

INTRODUCTION AU LASER

J. Roussel

Département Physique
Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes

Avril 2014

- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

Introduction

LASER signifie **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission **R**adiation.

Introduction

LASER signifie **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission **R**adiation.

- 1958 : Richard Townes et Arthur Schawlow posent les bases théoriques du laser.

Introduction

LASER signifie **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission **R**adiation.

- 1958 : Richard Townes et Arthur Schawlow posent les bases théoriques du laser.
- 1960 : invention du premier laser par Theodore Maiman.



Figure: T. Maiman avec son laser à rubis. Décédé en 2007, il a été nominé à deux reprises pour le Nobel qu'il n'obtiendra finalement pas. © Matteis / LookatSciences

Introduction

LASER signifie **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission **R**adiation.

- 1958 : Richard Townes et Arthur Schawlow posent les bases théoriques du laser.
- 1960 : invention du premier laser par Theodore Maiman.
- Le laser est une des inventions le plus marquantes du vingtième siècle avec l'informatique et internet.



Figure: T. Maiman avec son laser à rubis. Décédé en 2007, il a été nominé à deux reprises pour le Nobel qu'il n'obtiendra finalement pas. © Matteis / LookatSciences

Progression

- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples
- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

Un laser est un **oscillateur optique** qui comporte trois éléments :

Un laser est un **oscillateur optique** qui comporte trois éléments :

- 1 un milieu actif amplificateur (gaz, liq ou solide);

Un laser est un **oscillateur optique** qui comporte trois éléments :

- 1 un milieu actif amplificateur (gaz, liq ou solide) ;
- 2 Une cavité résonante (de type Fabry-Perot) ;

Un laser est un **oscillateur optique** qui comporte trois éléments :

- 1 un milieu actif amplificateur (gaz, liq ou solide);
- 2 Une cavité résonante (de type Fabry-Perot) ;
- 3 Un système de pompage permettant de réaliser une inversion de population au sein du milieu actif (excitation extérieure demandant bcp d'énergie : excitation électrique ou radiative)

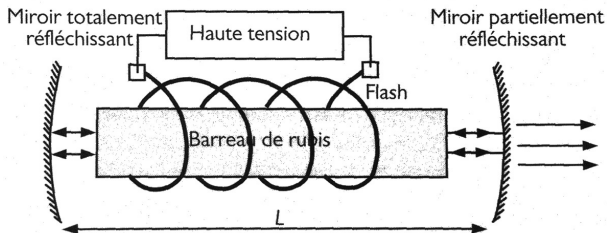


Figure: Exemple : Le laser à rubis

Progression

- 1 Principe du laser
 - Description
 - **Emission stimulée**
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

Le fonctionnement du laser repose sur le phénomène d'**émission stimulée**. Le concept d'émission stimulée fut introduit par A Einstein en 1917 pour expliquer le rayonnement du corps noir. L'émission stimulée est un des trois modes d'interaction lumière-matière avec l'absorption et l'émission spontanée.

L'absorption

- Considérons un système d'atomes à deux niveaux d'énergie E_1 (niveau fondamental) et E_2 (niveau excité).

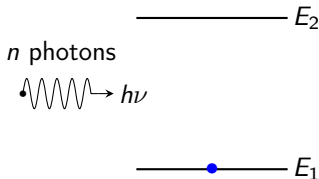
————— E_2

————— ● ——— E_1

L'absorption

- Considérons un système d'atomes à deux niveaux d'énergie E_1 (niveau fondamental) et E_2 (niveau excité).
- Envoyons des photons de fréquence ν vérifiant

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad \text{avec} \quad h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$$



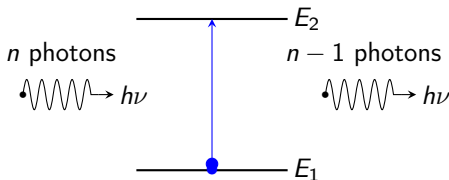
L'absorption

- Considérons un système d'atomes à deux niveaux d'énergie E_1 (niveau fondamental) et E_2 (niveau excité).
- Envoyons des photons de fréquence ν vérifiant

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad \text{avec} \quad h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$$

- Il y a une probabilité qu'un photon soit absorbé faisant passer un atome de l'état d'énergie E_1 vers l'état d'énergie E_2 . La probabilité de la transition est proportionnelle au nombre n de photons.

$$\left. \frac{dN_1}{N_1} \right|_{\text{abs}} = -B n dt \quad \text{avec} \quad B = C^{\text{te}}$$

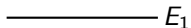


Emission spontanée

- L'état excité n'est pas stable ; il possède une faible durée de vie (de l'ordre de 10^{-8} s). En l'absence de photons, l'atome se désexcite spontanément en émettant un photon dans une direction aléatoire avec une phase et un état de polarisation aléatoire.



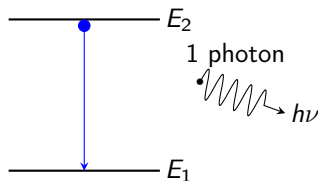
—●— E_2



— E_1

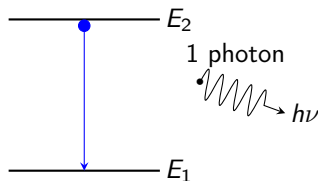
Emission spontanée

- L'état excité n'est pas stable ; il possède une faible durée de vie (de l'ordre de 10^{-8} s). En l'absence de photons, l'atome se désexcite spontanément en émettant un photon dans une direction aléatoire avec une phase et un état de polarisation aléatoire.



Emission spontanée

- L'état excité n'est pas stable ; il possède une faible durée de vie (de l'ordre de 10^{-8} s). En l'absence de photons, l'atome se désexcite spontanément en émettant un photon dans une direction aléatoire avec une phase et un état de polarisation aléatoire.

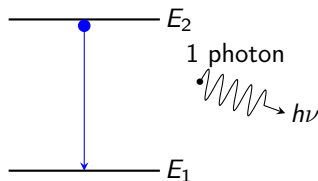


- La probabilité par unité de temps de la transition est constante.

$$\left. \frac{dN_2}{N_2} \right|_{\text{spont.}} = -A dt \quad \text{avec} \quad A = C^{\text{te}}$$

Emission spontanée

- L'état excité n'est pas stable ; il possède une faible durée de vie (de l'ordre de 10^{-8} s). En l'absence de photons, l'atome se désexcite spontanément en émettant un photon dans une direction aléatoire avec une phase et un état de polarisation aléatoire.



