

# La Lumière

On peut distinguer dans l'univers deux types de substance : la matière, qui possède une masse, et la lumière, de masse nulle. La lumière peut se propager dans le vide, toujours à la même vitesse. Mais de quoi est-elle faite ?

De même qu'une onde sonore est une variation de pression qui se propage dans un milieu matériel (air, eau, sol,...), la lumière est une variation du champ électromagnétique qui se propage dans le vide. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, James Clerk Maxwell (1831-1879) a synthétisé toute la théorie des phénomènes électriques et magnétiques dans quatre équations, qui relient le champ électromagnétique aux charges et courants électriques :

**Les équations de Maxwell**

1) Équation de Maxwell-Gauss :  $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

2) Équation de Maxwell-Faraday :  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

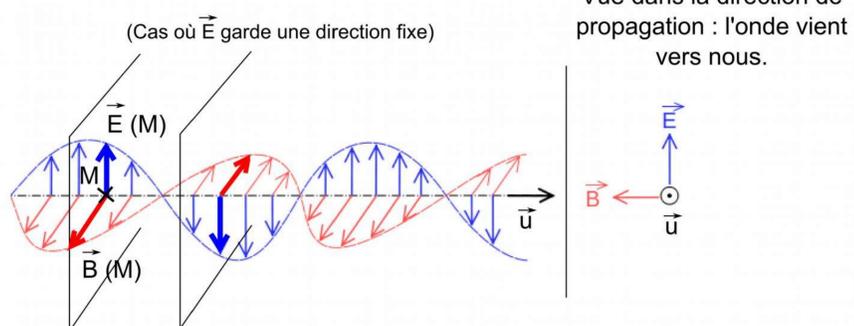
3) Équation de Maxwell-Thomson :  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

4) Équation de Maxwell-Ampère :  $c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

$\mathbf{E}$  : champ électrique     $\mathbf{B}$  : champ magnétique     $\mathbf{j}$  : courant électrique  
 $c$  : vitesse de la lumière     $t$  : temps     $\rho$  : charge électrique     $\epsilon_0$  : constante électrique

Ces équations impliquent l'existence des ondes électromagnétiques, dont la lumière visible n'est qu'une petite partie. Une propriété essentielle de ces équations est leur **linéarité** : si deux ondes électromagnétiques se rencontrent, elles se superposent et se traversent sans se déformer.

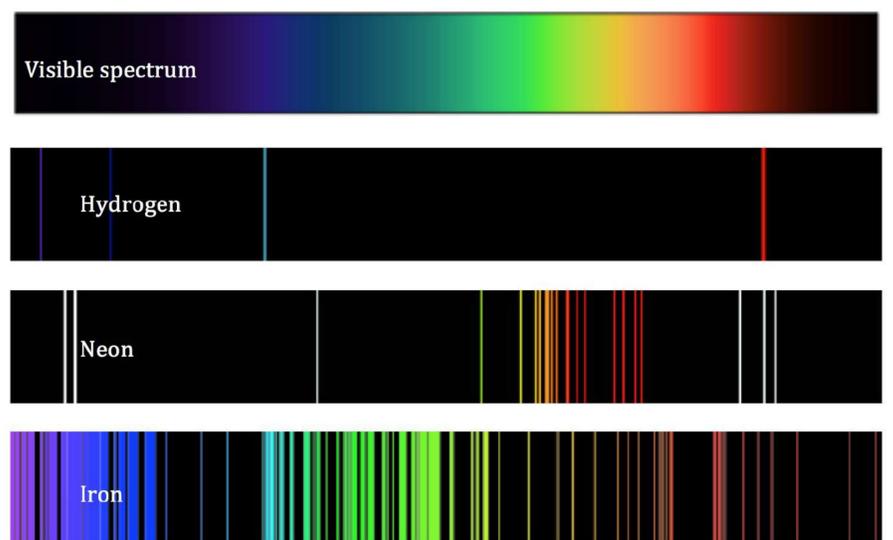
Allure du champ électromagnétique associé à une onde électromagnétique à un instant donné



$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont toujours contenus dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Description d'une onde électromagnétique sinusoïdale. © B. Hingant.

