

Concours Général 1979

COMPOSITION DE PHYSIQUE

(Classes terminales C, D et E)

Le candidat est invité à s'assurer qu'il dispose bien de la feuille intercalaire portant les figures correspondant au texte.

ENERGIE ET QUANTITE DE MOUVEMENT DU RAYONNEMENT

Dans tout ce problème, on admettra qu'à une lumière monochromatique de fréquence ν se propageant dans le vide (vitesse $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹, on peut associer des photons d'énergie :

$$(1) \quad E = h\nu$$

et de quantité de mouvement :

$$(2) \quad \vec{p} = \frac{E}{c} \vec{u}$$

où $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s est la constante de Planck et $\vec{u}$ le vecteur unitaire indiquant la direction et le sens de propagation du photon considéré. Le photon est une particule de masse nulle.

Le référentiel considéré est galiléen et la vitesse c d'un photon dans le vide a une même valeur dans tout référentiel galiléen.

I. Principe d'un photomultiplicateur, interférences lumineuses à très faible intensité.

I.1. On considère un faisceau lumineux monochromatique de fréquence ν , cylindrique, se propageant dans le vide. Le faisceau est homogène de sorte que le nombre n de photons contenus par unité de volume du faisceau a une même valeur en tout point. On appelle intensité I du faisceau, l'énergie transmise par le faisceau par unité de temps et par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. Calculer I en fonction de n , ν , c et h . Etablir la relation entre I et l'énergie w contenue par unité de volume du faisceau.

Application numérique :

Calculer numériquement n et w pour de la lumière de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ et un faisceau d'intensité $I = 10^{-3}$ W m⁻².

I.2. Un faisceau monochromatique du type précédent arrive perpendiculairement à la surface de la photocathode (supposée plane) d'une cellule photoélectrique. Si $\mathcal{P}$ est la puissance lumineuse totale reçue par la photocathode et i_s l'intensité du courant de saturation

de la cellule, montrer que $i_s = K \mathcal{E}$ où K est une constante caractéristique de la photocathode (et qui dépend en outre de la fréquence ν du rayonnement incident). On appelle *rendement quantique* r_v de la photocathode le rapport r_v du nombre d'électrons émis par effet photoélectrique au nombre de photons incidents reçus par la photocathode. Exprimer r_v en fonction de K , ν , h et de la charge élémentaire e ($e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C).

Application numérique :

Calculer r_v numériquement pour $K = 5 \cdot 10^{-2} \text{ AW}^{-1}$, $\lambda = 0,6 \text{ }\mu\text{m}$.

I.3. La figure 1 donne le principe d'un *photomultiplicateur* (appelé dans la suite P.M.). Un photon arrivant sur la photocathode du P.M. peut en extraire un électron qui est accéléré par une différence de potentiel appliquée entre la photocathode et une première

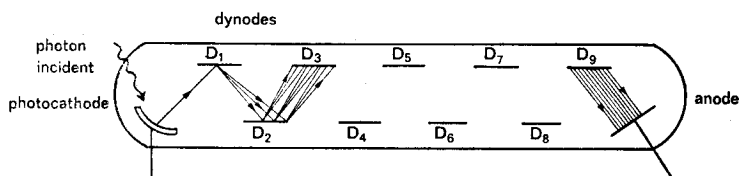


Fig. 1. — Schéma de principe d'un photomultiplicateur (P.M.).

