

### III. Etude de l'atome d'hydrogène et des atomes hydrogénoïdes

#### 1. Le spectre de l'hydrogène

Si on provoque une décharge électrique dans une atmosphère raréfiée d'hydrogène, on observe l'émission d'une lumière. Cette lumière analysée au spectrographe peut être séparée en un certain nombre de fréquences monochromatiques. Chacune de ces fréquences donne sur la plaque photographique une image de la fente d'entrée qui apparaît sous forme d'une raie. Ce spectre de raies est caractéristique de l'élément. Ces mêmes raies ou fréquences apparaissent également en absorption (raies noires sur fond continu), dans le spectre du soleil par exemple. Ces raies ont l'avantage d'être naturellement groupées en séries; ce qui a facilité leur analyse. Les fréquences de chaque raie, dans chaque série, ont pu être liées par une formule empirique :

Série de LYMAN (ultraviolet) :  $\nu = c R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  où  $n > 1$ ,

Série de BALMER (visible) :  $\nu = c R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  où  $n > 2$ ,

Série de PASCHEN (infrarouge) :  $\nu = c R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  où  $n > 3$ ,

Lorsque  $n > 4$ , c'est la série de BRACKETT; lorsque  $n > 5$ , on a la série de PFUND et lorsque  $n > 6$ , c'est la série de HUMPHREYS.

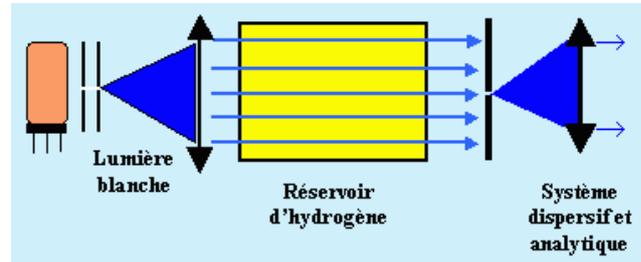
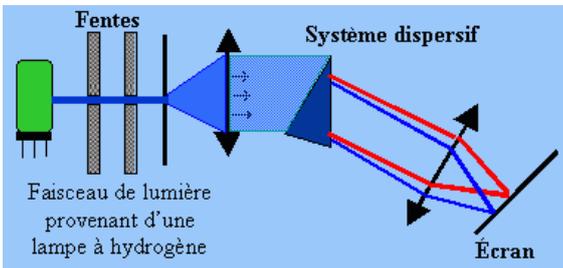


Figure 1. Observation du spectre d'émission de l'hydrogène.

Figure 2. Observation du spectre de l'hydrogène en absorption.

En émission, le spectre est obtenu en faisant passer une décharge électrique dans de l'hydrogène sous basse pression (figure 1). Dans le cas de l'absorption, une lumière blanche (donc de type fond continu) est transmise à travers de l'hydrogène gazeux (figure 2).

Le spectre complet de l'hydrogène peut donc se représenter par la formule empirique (figure 3) :

$$\nu_{mn} = c R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1)$$

Dans cette équation,  $n > m$ .

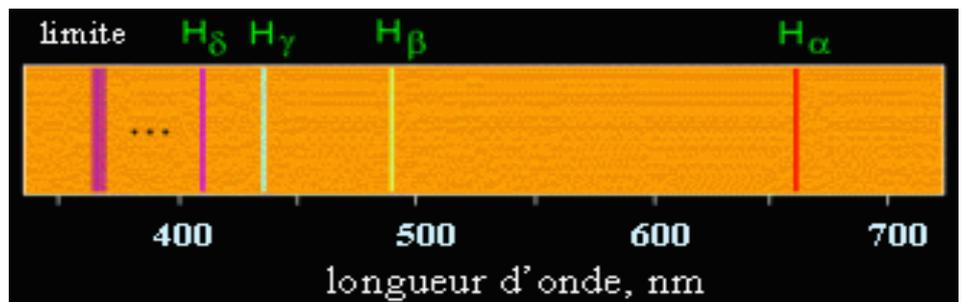


Figure 3. Spectre de l'hydrogène en absorption.

## 2. Théorie de BOHR

### 2.1. Les postulats de BOHR

À la suite des découvertes de l'effet photoélectrique, de l'effet COMPTON et des explications théoriques d'EINSTEIN et PLANCK, BOHR appliqua la théorie quantique aux échanges d'énergie électromagnétique de l'atome. Ses idées peuvent se grouper en deux postulats :

- *un postulat mécanique-* Parmi les orbites réalisables pour un électron tournant autour d'un noyau, seules certaines d'entre elles formant une suite discontinue sont possibles. Ces orbites sont stables, c'est-à-dire que l'énergie de l'atome est constante tant que l'électron reste sur une orbite déterminée. L'énergie de l'atome ne peut donc prendre que les valeurs d'une suite discontinue; ce sont les niveaux d'énergie de l'atome.
- *un postulat optique-* Dans un état stationnaire, l'atome n'émet ni n'absorbe aucune radiation. Par contre, l'électron peut passer d'un état stable d'énergie  $E_m$  à un état stable  $E_n$ . Il y a en même temps :

- soit émission du quantum  $h \nu = E_m - E_n$  si  $E_m > E_n$ ,

- soit absorption du quantum  $h \nu = E_n - E_m$  si  $E_m < E_n$ .

On conçoit l'importance de la spectroscopie dans la détermination des niveaux d'énergie des atomes et des molécules, d'où peut être déduite la structure des couches électroniques. Cette étude peut se faire dans tout le domaine des fréquences électromagnétiques, allant des rayons X aux ondes hertziennes.

Dans le cas des atomes, les quantités élevées d'énergie libérée ou absorbée par suite du saut électronique, les renseignements intéressants se trouvent dans la région des fréquences élevées allant des rayons X aux radiations visibles et même infrarouges.

### 2.2. Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

BOHR adopta tout d'abord l'hypothèse simplificatrice des orbites circulaires. Il admit, sans preuves expérimentales, mais seulement pour les besoins de sa théorie, que la quantité physique quantifiée (qui ne peut prendre que des valeurs discrètes) est le moment cinétique. Nous verrons combien cette hypothèse s'est avérée fondamentale puisque dans tous les systèmes atomiques et moléculaires, c'est toujours le moment cinétique total qui est quantifié.

Les orbites possibles sont celles dont le moment cinétique est égal à un nombre entier de fois  $h/2\pi$  :

$$\rho = mvr = nh/2\pi = n\hbar \quad \text{où} \quad n=1,2,3,\dots \text{ et } \hbar = h/2\pi \quad (2)$$

Dans ces équations :  $\rho$  est le moment cinétique,  $m$  est la masse de l'électron,  $r$  est le rayon de l'orbite,  $h$  la constante de PLANCK, et  $n$  est un nombre entier.

C'est le nombre quantique; on voit qu'il fixe les valeurs discontinues d'une grandeur physique. Évidemment, en conséquence, il fixe la valeur d'autres paramètres du système, par exemple le rayon des orbites et l'énergie de l'atome.

Le mouvement circulaire uniforme de l'électron autour du noyau est caractérisé par l'équilibre entre la force centrifuge et la force de COULOMB. On peut donc écrire dans le système SI :

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2} \times \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3)$$

$Z = 1$  dans le cas de l'hydrogène, mais pour des raisons développées plus tard, nous faisons le calcul dans le cas général d'un atome à un seul électron autour d'un noyau de charge  $Z e$  (par exemple :  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$ ,  $\text{Be}^{+++}$ , etc.).

En éliminant  $v$  entre les équations 2 et 3, on obtient :

$$r = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2 Z} \cdot 4\pi\epsilon_0 \quad (4)$$

Cette valeur de  $r$  pour  $n = 1$  est appelée le rayon de BOHR. Les rayons des orbites stables sont donc proportionnels à  $n^2$  (figure 4).

Calculons l'énergie de l'atome, l'électron étant sur l'orbite  $n$ . C'est la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique.

$$\text{énergie potentielle : } \frac{-Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \text{ où } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

$$\text{énergie cinétique : } \frac{1}{2}mv^2 = \frac{Ze^2}{2r} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (5)$$

$$\text{énergie totale (en valeur absolue) : } -\frac{Ze^2}{2r} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Le signe moins signifie qu'il faut fournir du travail pour séparer l'électron de l'atome. Notons cependant que l'énergie de l'orbite croît en valeur absolue quand  $r$  décroît. L'état d'équilibre stable pour l'atome correspond au minimum d'énergie potentielle, donc à la valeur de  $r$  la plus petite possible.

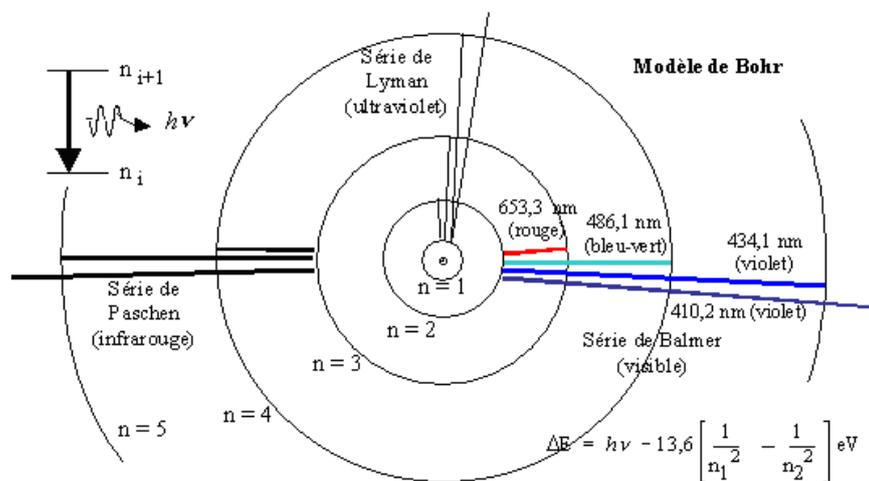


Figure 4. Représentation schématique du modèle de BOHR.

Le signe moins signifie qu'il faut fournir du travail pour séparer l'électron de l'atome. Notons cependant que l'énergie de l'orbite croît en valeur absolue quand  $r$  décroît. L'état d'équilibre stable pour l'atome correspond au minimum d'énergie potentielle, donc à la valeur de  $r$  la plus petite possible.

On a donc, en portant dans l'équation 5 la valeur de  $r$  (équation 4) :

$$|E_n| = \frac{Ze^2}{2} \cdot \frac{4\pi^2 m e^2 Z}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 = \frac{2\pi^2 m e^4 Z^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Si l'électron passe de l'état stationnaire  $m$  à l'état stationnaire  $n$ , on a échange d'un quantum  $h \nu$  tel que :

$$h\nu = |E_m - E_n| = \frac{2\pi^2 m e^4 Z^2}{h^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \cdot \left( \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \right)^2$$

Soit pour l'hydrogène ( $Z = 1$ ):  $\nu_{mn} = c R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{2 m e^4}{16 \epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  (6)

$$R_H = \frac{m e^4}{8 c h^3 \epsilon_0^2}$$
 (7)

La relation théorique (6) est identique à la formule empirique (1). D'autre part, (7) donne la valeur théorique de  $R_H$ . On trouve :

$$R_H = 109\,737 \text{ cm}^{-1}.$$

L'accord quantitatif est bon, ce qui fit le succès de cette théorie. Nous verrons qu'un terme correctif peut rendre l'accord encore meilleur.

### Conclusions

#### *Valeurs numériques de $r$ et $v$*

On obtient l'état stable ou état fondamental en donnant à  $n$  la plus petite valeur  $n = 1$ . Les atomes peuvent être amenés à d'autres états ou états excités, par exemple par le choc avec des électrons ou des ions dans la décharge électrique. Après une durée de vie très courte dans cet état excité (de l'ordre de  $10^{-7}$  secondes), l'atome retombe à l'état fondamental en émettant une radiation.

Le rayon  $r$ , pour  $n = 1$ , est  $0,53 \cdot 10^{-1}$  nm. La théorie de BOHR prédit donc l'ordre de grandeur correct pour les dimensions des atomes. La vitesse  $u$  la plus grande est atteinte pour l'orbite  $n = 1$ , on trouve :

$v_1/c = 7,29 \cdot 10^{-3}$ . Ceci conduit à une correction de relativité extrêmement faible :

$$m = m_0 \times 1,000\,027.$$

### **2.3. Diagramme des niveaux d'énergie**

Les niveaux possibles sont représentés par des lignes horizontales et les transitions par des flèches verticales. La fréquence de chaque raie spectrale est proportionnelle à la différence entre deux niveaux d'énergie. L'un est le niveau initial, l'autre le niveau final. Les séries proviennent de transitions pour lesquelles le niveau final est identique en émission ou du niveau initial identique dans le cas de l'absorption (figure 5).

L'atome peut arriver à l'état fondamental par suite d'un passage en cascade par les états intermédiaires. La théorie de BOHR ne nous donne pas d'indication sur ce processus donc sur les intensités relatives des raies. Elle prédit seulement les fréquences. Nous verrons que les théories ondulatoires prédisent à la fois fréquence et intensité.

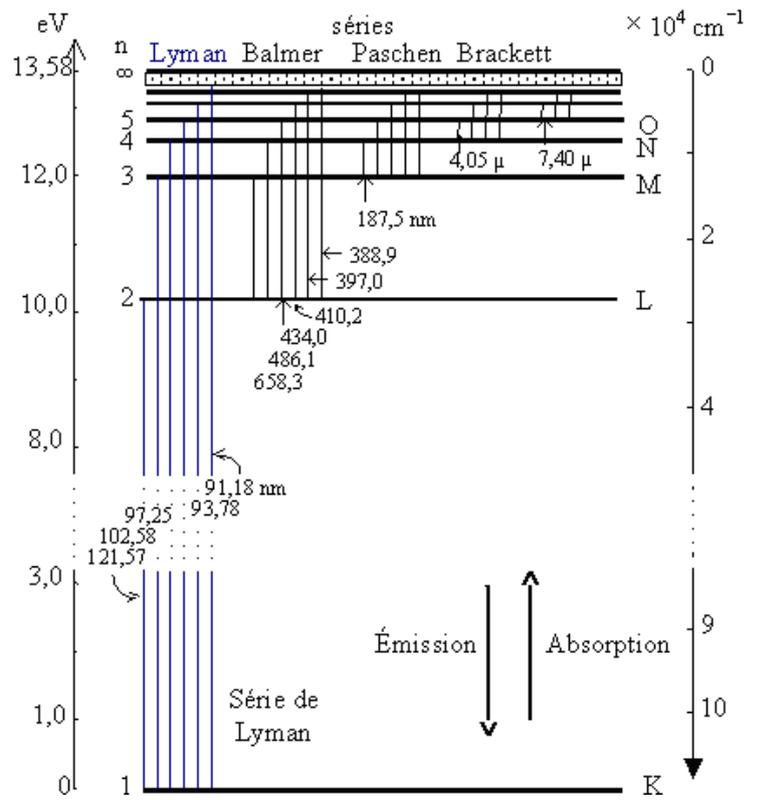


Figure 5. Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.

