



**HAL**  
open science

## Les lasers : bientôt 50 ans !

Lucile Julien

► **To cite this version:**

| Lucile Julien. Les lasers : bientôt 50 ans!. Licence. 2009. sfo-00419699

**HAL Id: sfo-00419699**

**<https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/sfo-00419699>**

Submitted on 24 Sep 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Les lasers : bientôt 50 ans !

Lucile JULIEN



9 septembre 2009, COLOQ'11, Mouans-Sartoux

# Le laboratoire Kastler Brossel

fondé par Alfred Kastler et Jean Brossel en 1951



A. Kastler

Laboratoire  
de spectroscopie hertzienne  
de l'ENS



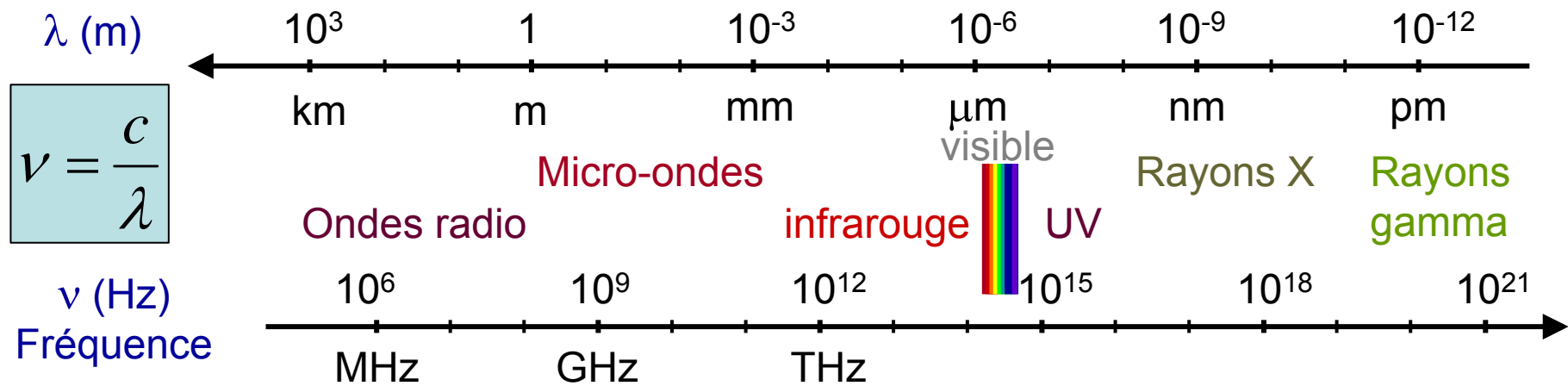
J. Brossel

- Interaction atomes - rayonnement
- Pompage optique (prix Nobel 1966)

# Le rayonnement électromagnétique

- un champ électrique et un champ magnétique  $(\vec{E}, \vec{B})$  couplés entre eux et oscillants...
- ... dans un large domaine de fréquence / longueur d'onde

Longueur d'onde



- il se propage dans le vide à la vitesse  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$
- et se comporte à la fois comme une onde et comme un corpuscule (photon)



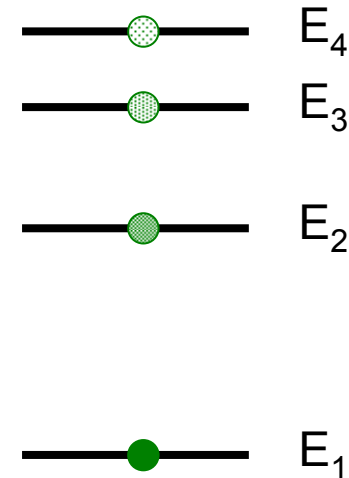
# L'interaction atome - rayonnement



Prix Nobel 1922

Niels Bohr (1913)

- L'énergie de l'atome est quantifiée :  
il possède des niveaux d'énergie



- L'atome ne peut absorber ou émettre la lumière qu'à des fréquences bien particulières telles que :

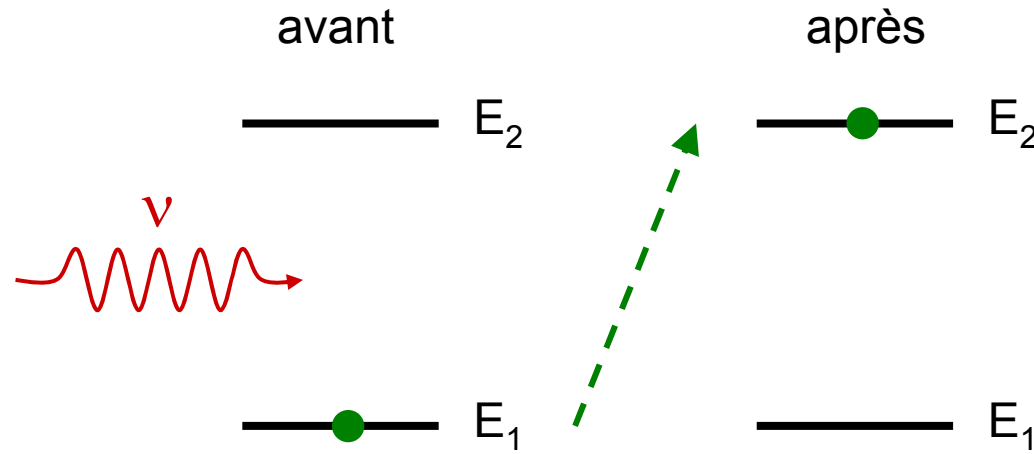
$$E_2 - E_1 = h\nu$$

(condition de résonance)

- Il le fait lors de "sauts quantiques"

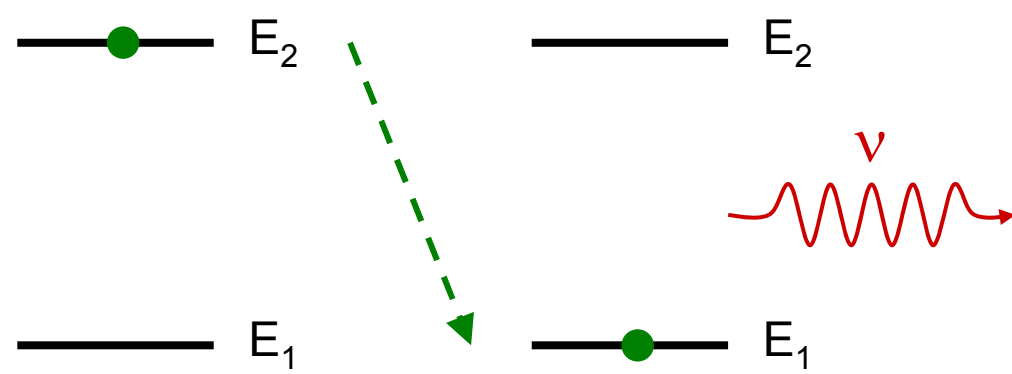
# Deux processus d'interaction résonnante :

Absorption



$$E_2 - E_1 = h\nu$$

Emission spontanée



Lors de ces processus d'interaction atome + photon,  
il y a **conservation** :

- de l'énergie
- de la quantité de mouvement
- du moment cinétique

comme pour tout système isolé (loi de la physique)

- l'énergie du photon est  $h\nu$
- nous verrons plus loin sa quantité de mouvement
- son moment cinétique dépend de la polarisation de l'onde

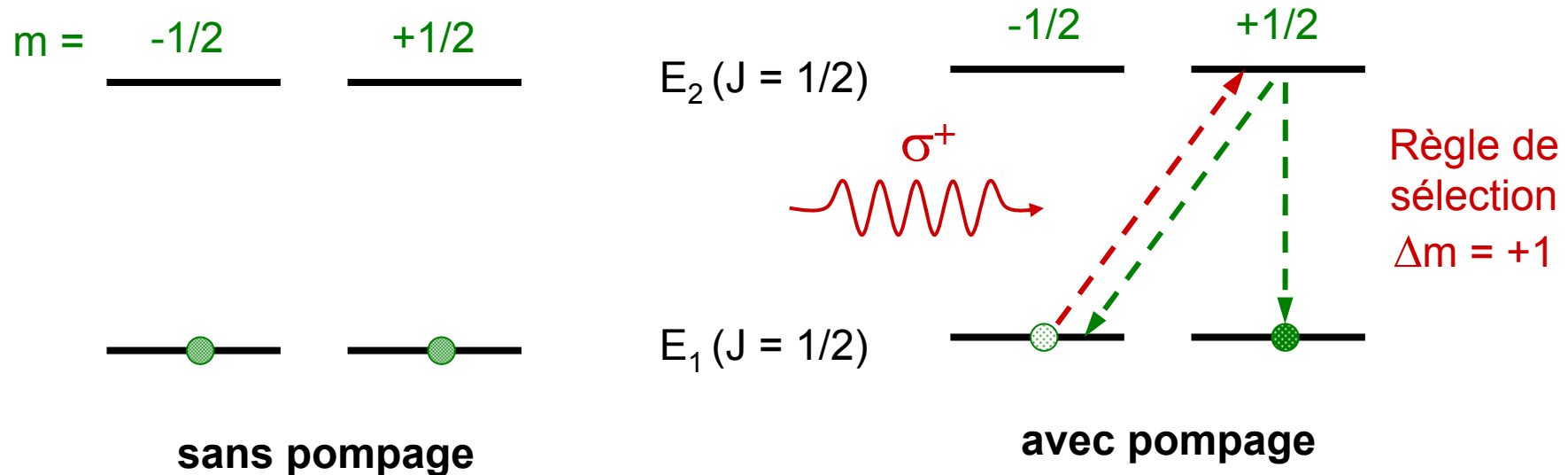
Utiliser la lumière et/ou une onde hertzienne pour transférer de l'énergie et/ou du moment cinétique à un atome, c'est faire du **pompage optique**

# Le pompage optique

Cette technique, inventée par Alfred Kastler et Jean Brossel en 1950, permet de transférer du moment cinétique aux atomes, en utilisant de la lumière polarisée.

Les niveaux atomiques de  $J \neq 0$  possèdent des sous-niveaux Zeeman. Les règles de sélection, valables pour l'absorption et l'émission spontanée, permettent de peupler préférentiellement certains de ces sous-niveaux en utilisant de la lumière polarisée, par exemple circulairement.

Exemple : niveau fondamental d'un alcalin ou du mercure



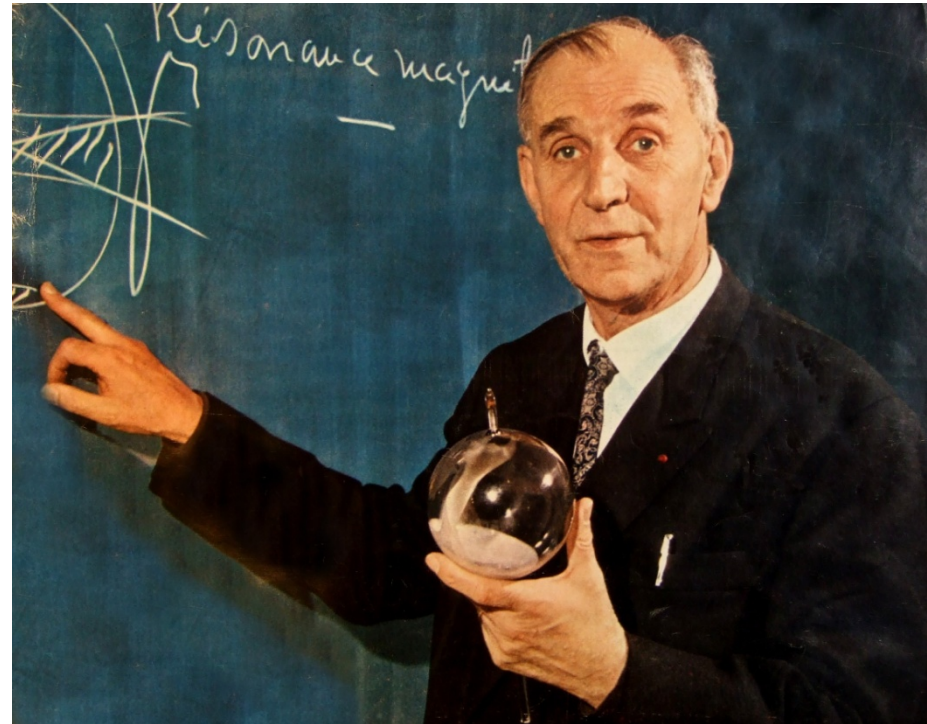


On crée ainsi de l'orientation atomique :  
le moment cinétique de l'atome  
(et donc son moment magnétique)  
pointe dans une direction privilégiée.