électrode appelée *dynode*. Lorsque l'électron ainsi accéléré arrive sur cette dynode, il est absorbé et en extrait un nombre g d'électrons par ce qu'on appelle *l'effet secondaire*. La dynode émet ainsi g électrons qui sont de même accélérés vers une deuxième dynode où le même effet multiplicatif se reproduit. L'appareil comporte ainsi p dynodes successives. Pour des énergies cinétiques suffisamment faibles, le facteur multiplicatif moyen g est proportionnel à la différence de potentiel v entre deux dynodes successives, soit $g = A v$ où A est une constante caractéristique des dynodes supposées ici toutes identiques. On admet en outre que tous les électrons émis successivement donnent effectivement, sans perte, l'effet secondaire.

a) On établit entre la photocathode et la dernière dynode une différence de potentiel totale V (tension d'alimentation du P.M.). La différence de potentiel entre la photocathode et la première dynode et entre deux dynodes successives ayant une même valeur, calculer le gain total G du P.M. (c'est-à-dire le nombre d'électrons secondaires obtenus à partir d'un électron émis par la photocathode) en fonction de V , A , p .

b) Pour un gain total G fixé à l'avance, calculer p pour que V soit minimale.

Application numérique :

On donne $G = 10^6$, $A = 3 \cdot 10^{-2} \text{ V}^{-1}$. Calculer numériquement cette valeur de p ainsi que la valeur V_m correspondante de V . Calculer numériquement g pour $V = V_m$.

On suppose que V subit des fluctuations ΔV . Le nombre des dynodes p ayant la valeur déterminée précédemment, quelle est la valeur maximale $\left| \frac{\Delta V}{V_m} \right|$ compatible avec un gain total ayant une stabilité de 10^{-3} en valeur relative? Quelle conclusion tirer de ce résultat concernant l'alimentation d'un P.M.?

c) La photocathode du P.M. pour le rayonnement utilisé de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ a un coefficient de sensibilité $K = 5 \cdot 10^{-2} \text{ AW}^{-1}$. Calculer pour un gain total $G = 10^6$ le nombre moyen d'électrons sortant de l'appareil (et captés par l'anode) pour un photon incident. On supposera que tous les électrons émis par la photocathode donnent effectivement l'effet secondaire sur la première dynode.

I.4. On se propose de réaliser une expérience d'interférences avec des intensités très faibles, le récepteur utilisé étant un P.M., ce qui permet de compter individuellement les photons.

Le dispositif utilisé est celui des fentes d'Young (fig. 2). Le faisceau lumineux incident cylindrique cohérent, monochromatique de

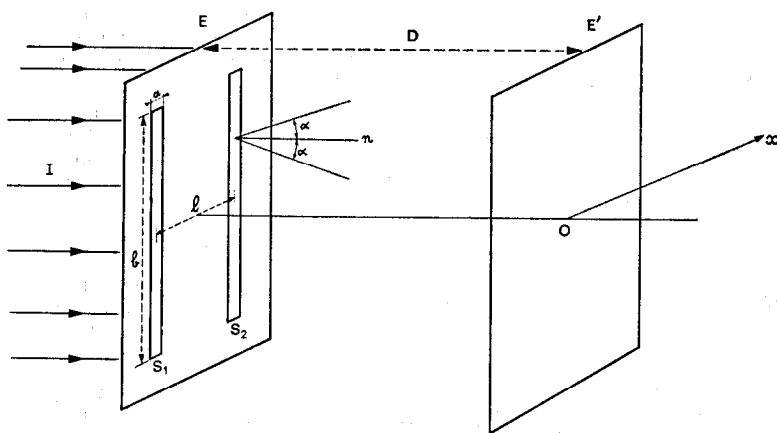


Fig. 2. — Expérience d'Young.

longueur d'onde dans le vide λ , d'intensité I , arrive perpendiculairement à un écran E percé de deux fentes fines S_1 et S_2 rectangulaires, parallèles, qui diffractent la lumière. On observe le phénomène d'interférences sur un écran E' parallèle à E et situé à la distance D de ce dernier. Chaque fente est un rectangle de largeur a et de longueur b ($a \ll b$). La distance des centres des deux fentes est l .

