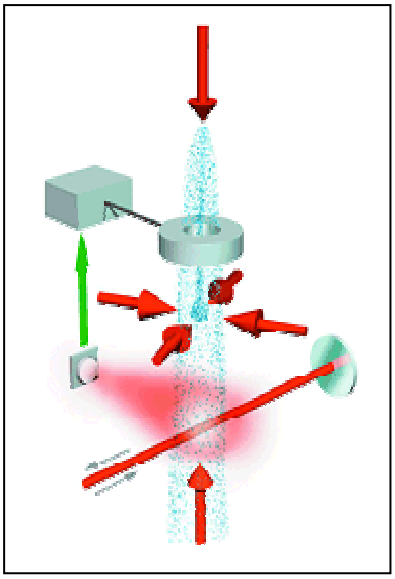
EXERCICE III : PHARAO, L'HORLOGE ATOMIQUE DE L'ESPACE (5 points)

La mise en orbite(*) de l'horloge spatiale à atomes froids PHARAO permettra de distribuer aux utilisateurs sur Terre, en utilisant un lien micro-onde spécifique, une échelle de temps de très grande stabilité. La précision de cette échelle de temps sera de 30 picosecondes sur un jour.

- (*) Lancement prévu en 2016 ; phase opérationnelle prévue à partir de 2017 à bord de la station spatiale internationale (ISS).

- PHARAO signifie Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite



D'après le site du CNES
http://smsc.cnes.fr/PHARAO/

Les atomes ou les molécules qui constituent toute matière, quel que soit l'état de celle-ci, ne sont jamais immobiles mais en perpétuelle agitation. Ce mouvement continuel est directement corrélé à la température : il est de moins en moins important lorsque la température diminue et inversement. Il s'agit de l'agitation thermique.

Données :

- constante de Planck : $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s ;

- célérité de la lumière dans le vide ou dans l'air : $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m.s^{-1} ;

- masse d'un atome de rubidium 87 : $m = 1{,}45 \times 10^{-25}$ kg.

1. Interaction d'un atome avec un rayonnement

Un atome supposé immobile dans le référentiel du laboratoire est placé sur le trajet d'un faisceau laser de fréquence ν_0. Cet atome peut alors passer d'un état d'énergie E_a à un état d'énergie supérieure E_b en absorbant un photon d'énergie $h\nu_0$.
Ce phénomène d'absorption provoque le déplacement de l'atome dans le sens de propagation du photon incident. L'atome se désexcite ensuite par émission spontanée d'un photon : il se déplace alors dans une direction aléatoire.

Pour mesurer l'importance du déplacement de l'atome ainsi provoqué, on introduit une vitesse dite « vitesse de recul », donnée par $V = \frac{h\nu_0}{mc}$: elle représente la vitesse qu'acquiert un atome initialement au repos par absorption ou émission d'un photon.

Dans le cas de l'isotope 87 du rubidium, couramment utilisé lors de la manipulation d'atomes froids, la vitesse de recul obtenue avec un laser de longueur d'onde λ de valeur 0,78 µm est égale à environ 6 mm.s^{-1}.

Un atome de l'isotope 87 du rubidium effectue en moyenne 10^8 cycles « absorption-désexcitation » en une seconde. Dans une première approche, seule l'action de l'absorption intervient, puisqu'elle s'effectue toujours dans le même sens tandis que l'effet sur la vitesse de l'émission spontanée est en moyenne nul. On peut alors évaluer l'accélération de l'atome : l'ordre de grandeur est de 10^6 m.s^{-2}.

Ceci permet d'arrêter des atomes ayant une vitesse initiale de quelques centaines de mètres par seconde en quelques millisecondes, sur quelques mètres, et rend les manipulations d'atomes lents en laboratoire possibles.

1.1 Absorption et émission

1.1.1 Illustrer à l'aide d'un diagramme de niveaux d'énergie la signification des termes « absorption » et « émission spontanée ».

1.1.2 Quel autre type d'émission peut-on rencontrer ? Dans quel dispositif est-il utilisé ?

1.2 La quantité de mouvement p d'un photon de fréquence ν est donnée par : $p = \frac{h\nu}{c}$. À quelle particularité de la lumière fait référence cette relation ?

1.3 Cas de l'isotope 87 du rubidium

1.3.1 En considérant que le système constitué d'un atome de rubidium et d'un photon est isolé et en utilisant la conservation de la quantité de mouvement totale, retrouver l'expression de la vitesse de recul V et l'ordre de grandeur de sa valeur donnés dans les documents.

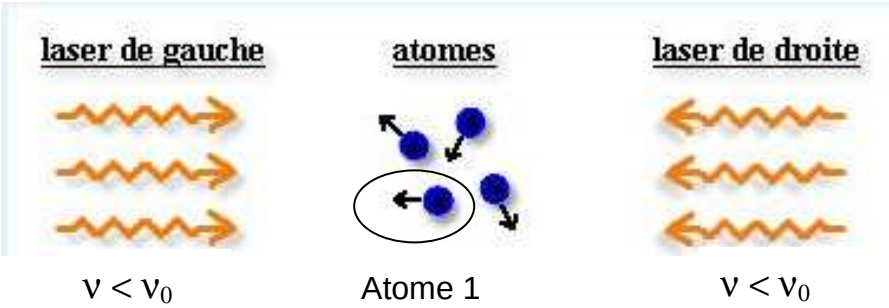
1.3.2 Définir l'accélération de l'atome et retrouver l'ordre de grandeur de sa valeur donné dans les documents en admettant que la durée du processus d'absorption soit de l'ordre de la période du cycle « absorption-désexcitation ».

1.4 Expliquer qualitativement pourquoi l'effet sur la vitesse de l'émission spontanée est en moyenne nul.

2. Principe du refroidissement Doppler

Principe du refroidissement Doppler selon une direction

On note ν_0 la fréquence des photons pouvant être absorbés par un atome immobile dans le référentiel du laboratoire et ν celle des photons émis par les lasers utilisés. ν est légèrement inférieure à ν_0.



D'après le site de l'équipe « atomes ultrafroids » du laboratoire Kastler Brossel
http://www-old.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/welcome.htm

2.1 Expliquer qualitativement le principe physique de l'effet Doppler.

2.2 L'atome 1 entouré sur le schéma précédent se déplace vers le « laser de gauche ».
Justifier pourquoi l'effet Doppler permet d'expliquer que cet atome est ralenti.

2.3 Le schéma de la fontaine atomique représentée en introduction de l'exercice fait apparaître six flèches représentant chacune un laser. Justifier la position de ces six lasers.

2.4 L'utilisation d'un laser pour refroidir peut, en première approche, paraître étonnante. Expliquer simplement en quelques mots en quoi le système étudié permet effectivement de refroidir des atomes.