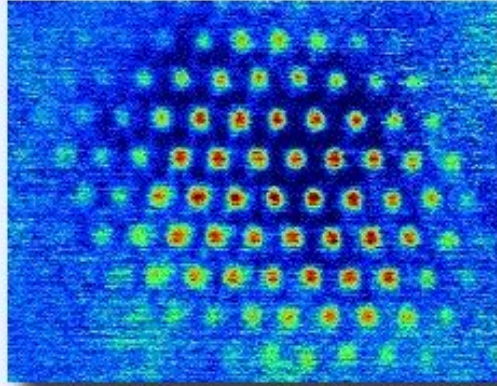


# De la lumière laser aux atomes ultrafroids



La physique des atomes froids présentée en termes simples par l'[équipe "atomes ultrafroids"](#)  
du [Laboratoire Kastler Brossel](#), dirigée par Claude Cohen-Tannoudji\*.



\* Prix Nobel de Physique 1997, avec Steven Chu et William D. Phillips, pour "le développement de méthodes pour refroidir et piéger des atomes avec des faisceaux laser".

©[Laboratoire Kastler Brossel - 1999](#).

1. Introduction
2. Les atomes
3. La lumière
4. Émission et absorption de photons
5. Le laser
6. La pression de radiation
7. Le refroidissement d'atomes par laser
8. Le piégeage laser
9. Les horloges atomiques
10. Les interférences atomiques
11. La condensation de Bose-Einstein
12. Pour en savoir plus

## 1. INTRODUCTION

Depuis le milieu des années 1980, la physique atomique connaît des développements spectaculaires. Grâce à une meilleure connaissance et une maîtrise croissante des interactions entre photons (les quanta de la [lumière](#)) et [atomes](#), plusieurs équipes de chercheurs dans le monde mènent des expériences où de petits nuages d'atomes sont immobilisés, suspendus dans le vide, et refroidis à des températures de quelques milliardièmes de degré seulement au-dessus du zéro absolu ( $-273,15$  °C). Ce thème a fait l'objet du prix Nobel de physique de 1997, qui a récompensé Claude Cohen-Tannoudji (qui dirige une équipe au [laboratoire Kastler-Brossel](#) de l'Ecole normale supérieure, à Paris) ainsi que les Américains Steven Chu et Williams Phillips.

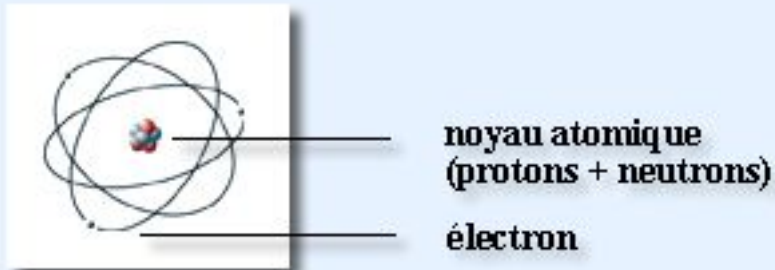
L'intérêt de ces travaux n'est pas seulement d'avoir battu tous les records de froid, mais de pouvoir sonder, contrôler et manipuler des atomes avec une extrême précision. Ces piégeages et [refroidissements d'atomes](#), réalisés avec l'aide essentielle de [lasers](#), révèlent aux physiciens de nouveaux phénomènes, souvent liés aux lois les plus intimes de la physique quantique — cette théorie construite dans les années 1920-1930 et qui a bouleversé l'image que l'on se faisait du monde. Les atomes ne sont pas de simples corpuscules, ce sont aussi des ondes. On le sait depuis plus de soixante-dix ans. Mais les expériences mettant en jeu les atomes froids le montrent avec force. Il est désormais possible de faire interférer entre eux des atomes, à l'instar des interférences lumineuses, plus familières. Depuis 1995, on sait également atteindre avec des atomes froids un état particulier de la matière, le « [condensat de Bose-Einstein](#) », que la physique quantique prévoyait depuis longtemps.

Les atomes froids représentent ainsi un nouveau terrain à explorer, un nouveau gisement d'idées. Avec des retombées qui vont au-delà des sciences fondamentales. Les [horloges atomiques](#) commencent déjà à en bénéficier. En exploitant les [interférences atomiques](#), d'autres domaines de la métrologie pourraient suivre. Et l'on commence à voir des dispositifs émettant des faisceaux cohérents non pas de photons, mais d'atomes — des lasers à atomes, équivalents atomiques de cette merveilleuse et aujourd'hui indispensable invention qu'est le laser lumineux.

[page précédente](#)[Pour en savoir plus](#)[page suivante](#)

## 2. LES ATOMES

Tout le monde le sait aujourd'hui, la matière ordinaire est faite d'atomes, souvent intimement liés entre eux pour constituer des molécules. Les atomes sont extrêmement petits : leur taille est de l'ordre de l'angström, soit  $10^{-10}$  mètre, c'est-à-dire le dix milliardième de mètre. Ils sont constitués d'un noyau, de charge électrique positive, entouré d'un nuage d'électrons, ayant chacun une charge électrique négative ( $-q = -1,6 \times 10^{-19}$  coulomb). Le noyau, minuscule, est formé de protons, chacun de charge  $+q$ , et de neutrons, de charge nulle. Pour l'atome neutre, le nombre d'électrons est égal au nombre de protons.

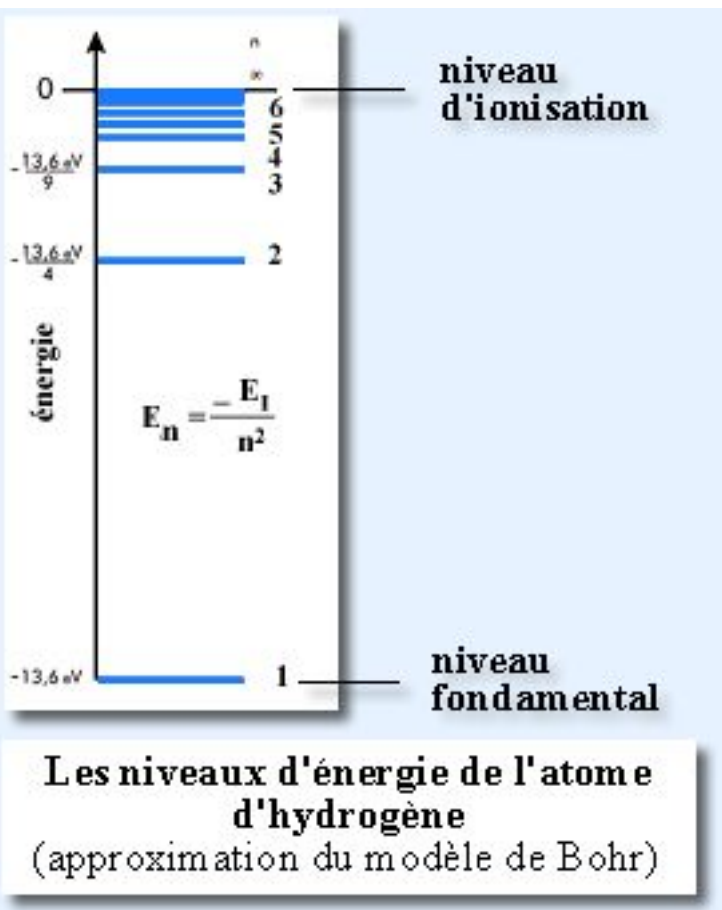


**Représentation naïve de l'atome de lithium**

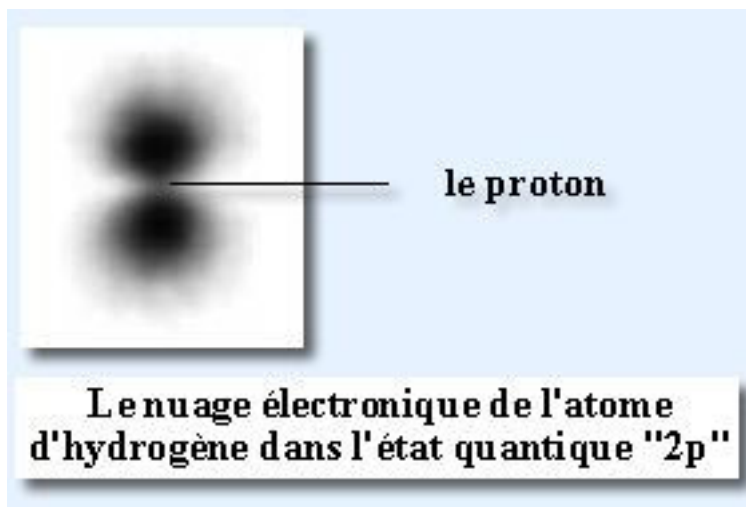
L'atome le plus simple est celui d'hydrogène, constitué d'un proton et d'un électron. Les lois de la physique quantique permettent de déterminer avec précision l'énergie de cet atome, qui est la somme de l'énergie cinétique de l'électron (le proton, beaucoup plus massif, est immobile en première approximation) et de l'énergie potentielle électrostatique liant l'électron au proton. Il s'avère que les valeurs possibles de l'énergie forment un ensemble discret, et peuvent être repérées par un entier positif.

En première approximation, l'énergie du « niveau »  $n$  de l'atome d'hydrogène vaut :

$$E_n = -E_I/n^2 \text{ où } E_I = 13,6 \text{ électronvolts (1 électronvolt (eV) = } 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule).}$$



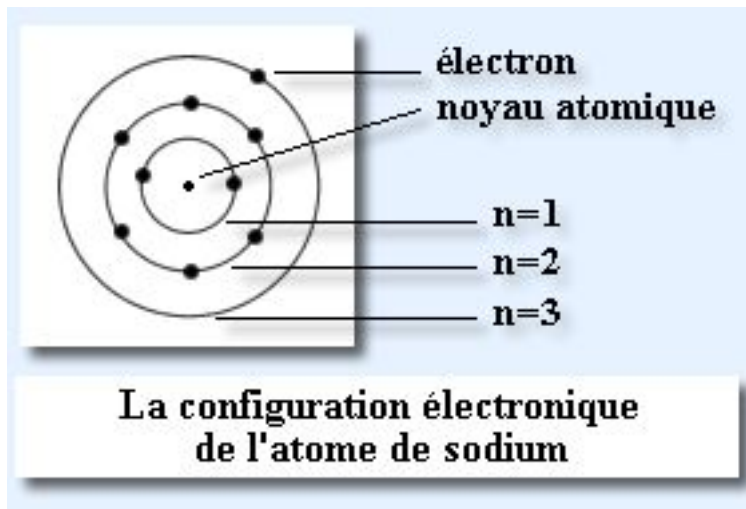
Il n'est pas possible d'attribuer aux électrons des atomes une orbite bien déterminée. La mécanique quantique ne donne accès qu'à des probabilités, par exemple la probabilité pour un électron d'être présent à tel ou tel endroit et à tel ou tel instant. D'où l'image d'un « nuage électronique » flou.



Cependant, lorsque l'électron de l'atome d'hydrogène est dans le niveau d'énergie  $n$ , on démontre que sa distance moyenne au proton vaut  $a_n = a_0 n^2$  où  $a_0 \approx 0,5 \text{ \AA} = 0,5 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Plus  $n$  est grand, plus l'électron est loin en moyenne du noyau atomique. Pour  $n$  infini, l'électron n'est plus lié au proton, son énergie est nulle : l'atome est ionisé.

$E_I = -E_1$  est donc l'énergie d'ionisation, c'est-à-dire l'énergie minimale qu'il faut fournir à l'électron situé initialement dans le niveau fondamental ( $n = 1$ ) pour qu'il ne soit plus lié à l'atome.

