

EFFET PHOTOELECTRIQUE DUALITE ONDE CORPUSCULE¹

Expérience de Hertz (1887)

- *Expérience* : Une plaque de zinc chargée négativement et reliée à un électroscope peut être déchargée par le rayonnement ultra-violet d'une lampe à vapeur de mercure. Plus la puissance ultra-violette est élevée, plus la décharge est rapide. C'est l'effet photoélectrique externe.
- *Contre expériences* : rayonnement lumineux intense mais dénué d'ultraviolets, plaque chargée positivement.
- *Résultats* : La quantité de lumière ne suffit pas pour expliquer ces expériences. La « qualité » de cette lumière est essentielle. (Analogie du sac de sable ou de la pierre)

Expériences avec une cellule photoélectrique à vide (sensible dans le visible)

- Relevé de la caractéristique courant-tension à éclairement constant.
- Potentiel d'arrêt $-U_0$. Relation $e \cdot U_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$ Influence de la longueur d'onde.
- *Résultats* : La lumière interagit avec la matière par « quanta » d'énergie appelés photons : un photon « efficace » arrache un électron au métal (énergie d'extraction W_0) :
$$e \cdot U_0 = h\nu - W_0$$
- L'énergie du photon associé à l'onde électromagnétique de fréquence ν est :
$$E = h\nu$$
- Quelques applications de l'effet photoélectrique : transformation d'un signal lumineux en signal électrique visible à l'oscillo (lampe reliée au secteur, stroboscope, démodulation...)

Le photon (quasi particule)

masse $m = 0$, vitesse $v = c$, énergie $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$, quantité de mouvement $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

Dualité onde-corpuscule (De Broglie 1923)

- Par analogie avec le couple « photon-onde électromagnétique », à chaque **particule** de quantité de mouvement p on associe une **onde** « de matière »² Ψ telle que :

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ c'est à dire } \lambda = \frac{h}{p}$$

- En régime **stationnaire**, cette onde est indépendante du temps.
- *Expériences* : Modes d'ondes **stationnaires** résonantes dans une corde élastique, intervention des nombres premiers et de la **quantification** (Mécanique quantique). Diffraction d'une onde lumineuse et diffraction de rayons X ou d'électrons par un cristal (expérience de Davisson et Germer)

¹ **Annales** : 2005 TH3, 2001 TH1 et TH3, 2000 TH3, 1997 TH 3, 1993 TH 2 et TH3, 1989 TH3

Syllabus: 9 Physique quantique a) Effet photoélectrique, énergie et quantité de mouvement du photon (formule d'Einstein) b) longueur d'onde de De Broglie, principe d'incertitude d'Heisenberg

² Ce n'est pas une onde électromagnétique mais une onde de « probabilité de présence » : plus $\Psi(M)$ est de module élevé, plus la probabilité de trouver la particule associée au voisinage du point M est importante. La notion de trajectoire perd alors le sens déterministe que lui donne la mécanique classique

Principes d'incertitude de Heisenberg

La mécanique quantique est probabiliste (ou statistique³). Elle impose des compromis sur la précision de certaines mesures simultanées comme p_x et x ou E et t , extension aux particules des compromis que l'on observe avec les photons lors d'une expérience de diffraction :

$$\Delta x \cdot \Delta p_x : \frac{h}{2\pi} \text{ et } \Delta E \cdot \Delta t : \frac{h}{2\pi}$$

Exercices :

L'énergie d'extraction d'un électron du zinc est de 3.40 eV . Justifier que l'effet photoélectrique ne « démarre » qu'avec des UV dans l'expérience de Hertz.

A quelle vitesse faut-il passer à travers l'ouverture d'une porte pour risquer d'être diffracté par l'ouverture ? On prendra $m = 70 \text{ kg}$, $a = 70 \text{ cm}$

Quelle est la déviation angulaire provoquée par la traversée d'une ouverture de 1cm d'un faisceau d'électrons dans un tube de télévision ? (on prendra comme tension accélératrice $U=10000 \text{ Volts}$). Y-a-t-il un problème avec le résultat du calcul de la vitesse atteinte par l'électron ?