a) On donne $a = 30 \mu\text{m}$, $b = 20 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ m}$, $l = 150 \mu\text{m}$, $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$. On admettra qu'une fente diffracte la lumière pratiquement dans les plans perpendiculaires à sa longueur dans un domaine

angulaire d'angle $\alpha = \frac{\lambda}{2a}$ de part et d'autre de la direction normale

au plan de la fente (c'est-à-dire dans un domaine angulaire total 2α). Calculer numériquement le nombre des franges d'interférences visibles sur l'écran E' .

b) Comment choisir l'intensité I pour que la probabilité soit très grande de n'avoir qu'un seul photon à la fois (ayant traversé S_1 ou S_2) dans l'espace compris entre E et E' ? Calculer numériquement l'intensité maximale correspondante. Dans ces conditions, observe-t-on sur E' un phénomène d'interférences, c'est-à-dire un taux de comptage des photons passant par des extremums lorsqu'on déplace le P.M. sur Ox ?

II. Pression de radiation.

II.1. Soit un photon d'énergie E et une particule de masse m , de vitesse v très faible devant c , de sorte qu'on peut lui appliquer les lois de la mécanique newtonienne. On suppose que l'énergie cinétique de la particule est égale à E . Calculer le rapport de la quantité de mouvement du photon à celle de la particule et conclure.

II.2. Un faisceau lumineux cylindrique d'intensité I se propageant dans le vide se réfléchit sans absorption d'énergie sur un miroir plan perpendiculaire à la direction de propagation du faisceau et maintenu fixe dans le référentiel considéré.

a) Calculer la variation de quantité de mouvement d'un photon qui se réfléchit sur le miroir. Chaque photon transmet ainsi au miroir une quantité de mouvement opposée à cette variation; en déduire la quantité de mouvement transférée au miroir par le faisceau par unité de temps et de surface.

b) Calculer la force moyenne Π exercée par unité de surface du miroir par le faisceau lumineux. On exprimera Π en fonction de I et de c . Ce résultat est-il modifié pour un faisceau non monochromatique? Π est appelé *pression de radiation*. Avez-vous connaissance de faits illustrant l'existence de la pression de radiation?

Application numérique :

Calculer Π numériquement pour un faisceau tel que $I = 2 \text{ W cm}^{-2}$. Que devient le résultat pour un plan absorbant totalement l'énergie (corps noir)?

c) Reprendre le calcul de Π pour un miroir totalement réfléchissant, le faisceau cylindrique d'intensité I arrivant sur le miroir avec l'angle d'incidence i .

II.3. *a)* Le faisceau cylindrique d'intensité I est reçu sur une sphère de rayon R , totalement absorbante (sphère noire). Calculer la force totale $\vec{F}$ exercée par le faisceau sur la sphère.

b) On a suggéré que des poussières appartenant au système solaire et plus petites qu'une taille critique devaient être « souff-

flées » hors de l'attraction solaire par la pression de radiation solaire. Expliquer qualitativement et brièvement une telle hypothèse. On suppose ainsi une petite particule assimilable à une sphère homogène de rayon R , de masse volumique μ et totalement absorbante pour le rayonnement solaire. Soit r la distance de la particule au Soleil et $I(r)$ l'intensité du rayonnement solaire au point où se trouve la particule ; $I(r)$ est supposée ne dépendre que de r . Montrer que la particule est « soufflée » hors de l'attraction solaire si son rayon R est inférieur à une valeur R_m que l'on calculera en fonction de $I(r)$, r , μ , c , M_S (masse du Soleil) et g (constante gravitationnelle). On négligera toute autre force s'exerçant éventuellement sur la particule. Montrer que R_m est en fait indépendant de r et l'exprimer uniquement en fonction de I_T intensité du rayonnement solaire sur la Terre, d distance Terre-Soleil supposée constante, μ , c , T durée de la translation terrestre autour du Soleil. On négligera toute absorption du rayonnement solaire dans l'espace interplanétaire.