Quid des atomes ayant plusieurs électrons ? Comme pour l'atome d'hydrogène, leur énergie électronique est « quantifiée », elle ne peut prendre que certaines valeurs. La structure résultante des niveaux d'énergie est complexe. L'essentiel à retenir est que les électrons se répartissent sur des niveaux d'énergie étiquetés par  $n$  et d'autres « nombres quantiques », remplissant ainsi des « couches » capables d'accueillir chacune au maximum un nombre bien déterminé d'électrons.

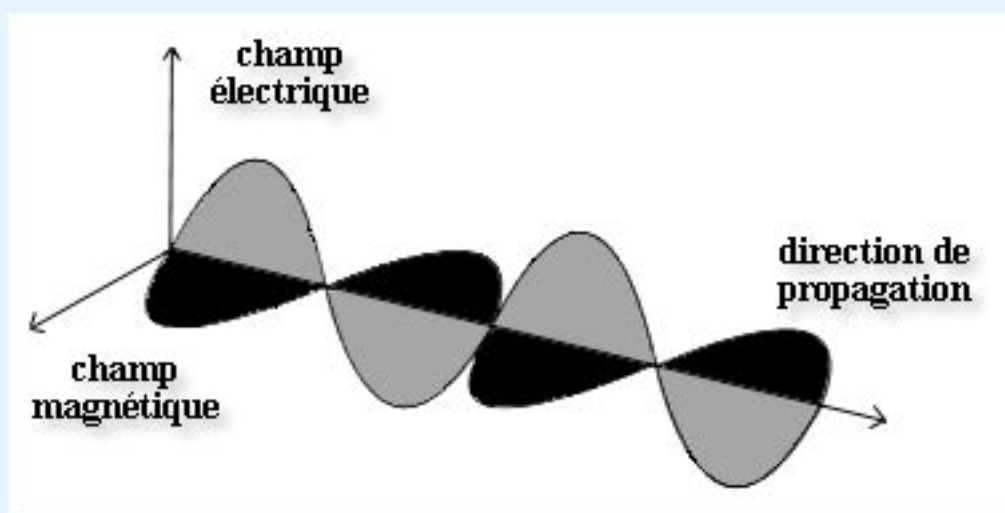
[page précédente](#)[Pour en savoir plus](#)[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

### 3. LA LUMIÈRE

La nature de la lumière a longtemps été mystérieuse. Elle ne s'est pleinement révélée qu'aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Depuis le XVII<sup>e</sup>, on se disputait pour savoir si la lumière est une onde (école représentée par Christiaan Huygens, Augustin Fresnel ou Thomas Young) ou si elle est faite de corpuscules (école représentée par Isaac Newton).

Une étape cruciale a été franchie vers 1864 par James Clerk Maxwell. Ce physicien écossais établissait les équations fondamentales auxquelles obéissent les champs électrique et magnétique. Or ces équations montrent que le champ électromagnétique peut osciller (ou vibrer) et que cette oscillation se propage dans le vide à la vitesse... de la lumière (300 000 km/s environ). Cela a suggéré que la lumière n'est autre qu'une onde électromagnétique, hypothèse qui s'est confirmée par la suite et qui se résume ainsi : une onde électromagnétique sinusoïdale de longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,8 micron environ correspond à de la lumière visible, de couleur différente selon la valeur de la longueur d'onde. Pour les longueurs d'onde plus grandes que 0,8 micron, on a les infrarouges, les micro-ondes, les ondes radio, etc. Au-dessous de 0,4 micron, on a les ultraviolets, les rayons X puis les rayons gamma.



**Propagation d'une onde électromagnétique dans le vide**

Si la théorie de Maxwell a considérablement étayé la thèse de la nature ondulatoire de la lumière, ce n'était pas la fin de l'histoire. Max Planck et son explication de la loi du rayonnement du « corps noir », en 1900, Einstein et son analyse de l'effet photoélectrique, en 1905, suggèrent la deuxième face de la lumière : son énergie est transmise par « quanta », c'est-à-dire par quantités bien définies, et l'énergie d'un quantum de lumière est :

$E = h\nu$  avec  $h = 6,626... \times 10^{-34}$  joule.seconde (constante de Planck),

$\nu$  = fréquence de l'onde électromagnétique (supposée sinusoïdale).

(Un quantum de lumière emporte aussi de la quantité de mouvement et du moment cinétique, voir l'encadré ci-dessous)

Les quanta de lumière seront plus tard appelés (en 1926, par Gilbert N. Lewis) « photons ». Ils représentent l'aspect corpusculaire de la lumière, ils sont ces quantités discontinues — ces « particules » — par lesquelles le champ électromagnétique échange de l'énergie, de la quantité de mouvement, du moment cinétique, avec la matière. Du point de vue théorique, les photons relèvent de l'électrodynamique quantique, théorie fondamentale développée à partir de 1927 et née de l'application des principes de la physique quantique à l'électromagnétisme de Maxwell.

### LE PHOTON

Si l'on note  $\hbar = h/(2\pi)$  la constante de Planck réduite,  $c$  la vitesse de la lumière,  $\nu$  la fréquence du rayonnement,  $\lambda$  sa longueur d'onde,  $\omega = 2\pi\nu$  sa pulsation,  $\mathbf{k} = 2\pi/\lambda \mathbf{u}$  son vecteur d'onde ( $\mathbf{u}$  étant le vecteur unitaire dans la direction de propagation), les principales caractéristiques du photon sont les suivantes.

*Masse* : 0

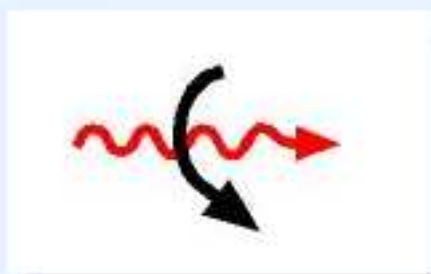
*Charge électrique* : 0

*Énergie* :  $E = h\nu = hc/\lambda = \hbar\omega$

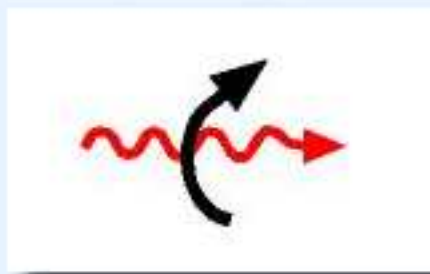
*Quantité de mouvement* :  $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} = h\nu/c \mathbf{u}$

Le photon transporte également un moment cinétique intrinsèque — un spin — dont la projection sur l'axe de propagation ne peut prendre que deux valeurs,  $+\hbar$  ou  $-\hbar$ . Dans le premier cas, on parle de polarisation circulaire gauche ; dans le deuxième, de polarisation circulaire droite.

**sens de rotation du vecteur champ électrique**



**Polarisation circulaire  
gauche**



**Polarisation circulaire  
droite**

[page précédente](#)

[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.



## 4. ÉMISSION ET ABSORPTION DE PHOTONS

La matière peut absorber ou émettre des rayonnements électromagnétiques. Au niveau microscopique et quantique, cela correspond à l'absorption ou l'émission de photons par les atomes. Ce faisant, les atomes changent d'état d'énergie (il s'agit, pour ce qui nous concerne, des niveaux d'énergie *électroniques* — il existe aussi des niveaux d'énergie *nucléaires*). On distingue trois mécanismes de base :

### 4.1. L'absorption

Lorsqu'un atome est soumis à une onde lumineuse, il peut absorber un photon. L'atome, initialement dans un état d'énergie électronique  $E_a$ , passe alors dans un état électronique d'énergie supérieure  $E_b > E_a$ . Comme l'impulsion (ou quantité de mouvement) totale doit être conservée, l'atome encaisse la quantité de mouvement du photon et recule donc. Pour un atome initialement immobile, ce processus d'absorption est d'autant plus efficace que l'énergie  $h\nu$  du photon est proche de l'écart  $E_b - E_a$  entre les deux niveaux d'énergie de l'atome.

### 4.2. L'émission spontanée

Les états électroniques excités ne sont pas stables. Plus ou moins vite, l'atome retombe dans l'état fondamental en émettant un photon. La durée de vie de l'état excité est le temps moyen au bout duquel cette émission spontanée se produit ; typiquement, elle vaut de l'ordre de 1 à 100 nanosecondes. Le photon peut être émis dans n'importe quelle direction et, chose importante à retenir pour la suite, deux directions d'émission opposées sont équiprobables si l'atome est initialement immobile. L'énergie  $h\nu$  du photon émis est égale à la différence d'énergie  $E_b - E_a$  entre les deux niveaux atomiques ( $b$ ) et ( $a$ ) (en toute rigueur, il faut tenir compte de l'énergie de recul de l'atome, mais celle-ci est ridiculement petite devant l'écart d'énergie  $E_b - E_a$ ).

### 4.3. L'émission induite ou stimulée

La présence d'un rayonnement incident peut induire un atome excité à émettre un photon ayant les mêmes caractéristiques que les photons incidents. Cela à condition que l'énergie de ces photons soit « résonnante », c'est-à-dire que  $h\nu$  soit égale à l'écart d'énergie entre le niveau supérieur et le niveau inférieur. Dans cette émission induite, qui constitue la réciproque du processus d'absorption, le photon créé par l'atome en se désexcitant a même fréquence et même direction de propagation que le rayonnement incident. Ce processus, qui permet d'amplifier une onde lumineuse, est à la base du fonctionnement des lasers.

[page précédente](#)

[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

## 5. LE LASER

Le mot « laser » est un acronyme de l'anglais « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ». Un laser est donc, littéralement, un amplificateur de lumière faisant appel à l'[émission stimulée](#) (ou induite). Le premier dispositif de ce type a été réalisé en 1960 par l'Américain Theodore H. Maiman, en s'appuyant sur les idées de ses compatriotes Charles H. Townes et Arthur L. Schawlow (quelques années auparavant, en 1952, Townes et les Soviétiques Nikolai G. Bassov et Alexandre M. Prokhorov avaient proposé le principe du maser, qui porte sur les micro-ondes alors que le laser porte sur les longueurs d'onde optiques).

### 5.1. L'inversion de population

Quel est le principe de fonctionnement des lasers ? On a vu que l'émission stimulée d'un atome ou d'une molécule produit un nouveau photon qui a exactement les mêmes fréquence, phase et direction que le photon incident ; dans un laser, cela se fait à grande échelle, sur un très grand nombre d'atomes ou molécules identiques. C'est pourquoi un laser a la particularité d'émettre une onde lumineuse intense dont la direction, la fréquence et la phase sont très bien déterminées. Il s'agit d'une lumière dite cohérente, contrairement par exemple à celle émise par une ampoule à filament, qui émet de nombreuses ondes de fréquences et phases diverses et ce dans toutes les directions.

Mais pour obtenir un effet d'émission stimulée sur un grand nombre d'atomes ou molécules, il faut fournir de l'énergie au milieu matériel afin que ses atomes ou molécules soient pour la plupart dans un niveau d'énergie excité  $E_2$ , et non dans leur niveau fondamental  $E_1$ . C'est ce qu'on appelle effectuer une *inversion de population*, car à l'équilibre thermodynamique la majorité des atomes se trouvent au contraire dans l'état d'énergie le plus bas (plus précisément, le rapport des populations des niveaux  $E_2$  et  $E_1$  vaut, à l'équilibre thermodynamique à la température absolue  $T$  :

$$N_2/N_1 = \exp [ - (E_2 - E_1)/kT ] \text{ où } k \text{ est la constante de Boltzmann.}$$

Le mécanisme précis aboutissant à l'inversion de population fait intervenir un ou plusieurs niveaux d'énergie intermédiaires entre  $E_1$  et  $E_2$  (ce n'est pas possible s'il n'y a que ces deux niveaux). De plus, le niveau excité  $E_2$  doit être suffisamment stable pour que l'émission spontanée ne se produise pas trop rapidement ; autrement, celle-ci devancerait l'émission stimulée et l'on obtiendrait pas une onde lumineuse cohérente.