Quelle doit être la puissance minimum d'un ensemble de faisceaux laser convenablement braqués sur une bille de 1mm de diamètre de masse 10^{-4} g , de façon à la faire léviter? (on supposera que tous les photons sont absorbés par la bille)

Dans le modèle classique de l'atome d'hydrogène à l'état fondamental, l'électron tourne autour du proton à environ 50 pm de lui avec une vitesse de l'ordre de $2 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Montrer que cela n'a aucun sens en mécanique quantique.

1989 Th3 (ce problème ne peut pas être traité sans la mécanique relativiste)

On cherche à transformer un microscope à faisceau électronique (électrons relativistes accélérés sous la tension $U = 511 \text{ kV}$) en un microscope à faisceau de protons (accélérés sous la tension $-U$)

Par quel facteur serait multiplié le pouvoir de résolution de ce microscope?

Nota: On admettra que le pouvoir de résolution ne dépend que des propriétés ondulatoires des particules du faisceau, que celles-ci sont émises à une vitesse négligeable, avant d'être accélérées par la tension.

Energies au repos (ou énergies de masse) :

$$\text{Electron : } E_e = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

$$\text{Proton : } E_p = m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$$

Réponse: 35

2000 Th3

On s'intéresse à l'effet du champ gravitationnel sur la propagation de la lumière dans l'espace.

a) Un photon émis à la surface du soleil (de masse M , de rayon R) a sa fréquence déplacée vers le rouge (redshift). En considérant l'énergie du photon comme une énergie de masse,

³ Pour une particule unique, elle donne la probabilité d'observer celle-ci à proximité d'un point M de l'espace, et pour un ensemble de particules identiques elle donne la proportion de celles qui sont à proximité d'un point M de l'espace (aspect statistique)

appliquez les lois de la gravitation de Newton à la masse au repos ainsi trouvée, et montrez que la fréquence du photon, mesurée à l'infini, est réduite d'un facteur :

$$(1-GM/Rc^2) \text{ (déplacement vers le rouge).}$$

b) Une diminution de la fréquence du photon est équivalente à une augmentation de sa période, ou, si on considère le photon comme une horloge de référence, à une dilatation du temps. De plus, on peut montrer qu'une dilatation du temps s'accompagne toujours d'une contraction des longueurs d'un même facteur.

Nous allons en étudier l'effet sur la propagation de la lumière au voisinage du Soleil.

On définit un indice de réfraction effectif n_r en un point situé à une distance r du centre du Soleil :

$$n_r = \frac{c}{c'_r}$$

où c est la vitesse de la lumière mesurée loin de l'influence gravitationnelle du Soleil ($r \gg R$), et c'_r la vitesse de la lumière mesurée à une distance r du centre du Soleil.

Montrez que si GM/rc^2 est petit devant 1, n_r est approximativement donné par :

$$n_r = 1 + \frac{\alpha GM}{rc^2}$$

où α est une constante que l'on déterminera.

c) En utilisant cette expression de n_r , calculez la déviation d'un rayon lumineux lorsqu'il passe au voisinage immédiat du Soleil.

Données :

Constante de gravitation universelle : $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$

Masse du Soleil : $M = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Rayon du Soleil : $R = 6.95 \cdot 10^8 \text{ m}$

Vitesse de la lumière : $c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

On donne aussi la valeur de l'intégrale :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{2}{a^2}$$

2001 Th1

Un faisceau atomique est obtenu en chauffant un ensemble d'atomes à une température T et en leur permettant de sortir horizontalement à travers un petit trou (de dimension atomique) de diamètre D situé dans un des côtés du four.

Estimer la largeur du faisceau après qu'il ait parcouru une longueur L horizontale.

La masse des atomes est notée M et leur

vitesse quadratique moyenne est $v = \sqrt{\frac{3kT}{M}}$