Application numérique :

On donne :

$$d = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}, \quad T = 1 \text{ an} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ s}, \quad I_T = 1,4 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}.$$

Calculer numériquement R_m pour $\mu = 2 \text{ g cm}^{-3}$.

c) On a proposé de construire pour manœuvrer les vaisseaux spatiaux des « voiles solaires », très grandes plaques métallisées utilisant la pression de radiation solaire. En vous basant sur les résultats précédents, indiquer qualitativement la difficulté de mise en œuvre de telles voiles solaires.

II.4. Les photons d'un faisceau lumineux cylindrique monochromatique arrivent perpendiculairement à un miroir mobile de masse M . Le miroir est supposé libre et sa vitesse reste parallèle et de même sens à celle des photons incidents dans le référentiel considéré. La vitesse du miroir est suffisamment faible pour que les expressions de son énergie cinétique et de sa quantité de mouvement soient celles données par la mécanique de NEWTON.

a) On considère le choc d'un photon incident d'énergie E sur le miroir. Dans le référentiel R considéré, la vitesse du photon incident est $c\vec{u}$ et celle du miroir, juste avant le choc, est $\vec{V} = V\vec{u}$. Le photon, en se réfléchissant, est supposé ne transmettre au miroir que de l'énergie cinétique. Ecrire deux équations de conservation en notant que l'énergie E' du photon réfléchi est nécessairement différente de E .

b) En déduire l'équation permettant de calculer E' en fonction de E , V , c et M . Simplifier l'équation précédente en supposant

$$\beta = \frac{V}{c}$$

la masse M très grande. On pose $\beta = \frac{V}{c}$. Montrer que dans cette

approximation, on a $E' = Ef(\beta)$ où $f(\beta)$ est une fonction uniquement de β que l'on déterminera.

c) On désigne par n le nombre de photons par unité de volume du faisceau incident (n est supposé indépendant du point

considéré) et par n' le nombre de photons par unité de volume du faisceau réfléchi. On suppose qu'aucun photon n'est absorbé par le miroir mobile dont la vitesse reste très sensiblement égale à $V\vec{u}$. En écrivant entre les instants t et $t + dt$ un bilan qui exprime la conservation du nombre des photons, établir la relation :

$$(n - n') c dt = (n + n') V dt.$$

On interprétera chacun des termes de cette égalité. En déduire la relation entre n et n' , puis entre l'intensité I du faisceau incident et l'intensité I' du faisceau réfléchi.

d) Pour faire le bilan d'énergie, on est amené, comme on a fait précédemment pour faire le bilan du nombre de photons, à comparer les quantités :

$$(I - I') dt \quad \text{et} \quad \left(\frac{I}{c} + \frac{I'}{c} \right) V dt.$$

— Que représente chacune de ces quantités ?

— Vérifier que : $I - I' > (I + I') \frac{V}{c}$.

— soit Π la pression de radiation s'exerçant sur le miroir.

Calculer Π en fonction de I , I' et c .

— Vérifier que, β étant petit :

$$(I - I') dt = \Pi V dt + (I + I') \frac{V}{c} dt$$

et montrer que cette relation exprime effectivement la conservation de l'énergie.

II.5. a) On se place dans le référentiel R_0 lié au miroir, donc de vitesse $\vec{V}$ par rapport à R . En utilisant le résultat II.4. a), montrer que la fréquence ν_0 d'un photon mesurée dans R_0 ne peut être égale à sa fréquence ν mesurée dans R . C'est l'effet DOPPLER-FIZEAU.

b) On est ainsi amené à poser $\nu = \nu_0 g(\beta)$ où $g(\beta)$ est une fonction de $\beta = \frac{V}{c}$. Montrer, moyennant une hypothèse très

plausible, que $g(-\beta) = \frac{1}{g(\beta)}$ et en déduire la relation entre la fonction $g(\beta)$ et la fonction $f(\beta)$ introduite en II.4. b).

c) Tirer les conséquences d'ordre physique de l'effet DOPPLER-FIZEAU. En connaissez-vous des applications en optique et plus généralement dans le domaine des ondes électromagnétiques ?