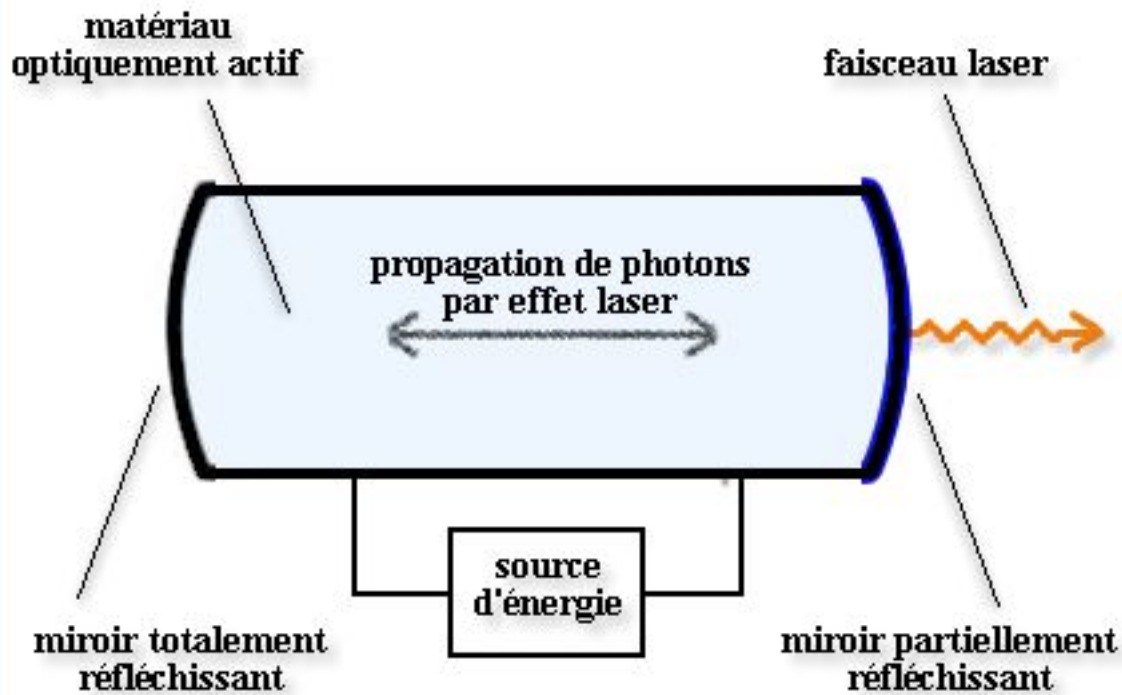
### 5.2. L'effet laser

L'inversion de population étant réalisée (par excitation lumineuse — on parle dans ce cas de « pompage optique » — ou électrique par exemple), regardons ce qui se passe lorsque l'un des atomes excités émet un photon de fréquence  $\nu = (E_2 - E_1)/h$  par émission *spontanée*. En arrivant sur un autre atome excité, ce photon va déclencher une émission *stimulée*, à l'issue de laquelle on obtient deux photons identiques et en phase. Ces deux photons vont à leur tour donner lieu à deux émissions stimulées, d'où deux nouveaux photons. Et ainsi de suite : le nombre de photons identiques et en phase qui traversent le milieu se multiplie très rapidement. C'est l'effet laser, c'est-à-dire l'amplification du rayonnement.

### 5.3. Un milieu actif, une cavité et deux miroirs

Pour obtenir un effet laser efficace, on place le milieu optiquement actif — c'est-à-dire les atomes qui subissent l'inversion de population et l'émission stimulée — dans une cavité entre deux miroirs disposés face à face. Ainsi, chaque photon fait plusieurs allers et retours, d'où un nombre plus important d'émissions induites par lui. Il reste à aménager une « ouverture » pour qu'une partie du rayonnement s'échappe de la cavité, formant ainsi le rayon laser. Pour ce faire, il suffit qu'un des deux miroirs soit partiellement réfléchissant.

La longueur d'onde, ou la fréquence, du faisceau émis dépend des dimensions de la cavité. En effet, la longueur d'onde des ondes lumineuses allant et venant dans la cavité et donnant lieu à l'effet laser doit être un diviseur entier de la longueur de la cavité. Sans cela, il se produirait des interférences destructives entre les ondes se propageant dans un sens et celles se propageant dans l'autre. Pour obtenir la longueur d'onde désirée, on peut donc jouer sur la longueur de la cavité.



**Schéma de principe d'un laser**

#### 5.4. Des utilisations innombrables

Les propriétés du rayon laser, en particulier sa fréquence lumineuse, dépendent en bonne partie du milieu matériel choisi pour remplir la cavité entre les deux miroirs. On a ainsi une grande variété de lasers : à gaz (hélium-néon,  $\text{CO}_2$ , etc.), à solides (rubis, néodyme, etc.), à liquides, à colorants, à semi-conducteurs. Il existe aussi des lasers à électrons libres, dont le principe est différent. Beaucoup de lasers sont peu puissants mais fournissent un faisceau en continu (les lasers à hélium-néon par exemple, qui sont fort répandus), tandis que d'autres sont très puissants mais ne délivrent que des impulsions brèves.

La gamme de longueurs d'onde accessibles ne cesse de s'étendre avec les années. La plupart des lasers de petite taille, comme les diodes laser qui équipent les lecteurs de CD, fonctionnent dans le rouge ou l'infrarouge, mais récemment le bleu a été atteint (cela promet des CD contenant encore plus d'informations sur une même surface ; en effet, la taille minimale de la tache produite par un rayon lumineux est, à cause des phénomènes de diffraction, de l'ordre de la longueur d'onde, or la longueur d'onde du bleu est environ la moitié de celle du rouge). Et d'autres dispositifs, plus volumineux et encore au stade de développement, ont atteint le domaine ultraviolet ou celui des rayons X.

À la diversité des lasers correspond une diversité encore plus grande de leurs applications : lecture de codes-barre dans les supermarchés, traitements ophtalmologiques, découpe de tissus, mesure précise de distances, détection de polluants atmosphériques, holographie, communications par fibres optiques, imprimantes d'ordinateurs, etc.

Les lasers sont également devenus des instruments dont les chercheurs — les physiciens, les chimistes — peuvent difficilement se passer. Des lasers à impulsions ultrabrèves permettent d'analyser comment se déroule une réaction chimique élémentaire ; en physique atomique et moléculaire, la lumière laser permet de contrôler et de sonder avec précision l'état des atomes ou des molécules ; et ainsi de suite. Bref, le laser est incontestablement l'une des inventions majeures du XX<sup>e</sup> siècle.

[page précédente](#)

[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

## 6. LA PRESSION DE RADIATION

### 6.1. Une force exercée par la lumière sur la matière

Les photons transportent de la quantité de mouvement. Le flux de photons que représente un faisceau lumineux est donc capable de transférer de la quantité de mouvement à la matière. Rapportée à l'unité de temps, ce transfert de quantité de mouvement donne lieu à une force. Et celle-ci, rapportée à l'unité d'aire, représente une pression. Ainsi, un rayonnement électromagnétique peut exercer une pression, qu'on appelle *pression de radiation*.

Une manifestation macroscopique bien connue de cet effet est l'orientation opposée au Soleil de la queue des comètes (du moins celles qui dégagent des particules neutres ; pour les autres, c'est le vent solaire plutôt que la pression de radiation qui agit sur l'orientation de la queue).



crédit : [JPL Picture Archive](#)

On peut aisément estimer la force subie par des atomes dans un faisceau laser dont la fréquence lumineuse  $\nu$  correspond à l'écart d'énergie entre deux niveaux atomiques ( $a$ ) et ( $b$ ). L'atome supposé initialement immobile absorbe un photon, et acquiert donc une quantité de mouvement  $M\mathbf{V} = h\nu/c \mathbf{u}$ , où  $\mathbf{u}$  est le vecteur unitaire de la direction du faisceau ( $M$  et  $\mathbf{V}$  sont la masse et la vitesse de l'atome).

Le changement de vitesse correspondant,  $h\nu/(Mc)$ , est appelé vitesse de recul, que l'on peut noter  $V_R$ . Prenons l'exemple de l'atome de sodium. La lumière permettant de le faire passer de son niveau fondamental à son premier niveau excité est de longueur d'onde  $\lambda = 589$  nanomètres (c'est la fameuse raie jaune du sodium). La vitesse de recul  $V_R$  de l'atome de sodium vaut alors environ 3,1 cm/s.

Au bout d'un temps moyen  $\tau$  (la durée de vie), l'atome se désexcite et réémet un photon de même fréquence. Ce photon peut être émis dans n'importe quelle direction, mais les probabilités sont égales pour deux directions opposées. L'effet moyen du recul dû à l'émission spontanée sur la quantité de mouvement est donc nul. Par conséquent, en un cycle d'absorption-émission, l'atome gagne *en moyenne* une quantité de mouvement égale à  $h\nu/c \mathbf{u}$ .

## 6.2. Quand les photons freinent les atomes

Plongé dans le faisceau laser, l'atome absorbe et réémet constamment des photons ; le temps qui sépare deux cycles absorption-émission spontanée successifs est de l'ordre de la durée de vie  $\tau$  du niveau excité. Pendant un temps  $\Delta t$ , il y a donc de l'ordre de  $\Delta t/\tau$  cycles, et la quantité de mouvement gagnée en moyenne pendant  $\Delta t$  vaut donc  $\Delta(MV) \approx h\nu/(\tau c) \Delta t \mathbf{u}$ . La force moyenne  $\mathbf{F}$  exercée sur l'atome est égale à la variation moyenne de quantité de mouvement divisée par l'intervalle de temps correspondant. D'où :

$$\mathbf{F} \approx h\nu/(\tau c) \mathbf{u} \text{ (force moyenne exercée par le faisceau laser sur l'atome)}$$

L'accélération correspondante est  $a = F/M \approx h\nu/(Mc\tau) = V_R/\tau$ .

En prenant  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-8}$  s, on obtient pour l'atome de sodium :

$$a \approx 10^6 \text{ m/s}^2$$

L'accélération (ou la décélération) peut atteindre 100 000 fois l'accélération de la pesanteur terrestre !

La force ci-dessus peut être utilisée pour ralentir et immobiliser un jet d'atomes. Le principe, développé à la fin des années 1970, consiste à disposer le jet atomique et le faisceau laser en opposition, la fréquence lumineuse étant convenablement choisie. Les atomes et les photons se propagent en sens inverse, la force subie par les atomes est en sens opposé de leur vitesse : les atomes sont donc freinés.