Cette orientation peut être détruite, soit  
par relaxation sur les parois de la  
cellule, soit par résonance magnétique.

On peut ainsi étudier les moments  
magnétiques des atomes et des  
noyaux atomiques.

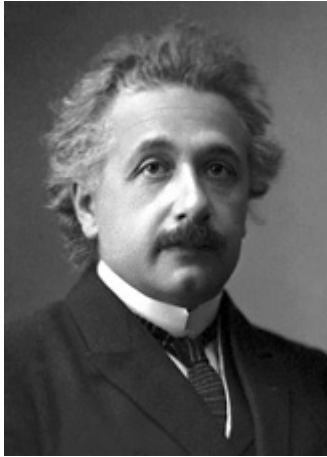
Exemple : imagerie des poumons  
avec de l'hélium 3 polarisé.



**Alfred Kastler**  
**Prix Nobel 1966**

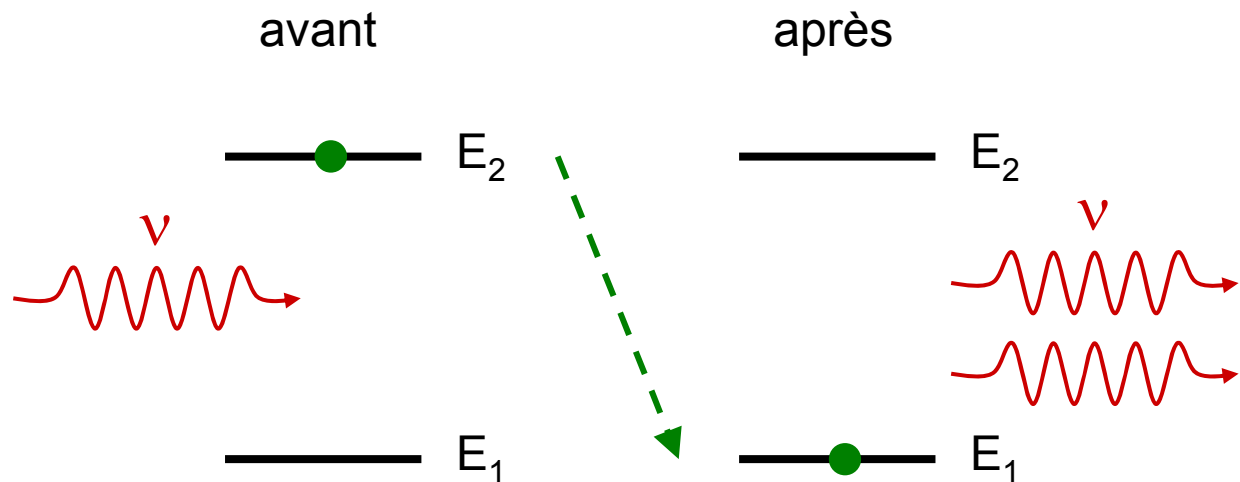
**Le pompage optique utilise les processus  
d'absorption et d'émission spontanée**

# Un troisième processus d'interaction résonnante !



Albert Einstein  
(1917)

## L'émission induite



Le deuxième photon, émis par émission induite, a les mêmes propriétés que le photon incident : la lumière se trouve **amplifiée** par l'atome.

# Comment observer l'émission induite ?

Cela n'est pas facile car elle est toujours en concurrence avec l'absorption :

- l'absorption atténue le rayonnement incident  
elle est proportionnelle à la population du niveau  $E_1$
- l'émission induite l'amplifie  
elle est proportionnelle à la population du niveau  $E_2$



Il faut avoir plus d'atomes dans l'état  $E_2$  que dans l'état  $E_1$  :  
c'est ce qu'on appelle une **inversion de population**.

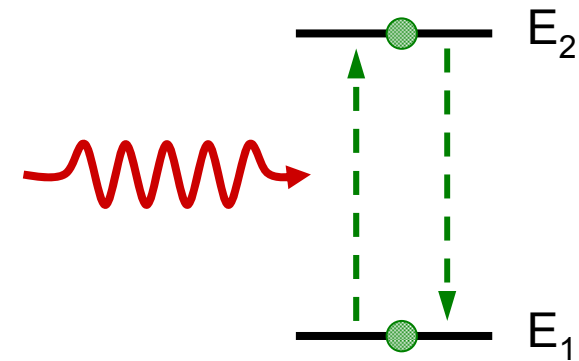


Mais dans son état "normal" (à l'équilibre thermodynamique)  
l'état du bas est toujours le plus peuplé.

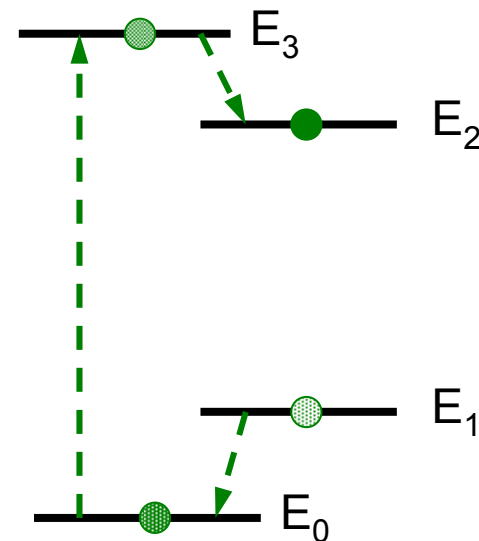
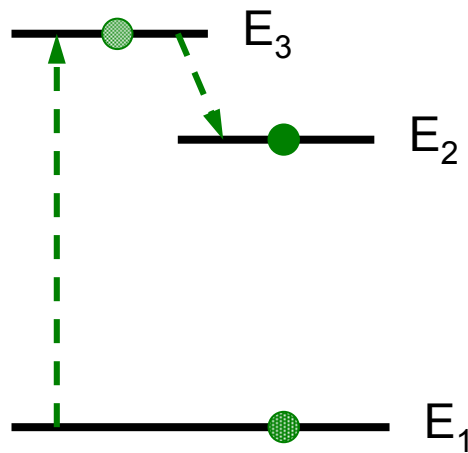


# Le pompage optique pour créer une inversion de population

**Impossible avec seulement deux niveaux :**  
avec un faisceau intense,  
il y a autant d'absorption que d'émission induite  
et on crée une égalité des populations



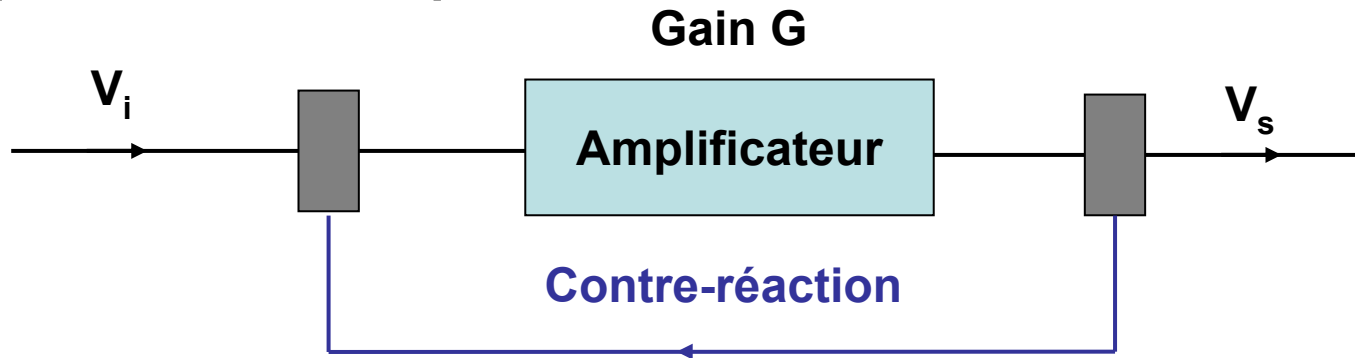
**Mais possible avec trois ou quatre niveaux :**



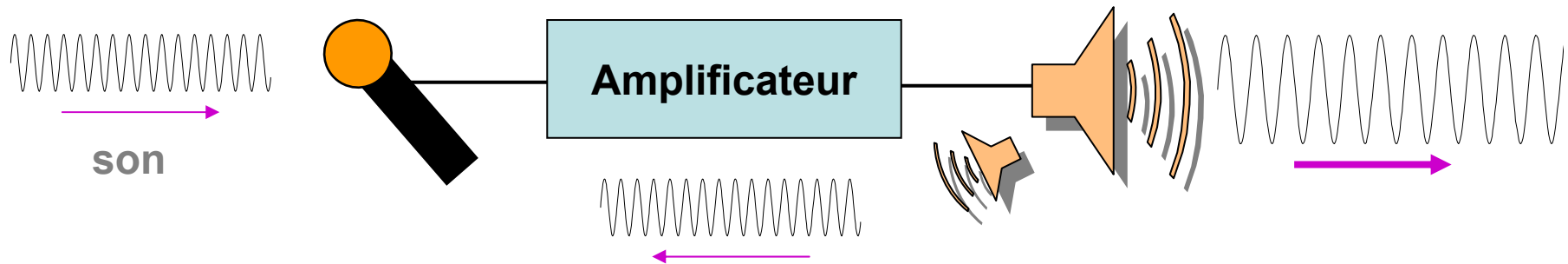
# Amplificateurs et oscillateurs

**Avec un amplificateur, on peut construire un oscillateur**

**Exemple de l'électronique**



**Autre exemple : l'effet Larsen**



**Pourquoi pas un oscillateur dont la grandeur oscillante serait le champ électromagnétique ?**

# Le MASER

**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Développement de la technologie des radars pendant la deuxième guerre mondiale  
Sources micro-ondes provenant des surplus militaires

## L'idée de base du maser :

- Charles H. Townes (Columbia University)
- Joseph Weber (University of Maryland)
- Alexander M. Prokhorov et Nikolaï G. Basov (Institut Lebedev, Moscou)

## Comment réaliser un maser ? (Townes, 1951, l'idée du maser à $\text{NH}_3$ )

Pendant un congrès à Washington, assis sur un banc dans un parc, pendant que son post-doc Arthur L. Schawlow dormait encore...