III. Lévitration par faisceau laser.

III.1. On envoie un faisceau laser cylindrique homogène d'intensité I sur des particules sphériques métalliques. Le milieu ambiant est l'air.

a) On admet que la surface des sphères est totalement réfléchissante. Montrer que le faisceau exerce sur une particule de rayon R

une force $\vec{F} = \frac{I}{c} \pi R^2 \vec{u}$ ($\vec{u}$ est le vecteur unitaire qui définit la

direction des photons incidents).

b) Pour une particule de type précédent de rayon R , homogène, de masse volumique μ , calculer l'intensité minimale I_m nécessaire pour qu'un faisceau laser se propageant suivant la verticale ascendante puisse soulever la particule soumise au champ de pesanteur terrestre (expérience de lévitation), calculer la puissance $\mathcal{P}_m$ alors reçue par la particule.

Application numérique :

Calculer numériquement I_m et $\mathcal{P}_m$

pour $R = 10 \mu\text{m}$ $\mu = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$.

c) En fait, une fraction α ($0 < \alpha < 1$) des photons incidents est absorbée par la particule. On suppose α indépendant de l'angle d'incidence i avec lequel le photon arrive sur la sphère. Calculer dans ces conditions la force exercée par le faisceau laser sur la particule.

d) On donne $\alpha = 2 \cdot 10^{-2}$ et indépendant de i et on suppose que la puissance absorbée ainsi est transformée intégralement en chaleur, d'où une élévation de température de la particule. La chaleur massique du métal est $C = 880 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Estimer l'élévation de température par seconde lorsque la puissance reçue par la particule est $\mathcal{P}_m$, calculée en III.1. b). Conclure quant à la possibilité d'expériences de lévitation avec des particules métalliques.

III.2. On est ainsi amené, pour réaliser des expériences de lévitation de ce type, à remplacer les sphérules métalliques par des sphérules en matière plastique transparente au rayonnement laser incident. Le milieu environnant est l'air, pratiquement assimilable au vide pour les propriétés optiques. On désignera par N l'indice de réfraction de la substance constituant les sphérules pour le rayonnement monochromatique incident.

a) Un rayon lumineux arrive sur la sphère sous l'incidence i . L'angle de réfraction correspondant est r . Calculer en fonction de i et r l'angle δ de déviation du rayon après la traversée de la sphère, c'est-à-dire l'angle que fait la direction du rayon émergent de la sphère après le prolongement du rayon incident. Dans quel sens varie δ pour i donné quand N augmente ?

b) Pour N donné, δ dépend de i . Calculer la valeur maximale δ_M de δ . Montrer que pour que $\delta_M > \frac{\pi}{2}$, il faut $N > N_0$ où N_0

est une valeur de N que l'on calculera. L'indice N satisfaisant à la condition précédente, déterminer la valeur i_0 de i telle que $\delta = \frac{\pi}{2}$.

Application numérique :

Calculer numériquement i_0 pour $N = 1,60$.

c) Le faisceau laser incident arrivant sur les particules précédentes, est homogène, monochromatique, d'intensité I . On néglige, pour simplifier, tout phénomène de réflexion partielle sur les particules, de même que toute absorption. Montrer que le faisceau exerce sur une particule de rayon R une force

$$\vec{F} = k(N) \frac{I}{c} \pi R^2 \vec{u}$$

où $\vec{u}$ définit la direction des photons incidents et où $k(N)$ est une fonction de l'indice N dont on ne demande pas le calcul. Dans quel sens varie $k(N)$ quand N augmente? Montrer que quel que soit N , on a $k(N) < 1$.