Dans les jets atomiques usuels, la vitesse  $V_0$  des atomes est de l'ordre de 1 000 m/s. Le jet atomique est donc stoppé en un temps  $T = V_0/a$ , soit

$$T \approx 10^{-3} \text{ s,}$$

et la distance  $L$  parcourue par le jet avant de s'immobiliser vaut

$$L = V_0^2/(2a) \approx 0,5 \text{ m.}$$

Une précision sur ce qui précède : en ralentissant, les atomes voient la fréquence laser varier, par [effet Doppler](#). Pour que les atomes restent en résonance, c'est-à-dire continuent d'absorber les photons qui vont à leur rencontre, il existe deux méthodes. L'une est le « balayage en fréquence » : on adapte la fréquence laser en l'augmentant au fur et à mesure que le temps s'écoule et que les atomes ralentissent. L'autre est le « ralentisseur Zeeman » : un champ magnétique inhomogène décale légèrement les niveaux d'énergie (en fonction de la position des atomes) de façon que l'écart  $E_b - E_a$  entre les deux niveaux reste en résonance avec la fréquence laser, celle-ci étant fixe.



## L'effet Doppler

La fréquence d'une onde telle qu'elle est mesurée par un observateur dépend du mouvement relatif entre la source et lui. S'il se rapproche de la source, la fréquence apparente est supérieure à la fréquence d'émission. Si l'observateur s'éloigne de la source, c'est le contraire. C'est bien connu : le bruit d'un train qui s'approche est plus aigu que s'il s'éloigne.

Plus précisément, prenons le cas d'un observateur et d'une source dont la vitesse relative  $V$  est dirigée selon l'axe observateur-source (pas de mouvement transversal, et  $V$  positive si l'observateur et la source s'éloignent). Soit  $c$  la vitesse de propagation des ondes, supposée grande par rapport à  $V$ , et soit  $f_0$  la fréquence des ondes telle qu'elle est mesurée dans le référentiel de la source. Alors, au premier ordre en  $V/c$ , la fréquence  $f$  mesurée par l'observateur est égale à

$$f = f_0(1 - V/c)$$

[page précédente](#)[Pour en savoir plus](#)[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

## 7. LE REFROIDISSEMENT D'ATOMES PAR LASER

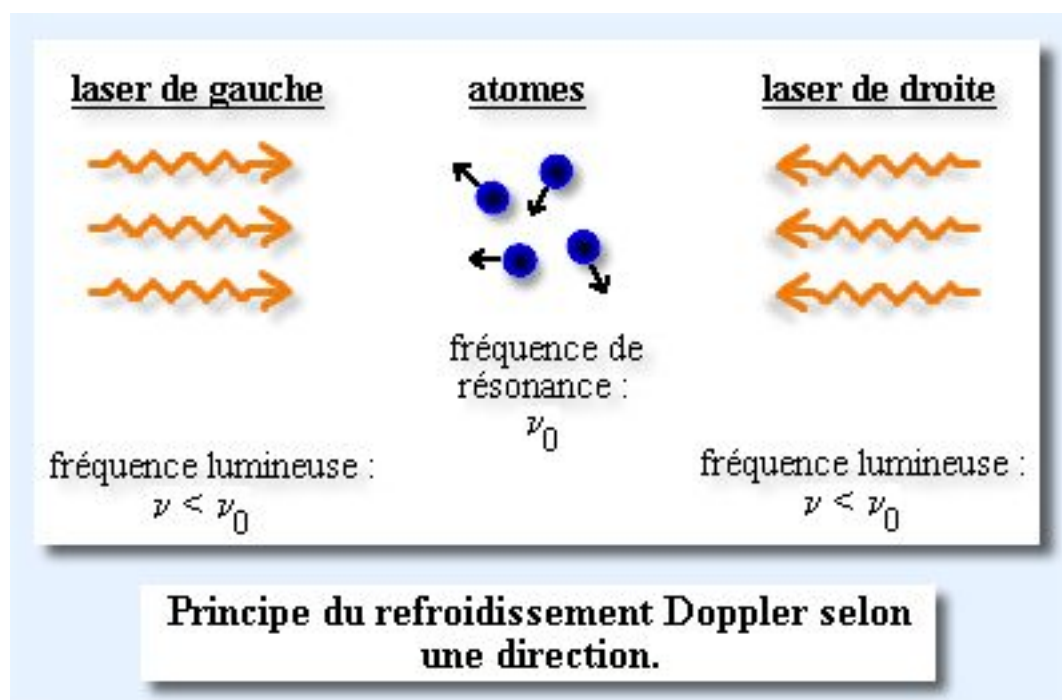
Ralentir des atomes, c'est diminuer leur vitesse moyenne. L'utilisation de la lumière, *via* sa [pression de radiation](#), permet également de les refroidir, c'est-à-dire de diminuer leur agitation thermique, ce qui revient à diminuer les fluctuations de la vitesse autour de la vitesse moyenne. De tels refroidissements d'atomes ont commencé à être réalisés vers 1985. L'obtention d'atomes ultrafroids met en jeu plusieurs mécanismes de refroidissement, et les recherches se poursuivent pour en découvrir d'autres. Le plus élémentaire d'entre eux est le refroidissement Doppler.

### 7.1. Le refroidissement Doppler

Il est fondé sur l'[effet Doppler](#). Prenons des atomes dont la fréquence lumineuse de résonance (c'est-à-dire la fréquence des photons qu'ils peuvent absorber et émettre) est notée  $\nu_0$ , avec  $\nu_0 = (E_b - E_a)/h$  pour deux niveaux atomiques adéquats (*a*) et (*b*).

Supposons qu'un tel atome soit soumis à un rayonnement de fréquence  $\nu$ . Si l'atome se déplace en venant à la rencontre du faisceau lumineux, la fréquence qu'il « percevra » n'est pas  $\nu$  mais supérieure à  $\nu$ , par effet Doppler. De manière analogue, s'il se déplace dans le même sens que le faisceau, la fréquence mesurée par l'atome sera inférieure à  $\nu$ .

D'où le principe du refroidissement Doppler : on soumet un nuage d'atomes à deux faisceaux laser dirigés en opposition, selon l'axe Oz par exemple, en choisissant leur fréquence lumineuse  $\nu$  légèrement en dessous de la résonance, soit  $\nu < \nu_0$ .



Que se passe-t-il alors ? Les atomes allant vers la droite ( $V_z > 0$ ) se rapprochent de la situation de résonance avec l'onde laser venant de la droite, et s'éloignent encore plus de la résonance avec l'onde venant de la gauche. Résultat : ces atomes vont absorber préférentiellement des photons venant de droite plutôt que de gauche, donc vont être ralentis. Si les atomes vont vers la gauche ( $V_z < 0$ ), les rôles des deux faisceaux sont échangés, et les atomes sont également freinés. En première approximation, la force selon Oz subie par les atomes est, en valeur algébrique, de la forme

$$F_z \approx -\alpha V_z$$

Cette force proportionnelle à la vitesse est analogue à une force de friction. En disposant une paire de faisceaux laser pour chacune des trois directions de l'espace, on obtient ainsi une « mélasse optique » qui ralentit les atomes ; leur agitation thermique, en particulier, diminue, et l'on peut de cette manière atteindre des températures de l'ordre de 100 microkelvins ( $10^{-4}$  K).

## 7.2. Le refroidissement Sisyphé

En fait, les expériences menées en 1987-1988 ont montré que les températures atteintes pouvaient être encore plus basses que la limite théorique du refroidissement Doppler. En cherchant à comprendre pourquoi, les physiciens ont mis en évidence d'autres mécanismes de refroidissement à l'œuvre. Sans entrer dans les détails, il est possible d'en donner une image simple.

Première idée, celle des « déplacements lumineux » : l'expérience comme la théorie montrent que le niveau d'énergie d'un atome soumis à une onde lumineuse dépend de l'intensité, de la polarisation et de la fréquence de l'onde (ces déplacements d'énergie résultent de l'interaction entre le dipôle électrique de l'atome et le champ électromagnétique de l'onde). Dans un champ électromagnétique, l'énergie potentielle (dite dipolaire) de l'atome varie donc selon sa position, en général.

Deuxième idée : le niveau d'énergie fondamental, occupé au départ par un atome, n'est d'ordinaire pas unique, mais est constitué de plusieurs sous-niveaux. En présence d'un champ, ces sous-niveaux ont des énergies légèrement différentes. Par conséquent, le paysage d'énergie potentielle dipolaire dépend du sous-niveau dans lequel se trouve l'atome.

Troisième idée : lorsque la lumière a une fréquence proche de la résonance (fréquence correspondant à une transition vers un niveau supérieur), l'atome peut passer de l'un de ces sous-niveaux à un autre par un cycle absorption-émission d'un photon. C'est ce qu'on appelle le pompage optique, prédit par Alfred Kastler dès 1949.

Ce qui précède peut être mis à profit pour ralentir l'atome dans un piège optique. Dans une mélasse optique, l'énergie potentielle dipolaire a une allure de « tôle ondulée », car les faisceaux laser opposés interfèrent et créent une onde stationnaire. Autrement dit, l'atome voit une succession périodique de creux et de collines d'énergie potentielle dipolaire. Selon où il se trouve et sa vitesse, l'atome va donc accélérer en se dirigeant vers un creux, ou ralentir en gravissant une colline.

Or ce relief de creux et de collines dépend du sous-niveau dans lequel il se trouve. Supposons que l'atome soit dans un sous-niveau donné et qu'il escalade une colline de potentiel. Son énergie cinétique diminue jusqu'à ce qu'il parvienne au sommet de la colline. Supposons qu'à ce moment, un cycle absorption-émission le fasse passer sur un autre sous-niveau, pour lequel le relief d'énergie potentielle est décalé dans l'espace, de telle façon que l'atome se retrouve dans un creux de ce nouveau potentiel (voir l'animation ci-dessous). Résultat : après avoir atteint le sommet d'une colline du premier potentiel, l'atome se voit obligé d'escalader une autre colline, liée au deuxième potentiel. Si le processus se répète, l'atome est ralenti considérablement car il a devant lui à chaque fois une colline à gravir qui lui fait perdre de l'énergie cinétique.

Ce mécanisme de ralentissement ou refroidissement a été dénommé effet Sisyphe, par analogie avec la situation du héros de la mythologie grecque condamné à pousser éternellement un rocher vers le sommet d'une montagne, rocher qui retombe dans la vallée aussitôt le sommet atteint. Le refroidissement Sisyphe s'arrête au moment où l'atome n'a plus assez d'énergie pour escalader la colline suivante. L'atome se retrouve ainsi piégé au bas d'une vallée. L'effet Sisyphe permet d'atteindre des températures environ cent fois plus basses que le refroidissement Doppler : de l'ordre du microkelvin ( $10^{-6}$  K).

### 7.3. Le refroidissement subrecul

Le refroidissement Sisyphe a nécessairement une limite, due au recul subi par un atome qui absorbe ou émet un photon : la température minimale est limitée par l'agitation correspondant à la vitesse de recul. Il existe cependant un moyen de descendre en dessous de cette limite ; c'est le refroidissement dit subrecul, méthode mise au point à partir de 1988 à l'ENS.

Dans cette technique, il ne s'agit pas de contrôler la vitesse des atomes en les faisant absorber ou émettre des photons. Au contraire, il s'agit en quelque sorte de laisser intacts les atomes immobiles. On choisit une fréquence de transition atomique et une configuration de faisceaux laser telles que l'atome cesse d'interagir avec la lumière dès lors que sa vitesse est nulle. Résultat : les atomes immobiles restent immobiles, tandis que d'autres rejoignent cet état en acquérant une vitesse nulle à un instant donné, au hasard de leurs pérégrinations. Le nombre d'atomes immobiles augmente donc petit à petit. En théorie, le refroidissement subrecul permet (après refroidissement préalable par effets Doppler et Sisyphe) d'atteindre une température aussi basse que l'on veut. Mais cela suppose des dispositifs expérimentaux parfaits, ce qui n'est jamais le cas. En pratique, on atteint l'échelle du nanokelvin ( $10^{-9}$  K), soit le milliardième de degré au-dessus du zéro absolu.