Comme le son, la lumière contient de l'énergie. Celle-ci est émise par les charges électriques accélérées, puis restituée à la matière lorsque la lumière est absorbée. Dans un atome, ce processus n'a lieu que si un électron peut donner ou recevoir une quantité précise d'énergie lumineuse. En effet, les expériences de spectroscopie du XIX<sup>ème</sup> siècle nous montrent que seules certaines couleurs ou fréquences de la lumière peuvent être émises ou absorbées par un atome de type donné. L'ensemble de ces fréquences est appelé son spectre :



Spectres de l'hydrogène, du néon et du fer

[http://www.visionlearning.com/img/library/large\\_images/image\\_6979.png](http://www.visionlearning.com/img/library/large_images/image_6979.png)

L'existence de ces sauts d'énergie des électrons dans la matière nous prouve que la lumière n'est pas seulement une onde mais se manifeste aussi comme des particules, grains de lumière appelés photons (Einstein, 1905). La physique quantique nous apprend que l'énergie d'un photon ( $E$ ) est proportionnelle à la fréquence ( $f$ ) de son onde électromagnétique :

$$E = hf$$

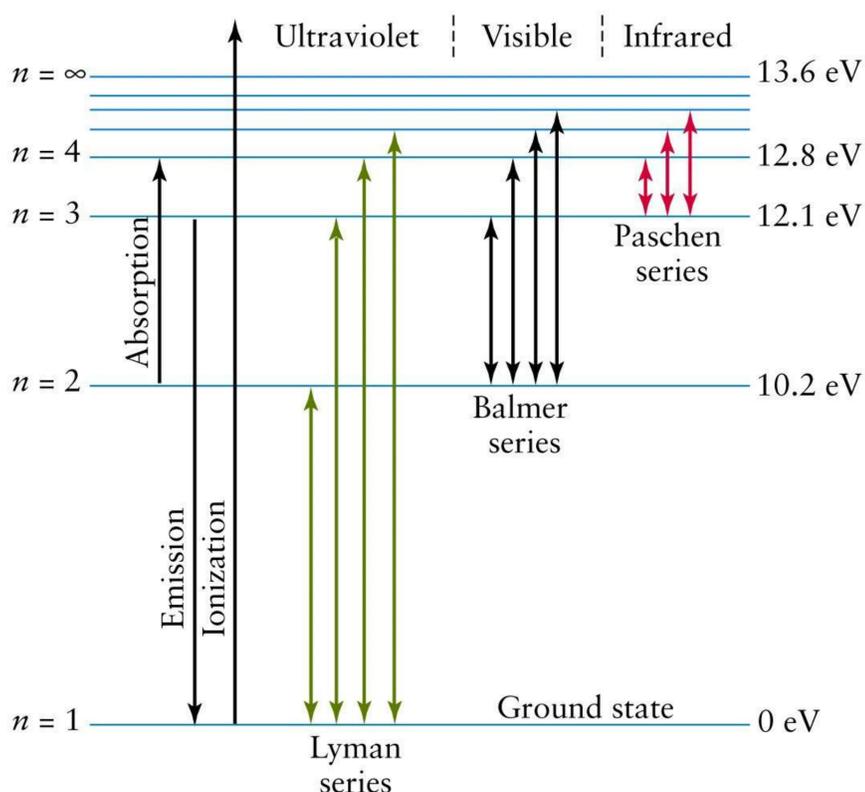
où  $h$  est la constante de Planck. Pour savoir comment les atomes émettent ou absorbent ces grains de lumière, il faut connaître les propriétés des états des électrons dans l'atome.

# La structure de l'atome

L'atome le plus simple, l'hydrogène, contient seulement un proton et un électron. L'électron est 2000 fois plus léger que le proton, mais il occupe un espace 100 000 fois plus grand. Contrairement aux planètes, qui suivent des trajectoires déterminées, les électrons vivent dans des nuages, décrits mathématiquement par une **fonction d'onde** qui donne la probabilité de présence de l'électron dans chaque région de l'espace. **L'équation de Schrödinger (1926)** décrit l'évolution de la fonction d'onde de l'électron et permet de connaître ses états stationnaires, d'énergie fixée. L'énergie des photons qu'un atome peut émettre ou absorber doit être égale à la différence d'énergie entre deux états stationnaires. Dans un atome d'hydrogène isolé, l'énergie ne dépend que du **nombre quantique principal,  $n$**  :