« Peut-être est-ce l'air frais du matin qui me fit voir soudain que c'était possible : en quelques minutes, je fis un schéma et calculais ce dont on avait besoin pour réaliser un jet moléculaire, sélectionner les molécules du niveau d'énergie supérieure et les envoyer dans une cavité contenant le rayonnement électromagnétique pour obtenir l'émission stimulée, puis rétroagir sur le rayonnement et obtenir une oscillation continue. »

# Le premier maser (1954)

J.P. Gordon, H.J. Zeiger et C.H. Townes

**Molécules d'ammoniac  $\text{NH}_3$**

Sélection par un champ électrique

Cavité micro-onde résonnante à 24 GHz

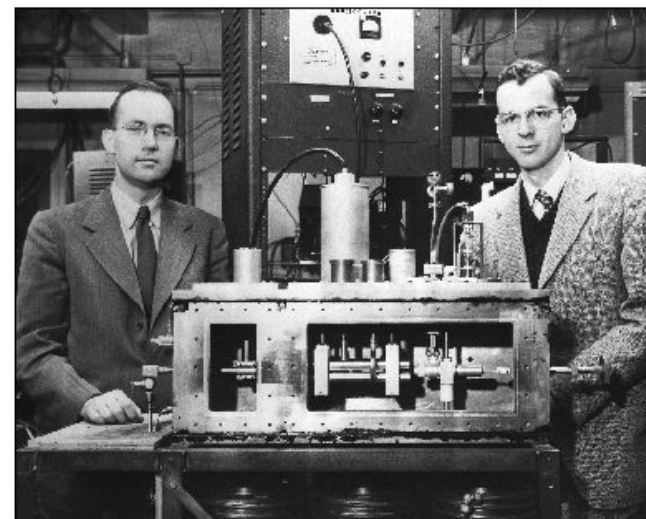
Longueur d'onde 1,25 cm

et quelques mois plus tard à Moscou

par N.G. Basov et A.M. Prokhorov

sélection par pompage (3 niveaux)

Townes et Gordon



**Prix Nobel de physique 1964**

Townes, Basov et Prokhorov

D'autres masers suivront :

**Maser à hydrogène (1960)**

Harvard University

N. Ramsey, H.M. Goldenberg et D. Kleppner



Maser à H  
référence  
de fréquence  
ultra-stable

# Le LASER

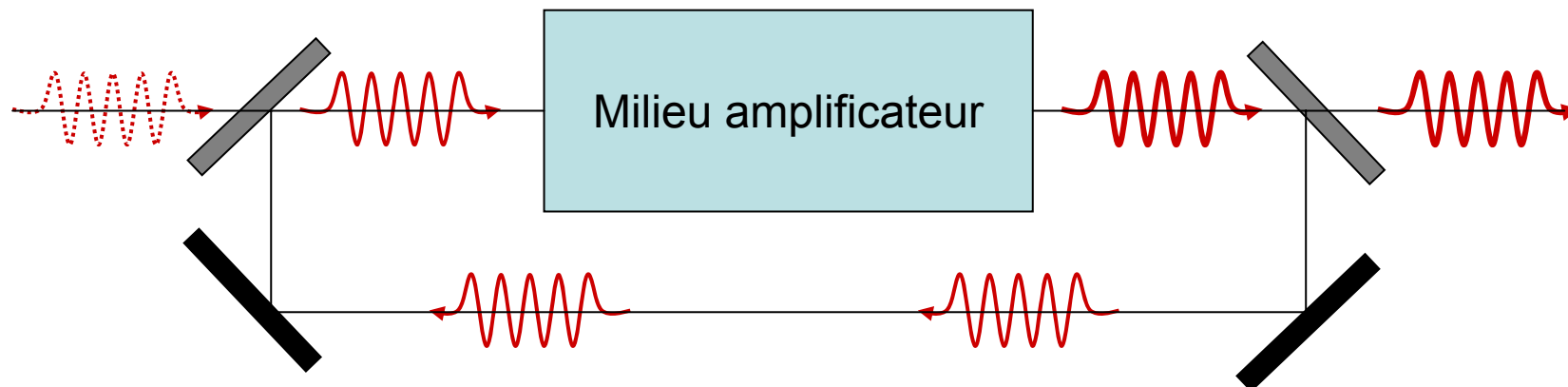
Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Appelé dans un premier temps "maser optique "

Diverses propositions sont faites dans les années 50 pour obtenir des populations différentes de l'équilibre dans un milieu atomique et réaliser l'amplification de rayonnement optique

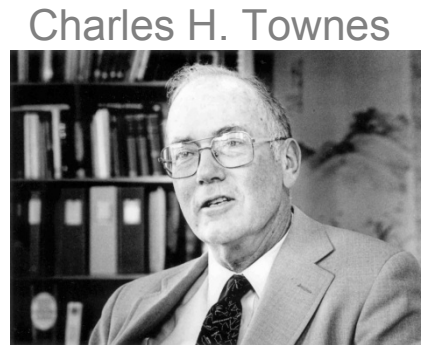
**Mais passer du maser au laser est loin d'être évident ...**

- Les énergies en jeu sont beaucoup plus grandes
- Les longueurs d'onde beaucoup plus petites
- Comment réaliser la contre-réaction optique?



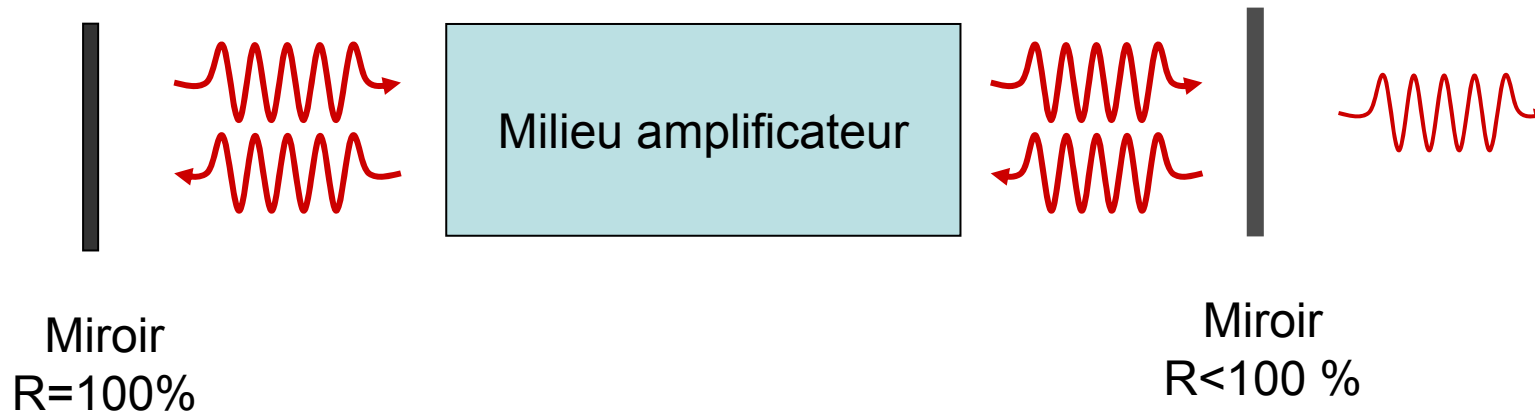


En 1958, Schawlow et Townes font la proposition d'un **maser optique** avec une cavité de type Fabry-Perot



Arthur L. Schawlow

La **cavité Fabry-Perot** est bien connue en interférométrie : elle est constituée de deux miroirs se faisant face



La longueur d'un aller-retour dans la cavité doit être un multiple de la longueur d'onde :

$$2L = p\lambda_p \quad (p \text{ entier})$$

Condition d'interférences constructives

**L'article de Schawlow et Townes en 1958 dans Physical Review  
"Infrared and optical masers" aura un fort retentissement et marquera  
le début d'une véritable **course au laser** :**

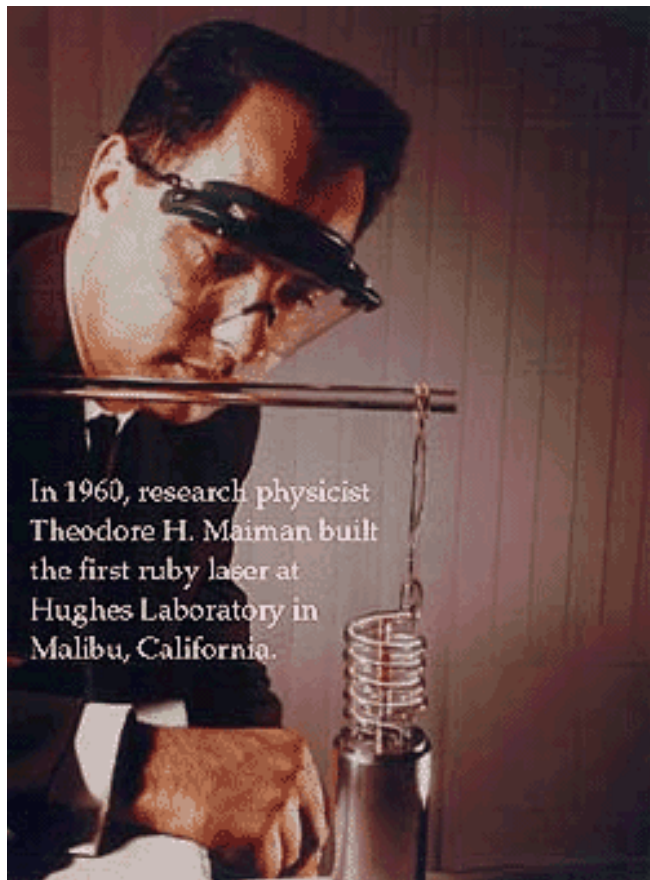
- à Columbia University (Townes)
- aux Bell Labs (Javan, Schawlow)
- à Moscou (Basov et Prokhorov)
- et dans des compagnies privées (Gould)
- .....

**dont le gagnant fut un outsider  
qui n'était pas censé travailler sur ce projet**

# Le premier laser

laser à solide (rubis) pompé par flash

Theodore H. Maiman, 16 mai 1960  
Hughes Research Laboratories, Malibu, Californie



**Le vrai !**

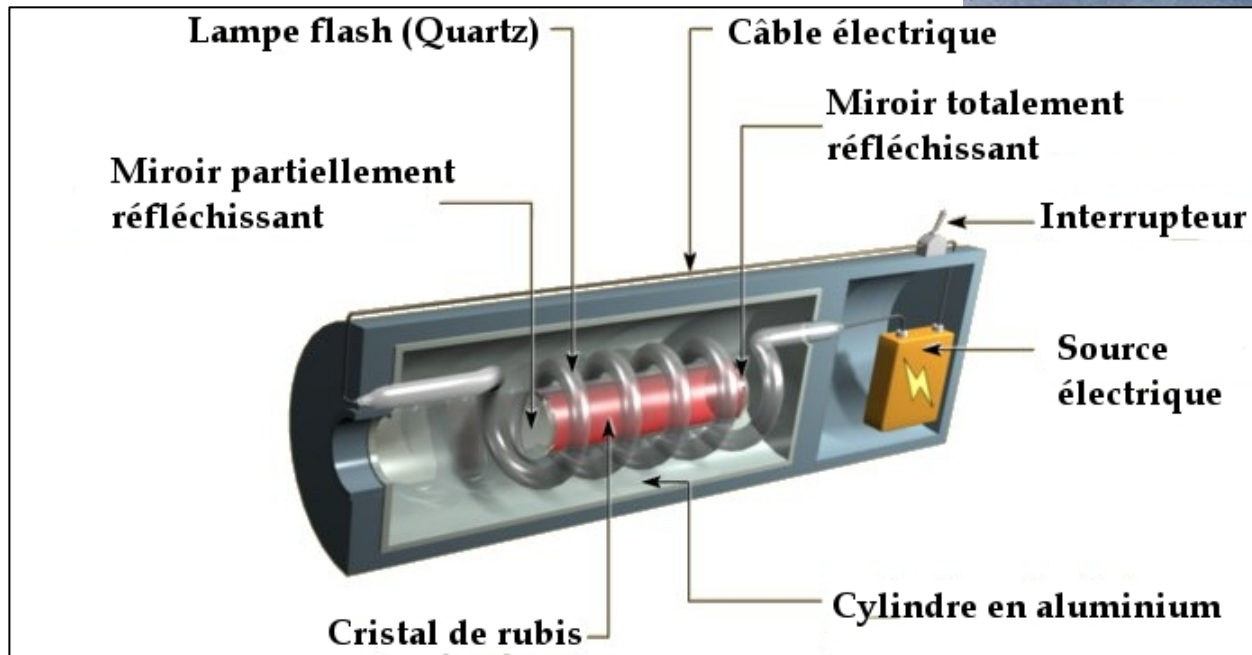
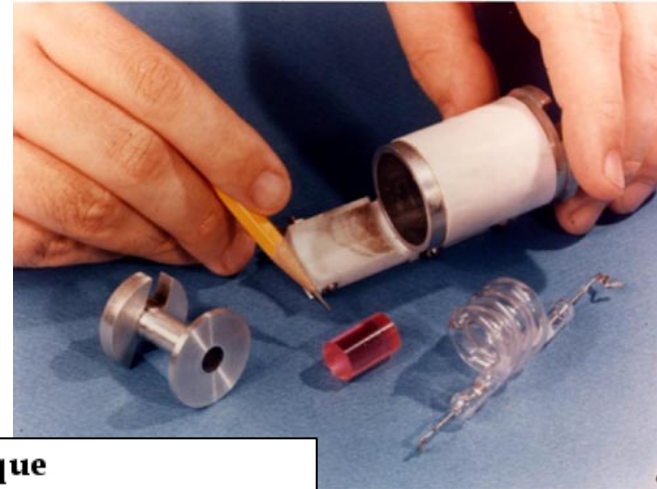
Longueur d'onde 694 nm

Le photographe avait trouvé le dispositif trop petit ...