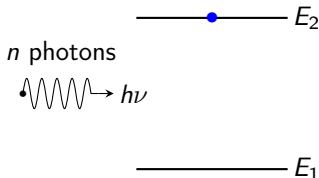
- La probabilité par unité de temps de la transition est constante.

$$\left. \frac{dN_2}{N_2} \right|_{\text{spont.}} = -A dt \quad \text{avec} \quad A = C^{\text{te}}$$

- NB** : Il existe des niveaux excités de grande durée de vie (de l'ordre de la ms) qui sont dit **métastables**. Dans ce cas, la désexcitation est souvent d'origine non radiative (collisions).

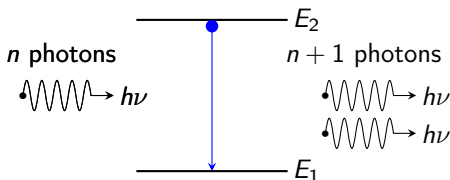
Emission stimulée

- En présence de photons de fréquence ν , la désexcitation peut être induite par un photon. On parle d'émission stimulée.



Emission stimulée

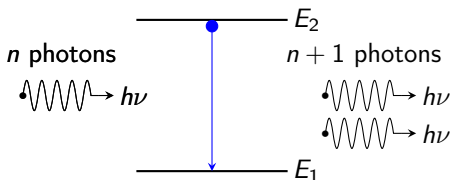
- En présence de photons de fréquence ν , la désexcitation peut être induite par un photon. On parle d'émission stimulée.
- Dans ce cas, le photon produit par la désexcitation possède les **mêmes propriétés** que le photon incident.



Emission stimulée

- En présence de photons de fréquence ν , la désexcitation peut être induite par un photon. On parle d'émission stimulée.
- Dans ce cas, le photon produit par la désexcitation possède les **mêmes propriétés** que le photon incident.
- La probabilité par unité de temps de ce phénomène est proportionnelle au nombre de photons.

$$\left. \frac{dN_2}{N_2} \right|_{\text{stim.}} = -B n dt$$



Comment amplifier la lumière ?

Pour produire des photons identiques il faut que l'émission stimulée soit prépondérante devant l'absorption **et** l'émission spontanée, ce qui donne deux conditions :

- 1 $Bn \gg A$: il faut un suffisamment de photons d'où l'intérêt d'une cavité optique.
- 2 $N_2 \gg N_1$: il faut procéder à une **inversion de population**.

Progression

- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - **Inversion de population**
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

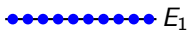
- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

Loi de Boltzmann

- À l'équilibre thermodynamique, les populations des deux niveaux sont données par la loi de Boltzmann

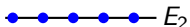


$$N_i = C^{\text{te}} e^{-E_i/k_B T} \quad \text{avec} \quad k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

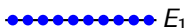


Loi de Boltzmann

- À l'équilibre thermodynamique, les populations des deux niveaux sont données par la loi de Boltzmann



$$N_i = C^{\text{te}} e^{-E_i/k_B T} \quad \text{avec} \quad k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

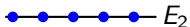


- Ainsi le rapport de population des niveaux 1 et 2 vaut

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\Delta E/k_B T} = e^{-h\nu/k_B T} < 1$$

Loi de Boltzmann

- À l'équilibre thermodynamique, les populations des deux niveaux sont données par la loi de Boltzmann



$$N_i = C^{\text{te}} e^{-E_i/k_B T} \quad \text{avec} \quad k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$



- Ainsi le rapport de population des niveaux 1 et 2 vaut

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\Delta E/k_B T} = e^{-h\nu/k_B T} < 1$$

Conclusion

Il ne peut donc y avoir amplification dans un système à l'équilibre.

Pompage optique

- Procédé inventé par le physicien français Alfred Kastler (ENS Ulm).

Pompage optique

- Procédé inventé par le physicien français Alfred Kastler (ENS Ulm).
- But : "inverser les populations" par un apport d'énergie extérieure d'origine optique, électrique voire chimique.

Pompage optique

- Procédé inventé par le physicien français Alfred Kastler (ENS Ulm).
- But : "inverser les populations" par un apport d'énergie extérieure d'origine optique, électrique voire chimique.

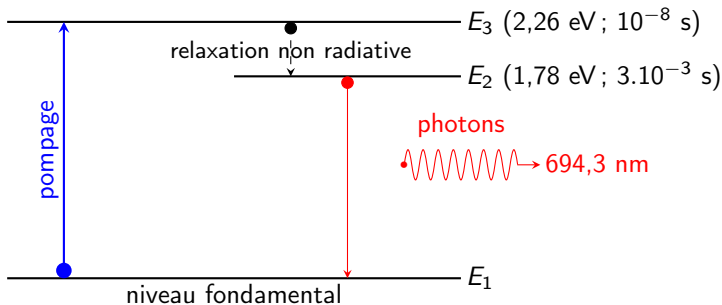


Figure: Inversion de populations dans un système à trois niveaux.

Progression

- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

Grâce à l'émission stimulée et à l'inversion de population il est possible de réaliser un **amplificateur de lumière**.

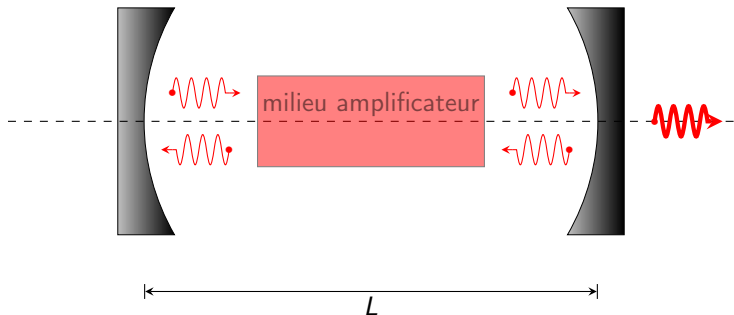
Cependant un laser est un **oscillateur optique**. Pour transformer un amplificateur en oscillateur il faut une boucle de rétroaction (*cf.* électricité). le système peut se mettre à auto-osciller en "démarrant" sur les petites fluctuations du système (comme dans l'effet Larsen).

Dans le laser, c'est l'émission spontanée qui jouera le rôle du "bruit" et une cavité optique celui de la boucle de rétroaction.

