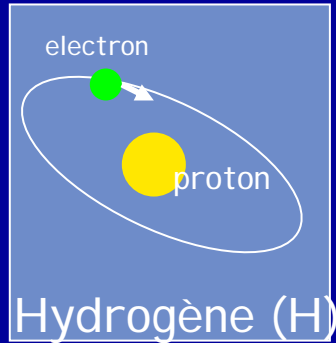
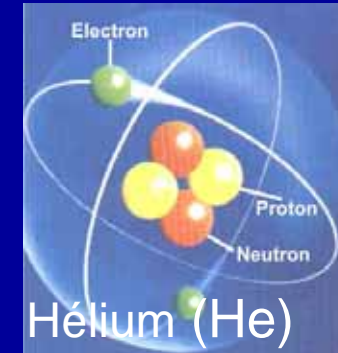


Atome et lumière

Le monde qui nous entoure est peuplé d'atomes....



Les deux atomes les plus abondants dans l'Univers



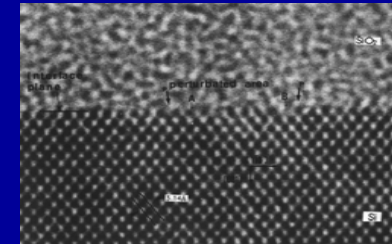
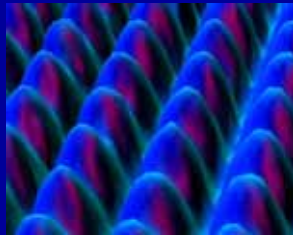
...et l'essentiel de l'information que nous en recevons vient de la lumière...



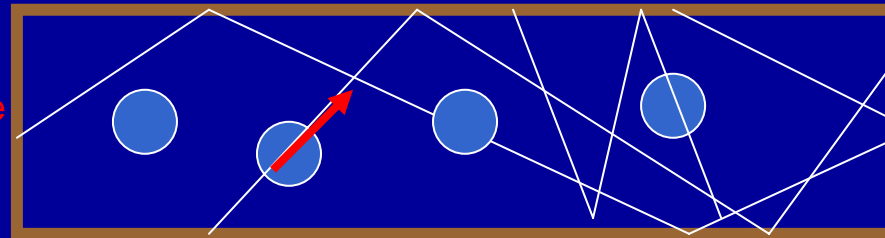
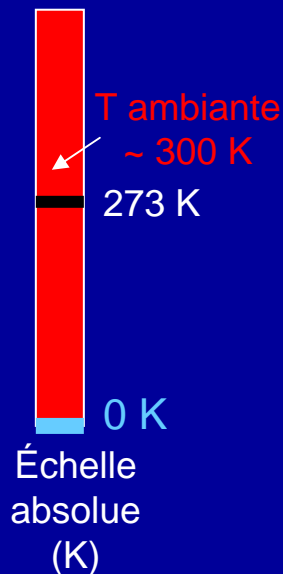
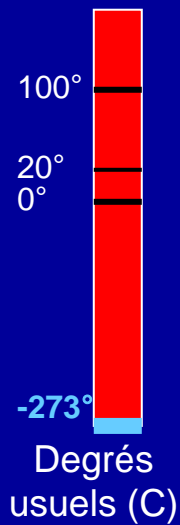
Comprendre l'interaction entre atome et lumière et l'exploiter pour des applications technologiques est un des aspects essentiels de la physique quantique

Les atomes (ou les molécules qu'ils forment en se liant) sont les «grains» dont est faite la matière

Ces «grains» sont organisés en cristaux ordonnés ou en ensemble amorphes désordonnés dans la matière solide...



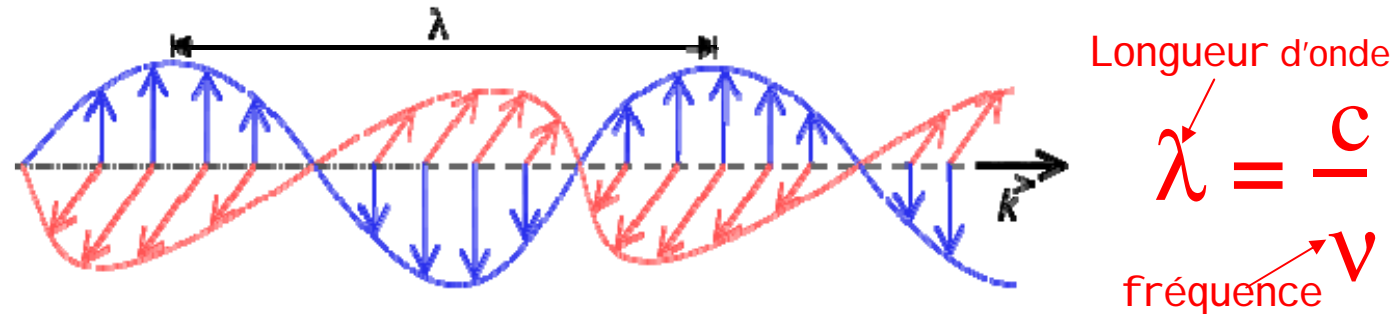
..ou se déplacent aléatoirement dans les liquides ou les gaz...



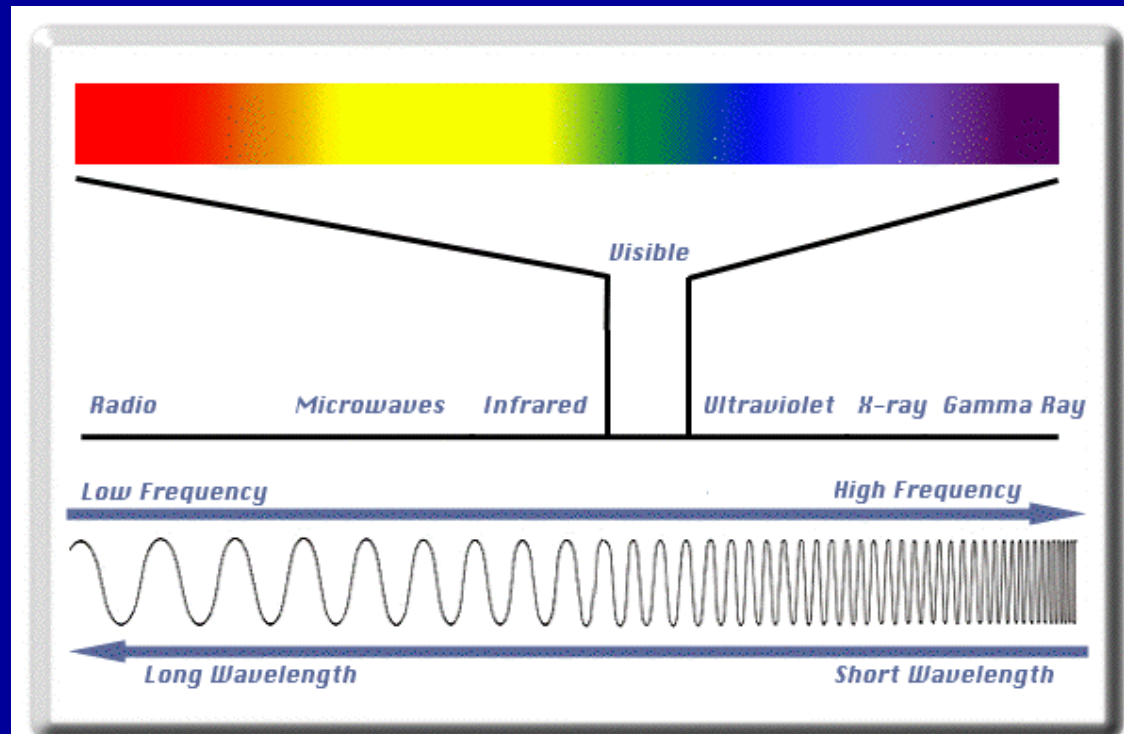
La température «mesure» le degré d'agitation (l'énergie cinétique) des atomes. Plus elle est élevée, plus les atomes vibrent (solides) ou se déplacent rapidement (liquides et gaz)

La lumière est une onde électromagnétique

Un champ électrique et un champ magnétique combinés qui se propagent en oscillant à $c = 300.000 \text{ km/s}$ (1 milliard de km/h!)



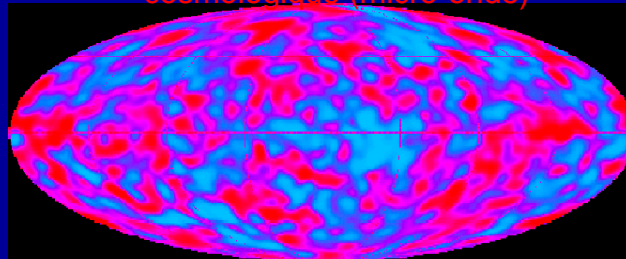
La longueur d'onde λ (distance entre deux crêtes successives du champ) détermine la « couleur » de la lumière... Seule une étroite fenêtre de longueur d'onde (autour de 0,5 microns) est visible



Ces ondes emplissent l'espace qui nous entoure

Ondes radiofréquences, micro-ondes, rayonnement infrarouge naturel ou artificiel détecté par des antennes radio ou télé, téléphones portables, radiotélescopes...

