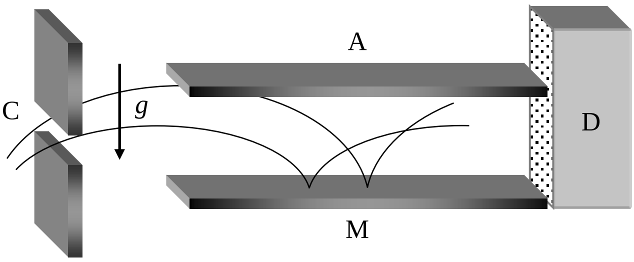
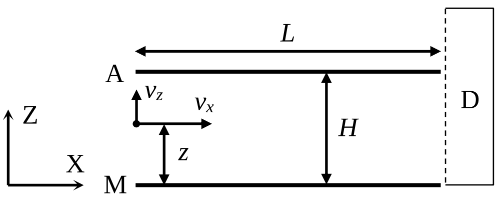
Th 3 NEUTRONS DANS UN CHAMP DE GRAVITATION

En physique classique, une balle élastique qui rebondit au sol est un exemple parfait de mouvement perpétuel. La balle est piégée : elle ne peut ni descendre sous la surface, ni dépasser son point culminant, et ceci indéfiniment. Le frottement de l'air et les rebonds inélastiques peuvent seuls arrêter le processus mais il n'en sera pas tenu compte dans la suite.

En 2002, un groupe de physiciens de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble a mis en évidence un comportement particulier des neutrons dans le champ gravitationnel terrestre. Leur expérience traite de neutrons lancés en tir balistique dans le champ de gravitation et tombant vers une surface horizontale servant de miroir sur laquelle ils rebondissent indéfiniment de façon élastique.

Le montage expérimental représenté sur la figure F-1 consiste en une ouverture C, un miroir à neutrons M (à une hauteur z = 0), une plaque A de longueur L placée à une hauteur z = H et capable d'absorber les neutrons incidents et, finalement, un détecteur de neutrons D. La composante horizontale v_x de la vitesse du faisceau de neutrons est constante de C à D tout au long du dispositif. Tous les neutrons qui atteignent la surface A sont absorbés et n'interviennent plus dans l'expérience, tandis que ceux qui atteignent la surface M sont réfléchis de façon élastique. Le détecteur D enregistre le taux de transmission N(H) des neutrons, c'est-à-dire le nombre total de neutrons qui atteignent D par unité de temps.





F-1

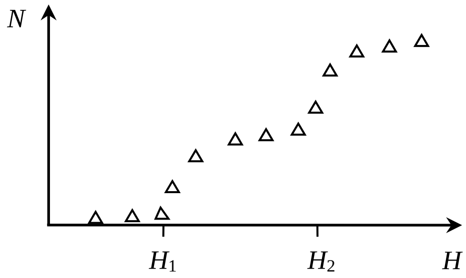
Les neutrons qui pénètrent dans l'espace compris entre A (la paroi absorbante) et M (le miroir) possèdent un large éventail de composantes verticales v_z de la vitesse, positives et négatives.

1. A l'aide des lois de la mécanique classique, déterminer la largeur de l'intervalle de vitesses verticales $v_z(z)$ des neutrons qui pénètrent à la hauteur z dans l'espace compris entre A et M et qui sont capables d'atteindre le détecteur D. On admettra que L est beaucoup plus grande que n'importe quelle autre longueur du système.
2. A l'aide des lois de la mécanique classique, déterminer la longueur minimale L_c de la cavité AM telle que tous les neutrons qui n'appartiennent pas à l'intervalle de vitesses ci-dessus sont absorbés par A. Utiliser $v_x = 10\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ et $H = 50\ \mu\mathrm{m}$.

Le taux de transmission de neutrons $N(H)$ est mesuré en D. On peut s'attendre à ce que $N(H)$ soit strictement croissant avec H, étant donné que la plaque absorbante A restreint les vitesses verticales possibles.