... et l'article fut refusé par Physical Review Letters ("encore un papier sur un maser ")

## le laser à rubis

Le cylindre de rubis (\*) est entouré d'un serpentín de verre dans lequel on allume une décharge électrique



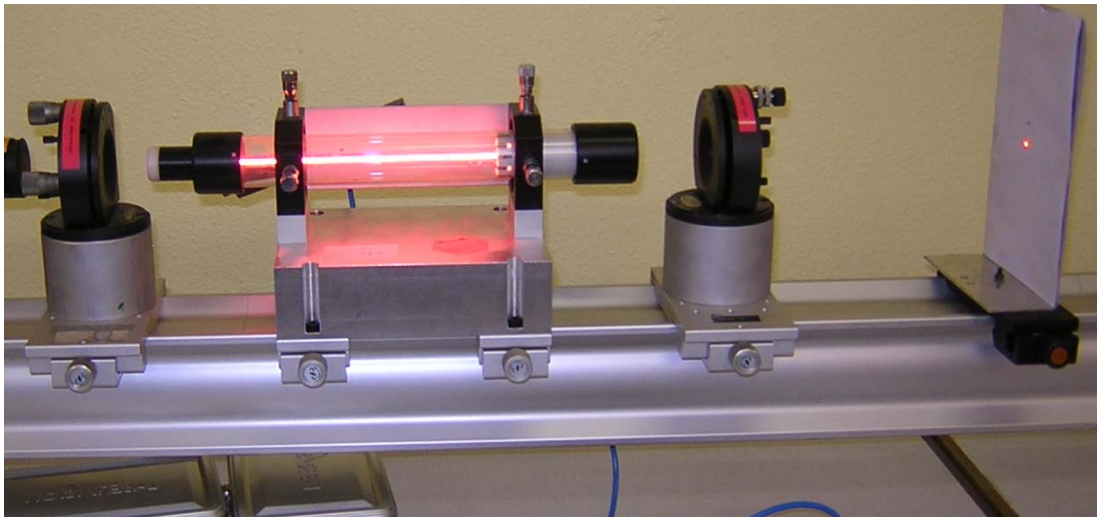
(\*) rubis :  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  dopé au  $\text{Cr}^{3+}$

Résumé publié dans Nature (1960) ; articles détaillés dans Physical Review (1961)

## Le premier laser à gaz : le laser hélium-néon

Ali Javan (1961)  
Bell Labs

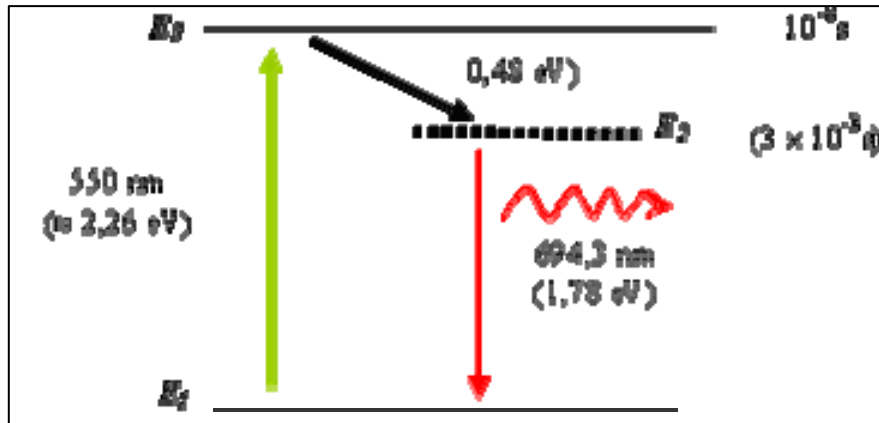
Longueur d'onde  
 $1,15 \mu\text{m}$  ...



... puis 633 nm

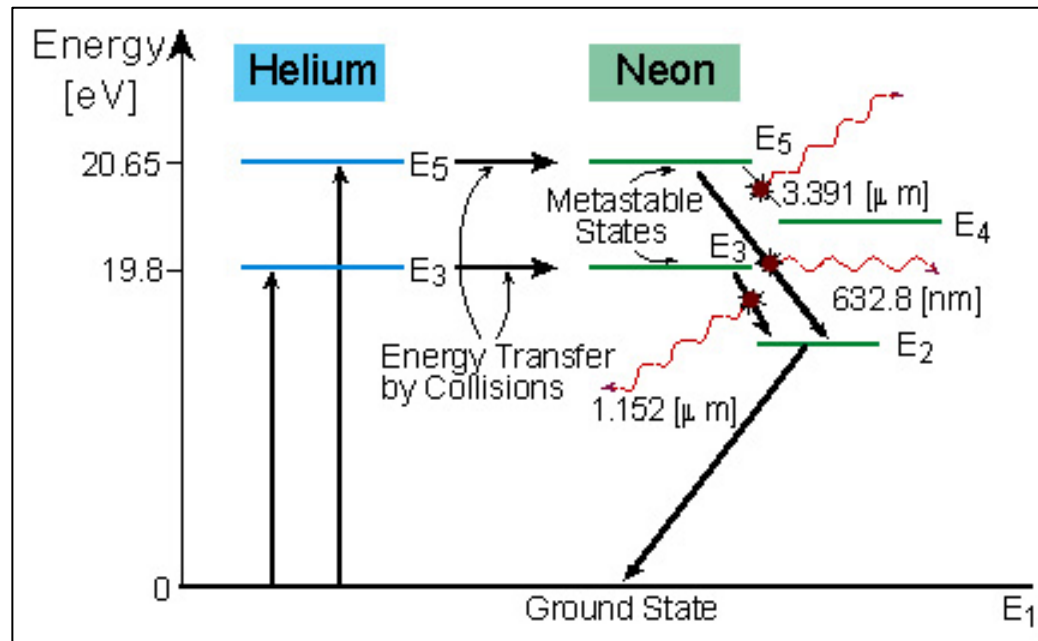
A.D. White et J.D. Rigden  
(1962)  
Bell Labs

# Lasers à trois ou quatre niveaux ?



**Laser à rubis**

**Laser Ne-Ne**  
Le premier laser émettant en continu



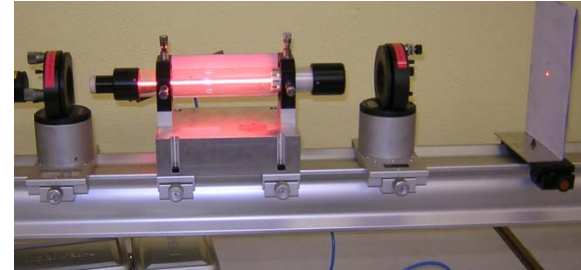
Le mécanisme de pompage "à quatre niveaux" est plus efficace et permet de fonctionner en continu

# Début d'une longue série...

Milieux amplificateurs, pompages et longueurs d'onde variés

## Lasers à gaz

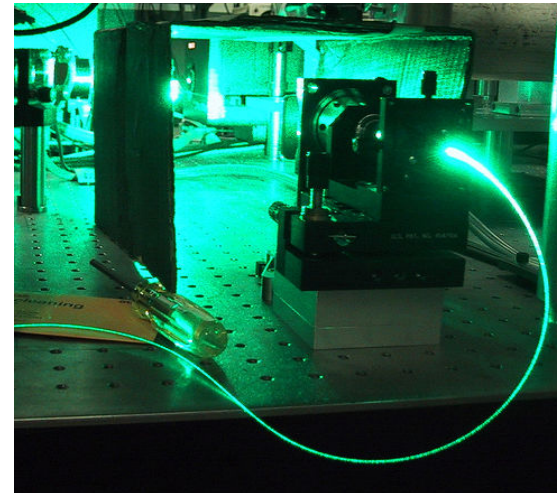
- laser He-Ne (1961), gaz atomique  
Décharge électrique et collisions entre atomes  
1,15  $\mu\text{m}$  - 3,39  $\mu\text{m}$  - 633 nm, 1 à 100 mW



## Lasers les plus répandus pendant plus de 20 ans

- laser à vapeur de Cs (1961), gaz atomique, 3,2  $\mu\text{m}$  - 7,2  $\mu\text{m}$
- laser CO<sub>2</sub>, (1962), gaz moléculaire, 9,6  $\mu\text{m}$  - 10,6  $\mu\text{m}$ , 1 à 10 kW
- laser à azote (1963) gaz moléculaire N<sub>2</sub>
- lasers ioniques, gaz atomique ionisé (1964)

Hg<sup>+</sup> (1963) IR  
Ar<sup>+</sup>, nombreuses raies : 514 nm ...  
100 mW à 50 W



# Lasers à solides (1) Très répandus

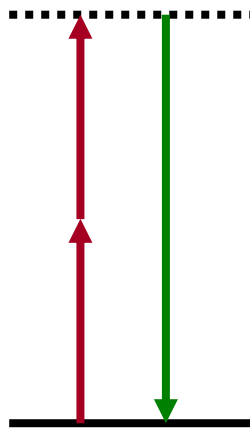
**Lasers à rubis** (les premiers lasers sont commercialisés en 1961)

**Lasers à YAG** (**G**renat d'**Y**ttrium et d'**A**luminium  $Y_3^{3+}Al_5^{3+}O_{12}^{2-}$ ) (1964)

Nd:YAG des ions  $Nd^{3+}$  sont substitués aux ions  $Y^{3+}$  "dopage "

Pompage optique, 1064 nm, proche infrarouge, 10 W

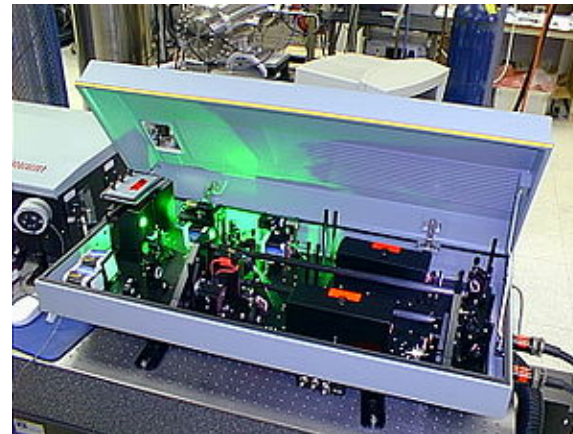
On peut doubler (ou tripler) leur fréquence dans un cristal non-linéaire