Carte du rayonnement cosmologique (micro-onde)



Rayonnement thermique
Infrarouge

Lumière visible détectée par l'œil qui rend le monde perceptible

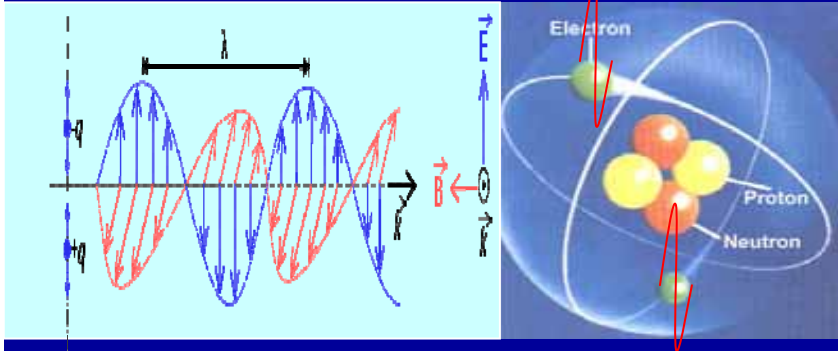


Lumière et
chaleur!

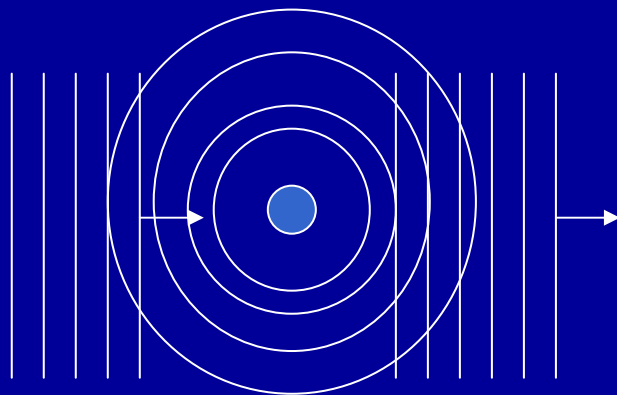


Rayonnement cosmique ultraviolet, X et gamma

L'interaction atome-lumière

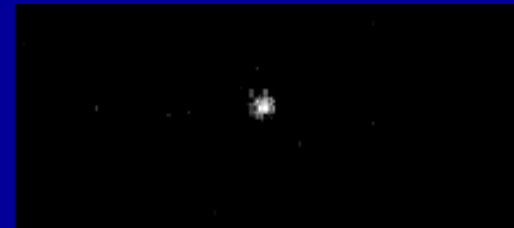


Le champ électrique arrivant sur un atome met en vibration ses électrons, l'atome se comportant comme une antenne microscopique.



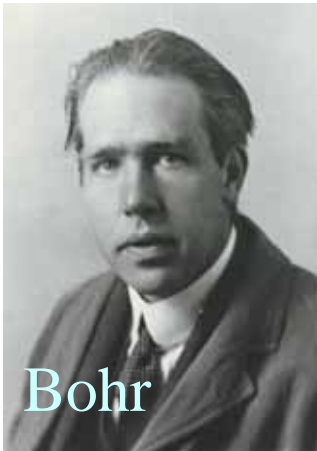
Les électrons perturbés rayonnent un champ diffusé à la même fréquence qui s'ajoute au champ incident. L'atome modifie ainsi le rayonnement reçu et c'est cette modification qui fait que l'on voit l'atome (ou l'objet constitué d'atomes).

4 atomes dans un piège



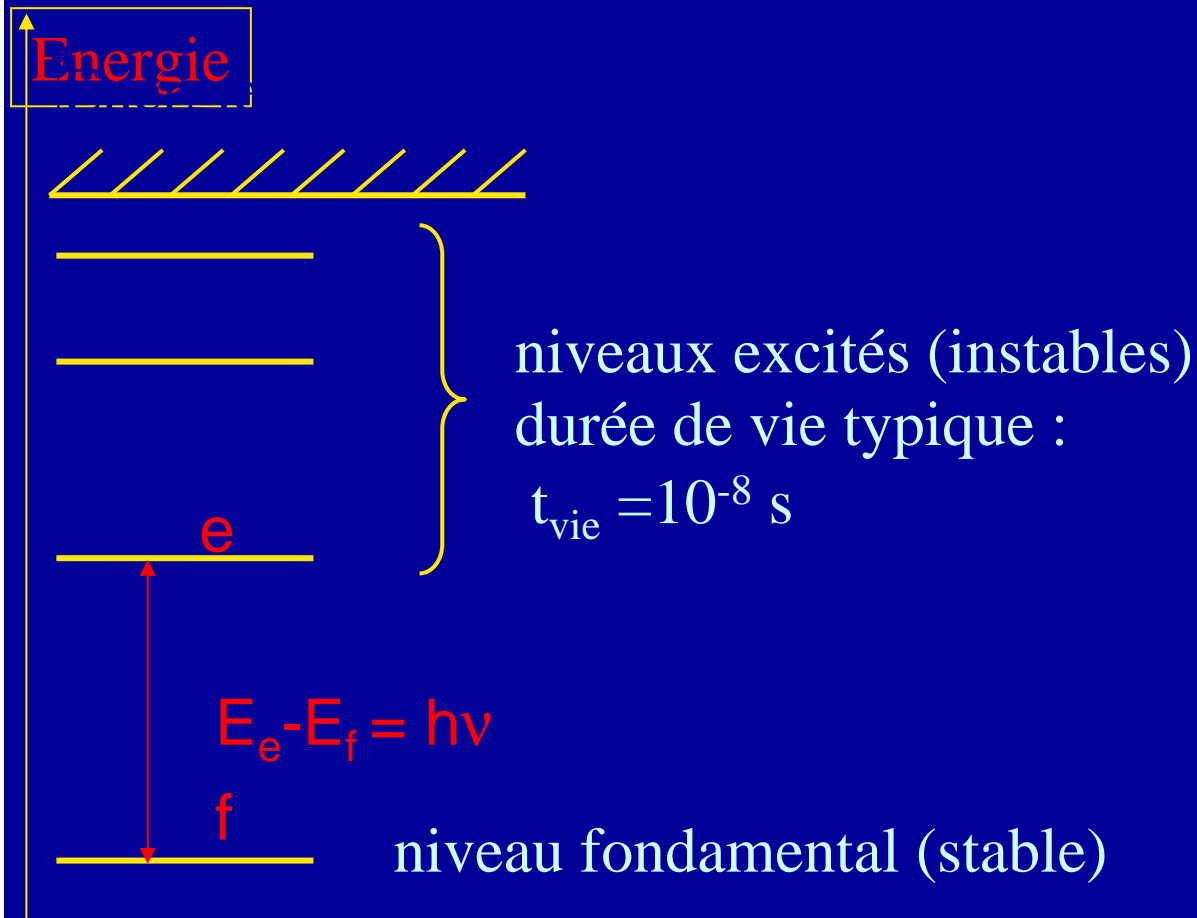
Un seul atome piégé diffusant la lumière d'un laser

Interaction gouvernée par les lois quantiques



Les niveaux d'énergie d'un atome et la résonance optique

Un atome donné (hydrogène, hélium, etc.) peut exister dans différents niveaux d'énergie



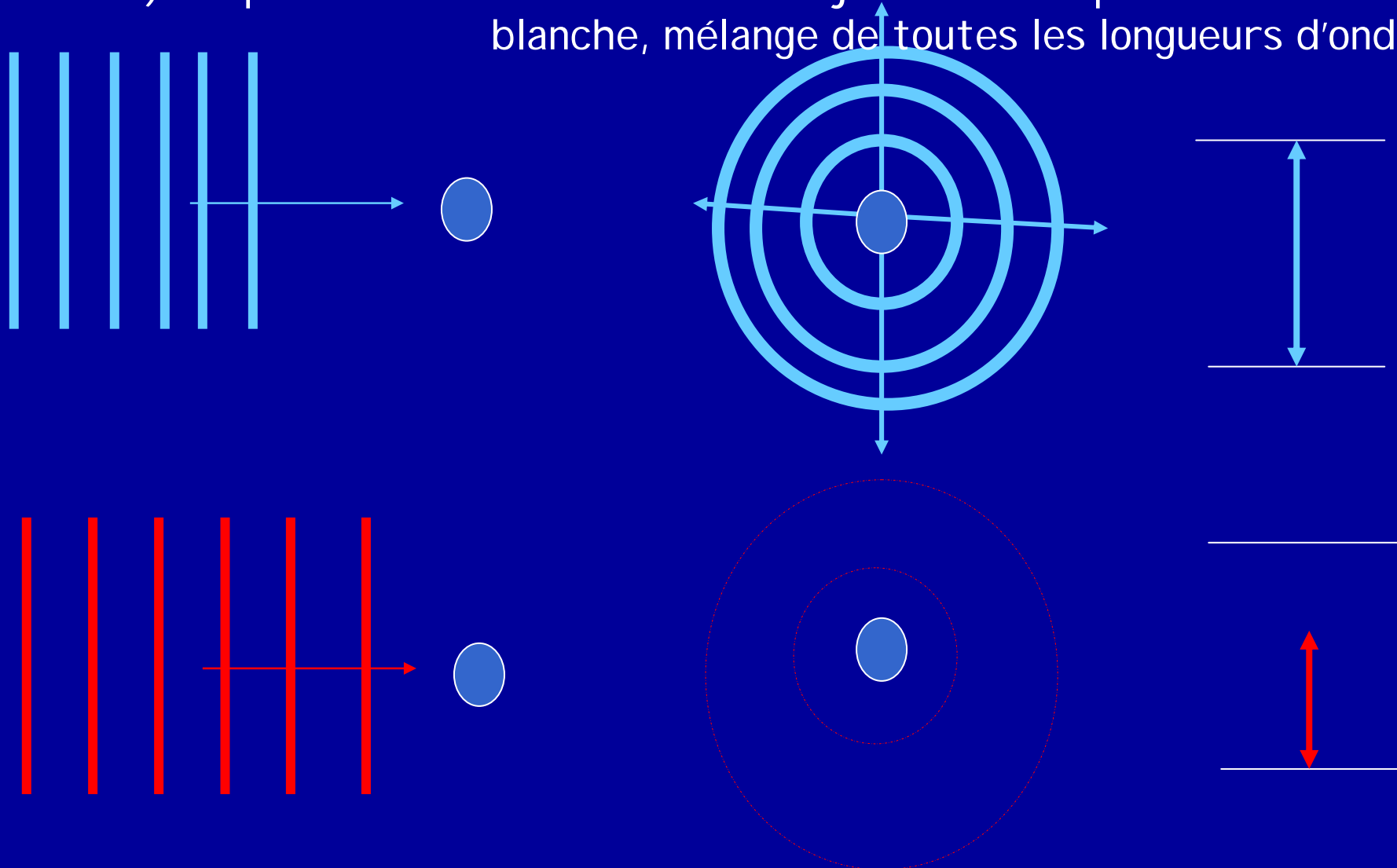
Un champ incident de fréquence ν met les électrons atomiques en vibration à cette fréquence, avec une amplitude maximale (résonance) lorsque ν satisfait la condition:

$$E_e - E_f = h\nu$$

(h: constante de Planck)

