

Relativité et Électromagnétisme : TD soutien n°3

— L7 —

Expérience de Pound et Rebka

Sébastien LEURENT, Marc LILLEY & Sylvain NASCIMBÈNE

14 mars 2012

Un atome de $^{57}\text{Fe}^*$ est un atome de Fer porté dans un état nucléaire excité (obtenu par dégénérescence radioactive du ^{57}Co). Il peut se désexciter vers l'état fondamental ^{57}Fe en émettant un photon X dur. La différence d'énergie entre le niveau fondamental et le niveau excité est d'environ 14,4 keV. On note m^* et m les masses respectives de $^{57}\text{Fe}^*$ et ^{57}Fe . On note E l'énergie du photon émis, et $E_0 = m^*c^2 - mc^2$ l'énergie de la transition nucléaire.

1. En utilisant les lois de conservations du quadri-vecteur énergie-impulsion, montrer que l'énergie du photon émis par un atome de $^{57}\text{Fe}^*$ initialement au repos s'écrit :

$$E_{\text{émis}} = E_0 \left(1 - \frac{E_0}{2m^*c^2} \right). \quad (1)$$

Évaluer le décalage relatif dû au recul de l'atome par rapport à E_0 , en prenant pour la masse du Fer $0,9 \times 57 \text{ GeV}$.

2. Quelle est l'énergie E_{abs} d'un photon qui permet d'effectuer la transition inverse, c'est à dire de porter l'atome ^{57}Fe initialement au repos vers son état excité $^{57}\text{Fe}^*$?
3. En sachant que la transition nucléaire a une finesse $\delta\nu/\nu = 3 \times 10^{-13}$ (ν est la fréquence de la transition et $\delta\nu$ en est la largeur naturelle), montrer qu'un photon émis par un atome $^{57}\text{Fe}^*$ initialement au repos en se désexcitant ne peut pas permettre à un atome de ^{57}Fe au repos de transiter vers l'état excité.
4. En fait, quand un atome de Fer est lié à un cristal, on peut montrer que c'est le cristal tout entier qui recule lors de l'émission ou la réception du photon (Effet Mossbauer). Cela revient à remplacer m^* par la masse de l'échantillon tout entier dans l'équation (1). Montrer alors que la réponse à la question 3 devient positive pour des atomes liés à des échantillons de tailles macroscopiques.

Dans toute la suite, on négligera le décalage dû au recul de l'atome.

5. On considère un atome de $^{57}\text{Fe}^*$ appartenant à un échantillon de Fer à la température T_1 . L'émission d'un photon correspond à l'oscillation de la charge nucléaire à la fréquence ν dans le référentiel propre de l'atome, cette oscillation constituant en quelque sorte une horloge propre à l'atome. Montrer, qu'à l'ordre le plus bas en vitesse, la fréquence d'oscillation moyenne de cette horloge dans le référentiel du laboratoire s'écrit :

$$\nu_1 = \nu \left(1 - \frac{3k_B T_1}{2mc^2} \right) \quad (2)$$

où $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann. On admettra par la suite que cette fréquence ν_1 est la fréquence moyenne (dans le référentiel de l'échantillon) des photons susceptibles d'être émis par un échantillon macroscopique $^{57}\text{Fe}^*$ ou reçus par un échantillon de ^{57}Fe à la température T_1 .

L'expérience de R. V. Pound et G. A. Rebka ¹ a été la suivante. Ils disposaient d'un échantillon de Fer à la température T_1 enrichi en $^{57}\text{Fe}^*$ qui jouait le rôle de source et d'un deuxième échantillon de Fer à la température T_2 constitué de ^{57}Fe qui jouait le rôle d'absorbant. Ils placèrent l'absorbant entre la source et un détecteur de rayons gamma. Pound et Rebka effectuèrent des mesures sur des échantillons entre lesquels il existait une différence de température de $\Delta T = T_1 - T_2 = 1\text{K}$. Ils mesuraient ensuite la vitesse qu'il fallait communiquer à l'absorbant pour qu'il puisse absorber le rayonnement de la source grâce à l'effet Doppler non relativiste (on vérifiera a posteriori dans la question suivante qu'on est bien dans le régime non relativiste).

6. Dans quel sens faut-il déplacer l'absorbant : vers la source ou vers le détecteur ? Quel est l'ordre de grandeur des vitesses mises en jeu ?

7. Le résultat de l'expérience donne :

$$\frac{(\nu_1 - \nu_2)}{\nu} = -2,09 \pm 0,24 \times 10^{-15} \quad (3)$$

Discuter.

Cette expérience peut être interprétée comme un test expérimental du paradoxe des jumeaux qui prédit le vieillissement moindre du jumeau voyageur par rapport au jumeau sédentaire. Dans l'expérience de Pound-Rebka, deux atomes de Fer ont des vitesses moyennes différentes (car appartenant à deux échantillons de températures différentes) et on compare leur vieillissement respectif à l'aide des horloges internes extrêmement précises que sont les oscillations nucléaires des noyaux de Fer, par l'intermédiaire de leur radioactivité artificielle ². Enfin, notons que l'expérience originale de Pound-Rebka a servi en fait à tester la relativité générale qui prédit que deux horloges soumises à des potentiels gravitationnels différents ne battent pas de la même façon, en plaçant les échantillons à des hauteurs différentes.

¹Physical Review Letters, 4, 337 (1960).

²Some Recent Experimental Tests of the "Clock Paradox", C. W. Sherwin, Physical Review, Volume 120, Number 1, 17 (1960).