### 2.3. Énergie d'excitation et d'ionisation

Le diagramme de niveaux d'énergie représente directement deux caractéristiques importantes de l'atome. L'énergie d'excitation est l'énergie nécessaire pour faire passer l'atome de l'état fondamental  $n = 1$  au premier état excité  $n = 2$ . C'est l'énergie minimum qu'il faut pour accomplir une transformation dans l'atome. Un grand nombre d'atomes entrent en combinaison par l'intermédiaire d'états excités. Il faudra donc leur fournir au minimum cette énergie pour que la réaction se produise.

Pour l'hydrogène :  $E_2 - E_1 = 10,19 \text{ eV}$ .

Cette différence peut être également calculée à partir de la fréquence de la première raie de la série de LYMAN.

L'énergie d'ionisation est l'énergie qu'il faut fournir à l'atome pour séparer complètement l'électron du noyau. Cette séparation correspond à la valeur  $n = \infty$  qui correspond à  $r = \infty$ . La théorie de BOHR donne la valeur de cette énergie (en  $\text{cm}^{-1}$ ) :

$$E_{\infty} - E_1 = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty} \right) = R_H$$

Dans le cas de l'hydrogène, cette énergie est  $13,58 \text{ eV}$ .

On peut mesurer cette énergie par des méthodes indépendantes. Il est possible qu'un électron libre, possédant une certaine énergie cinétique,  $1/2 m v^2$ , vienne se placer sur une des orbites  $n$  possibles de l'atome. Dans ce cas, l'énergie émise sous forme de radiation électromagnétique est :

$$h \nu = 1/2 m v^2 + E_{\infty} - E_n$$

Puisque les vitesses peuvent avoir toutes les valeurs possibles,  $h\nu$  n'est pas quantifié et le spectre de fréquences observé est un spectre continu. On observe effectivement un tel spectre. Il fait suite à la limite de convergence de chaque série de raies.

## Configurations et termes spectraux

On énonce la règle de Hund :

« Pour une configuration électronique donnée, le terme spectral d'énergie la plus basse a :

- I. la multiplicité  $2S+1$  la plus grande possible
- II. la valeur du nombre quantique  $L$  la plus grande possible »

1.a Quelle est la configuration de l'état fondamental du carbone ( $Z=6$ ) ?

1.b Quel sont les termes spectraux formés à partir de cette configuration, correspondant aux différents possibles de  $L$  et  $S$  ?

1.c Parmi ces termes spectraux  $^{2S+1}L$ , montrer que certains sont incompatibles avec un état antisymétrique d'échange des électrons et sont donc interdits.

1.d Conclure sur la nature du terme électronique correspondant au niveau d'énergie fondamental du carbone

2. Même questions pour l'atome d'oxygène ( $Z=8$ )

**1.a** La configuration du niveau fondamental du carbone ( $Z=6$ ) est  $1s^2 2s^2 2p^2$ .

**1.b** Seuls contribuent aux moments orbital  $L$  et spin  $S$  de l'ensemble de l'atome les électrons de couche incomplète  $2p^2$ . Avec 2 électrons  $l=1$  et  $s=1/2$  on peut donc avoir  $L=0,1,2$  et  $S=0,1$  d spectraux envisageables  $^1S, ^3S, ^1P, ^3P, ^1D, ^3D$ .

**1.c** En fait tous ces termes ne sont pas compatibles avec le principe de Pauli. Ainsi, par exemple remarquer que le terme  $^3D$  comprend un état  $M_L=+2$  et  $M_S=+1$  qui ne peut être construit qu'à partir de deux électrons où les deux électrons doivent avoir la même valeur de  $m_l=+1$  et la même valeur de spin des deux électrons auraient donc le même état spin-orbital, ce qui est interdit.

Plus formellement, on remarque que pour notre configuration  $p^2$  (cf les valeurs des coefficients Gordan  $\langle 1,1; m_{l1}, m_{l2} | L, M_L \rangle$ ):

-les états orbitaux  $L=2$  sont symétriques par échange des électrons:

$$|2, \pm 2\rangle = |1,1; m_{l1}=\pm 1, m_{l2}=\pm 1\rangle$$

$$|2, \pm 1\rangle = (1/2)^{1/2} (|1,1; m_{l1}=\pm 1, m_{l2}=0\rangle + |1,1; m_{l1}=0, m_{l2}=\pm 1\rangle)$$

$$|2, 0\rangle = (1/6)^{1/2} (|1,1; m_{l1}=1, m_{l2}=-1\rangle + |1,1; m_{l1}=-1, m_{l2}=1\rangle + 2|1,1; m_{l1}=0, m_{l2}=0\rangle)$$

Pour satisfaire Pauli il faut donc que l'état de spin soit antisymétrique, ce qui impose  $S=0$

-les états orbitaux  $L=1$  sont antisymétriques par échange des électrons:

$$|1, \pm 1\rangle = (1/2)^{1/2} (|1,1; m_{l1}=0, m_{l2}=\pm 1\rangle - |1,1; m_{l1}=\pm 1, m_{l2}=0\rangle)$$

$$|1, 0\rangle = (1/2)^{1/2} (|1,1; m_{l1}=1, m_{l2}=-1\rangle - |1,1; m_{l1}=-1, m_{l2}=1\rangle)$$

Pour satisfaire Pauli il faut donc que l'état de spin soit symétrique, ce qui impose  $S=1$

-l'état orbital  $L=0$  est symétrique par échange des électrons:

$$|0, 0\rangle = (1/3)^{1/2} (|1,1; m_{l1}=1, m_{l2}=-1\rangle + |1,1; m_{l1}=-1, m_{l2}=1\rangle - |1,1; m_{l1}=0, m_{l2}=0\rangle)$$

Pour satisfaire Pauli il faut donc que l'état de spin soit antisymétrique, ce qui impose  $S=0$

(NB dans les expressions ci-dessus la fonction d'onde radiale pour chacun des électrons est identique et factorisée donc est sous-entendue. Tel ne serait pas le cas si l'on avait affaire à une configuration des électrons dans des sous-couches différentes: alors il faudrait faire apparaître explicitement la fonction radiale pour chacun des électrons, ce qui permettrait de construire un état orbital  $L=2$  antisymétrique.)

Finalement on voit que les seuls termes spectraux pouvant exister dans cette configuration  $p^2$  sont  $^1S, ^3P, ^1D$ .

**1.d** Suivant la règle de Hund le terme d'énergie la plus basse est le  $^3P$ .

**2.** La configuration du niveau fondamental de l'oxygène ( $Z=8$ ) est  $1s^2 2s^2 2p^4$ . On peut raisonner de manière similaire au cas de l'oxygène en remarquant que cette configuration avec 4 électrons  $p$  est équivalente à la configuration  $p^2$  de deux trous de moment orbital  $l=1$  et de spin  $1/2$ , comme les électrons. De ce fait la configuration donnera lieu aux mêmes termes spectraux que la configuration  $p^2$  du carbone, et suivant la règle de Hund le terme d'énergie la plus basse sera également le  $^3P$ .

## Effet Zeeman.

Un électron de masse  $m$ , de charge  $-e$ , situé au point  $M(t)$  est élastiquement lié à son noyau, considéré comme immobile au point  $O$ , par une force  $\vec{f} = -m\omega_0^2 \vec{r}$  où  $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ . Il est soumis à un champ magnétique uniforme et stationnaire  $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ . On néglige les phénomènes dissipatifs.

**Question 1 :**

*Mettre en équation le mouvement. Quel est le mouvement selon  $Oz$  ?*

On a

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} &= -m\omega_0^2 \vec{r} - e \vec{v} \wedge \vec{B}_0 \\ \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} &= -\omega_0^2 \vec{r} - \frac{eB_0}{m} \vec{v} \wedge \vec{e}_z \\ \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} &= -\omega_0^2 \vec{r} - \omega_c \vec{v} \wedge \vec{e}_z \end{aligned}$$

où l'on reconnaît en  $\omega_c = \frac{eB_0}{m}$  la «pulsation cyclotron».

On pose

$$\vec{r} = x \vec{e}_x + y \vec{e}_y + z \vec{e}_z$$

et l'on tire après des calculs de routine :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\omega_0^2 x - \omega_c \dot{y} \\ \ddot{y} = -\omega_0^2 y + \omega_c \dot{x} \\ \ddot{z} = -\omega_0^2 z \end{cases}$$

La troisième équation donne  $z(t)$  sinusoïdal de pulsation  $\omega_0$ .

**Question 2 :**

*Pour le mouvement projeté sur le plan  $xOy$ , on cherchera une solution de la forme  $x = A \exp(j\omega t)$  et  $y = B \exp(j\omega t)$  et on trouvera deux valeurs pour  $\omega$  (on simplifiera au premier ordre sachant que  $\omega_c \ll \omega_0$ ) auxquelles on associera deux valeurs pour le rapport  $A/B$ , valeurs que l'on interprétera.*

On reporte les expressions proposées dans les deux premières équations et l'on trouve, après simplification par l'exponentielle :

$$\begin{cases} 0 = (\omega^2 - \omega_0^2) A - j\omega_c \omega B \\ 0 = j\omega_c \omega A + (\omega^2 - \omega_0^2) B \end{cases}$$

Ce système en  $(A, B)$  admet la solution évidente  $(0, 0)$  mais elle correspond au repos. Il n'y a de solutions non nulles, donc de mouvement, que si le déterminant est nul soit :

$$(\omega^2 - \omega_0^2)^2 = \omega_c^2 \omega^2$$

équation bicarrée qui se dédouble en deux équations du second degré :

$$\omega^2 - \omega_0^2 = \pm \omega_c \omega$$

dont on ne conservera que les solutions positives (par convention, les pulsations sont positives), soit

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_0^2}}{2} \approx \omega_0 + \frac{\omega_c}{2} \\ \omega_2 = \frac{-\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_0^2}}{2} \approx \omega_0 - \frac{\omega_c}{2} \end{cases}$$

Pour chacune des solutions, le système qu'on a résolu entraîne que

$$B = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{j\omega_c\omega} A$$

Avec  $\omega_1$ , qui est solution de  $\omega^2 - \omega_0^2 = \omega_c\omega$ , on a

$$B = \frac{\omega_c\omega}{j\omega_c\omega} A = -jA$$

et en choisissant l'origine des temps de sorte que  $A$  soit réel

$$\begin{cases} x(t) = \Re[A \exp(j\omega_1 t)] = A \cos(\omega_1 t) \\ y(t) = \Re[-jA \exp(j\omega_1 t)] = A \sin(\omega_1 t) \end{cases}$$

où l'on reconnaît un mouvement circulaire dans le sens trigonométrique. Bien évidemment, avec  $\omega = \omega_2$ , on a un mouvement circulaire dans le sens horaire.

Pour résumer, le mouvement le plus général, à condition qu'il soit excité par l'agitation thermique (par exemple), est superposition d'un mouvement sinusoïdal selon  $Oz$  de pulsation  $\omega_0$  et de mouvements circulaires dans les deux sens du plan  $Oxy$ , respectivement de pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$ .

*Question 3 :*

*Cet électron rayonne. Analyser la polarisation des trois rayonnements correspondant aux trois pulsations, d'une part dans la direction de  $Oz$ , d'autre part dans une direction du plan  $xOy$ , disons la direction de  $Ox$ .*

■ Réponse exercice de physique atomique n° 1 de l'examen du 5 janvier 2006, Université Joseph Fourier, Grenoble

$$1. 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6 7s^1$$

■ Réponse exercice de physique atomique n° 2 de l'examen du 5 janvier 2006, Université Joseph Fourier, Grenoble

2. Exemples de configurations de niveaux excités :

a : (...)  $7p^1$

termes possibles  $S=1/2$   $L=1$  (1 seul électron sur sous couche pas complète)  $J=3/2$  ou  $1/2$

soit  $^2P_{1/2}$  et  $^2P_{3/2}$

b : (...)  $8s^1$

termes possibles  $S=1/2$   $L=0$  (1 seul électron sur sous couche pas complète)  $J=1/2$

soit  $^2S_{1/2}$

c : (...)  $7d^1$

termes possibles  $S=1/2$   $L=2$  (1 seul électron sur sous couche pas complète)  $J=5/2$  ou  $3/2$

soit  $^2D_{3/2}$  et  $^2D_{5/2}$

d : (...)  $7f^1$

termes possibles  $S=1/2$   $L=3$  (1 seul électron sur sous couche pas complète)  $J=7/2$  ou  $5/2$

soit  $^2F_{7/2}$  et  $^2F_{5/2}$

Correction Examens S5

Exercice 1

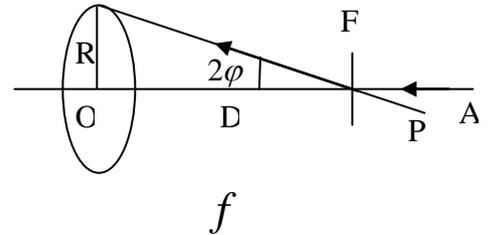
1°. L'onde associée se propage et diffractée par les atomes d'un plan réticulaire P de la feuille F et déviée d'un angle  $2\varphi$ . La loi de Bragg s'écrit :  $\lambda = 2d \sin \varphi$  avec  $2\varphi = \frac{R}{D}$  ; on a donc  $\lambda = d \frac{R}{D}$ .

2°. La longueur d'onde, associée aux électrons de vitesse  $u$ , est  $\lambda = \frac{h}{mu}$  ; on peut écrire  $\lambda^2 = \frac{h^2}{2 \frac{1}{2} mu^2}$  et l'on

reconnait l'énergie cinétique  $\frac{1}{2} mu^2$  qui exprimée à partir de la tension accélératrice  $V$ , est égale à eV. Il vient

donc

$$\lambda = d \frac{R}{D} = \frac{h}{\sqrt{V} \sqrt{2me}}, \quad \text{ou} \quad R\sqrt{V} = \frac{D}{d} \left( \frac{h}{\sqrt{2me}} \right) ;$$



pour un appareil donné et un cristal donné, cette relation est de la forme

$$R\sqrt{V} = C = \text{Constante}.$$

Numériquement, le terme  $\frac{h}{\sqrt{2me}}$  a pour valeur  $1,226 \cdot 10^{-9} \approx \sqrt{150} \cdot 10^{-10}$ .