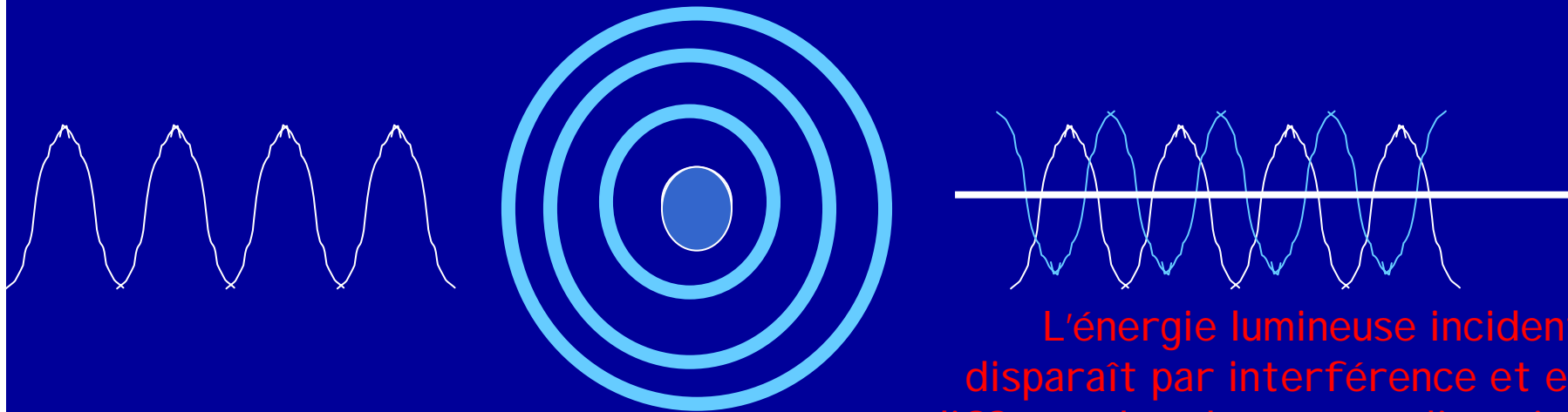
Diffusion de la lumière par les atomes: la couleur des objets

Un atome diffuse surtout les ondes dont la fréquence est résonante (ici le bleu) ce qui confère leur couleur aux objets éclairés par de la lumière blanche, mélange de toutes les longueurs d'onde



L'absorption de la lumière: diffusion vers l'avant et interférence

La lumière diffusée à résonance vers l'avant par un atome a une phase opposée à la lumière incidente...



L'énergie lumineuse incidente disparaît par interférence et est diffusée dans les autres directions

Principe de superposition des ondes:

Lumière + lumière = ombre !

Interférence!

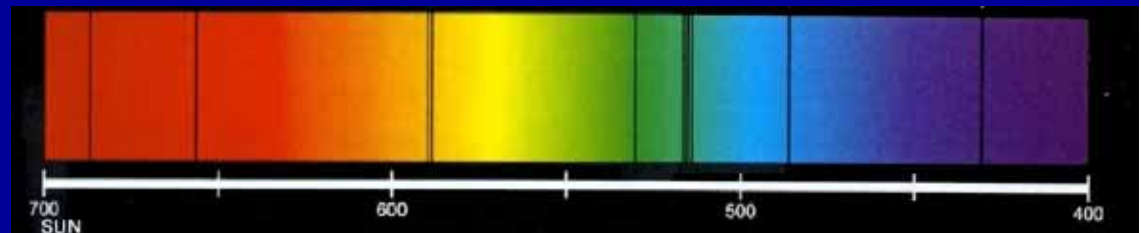
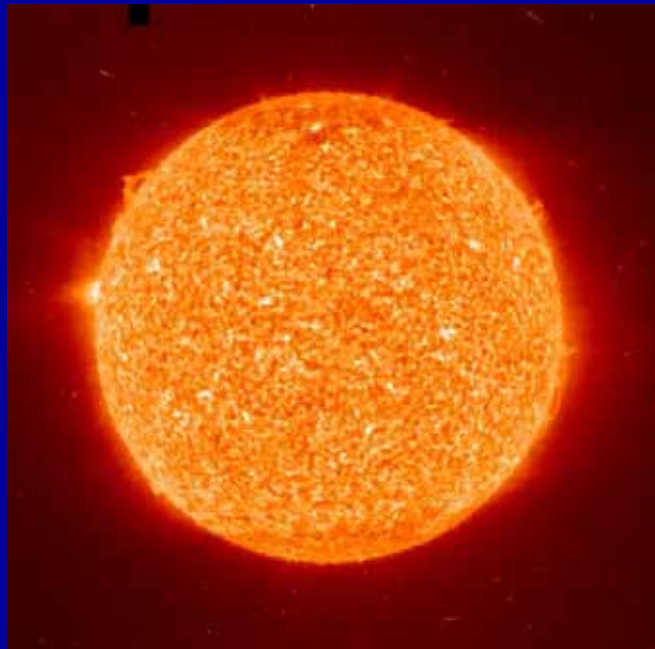
Explique l'opacité des corps solides à la lumière visible, les spectres de la lumière reçue des étoiles, le bleu du ciel et la couleur rouge du soleil couchant ou de la lune à l'horizon...

Lumière = source de renseignement sur la matière

La lumière est un moyen privilégié pour acquérir des informations sur le monde qui nous entoure.

La spectroscopie renseigne sur la composition des étoiles, des corps brûlant dans une flamme, des gaz dans une décharge électrique...

Raies d'absorption signature de la présence d'atomes particuliers



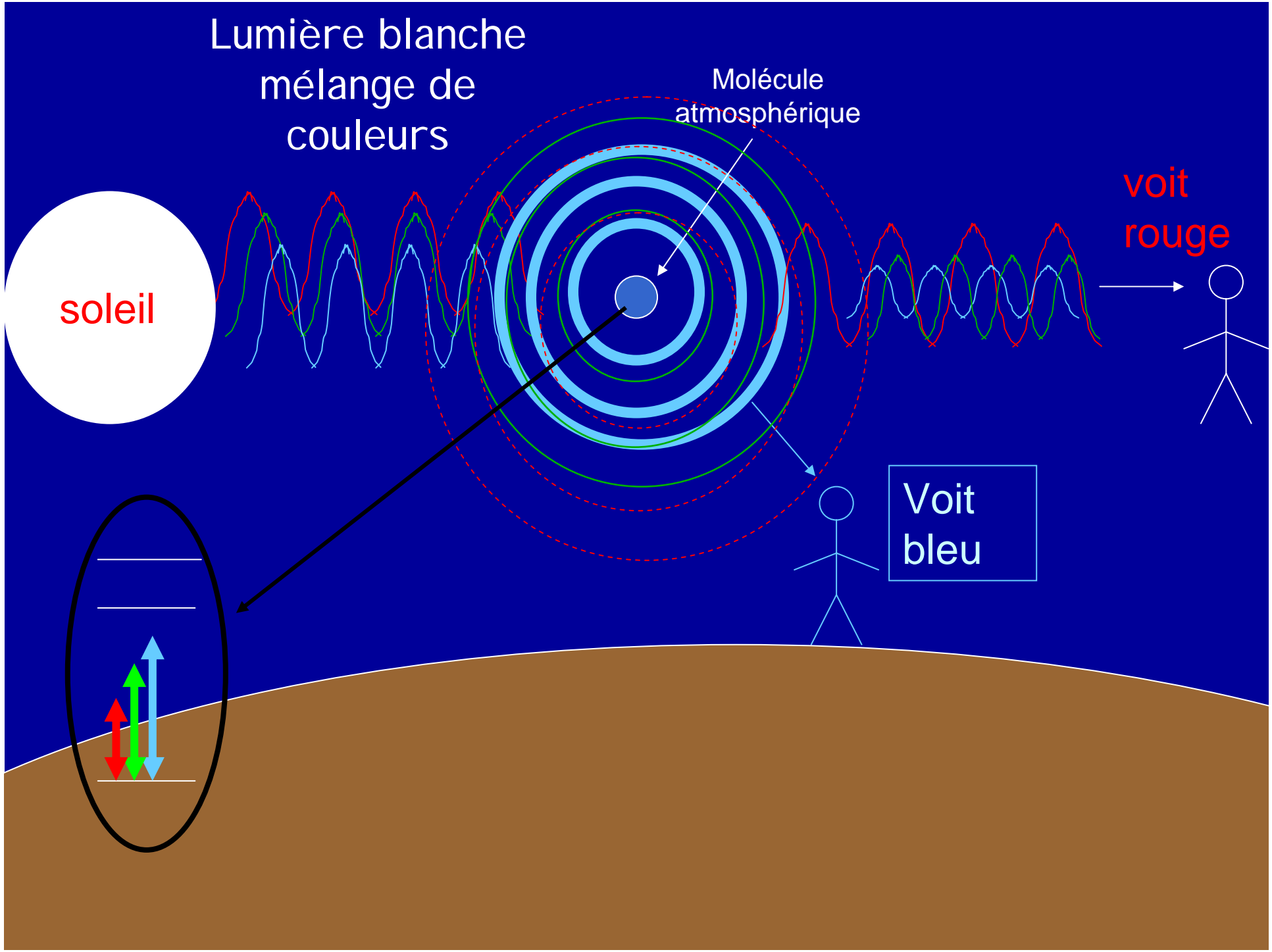
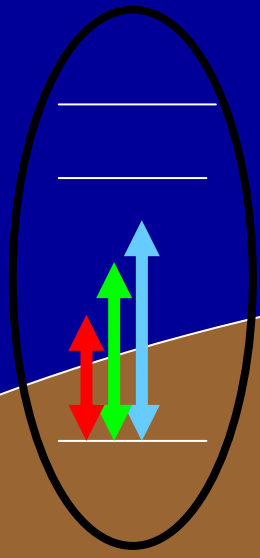
Lumière blanche
mélange de
couleurs