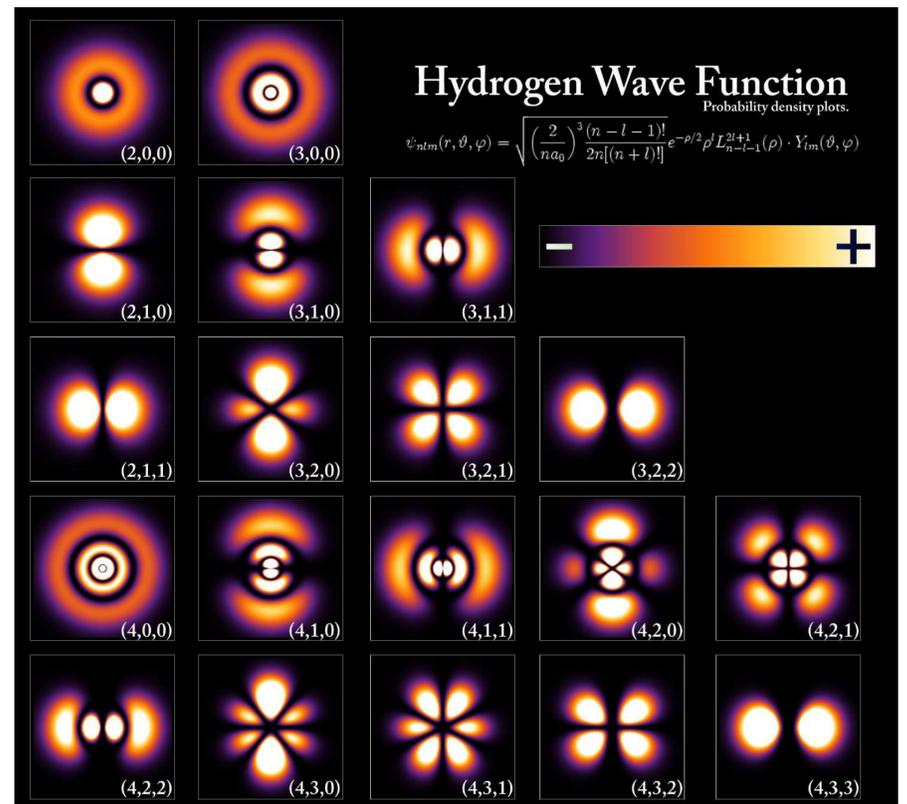
$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$$

De même qu'un satellite peut se libérer de l'attraction terrestre si on le lance assez vite, on peut arracher un électron d'un atome en lui donnant suffisamment d'énergie. Cette **énergie d'ionisation** vaut 13.6 eV pour l'atome d'hydrogène.



Une part de l'énergie de l'électron vient de sa rotation autour du noyau. La forme du nuage électronique dépend de ce mouvement, représenté

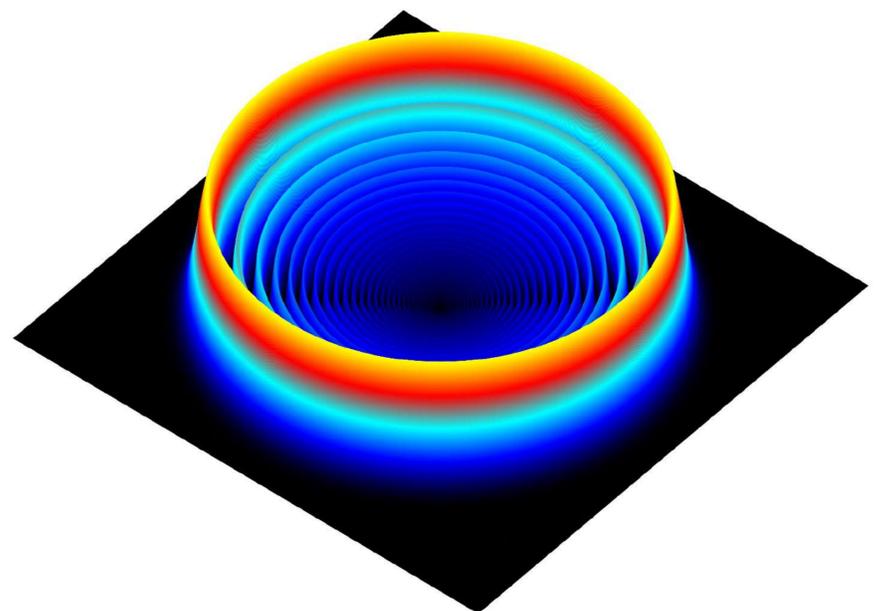
par deux autres nombres quantiques,  $l$  et  $m$ . Dans un nuage à symétrie sphérique ( $l = m = 0$ ), l'électron n'a pas d'énergie de rotation. Plus  $l$  est élevé, plus la fonction d'onde oscille et plus le nuage a de lobes.



Les nuages électroniques de l'hydrogène, indexés par  $(n, l, m)$

© PoorLeno, via Wikimedia Commons

Si un électron a un nombre quantique principal,  $n$ , élevé, son nuage est beaucoup plus grand que les autres et l'atome est presque ionisé. Cet électron périphérique se comporte alors comme dans un **atome d'hydrogène géant**. Ces états, dits de Rydberg, ont des énergies très proches et l'on peut passer de l'un à l'autre avec des photons de très basse énergie (micro-ondes ou radiofréquences). Dans les **états de Rydberg circulaires**,  $m$  est maximal et le nuage électronique a la forme d'un tore, proche d'une trajectoire classique.