3°. On trouve  $d = 1,25 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , ou  $1,25 \text{ \AA}$ .

Exercice 2

1°. Pour produire un effet photoélectrique, l'énergie de la radiation doit être égale ou supérieure au travail d'extraction des électrons du sodium, soit :

$$2,3 \text{ eV} = 2,3(1,602 \times 10^{-19}) \text{ J} = 3,68 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Une radiation de longueur d'onde  $6800 \text{ \AA}$  possède une énergie de

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6800 \times 10^{-10}} = 2,92 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Il n'y a donc pas d'effet photoélectrique avec la radiation de  $6800 \text{ \AA}$  car celle-ci a une énergie inférieure au seuil photoélectrique de  $3,68 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

2°. La radiation de 3500 Å possède une énergie de

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3500 \times 10^{-10}} = 5,67 \times 10^{-19} \text{ J}$$

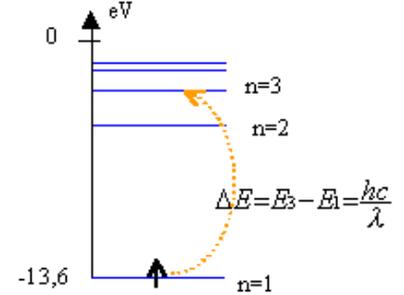
On a dans ce cas un effet photoélectrique et l'énergie cinétique maximum des électrons sera égale à la différence entre l'énergie de la radiation et le travail d'extraction des électrons.

$$\frac{1}{2} m v^2 = 5,67 \times 10^{-19} - 3,68 \times 10^{-19} = 1,99 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### Exercice 3

1). L'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée par  $E = -13,6 / n^2$  en eV.

N	1	2	3	4	5	6
E(eV)	-13,6	-3,4	-1,51	-0,85	-0,54	-0,38



2°. Le photon est absorbé si son énergie est égale à  $E_3 - E_1 = -1,51 - (-13,6)$

$= 12,09 \text{ eV}$  à exprimer en joule ( $12,09 \times 1,6 \times 10^{-19} = 1,93 \times 10^{-18} \text{ J}$ ) pour le calcul de la longueur d'onde.

$$\lambda = 6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 1,93 \times 10^{-18} = 1,03 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

3°. Energie du photon de longueur d'onde  $8,5 \times 10^{-8} \text{ m}$  :

$E = 6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 8,5 \times 10^{-8} = 2,336 \times 10^{-18} \text{ J} = 14,6 \text{ eV}$ . Cette valeur est supérieure à 13,6 eV, l'électron situé au niveau fondamental est arraché.

4°.

Transition	4 → 1	4 → 3	3 → 2	2 → 1	4 → 2
ΔE(J)	$2,04 \times 10^{-18}$	$1,056 \times 10^{-19}$	$3,024 \times 10^{-19}$	$1,632 \times 10^{-18}$	$4,08 \times 10^{-19}$
λ(nm)	97,35(UV)	1880(IR)	656,7(visible)	121,7(UV)	486,7(visible)

5°. L'énergie d'ionisation est l'opposé de l'énergie de l'électron situé sur le niveau considéré soit 0,85 eV.

### Exercice 4

La loi de MOOSELEY est telle que

$$n = 0,764 R_H c (Z - 1,13)^2 \quad \text{et} \quad \nu = 0,764 \times (1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}) (2,998 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (79 - 1,13)^2$$

$$\nu = 1,5236 \times 10^{19} \text{ s}^{-1} \quad \text{donc} \quad E = h \nu = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}) \times (1,5236 \times 10^{19} \text{ s}^{-1})$$

$$E = 1,009 \times 10^{-14} \text{ J} \quad \text{ou en divisant par la charge électronique, on obtient la valeur en keV : } E = 63,02 \text{ keV.}$$

**Correction d'Examen de TP Physique 8**

1°. Ajustage linéaire des points :

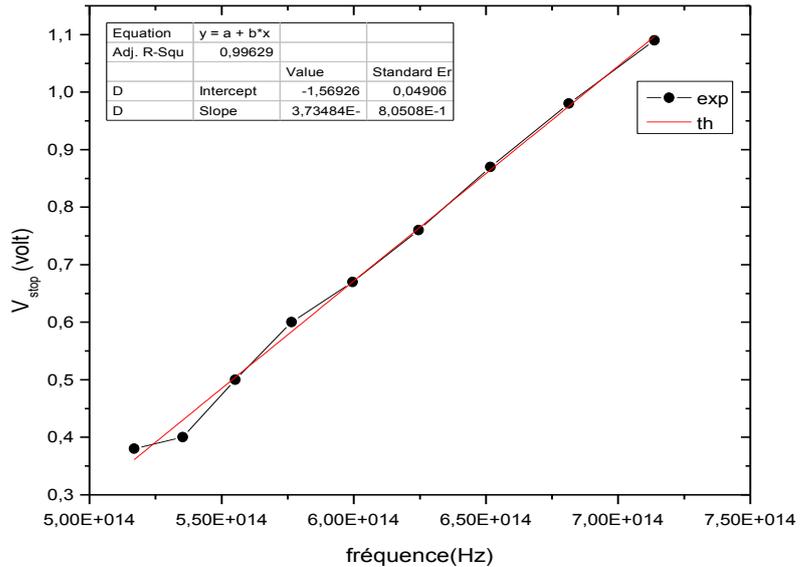
$\lambda$ [nm]	1,09	0,98	0,87	0,76	0,67	0,6	0,5	0,4	0,38
$\nu$ [Hz] *10 <sup>-14</sup>	7.13792	6.81346	6.51723	6.24568	5.99585	5.76524	5.55171	5.35344	5.16884

La valeur de  $V_0$  est telle qu'aucun électron n'atteigne l'anode ( $v = 0$ ). L'électron est donc émis avec une vitesse maximale  $v_m$  telle que :

$$E_{cm} = mv_m^2/2 = eV_0 = h(\nu - \nu_s)$$

On peut alors estimer la valeur de la constante de Planck  $h$  en multipliant la valeur de la pente de  $V(\nu)$  par  $e$  :

$$h = 3,80413 \cdot 10^{-15} * 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,0866 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$



2°.  $Z=22$ , le titane.

3°. `function [m,b]=fit(x,y);`

```

n=length(x);
num=n*sum(x.*y)-sum(x)*sum(y);
den=n*sum(x.^2)-(sum(x))^2;
m=num/den;
b=mean(y)-m*mean(x);
>> x=[13 26 29 42 74 92];
>> y=[6.00481E8 1.24676E9 1.39573E9 2.05557E9 3.77964E9 4.80384E9];
>> [m b]=fit(x,y)
m =
    5.3282e+007
b =
   -1.3730e+008

```

Z	Sqrt(ν (Hz))
13	6,00481E8
26	1,24676E9
29	1,39573E9
42	2,05557E9
74	3,77964E9
92	4,80384E9

4°. 1. a. Il s'agit d'un spectre de raies d'émission.

b. La grandeur portée en abscisse est la longueur d'onde  $\lambda$  ; l'unité est le nanomètre (nm).

c.  $\lambda_{bleu} \approx 470 \text{ nm}$ .

d.  $\lambda_{rouge} \approx 640 \text{ nm}$ .

2. a. Les spectres du mercure et du zinc sont totalement différents ; ils ne comportent quasiment aucune raie monochromatique en commun. On a bien là une véritable signature de l'élément considéré (l'existence d'un spectre est la manifestation de la structure interne de l'atome, différente pour chaque élément).
- b. Les éléments ont été portés à haute température, afin d'exciter leurs atomes ou ions constituants. Ces entités, une fois excitées, se désexcitent en émettant les spectres de raies observés.
- c. Le spectre résultant serait un exact mélange des deux spectres.

**Université d'Adrar**

**3<sup>ième</sup> Année Physique**

**Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur**

**Module : Physique VIII**

**Département Agriculture Saharienne**

**A-U 2011-2012**

.....  
**Examen de rattrapage**

**Exercice 1**

La longueur d'onde associée à un neutron ( $m = 1,67 \times 10^{-27}$  kg) qui se déplace à la vitesse de  $6 \times 10^7$  m/s est

- (a) de zéro car le neutron n'est pas chargé
- (b)  $3 \times 10^8$  m
- (c)  $1,5 \times 10^{-15}$  m
- (d)  $6,6 \times 10^{-15}$  m.

**Exercice 2**

À l'aide de la loi de Wien, calculer la longueur d'onde moyenne  $\lambda_m$  correspondant au maximum d'intensité lumineuse émise par chaque filament incandescent des deux lampes. Les résultats seront exprimés en micromètres ( $\mu\text{m}$ ) puis convertit en nanomètres (nm).

**Exercice 3**

On dispose d'une photocathode au césium éclairée par une lumière monochromatique.

1. La longueur d'onde seuil pour le césium est  $\lambda_0 = 0.66 \mu\text{m}$ . Déterminer le travail d'extraction  $W_0$  d'un électron.
2. La lumière qui éclaire cette photocathode a une longueur d'onde  $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$ .
  - a- Déterminer l'énergie cinétique maximale d'un électron émis par la cathode.
  - b- déterminer la vitesse de cet électron.
  - c- Déterminer la tension d'arrêt dans ces conditions.

**Exercice 4**

1. Le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène est composé de plusieurs séries de raies. Donner pour chacune des trois premières séries, les longueurs d'onde de la première raie et de la raie limite. On établira d'abord la formule donnant  $1/\lambda_{i-j}$ , où  $\lambda_{i-j}$  représente la longueur d'onde de la radiation émise lorsque l'électron passe du niveau  $n_i$  au niveau  $n_j$ . ( $n_i > n_j$ ).
2. Un atome d'hydrogène initialement à l'état fondamental absorbe une quantité d'énergie de 10,2 eV. A quel niveau se trouve l'électron ?

3. L'électron d'un atome d'hydrogène initialement au niveau  $n=3$  émet une radiation de longueur d'onde  $\lambda = 1027 \text{ \AA}$ . A quel niveau se retrouve l'électron ?

Dans quel domaine spectral (visible, ultra-violet, infra-rouge,...) observe-t-on chacune de ces séries ?

Université d'Adrar

Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur

Département Agriculture Saharienne

3<sup>ème</sup> Année Physique

Module : Physique VIII

A-U 2011-2012

.....  
Examen de rattrapage  
.....

**Exercice 1**

La longueur d'onde associée à un neutron ( $m = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) qui se déplace à la vitesse de  $6 \times 10^7 \text{ m/s}$  est

- (a) de zéro car le neutron n'est pas chargé
- (b)  $3 \times 10^8 \text{ m}$
- (c)  $1,5 \times 10^{-15} \text{ m}$
- (d)  $6,6 \times 10^{-15} \text{ m}$ .

**Exercice 2**

À l'aide de la loi de Wien, calculer la longueur d'onde moyenne  $\lambda_m$  correspondant au maximum d'intensité lumineuse émise par chaque filament incandescent des deux lampes. Les résultats seront exprimés en micromètres ( $\mu\text{m}$ ) puis convertit en nanomètres (nm).

**Exercice 3**

On dispose d'une photocathode au césium éclairée par une lumière monochromatique.

1. La longueur d'onde seuil pour le césium est  $\lambda_0 = 0,66 \mu\text{m}$ . Déterminer le travail d'extraction  $W_0$  d'un électron.
2. La lumière qui éclaire cette photocathode a une longueur d'onde  $\lambda = 0,44 \mu\text{m}$ .
  - a- Déterminer l'énergie cinétique maximale d'un électron émis par la cathode.
  - b- déterminer la vitesse de cet électron.
  - c- Déterminer la tension d'arrêt dans ces conditions.

**Exercice 4**

1. Le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène est composé de plusieurs séries de raies. Donner pour chacune des trois premières séries, les longueurs d'onde de la première raie et de la raie limite. On établira d'abord la formule donnant  $1/\lambda_{i-j}$ , où  $\lambda_{i-j}$  représente la longueur d'onde de la radiation émise lorsque l'électron passe du niveau  $n_i$  au niveau  $n_j$ . ( $n_i > n_j$ ).

2. Un atome d'hydrogène initialement à l'état fondamental absorbe une quantité d'énergie de 10,2 eV. A quel niveau se trouve l'électron ?

3. L'électron d'un atome d'hydrogène initialement au niveau  $n=3$  émet une radiation de longueur d'onde  $\lambda = 1027 \text{ \AA}$ . A quel niveau se retrouve l'électron ?

Dans quel domaine spectral (visible, ultra-violet, infra-rouge,...) observe-t-on chacune de ces séries ?

**Université Africaine D'Adrar - Ahmed Draya**  
**3<sup>ème</sup> Année Physique**  
**Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur**  
**Module : TP Physique VIII**  
**Département Agriculture Saharienne**  
**Durée : 1 H 30 min**

### Examen de TP Physique 8

1°. Le balayage des longueurs d'onde est donné de 420 à 580 nm par pas de 20 nm. Le tableau suivant représente la variation de  $V_{\text{arrêt}}$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

A- Remplir le Tableau.

B- Tracer la courbe  $V_{\text{arrêt}} = f(\nu)$ .  
Interpréter.

C- Déduire la valeur de la constante de Planck :  $h = ( \dots \pm \dots ) \text{ J.s}$ .

$\lambda$ (nm)	420	440	460	480	500	520	540	560	580
$\nu$ (Hz)									
$V_{\text{arrêt}}$ (V)	1,09	0,98	0,87	0,76	0,67	0,6	0,5	0,4	0,38

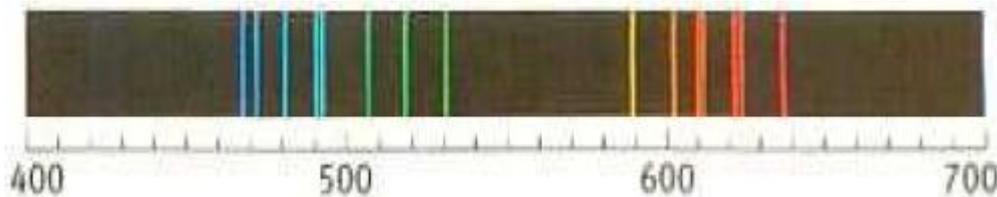
2°. A- Une série de déterminations expérimentales a pu montrer la valeur des longueurs d'onde des raies  $K_{\alpha}$  de plusieurs métaux. À partir de ces résultats (tableau suivant) montrez que la loi de MOOSELEY est satisfaite.

