

Université de Nice Sophia-Antipolis
Master 1: Optique - IMAG2E
Anders Kastberg – Fabien Kéfélian

EXAMEN

Physique atomique
2015–10–20, at 9:00–13:00

Aides autorisées:

- Photocopied pages from “Physics Handbook” (Nordling/Österman)
 - Calculator
-
- Commencer chaque exercice sur une nouvelle page.
 - Ecrire votre nom sur chaque feuille.
 - Les réponses doivent être présentées de façon claire et bien lisible.
 - Tous les raisonnements doivent être expliqués.

Good Luck!

- 1** Dans les sources d'ions extrêmes, des ions de charge très importante peuvent être produits. On considère une telle source, où des atomes d'uranium ont été débarrassés de tous leurs électrons sauf un.
- a. Quelle est l'énergie (en eV) nécessaire pour arracher le dernier électron ?
 - b. Si l'on souhaite arracher cet électron avec une radiation électromagnétique, quelle est la longueur d'onde maximum que l'on peut utiliser.
 - c. On veut générer cette radiation avec une source à rayon X classique. Donner un exemple d'élément pouvant constituer la cathode de la source.
 - d. Si l'on souhaite que l'ion émette de la lumière visible (400 nm – 700 nm), à quel niveau d'énergie (nombre quantique principal) doit-on préalablement l'exciter ?
 - e. Donner pour cet ion trois raies spectrales dans le domaine visible, des couleurs différents. Indiquer pour chaque longueur d'onde les niveaux électroniques qui sont impliqués dans la transition.
-

2 Le positronium est un système formé d'un électron et d'un positron. Le positron est l'antiparticule associée à l'électron. Il possède la même masse, le même spin, le même facteur g de spin (cf. ci-dessous) que l'électron, mais sa charge est opposée.

- a. Décrire d'un point de vue classique la différence entre un atome d'hydrogène (de masse d'environ 1 u) et un système positronium. Préciser en particulier le mouvement interne des particules constituant ces deux systèmes.
- b. Comparer à partir de vos connaissances sur l'hydrogène les niveaux d'énergie du positronium et de l'hydrogène. Que pouvez vous dire des fonctions d'ondes ?
- c. Rappeler l'origine physique de la structure hyperfine dans un atome tel que l'hydrogène.

On rappelle que le moment magnétique de spin μ_S d'une particule est relié au spin $\vec{S}$ de la particule par la relation :

$$\vec{\mu}_S = g \frac{q}{2m} \vec{S},$$

où q est la charge de la particule, m sa masse et g est un facteur sans dimension propre à chaque particule appelé facteur g de spin. Pour l'électron $g_e = -2$ et pour le proton $g_p = 5.6$. On appelle $\gamma = q/2m$ le rapport gyromagnétique de la particule. On rappelle également que le proton est une particule de spin $1/2$.

Pour l'électron dans un état s d'un atome d'hydrogène, le Hamiltonien de la structure hyperfine a pour expression :

$$H_{\text{hfs}} = \frac{2\mu_0}{3} g_I \gamma_N \vec{I} g_e \gamma_e |\psi_{ns}(0)|^2 \vec{s},$$

avec g_I le facteur g de spin du noyau, $\vec{I}$ le spin du noyau, γ_N le rapport gyromagnétique du noyau, g_e le facteur g de spin de l'électron, γ_e le rapport gyromagnétique de l'électron, $\vec{s}$ le spin de l'électron et ψ_{ns} la fonction d'onde de l'électron.

Ceci conduit à un écartement en énergie des niveaux donné par l'expression

$$E_{\text{hfs}} = \frac{A_{\text{hfs}}}{2} [F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)],$$

avec

$$A_{\text{hfs}} = \frac{2\mu_0}{3\pi} g_e \gamma_e g_I \gamma_N \left(a_0 \frac{M_N}{M_N + m_p} n \right)^{-3}$$

- d. Sachant que l'écartement hyperfin du niveau fondamental de l'isotope le plus répandu de l'hydrogène correspond à une longueur d'onde de 21 cm, à quelle longueur d'onde pourrait on s'attendre pour l'écartement hyperfin du niveau fondamental du positronium.

- e. La figure ci-dessous représente la structure des niveaux d'énergie du positronium pour $n = 2$. Avec celui de quel atome ce diagramme présente des similitudes ?
- f. Expliquer la raison de ces similitudes, repérer les différences et préciser la signification particulière de la notation spectroscopique utilisée ici pour le positronium.