[page précédente](#)

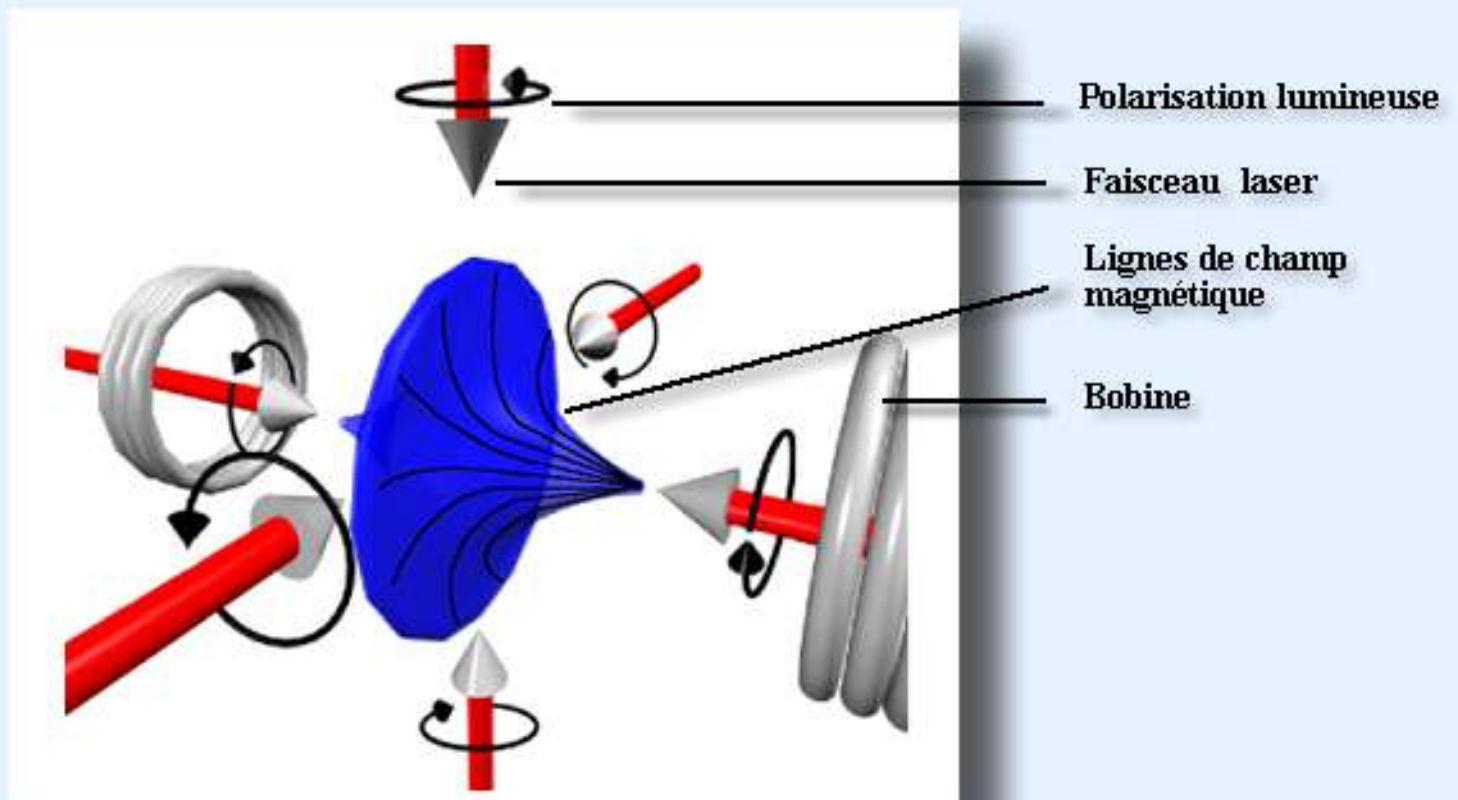
[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

## 8. LE PIÉGEAGE DES ATOMES

La lumière laser permet, on l'a vu, de ralentir et refroidir des atomes. En fait, il faut aussi réussir à garder les atomes froids suffisamment longtemps au même endroit. Or le ralentissement et le refroidissement, à eux seuls, ne remplissent pas cette fonction. En effet, la force de friction subie par un atome dans une mélasse optique n'est qu'une force moyenne ; à cause de ses fluctuations (dues aux absorptions et émissions successives de photons), chaque atome effectue un mouvement erratique et finit par s'échapper de la mélasse optique au bout de quelques secondes, durée souvent trop courte pour beaucoup d'expériences.

Pour allonger le temps de confinement des atomes, il a donc fallu inventer des méthodes de piégeage. Une idée, proposée en 1986 au Laboratoire Kastler Brossel, est d'ajouter à la mélasse optique un champ magnétique inhomogène. Un tel champ a pour effet de déplacer les niveaux d'énergie atomiques et, s'il est bien choisi, permet de modifier l'absorption de photons laser par les atomes en fonction de leur position. Plus précisément, on place de part et d'autre du centre de la mélasse deux bobines, parcourues par des courants électriques de sens opposés :

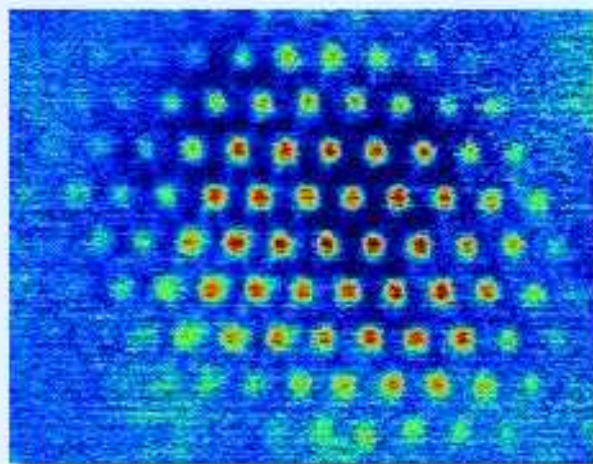


**Principe d'un piège magnéto-optique**

Ces bobines créent un gradient de champ magnétique : le champ est nul au centre de la mélasse, son intensité croît lorsqu'on s'écarte du centre, et les champs en deux points symétriques ont des sens opposés. Pour un atome écarté du centre, un tel champ magnétique fait apparaître un déséquilibre entre les pressions de radiation exercées par les faisceaux laser (ceux-ci étant convenablement polarisés). Il en résulte une force de rappel qui ramène les atomes vers le centre de la mélasse optique. Avec de tels pièges magnéto-optiques, dont le premier a été réalisé en 1987 par une équipe américaine (collaboration MIT-Bell Labs), on arrive à confiner des milliards d'atomes et ce pendant plusieurs minutes.

Une autre méthode de piégeage consiste à utiliser les « déplacements lumineux », c'est-à-dire la modification des niveaux d'énergie atomiques par un champ lumineux (voir le [refroidissement Sisyphé](#) plus haut). Un faisceau laser relativement intense est focalisé au centre de l'enceinte à vide, la fréquence lumineuse étant choisie notablement inférieure à la fréquence de résonance atomique. Les déplacements lumineux produits par le laser forment alors un puits de potentiel pour les atomes refroidis, qui viennent s'accumuler au voisinage du foyer lumineux.

Signalons au passage qu'en combinant plusieurs faisceaux laser de piégeage, on peut obtenir, par interférence, une onde lumineuse stationnaire, ce qui correspond à un champ lumineux périodique dans l'espace. On peut ainsi former un réseau de puits de potentiel régulièrement espacés dans lesquels les atomes viennent se ranger, un peu comme des œufs dans des boîtes à œufs.



**Atomes de césium piégés  
dans un réseau lumineux**

[page précédente](#)

[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

## 9. LES HORLOGES ATOMIQUES

Quand les atomes sont lents, on peut les observer longtemps, ce qui offre la possibilité de mesurer avec grande précision la fréquence correspondant à une transition entre deux niveaux d'énergie atomiques. Les horloges les plus précises à ce jour sont les horloges atomiques, dont le principe utilise une fréquence associée à une transition atomique. On comprend donc que le refroidissement d'atomes soit intéressant pour mettre au point des horloges encore plus performantes. Ainsi, depuis 1998, l'horloge la plus précise au monde est l'horloge à atomes froids du [BNM-LPTF](#) (Bureau national de métrologie, Laboratoire primaire du temps et des fréquences), à l'Observatoire de Paris.

### 9.1. Principe d'une horloge atomique

Les horloges atomiques ont été mises au point dès le milieu des années 1950. Leur précision et leur stabilité sont telles qu'elles constituent aujourd'hui les étalons de temps (ou de fréquence). Depuis la Conférence générale des poids et mesures de 1967, « la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Les deux niveaux en question correspondent aux deux orientations relatives possibles (parallèle ou anti-parallèle) du moment magnétique de l'électron externe et du moment magnétique du noyau.

Comment fonctionne une horloge atomique ? Prenons l'exemple d'une horloge à césium. Un jet d'atomes de césium est produit par un four ; les atomes passent par un dispositif approprié (champ magnétique, par exemple) qui sélectionne les atomes se trouvant dans le premier niveau hyperfin. Ces atomes traversent ensuite une cavité dans laquelle règne un champ micro-onde de fréquence ajustable, fourni par un oscillateur électronique. Notons (*a*) le premier niveau hyperfin, et (*b*) le deuxième. Si la fréquence  $\nu$  du champ est voisine de la fréquence  $\nu_0 = (E_b - E_a)/h$  correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins, des atomes absorbent un photon et passent dans le niveau supérieur (*b*). À la sortie de la cavité, un second tri permet de détecter les atomes ayant subi la transition (l'émission spontanée à partir du niveau (*b*) est totalement négligeable dans ce domaine de fréquence). Un système d'asservissement ajuste la fréquence  $\nu$  du champ de façon que le nombre d'atomes ainsi recueillis soit maximal : la fréquence  $\nu$  est alors égale à  $\nu_0$ . Des moyens électroniques permettent ensuite de diviser la fréquence de l'oscillateur et, au bout du compte, de fournir un top toutes les secondes — avec une exactitude relative d'environ  $10^{-14}$ , c'est-à-dire qu'au bout de 3 millions d'années, l'erreur accumulée par l'horloge serait inférieure à une seconde...