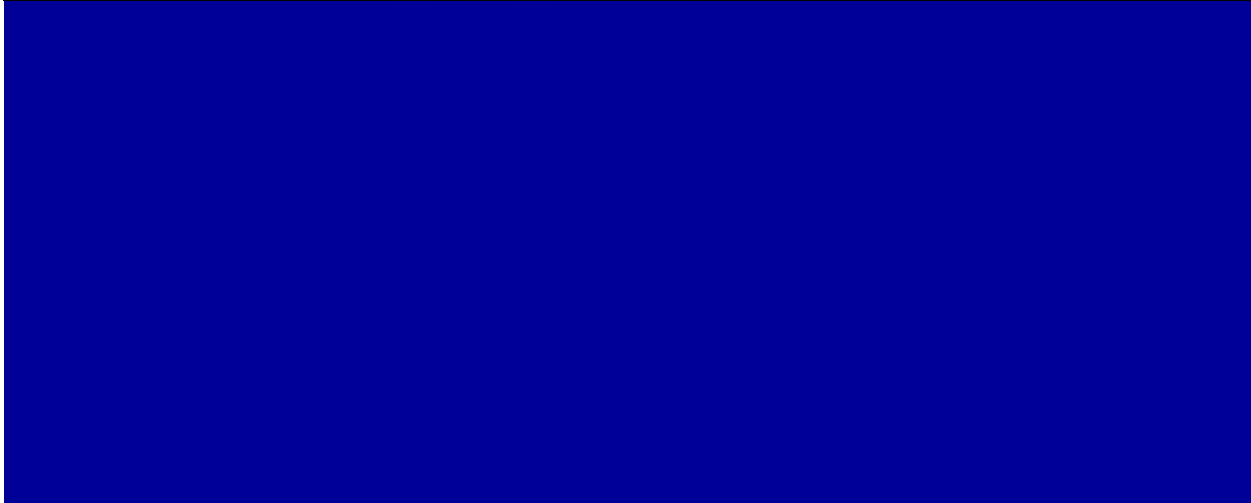
Molécule
atmosphérique

soleil

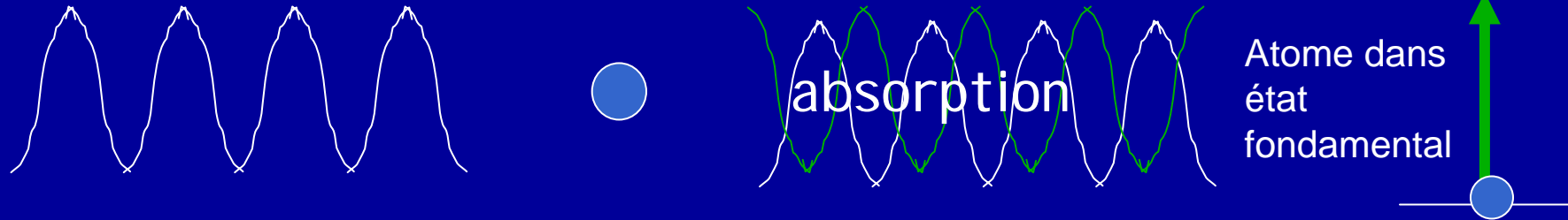
voit
rouge

Voit
bleu

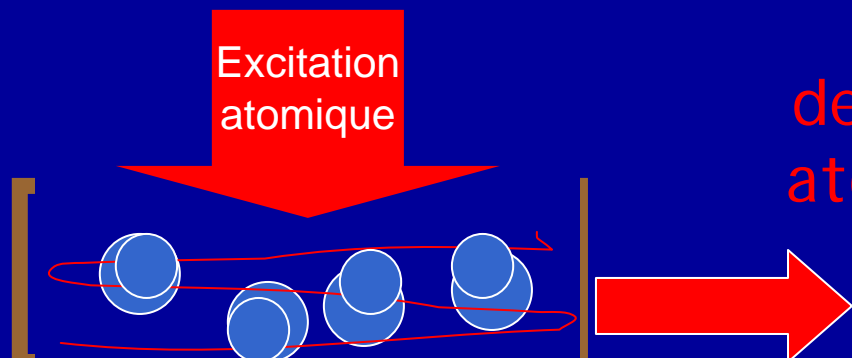
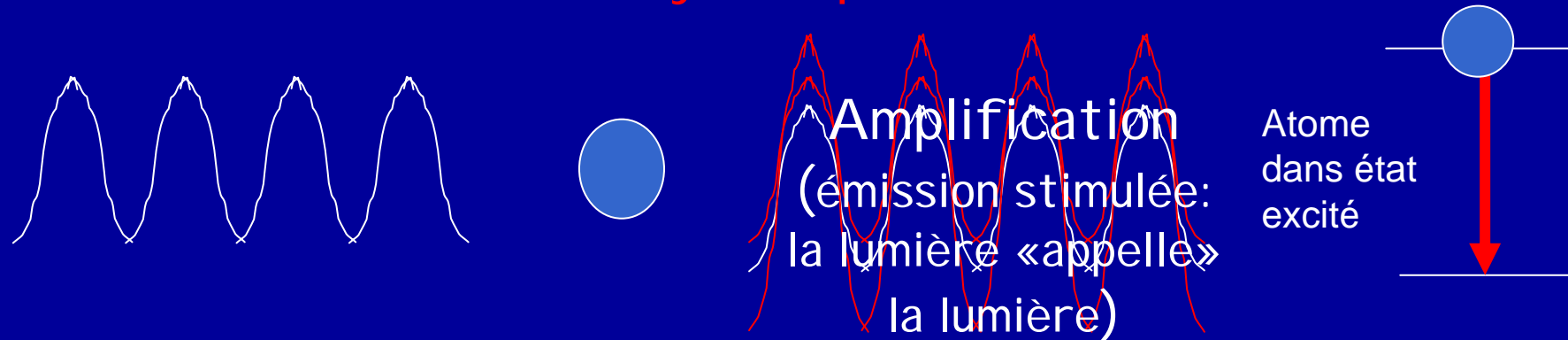




Les atomes peuvent aussi amplifier la lumière: le Laser

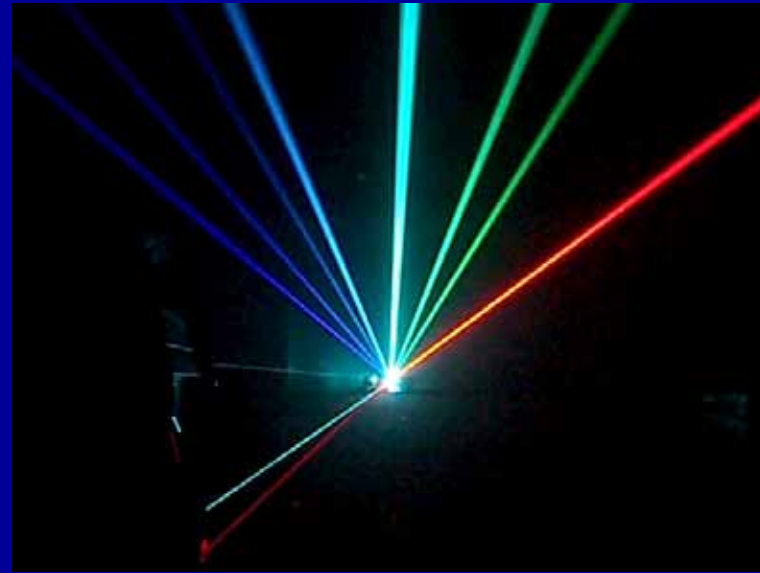


Si l'atome diffuseur est dans l'état excité, la lumière rayonnée vers l'avant devient en phase avec la lumière incidente: au lieu de l'extinction, il y a amplification de l'onde incidente

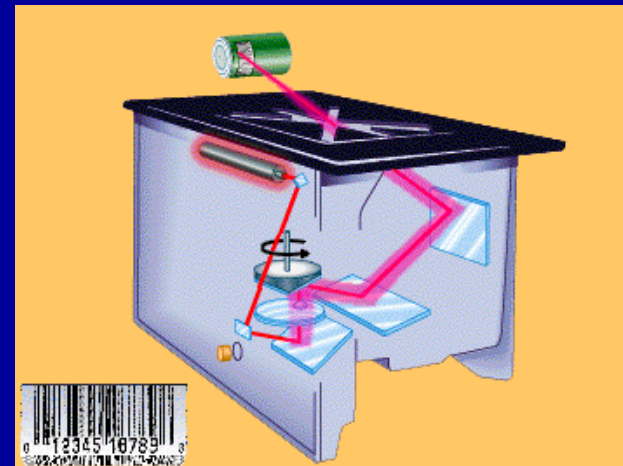


La lumière qui va et vient entre deux miroirs est amplifiée par les atomes excités. L'amplification du bruit de rayonnement conduit à l'oscillation laser.