B- À l'aide des résultats précédents, identifier le métal dont la raie  $K_{\alpha}$  apparaît à 0,274 nm.

Métal	Z	Raies $K_{\alpha}$ (nm)
Al	13	0,832
Fe	26	0,193
Cu	29	0,154
Mo	42	0,071
W	74	0,021
U	92	0,013

3°. En utilisant la méthode de « droite d'ajustement affine par la méthode des moindres carrés », écrire un programme Matlab pour retrouver la loi de MOOSELEY (On prend comme exemple les expériences de Q.2°).

4°.1. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de zinc.



A. Est-ce un spectre d'émission ou d'absorption ?

B. Quelle est la grandeur représentée sur le segment gradué ? L'unité n'est pas précisée : quelle est-elle ?

C. Déterminer la valeur de la plus petite longueur d'onde des raies du spectre, située dans le bleu, le plus à gauche.

D. Même question pour la plus grande longueur d'onde, située dans le rouge, le plus à droite.

2. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de mercure.



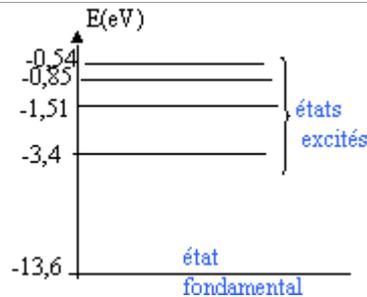
A. Nous avons indiqué dans le cours qu'un spectre est caractéristique de l'élément considéré ; justifiez cette affirmation, en vous basant sur une comparaison des spectres du mercure et du zinc.

B. Pour obtenir ces spectres, il a été nécessaire de placer les éléments zinc et mercure, qui sont des métaux, sous forme d'une vapeur (les métaux sont alors dans l'état gazeux, en suspension dans l'air). Pourquoi ?

C. Quelle serait l'allure du spectre, si on mélangeait les vapeurs de zinc et de mercure ?

### Exo4 corrigé

énergie (eV)	-13,6	-3,4	1,51	0,85	0,54
n	1	2	3	4	5



Les échanges d'énergies entre la lumière et la matière ne se font pas de manière continue mais par quantité élémentaire.

Une transition atomique est le passage d'un état d'énergie à un autre.

La fréquence d'un photon émis ou absorbé est reliée aux énergies  $E_n$  et  $E_p$  par la relation de Bohr :

$$\Delta E = |E_p - E_n| = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

}

E : énergie (J)

h : Cte de Plank

$\nu$  fréquence (Hz)

c :  $3 \cdot 10^8$  m/s

$\lambda$  longueur d'onde (m)

Chaque raie d'un spectre est associée à l'émission ou l'absorption d'un photon lors d'une transition atomique.

L'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène est l'énergie qu'il faut fournir pour arracher l'électron soit 13,6 eV.

transition n=5 à n=3 : l'énergie de l'atome diminue, un photon est émis

$$\Delta E = 1,511 - 0,544 = 0,967 \text{ eV} \text{ ou } 0,967 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,547 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{longueur d'onde du photon émis : } \lambda = hc / \Delta E$$

$$\lambda = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 1,547 \cdot 10^{-19} = \underline{1,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \text{ ( domaine des U.V)}$$

les raies de la série de Balmer appartiennent au domaine du visible.

Les raies de la série de Paschen au domaine I.R, plus difficile à mettre en évidence au début du XX<sup>e</sup> siècle.

Le photon peut être absorbé si son énergie est égal à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie de l'atome.

état excité  $n=3$  :  $E_3 = -1,51$  eV; état excité  $n=4$  :  $E_4 = -0,85$  eV

différence :  $1,51 - 0,85 = 0,66$  eV, donc le photon d'énergie 0,5 eV ne peut pas être absorbé par l'atome.

à partir de l'état excité  $n=3$ , il est possible d'ioniser l'atome en fournissant au minimum 1,51 eV.

Un photon d'énergie 2eV ionise donc cet atome initialement à l'état excité  $n=3$ .

L'énergie  $2 - 1,51 = 0,49$  eV est emportée par l'électron, sous forme d'énergie cinétique.

### Exercice 6

Calculer la longueur d'onde de la première raie pour l'atome d'hydrogène. Calculer ensuite la valeur de la raie limite.

#### Correction

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 92,259 \Rightarrow \lambda = \dots \text{ 1<sup>er} \text{ terme } n_f = 2</sup>$$

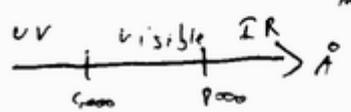
$$\text{pour la raie limite } n_{\text{fin}} = \infty \quad \frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} \right) = 109,679; \lambda = \dots$$

### Exercice 8

Quelle est la plus grande quantité d'énergie que peut absorber l'atome d'hydrogène? Quelle est la longueur d'onde du rayonnement incident correspondant?

La plus grande quantité d'énergie correspond à la transition entre  $n_i = 1$  et  $n_f = \infty$  pour  $E_f = -\frac{13,6}{\infty^2} = 0$ .

soit  $\Delta E = E_f - E_i = -\frac{13,6}{\infty^2} - \left(-\frac{13,6}{1^2}\right) = 13,6$  eV soit  $2,18 \times 10^{-18}$  J.  $\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E} = 9,12 \text{ \AA}$



### Exercice 9

Soit l'atome de beryllium Be.

1) Calculer la fréquence et la longueur d'onde de la radiation lumineuse qui transforme un ion  $\text{Be}^+$  en un ion  $\text{Be}^{2+}$ .

2) Calculer la valeur des énergies en eV des cinq premiers niveaux d'énergie permis pour l'ion  $\text{Be}^{3+}$

$\rightarrow \text{Be}^{\text{III}} \rightarrow \text{Be}^{\text{IV}} + e^-$  il s'agit de l'énergie de 2<sup>e</sup> ionisation.  $\Delta E = 19,21$  eV

$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow \nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{19,21 \times 1,6 \times 10^{-19}}{6,62 \times 10^{-34}} \text{ Hz}$  (à convertir les eV en J)

$\nu = 4,59 \times 10^{15} \text{ Hz}$  et  $\text{Be}^{\text{III}}$  est l'hydrogène  $E_n = -R_H \frac{Z^2}{n^2} = -R_H \frac{16}{n^2}$

$\Rightarrow E_1 = -13,6 \times 16 = -217,6$  eV;  $E_2 = -13,6 \times 16/4 = -54,4$  eV.

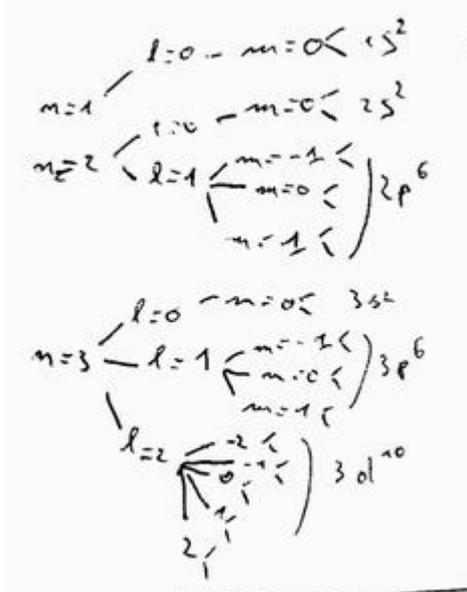
### Exercice 10

Un atome d'hydrogène à l'état fondamental absorbe un photon de 97.2nm. A la suite de ce processus, il émet deux photons dont l'un à 486nm. Quelle est la longueur d'onde de l'autre?

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{RH}{n_i^2} - \frac{RH}{n_f^2} \Rightarrow n_f^2 = \frac{1}{\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{\lambda RH}} \Rightarrow n_f = 4$$
 après avoir absorbé le photon de 97,2nm l'hydrogène se trouve sur la couche 4. De là on peut trouver qu'après avoir émis 486nm il se trouve sur la 2<sup>ème</sup> couche. On pourrait le savoir de suite car entre 100 et 700nm on a dans le visible et seul Balmer (n=2) est dans ce domaine et dans ce cas, si un photon est encore émis, il ne peut plus s'agir que de Balmer n=2. C'est pourquoi donc  $n_f = 2$ ;  $\frac{1}{\lambda} = \frac{RH}{n_i^2} - \frac{RH}{n_f^2}$  comme 1 y a déjà été fait (+) et  $n_i > n_f$  on a  $\lambda = \frac{1}{\frac{RH}{n_i^2} - \frac{RH}{n_f^2}} = 122\text{nm}$ .

### Exercice 13

Pour 1 atome la série des nombres quantique n=3 l=1 m=1 décrit-elle un électron dans une orbitale 3p?



### Exercice 14

Dans un atome, combien d'électrons peuvent être caractérisés par les valeurs suivantes d'un ou plusieurs nombres quantiques?

- 1) n=4
- 2) n=3, l=2
- 3) n=3, m=0
- 4) n=4, l=0, s=1/2
- 5) n=5, l=3, m=-1, s=1/2
- 6) n=3, s=-1/2

Configurations électroniques - Nombres Quantiques - Notion de Couche et de sous-couche - Classification périodique

Exercice 1:

Etablir les configurations électroniques des atomes suivants. Vérifier le résultat obtenu sur une classification périodique. Justifier les éventuelles anomalies.

Ca (Z=20) -

F

e(Z=26) - Br(Z=35) - Cs(Z=55) - Cr (Z=24) - Mo (Z=42) - Au(Z=79) -

Exercice 2:

Les affirmations suivantes sont-elles exactes ou inexactes? Pourquoi ? a) Si  $l=1$ , l'électron est dans une sous couche d. b) Si  $n=4$  l'électron est dans la couche O. c) Pour un électron d,  $m$  peut être égal à 3. d) Si  $l=2$ , la sous-couche correspondante peut recevoir au plus 6 électrons. e) Le nombre  $n$  d'un électron d'une sous-couche f peut être égal à 3. f) Si deux " édifices atomiques " ont la même configuration électronique, il s'agit forcément du même élément. g) Si deux " édifices atomiques " ont des configurations électroniques différentes il s'agit forcément de deux éléments différents.

Exercice 3:

Classer par ordre croissant de leur énergie les électrons d'un même atome définis par les valeurs suivantes de leurs nombres quantiques. Identifier le sous-niveau auquel ils appartiennent. 1)  $n = 3 ; l = 1 ; m = 0 ; s = +1/2$  2)  $n = 4 ; l = 0 ; m = 0 ; s = -1/2$  3)  $n = 3 ; l = 1 ; m = 0 ; s = -1/2$

Fiche de TD n° 05

**Exercice 1**

Montrer que l'égalité  $L^2 = l(l + 1)$  s'obtient par des formules élémentaires de la théorie des probabilités, en s'appuyant sur le fait que les projections du moment cinétique sur un axe arbitraire sont égales à  $m$  ( $m = -l, -l + 1, \dots, l$ ), que toutes ces valeurs sont équiprobables et qu'il n'y a pas d'axe privilégié.

**Exercice 2**

Représenter l'opérateur moment cinétique du système de deux particules sous forme d'une somme de deux termes, décrivant le moment de la particule dans le système du centre d'inertie (moment du mouvement relatif) et le moment du centre d'inertie du système.

Fiche de TD n° 03

**Exercice 1**

Si l'électron de l'Hydrogène est excité au niveau  $n=4$ , combien de raies différentes peuvent-elles être émises lors du retour à l'état fondamental. Calculer dans chaque cas la fréquence et la longueur d'onde du photon émis.

**Exercice 2**

Si un atome d'Hydrogène dans son état fondamental absorbe un photon de longueur d'onde  $\lambda_1$  puis émet un photon de longueur d'onde  $\lambda_2$ , sur quel niveau l'électron se trouve-t-il après cette émission ?

a)  $\lambda_1 = 97.28 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 1879 \text{ nm}$

b)  $\lambda_1 = 97.28 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 78.15 \text{ nm}$

**EXERCICE 3**

Le spectre de l'atome d'hydrogène peut se décomposer en plusieurs séries de raies nommées pour les quatre premières : séries de Lyman ; de Balmer ; de Paschen et de Pfund.

a) Expliquer à quoi correspondent ces diverses séries.

b) Les longueurs d'onde des raies de chaque série sont comprises entre deux valeurs limites. À quoi correspondent ces deux limites ?

c) Donner une formule générale permettant le calcul de ces deux limites.

d) Calculer les longueurs d'ondes limites des séries de Lyman, Balmer, de Paschen et de Pfund.

e) Attribuer à chaque série son domaine spectral (U.V ; Visible ; I.R).

### Exercice n°1

On dispose d'une photocathode au césium éclairée par une lumière monochromatique.

1. La longueur d'onde seuil pour le césium est  $\lambda_0 = 0.66 \mu\text{m}$ . Déterminer le travail d'extraction  $W_0$  d'un électron.
2. La lumière qui éclaire cette photocathode a une longueur d'onde  $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$ .
  - a- Déterminer l'énergie cinétique maximale d'un électron émis par la cathode.
  - b- déterminer la vitesse de cet électron.
  - c- Déterminer la tension d'arrêt dans ces conditions.

#### Corrigé

$$1. \text{ On a } W_0 = h\nu_0 = \frac{h.c}{\lambda_0} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0.66 \cdot 10^{-6}} = 3.0 \cdot 10^{-19} \text{J} = \frac{3.0 \cdot 10^{-19}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 1.9 \text{ eV}$$

$$2. \lambda = 0.44 \mu\text{m}.$$

$$a- E_c = h\nu - W_0 = hc/\lambda - W_0 = 1.5 \cdot 10^{-19} \text{J}.$$

$$b- E_c = \frac{1}{2} m_e v^2 \text{ soit } v = \sqrt{\frac{2 E_c}{m_e}} = 5.8 \cdot 10^5 \text{ m.s}^{-1} \text{ (avec } m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg, la masse de l'électron).}$$

$$c- \text{Théorème de l'énergie cinétique : } E_{c2} - E_{c1} = W.$$

Il n'y a ici qu'un seul travail effectué, le travail électrique résistif qui sert à annuler la vitesse de l'électron :  
 $W = eU_0$

$E_{c2} = 0$  puisqu'à l'arrivée la vitesse de l'électron est nulle.