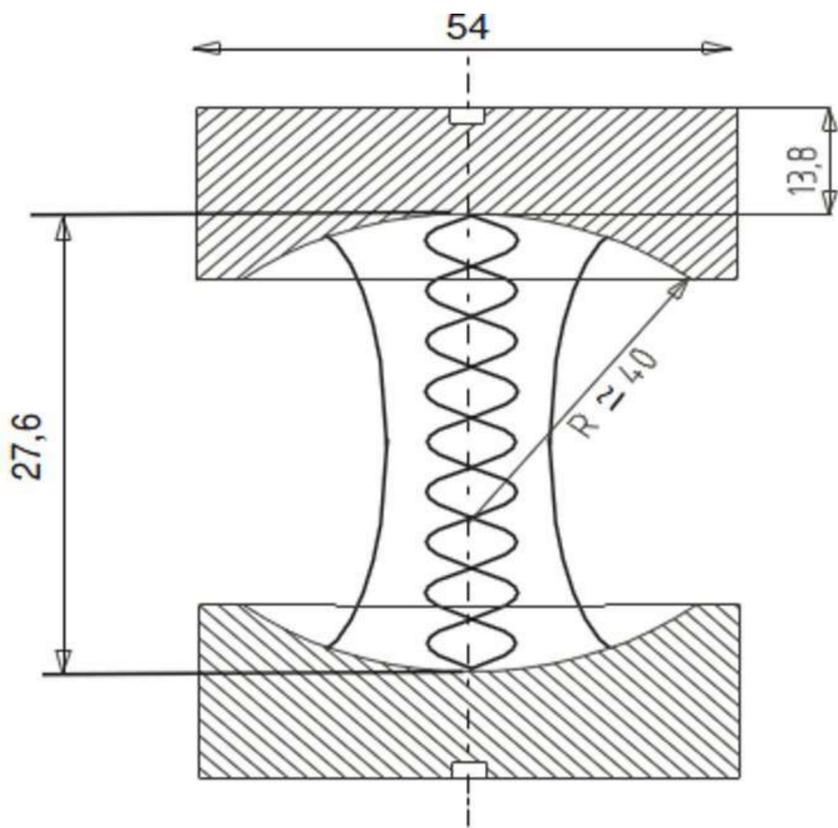


Un état de Rydberg circulaire

© Hweimer, via Wikimedia Commons

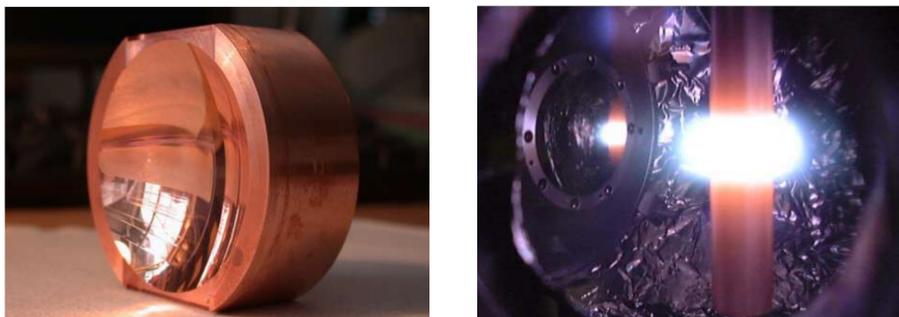
# Comment fabriquer une boîte à photons ?

En plaçant face à face deux miroirs sphériques concaves, on peut piéger une onde lumineuse. C'est une **cavité optique**.



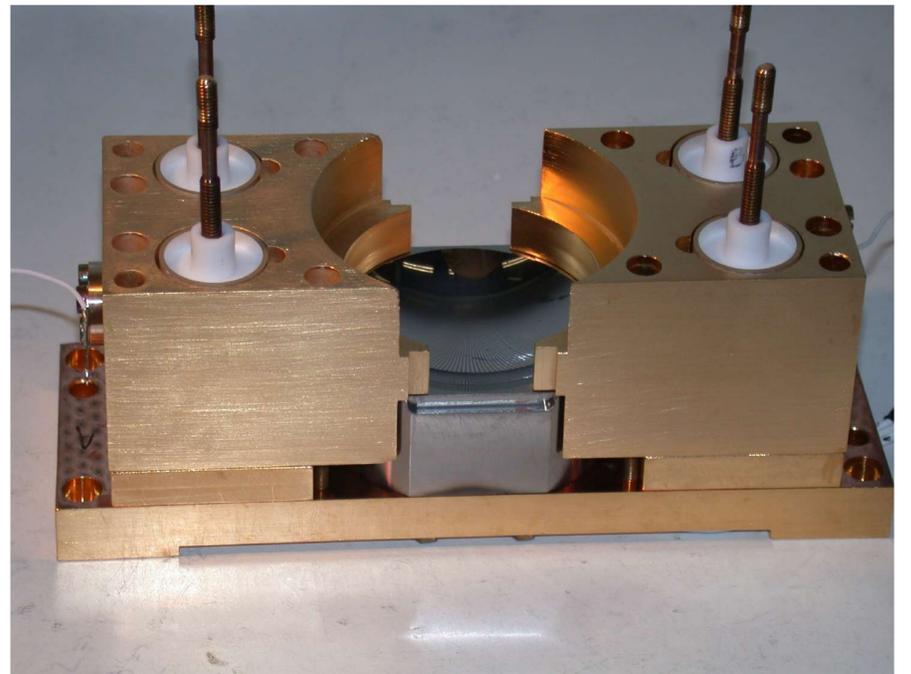
Cavité formée par deux miroirs sphériques coaxiaux.  
© LKB, Collège de France.