YAG doublé  
532 nm



Pointeur laser vert

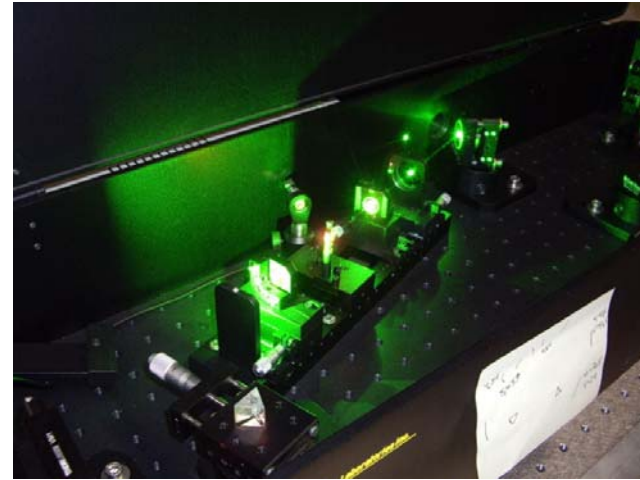




## Lasers à solides (2)

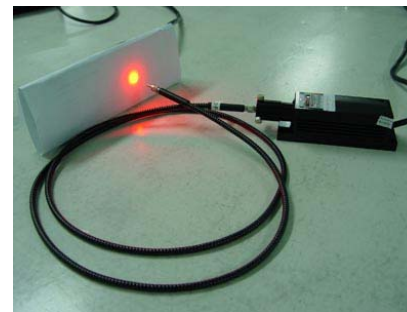
### Lasers Ti:saphir

Pompage optique par YAG doublé ou  $\text{Ar}^+$   
large spectre de 700 à 1100 nm, accordable,  
1 à 50 W (1986)



### Lasers à fibres optiques

La lumière est guidée dans le milieu  
amplificateur qui peut être très long  
Pompage optique par diode laser



$\text{Er}^{3+}$ :verre, IR 1550 nm, 1 W

Les fibres optiques dopées à l'erbium sont utilisées comme amplificateurs  
dans les télécommunications

## Lasers à solides (3)

### Lasers à semi-conducteurs (diodes lasers)

On sait contrôler monocouche par monocouche le dépôt de semi-conducteurs sur un substrat

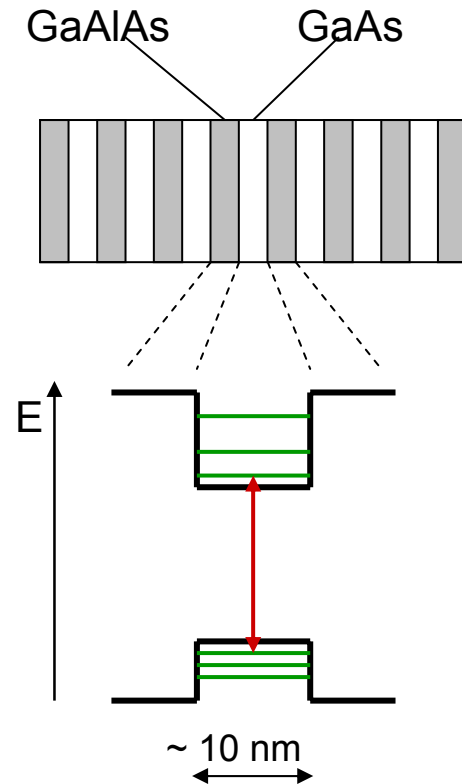
Dans un puits quantique les électrons sont confinés entre deux plans (2D)

La recombinaison "interbande" d'une paire électron-trou s'accompagne de l'émission d'un photon

Les faces du matériau sont utilisées comme miroirs

En jouant sur la géométrie et les matériaux, on peut ajuster la longueur d'onde d'émission (d'abord rouge et IR)

En pratique, on utilise des **hétérostructures** plus complexes : la zone de multi-puits quantiques se trouve entre deux matériaux dopés par des atomes donneurs (n) et accepteurs (p) d'électrons (Prix Nobel de physique 2000 : Z.I. Alferov et H. Kroemer)



Structure à multi-puits quantiques

# Lasers à solides (4)

## Lasers à semi-conducteurs (suite)

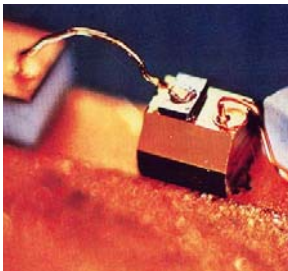
### Nombreux développements dans les matériaux et les structures

- VECSEL (vertical cavity surface emitting) (1979)
- GaN, AlN (1993)
- Diodes à cascade quantique (transition " intrabande ") (1994)

Extension des longueurs d'onde vers le bleu et l'UV  
ainsi que vers l'IR lointain et le domaine des THz

### Principaux avantages des lasers à semi-conducteurs

Pompage par un courant électrique, bon rendement (50%), 1 mW à 5W



Très faible coût, petite taille,  
grande durée de vie (100 ans), robuste  
les plus vendus actuellement



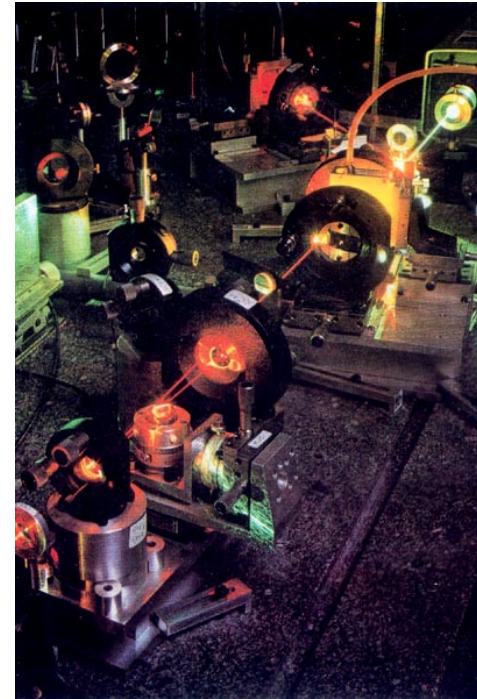
## Lasers à liquides

Lasers à colorants (1966)

Pompage optique par un autre laser

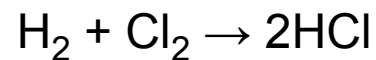
Possibilité d'accorder la fréquence  
sur une large plage dépendant du colorant

Visible et proche infrarouge, 1W



## Lasers chimiques

Pompage par une réaction chimique (1965)



Lasers à excimère (dimère de gaz rare excité produit par décharge électrique)

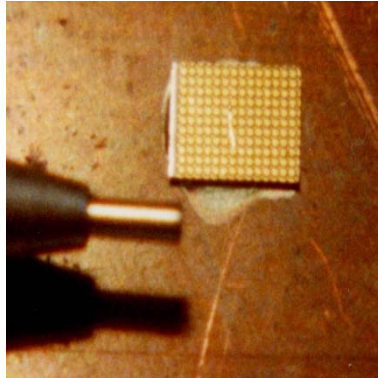
Ultraviolet : KrF (248 nm), XeBr (282 nm), etc. (exciplexes)



# Une grande variété de réalisations et de propriétés

## • Géométries et dimensions

100 microlasers  
à semiconducteur



Laser Nova pour la fusion nucléaire

## • Puissances

du microwatt au pétawatt ( $1\text{PW} = 10^{15}$  watts)

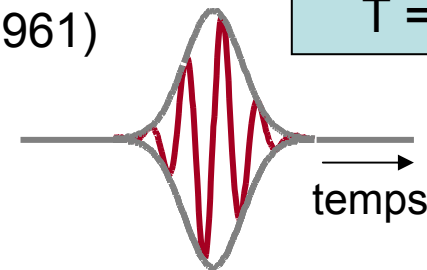
## • Continus ou pulsés

Des impulsions de plus en plus courtes :

- fonctionnement relaxé (le premier laser)
- fonctionnement déclenché (Q-switch, 1961)
- blocage de modes

Impulsions femtosecondes ( $1\text{fs} = 10^{-15}$  s)

$\lambda = 600 \text{ nm}$   
 $\nu = 500 \text{ THz}$   
 $T = 2 \text{ fs}$



# Plan de l'exposé

---

## I . Les origines du laser

- l'interaction atome-rayonnement
- un oscillateur optique
- des réalisations multiples

## II . Des propriétés ...

- un rayon lumineux
- de longueur d'onde bien définie

### ... et leurs applications

dans la vie quotidienne et pour la recherche

## III . Un instrument

- pour stocker et transporter l'information
- pour étudier et manipuler atomes et molécules
- pour mesurer de plus en plus précisément

# Un rayon lumineux

Pointeur laser



Spectacle

**Directivité : cohérence spatiale**

**Possibilité de concentrer l'énergie lumineuse sur une petite surface**

**Applications dans l'industrie, le bâtiment, la médecine, la recherche ...**

# Dans l'industrie

Découpe de plaques, tubes, pièces métalliques ...

Laser à CO<sub>2</sub>



... et aussi de bois, de tissu,  
de plastique

Le laser est un outil universel

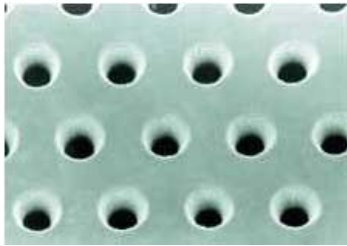




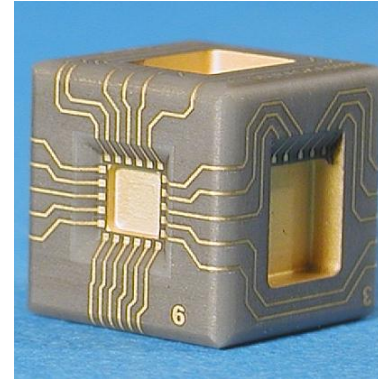
# Dans l'industrie (suite)

## Perçage

Laser YAG ou CO<sub>2</sub>

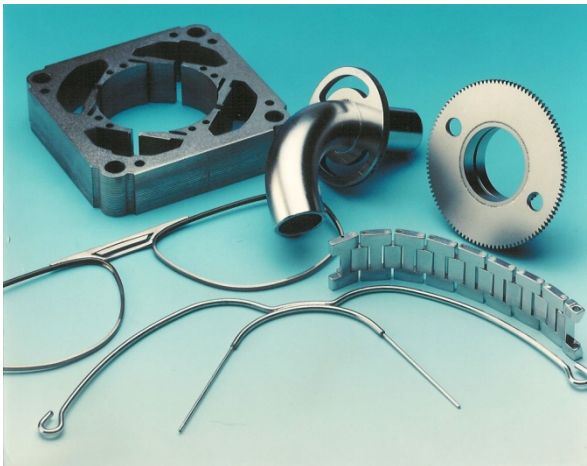


Trous de 10 µm dans un film en polymères



## Usinage

Supports en céramique pour microélectronique



Petites pièces mécaniques

## Soudage



Réservoir de carburant pour fusée

# Dans le bâtiment

Pour l'alignement sur les chantiers



Laser de canalisation



Niveau laser

et aussi pour  
la mesure des distances



Télémètre laser

# Dans le bâtiment (suite)

**Nettoyage de la pierre des monuments et des sculptures :  
sans eau, sans produit chimique, sans abrasif, sans pression**



Façade de la cathédrale Notre Dame de Paris

## Laser YAG pulsé

Restauration du Musée national  
du Moyen Age



# Pour la médecine

## **Dermatologie**

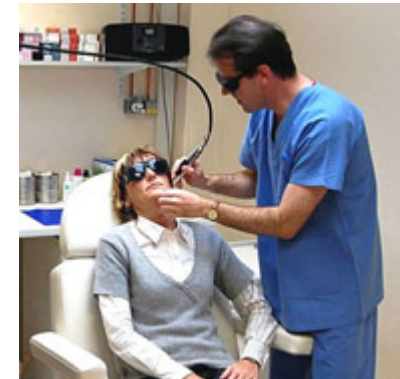
Destruction de tumeurs, angiomes, traitement de l'acné ...