Stabilité de la cavité

Miroir parfaitement
réfléchissant

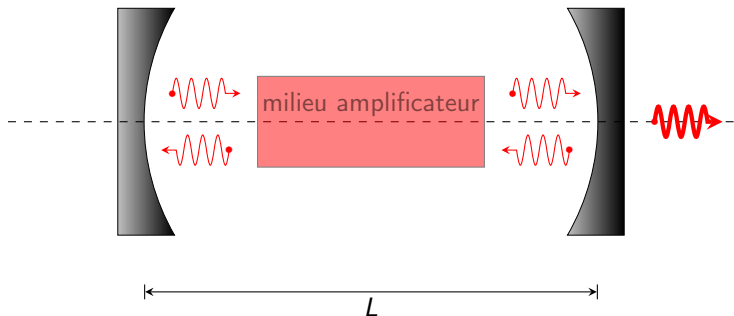
Miroir partiellement
transparent



Stabilité de la cavité

Miroir parfaitement réfléchissant

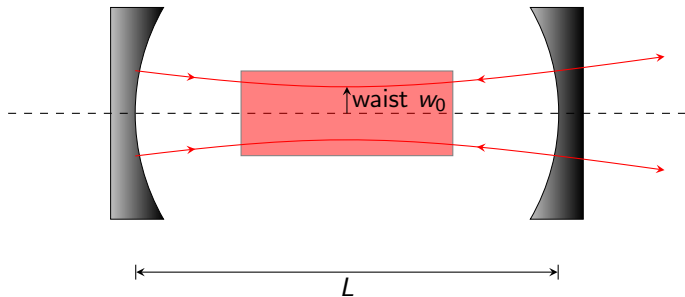
Miroir partiellement transparent



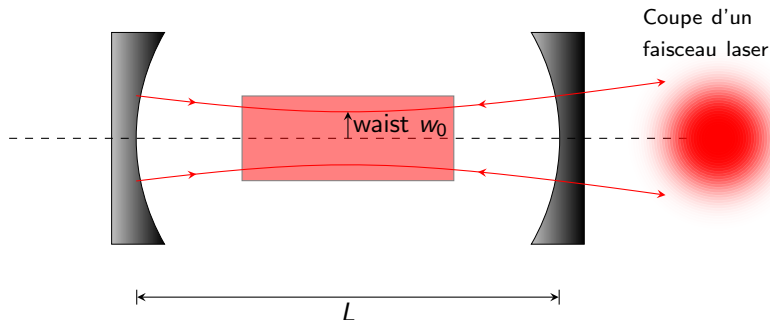
Condition de stabilité :

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

Divergence du faisceau laser

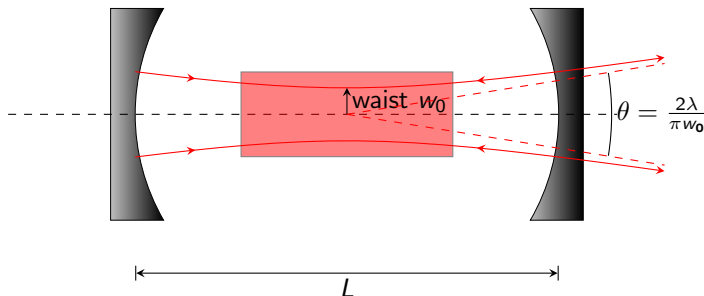


Divergence du faisceau laser



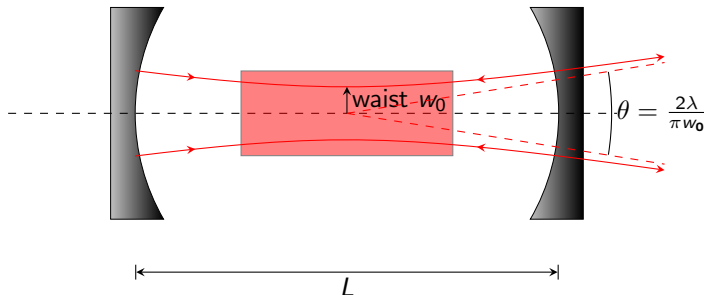
Le faisceau laser est un faisceau gaussien

Divergence du faisceau laser



Le faisceau laser est un faisceau gaussien qui sort avec une divergence θ liée à la taille du col (*waist* en anglais) du faisceau dans la cavité.

Divergence du faisceau laser



Le faisceau laser est un faisceau gaussien qui sort avec une divergence θ liée à la taille du col (*waist* en anglais) du faisceau dans la cavité.

Exemple : Laser He-Ne : $w_0 = 0,4$ mm et $\theta = 1$ mrad.

Modes longitudinaux

Du fait des interférences, la cavité ne transmet que certaines fréquences.

Modes longitudinaux

Du fait des interférences, la cavité ne transmet que certaines fréquences.
Il y a interférences constructives quand

$$\delta = k\lambda$$

Modes longitudinaux

Du fait des interférences, la cavité ne transmet que certaines fréquences.
Il y a interférences constructives quand

$$\delta = k\lambda \implies 2nL = k\lambda$$

Modes longitudinaux

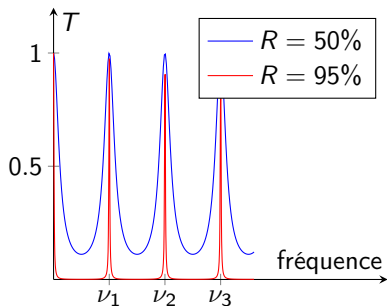
Du fait des interférences, la cavité ne transmet que certaines fréquences.
Il y a interférences constructives quand

$$\delta = k\lambda \implies 2nL = k\lambda \implies \nu_k = \frac{c}{\lambda} = k \frac{c}{2nL}$$

Modes longitudinaux

Du fait des interférences, la cavité ne transmet que certaines fréquences.
Il y a interférences constructives quand

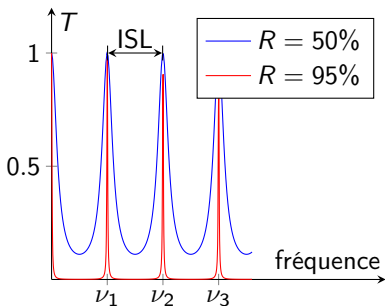
$$\delta = k\lambda \implies 2nL = k\lambda \implies \nu_k = \frac{c}{\lambda} = k \frac{c}{2nL}$$



Modes longitudinaux

Du fait des interférences, la cavité ne transmet que certaines fréquences.
Il y a interférences constructives quand

$$\delta = k\lambda \implies 2nL = k\lambda \implies \nu_k = \frac{c}{\lambda} = k \frac{c}{2nL} = k\text{ISL}$$

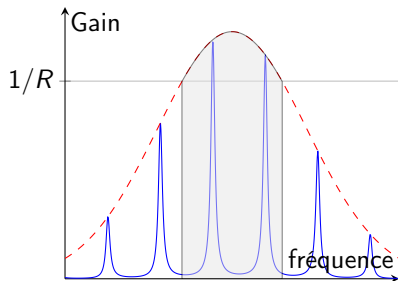


Les modes longitudinaux sont espacé du même Intervalle Spectral Libre.