**PHARAO: L'horloge à atomes froids pour expériences en micro-gravité**

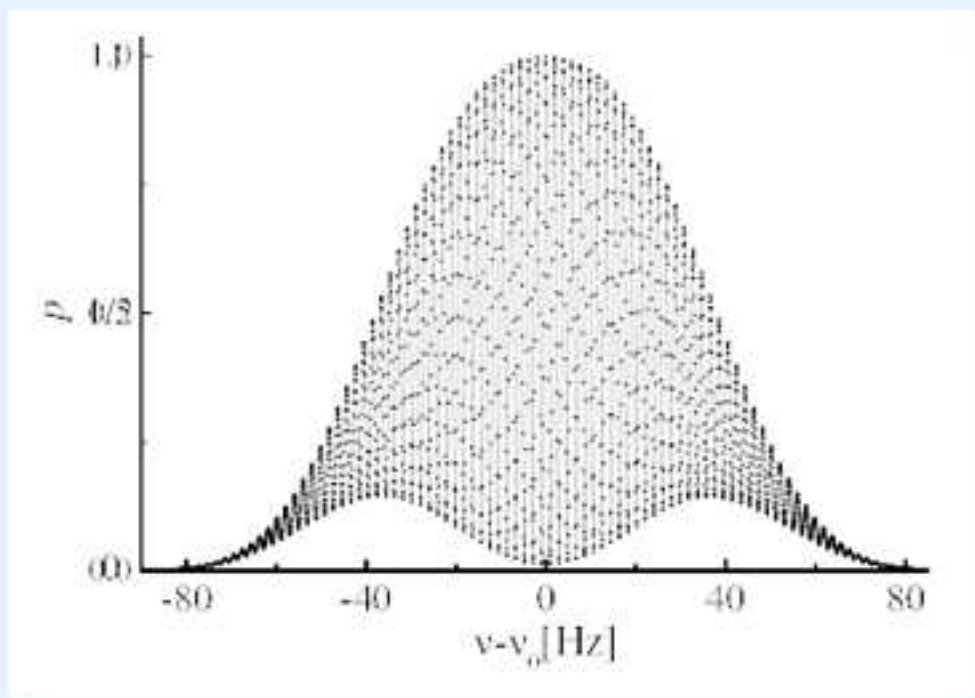
## 9.2. La méthode des franges de Ramsey

On peut démontrer que la raie de résonance, c'est-à-dire le pic de la courbe représentant le nombre d'atomes ayant subi la transition en fonction de la fréquence  $\nu$ , est de largeur inversement proportionnelle au temps passé par les atomes dans la cavité de l'horloge. Cette largeur de raie est un paramètre crucial pour l'horloge atomique. Pour avoir une raie de résonance très étroite, et donc une détermination très précise de  $\nu_0$ , on pourrait songer à allonger la cavité. Mais il est très difficile de réaliser une longue cavité, par exemple de un mètre, de qualité suffisante.

En 1949, le physicien américain Norman F. Ramsey a inventé une méthode performante pour obtenir une raie de résonance très étroite, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1989. Il a découvert que plutôt que de faire passer les atomes dans une longue cavité, il revient au même de leur faire traverser deux cavités espacées d'une certaine distance ; ce qui importe alors est le temps de vol entre les deux cavités. Dans une telle situation, le nombre d'atomes détectés oscille (d'où le terme de « franges de Ramsey ») lorsque la fréquence  $\nu$  de l'oscillateur balaye le voisinage de la fréquence de résonance  $\nu_0$ , la largeur de chaque frange étant inversement proportionnelle au temps de vol entre les deux cavités.

En espaçant donc suffisamment les deux cavités, on a un moyen de cerner  $\nu_0$  avec une grande précision. Avec deux cavités micro-onde espacées de un mètre et un jet atomique de vitesse 300 m/s, la largeur du pic de résonance est ainsi de l'ordre de 100 Hz.



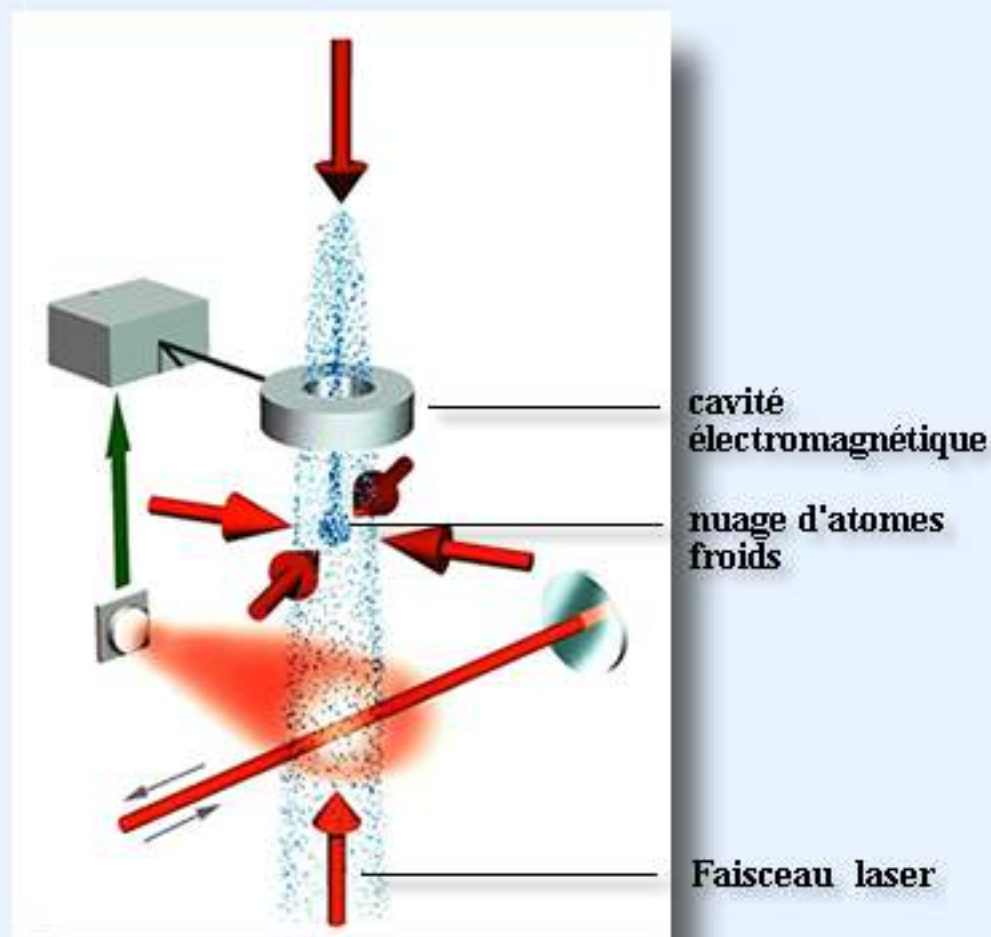


**Franges de Ramsey**

### 9.3. La fontaine atomique

La largeur du pic de résonance pourrait être réduite en allongeant la distance entre les deux cavités dans la méthode des franges de Ramsey. Mais cela donnerait des dispositifs encore plus encombrants.

Une manière astucieuse d'allonger le temps de vol des atomes entre les deux passages par une cavité micro-onde est le dispositif appelé fontaine atomique. L'idée a été proposée dès 1954 (par l'Américain J. R. Zacharias), mais elle n'a pu être réalisée qu'en 1989, grâce aux atomes froids. Une fontaine atomique consiste tout d'abord à piéger et refroidir un nuage d'atomes au moyen d'une mélasse optique, ou d'un piège magnéto-optique. Ensuite, en modifiant légèrement la fréquence des deux lasers verticaux, on propulse le nuage atomique vers le haut avec une vitesse initiale de 3 à 5 m/s environ. Les atomes passent dans une cavité micro-onde, poursuivent leur mouvement en ralentissant sous l'effet de la pesanteur, rebroussement chemin et, en retombant, traversent une deuxième fois la cavité. Il faut ici des atomes refroidis à quelques microkelvins (soit une dispersion statistique des vitesses de l'ordre du cm/s), de façon que le nuage d'atomes ne s'éparpille pas trop vite sous l'effet de l'agitation thermique.



**Principe d'une fontaine atomique**

Avec une fontaine haute de un mètre, le temps qui sépare les deux passages par la cavité est de l'ordre de la seconde, ce qui est cent fois plus qu'avec un jet atomique conventionnel. C'est pourquoi plusieurs dizaines de laboratoires de métrologie dans le monde développent des horloges atomiques à fontaine. L'ENS a ainsi collaboré depuis 1989 avec le BNM-LPTF, à l'Observatoire de Paris, pour développer ces horloges à fontaine atomique. Celle du BNM-LPTF, mise au point dès 1994, utilise des atomes de césium et son exactitude relative est aujourd'hui de  $1,4 \times 10^{-15}$  (erreur d'environ une seconde tous les vingt millions d'années !).

#### 9.4. Des horloges à atomes froids dans l'espace

Dans une fontaine atomique, le temps qui sépare les deux interactions avec la cavité micro-onde est limité par l'accélération de la pesanteur. D'où l'idée de faire fonctionner des horloges à atomes froids en situation de microgravité, à bord de satellites en particulier. Des expériences de refroidissement ont été conduites en 1992 par les physiciens de l'ENS en collaboration avec le CNES (Centre national d'études spatiales), lors d'une série de vols paraboliques en Caravelle permettant d'obtenir des séquences d'une vingtaine de secondes en gravité réduite. Une deuxième campagne, menée par l'ENS, le BNM-LPTF et le Laboratoire de l'horloge atomique du CNRS, a eu lieu en 1997 avec l'Airbus zéro G du CNES ; cette deuxième série d'essais a consisté à faire fonctionner un prototype complet d'horloge à atomes froids en apesanteur. Cette démonstration représente un pas important vers la réalisation d'horloges à atomes froids embarquées sur satellite, qui seraient dix fois plus précises que les meilleures horloges terrestres. C'est l'objet du projet PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite), soutenu par le CNES, et qui a été sélectionné par l'ESA (Agence spatiale européenne) pour voler sur la station spatiale internationale fin 2004.



**Vol parabolique au CNES**

## 9.5. Les applications des horloges atomiques

Les horloges atomiques servent tout d'abord à établir une échelle de temps mondiale, le « temps atomique international » (TAI). Pour cela, on centralise au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, en France, les données fournies par près de deux cents horloges atomiques de par le monde. C'est leur moyenne pondérée qui constitue le TAI ; chaque laboratoire reçoit alors l'écart mesuré entre le temps indiqué par son horloge et le TAI, ce qui permet d'effectuer des corrections.

Les systèmes de navigation tels que le GPS (Global Positioning System) américain ou le GLONASS (Global Navigation Satellite System) russe font également appel à des horloges atomiques. Le GPS, par exemple, utilise un réseau de satellites et permet à un navigateur ou à un randonneur de déterminer sa position à quelques dizaines de mètres près. Chaque satellite envoie des signaux radio contenant des informations sur sa position et l'instant d'émission, données fournies de façon très précise grâce à l'horloge atomique embarquée. Le calcul de la position du récepteur peut alors s'effectuer par triangulation en déterminant les distances séparant le récepteur de trois au moins des satellites (la distance est le produit de la vitesse de la lumière par le temps mis par les signaux pour parvenir au navigateur).

Citons pour finir trois autres applications des horloges atomiques : la synchronisation des réseaux de télécommunications à haut débit (à l'échelle de 10 gigabits par seconde), la télécommande de sondes spatiales lointaines, et les tests expérimentaux de la théorie de la relativité restreinte ou générale d'Einstein.