d) Le milieu, ici l'air ambiant, exerce sur les particules précédentes une force résistante de viscosité de la forme $\vec{F}' = -6\pi\eta R \vec{v}$ où $\vec{v}$ est la vitesse d'une particule et η le coefficient de viscosité de l'air (loi de STOKES). Calculer, dans ces conditions, la vitesse limite $\vec{v}_l$ atteinte par une particule placée dans le faisceau laser d'intensité I . On ne tiendra pas compte, ici, du poids des particules. En fait, la loi de STOKES n'est valable que pour des vitesses v pas trop grandes. Plus précisément, il faut approximativement que v satisfasse à la condition $\mathcal{R} < 0,1$ où $\mathcal{R}$ est le *nombre de Reynolds* défini par

$$\mathcal{R} = \frac{2vR\mu'}{\eta} \quad \mu' \text{ étant la masse volumique du fluide ambiant (ici, l'air).}$$

Vérifier que $\mathcal{R}$ est sans dimension. Montrer que pour satisfaire à la condition $\mathcal{R} < 0,1$, la puissance $\mathcal{S}$ reçue par une particule doit être inférieure à une valeur maximale $\mathcal{S}_m$ que l'on exprimera en fonction de $k(N)$, μ' , η et c .

Application numérique :

Calculer numériquement $\mathcal{S}_m$
pour $k(N) = 0,4$, $\mu' = 1,3 \text{ kg m}^{-3}$, $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa. s.}$

Pour $\mathcal{S} = \mathcal{S}_m$, calculer numériquement la vitesse limite v_l d'une particule de rayon $R = 10 \mu\text{m}$ ainsi que le rapport de la force F exercée par le faisceau sur la particule et du poids mg de la particule dont la masse volumique est $\mu = 1 \text{ g cm}^{-3}$. Voyez-vous des applications possibles de ces expériences?

III.3. On considère toujours des sphérules en matière plastique du type précédent mais plongées dans l'eau d'une cuve. La masse

volumique de la matière plastique est sensiblement égale à celle de l'eau. Cette matière plastique est supposée plus réfringente que l'eau. La cuve reçoit un faisceau laser cylindrique.

a) Indiquer les avantages d'un tel dispositif.

b) Le faisceau laser de section droite circulaire est supposé *non* homogène, l'intensité lumineuse décroissant de l'axe vers les bords du faisceau. Etudier qualitativement l'action du faisceau sur une particule. On négligera les phénomènes de réflexion sur la surface des particules. On montrera que les particules tendent à se placer au voisinage de l'axe du faisceau de façon stable. Qu'arriverait-il dans le cas où les particules seraient des bulles d'air ?

c) On envoie sur la cuve deux faisceaux identiques non homogènes comme précédemment mais légèrement divergents comme il est indiqué sur la fig. 3. Expliquer pourquoi les particules restent piégées dans la région du point P (bouteille optique). Voyez-vous des applications de ce dispositif ?

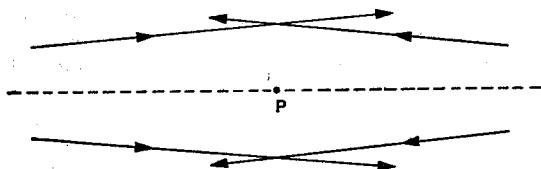


Fig. 3

IV. Pompage optique.

IV.1. On étudie dans cette question et les suivantes l'absorption et l'émission de photons par les atomes d'un gaz monoatomique. Ces atomes seront supposés ne subir aucune autre interaction que celle exercée par le rayonnement.