$E_{c1} = E_c$  c'est l'énergie initiale de l'électron.

$$\text{Donc } -E_c = eU_0 \text{ et } U_0 = \frac{-E_c}{e} = -0.94 \text{ V}$$

Fiche de TD n° 03

**Exercice 1**

Si l'électron de l'atome d'hydrogène est excité au niveau  $n=4$ , combien de raies différentes peuvent-elles être émises lors du retour à l'état fondamental. Calculer dans chaque cas la fréquence et la longueur d'onde du photon émis.

**Exercice 2**

Si un atome d'hydrogène dans son état fondamental absorbe un photon de longueur d'onde  $\lambda_1$  puis émet un photon de longueur d'onde  $\lambda_2$ , sur quel niveau l'électron se trouve-t-il après cette émission ?

a)  $\lambda_1 = 97.28 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 1879 \text{ nm}$

b)  $\lambda_1 = 97.28 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 78.15 \text{ nm}$

**Exercice 3**

Le spectre de l'atome d'hydrogène peut se décomposer en plusieurs séries de raies nommées pour les quatre premières : séries de Lyman ; de Balmer ; de Paschen et de Pfund.

- Expliquer à quoi correspondent ces diverses séries.
- Les longueurs d'onde des raies de chaque série sont comprises entre deux valeurs limites. À quoi correspondent ces deux limites ?
- Donner une formule générale permettant le calcul de ces deux limites.
- Calculer les longueurs d'ondes limites des séries de Lyman, Balmer, de Paschen et de Pfund.
- Attribuer à chaque série son domaine spectral (U.V ; Visible ; I.R).

**Exercice 4**

Si l'électron de l'atome d'hydrogène est excité au niveau  $n = 5$ , combien de raies différentes peuvent-elles être émises lors du retour à l'état fondamental. Calculer dans chaque cas la fréquence et la longueur d'onde du photon émis

**Exercice 5**

- Si un atome d'hydrogène initialement dans son état fondamental absorbe une quantité d'énergie de 10.2 eV. À quel niveau se trouve l'électron ?
- L'électron d'un atome d'hydrogène initialement au niveau  $n = 3$  émet une radiation de longueur d'onde  $\lambda = 1027 \text{ \AA}$ . À quel niveau se trouve l'électron ?

## Exercice 6

1. Représenter sur un diagramme les niveaux d'énergie en électron-volts de l'atome d'hydrogène pour  $n$  compris entre 1 et 5. Préciser ce qu'on appelle état fondamental et état excité. S'aider de ce diagramme pour justifier le caractère discontinu du spectre d'émission de l'atome d'hydrogène.

2. Qu'appelle-t-on énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène ? Quelle est sa valeur ?

3. L'atome d'hydrogène passe du niveau d'énergie correspondant à  $n=5$  au niveau  $n=3$ .

\* Calculer la longueur d'onde de la radiation émise.

\* A quelle domaine de radiation cette longueur d'onde appartient-elle ?

Les quatre premières raies de la série de Balmer correspondant au retour - menu au niveau  $n=2$  ont pour longueur d'onde : 410 nm , 434 nm, 486 nm, 656 nm. Les longueurs d'ondes de la série de Paschen sont supérieures à 820 nm. Les séries de Balmer et de Paschen ont été découvertes respectivement en 1885 et 1909. Justifier cette chronologie.

1. L'atome d'hydrogène étant dans un état correspondant au niveau  $n=3$ , il reçoit un photon d'énergie 0,5 eV. Le photon est-il absorbé ?

2. L'atome d'hydrogène étant dans un état correspondant au niveau  $n=3$ , il reçoit un photon d'énergie 2 eV. Montrer que l'électron est arraché. Calculer son énergie cinétique en eV.

Fiche de TD n° 03

**Exercice 1**

Si l'électron de l'Hydrogène est excité au niveau  $n=4$ , combien de raies différentes peuvent-elles être émises lors du retour à l'état fondamental. Calculer dans chaque cas la fréquence et la longueur d'onde du photon émis.

**Exercice 2**

Si un atome d'Hydrogène dans son état fondamental absorbe un photon de longueur d'onde  $\lambda_1$  puis émet un photon de longueur d'onde  $\lambda_2$ , sur quel niveau l'électron se trouve-t-il après cette émission ?

a)  $\lambda_1 = 97.28 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 1879 \text{ nm}$

b)  $\lambda_1 = 97.28 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 78.15 \text{ nm}$

**EXERCICE 3**

Le spectre de l'atome d'hydrogène peut se décomposer en plusieurs séries de raies nommées pour les quatre premières : séries de Lyman ; de Balmer ; de Paschen et de Pfund.

a) Expliquer à quoi correspondent ces diverses séries.

b) Les longueurs d'onde des raies de chaque série sont comprises entre deux valeurs limites. À quoi correspondent ces deux limites ?

c) Donner une formule générale permettant le calcul de ces deux limites.

d) Calculer les longueurs d'ondes limites des séries de Lyman, Balmer, de Paschen et de Pfund.

e) Attribuer à chaque série son domaine spectral (U.V ; Visible ; I.R).

Fiche de TD n° 06

**Exercice 1**

On énonce la règle de Hund :

« Pour une configuration électronique donnée, le terme spectral d'énergie la plus basse a :

- I. la multiplicité  $2S+1$  la plus grande possible
- II. la valeur du nombre quantique L la plus grande possible »

1. a Quelle est la configuration de l'état fondamental du carbone ( $Z=6$ ) ?
1. b Quel sont les termes spectraux formés à partir de cette configuration, correspondant aux différentes valeurs possibles de L et S ?
1. c Parmi ces termes spectraux  $^{2S+1}L$ , montrer que certains sont incompatibles avec un état antisymétrique par échange des électrons et sont donc interdits.
1. d Conclure sur la nature du terme électronique correspondant au niveau d'énergie fondamental de l'atome de carbone.
2. Même questions pour l'atome d'oxygène ( $Z=8$ ).

**Exercice 2**

Le Francium est l'élément de numéro atomique  $Z=87$ .

1. Donner la configuration électronique de l'état fondamental de cet atome.
2. Donner quatre configurations excitées de votre choix et distinguer par leur notation spectroscopique les termes spectraux  $^{2S+1}L_J$  auxquelles elles donnent lieu en explicitant et justifiant la signification de cette notation spectroscopique.

**Exercice 3**

Un électron de masse  $m$ , de charge  $-e$ , situé au point  $M(t)$  est élastiquement lié à son noyau, considéré comme immobile au point O, par une force  $\vec{f} = -m\omega_0^2 \vec{r}$  où  $\vec{r} = \vec{OM}$ . Il est soumis à un champ magnétique uniforme et stationnaire  $\vec{B}_0 = B_0 \vec{e}_z$ .

Mettre en équation le mouvement. Quel est le mouvement selon Oz ?

Pour le mouvement projeté sur le plan xOy, on cherchera une solution de la forme  $x = A \exp(j \omega t)$  et  $y = B \exp(j \omega t)$  et on trouvera deux valeurs pour  $\omega$  (on simplifiera au premier ordre sachant que  $\omega_c \ll \omega_0$ ) auxquelles on associera deux valeurs pour le rapport A/B, valeurs que l'on interprétera.

Fiche de TD n° 08 : R-X

**Exercice 1°:**

Le chlorure de césium cristallise dans une structure de symétrie cubique avec un paramètre de maille  $a = 4,12 \text{ \AA}$ .

- (i) Dessiner la maille élémentaire du chlorure de césium.
- (ii) Au sein de cette maille dessiner les plans réticulaires (100), (110), (111) et (200).
- (iii) La distance réticulaire d'un plan (hkl) pour une maille élémentaire de symétrie cubique peut être calculée grâce à la formule :

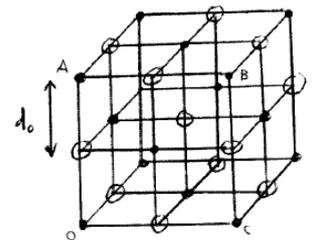
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Pic	Position angulaire ( $\theta^\circ$ )
Pic 1	10,78
Pic 2	15,35
Pic 3	18,88
Pic 4	21,94

Pour chaque plan cité précédemment, calculer la distance réticulaire associée.

- (iv) Le diffractogramme réalisé sur une poudre polycristalline de CsCl a été réalisé en utilisant une radiation du cuivre (faisceau incident de rayons X) de longueur d'onde  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ . La position angulaire de chaque pic de diffraction a été mesurée et les valeurs obtenues sont reportées dans le tableau suivant.

Associer chaque pic de diffraction observé à un plan (hkl).



Structure cristalline de KCl

**Exercice 2°:**

- (i) Par des considérations géométriques, trouvez la valeur de  $d_0$  en fonction de  $N_A$  (nombre d'Avogadro), de  $\rho$  la densité de KCl ( $1990 \text{ kg/m}^3$ ) et de  $M_K$  la masse molaire de K:  $39,10 \text{ g/mole}$ ,  $M_{Cl}$  la masse molaire de Cl:  $35,45 \text{ g/mole}$ .
- (ii) Donner les indices de Miller du plan (ABCO)

**Exercice 3°:**

Une source de rayons X est produite en accélérant des électrons par une différence de potentiel de  $45\,000 \text{ volts}$ . Quelle sera la longueur d'onde limite en nm du rayonnement X émis ? ( $R=1.097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ ).

**Exercice 4°:**

En utilisant une formule approximative, calculer la longueur d'onde du rayonnement X (raie  $K_\alpha$ ) émis par le zinc ( $Z = 30$ ).

**Exercice 5°:**

La raie  $K_\alpha$  du palladium est située à  $58 \text{ picomètres}$ . Quel est le voltage minimum que l'on doit appliquer sur les électrons pour produire ces rayons X?

**Exercice 6°:**

Un faisceau d'électrons monocinétiques est réfléchi sur un monocristal. Le plus petit angle de réflexion est de  $54^\circ$ . Si les plans réticulaires atomiques sont espacés de  $0.215 \text{ nm}$  quelle est la longueur d'onde associée au faisceau d'électrons ?

**Exercice 7°:**

Une série de déterminations expérimentales a pu montrer la valeur des longueurs d'onde des raies  $K_\alpha$  de plusieurs métaux.

- (i) À partir de ces résultats (tableau suivant) montrez que la loi de Moseley est satisfaite.

Métal	Z	Raies $K_\alpha$ (nm)
Al	13	0,832
Fe	26	0,193
Cu	29	0,154
Mo	42	0,071

- (ii) A l'aide des résultats précédents, identifier le métal dont la raie  $K_\alpha$  apparaît à  $0,274 \text{ nm}$ .

W	74	0,021
U	92	0,013

## TP 1 : EFFET PHOTOELECTRIQUE

### OBJECTIFS

Ce TP a pour but de mettre en évidence le caractère corpusculaire de la lumière, de mesurer la constante de Planck.

### I. Théorie

#### 1. Lois de l'effet photoélectrique

On a donné le nom d'effet photoélectrique au phénomène d'extraction d'électrons de la matière sous l'effet de la lumière. Il obéit notamment aux lois suivantes :

1. tout se passe comme si l'énergie contenue dans la lumière était groupée en quanta indivisible, d'autant plus petit que la longueur d'onde est petite.
2. L'effet n'a lieu que si la longueur d'onde de la lumière incidente est inférieure à une valeur précise  $\lambda_0$ , appelée seuil photoélectrique qui dépend uniquement de la nature du métal ;
3. Si  $\lambda > \lambda_0$ , l'effet n'a pas lieu, aussi intense que puisse être le flux lumineux incident ;
4. Si  $\lambda < \lambda_0$ 
  - l'émission des électrons est quasi instantanée même si l'intensité lumineuse est faible ; le premier électron est éjecté  $10^{-9}$  secondes après que la lumière ait rencontré le métal ;
  - la vitesse maximum des photoélectrons ne varie pas quand on agit sur l'intensité lumineuse, par contre leur nombre lui, varie ;
  - la vitesse maximum des photoélectrons augmente quand  $\lambda$  diminue.

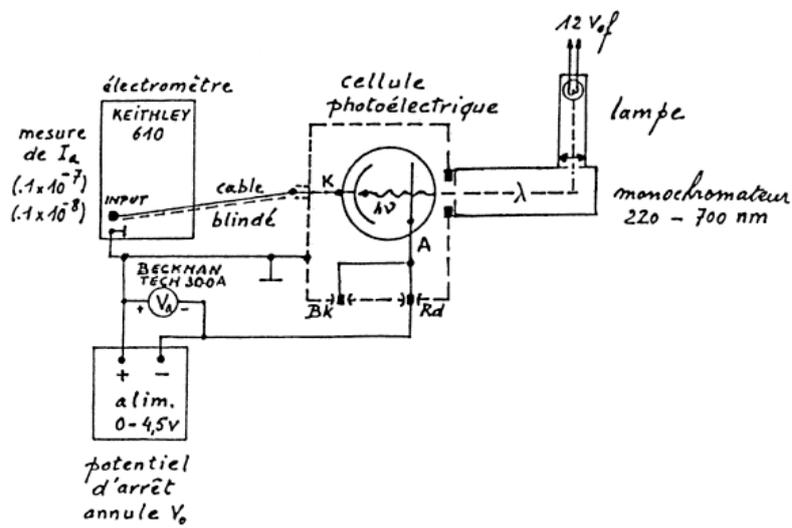
#### 2. Détermination de la constante de Planck

On peut déterminer la constante de Planck à partir de l'équation d'Einstein  $E_c = h\nu - W = h(\nu - \nu_0)$ . Pour déterminer l'énergie cinétique des électrons on procède comme ceci : on applique une tension opposée au mouvement des électrons de manière à les ralentir. Quand le courant tombe à zéro, ça veut dire que l'énergie cinétique correspondant à une fréquence  $\nu$  des photons incidents est exactement contrebalancée par la tension appliquée. On a donc  $e V_{\text{arrêt}} = E_c$  et donc  $V_{\text{arrêt}} = h/e (\nu - \nu_0)$ .

En déterminant  $V_{\text{arrêt}}$  pour différentes fréquences lumineuses, on doit obtenir une droite dont le coefficient angulaire vaut  $h/e$ .