Lasers pulsés : YAG, alexandrite, colorants

**et " esthétique "**

... détatouage, couperose, taches de pigmentation,  
épilation définitive ...

... ou stimulation de la repousse des cheveux !



**Chirurgie de  
contact  
" bistouri laser "**

Lasers holmium-YAG

Destruction de tumeurs, réparation des  
hernies discales, urologie, gynécologie, ...



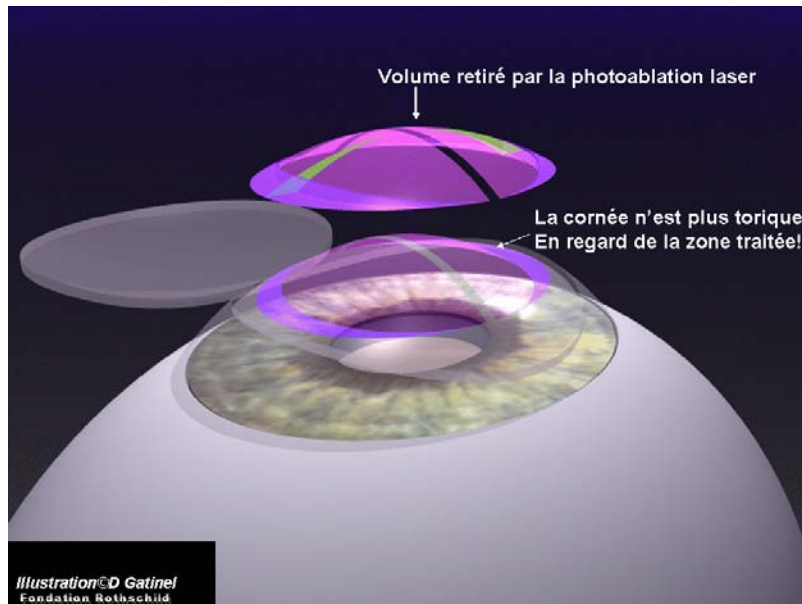
**La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde et du tissu**

# Pour la médecine (suite)

## Ophthalmologie

Traitement du glaucome  
Lasers YAG, Ar<sup>+</sup> ou diode

## Chirurgie réfractive



Traitement du décollement de la rétine  
Laser à Ar<sup>+</sup>



Découpe d'un mince volet de cornée

Laser Ti-saphir 800 nm fs

Rectification de la courbure de la cornée

Laser à excimère UV 193 nm

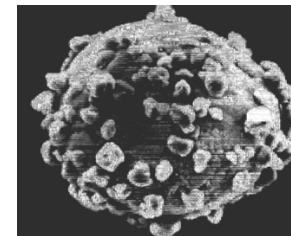
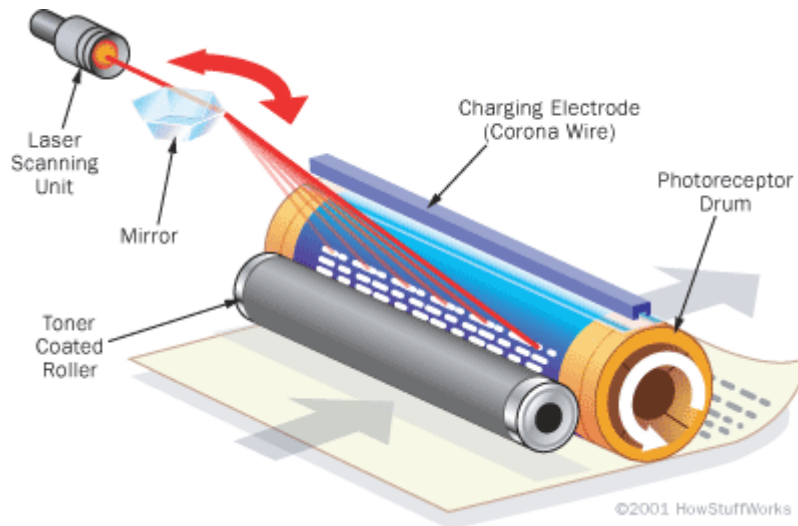
# Au bureau ou à la maison

## Imprimante laser

Le toner se colle au tambour  
au niveau du spot laser

Il est ensuite déposé sur la feuille de papier

Grâce au laser, vitesse et la résolution sont meilleures qu'avec un jet d'encre



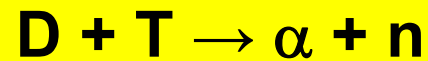
Particule de toner

# Le laser pour la fusion nucléaire

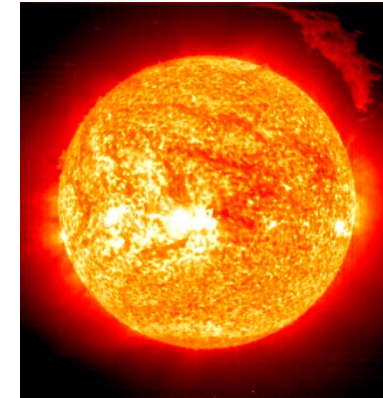
L'énergie de la liaison chimique : de l'ordre de 1 eV  
- combustion du charbon, du pétrole

L'énergie de la liaison nucléaire : de l'ordre de 1 MeV  
- fission de l'uranium

- fusion



1 g ~ 10 tonnes de pétrole



$10^9$  atm  
 $10^8$  K

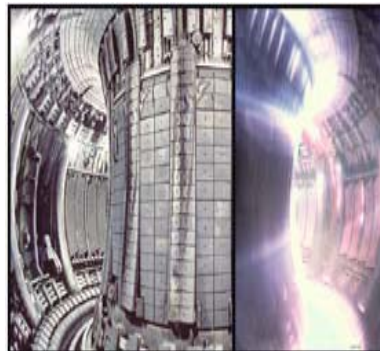
Le Soleil

## Vers la fusion contrôlée

Pour amorcer la réaction de fusion, il faut produire un plasma dense et chaud.  
Deux voies terrestres :

Le confinement  
magnétique

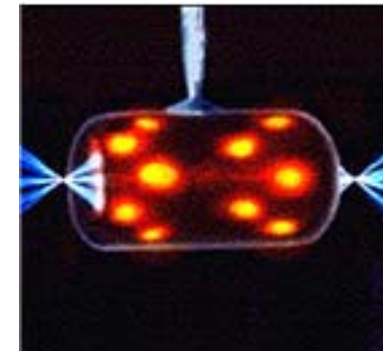
projet ITER



Tokamak JET

Le confinement  
inertiel

projet laser MJ



cible laser NOVA

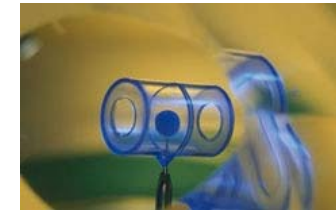
# Le laser Mégajoule

En construction par le CEA au CESTA près de Bordeaux, il sera avec le NIF à Livermore le laser le plus énergétique au monde



Un hall de 320 m de long (40 000 m<sup>2</sup>)  
maquette

La cible : une microbille au  
centre d'une chambre  
d'expérience de 10 m de  
diamètre



240 faisceaux synchronisés entre eux,  
durée de l'impulsion 20 ns, YAG 1053 nm amplifiés puis triplés en fréquence → UV

L'énergie produite à chaque impulsion sera de **1,8 MJ**

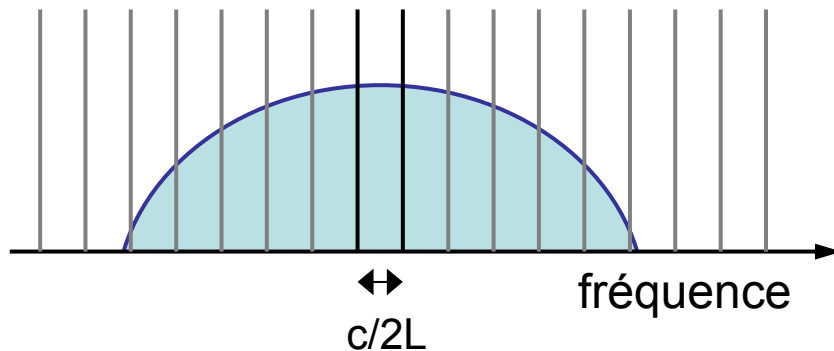
focalisée sur moins de 1mm<sup>2</sup>

Puissance crête **550 TW**

**Fonctionnement prévu en 2014**



# Un rayon lumineux ... de longueur d'onde bien définie



Modes de la cavité laser

Gain du milieu amplificateur

On sait faire des lasers monomodes : une seule fréquence d'oscillation dans la cavité

**Directivité : cohérence spatiale**

**Monochromaticité : cohérence temporelle**

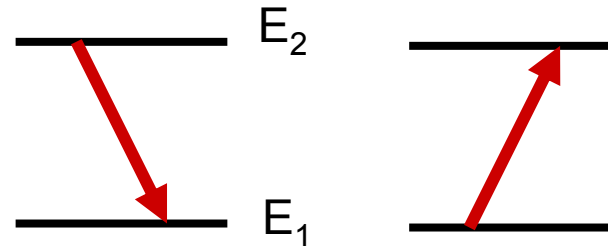
Depuis les années 70, on sait de plus faire des lasers monomodes et accordables  
lasers à colorants continus, puis lasers titane-saphir (1986)

**Applications pour la spectroscopie de haute résolution :**

- on peut "balayer" la fréquence de la source autour de la résonance atomique
- et augmenter la résolution en s'affranchissant de l'effet Doppler