[page précédente](#)

[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

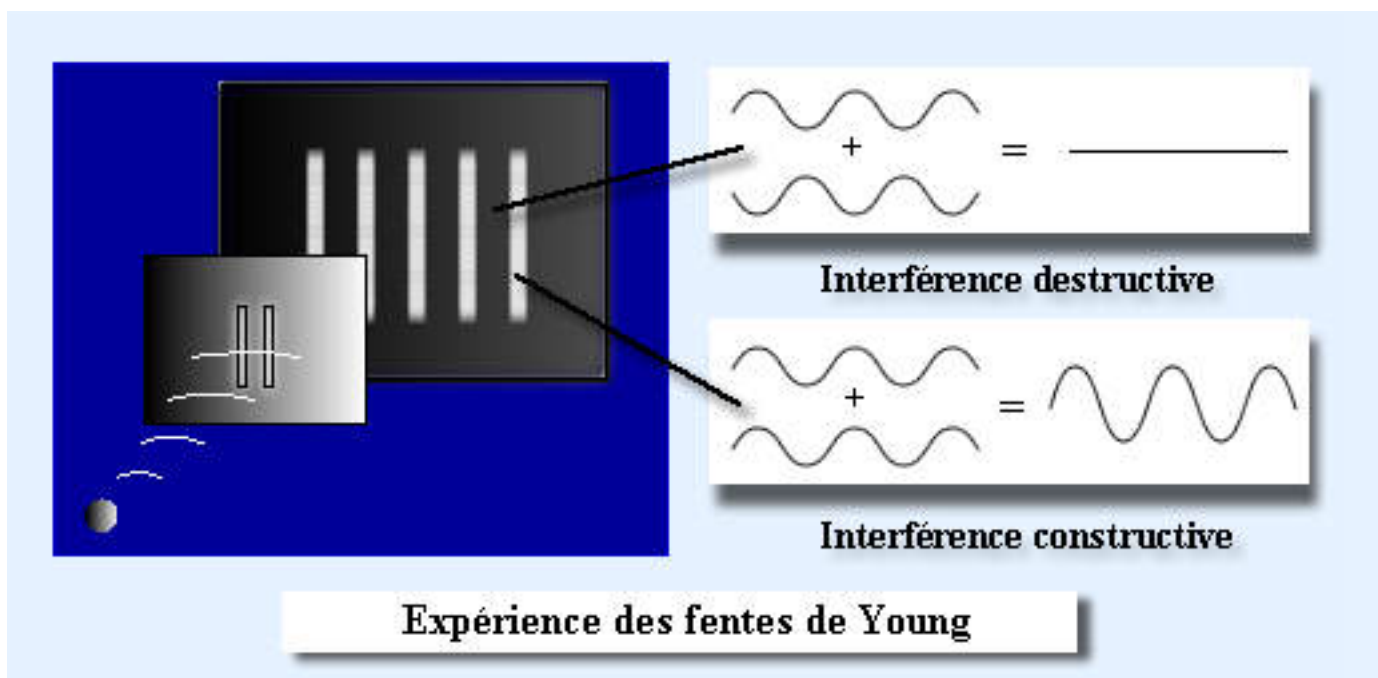
## 10. LES INTERFÉRENCES ATOMIQUES

### 10.1. La longueur d'onde de Louis de Broglie

En 1923, le physicien français Louis de Broglie, l'un des pionniers de la mécanique quantique, a formulé l'hypothèse suivante : à toute particule animée d'une quantité de mouvement  $p$  est associée une longueur d'onde  $\lambda = h/p$ , où  $h$  est la constante de Planck. Autrement dit, tout corpuscule matériel possède des propriétés ondulatoires caractérisées par une longueur d'onde  $\lambda$  inversement proportionnelle à sa masse  $M$  et à sa vitesse  $V$  (car  $p = MV$  pour les vitesses  $V$  petites par rapport à la vitesse de la lumière). Cette hypothèse généralisait aux particules dotées d'une masse la « dualité onde-corpuscule » que l'on constatait pour les [photons](#), ceux-ci étant caractérisés à la fois par une longueur d'onde et par des valeurs bien déterminées de la quantité de mouvement et de l'énergie.

### 10.2. L'interférence, phénomène ondulatoire par excellence

Qui dit onde dit aussi phénomènes d'interférence, puisqu'en superposant deux ondes identiques mais déphasées, on peut obtenir un renforcement de l'amplitude totale ou au contraire sa diminution, voire son annulation, suivant la valeur du déphasage. Considérons par exemple la célèbre expérience dite des fentes de Young : une source lumineuse monochromatique, c'est-à-dire émettant à une fréquence bien définie, éclaire une plaque percée de deux fentes parallèles. L'onde initiale, en passant par les fentes, se dédouble en deux ondes. Un écran de détection placé plus loin enregistre l'intensité lumineuse : le résultat est une alternance de bandes sombres et brillantes. Ces « franges d'interférence » résultent de la superposition des deux ondes provenant des fentes, ondes qui ne suivent pas le même chemin pour arriver à un même point de l'écran et sont donc généralement déphasées : la variation du déphasage d'un point à l'autre sur l'écran se traduit alors par une variation spatiale de l'intensité enregistrée.



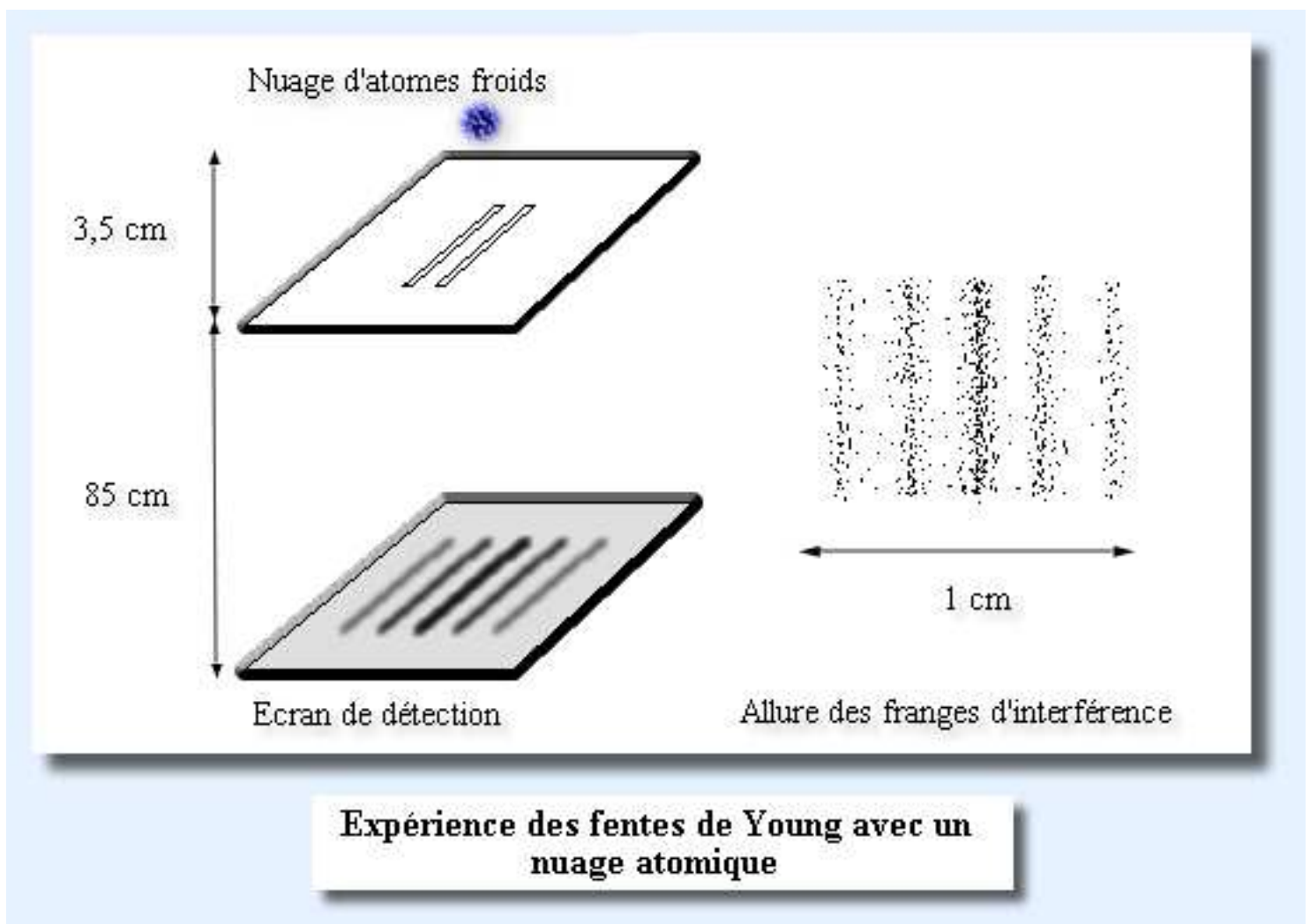
Les phénomènes d'interférence sont l'une des principales manifestations des propriétés ondulatoires. Il en est de même des phénomènes de diffraction, qui peuvent d'ailleurs être considérés comme le résultat d'un grand nombre d'interférences. C'est la diffraction des électrons par un cristal qui a permis, en 1927, de confirmer l'hypothèse de De Broglie pour ce qui concerne les électrons (expérience de Davisson-Germer). Depuis, les interférences d'ondes de matière ont été observées pour d'autres types de particules (neutrons lents en particulier). Mais pour les atomes à température ambiante, c'est plus difficile. Les longueurs d'onde correspondantes sont très faibles : par exemple, la longueur d'onde d'un atome d'hélium se déplaçant à une vitesse de l'ordre de 1 000 m/s (typique pour un gaz à température ambiante) vaut environ 0,1 nanomètre ( $10^{-10}$  m). Et plus l'atome est lourd, plus la longueur d'onde est petite. Or l'espacement des franges d'interférences est proportionnel à la longueur d'onde, d'où la difficulté d'observer des interférences avec des atomes : l'interfrange est en général trop petit.

### 10.3. Des interférences atomiques grâce aux microstructures diffractives et aux techniques de manipulation par laser

Pourtant, dès le début des années 1990, les physiciens sont parvenus à réaliser et mesurer des interférences avec des atomes, à l'instar des interférences lumineuses depuis longtemps familières. Et ce grâce à deux techniques, que l'on peut d'ailleurs panacher. L'une consiste à agir sur un jet d'atomes en le faisant passer par des structures diffractives (un réseau de minuscules fentes par exemple). Avec les progrès des techniques de microfabrication, on sait aujourd'hui obtenir des structures régulières dont la périodicité spatiale descend jusqu'à quelques dizaines de nanomètres ; à cette échelle, qui s'approche de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde atomiques, les effets ondulatoires deviennent mesurables. Ainsi, avec des structures diffractives, on peut faire avec les atomes des expériences du type des franges de Young : dédoubler une onde atomique, faire suivre à chacune des deux ondes résultantes un trajet différent, et enregistrer le résultat de leur superposition sur un écran de détection.

Deuxième technique permettant de réaliser des interférences atomiques : les interactions avec la lumière laser. Une interaction appropriée avec un photon peut par exemple faire passer un atome de son état quantique initial à une superposition de deux états quantiques différents, ce qui signifie que l'onde atomique initiale se voit dédoublée en deux ondes de caractéristiques différentes. Une interaction ultérieure avec la lumière peut faire l'inverse, c'est-à-dire recombinaison des deux ondes ; on obtient alors des interférences.

Comme on l'a vu, les techniques laser permettent aussi de ralentir et refroidir des atomes. Or quand la vitesse d'un atome diminue, sa longueur d'onde augmente. Et plus celle-ci est grande, plus les effets ondulatoires sont faciles à mettre en évidence. Par exemple, une expérience d'interférences atomiques réalisée par une équipe japonaise en 1992 a consisté à immobiliser et refroidir avec une mélasse optique une assemblée d'atomes de néon, puis à laisser tomber en chute libre ce nuage d'atomes au-dessus d'une plaque percée de deux fentes microscopiques. Comme avec les ondes lumineuses, chaque onde atomique se dédouble à son passage par les deux fentes, et la superposition de ces deux ondes produit des franges d'interférence sur un écran de détection placé un peu plus bas. La vitesse des atomes à ce niveau est de l'ordre de 2 m/s seulement, d'où une longueur d'onde de De Broglie valant environ 15 nanomètres ; avec une distance fentes-écran égale à 85 cm et des fentes écartées de 6 microns, l'interfrange vaut environ 2 mm, ce qui est aisément observable.