Le laser dont le principe remonte au travail d'Einstein sur l'émission stimulée (1917)....



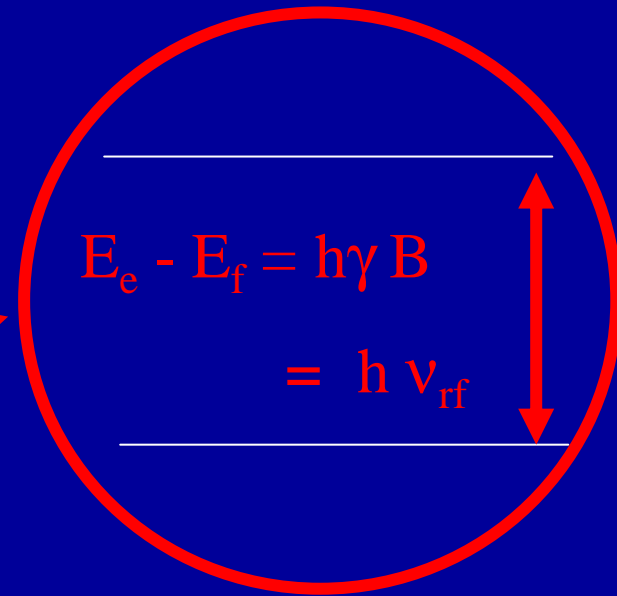
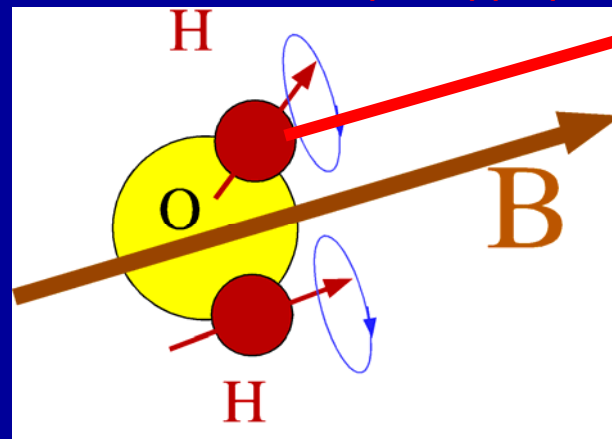
...a conduit à de très nombreuses applications technologiques....



Un autre exemple d'application de l'interaction atome - rayonnement: l'imagerie par résonance magnétique (IRM)



Les atomes d'H ont une structure magnétique à deux niveaux, séparés par un intervalle proportionnel au champ B appliqué



La diffusion de radio-fréquences de fréquence variable dans un champ magnétique inhomogène permet de cartographier l'intérieur du corps



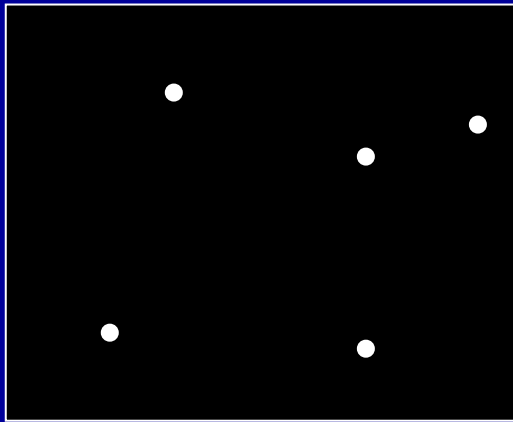
Observation statique ou dynamique du
cerveau....



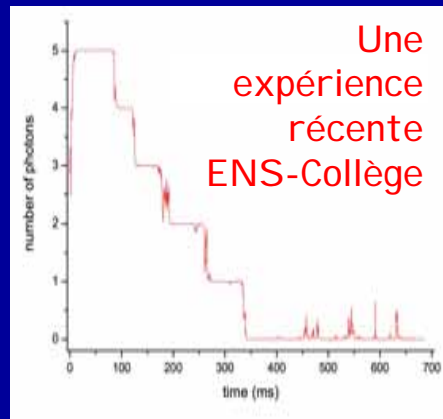
Atomes = particules et lumière = ondes

Est-ce si simple?

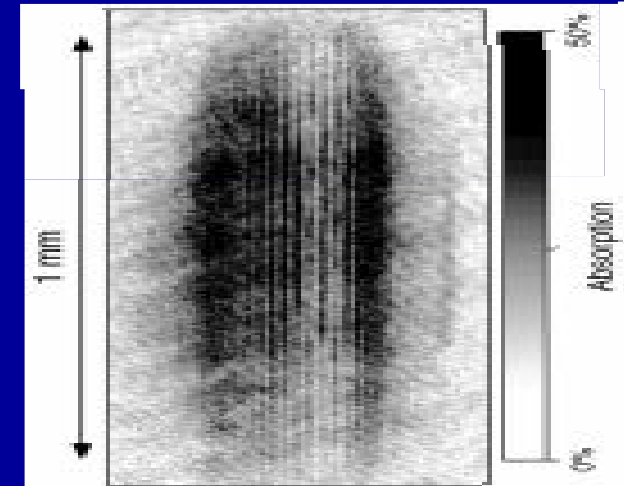
La physique quantique nous apprend que la lumière a **aussi** un aspect corpusculaire et la matière **aussi** un aspect ondulatoire!



Détection de lumière d'intensité très faible sur une plaque sensible: on observe des impacts discrets, signature de l'arrivée des «photons»



L'énergie lumineuse stockée dans une cavité s'échappe par paquets discrets, une autre signature des « photons »



Collision de deux jets d'atomes ultrafroids fait apparaître des franges d'interférence signature du caractère ondulatoire des atomes

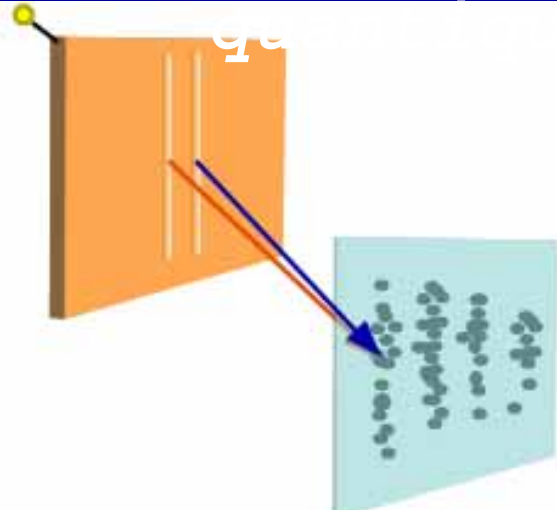
Comment interpréter ce dualisme onde-particule ?

L'interférence quantique: « l'essence de l'étrangeté



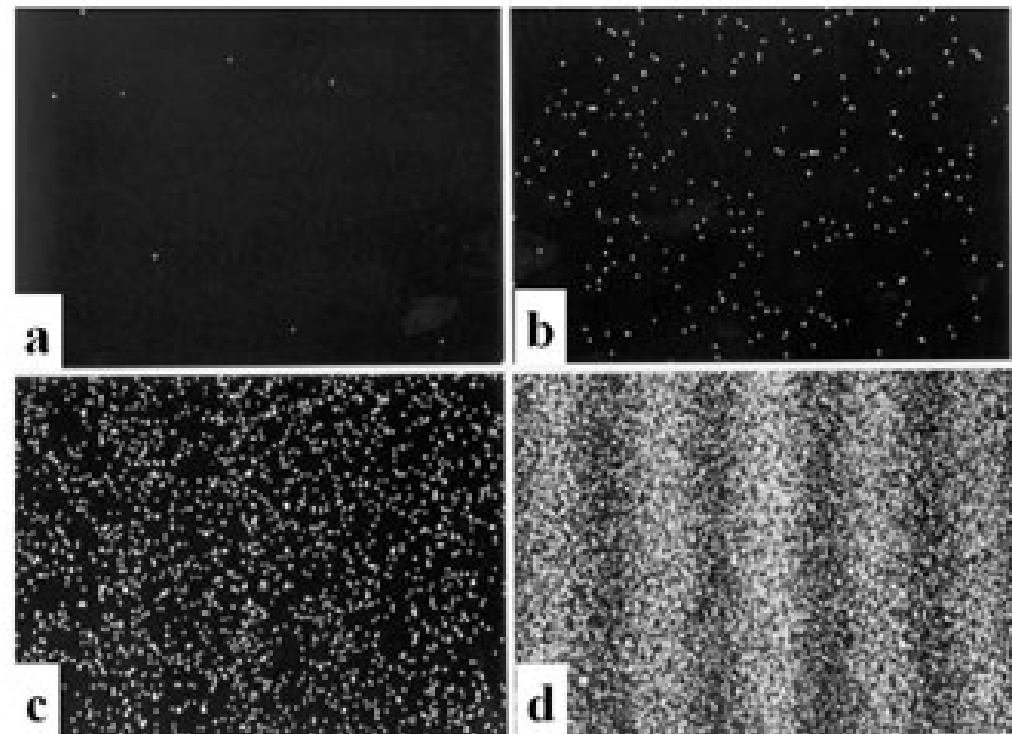
(R. Feynman)