Nos miroirs de cuivre sont recouverts de niobium et conduisent parfaitement l'électricité. La lumière peut ainsi faire de nombreux allers-retours, parcourant  $39000 \text{ km}$  en  $0.13 \text{ s}$ , durée suffisante pour étudier les photons piégés dans cette cavité.

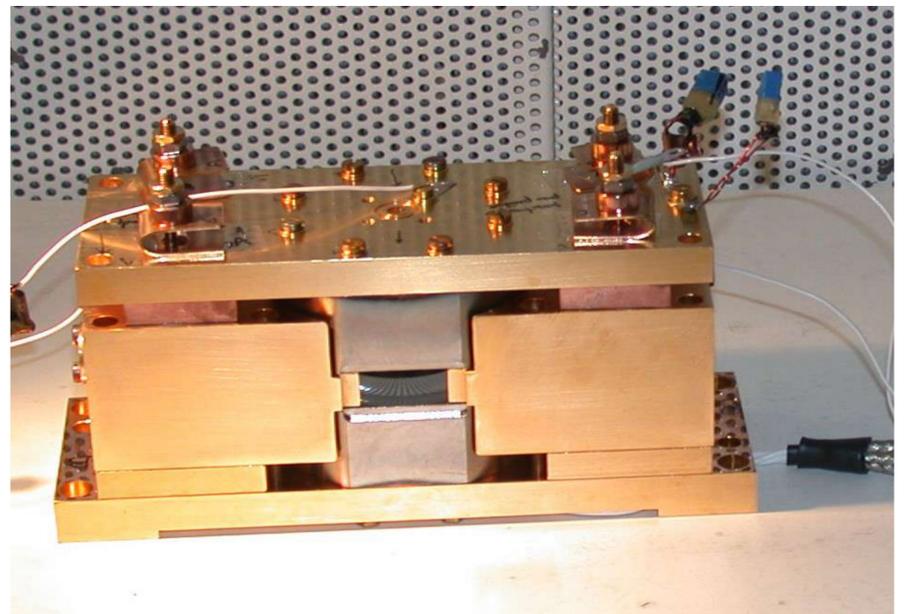


Miroir de cuivre (g) recouvert de niobium dans un plasma d'argon (d).  
© cqed.org (g) & CEA (d).

Ces miroirs sont posés sur des cales piézoélectriques qui permettent de régler finement leur écartement, donc les modes de vibration de la lumière piégée. Ils sont placés dans une enceinte refroidie à  $0.8 \text{ K}$  (soit  $-272.35 \text{ °C}$ ) par de l'azote et de l'hélium liquides, pour que le niobium devienne supraconducteur et réfléchisse parfaitement les photons.



Une boîte à photons partiellement assemblée.  
© LKB, Collège de France.



La même boîte entièrement assemblée. © LKB, Collège de France.

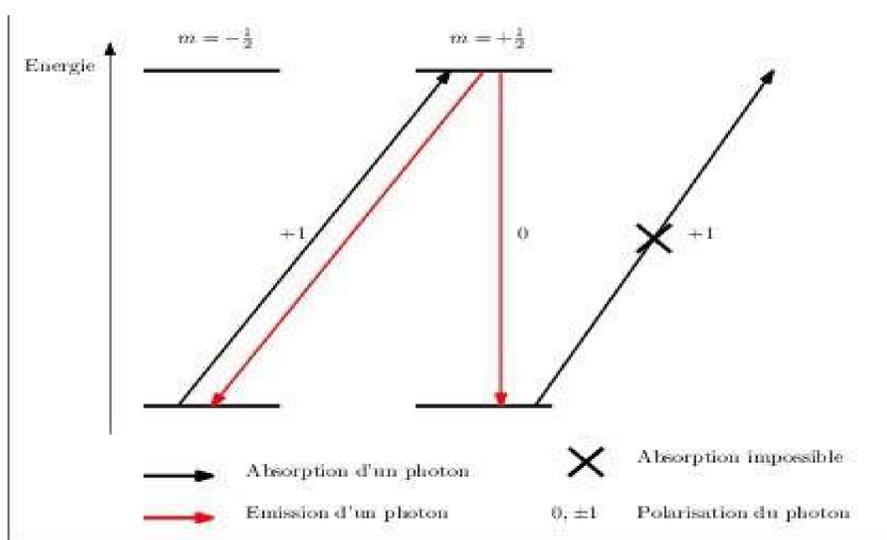
Un orifice latéral permet d'injecter des atomes de rubidium, dont l'état est modifié par la présence des photons dans la cavité traversée. En observant ces atomes à leur sortie, on peut compter les photons qu'il y avait dans la cavité.