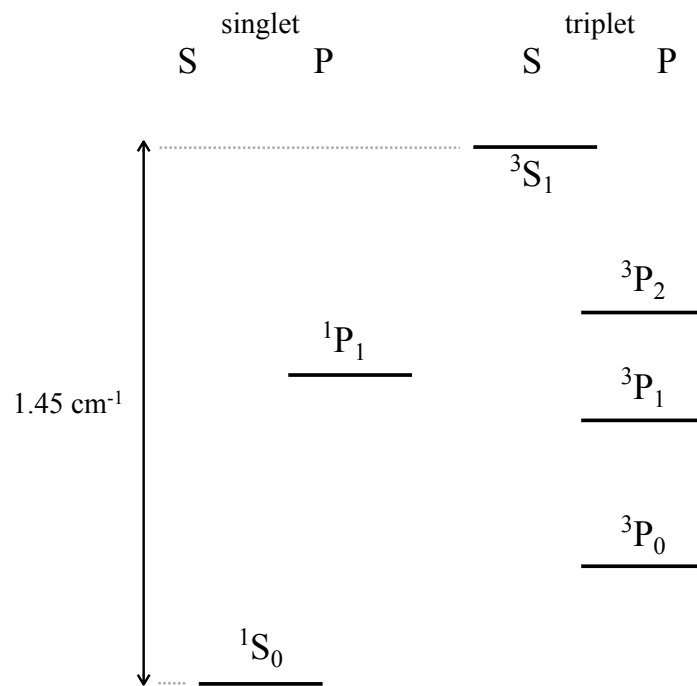


Figure 1: Niveaux d'énergie du positronium pour $n = 2$.

- 3** Une étude spectroscopique minutieuse de l'atome de cadmium neutre est faite à l'aide d'un spectromètre UV. Avant l'expérience, on connaît l'énergie approximative des niveaux les plus bas (sans la structure fine), voir tableau 1.

Table 1: Energy levels in Cd

configuration	term	level (eV)
$4d^{10}5s^2$	1S	0.0
$4d^{10}5s5p$	$^3P^o$	3.9
$4d^{10}5s5p$	$^1P^o$	5.4
$4d^{10}5s6s$	3S	6.4
$4d^{10}5s6s$	1S	6.6
$4d^{10}5s6p$	$^3P^o$	7.2
$4d^{10}5s5d$	1D	7.3
$4d^{10}5s5d$	3D	7.4
$4d^{10}5s6p$	$^1P^o$	7.4
$4d^{10}5s7s$	3S	7.8
$4d^{10}5s7s$	1S	7.8
$4d^{10}5s7p$	$^3P^o$	8.1
$4d^{10}5s6d$	1D	8.1
$4d^{10}5s6d$	3D	8.1
$4d^{10}5s7p$	$^1P^o$	8.1

Le spectre de fluorescence est fait en deux étapes. Premièrement, le spectre d'émission est observé avec un spectromètre basse résolution qui possède une plage de 200 nm à 400 nm. Le spectre obtenu, en cm^{-1} , est présenté sur la figure 2. On peut y voir dix raies spectrales. Elles ont été repérées avec les lettres de a à j. Dans ce premier spectre, il est possible que la structure fine puisse être résolue dans certains cas, et ne pas dans d'autres.

- Le tableau présente 15 niveaux. Lesquels seront divisés en plusieurs niveaux de structure fine ? Indiquer dans ces cas la notation spectroscopique de chacun de ces niveaux de structure fine.
- Parmi les 14 niveaux excités, lesquels possèdent une transition dipolaire électrique permise avec le niveau fondamental ?
- Parmi ces transitions, lesquelles devraient être visibles par le spectromètre utilisé ?
- Parmi les 13 niveaux situés au dessus du premier terme excité ($^3P^o$), lesquels possèdent une transition dipolaire électrique permise avec $^3P^o$?

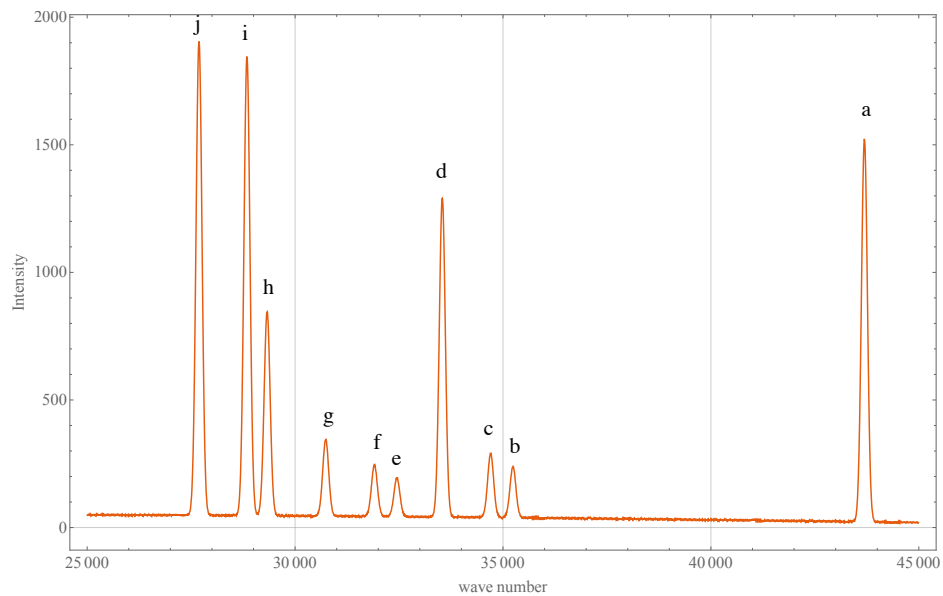


Figure 2: Spectre basse résolution, de 200 nm à 400 nm. L'axe horizontal est en cm^{-1} . L'axe vertical est l'intensité détectée en unité arbitraire.