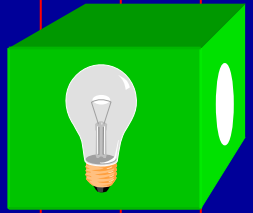
« Personne ne comprend vraiment la
physique quantique »



Interféromètre de Young avec des
photons, électrons, atomes, molécules...
traversant l'appareil un à un

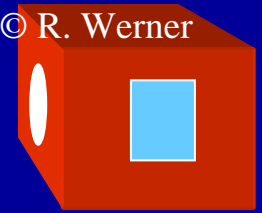
*L'interférence se
bâtit
progressivement,
au fur et à mesure
que les particules
sont détectées
une à une*





Une onde est associée à chaque particule (atome, électron, photon...). Le carré de son amplitude en chaque point donne la probabilité de trouver la particule en ce point

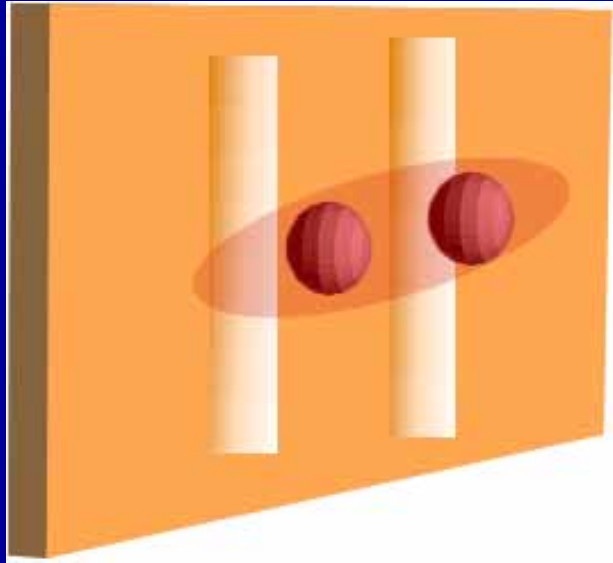
© R. Werner



intensité

Interférence
d'ondes de
probabilités!
("Dieu joue
aux dés")

Superposition d'états et complémentarité

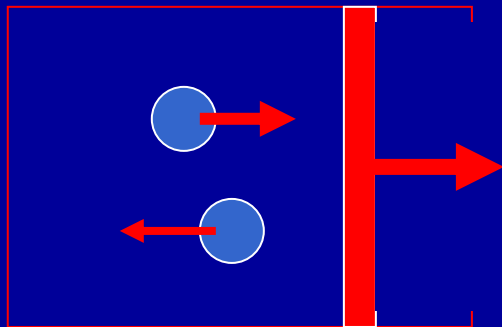
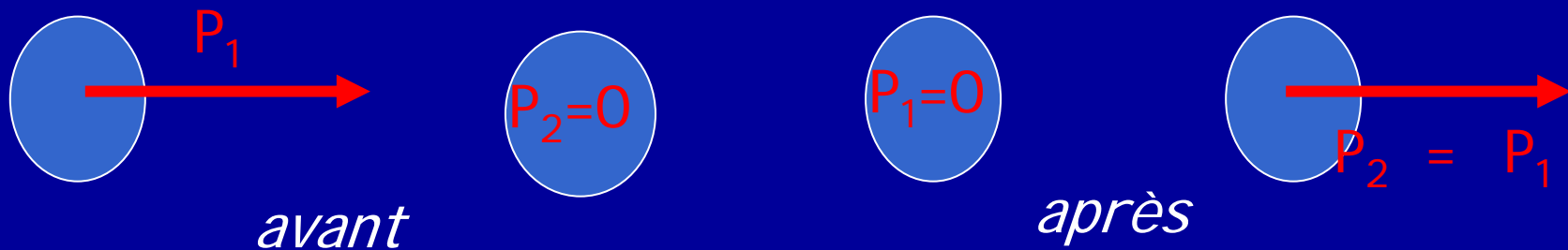


Le photon ou l'atome qui traverse l'écran des fentes « piloté » par son onde de probabilité passe par les deux trous à la fois! Il est dans une superposition quantique de deux états

Si on cherche à détecter par quelle fente la particule passe, les interférences disparaissent: la lumière ou la matière se comportent comme un ensemble de « grains »... Si on ne cherche pas à acquérir cette information, le caractère ondulatoire est apparent! Les aspects onde et corpuscule sont « complémentaires » (Bohr)

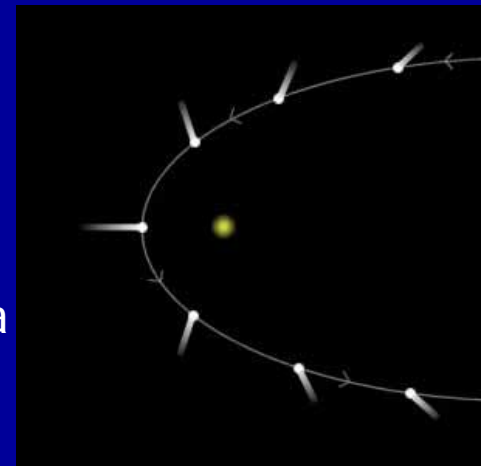
Impulsion des particules

Chaque particule (atome ou photon) possède une impulsion (quantité de mouvement), un vecteur aligné le long de sa direction de propagation. Lorsque deux particules subissent une collision, leur impulsion totale se conserve (Newton). Si l'une subit un changement d'impulsion positif, l'autre le compense par un changement d'impulsion négatif...



Le changement d'impulsion des molécules de gaz au cours des collisions sur le piston est la cause de la force de pression qu'il subit

La pression de radiation exercée par les photons émis par le soleil explique l'orientation de la queue des comètes (Kepler)



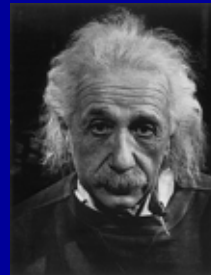
Impulsion et longueur d'onde

Pour les atomes: $P = M v$



Newton

Pour les photons: $P = \frac{h}{\lambda}$



Einstein

Les deux définitions
coincident si:

$$M v = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{M v}$$



De Broglie

La longueur d'onde de l'onde de matière est d'autant plus grande que la vitesse des atomes est plus petite: pour rendre les effets ondulatoires importants, il faut refroidir les atomes

Ordres de grandeur

$$\lambda = \frac{h}{M v}$$

Pour M = masse atome de sodium et $v = 500$ m/s (vitesse typique à la température ordinaire $T = 300^\circ\text{K}$)

$$\lambda = 0,000000000003 \text{ mètre} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

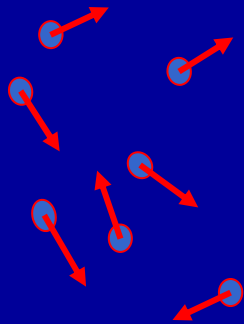
λ est très petit (plus petit que la taille de l'atome) rendant les effets d'interférence quantique en général inobservables...

Pour rendre λ de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière ($10^{-6} \text{ m} = 1$ micron), *il faut diviser v par 50000* (1 cm/s au lieu de 500m/s)

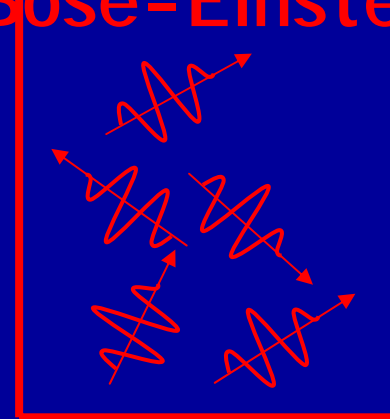
L'énergie cinétique (proportionnelle à v^2) doit être divisée par $2 \cdot 10^9$ et la température passer de 300°K à $0,0000015^\circ\text{K}$ soit 150 nanodegrés K! :

C'est très très froid!!!

Confinés dans une «boîte» à très basse T , des atomes à nombre pair de constituants (nucléons plus électrons) doivent former une onde matérielle géante: c'est la condensation de Bose-Einstein

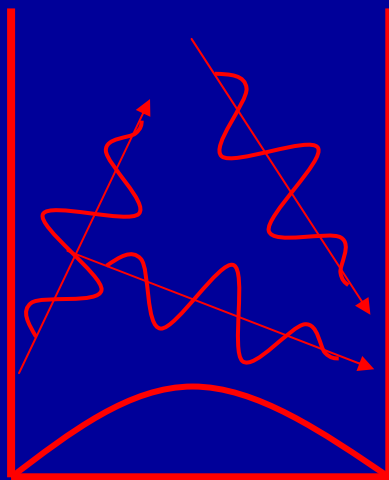


Nouvel état de la matière ultra-froide et ultra-diluée?