L'énergie totale d'un atome de masse m , de vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel considéré est de la forme $E_a + \frac{1}{2}mv^2$ où E_a est l'énergie

propre de l'atome, c'est-à-dire son énergie au repos. On notera que E_a ne peut prendre que des valeurs discrètes caractéristiques de l'atome considéré (quantification de l'énergie des atomes). Par convention, on prend ici $E_a = 0$ pour l'atome totalement ionisé.

a) Quel est le signe des valeurs possibles de E_a ? Justifier la réponse. Qu'appelle-t-on état *fondamental* de l'atome ?

b) On étudie l'absorption d'un photon incident d'énergie $E = h\nu$ par un atome du gaz de masse m et de vitesse $\vec{v}$ juste avant l'absorption du photon. On désigne par v_x la composante de $\vec{v}$ sur

la direction du vecteur unitaire $\vec{u}$ qui définit la direction et le sens de propagation du photon incident. Avant l'absorption du photon, l'atome est dans son état fondamental d'énergie E_{1a} . Après l'absorption du photon, l'atome est dans un état d'énergie E_{2a} . Etablir la relation entre $\Delta E_a = E_{2a} - E_{1a}$ (caractéristique du type d'atome considéré), E , v_x , m et c . On admettra par la suite que le passage de l'état d'énergie E_{1a} à l'état d'énergie E_{2a} par absorption par l'atome d'un photon n'est possible que si l'énergie E du photon satisfait à la condition précédente (condition de résonance).

Application numérique :

Le gaz est de l'argon, de masse atomique :

$$A = 23 \cdot 10^{-3} \text{ kg} ; E_a = 2,05 \text{ eV},$$

v est une vitesse d'agitation thermique des atomes du gaz et a

pour ordre de grandeur $v \simeq \sqrt{\frac{3RT}{A}}$ où T est la température

absolue du gaz ($T = 300 \text{ K}$) et $R = 8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ la constante des gaz parfaits. On prendra pour le nombre d'Avogadro $\mathcal{N} = 6,02 \cdot 10^{23}$. Compte tenu de ces données numériques, simplifier la relation liant ΔE_a et E . Calculer dans cette approximation la variation Δv_x de v_x en fonction de E et donner sa valeur numérique.

c) Pour déterminer les états d'énergie E_a d'un atome, on mesure la fréquence des photons absorbés par les atomes résonnants. Expliquer pourquoi l'agitation thermique des atomes est gênante. Pour pallier cette difficulté, on réalise, par exemple au moyen de deux faisceaux laser identiques se propageant dans des directions opposées, l'absorption par un atome de deux photons de même énergie E mais de quantités de mouvement opposées. Etablir dans ce cas la relation entre E et ΔE_a et conclure.

d) Après l'absorption d'un photon, l'atome étant dans l'état excité d'énergie E_{2a} et sa vitesse étant $\vec{v}$, il émet dans une direction définie par le vecteur unitaire $\vec{u}'$ un photon d'énergie E' revenant ainsi à son état d'énergie fondamental E_{1a} . Calculer E' ainsi que la variation $\Delta \vec{v}$ de la vitesse de l'atome.

IV.2. On considère l'action sur les atomes du gaz d'un faisceau laser cylindrique monochromatique d'intensité I . On ne considère que les transitions entre les états d'énergie E_{1a} et E_{2a} .

On admet que pour un atome, le nombre moyen d'absorptions photoniques par unité de temps (faisant passer l'atome du niveau d'énergie E_{1a} au niveau d'énergie E_{2a}) est proportionnel à I , donc égal à bI où b est une constante. L'atome se désexcite en revenant au niveau d'énergie E_{1a} par deux processus possibles : soit l'émission spontanée, soit l'émission stimulée. L'émission stimulée consiste en l'émission d'un photon se propageant dans la même direction et le même sens que le photon incident ; on admettra que pour ce processus, le nombre moyen d'émissions par unité de temps est le même que pour l'absorption, soit bI .

L'émission spontanée consiste en l'émission d'un photon dans une direction *quelconque*, toutes les directions d'émissions étant également probables ; pour ce processus, le nombre moyen d'émissions *par unité de temps* est constant et égal à a (donc indépendant de I).

a) Pour une durée quelconque t , calculer en fonction de a et de bI le rapport $\frac{t_{exc}}{t}$ où t_{exc} est la durée moyenne pendant laquelle

un atome est dans un état excité. On notera qu'un atome dans un état excité ne peut absorber de photons entre les niveaux considérés. En déduire le nombre de photons absorbés en moyenne par unité de temps par un atome.

b) Pour un photon absorbé en moyenne, calculer en fonction de a , bI , $\frac{\Delta E_a}{c}$ la quantité de mouvement transférée à l'atome.