Conditions d'oscillation laser

$G(\nu)$ représente le gain en intensité après un aller-retour. Pour une cavité optique formée d'un miroir parfait et d'un autre de facteur de réflexion R , la condition d'oscillation laser est donnée par :

$$G R > 1$$

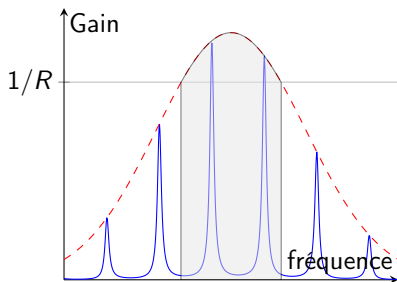


Conditions d'oscillation laser

$G(\nu)$ représente le gain en intensité après un aller-retour. Pour une cavité optique formée d'un miroir parfait et d'un autre de facteur de réflexion R , la condition d'oscillation laser est donnée par :

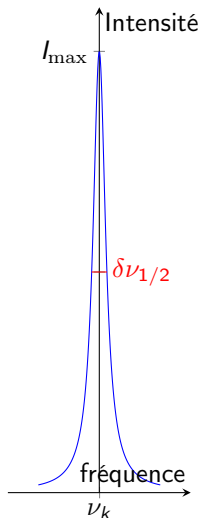
$$G R > 1$$

Si un seul mode vérifie cette condition, le laser sera **monomode**, sinon **multimode**.



- Finesse F d'un mode :

$$F = \frac{ISL}{\delta\nu_{1/2}}$$

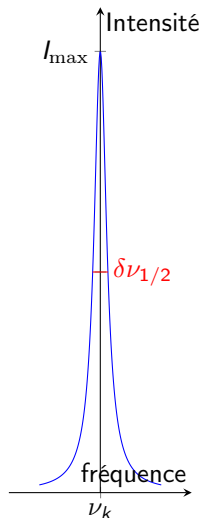


- Finesse F d'un mode :

$$F = \frac{ISL}{\delta\nu_{1/2}}$$

- Les modes laser ont une largeur spectrale très fine d'où une grande cohérence spectrale (longueur de cohérence $l = c/\delta\nu$).

Laser	$\delta\nu_{1/2}$	l
He-Ne	1,5 GHz	20 cm
He-Ne stabilisé	1 MHz	300 m
CO ₂ stabilisé	10 kHz	30 km
raie naturelle	$\delta\nu_{1/2}$	l
H _{α} (Soleil)	25 GHz	1 cm



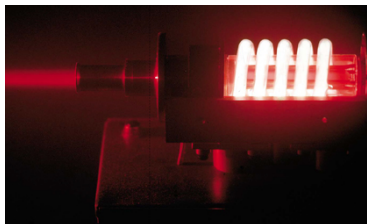
Progression

- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

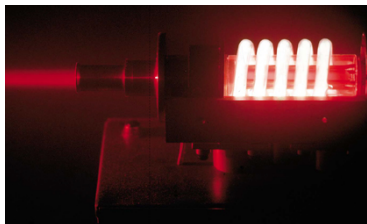
Les lasers à solide

- Milieu amplificateur : pierres précieuses dopées (grenat, rubis, saphir).



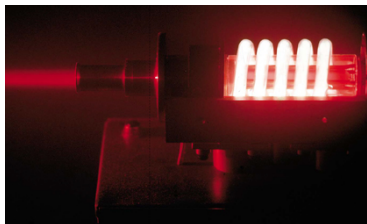
Les lasers à solide

- Milieu amplificateur : pierres précieuses dopées (grenat, rubis, saphir).
- Pompage : lampe flash ou diode laser.



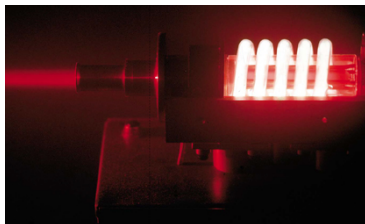
Les lasers à solide

- Milieu amplificateur : pierres précieuses dopées (grenat, rubis, saphir).
- Pompage : lampe flash ou diode laser.
- gain important, lasers puissants.



Les lasers à solide

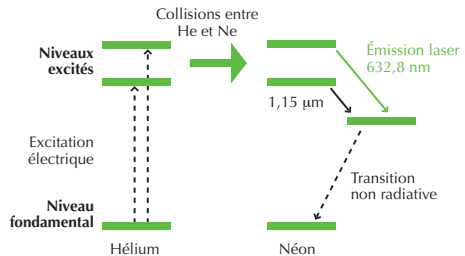
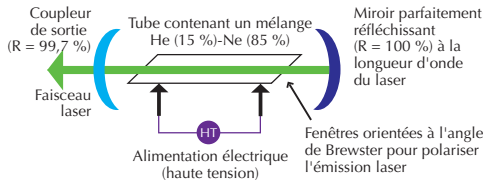
- Milieu amplificateur : pierres précieuses dopées (grenat, rubis, saphir).
- Pompage : lampe flash ou diode laser.
- gain important, lasers puissants.



Laser	λ	Puissance	Rendement	Pompage	Mode	Applications
Nd ³⁺ : YAG	1,064 μm	1 mW à 1 kW 1 GW	1%	opt.	C I	chirurgie, usinage
Nd ³⁺ : verre	1,062 μm	> 100 TW			I	fusion thermonucléaire
Ti ³⁺ : Al ₂ O ₃	650 à 1100 nm	1 TW	10%	opt.	I	femtochimie

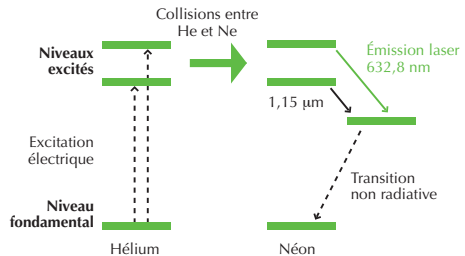
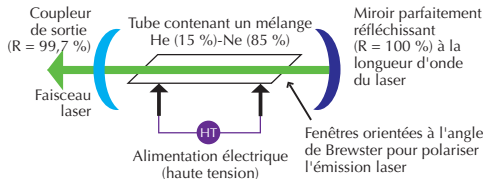
Les lasers à gaz

- Milieu amplificateur : gaz ou mélange gazeux.