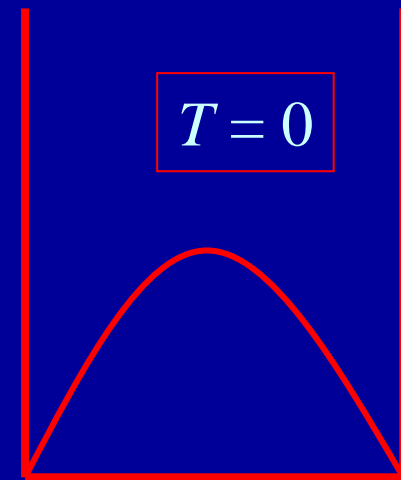
Haute température :
mécanique newtonienne

On refroidit : la nature ondulatoire commence à se faire sentir $\lambda = h / (Mv)$

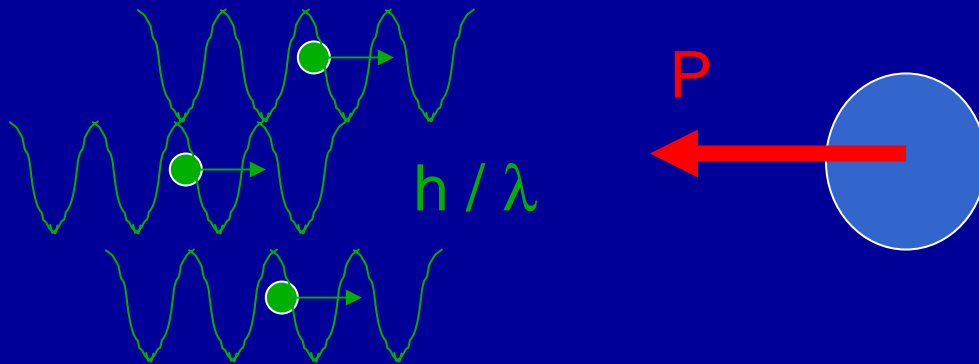


Seuil de la condensation: λ devient de l'ordre de la distance entre particules et de la taille du piège (quelques microns)

Analogie avec l'onde lumineuse associée à un ensemble de photons entre les miroirs d'un laser



Pour ralentir les atomes et baisser leur T, utiliser la pression de radiation de la lumière !



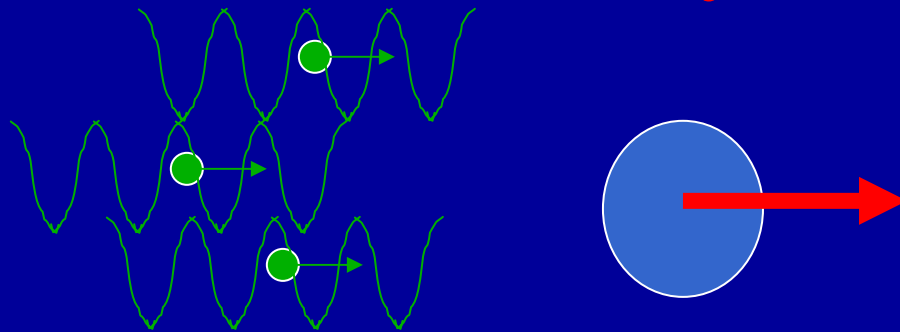
Chaque photon absorbé « contre le mouvement » de l'atome diminue son impulsion, donc sa vitesse

$$P = Mv \rightarrow P' = Mv' = Mv - h/\lambda$$

$$v' = v - h/M\lambda$$

Variation de 1cm/s par photon

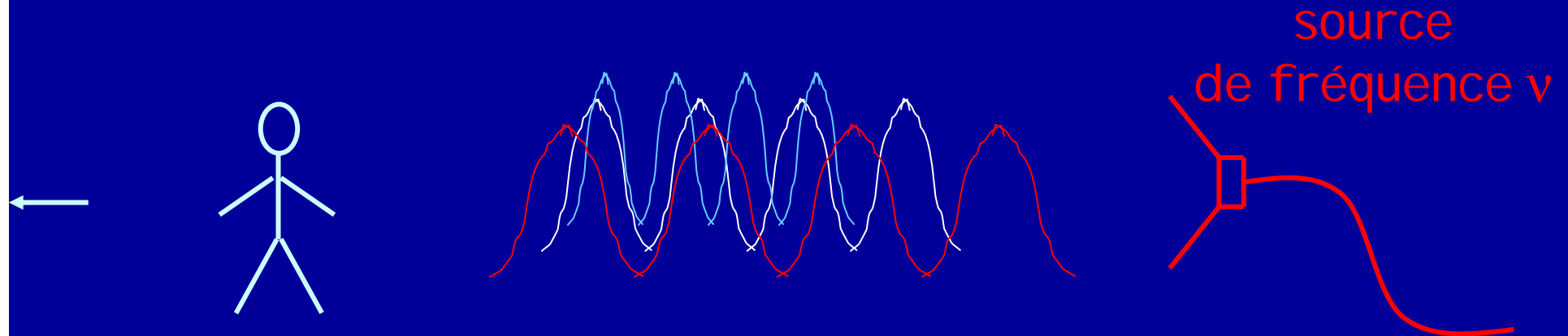
Après absorption et diffusion de 50000 photons (en environ 1 milliseconde), un atome ayant une vitesse de 500m/s est stoppé !



Problème: pour la moitié des atomes allant dans le sens des photons, la vitesse est augmentée...

Pour rendre la lumière plus efficace à freiner les atomes qu'à les accélérer, utiliser l'effet Doppler!

Le principe du refroidissement Doppler



fréquence apparente supérieure à ν (décalage vers le bleu)
fréquence apparente inférieure à ν (décalage vers le rouge)

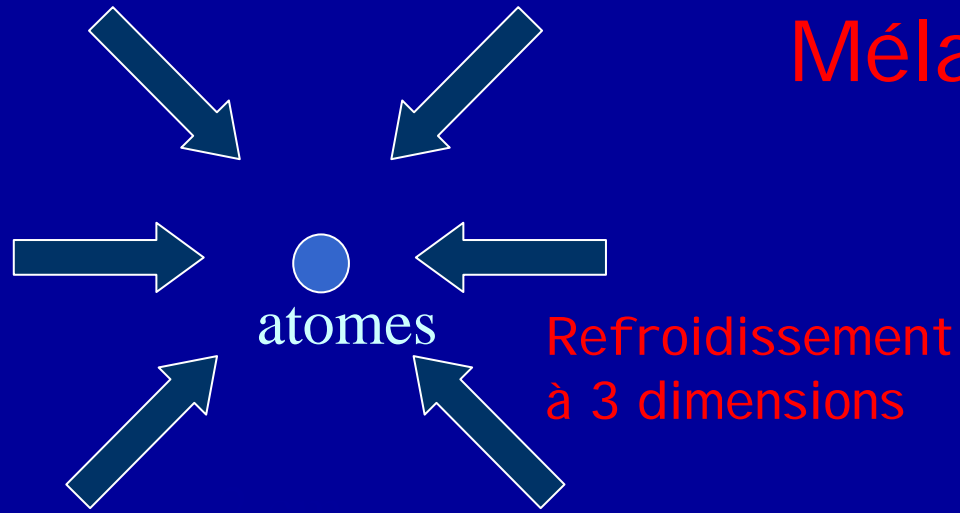
En allant vers la droite, l'atome se met mieux en résonance avec l'onde venant de droite, moins bien avec celle venant de gauche...
...et inversement s'il va vers la gauche

*On choisit $h\nu < E_e - E_f$
et on irradie avec 2 ondes de
sens opposés*

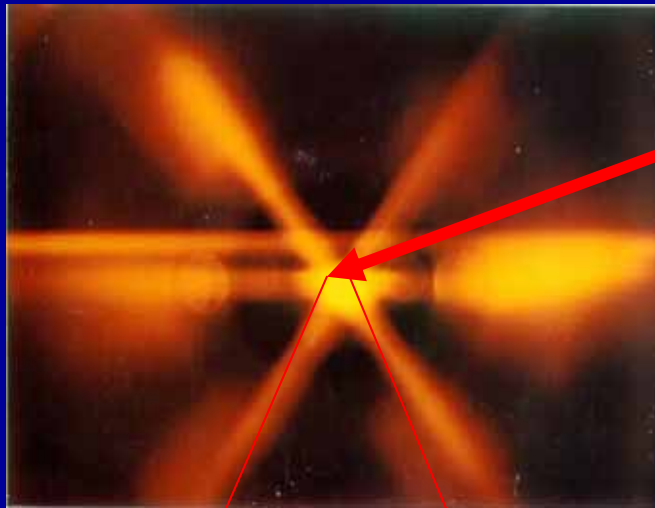


L'atome en mouvement interagit toujours plus avec l'onde se propageant en sens opposé → force opposée à vitesse !

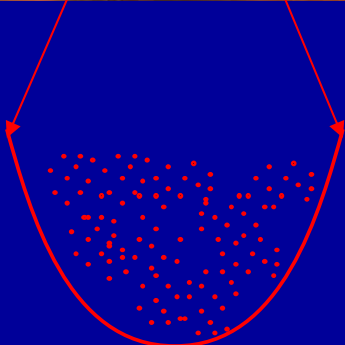
Mélasse optique et piège magnétique



Un milliard d'atomes à quelques microdegrés Kelvin, se déplaçant à quelques dizaines de cm/s comme dans un milieu visqueux