Assemblage du cryostat autour de la boîte à photons.  
© LKB, Collège de France.

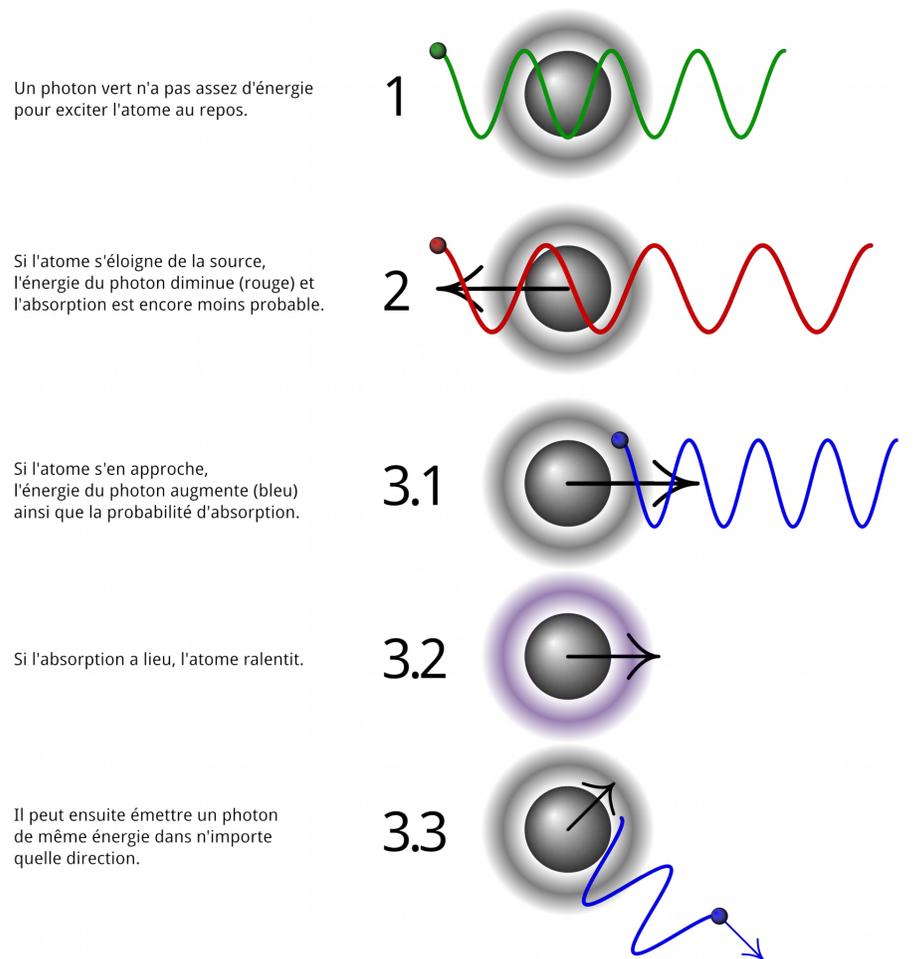
# Refroidir les atomes avec des lasers

Selon la polarisation de la lumière et sa direction de propagation, un photon peut modifier la rotation de l'électron dans l'atome et changer son impulsion angulaire. En éclairant des atomes avec des photons polarisés convenablement, on peut amener un de leurs électrons dans un état de rotation maximale et placer ainsi ces atomes dans le même état. Cette méthode est appelée le **pompage optique**.

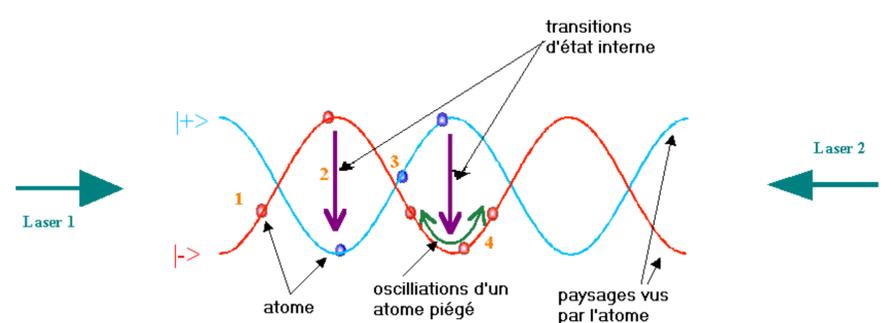


Lorsqu'un train siffle en passant près d'un quai, le son passe d'aigu à grave. De même, si un atome se déplace vers une source de lumière, il voit sa fréquence augmenter. S'il s'en éloigne, il la voit diminuer. Puisque l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence, se déplacer vers lui augmente son énergie perçue, et s'en éloigner la diminue.