# L'effet Doppler-Fizeau

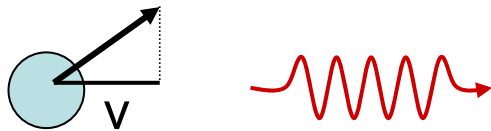
Atome au repos



lorsqu'il passe d'un niveau d'énergie à un autre, il émet ou absorbe un photon à la fréquence  $\nu_0$  telle que :

$$E_2 - E_1 = h\nu_0$$

Atome en mouvement à la vitesse  $v$



sa fréquence d'émission ou d'absorption est décalée par l'effet Doppler

Elle devient :

$$\nu = \nu_0 \left(1 + v/c\right)$$

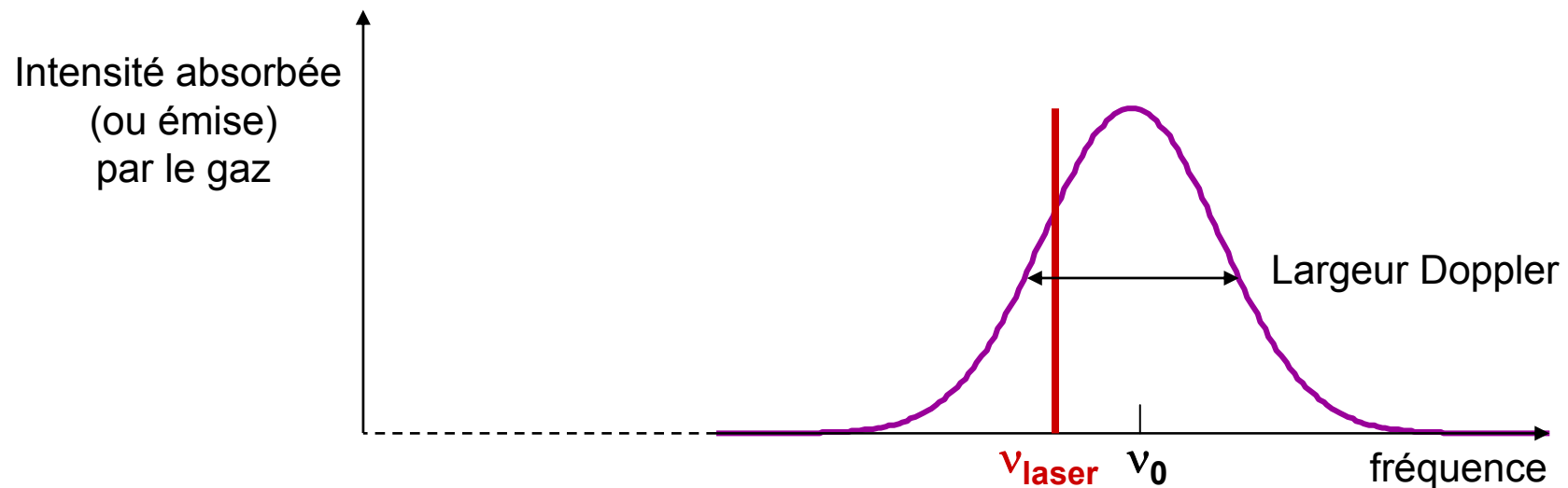
Le décalage Doppler est proportionnel à  $\nu_0$

- l'effet est négligeable dans le domaine des radiofréquences,
- mais important dans le domaine visible (environ  $10^{-6}$  en valeur relative)

$$\nu = \nu_0 \left(1 + v/c\right)$$

Le signe du décalage Doppler dépend du sens de la vitesse par rapport à la direction de propagation du faisceau

**La distribution des fréquences absorbées (ou émises) reflète la distribution des vitesses dans le gaz**



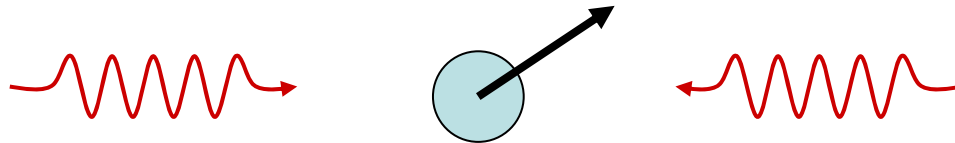
**La largeur de raie est reliée à la température**

Pour un gaz à température ordinaire la largeur Doppler est de l'ordre de 1 GHz

**Un laser monomode permet de sélectionner une classe de vitesse au sein d'un gaz atomique**

# Spectroscopie sans effet Doppler

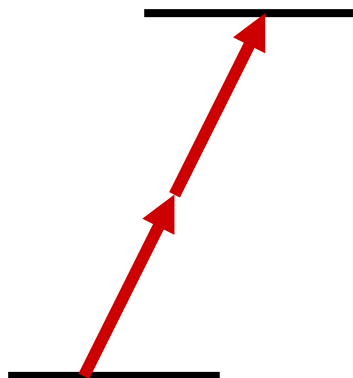
Les lasers accordables permettent d'éliminer l'effet Doppler, par exemple en faisant absorber à l'atome deux photons de directions opposées issus du même laser



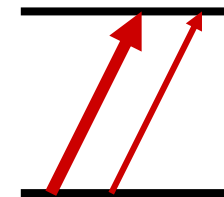
Les décalages Doppler se compensent

Il s'agit d'un effet non linéaire : l'atome doit interagir avec les deux faisceaux.

**Exemples :**



- saturation d'une transition à un photon  
(un faisceau pompe et un faisceau sonde)



- transition à deux photons

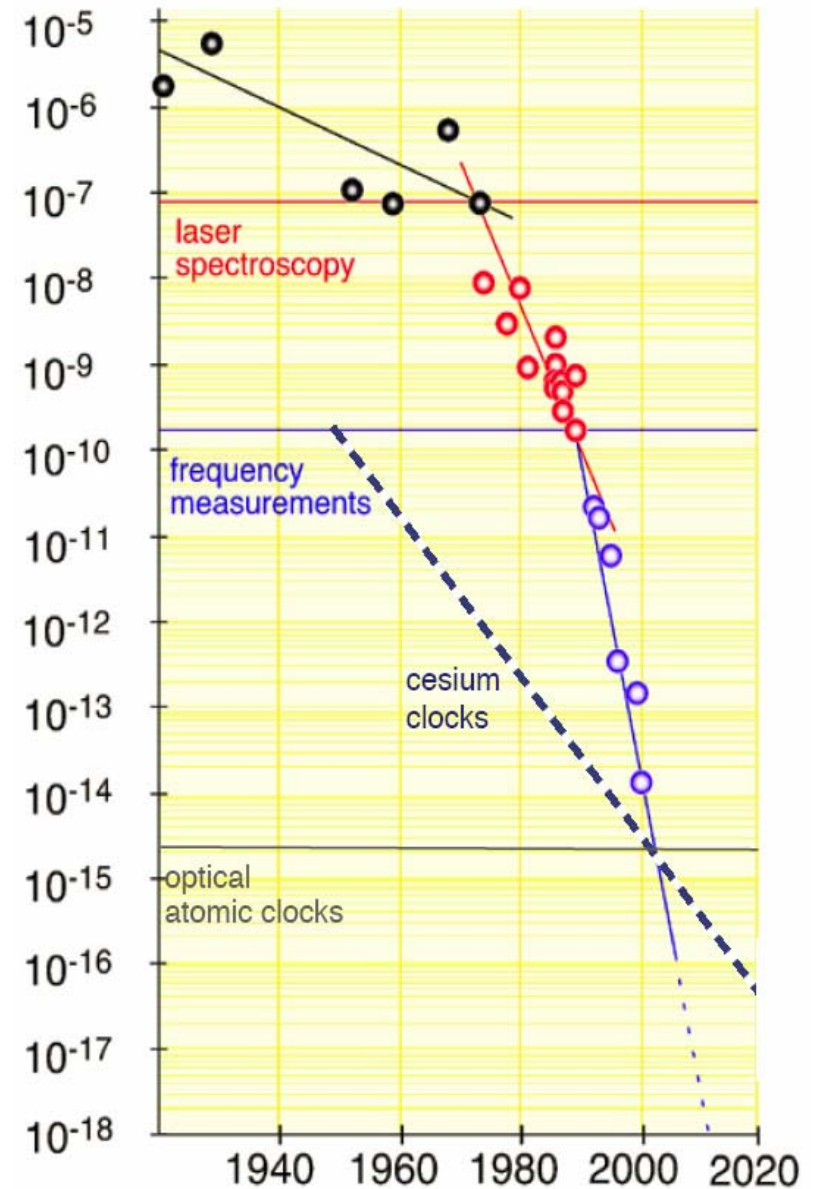
La résolution obtenue passe de  $10^{-6}$  à  $10^{-9}$   
(ou beaucoup mieux selon la largeur naturelle de la transition)

# La spectroscopie laser

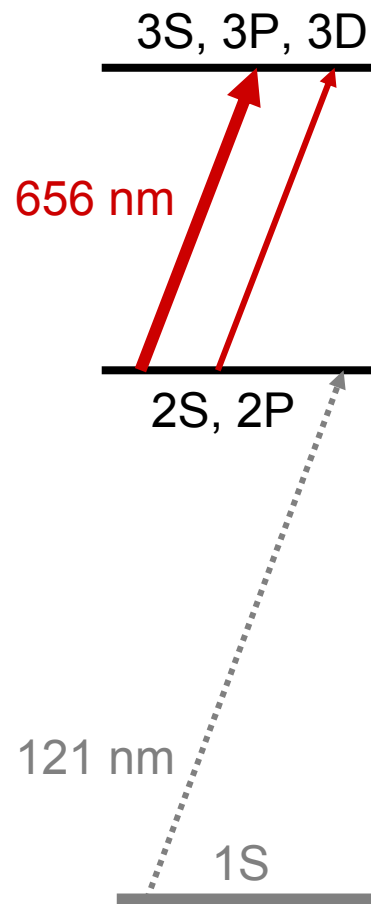
**Exemple de l'atome d'hydrogène  
(1 proton + 1 électron)**

Intérêt de la confrontation  
expérience - théorie (QED)

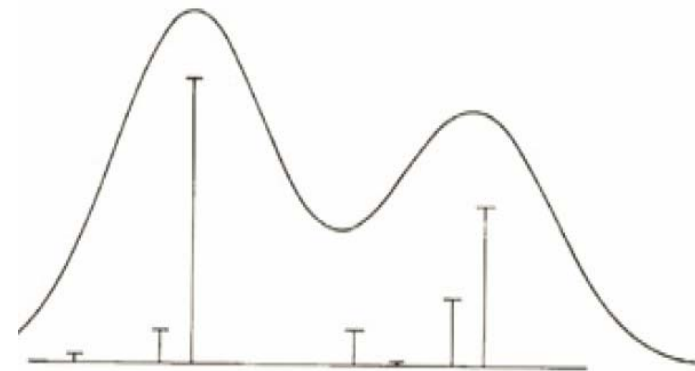
évolution de la précision relative  
des fréquences de transition



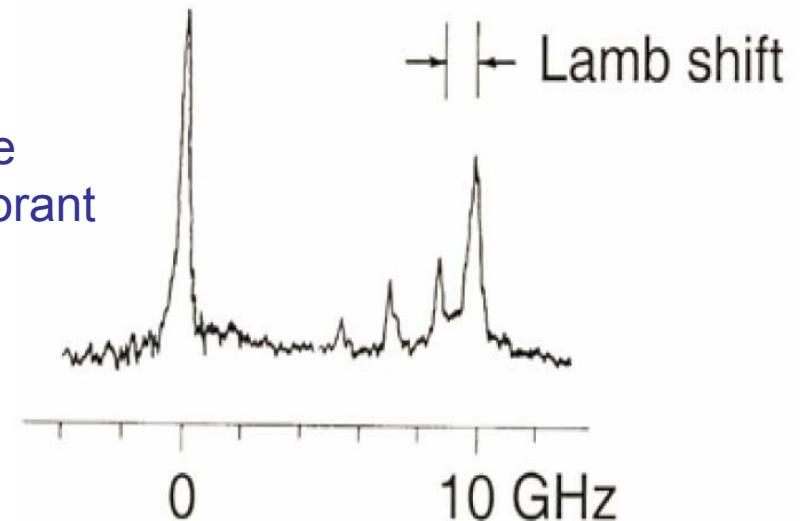
# L'absorption saturée de la transition Balmer $\alpha$



Profil de la raie Balmer  $\alpha$  élargie par l'effet Doppler (à 300 K)