### II. Expérience

*Un faisceau lumineux est envoyé à travers un monochromateur à prismes de verre et on place à sa sortie une cellule photoélectrique. Celle-ci est raccordée à un générateur et un électromètre. La tension appliquée par le générateur peut être changée avec précision grâce à un potentiomètre ; l'électromètre permet de mesurer, théoriquement de manière précise, des courants extrêmement faibles.*



### Vérification des lois de l'effet photoélectrique

On commence par choisir une tension d'alimentation de la lampe source : 10 et 12V. On fixe ensuite une longueur d'onde qui se situe dans la gamme de la meilleure sensibilité du monochromateur : entre 400 et 600 nm. Il suffit ensuite de mesurer l'intensité du courant en fonction de la tension appliquée.

Nous devons observer expérimentalement les phénomènes suivants :

- Lorsque la tension appliquée est nulle, le courant n'est pas nul car les photons ont assez d'énergie pour arracher des électrons de la cathode et leur donner l'énergie cinétique suffisante à leur voyage vers l'anode.
- En augmentant la tension, le courant doit croître jusqu'à une valeur limite appelée courant de saturation. Ceci est dû au fait que l'anode récolte de plus en plus d'électrons arrachés jusqu'à tous les recueillir.
- En inversant les bornes du générateur, il est possible de constater une certaine valeur  $V_{\text{arrêt}}$  de la tension appliquée pour laquelle le courant s'annule. On l'appelle potentiel d'arrêt et ne dépend uniquement que de la longueur d'onde de la lumière incidente.
- En changeant l'intensité lumineuse (en modifiant la tension d'alimentation de la lampe), le plateau de saturation du courant est modifié.

En effet le nombre d'électrons émis augmente ou diminue. Cependant le potentiel d'arrêt reste inchangé.

### III. Résultats des mesures

#### 1. Courant de saturation

Ces deux premières séries de mesure consistaient à vérifier que pour deux intensités différentes de la lumière incidente, nous obtenions bien le même  $V_{\text{arrêt}}$  et un courant de saturation différent. La longueur d'onde choisie est de 450 nm et les deux tensions d'alimentation sont 12 V et 6 V.

12 V		6 v	
Tension (V)	Courant (nA)	Tension (V)	Courant (nA)

-0.91	0	-0.93	0
-0.8	0.01	-0.8	0.006
-0.6	0.04	-0.6	0.02
-0.4	0.08	-0.4	0.042
-0.2	0.15	-0.2	0.071
0	0.22	0	0.12
0.2	0.3	0.2	0.18
0.4	0.4	0.4	0.24
0.6	0.54	0.6	0.3
0.8	0.62	0.8	0.36
1	0.7	1	0.41
1.2	0.8	1.2	0.47
1.4	0.9	1.4	0.52
1.6	0.98	1.6	0.55
1.8	1.15	1.8	0.62
2	1.25	2	0.65
2.4	1.4	2.4	0.69
2.6	1.55	2.6	0.81
2.8	1.7	2.8	0.87
3	1.8	3	0.93
3.5	2.03	3.5	1
4	2.25	4	0.15
4.5	2.4	4.5	0.3
5	2.6	5	1.4
6	2.8	6	1.5
7	3.1	7	1.7
8	3.2	8	1.8
9	3.4	9	1.9
10	3.6	10	2
11	3.7	11	2.1
12	3.9	12	2.2
14	4.2	14	2.3
16	4.5	16	2.5

- Tracer la courbe  $i = f(V)$ . Commenter.

- Déduire la valeur du potentiel d'arrêt.

- Calculer, pour la longueur d'onde choisie, la vitesse maximale d'un électron émis.

Comparer-la   la célérité de la lumière dans le vide. Conclusion.

## 2. Potentiel d'arrêt

Ces trois dernières séries de mesures ne servaient qu'à montrer que les  $V_{\text{arrêt}}$  étaient différents pour des valeurs de longueurs d'onde différentes 450 nm, 500 nm et 550 nm, mais pour une valeur de tension d'alimentation de la lampe identique 12 V.

450 nm		500 nm		550 nm	
Tension (V)	Courant (nA)	Tension (V)	Courant (nA)	Tension (V)	Courant (nA)
-0.9	0	-0.45	0		
-0.8	0.1	-0.4	0.1		
-0.6	0.4	-0.3	0.3		
-0.4	0.8	-0.2	0.7		
-0.2	1.5	-0.1	1.1	-0.16	0
0	2.2	0	1.6	0	0.7
2,08333	12,45902	1	9,18032787	1,91666667	10,9836066
2,625	15,57377	1,41666667	10,3278689	2,79166667	14,5901639
3,375	20,16393	1,79166667	12,6229508	3,20833333	16,0655738

3,79167	21,96721	2,25	16,0655738	3,58333333	18,6885246
4,58333	24,91803	2,625	19,6721311	-7	19,0163934
5,41667	27,54098	3,41666667	24,7540984	4,83333333	21,147541
6,16667	28,68852	4,20833333	29,1803279	6	23,1147541
7	31,14754	4,79166667	33,2786885	7,16666667	25,0819672
8,25	33,44262	5	35,4098361	8	26,0655738
9,95833	36,39344	5,375	36,3934426	8,95833333	28,0327869
11	37,54098	5,95833333	37,3770492	10	29,1803279
12	39,67213	8	44,4262295	10,9583333	30,1639344
12,91667	41,47541	9,95833333	48,5245902	11,9583333	30,8196721
13,95833	42,45902	10,9583333	50,4918033	13,9166667	31,147541
14,91667	44,2623	11,9583333	52,7868852	15,9166667	32,1311475
15,95833	45,40984	13,9166667	54,7540984	18,875	34,0983607
16,91667	46,55738	15,9166667	56,7213115		
17,95833	48,52459	18,875	57,3770492		

- Tracer les courbes  $i = f(V)$ . Commenter.
- Déduire les valeurs du potentiel d'arrêt. Interpréter.

### 3. Constante de Planck

Le balayage des longueurs d'onde est donné de 420 à 580 nm par pas de 20 nm. Le tableau suivant représente la variation de  $V_{\text{arrêt}}$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  (la vitesse de la lumière dans le vide est  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  m/s).

$\lambda$ (nm)	$V_{\text{arrêt}}$ (V)	$\nu$ (Hz)
420	1.09	
440	0.98	
460	0.87	
480	0.76	
500	0.67	
520	0.6	
540	0.5	
560	0.4	
580	0.38	

- Remplir le Tableau.
- Tracer la courbe  $V_{\text{arrêt}} = f(\nu)$ . Interpréter.
- Déduire la valeur de la constante de Planck :  $h = ( \dots \pm \dots ) J.s$ .

## TP 1 Partie 02 : EFFET PHOTOELECTRIQUE

### Droite d'ajustement affine par la méthode des moindres carrés

#### Définition

Soit S une série statistique à deux variables quantitatives discrètes X et Y de taille  $n \in \mathbb{N}$ , définie par  $S = \{(x_i; y_i)\}$  tel que :  $1 \leq i \leq n$ . On appelle **droite d'ajustement affine par la méthode des moindres carrés** de S la droite d'équation

$$y = \frac{\text{cov}(X, Y)}{V(X)} (x - \bar{x}) + \bar{y}$$

Où

$\text{cov}(X, Y)$  est la covariance de X et Y ;

$V(X)$  est la variance de X ;

$\bar{x}$  et  $\bar{y}$  sont les moyennes arithmétiques respectives de X et de Y.

Utilisant la méthode de « **droite d'ajustement affine : la méthode des moindres carrés** », et les résultats de mesure TP – I, déduire les valeurs du potentiel d'arrêt pour chaque expériences de l'effet photoélectrique.

### TP 5: Les Harmonique sphérique

#### Expression des harmoniques sphériques :

En mathématiques, les harmoniques sphériques sont des fonctions harmoniques particulières. À titre de rappel, une fonction est dite harmonique lorsque son laplacien est nul. Les harmoniques sphériques sont défini par la formule suivante :

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2 \cdot (l - m)!}{(l + m)!}} \cdot P_l^m(\cos \theta) \cdot \cos(m\varphi)$$

où  $i$  est l'imaginaire et  $P_{lm}$  est le polynôme de Legendre :

$$P_l^m(X) = \frac{(-1)^m}{2^l \cdot l!} \cdot (1 - X^2)^{m/2} \cdot \frac{\partial^{m+l}}{\partial X^{m+l}} [(X^2 - 1)^l]$$

Les fonctions  $Y_l^m(\theta, \varphi)$  présentent de plus en plus de symétries au fur et à mesure que  $l$  croît (sauf lorsque  $l = 0$ , puisque  $Y_0^0$  est une fonction constante et décrit donc une sphère).

#### Représentations graphiques :

En utilisant un code Matlab et à partir des formules citées ci-dessus, donner une représentation graphique des harmoniques sphériques correspondant aux orbitales s, p, d, f, g.

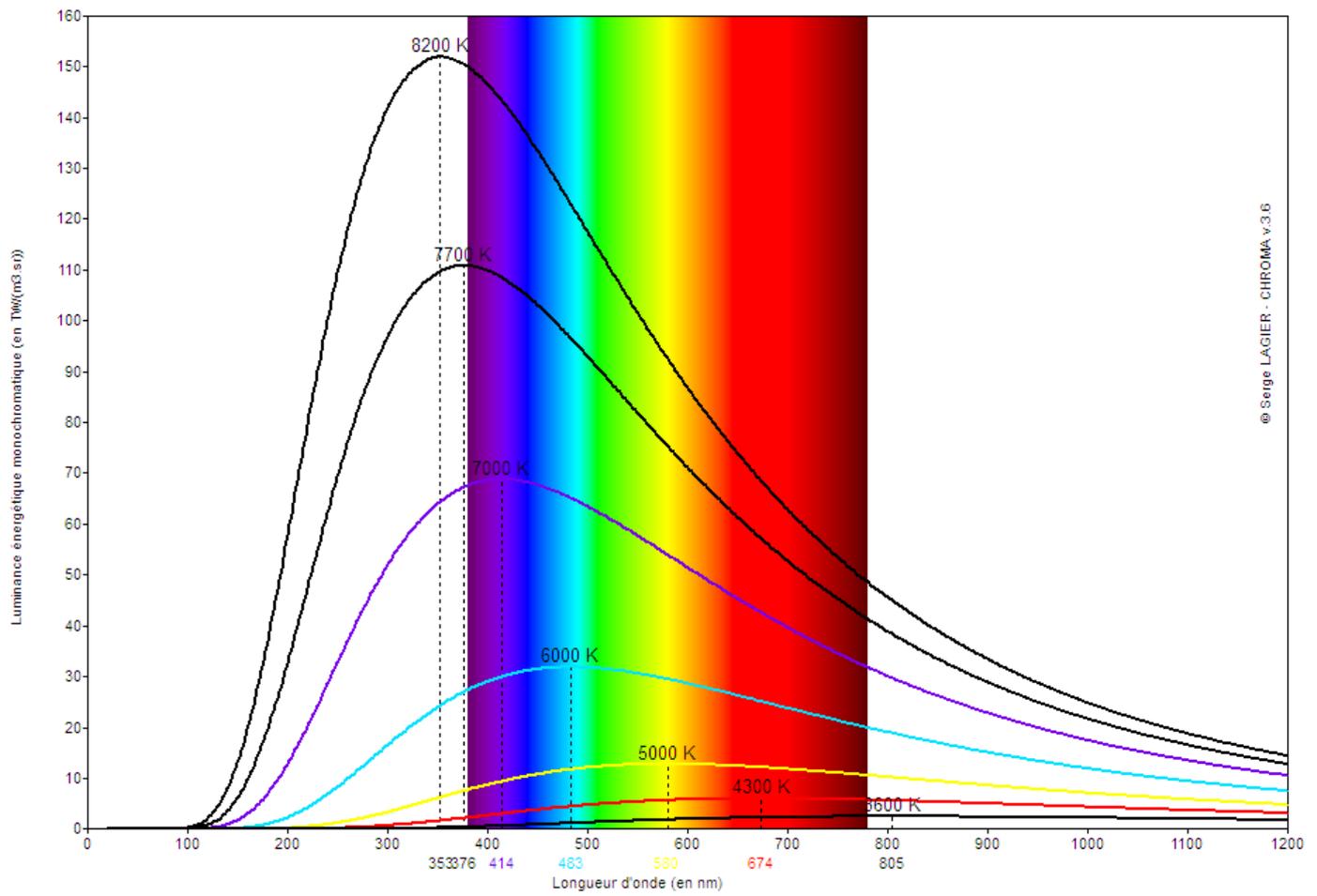
#### Exemple :

Pour tracer la courbe de la fonction  $f(x, y) = \mathbf{x} \exp(-\mathbf{x}^2 - \mathbf{y}^2)$  on exécute en Matlab les instructions suivantes :

```
[x,y] = meshgrid([-2:.2:2]);
```

```
z = x.*exp(-x.^2-y.^2);
```

## Corps Noir



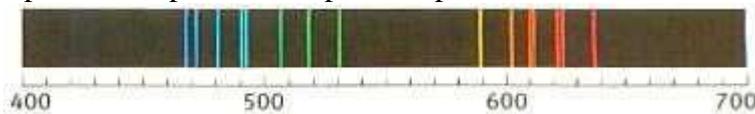
T (°K)	$\lambda$ (nm)
2500	1159
3000	966
3500	828
4000	724
4500	644
5000	580
5500	527
6000	483
6500	446
7000	414
7500	386
8000	362
8200	353

Fiche de TD n° 03

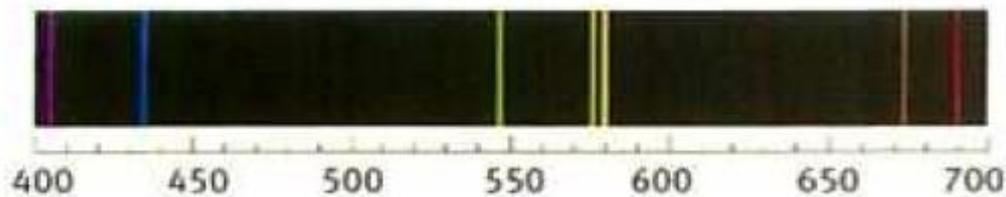
Exercice n°1

9.4 Spectres du zinc et du mercure

1. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de zinc.