Utilisons cet **effet Doppler** avec des photons d'énergie légèrement inférieure à celle qui permet une transition dans un atome au repos. S'il se déplace, il absorbera bien plus de photons issus de la source dont il se rapproche que de photons issus de la source dont il s'éloigne (figure 3). Comme chaque photon absorbé lui transfère son impulsion, l'atome subit une force opposée au sens de son déplacement, comme la force de frottement d'un fluide. L'atome ralentit peu à peu et sa vitesse moyenne diminue. Collectivement, les atomes se refroidissent. On atteint ainsi des températures de l'ordre du **millikelvin** (un millième de degré au-dessus du zéro absolu).



On peut encore améliorer le refroidissement des atomes dans une cavité avec une onde lumineuse stationnaire. Selon son état interne, noté  $|+\rangle$  ou  $|-\rangle$ , l'atome évolue dans un paysage énergétique fait de collines et de vallées ou dans le paysage inversé (figure 3). On peut ajuster l'onde pour qu'un atome dans l'état  $|+\rangle$  arrivant en haut d'une colline absorbe un photon du laser puis émette un photon de fluorescence pour redescendre immédiatement dans le fond de la vallée dans l'état  $|-\rangle$ . S'il a encore assez d'énergie cinétique pour remonter la colline, il a de fortes chances de subir cette même absorption-émission pour retomber au fond de la vallée dans l'état  $|+\rangle$ , et ainsi de suite jusqu'à l'épuisement, comme le pauvre Sisyphos de la mythologie grecque ! Cette méthode, appelée le **refroidissement Sisyphos**, permet d'atteindre des températures de l'ordre du **microkelvin**.



# Comment compter les photons dans une boîte ?

Pour compter les photons contenus dans une boîte, on peut les faire absorber par des atomes et mesurer l'énergie ainsi acquise. L'inconvénient est que les photons ont alors disparu. Mais on peut aussi faire une **mesure non destructive** en modifiant l'état des atomes sans leur faire absorber de photon.

Lorsqu'une grandeur physique ne peut prendre que deux valeurs, on obtient un **système à deux états**. En physique quantique, un tel système peut aussi se trouver dans des états intermédiaires, représentés par les points d'une sphère appelée la **sphère de Bloch**. L'état  $|e\rangle$  (*excited*) est placé au pôle nord et l'état  $|g\rangle$  (*ground*) au pôle sud. Ils ont des énergies  $E_e > E_g$ .