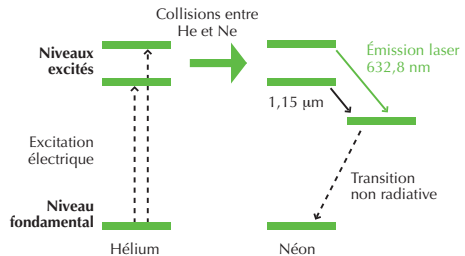
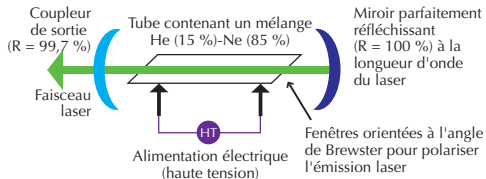
Les lasers à gaz

- Milieu amplificateur : gaz ou mélange gazeux.
- Pompage par décharge électrique ou optique.



Les lasers à gaz

- Milieu amplificateur : gaz ou mélange gazeux.
- Pompage par décharge électrique ou optique.
- Gain faible d'où la nécessité de miroirs quasi-parfaits ($R > 99,5\%$).

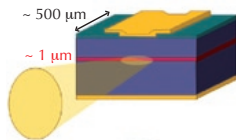


Les lasers à gaz

Laser	λ	Puissance	Rendement	Pompage	Mode	Applications
He-Ne	632,8 nm 543,5 nm 1,152 μm 3, 391 μm	1 à 100 mW	0,05%	elec.	C	codes barres alignement enseignement interférométrie
CO ₂	10,6 μm 9,6 μm	10 W-10 kW	25% 25%	elec. elec.	C I	chirurgie usinage
excimère Ar – F	193 nm	1 W	2%	elec.	I	Chirurgie réfractive

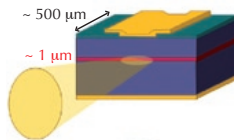
Les diodes lasers

- Milieu amplificateur : jonction semiconductrice.



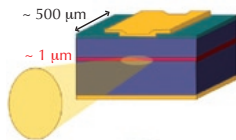
Les diodes lasers

- Milieu amplificateur : jonction semiconductrice.
- Pompage électrique.



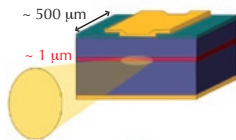
Les diodes lasers

- Milieu amplificateur : jonction semiconductrice.
- Pompage électrique.
- Très faible encombrement.
Divergence importante.



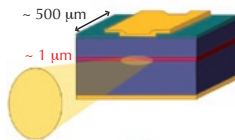
Les diodes lasers

- Milieu amplificateur : jonction semiconductrice.
- Pompage électrique.
- Très faible encombrement.
Divergence importante.
- Les plus vendus.



Les diodes lasers

- Milieu amplificateur : jonction semiconductrice.
- Pompage électrique.
- Très faible encombrement.
Divergence importante.
- Les plus vendus.



Laser	λ	Puissance	Rendement	Pompage	Mode	Applications
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	780-880 nm	qq mW	50%	elec.	C/I	lecteur CD
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	150-1150 nm	100 mW	50%	elec.	C I	Télécommunications Pompage laser

Applications

Les applications sont nombreuses :

- usinage laser dans l'industrie ;
- lecture numérique (codes barres, lecteur CD, DVD blue ray) ;
- télémétrie ;
- transport de l'information à haut débit ;
- domaine de la santé : Ophtalmologie, dermatologie, cancérologie ;
- gyrolaser ;
- imprimante laser ;
- vélocimétrie doppler ;
- refroidissement laser, métrologie ;
- femtochimie ;
- étude de la fusion thermonucléaire...

Progression

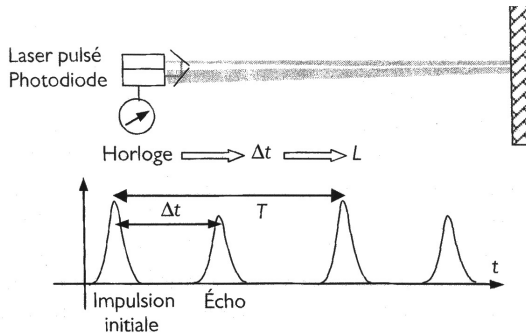
- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

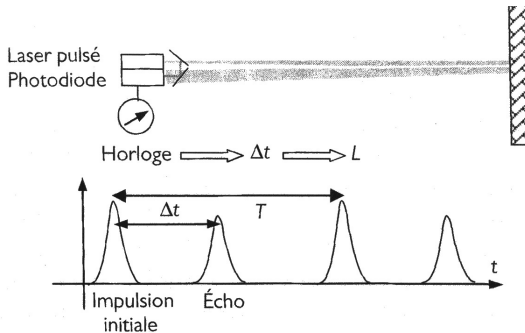
- **Télémétrie** : mesure de distance par un procédé optique, acoustique ou radio.

- **Télémétrie** : mesure de distance par un procédé optique, acoustique ou radio.
- **Propriété utilisée** : faible divergence, grande directivité.

- **Télémétrie** : mesure de distance par un procédé optique, acoustique ou radio.
- **Propriété utilisée** : faible divergence, grande directivité.
- **Méthode du temps de vol** : un laser pulsé envoie une série d'impulsions très brèves sur une cible située à la distance L . Le faisceau rétrodiffusé est détecté par une photodiode disposée à côté du laser. On déduit D du retard $\Delta t = 2L/c$



- **Télémétrie** : mesure de distance par un procédé optique, acoustique ou radio.
- **Propriété utilisée** : faible divergence, grande directivité.
- **Méthode du temps de vol** : un laser pulsé envoie une série d'impulsions très brèves sur une cible située à la distance L . Le faisceau rétrodiffusé est détecté par une photodiode disposée à côté du laser. On déduit D du retard $\Delta t = 2L/c$
- Application dans le bâtiment, l'armement ou en physique fondamentale...



Exemple : mesure de la distance Terre-Lune

- Laser YAG à impulsions de 300 ps.
10 impulsions/s.

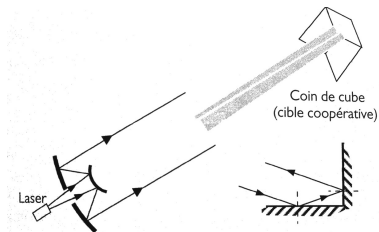


Figure: réflecteur lunaire

Exemple : mesure de la distance Terre-Lune

- Laser YAG à impulsions de 300 ps.
10 impulsions/s.
- Collimation par télescope de 1,54 m de diamètre. Diamètre de la tache sur la lune environ 10 km.