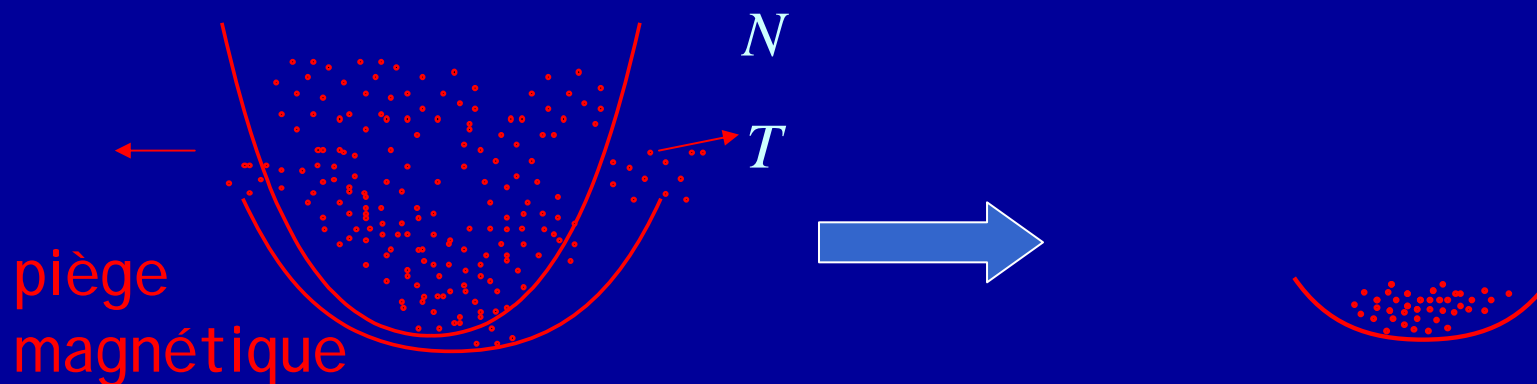
On coupe la lumière et on branche une configuration de champs magnétiques qui piège les atomes froids comme s'ils étaient dans une bouteille



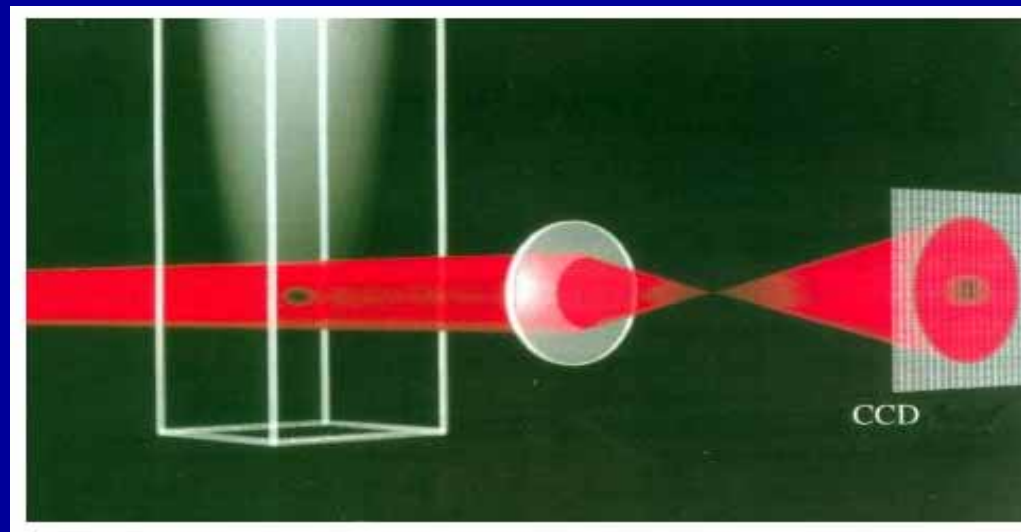
Peut-on les refroidir encore plus?

Comment atteindre le seuil de condensation ?

Refroidissement par évaporation: on diminue la force de piègeage pour laisser échapper les atoms « chauds »



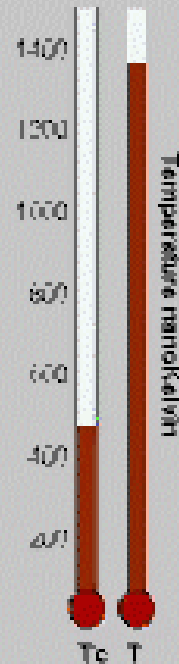
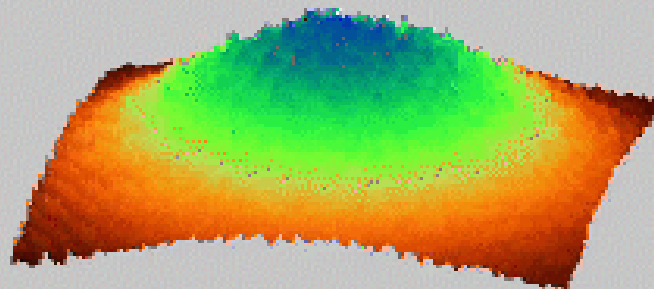
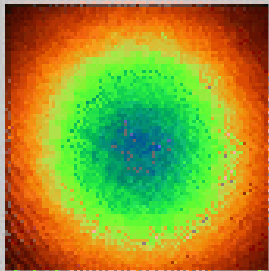
imagerie grâce une impulsion laser résonnante: on observe l'ombre du nuage atomique



Film de la condensation de Bose-Einstein

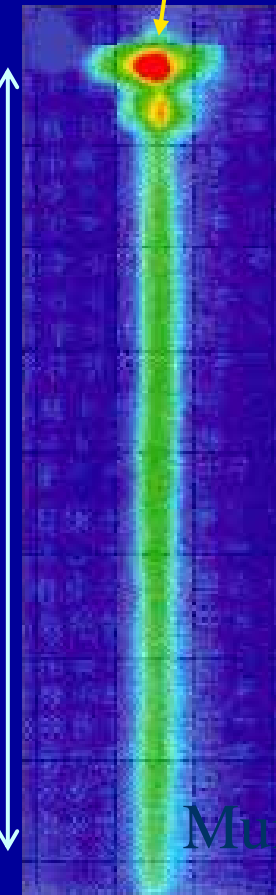
Bose-Einstein Condensation of Rb 87

$$100 \text{ (N)} = 2 \cdot 10^7 \quad - \quad 100 \text{ (N)} = 2 \cdot 10^7$$



Les objets
les plus
froids de
l'Univers!

Condensat

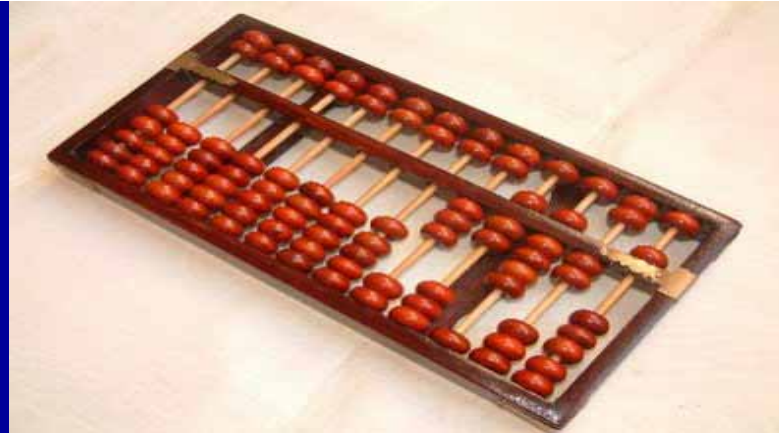


3 mm

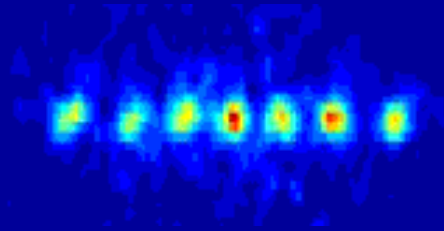
et image d'un laser à atomes...

Quelles applications?

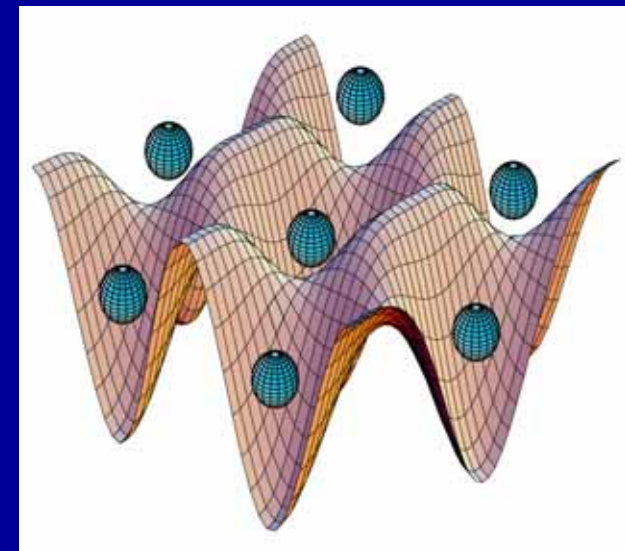
Des bouliers classiques...



...au bouliers quantiques



bouliers d'atomes piégés interagissant avec des faisceaux laser



Bouliers d'atomes ultrafroids dans un « réseau optique »

Vers d'autres façons de calculer et de communiquer utilisant la logique de la physique quantique....

Atomes et lumière sont les acteurs principaux du monde tel que nous le percevons depuis l'origine des temps

...mais ce n'est que depuis un siècle que nous avons vraiment compris les lois quantiques qui régissent leurs interactions

Cette compréhension nous a permis de développer des outils technologiques puissants qui ont changé notre vie quotidienne

Ce qui motive au départ cette recherche n'est cependant pas tant la promesse d'applications mais la curiosité des physiciens qui cherchent à comprendre comment le monde fonctionne et à exploiter toutes les possibilités de ses lois

En étudiant l'interaction des atomes avec la lumière, nous avons découvert qu'ondes et particules ne sont que les deux faces d'une même réalité et que la lumière, qui nous renseigne sur la matière peut également servir à la manipuler de façon étonnante...Ainsi le rayonnement qui, en nous chauffant, permet la vie sur terre peut également refroidir avec une efficacité extraordinaire, conduisant à la création de la matière la plus froide de l'Univers dont les propriétés vont sans doute encore nous surprendre. En faisant danser les atomes dans la lumière nous espérons aussi pouvoir un jour exploiter la logique quantique pour mieux communiquer et calculer...