3. Soit ρ le nombre constant de neutrons par unité de temps, par unité de vitesse verticale et par unité de hauteur qui pénètrent dans la cavité AM avec une vitesse verticale v_z et à une hauteur z. A l'aide des lois de mécanique classique, exprimer, en fonction de ρ, le taux $N(H)$ en supposant que pour les neutrons qui arrivent à l'entrée de la cavité avec une vitesse verticale v_z et à une hauteur z, toutes les valeurs de v_z et z ont la même probabilité.

Les résultats expérimentaux obtenus par le groupe de Grenoble sont en désaccord avec les prédictions classiques précédentes ; en revanche, ils démontrent que la valeur de $N(H)$ subit des variations brusques lorsque H atteint les hauteurs critiques H_1, H_2 ...(voir Figure F-2). En d'autres termes, l'expérience montre que le mouvement vertical des neutrons qui rebondissent sur le miroir est quantifié. Selon le modèle utilisé par Bohr et Sommerfeld pour obtenir les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène, il convient de procéder comme suit : "L'action S de ces neutrons le long de la direction verticale est un multiple entier de la constante de Planck h". S est alors donnée par



F-2

$$S = \int p_z \, dz = n\,h, \quad n = 1, 2, 3\ldots \quad \text{(condition de quantification de Bohr-Sommerfeld)}$$

où p_z est la composante verticale de la quantité de mouvement classique et l'intégrale s'étend à un cycle complet de valeurs de z comprises entre deux rebonds consécutifs. Seuls les neutrons ayant ces valeurs de S peuvent exister dans la cavité.

4. Calculer les hauteurs H_n des points culminants des trajectoires et les niveaux d'énergie E_n (associés au mouvement vertical) en utilisant la condition de quantification de Bohr-Sommerfeld. Donner les valeurs numériques de H_1 en μm et de E_1 en eV .

La distribution uniforme initiale des neutrons à l'entrée du dispositif évolue tout au long de la trajectoire vers une distribution en escalier qui est finalement détectée en D (voir Figure F-2). Dorénavant nous considérerons pour simplifier le cas d'une cavité longue avec $H < H_2$. Selon les lois de la mécanique classique, tous les neutrons dont les énergies sont comprises dans l'intervalle considéré dans la partie 1 peuvent traverser la cavité, tandis que du point de vue de la mécanique quantique, seuls ceux qui ont le niveau d'énergie E_1 le pourront. Selon le principe d'incertitude énergie-temps d'Heisenberg, la nouvelle donne implique une durée de trajet minimale au travers du dispositif. L'incertitude sur l'énergie liée au mouvement vertical ne devient appréciable que lorsque la hauteur de la cavité est petite. Ce phénomène donne lieu à un élargissement du niveau d'énergie.

5. Estimer la durée de trajet minimum t_q et la longueur minimale L_q de la cavité pour que l'on puisse observer le premier saut brusque dans le nombre de neutrons captés en D. Utiliser $v_x = 10 \text{ m s}^{-1}$.

Données:

Constante de Planck	$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J s
Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}
Charge élémentaire	$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C
Masse du neutron	$M = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Accélération de la gravité sur la Terre	$g = 9{,}81$ m s^{-2}

Au besoin, utiliser l'expression: $\int (1-x)^{n/2} dx = -\frac{(1-x)^{(n/2)+1}}{(n/2)+1}, \quad n \neq 0, -2$

COUNTRY CODE	STUDENT CODE	PAGE NUMBER	TOTAL No OF PAGES

Th 3 FEUILLE DE REPONSES

Question	Formules fondamentales utilisées	Résultats algébriques	Résultats numériques	Barème
1		$\leq v_z(z) \leq$		1.5
2		$L_c =$	$L_c =$	1.5
3		$N_c(H)=$		2.5
4		$H_n =$ $E_n =$	$H_1=$ $E_1 =$	2.5
5		$t_q =$ $L_q =$	$t_q =$ $L_q =$	2.0