $n = 2$ en tenant compte de la structure hyperfine. Calculer les valeurs de $A \hbar^2$ en MHz .
3. Calculer les valeurs numériques -en MHz - de la correction énergétique associée à l'interaction hyperfine pour les états $n = 2$.
4. Pour les états $n = 2$ de même j mais de l différents, il existe un écart énergétique de 1059 MHz -effet Lamb-, essentiellement dû à l'augmentation d'énergie de l'état l le plus faible. En tenant compte de tous les effets énoncés ci-dessus – effets de structures fine, hyperfine et effet Lamb-, tracer le diagramme d'énergie correspondant aux états $n = 2$

recensés au 2. Faire un schéma le plus clair possible même s'il n'est pas possible de respecter totalement les échelles.

On donne :

$$A\hbar^2 (\text{MHz}) \approx 81,7 \frac{1}{j(j+1)n^3(l+1/2)} \text{ pour l'atome de deutérium,}$$

$$\text{Correction de structure fine } \Delta E_{SF} = \frac{-mc^2 Z^4 \alpha^4}{2n^3} \left[\frac{2}{2j+1} - \frac{3}{4n} \right], \text{ avec } \alpha \approx 1/137,$$

$$\frac{mc^2 \alpha^2}{2} \approx 13,6 \text{ eV} \approx 3,29 \cdot 10^9 \text{ MHz.}$$

3. Effet Zeeman orbital

On considère un atome d'hydrogène placé dans un champ magnétique uniforme B orienté le long de l'axe Oz : $\mathbf{B} = B \mathbf{u}_z$, où \mathbf{u}_z est le vecteur unitaire selon Oz . On s'intéresse dans cet exercice à la perturbation induite par ce champ magnétique sur les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. On néglige tout effet lié au spin de l'électron ou du proton.

On modélise l'interaction entre l'atome et le champ magnétique en utilisant l'analogie classique d'une boucle de courant. Cette analogie revient à poser la proportionnalité entre l'opérateur moment cinétique de l'électron \mathbf{L} et son opérateur moment magnétique $\boldsymbol{\mu}$, selon $\boldsymbol{\mu} = (-q/2m_e) \mathbf{L}$ où $-q$ est la charge de l'électron et m_e sa masse. Le Hamiltonien décrivant l'interaction magnétique s'écrit : $H = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$.

1. Quelle est (à l'ordre 1 en champ) la modification de l'état fondamental $1s$ de l'atome d'hydrogène, d'énergie $E = -E_I$, avec $E_I = 13,6 \text{ eV}$?
2. Quelle est (à l'ordre 1 en champ) la modification du premier niveau excité, d'énergie $E = -E_I/4$? On rappellera la dégénérescence de ce niveau d'énergie en absence de champ magnétique. Les dégénérescences sont-elles complètement levées par la présence du champ B ?
3. Comment ces résultats sont-ils modifiés si le champ \mathbf{B} est aligné avec l'axe Ox ?
4. On prend $B = 0,1 \text{ T}$. Estimer les déplacements d'énergie dus au champ magnétique. Comment ces déplacements se comparent-ils à l'énergie typique du problème coulombien E_I ? Justifier l'utilisation de la théorie des perturbations.
5. Quand un atome d'hydrogène est préparé dans un des états $|n = 2, \ell = 1, m = 0, \pm 1 \rangle$, il peut tomber sur l'état fondamental $|n = 1, \ell = 0, m = 0 \rangle$ en émettant un photon d'énergie $3E_I/4$. Comment cette raie spectrale est-elle modifiée quand on applique le champ magnétique ?