*Expérience d'interférences atomiques réalisée en 1992 par une équipe japonaise de l'université de Tokyo:*

*Les atomes, immobilisés et refroidis, sont lâchés au-dessus des fentes ; ils tombent jusqu'à l'écran de détection, où chaque point noir correspond à l'impact d'un atome. La densité des impacts dessine une alternance de bandes sombres et claires : les franges d'interférence. La densité en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'a un atome de se retrouver en ce point. Cette probabilité est elle-même proportionnelle au module carré  $|A_1 + A_2|^2$  de la somme des amplitudes  $A_1$  et  $A_2$  des deux ondes atomiques évaluées en ce point.*

#### 10.4. Des interférences atomiques, pour quoi faire ?

Dans un interféromètre lumineux, les ondes voyagent... à la vitesse de la lumière, c'est-à-dire très vite ! Avec des atomes, c'est différent : les ondes atomiques, beaucoup plus lentes, passent un temps relativement long dans l'interféromètre. Il s'ensuit une grande sensibilité des dispositifs à interférences atomiques, sensibilité vis-à-vis des éventuelles interactions auxquelles les atomes sont soumis. Cette sensibilité peut être mise à profit pour des mesures très précises, par exemple de l'accélération de la pesanteur (applications possibles à la prospection minière ou pétrolière...), de la masse d'un atome (pour des tests de certaines lois fondamentales de la physique), de la rotation subie par l'interféromètre (qui devient alors un gyromètre), etc. Autre avantage des ondes atomiques, par rapport aux ondes lumineuses : on peut accéder à une gamme de longueurs d'onde plus étendue, allant *grosso modo* du micron au nanomètre, alors que les longueurs d'onde lumineuses tournent seulement autour du micron. Par ailleurs, les interférences atomiques sont exploitées pour faire de l'holographie avec des atomes. Par exemple, en constituant une figure d'interférence, on fabrique du même coup une microstructure, ce qui ouvre la voie à des techniques microlithographiques encore plus fines que celles existant actuellement (pour les besoins de la microélectronique en particulier).

[page précédente](#)[Pour en savoir plus](#)[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

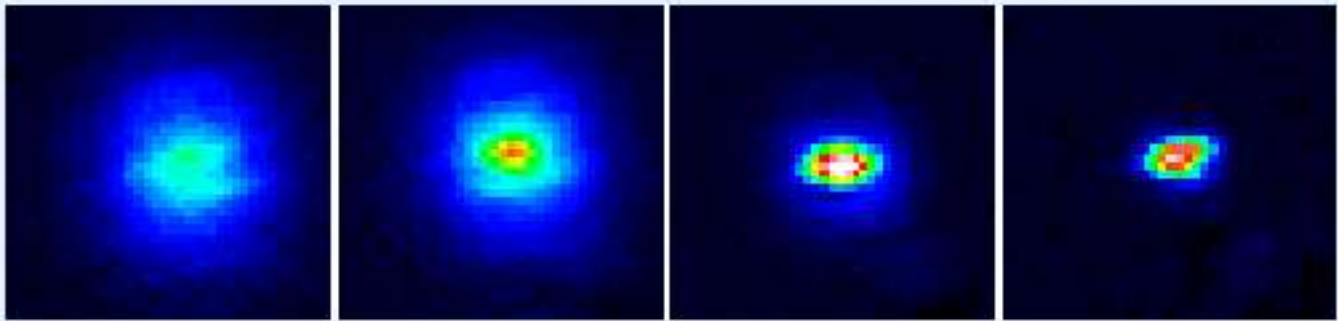


## 11. LA CONDENSATION DE BOSE-EINSTEIN

Vers 1925, Albert Einstein, en approfondissant une idée du physicien indien Satyendranath Bose, avait prédit que dans un gaz d'atomes identiques et sans interactions mutuelles, un étonnant phénomène devait se produire à basse température si la densité est suffisamment grande. D'après Einstein, si la longueur d'onde de De Broglie des atomes devenait du même ordre que les distances interatomiques (cette longueur d'onde est généralement beaucoup plus petite), alors une fraction importante des atomes devrait s'accumuler dans l'état fondamental de l'enceinte qui contient les atomes, c'est-à-dire dans le même état quantique d'énergie minimale. Cette « condensation » ne concerne pas n'importe quelles particules, mais uniquement les bosons, c'est-à-dire les particules dont le spin — le moment cinétique intrinsèque — est un multiple entier de la constante de Planck réduite  $h/(2\pi)$ . Les autres particules, les fermions, dont le spin est demi-entier, ne peuvent subir la « condensation de Bose-Einstein » : un principe fondamental de la physique quantique, le « principe d'exclusion de Pauli », interdit à deux fermions identiques d'occuper le même état.

L'idée de la condensation de Bose-Einstein resta longtemps dans les tiroirs. La prédiction d'Einstein ne fut reconsidérée que vers 1937, avec la découverte de la superfluidité de l'hélium à très basse température. Fritz London proposa l'existence d'un lien entre ce phénomène et la condensation de Bose-Einstein, ce qui est le point de départ des théories actuelles sur la superfluidité. Mais il y a des différences importantes. Ainsi, dans le cas de l'hélium superfluide, la proportion d'atomes condensés dans l'état fondamental est faible (de l'ordre de 10 % au plus, même à une température arbitrairement basse), en raison des interactions entre les atomes qui jouent ici un rôle essentiel. Une situation à certains égards plus proche d'un condensat de Bose-Einstein est celle de la lumière laser : dans un faisceau laser, tous les photons se trouvent dans le même état quantique (même énergie, même direction, même fréquence, même phase, etc.), et c'est ce qui confère à la lumière laser ses propriétés si particulières.

Le sujet a connu un regain d'intérêt avec l'avènement des techniques de piégeage et de refroidissement d'atomes par laser. Grâce aux très basses températures (et donc aux grandes longueurs d'onde de De Broglie) atteintes, les chercheurs avaient bon espoir d'obtenir enfin la condensation de Bose-Einstein; cela pour des densités suffisamment basses pour que les interactions mutuelles entre atomes ne masquent pas l'effet de condensation. Effectivement, en 1995, une équipe américaine du Colorado, dirigée par Eric Cornell et Carl Wieman, est parvenue à obtenir pendant quelques secondes un condensat de Bose-Einstein ; il était constitué de quelques milliers d'atomes de rubidium prérefroidis par laser, puis refroidis plus avant par « évaporation » dans un piège magnétique.



**Formation d'un condensat de Bose-Einstein d'atomes de rubidium**  
(photos d'une expérience réalisée au laboratoire Kastler-Brossel)

Des expériences du même type ont été réalisées depuis par de nombreuses équipes de physiciens, et la condensation de Bose-Einstein a été également observée avec des atomes de sodium (équipe du MIT), de lithium (équipe de Houston), d'hydrogène (équipe du MIT). Ce nouvel état de la matière que représentent les condensats atomiques offre plusieurs voies à explorer. L'une d'elles est évidemment l'étude des propriétés physiques (par exemple l'équivalent de la superfluidité observée dans l'hélium liquide) des condensats. Une autre est la réalisation de lasers à atomes, c'est-à-dire d'instruments capables de délivrer un faisceau d'atomes se trouvant tous dans le même état, à l'instar des photons d'un rayon laser. Cela rendrait de grands services à l'optique et l'interférométrie atomiques, à la chimie (étude de réactions entre deux faisceaux atomiques dans des conditions très bien définies et contrôlées, condensats de molécules, etc.). Plusieurs équipes de physiciens sont parvenues, dès 1997, à produire un effet laser avec des atomes, le principe étant de former d'abord un condensat puis d'extraire par un moyen adéquat une partie des atomes condensés. Mais beaucoup de chemin reste à parcourir avant d'arriver à des flux atomiques d'intensité et de durée appréciables...

[page précédente](#)

[Pour en savoir plus](#)

[page suivante](#)

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

## 12. POUR EN SAVOIR UN PEU OU BEAUCOUP PLUS

(\* : public large ; \*\* : étudiants en premier ou deuxième cycles ; \*\*\* : étudiants en troisième cycle et spécialistes)

### Des articles de vulgarisation :

\* « Des atomes tout près du zéro absolu », par Claude Cohen-Tannoudji, *Science & Vie Hors-Série* n° 192, septembre 1995, pp. 126-134.

\* « Le refroidissement des atomes par laser » par Alain Aspect et Jean Dalibard, *La Recherche*, janvier 1994, pp. 30-37.

\* « La condensation de Bose-Einstein » par Eric Cornell et Carl Wieman, *Pour la Science*, mai 1998, pp. 92-97.

\* « Les atomes piégés par le froid » par Jean Dalibard, *Science & Vie Hors-Série* n° 161, décembre 1987, pp. 80-87.

\* « Une fontaine atomique » par Maurice Mashaal, *La Recherche*, février 1990, pp. 238-239.

\* « L'optique atomique » par Olivier Carnal et Jürgen Mlynek, *La Recherche*, octobre 1992, pp. 1134-1142.

\* « Immobiliser les atomes à coup de lumière laser » par Jean Dalibard, *La Recherche*, juillet-août 1985, pp. 934-935.

### Des articles de synthèse spécialisés :

\*\* « Atomes refroidis par laser : vers le microkelvin », par Alain Aspect et Christophe Salomon, dans *Images de la physique 1990* (édité par le CNRS), pp. 74-80.

\*\*\* « Le refroidissement laser subrecul : fonctions d'onde stochastiques et vols de Lévy », par François Bardou et Yvan Castin, dans *Images de la physique 1998* (édité par le CNRS), pp. 7-14.

\*\* « Refroidissement d'atomes par laser et optique atomique », par Yvan Castin, dans *Les lasers et leurs applications scientifiques et médicales* (éds. C. Fabre et J. P. Pocholle), Les Éditions de Physique, 1996.

\*\*\* « Atomic motion in laser light », par Claude Cohen-Tannoudji, dans *Systèmes fondamentaux en optique quantique*, Ecole d'été Les Houches, session LIII, 1990 (éds. J. Dalibard *et al.*), Elsevier, 1992.

\*\* «Atom lasers» par K. Helmerson, D. Hutchinson, K. Burnett and W. D. Phillips, *Physics World*, Août 1999, p. 31.

\*\* «Bose condensates make quantum leaps and bounds» par Y. Castin, R. Dum and A. Sinatra, *Physics World*, Août 1999, p. 37.

### Des livres :

\* R. Feynman, *Lumière et matière*, InterÉditions/Seuil, 1987.

\*\* C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, *Mécanique quantique*, Hermann, 1977.

\*\*\* C. Cohen-Tannoudji, J. Dupont-Roc et G. Grynberg, *Photons et atomes*, InterÉditions, 1987.

\*\* W. T. Silfvast, *Laser fundamentals*, Cambridge University Press, 1996.

### Des sites Internet :

- [Equipe "atomes ultrafroids" - Laboratoire Kastler Brossel](#)
- [Laboratoire Kastler Brossel](#)
- [Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences](#)
- [Physics 2000](#) (Université du Colorado)
- [Centre National d'Etudes Spatiales](#)
- [The Bose-Einstein Condensation \(BEC\) Homepage at Georgia Southern University \(GSU\)](#)

**retour au sommaire**

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.

## Conception et rédaction

Avec le soutien financier du [CNRS](#) et du [Ministère de l'Education Nationale](#).

### Laboratoire Kastler Brossel

<http://www.lkb.ens.fr/>

Claude COHEN-TANNOUJJI

Jean DALIBARD

Pierre DESBIOLLES

Michèle LEDUC

Christophe SALOMON

### Rédaction

Maurice MASHAAL

[mashaal@club-internet.fr](mailto:mashaal@club-internet.fr)

### Conception WEB

Pascal LABROUILLERE.

Network-Error Production.

[contact@network-error.com](mailto:contact@network-error.com)

**retour au sommaire**

©Laboratoire Kastler Brossel - 1999.