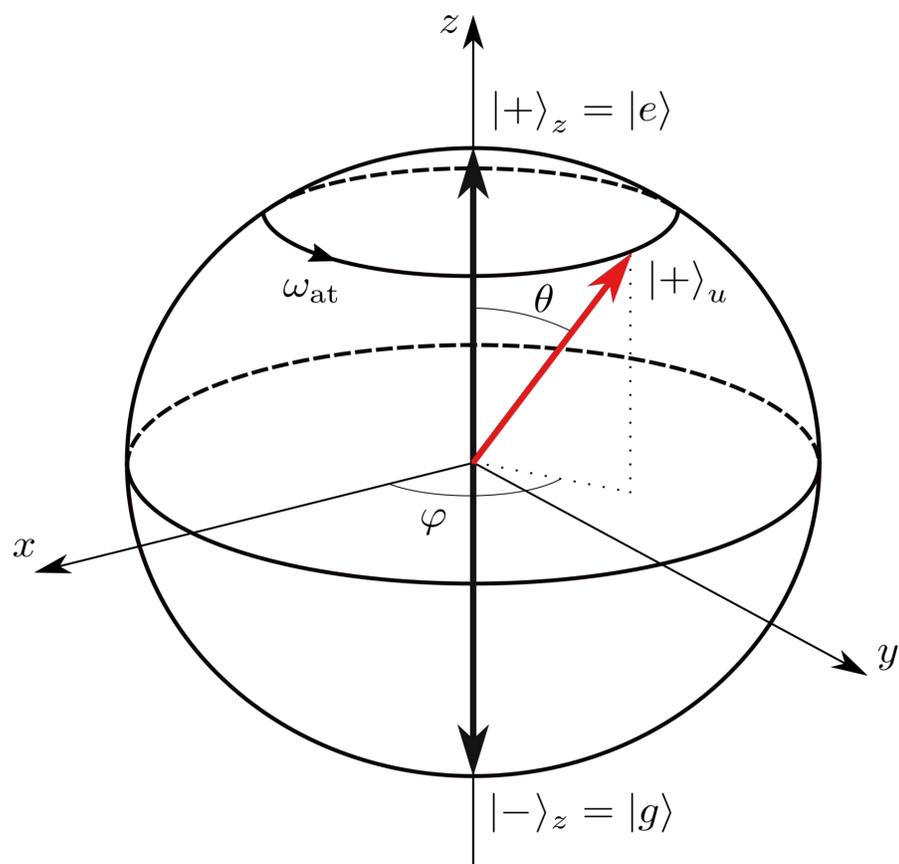


Figure 1 : La sphère de Bloch. © V. Métillon.

L'évolution du système correspond à une trajectoire sur la sphère de Bloch. Si on empêche l'atome d'absorber ou d'émettre des photons, son état tourne sur un cercle horizontal. Plus les niveaux ont des énergies éloignées, plus cette rotation est rapide. Si l'état est dans l'hémisphère nord, une mesure de l'énergie donne plus souvent le résultat  $E_e$  tandis que dans l'hémisphère sud, l'énergie  $E_g$  est plus probable.

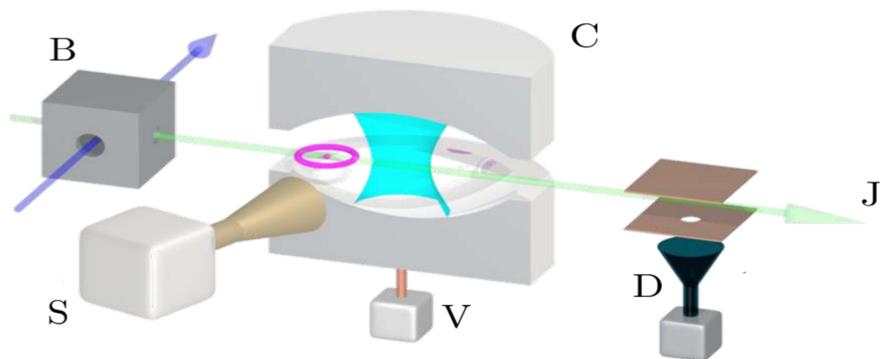


Figure 2 : Un dispositif permettant de compter les photons piégés. © V. Métillon.

Un atome, préparé dans un état tournant sur l'équateur, sort de la boîte B. Il entre dans la cavité C contenant  $n$  photons. Plus  $n$  est élevé, plus l'état tourne vite. La durée de l'interaction atome-lumière est fixée par l'expérimentateur pour que l'équateur serve de cadran indiquant le nombre  $n$  de photons contenus dans la cavité (figure 3).

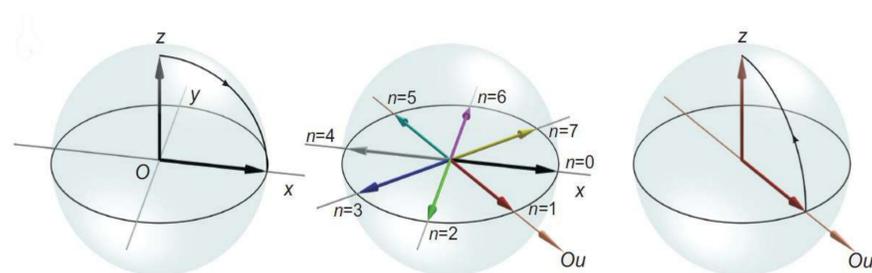


Figure 3 : L'état de l'atome, préparé sur l'équateur (gauche) change selon le nombre  $n$  de photons (milieu). Une impulsion convenable ramène l'état au pôle nord (droite). © LKB, Collège de France.

S'il n'y a qu'un photon, par exemple, l'atome arrive dans l'état représenté par la flèche rouge ( $n = 1$ ). Une impulsion micro-onde adaptée fait tourner la sphère de Bloch autour d'un axe horizontal et amène l'état au pôle nord. En mesurant l'énergie de l'atome, on le trouvera alors dans l'état  $|e\rangle$ .

Si la cavité contient deux photons, la même impulsion ne ramène pas l'atome en  $|e\rangle$  ou en  $|g\rangle$ , mais une répétition de la mesure nous fournira la probabilité de retomber dans chacun de ces deux états. L'information pertinente n'est pas l'état dans lequel on trouve l'atome lors de la mesure, mais cette probabilité de retomber dans l'état  $|e\rangle$  ou dans l'état  $|g\rangle$ .

En modifiant l'impulsion micro-onde, donc l'axe horizontal de cette rotation, on reconstruit l'état qu'avait l'atome sur le cadran de l'équateur et l'on parvient ainsi à mesurer le nombre de photons sans les détruire.