- e. Parmi ces transitions, lesquelles devraient être visibles par le spectromètre utilisé ?
- f. Pour les 10 raies spectrales, identifier les termes des niveaux haut et bas de la transition correspondante.
- g. Peut-on déjà voir de la structure fine dans ce spectre ? Dans ce cas, indiquer laquelle et contrôler la validité du couplage LS dans le multiplet en question.

Dans une seconde étape, chacune des dix raies spectrales est étudiée avec un système possédant une bien meilleure résolution. Les spectres obtenus sont présentés sur la figure 3.

- h. Utiliser ces spectres pour améliorer la précision du tableau 1 pour tous les niveaux pour lesquels cela est possible.
 - i. Dans les cas où la structure fine est résolue, contrôler la validité de l'approximation du couplage LS.
-

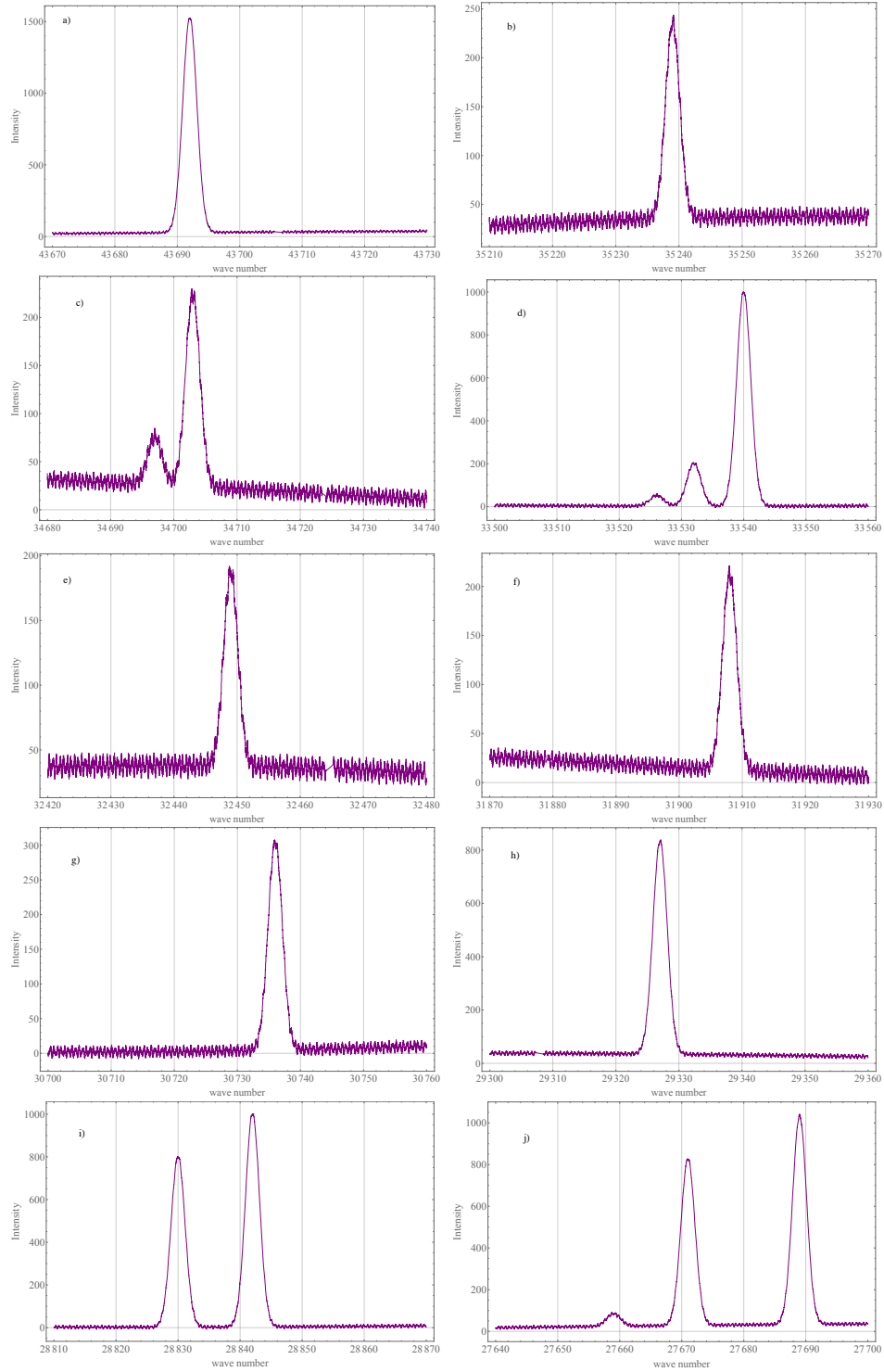


Figure 3: Spectres à haute résolution, correspondant aux pics de la figure 2. Les axes horizontaux sont en cm^{-1} . Les axes verticaux représentent l'intensité détectée en unité arbitraire.