- Est-ce un spectre d'émission ou d'absorption ?
  - Quelle est la grandeur représentée sur le segment gradué ? L'unité n'est pas précisée : quelle est-elle ?
  - Déterminer la valeur de la plus petite longueur d'onde des raies du spectre, située dans le bleu, le plus à gauche.
  - Même question pour la plus grande longueur d'onde, située dans le rouge, le plus à droite.
2. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de mercure.



- Nous avons indiqué dans le cours qu'un spectre est caractéristique de l'élément considéré ; justifiez cette affirmation, en vous basant sur une comparaison des spectres du mercure et du zinc.
- Pour obtenir ces spectres, il a été nécessaire de placer les éléments zinc et mercure, qui sont des métaux, sous forme d'une vapeur (les métaux sont alors dans l'état gazeux, en suspension dans l'air). Pourquoi ?
- Quelle serait l'allure du spectre, si on mélangeait les vapeurs de zinc et de mercure ?

Exercice n°2

On dispose d'une photocathode au césium éclairée par une lumière monochromatique.

- La longueur d'onde seuil pour le césium est  $\lambda_0 = 0.66 \mu\text{m}$ . Déterminer le travail d'extraction  $W_0$  d'un électron.
- La lumière qui éclaire cette photocathode a une longueur d'onde  $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$ .
  - Déterminer l'énergie cinétique maximale d'un électron émis par la cathode.
  - déterminer la vitesse de cet électron.
  - Déterminer la tension d'arrêt dans ces conditions.

Exercice n°3

On dispose d'une cellule photoélectrique au potassium dont le travail d'extraction est  $W_0 = 2.2 \text{ eV}$ .

On détermine pour cette cellule, la tension d'arrêt en fonction de diverses fréquences d'éclairage. On obtient les résultats suivants : (On a indiqué dans le tableau la valeur absolue de la tension d'arrêt).

$\nu$ (Hz)	$7.00 \cdot 10^{14}$	$8.00 \cdot 10^{14}$	$9.00 \cdot 10^{14}$
$ U_0 $ (V)	0.69	1.10	1.52

1. Tracer la courbe  $\nu = f(|U_0|)$  et conclure.
2. En déduire la valeur du seuil photoélectrique de cette photocathode. Ce résultat est-il en accord avec la valeur de  $W_0$  ?
3. Déterminer la valeur de la constante de Planck ( $h$ ) à partir de la courbe réalisée. Cette valeur correspond-elle à la valeur admise ?

## CORRECTION

### Spectres du zinc et du mercure

1. a. Il s'agit d'un spectre de raies d'émission.

b. La grandeur portée en abscisse est la longueur d'onde  $\lambda$  ; l'unité est le nanomètre (nm).

c. Avec de bons yeux, on peut lire  $\lambda_{\text{bleu}} \approx 470$  nm.

d.  $\lambda_{\text{rouge}} \approx 640$  nm.

2. a. Les spectres du mercure et du zinc sont totalement différents ; ils ne comportent quasiment aucune raie monochromatique en commun. On a bien là une véritable *signature* de l'élément considéré (l'existence d'un spectre est la manifestation de la structure interne de l'atome, différente pour chaque élément).

b. Les éléments ont été portés à haute température, afin d'exciter leurs atomes ou ions constituants. Ces entités, une fois excitées, se désexcitent en émettant les spectres de raies observés.

c. Le spectre résultant serait un exact mélange des deux spectres. Tout l'art du spécialiste en spectroscopie stellaire consiste à *reconnaître* les raies caractéristiques de tel ou tel élément, mélangées qu'elles sont avec toutes les autres raies du spectre d'une étoile.

**Correction d'Examen de TP Physique 8**

1°. Ajustage linéaire des points :

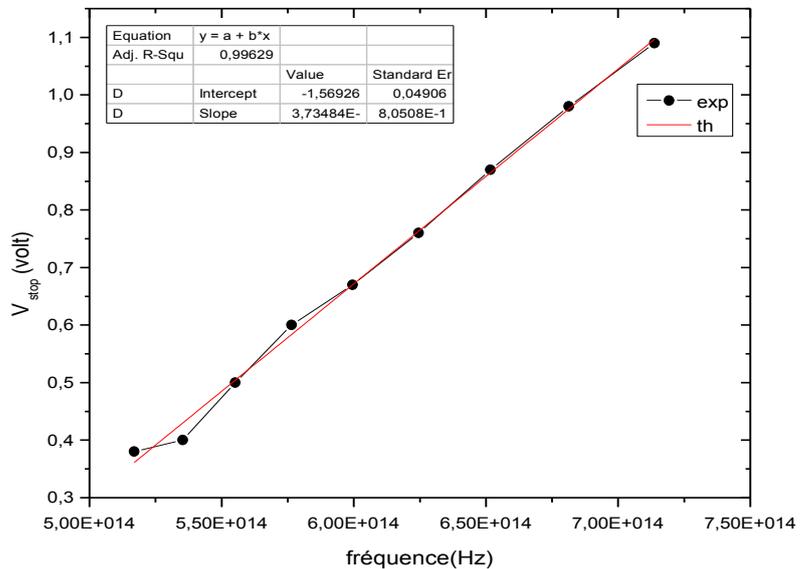
$\lambda$ [nm]	1,09	0,98	0,87	0,76	0,67	0,6	0,5	0,4	0,38
$\nu$ [Hz] $\cdot 10^{-14}$	7.13792	6.81346	6.51723	6.24568	5.99585	5.76524	5.55171	5.35344	5.16884

La valeur de  $V_0$  est telle qu'aucun électron n'atteigne l'anode ( $v = 0$ ). L'électron est donc émis avec une vitesse maximale  $v_m$  telle que :

$$E_{cm} = mv_m^2/2 = eV_0 = h(\nu - \nu_s)$$

On peut alors estimer la valeur de la constante de Planck  $h$  en multipliant la valeur de la pente de  $V(\nu)$  par  $e$  :

$$h = 3,80413 \cdot 10^{-15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,0866 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$



2°.  $Z=22$ , le titane.

3°. `function [m, b]=fit(x, y);`

```

n=length(x);
num=n*sum(x.*y)-sum(x)*sum(y);
den=n*sum(x.^2)-(sum(x))^2;
m=num/den;
b=mean(y)-m*mean(x);

```

```

>> x=[13 26 29 42 74 92];
>> y=[6.00481E8 1.24676E9 1.39573E9 2.05557E9 3.77964E9 4.80384E9];
>> [m b]=fit(x, y)
m =
    5.3282e+007
b =
   -1.3730e+008

```

<b>Z</b>	<b>Sqrt(<math>\nu</math> (Hz))</b>
13	6,00481E8
26	1,24676E9
29	1,39573E9
42	2,05557E9
74	3,77964E9
92	4,80384E9

4°. 1. a. Il s'agit d'un spectre de raies d'émission.

b. La grandeur portée en abscisse est la longueur d'onde  $\lambda$  ; l'unité est le nanomètre (nm).

c.  $\lambda_{\text{bleu}} \approx 470 \text{ nm}$ .

d.  $\lambda_{\text{rouge}} \approx 640 \text{ nm}$ .

2. a. Les spectres du mercure et du zinc sont totalement différents ; ils ne comportent quasiment aucune raie monochromatique en commun. On a bien là une véritable signature de l'élément considéré (l'existence d'un spectre est la manifestation de la structure interne de l'atome, différente pour chaque élément).

b. Les éléments ont été portés à haute température, afin d'exciter leurs atomes ou ions constituants. Ces entités, une fois excitées, se désexcitent en émettant les spectres de raies observés.

c. Le spectre résultant serait un exact mélange des deux spectres.

**Université Africaine D'Adrar - Ahmed Draya**

**3<sup>ème</sup> Année Physique**

**Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur**

**Module : TP Physique VIII**

**Département Agriculture Saharienne**

**Durée : 1 H 30 min**

### Examen de TP Physique 8

1°. Le balayage des longueurs d'onde est donné de 420 à 580 nm par pas de 20 nm. Le tableau suivant représente la variation de  $V_{\text{arrêt}}$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  (la vitesse de la lumière dans le vide est  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

A- Remplir le Tableau.

B- Tracer la courbe  $V_{\text{arrêt}} = f(\nu)$ . Interpréter.

C- Déduire la valeur de la constante de Planck :  $h = ( \dots \pm \dots ) \text{ J.s}$ .

$\lambda$ (nm)	$V_{\text{arrêt}}$ (V)	$\nu$ (Hz)
420	1.09	
440	0.98	
460	0.87	
480	0.76	
500	0.67	
520	0.6	
540	0.5	
560	0.4	
580	0.38	

2°.

A- Une série de déterminations expérimentales a pu montrer la valeur des longueurs d'onde des raies  $K_{\alpha}$  de plusieurs métaux. À partir de ces résultats (tableau suivant) montrez que la loi de MOOSELEY est satisfaite.

B- À l'aide des résultats précédents, identifier le métal dont la raie  $K_{\alpha}$  apparaît à 0,274 nm.

Métal	Z	Raies $K_{\alpha}$ (nm)
Al	13	0,832
Fe	26	0,193
Cu	29	0,154
Mo	42	0,071
W	74	0,021
U	92	0,013

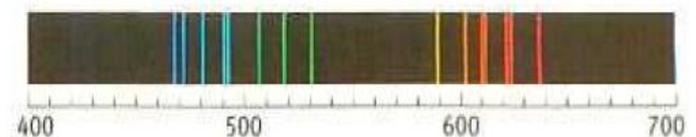
3°. En utilisant la méthode de « droite d'ajustement affine par la méthode des moindres carrés », écrire un programme Matlab pour retrouver la loi de MOOSELEY.

4°.1. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de zinc.

a. Est-ce un spectre d'émission ou d'absorption ?

b. Quelle est la grandeur représentée sur le segment gradué ? L'unité n'est pas précisée : quelle est-elle ?

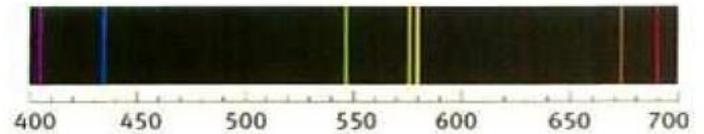
c. Déterminer la valeur de la plus petite longueur d'onde des raies du spectre, située dans le bleu, le plus à gauche.



d. Même question pour la plus grande longueur d'onde, située dans le rouge, le plus à droite.

2. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de mercure.

a. Nous avons indiqué dans le cours qu'un spectre est caractéristique de l'élément considéré ; justifiez cette affirmation, en vous basant sur une comparaison des spectres du mercure et du zinc.



b. Pour obtenir ces spectres, il a été nécessaire de placer les éléments zinc et mercure, qui sont des métaux, sous forme d'une vapeur (les métaux sont alors dans l'état gazeux, en suspension dans l'air). Pourquoi ?

c. Quelle serait l'allure du spectre, si on mélangeait les vapeurs de zinc et de mercure ?

**Université Ahmed Draya Adrar**

**3<sup>ème</sup> Année Physique**

**Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur**

**Module : Physique VIII**

**Département Agriculture Saharienne**

**A-U 2011-2012**

### Examens S5

#### Exercice 1

Dans une expérience de G.P. Thomson, un mince pinceau d'électrons traversait une feuille métallique, F, et l'on observait des anneaux analogues aux anneaux de diffraction que l'on aurait obtenus avec un faisceau de rayons X traversant la même feuille.

1°. Etablir, en application de la loi de Bragg, une relation entre longueur d'onde associée  $\lambda$  et le rayon R du premier anneau de diffraction. La distance du plan de cet anneau à la feuille métallique est D.

2°. En admettant que la longueur d'onde associée aux électrons est définie par  $\lambda = h / m u$  (h, constante de Planck, m et u masse et vitesse de l'électron) montrer que, entre la tension accélératrice, V, de ces électrons et le rayon R existe une relation

$$R \sqrt{V} = C = \text{Constante}.$$

Déterminer C en fonction de D, h, e, m et d, distance des plans réticulaires du cristal.

3°. Application numérique :

Calculer d quand on observe un rayon R = 1 cm pour D = 50 cm et V = 240 000 volts.

#### Exercice 2

1°. Le travail d'extraction du sodium est de 2,3 eV. On éclaire une cathode de sodium avec une radiation de 6800 Å, y a-t-il effet photoélectrique ? Quel est le seuil photoélectrique ?

2°. On éclaire la cathode avec une radiation de longueur d'onde de 3500 Å. Calculer l'énergie cinétique maximum des électrons.

#### Exercice 3

1. Calculer les valeurs des différents niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. Les schématiser.

2. Quelle est la longueur d'onde du photon provoquant la transition d'un électron du niveau fondamental au niveau n=3.

3. L'atome d'hydrogène dans son état fondamental absorbe un photon de longueur d'onde  $8,5 \cdot 10^{-8}$  m. L'atome est-il ionisé ?
4. L'atome d'hydrogène est excité au niveau  $n=4$ . Quelles sont les longueurs d'onde des photons émis lors de sa désexcitation. Quelle est la région du spectre concernée ?
5. Dans cet état excité, quelle est l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène.

**Exercice 4**

En utilisant la loi de MOSELEY, calculer l'énergie en keV et la longueur d'onde en nm de la raie  $K_{\alpha}$  de l'or  ${}_{79}\text{Au}$ .

**Université Africaine D'Adrar - Ahmed Draya**  
**3<sup>ème</sup> Année Physique**  
**Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur**  
**Module : TP Physique VIII**  
**Département Agriculture Saharienne**  
**Durée : 1 H 30 min**

**Examen de TP Physique 8**

1°. Le balayage des longueurs d'onde est donné de 420 à 580 nm par pas de 20 nm. Le tableau suivant représente la variation de  $V_{\text{arrêt}}$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

- A- Remplir le Tableau.
- B- Tracer la courbe  $V_{\text{arrêt}} = f(\nu)$ .  
Interpréter.
- C- Déduire la valeur de la constante de Planck :  $h = ( \dots \pm \dots ) \text{ J.s}$ .