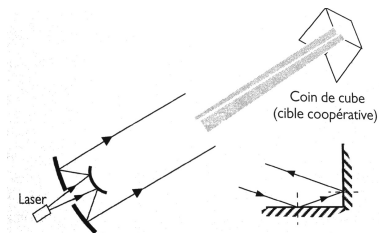


Figure: réflecteur lunaire

Exemple : mesure de la distance Terre-Lune

- Laser YAG à impulsions de 300 ps.
10 impulsions/s.
- Collimation par télescope de 1,54 m de diamètre. Diamètre de la tache sur la lune environ 10 km.
- Précision de l'horloge atomique
7 ps. Précision relative sur la distance : $1/10^{11}$ Accès aux effets relativistes ($(v/c)^2 \sim 10^{-10}$)

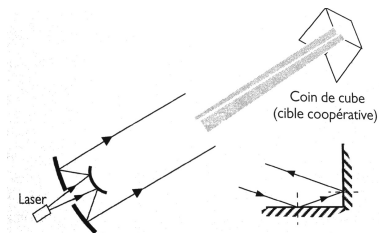


Figure: réflecteur lunaire

Progression

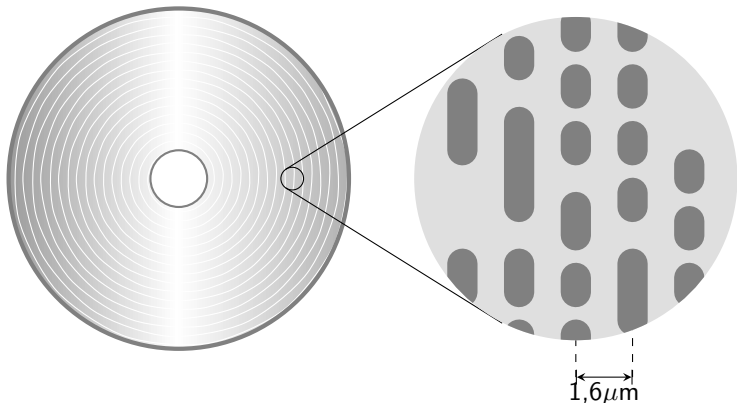
- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

Description

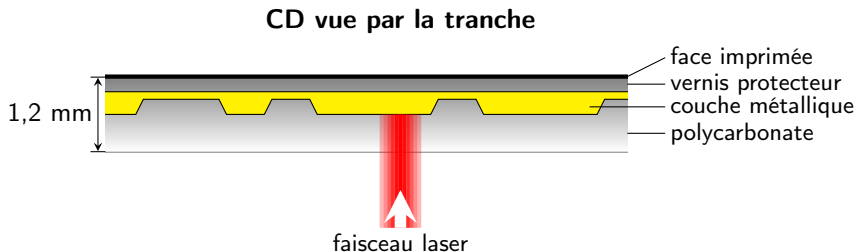
Les premiers disques ont été inventés en 1982 par Sony et Philips. il s'agit d'une galette de 12 cm de diamètre sur laquelle est gravée un sillon qui forme une spirale. Ce sillon, qui fait près de 5 km de long, est constitué de creux dont la profondeur est de l'ordre du dixième de micron.

CD vu de dessus



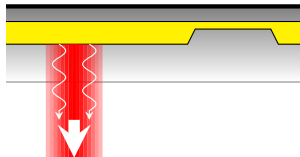
Description

Le disque est constitué d'un polymère (polycarbonate) pourvu de creux et de bosses, recouvert d'une couche métallique réfléchissante puis d'une feuille protectrice. Un laser focalisé sur la piste est réfléchi par la couche métallique. En balayant la piste, le laser visite des creux et des bosses ce qui module l'intensité réfléchie.



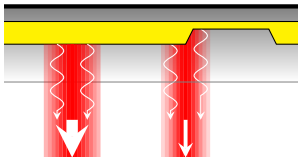
Principe de lecture laser

- Lorsque le faisceau laser arrive sur un plat, une grande partie du faisceau est réfléchi (90%).



Principe de lecture laser

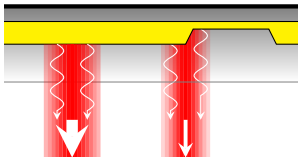
- Lorsque le faisceau laser arrive sur un plat, une grande partie du faisceau est réfléchi (90%).



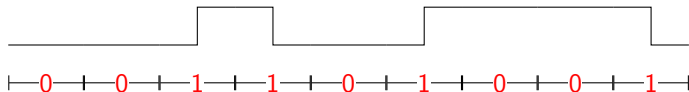
- Lorsque le faisceau rencontre un changement de relief, la lumière réfléchi comporte deux ondes déphasés. La profondeur des creux est telle que le décalage optique introduit vaut $\lambda/2$: les ondes sont alors en opposition de phase et interfèrent de façon destructive : la lumière recueillie présente une intensité faible.

Principe de lecture laser

- Lorsque le faisceau laser arrive sur un plat, une grande partie du faisceau est réfléchi (90%).



- Lorsque le faisceau rencontre un changement de relief, la lumière réfléchi comporte deux ondes déphasés. La profondeur des creux est telle que le décalage optique introduit vaut $\lambda/2$: les ondes sont alors en opposition de phase et interfèrent de façon destructive : la lumière recueillie présente une intensité faible.
- Lorsque le laser balaye la piste, l'intensité est modulée et transformée en un signal électrique binaire.



Principe de lecture laser

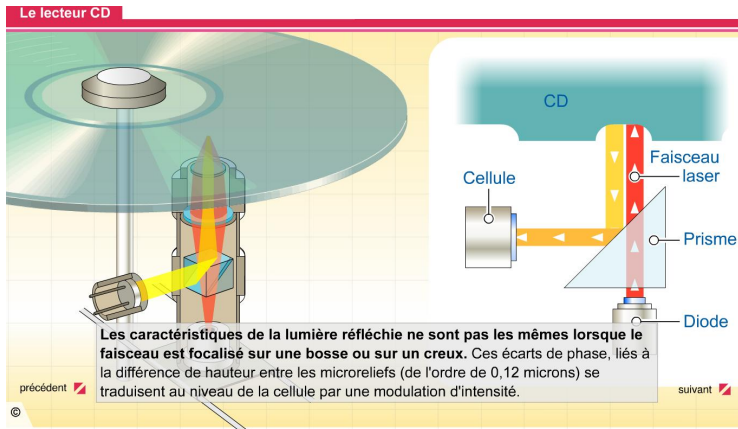


Figure: Principe de lecture CD

Capacité de Stockage

- La capacité de stockage mesure le nombre de données binaires que le disque peut contenir. Il se mesure en bit ou en octet :

1 octet = 8 bit et 1 Ko = 1024 octet ...

