

# Examen 2023: Physique Atomique et Moléculaire

Mercredi 12 décembre 2023

-- TOUT DOCUMENT ET OBJET CONNECTÉ EST INTERDIT --

## 1. Question de cours

1. Quel est le rôle des coefficients de Clebsch-Gordan en physique atomique ?
2. Décrire l'origine de la raie d'émission à 21 cm de l'atome d'hydrogène. Préciser les nombres quantiques associés à la base propre du Hamiltonien correctif impliqué, après avoir explicité ce dernier. Calculer ces nombres quantiques et indiquer d'éventuelles dégénérescences. Le préfacteur du terme correctif vaut  $5,9 \times 10^{-6}$  eV ; calculer la fréquence des photons dans la transition radiative. Donner un exemple d'application.
3. Expliquer le rôle de l'écrantage dans les systèmes atomiques polyélectroniques.

## 2. Facteur de Landé

Soit  $\{|n, l, j, m_j\rangle\}$  le système de vecteurs propres communs aux opérateurs  $\vec{L}^2$ ,  $\vec{J}^2$ ,  $\vec{S}^2$  et  $J_z$ . On se propose de calculer les éléments matriciels diagonaux de l'opérateur  $S_z$  dans ce système de vecteurs propres.

1. Après avoir explicité la nature physique de  $\vec{J}$ , montrer que ce vecteur est conservatif.
2. Si l'on représente classiquement le spin  $\vec{S}$  par un vecteur, ce dernier précesse autour de  $\vec{J}$  dans un état non perturbé. Par raison de symétrie, la valeur moyenne  $\langle \vec{S} \rangle$  de  $\vec{S}$  est un vecteur dirigé selon  $\vec{J}$ . Exprimer  $\langle \vec{S} \rangle$  en fonction de  $\vec{J}$ .
3. On pose  $\hbar m_j (g - 1) = \langle n, l, j, m_j | S_z | n, l, j, m_j \rangle$ , avec  $g$  le facteur de Landé. Le déterminer en fonction de  $j$ ,  $l$  et  $s$ .

## 3. Effet Zeeman orbital

On considère un atome d'hydrogène  $H$  placé dans un champ magnétique uniforme  $B$  orienté le long de l'axe  $Oz$  :  $\vec{B} = B \vec{u}_z$ , où  $\vec{u}_z$  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  $\vec{L}$  et son opérateur moment magnétique  $\vec{\mu}$ , selon  $\vec{\mu} = (-q/2m_e) \vec{L}$  où  $-q$  est la charge de l'électron et  $m_e$  sa masse. Le hamiltonien décrivant l'interaction magnétique s'écrit :  $H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ .

1. Quelle est (à l'ordre 1 en  $B$ ) la modification de l'état fondamental  $1s$  de l'atome d'hydrogène, d'énergie  $E = -E_I$ , avec  $E_I = 13.6$  eV ?
2. Quelle est (à l'ordre 1 en  $B$ ) 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  $\vec{B}$  ?
3. Comment ces résultats sont-ils modifiés si le champ  $\vec{B}$  est aligné avec l'axe  $Ox$  ?

(T.S.V.P)

4. On prend  $B = 0.1$  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.

#### 4. Rotateurs rigides

Les constantes de rotation de  $H^{19}F$ ,  $H^{35}Cl$  et  $H^{80}Br$  sont respectivement égales à 20,956, 10,593 et 8,465  $\text{cm}^{-1}$ .

1. Evaluer leurs moments d'inertie puis leurs masses réduites.
2. En déduire les longueurs de liaison  $HX$ , avec respectivement  $X = F$ ,  $^{35}Cl$  et  $^{80}Br$ .
3. A 1000K, quelles sont les populations relatives des niveaux  $J = 4$  et  $J = 5$  ?
4. Pour quelle valeur de  $J$  l'intensité de raie est-elle maximale à 1000 K ?

#### Données :

Constantes de Planck :  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J.s ; de Boltzmann :  $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$   $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$  ; charge élémentaire  $q = 1,602 \times 10^{-19}$  C ; masse de l'électron :  $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$  kg.

Conversion  $\text{cm}^{-1}/\text{eV}$  :  $1 \text{ eV} = 806573 \text{ m}^{-1}$  ;  $1 \text{ u} = 1,661 \times 10^{-27}$  kg.