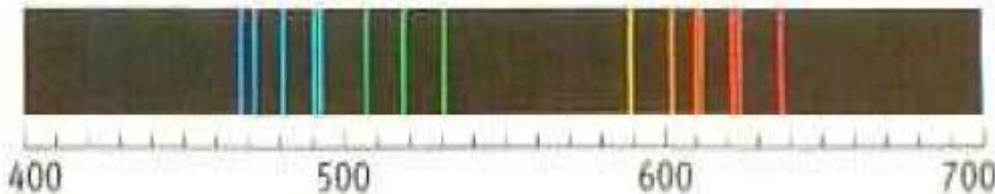
$\lambda$ (nm)	420	440	460	480	500	520	540	560	580
$\nu$ (Hz)									
$V_{\text{arrêt}}$ (V)	1,09	0,98	0,87	0,76	0,67	0,6	0,5	0,4	0,38

- 2°. A- Une série de déterminations expérimentales a pu montrer la valeur des longueurs d'onde des raies  $K_{\alpha}$  de plusieurs métaux. À partir de ces résultats (tableau suivant) montrez que la loi de MOOSELEY est satisfaite.
- B- À l'aide des résultats précédents, identifier le métal dont la raie  $K_{\alpha}$  apparaît à 0,274 nm.

Métal	Z	Raies $K_{\alpha}$ (nm)
Al	13	0,832
Fe	26	0,193
Cu	29	0,154
Mo	42	0,071
W	74	0,021
U	92	0,013

3°. En utilisant la méthode de « droite d'ajustement affine par la méthode des moindres carrés », écrire un programme Matlab pour retrouver la loi de MOOSELEY (On prend comme exemple les expériences de Q.2°).

4°.1. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de zinc.

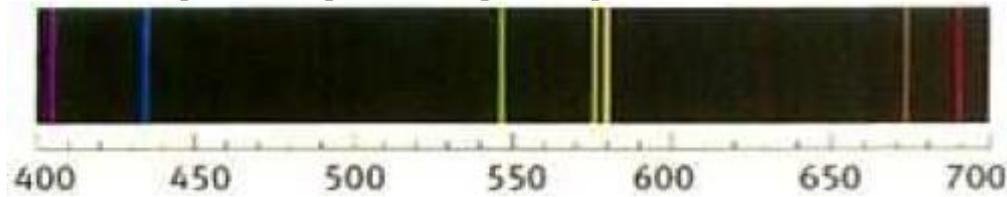


- A. Est-ce un spectre d'émission ou d'absorption ?
- B. Quelle est la grandeur représentée sur le segment gradué ? L'unité n'est pas précisée : quelle est-elle ?

C. Déterminer la valeur de la plus petite longueur d'onde des raies du spectre, située dans le bleu, le plus à gauche.

D. Même question pour la plus grande longueur d'onde, située dans le rouge, le plus à droite.

2. Le document ci-dessous reproduit le spectre émis par la vapeur de mercure.



A. Nous avons indiqué dans le cours qu'un spectre est caractéristique de l'élément considéré ; justifiez cette affirmation, en vous basant sur une comparaison des spectres du mercure et du zinc.

B. Pour obtenir ces spectres, il a été nécessaire de placer les éléments zinc et mercure, qui sont des métaux, sous forme d'une vapeur (les métaux sont alors dans l'état gazeux, en suspension dans l'air). Pourquoi ?

C. Quelle serait l'allure du spectre, si on mélangeait les vapeurs de zinc et de mercure ?

Université Ahmed Draya Adrar

3<sup>ème</sup> Année Physique

Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur

Module : Physique VIII

Département Agriculture Saharienne

A-U 2011-2012

### Correction Examens S5

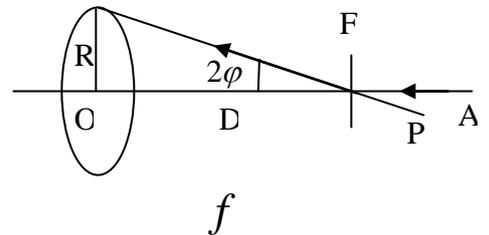
#### Exercice 1

1°. L'onde associée se propage et diffractée par les atomes d'un plan réticulaire P de la feuille F et déviée d'un angle  $2\varphi$ . La loi de Bragg s'écrit :  $\lambda = 2d \sin \varphi$  avec  $\sin \varphi = \frac{R}{D}$  ; on a donc  $\lambda = 2d \frac{R}{D}$ .

2°. La longueur d'onde, associée aux électrons de vitesse  $u$ , est  $\lambda = \frac{h}{mu}$  ; on peut écrire  $\lambda^2 = \frac{h^2}{2} \frac{1}{\frac{1}{2} mu^2 . m}$  et l'on

reconnait l'énergie cinétique  $\frac{1}{2} mu^2$  qui exprimée à partir de la tension accélératrice  $V$ , est égale à  $eV$ . Il vient donc

$$\lambda = d \frac{R}{D} = \frac{h}{\sqrt{V} \sqrt{2me}}, \quad \text{ou} \quad R \sqrt{V} = \frac{D}{d} \left( \frac{h}{\sqrt{2me}} \right) ;$$



pour un appareil donné et un cristal donné, cette relation est de la forme

$$R \sqrt{V} = C = \text{Constante} .$$

Numériquement, le terme  $\frac{h}{\sqrt{2me}}$  a pour valeur  $1,226.10^{-9} \approx \sqrt{150}.10^{-10}$ .

3°. On trouve  $d = 1,25. 10^{-10} \text{ m}$ , ou  $1,25 \text{ \AA}$ .

#### Exercice 2

1°. Pour produire un effet photoélectrique, l'énergie de la radiation doit être égale ou supérieure au travail d'extraction des électrons du sodium, soit :

$$2,3 \text{ eV} = 2,3(1,602 \times 10^{-19}) \text{ J} = 3,68 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Une radiation de longueur d'onde  $6800 \text{ \AA}$  possède une énergie de

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6800 \times 10^{-10}} = 2,92 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Il n'y a donc pas d'effet photoélectrique avec la radiation de  $6800 \text{ \AA}$  car celle-ci a une énergie inférieure au seuil photoélectrique de  $3,68 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

2°. La radiation de  $3500 \text{ \AA}$  possède une énergie de

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3500 \times 10^{-10}} = 5,67 \times 10^{-19} \text{ J}$$

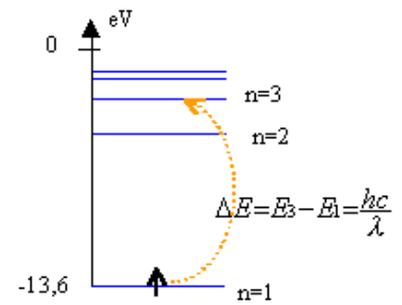
On a dans ce cas un effet photoélectrique et l'énergie cinétique maximum des électrons sera égale à la différence entre l'énergie de la radiation et le travail d'extraction des électrons.

$$\frac{1}{2} m v^2 = 5,67 \times 10^{-19} - 3,68 \times 10^{-19} = 1,99 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### Exercice 3

1). L'énergie de l'atome d'hydrogène est donnée par  $E = -13,6 / n^2$  en eV.

N	1	2	3	4	5	6
E(eV)	-13,6	-3,4	-1,51	-0,85	-0,54	-0,38



2°. Le photon est absorbé si son énergie est égale à  $E_3 - E_1 = -1,51 - (-13,6)$

$= 12,09 \text{ eV}$  à exprimer en joule ( $12,09 \times 1,6 \times 10^{-19} = 1,93 \times 10^{-18} \text{ J}$ ) pour le calcul de la longueur d'onde.

$$\lambda = 6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 1,93 \times 10^{-18} = 1,03 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

3°. Energie du photon de longueur d'onde  $8,5 \times 10^{-8} \text{ m}$  :

$E = 6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 8,5 \times 10^{-8} = 2,336 \times 10^{-18} \text{ J} = 14,6 \text{ eV}$ . Cette valeur est supérieure à  $13,6 \text{ eV}$ , l'électron situé au niveau fondamental est arraché.

4°.

Transition	4 → 1	4 → 3	3 → 2	2 → 1	4 → 2
$\Delta E(\text{J})$	$2,04 \times 10^{-18}$	$1,056 \times 10^{-19}$	$3,024 \times 10^{-19}$	$1,632 \times 10^{-18}$	$4,08 \times 10^{-19}$

$\lambda(\text{nm})$	97,35(UV)	1880(IR)	656,7(visible)	121,7(UV)	486,7(visible)
----------------------	-----------	----------	----------------	-----------	----------------

5°. L'énergie d'ionisation est l'opposé de l'énergie de l'électron situé sur le niveau considéré soit 0,85 eV.

#### Exercice 4

La loi de MOOSELEY est telle que

$$n = 0,764 R_H c (Z - 1,13)^2 \quad \text{et} \quad \nu = 0,764 \times (1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}) (2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}) \times (79 - 1,13)^2$$

$$\nu = 1,5236 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1} \quad \text{donc} \quad E = h \nu = (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}) \times (1,5236 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1})$$

$$E = 1,009 \cdot 10^{-14} \text{ J} \quad \text{ou en divisant par la charge électronique, on obtient la valeur en keV : } E = 63,02 \text{ keV.}$$

#### EXO 1

$$A = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m. K} \approx 2900 \text{ } \mu\text{m. K} \text{ d'où la loi de Wien :}$$

$$\boxed{\lambda_m T \approx 2900 \text{ } \mu\text{m. K}}$$

#### EXO2

On calcule  $\lambda_m$  par la loi de WIEN :  $\lambda_m T \approx 2900 \text{ } \mu\text{m. K}$  d'où  $\lambda_m = 2,9 \text{ } \mu\text{m}$  dans l'infrarouge, d'où le domaine spectral :  $1,45 \text{ } \mu\text{m} < \lambda < 23 \text{ } \mu\text{m}$ .

98 % de l'énergie reçue se situe dans l'infrarouge (et même davantage puisque l'infrarouge dépasse ce domaine).

#### EXO3

$$x = \frac{h\nu}{k_B T}$$

En posant

l'intégrale s'écrit :

$$\varphi^i(T) = \frac{2\pi h k_B^4 T^4}{c^2 h^4} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi h k_B^4 T^4}{c^2 h^4} \frac{\pi^4}{15}$$

ce qui permet d'établir la loi de STEFAN

$$\varphi^i(T) = \sigma T^4$$

et de donner l'expression de la constante de STEFAN :

$$\boxed{\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2}}$$

L'application numérique donne la valeur  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

## EXO 4

**EXERCICE 17** Un tube de radiateur infrarouge d'un grille pain est cylindrique de rayon  $r = 0,4 \text{ cm}$  et de longueur  $l = 21 \text{ cm}$  ; il rayonne une puissance  $P = 550 \text{ W}$  et on admet qu'il se comporte comme un corps noir.

Calculer sa température  $T$  et l'étendue spectrale du rayonnement émis à cette température.

D'après la loi de STEFAN, la puissance rayonnée est liée à sa température  $T$  par la relation :

$$P = S\sigma T^4 = 2\pi r l \sigma T^4 \text{ d'où } T = \left( \frac{P}{2\pi r l \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ soit}$$

$$T = 1164 \text{ K} \approx 890 \text{ }^\circ\text{C}$$

D'après la loi de WIEN, la densité spectrale est maximale pour :

$$\lambda_m = \frac{2900}{1164} \approx 2,5 \text{ } \mu\text{m}$$

98 % de l'énergie est compris entre  $\frac{1}{2}\lambda_m$  et  $8\lambda_m$ , soit  $1,25 \text{ } \mu\text{m} < \lambda < 20 \text{ } \mu\text{m}$  : le rayonnement d'équilibre est essentiellement constitué de rayonnement infrarouge.

## EX5

a) La loi de WIEN  $\lambda_m T \approx 2900 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$  donne la température

$$T_S = 5580 \text{ K} \approx 5600 \text{ K}$$

La puissance émise par le Soleil est :

$$P_S = \sigma T_S^4 \times 4\pi R_S^2$$

soit

$$P_S = 3,4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

b) A une distance  $d$ , le rayonnement solaire entraîne un flux ou puissance par unité de surface :

$$\varphi(d) = \frac{P_S}{4\pi d^2}$$

La Terre intercepte une partie correspondant à un disque de surface  $\pi R_T^2$  ; elle reçoit donc une puissance de la part du Soleil :

$$P_{\text{reçue}} = \varphi(d) \times \pi R_T^2 = P_S \frac{R_T^2}{4d^2}$$

Soit

$$P_{\text{reçue}} = 1,6 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

ce qui correspond à une puissance d'environ 1,3 kW par  $\text{m}^2$  en moyenne à la surface du sol terrestre.

Fiche de TD n° 01 : *Le Corps Noir*

**Exercice 1**

Pour un rayonnement en équilibre radiatif avec la matière à la température  $\theta$ , la densité spectrale en longueur d'onde du flux passe par un maximum pour une longueur d'onde  $\lambda_m$  telle que :  $\lambda_m \theta = \frac{hc}{4,964 k_B} = A$  appelée loi de WIEN. Evaluer la constante A en  $\mu m \cdot K$  avec 3 chiffres significatifs sachant que :  
 $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ ,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$  et  $c = 2,998 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ .

**Exercice 2**

Environ 98 % de l'énergie de rayonnement d'équilibre reçue par une surface est comprise dans l'intervalle  $[\lambda_m/2, 8 \lambda_m]$  appelé étendu spectral du rayonnement d'équilibre à une température donnée.  
 Dans un four dont les parois sont à la température de 1000 K, quel est ce domaine spectral ?

**EXERCICE 3**

Effectuer l'intégration sur toutes les fréquences du spectre  $U(T) = \int_0^{\infty} U(\nu, T) d\nu$  avec  $U(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$

conduisant à la loi de STEFAN pour le flux sachant que  $\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$  et donner l'expression de la constante de

STEFAN  $\sigma$ .

**Exercice 4**

Un tube de radiateur infrarouge d'une grille pain est cylindrique de rayon  $r = 0,4$  cm et de longueur  $l = 21$  cm ; il rayonne une puissance  $P = 550$  W et on admet qu'il se comporte comme un corps noir.  
 Calculer sa température T et l'étendue spectrale du rayonnement émis à cette température.

**Exercice 5**

On admet que le Soleil et la Terre rayonnent comme de corps noirs de températures  $T_S$  et  $T_T$ .

- Déterminer la température à la surface du Soleil sachant que le maximum du spectre qu'il émet est situé à 520 nm. Quelle est alors la puissance  $P_S$  émise par le Soleil ?
- En déduire la puissance  $P_{reçue}$  par la Terre en provenance du Soleil.

Données : rayon terrestre :  $R_T = 6370$  km ; rayon du Soleil :  $R_S = 697\,000$  km ;  
 distance Terre-Soleil :  $d = 144 \cdot 10^6$  km.