Capacité de Stockage

- La capacité de stockage mesure le nombre de données binaires que le disque peut contenir. Il se mesure en bit ou en octet :

$$1 \text{ octet} = 8 \text{ bit} \quad \text{et} \quad 1 \text{ Ko} = 1024 \text{ octet} \dots$$

- La tache de focalisation est limitée par la diffraction. Son diamètre est de l'ordre $\phi \sim \lambda$ ce qui correspond à une aire $\mathcal{A}_0 \simeq \lambda^2$. Si \mathcal{A} désigne la surface effective où sont stockées les données, la capacité maximale de stockage est donnée par

$$N_{\max} = \frac{A}{A_0} \simeq \frac{A}{\lambda^2} \text{ bit}$$

Capacité de Stockage

- La capacité de stockage mesure le nombre de données binaires que le disque peut contenir. Il se mesure en bit ou en octet :

$$1 \text{ octet} = 8 \text{ bit} \quad \text{et} \quad 1 \text{ Ko} = 1024 \text{ octet} \dots$$

- La tache de focalisation est limitée par la diffraction. Son diamètre est de l'ordre $\phi \sim \lambda$ ce qui correspond à une aire $\mathcal{A}_0 \simeq \lambda^2$. Si \mathcal{A} désigne la surface effective où sont stockées les données, la capacité maximale de stockage est donnée par

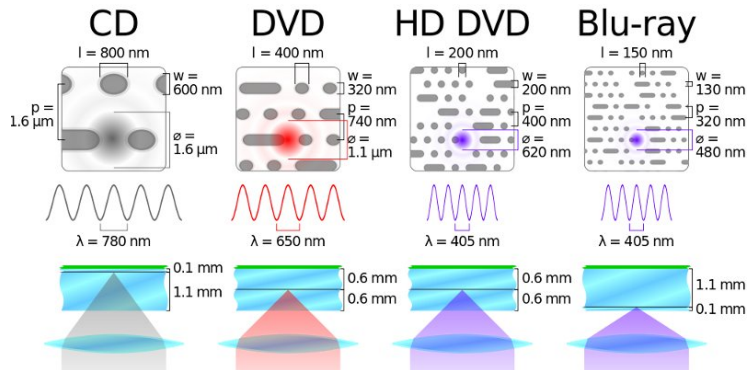
$$N_{\max} = \frac{A}{\mathcal{A}_0} \simeq \frac{A}{\lambda^2} \text{ bit}$$

- **Par exemple :**

$$\lambda = 800 \text{ nm} \quad \text{et} \quad \mathcal{A} \simeq 0,01 \text{ m}^2 \quad \Longrightarrow \quad N_{\max} \simeq 10^{10} \text{ bit} \simeq 1 \text{ Go}$$

Capacité de Stockage

Ainsi, pour améliorer le stockage on cherche en général à diminuer λ et à augmenter la surface effective.



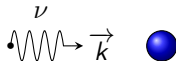
Progression

- 1 Principe du laser
 - Description
 - Emission stimulée
 - Inversion de population
 - Rôle de la cavité résonante
 - Exemples

- 2 Applications
 - Télémétrie
 - Lecture CD et DVD
 - Refroidissement laser

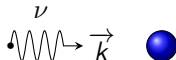
Impulsion de recul

- Envoyons un faisceau laser de fréquence ν sur un atome au repos présentant une raie d'absorption de fréquence ν_0 .



Impulsion de recul

- Envoyons un faisceau laser de fréquence ν sur un atome au repos présentant une raie d'absorption de fréquence ν_0 .

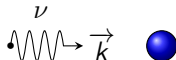


- Chaque photon transporte une quantité de mouvement

$$p_{\text{ph}} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

Impulsion de recul

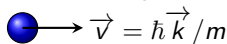
- Envoyons un faisceau laser de fréquence ν sur un atome au repos présentant une raie d'absorption de fréquence ν_0 .



- Chaque photon transporte une quantité de mouvement

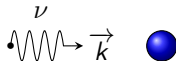
$$p_{\text{ph}} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

- Si $\nu = \nu_0$, la probabilité d'absorption est maximale : l'atome reçoit alors une quantité de mouvement $\Delta \vec{p} = \hbar \vec{k}$ (impulsion de recul).



Impulsion de recul

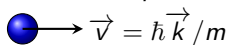
- Envoyons un faisceau laser de fréquence ν sur un atome au repos présentant une raie d'absorption de fréquence ν_0 .



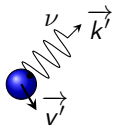
- Chaque photon transporte une quantité de mouvement

$$p_{\text{ph}} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

- Si $\nu = \nu_0$, la probabilité d'absorption est maximale : l'atome reçoit alors une quantité de mouvement $\Delta \vec{p} = \hbar \vec{k}$ (impulsion de recul).



- Le photon absorbé est ensuite réémis (émission spontanée) dans une direction aléatoire et le processus recommence.



Impulsion de recul

- Au maximum le processus se répète tous les 2τ (durée de vie de l'état excitée) d'où une force maximale

$$\vec{F}_{\max} = \frac{\Delta \vec{p}}{2\tau} = \frac{\hbar \vec{k}}{2\tau}$$

Impulsion de recul

- Au maximum le processus se répète tous les 2τ (durée de vie de l'état excitée) d'où une force maximale

$$\vec{F}_{\max} = \frac{\Delta \vec{p}}{2\tau} = \frac{\hbar \vec{k}}{2\tau}$$

- Pour la transition à $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ du césium 133 ($\tau = 3.10^{-8} \text{ s}$) on trouve un freinage $a = F_{\max}/m = 6000 \text{ g}$!

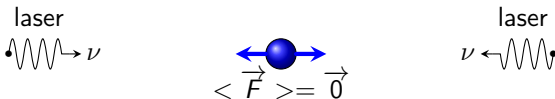
Ralentissement Doppler

Objectif : Freiner des atomes quelle que soit leur vitesse.

Ralentissement Doppler

Objectif : Freiner des atomes quelle que soit leur vitesse.

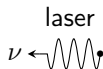
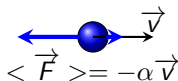
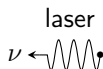
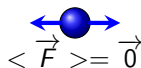
- On envoie deux lasers de fréquence $\nu < \nu_0$ de sorte qu'un atome immobile ne ressent aucune force et reste donc immobile.