On tiendra compte de l'émission stimulée et on montrera qu'en moyenne sur un grand nombre d'absorptions, l'émission spontanée n'intervient pas.

c) En déduire la force moyenne $\vec{F}_m$ exercée sur un atome. On écrira $\vec{F}_m = f \frac{\Delta E_a}{c} \vec{u}$ où f est une fonction de a et de bI . Mon-

trer que tout se passe du point de vue de la force moyenne exercée sur un atome comme si l'atome absorbait f photons par seconde sans processus d'émission stimulée. Lorsque I tend à augmenter indéfiniment, montrer que F_m croît vers une limite que l'on calculera en

fonction de ΔE_a , c et $\tau = \frac{1}{a}$ (donner la signification physique de τ).

Application numérique :

On prendra $\tau = 10^{-8}$ s et $\Delta E_a = 2,05$ eV. Calculer dans ce cas la valeur maximale de F_m puis celle de l'accélération correspondante γ_m communiquée à un atome ($A = 23 \cdot 10^{-3}$ kg).

d) Expliquer pourquoi, en fait, pour un même atome, F_m tend à décroître au cours des absorptions successives dans un faisceau d'intensité I (supposé non perturbé par l'absorption et l'émission des atomes).

IV.3. On réalise une expérience de pompage optique d'un gaz (fig. 4). Le faisceau laser exerce sur les atomes satisfaisant à la

condition de résonance la force $\vec{F}_m$ qu'on supposera ayant la même valeur pour tous les atomes en tout point du tube. Les atomes du gaz sont ainsi refoulés dans la région II (pompe optique). On considère une situation d'équilibre le long du tube. La pression du gaz le long du tube, supposée à une température T constante, est une fonction $p(x)$ de l'abscisse x , de même que le nombre d'atomes par unité

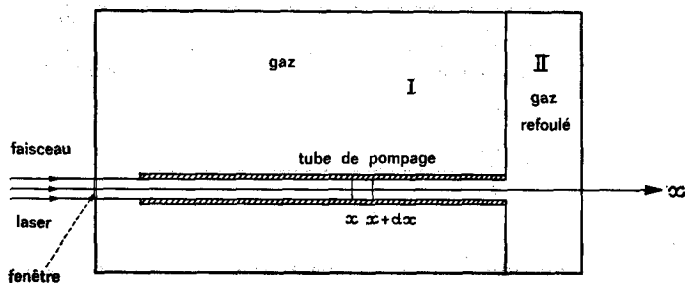


Fig. 4. — Le faisceau laser refoule dans le tube le gaz de la région I vers la région II.

de volume du gaz. En supposant le gaz parfait, écrire l'équation satisfaite par $p(x)$ qui exprime l'équilibre d'une tranche de gaz comprise entre les abscisses x et $x + dx$. On négligera le poids du gaz. En

déduire que $p(x) = p_0 e^{\frac{x}{L}}$ où p_0 est une constante et L une longueur caractéristique. En adoptant pour F_m l'expression calculée en IV.2. c),

donner l'expression de L en fonction de f , ΔE_a , T , c et $k_B = \frac{R}{\mathcal{N}}$ où $\mathcal{N}$ est le nombre d'Avogadro et R la constante des gaz parfaits.

Application numérique :

$$f = 10^7 \text{ s}^{-1}, \quad \Delta E_a = 2,05 \text{ eV}, \quad T = 300 \text{ K},$$

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

calculer numériquement L . Dans quel rapport la pression du gaz augmente-t-elle sur une longueur de 1 m ?

Quel avantage voyez-vous à ce mode de pompage ?