Ralentissement Doppler

Objectif : Freiner des atomes quelle que soit leur vitesse.

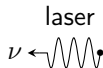
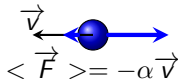
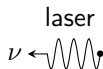
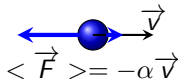
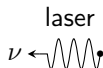
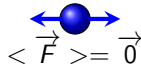
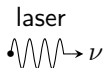
- On envoie deux lasers de fréquence $\nu < \nu_0$ de sorte qu'un atome immobile ne ressent aucune force et reste donc immobile.
- Si l'atome se rapproche d'un laser il absorbe préférentiellement un photon du laser vers lequel il se rapproche de sorte qu'il est toujours freiné.



Ralentissement Doppler

Objectif : Freiner des atomes quelle que soit leur vitesse.

- On envoie deux lasers de fréquence $\nu < \nu_0$ de sorte qu'un atome immobile ne ressent aucune force et reste donc immobile.
- Si l'atome se rapproche d'un laser il absorbe préférentiellement un photon du laser vers lequel il se rapproche de sorte qu'il est toujours freiné.



Refroidissement Doppler

- Diminuer l'énergie cinétique d'un gaz c'est le refroidir :

$$\left\langle \frac{1}{2}mv^2 \right\rangle = \frac{3}{2}k_B T \quad \text{avec} \quad k_B = \frac{R}{\mathcal{N}_a}$$

Refroidissement Doppler

- Diminuer l'énergie cinétique d'un gaz c'est le refroidir :

$$\left\langle \frac{1}{2}mv^2 \right\rangle = \frac{3}{2}k_B T \quad \text{avec} \quad k_B = \frac{R}{\mathcal{N}_a}$$

- Il existe une **limite Doppler**

$$k_B T_{\min} = \frac{\hbar}{2\tau} \quad \Rightarrow \quad T_{\min} \sim 100 \mu\text{K}$$

Refroidissement Doppler

- Diminuer l'énergie cinétique d'un gaz c'est le refroidir :

$$\left\langle \frac{1}{2}mv^2 \right\rangle = \frac{3}{2}k_B T \quad \text{avec} \quad k_B = \frac{R}{\mathcal{N}_a}$$

- Il existe une **limite Doppler**

$$k_B T_{\min} = \frac{\hbar}{2\tau} \quad \implies \quad T_{\min} \sim 100 \mu\text{K}$$

- La limite Doppler a été dépassée et le record actuel est de 450 pK (MIT 2003) !

Intérêt du refroidissement laser

Gain de précision des horloges atomiques

- Définition de la seconde : La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos.

Intérêt du refroidissement laser

Gain de précision des horloges atomiques

- Définition de la seconde : La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos.
- La précision des horloges atomiques est inversement proportionnelle à la vitesse des atomes de Césium que l'on sonde.

Intérêt du refroidissement laser

Gain de précision des horloges atomiques

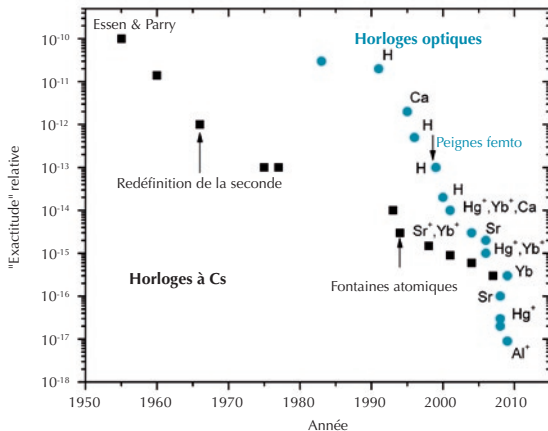


Figure: ©Reflète de la Physique n° 21 / Le Bup n° 927

Interférométrie atomique

- Dualité onde-corpuscule : loi de De Broglie $\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$.

Interférométrie atomique

- Dualité onde-corpuscule : loi de De Broglie $\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$.
- Pour un gaz d'atome dans une mélasse optique on a

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{mv} \sim \mu\text{m}$$

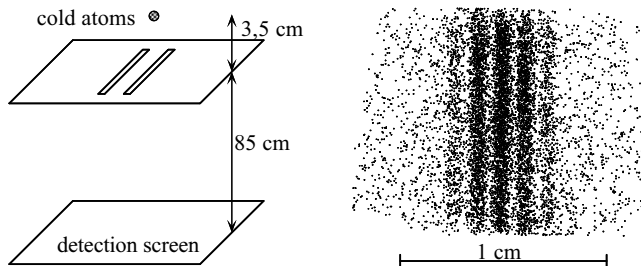


Figure: Expérience des fentes d'Young avec des atomes

Interférométrie atomique

- Dualité onde-corpuscule : loi de De Broglie $\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$.
- Pour un gaz d'atome dans une mélasse optique on a

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{mv} \sim \mu\text{m}$$

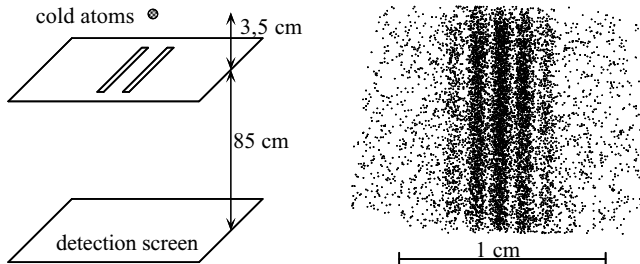


Figure: Expérience des fentes d'Young avec des atomes

- Parce que les atomes ont une masse, les nouveaux « interféromètres atomiques » sont remarquablement sensibles aux effets de la force de gravitation ou des forces d'inertie.

The Nobel Prize in Physics 1997



Steven Chu
Prize share: 1/3



Claude Cohen-Tannoudji
Prize share: 1/3



William D. Phillips
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 1997 was awarded jointly to Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips *"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"*.

The Nobel Prize in Physics 2001



Eric A. Cornell
Prize share: 1/3



Wolfgang Ketterle
Prize share: 1/3



Carl E. Wieman
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2001 was awarded jointly to Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle and Carl E. Wieman *"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"*.

Bibliographie – Webographie



F. Bretenaker et N Treps

Le laser, coll. Une introduction à
EDP sciences, 2010



S. Houard

Optique - une approche expérimentale et pratique
Ed. DeBoeck



D. Dangoisse et al.

Les lasers
Ed. Dunod



R. Farcy

Application des lasers
Ed. Masson