Spectre d'absorption saturée observé avec un laser à colorant



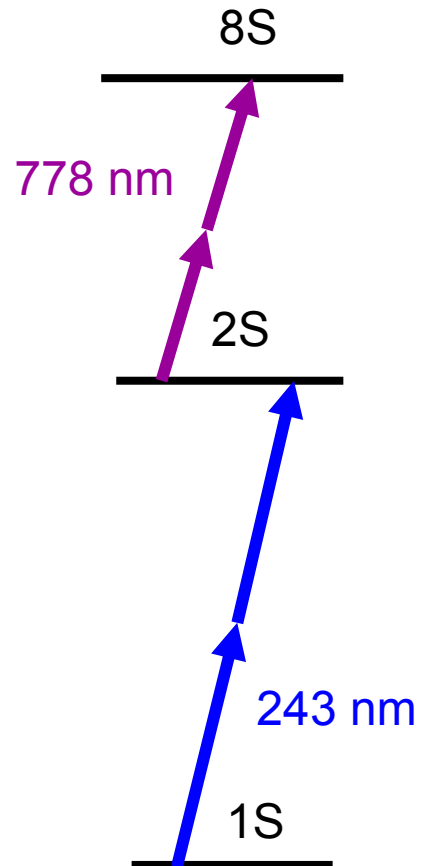
Première observation du déplacement de Lamb (écart 2S-2P) dans le domaine visible

**T.W. Hänsch, I.S. Shahin et A.L. Schawlow, Nature 235, 63 (1972)**

# Les transitions à deux photons

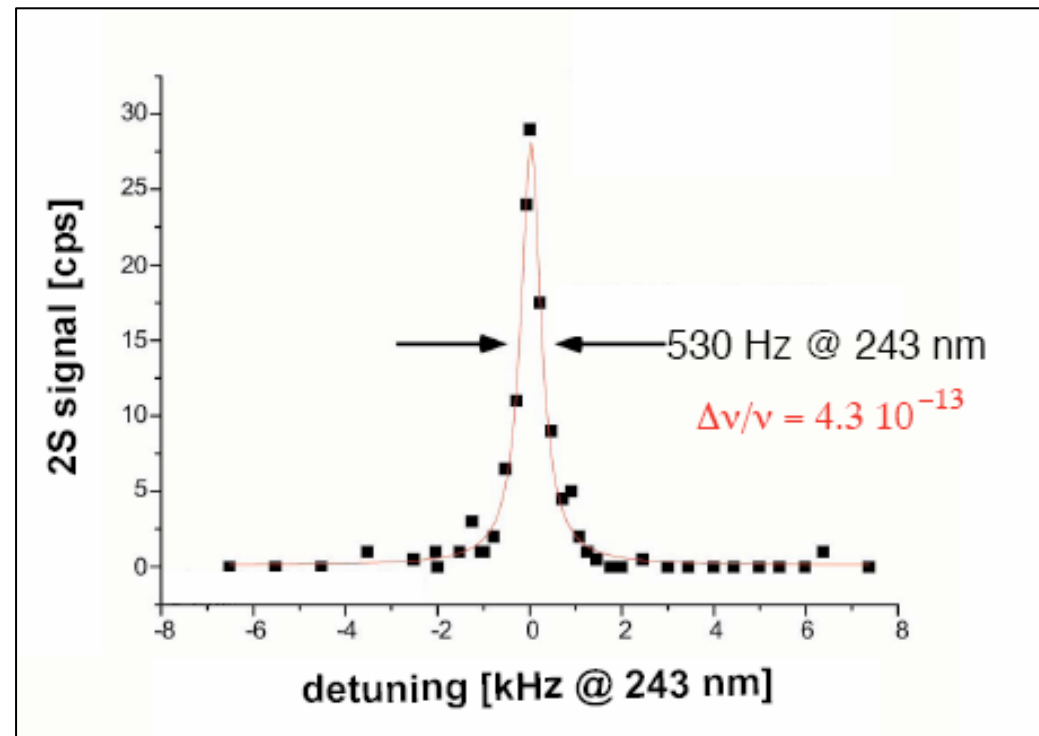
Groupe du LKB à Paris :  
F. Biraben, L. Julien, F. Nez ...

Etude des transitions 2S-nS et 2S-nD  
vers  $n = 8, 10, 12$



Groupe de Ted Hänsch  
à Stanford puis à Garching

Etude de la transition 1S-2S



# Plan de l'exposé

---

## I . Les origines du laser

- l'interaction atome-rayonnement
- un oscillateur optique
- des réalisations multiples

## II . Des propriétés ...

- un rayon lumineux
- de longueur d'onde bien définie

### ... et leurs applications

dans la vie quotidienne et pour la recherche

## III . Un instrument

- pour stocker et transporter l'information
- pour étudier et manipuler atomes et molécules
- pour mesurer de plus en plus précisément



# Pour stocker l'information et la lire

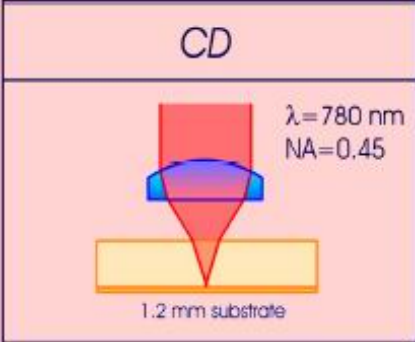
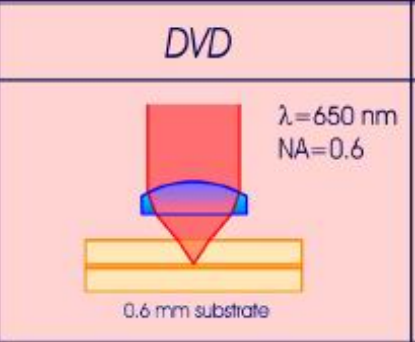

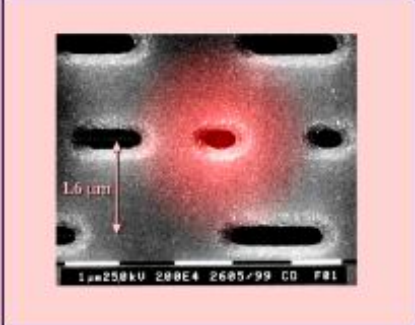
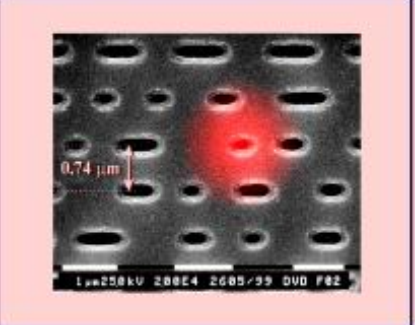



Lecture de code-barres

Lasers à semiconducteurs

CD et DVD



CD	DVD	Blu-ray Disc
 <p><math>\lambda=780 \text{ nm}</math> <math>NA=0.45</math></p> <p>1.2 mm substrate</p>	 <p><math>\lambda=650 \text{ nm}</math> <math>NA=0.6</math></p> <p>0.6 mm substrate</p>	 <p><math>\lambda=400 \text{ nm}</math> <math>NA=0.85</math></p> <p>0.1 mm cover layer</p>
 <p>1.6 <math>\mu\text{m}</math></p> <p>1, <math>\mu\text{m}</math> 250kV 280E4 2605/99 CD F01</p>	 <p>0.74 <math>\mu\text{m}</math></p> <p>1, <math>\mu\text{m}</math> 250kV 280E4 2605/99 DVD F02</p>	 <p>0.32 <math>\mu\text{m}</math></p> <p>1, <math>\mu\text{m}</math> 250kV 280E4 2605/99 DUR F03</p>

# Pour transporter l'information

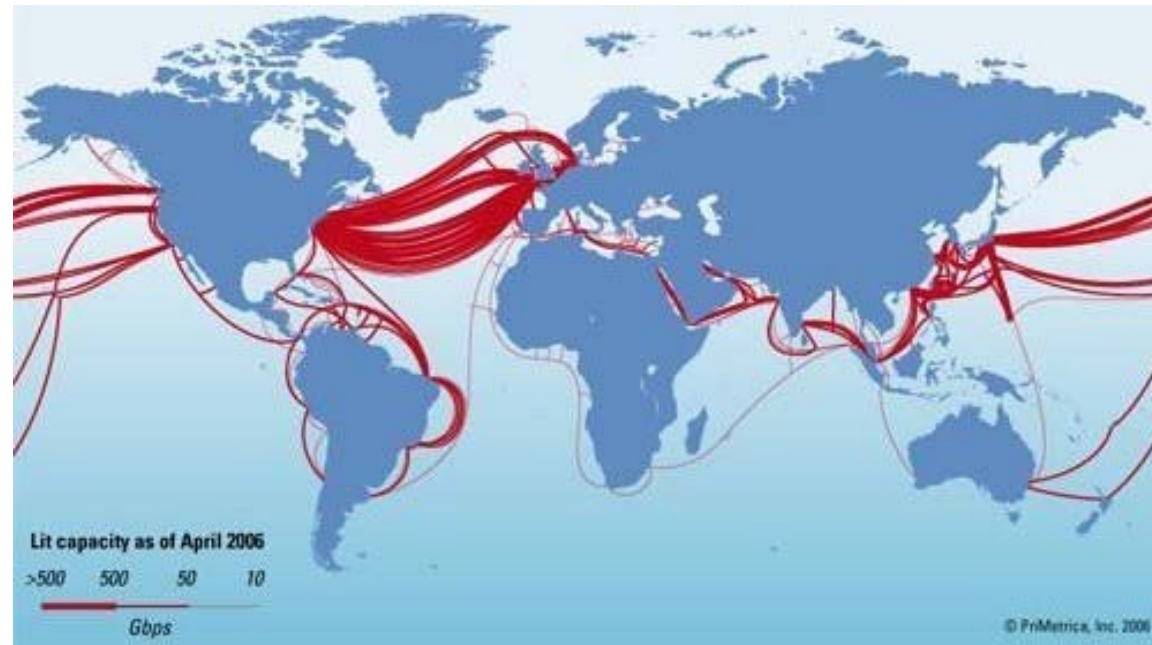


**Le réseau mondial  
sous-marin  
de câbles de fibres  
optiques**



On peut coupler les lasers avec des fibres optiques qui guident la lumière pendant des milliers de km

Les pertes à grande distance sont plus faibles que celles qu'on a pour un signal électrique dans un conducteur métallique



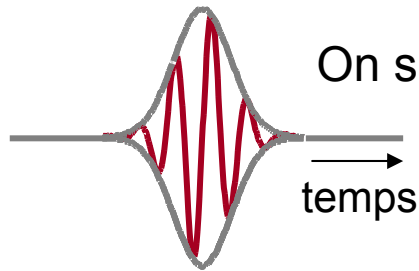
**80% des communications à longue distance dans le monde le sont grâce au réseau de fibres optiques**

Le multiplexage (superposition de signaux de différentes fréquences) permet d'avoir jusqu'à 256 canaux par fibre et d'augmenter le débit

# Un instrument pour étudier les atomes et les molécules...

**Les lasers monomodes pour le spectroscopie**

**Les lasers à impulsions courtes pour étudier la dynamique des molécules et des électrons**

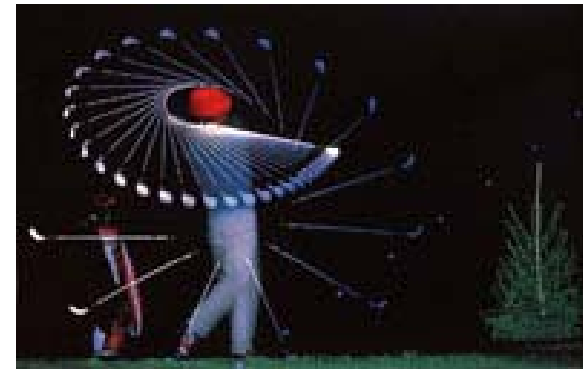


On sait maintenant faire des lasers avec des impulsions très brèves de quelques femtosecondes ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ )

génération d'harmoniques → 100 attosecondes ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ )

On peut étudier des phénomènes ultra-rapides, comme des réactions chimiques par exemple (Prix Nobel de chimie 1999 : A.H. Zewail)

et même le mouvement d'un électron  
<http://www.atto.fysik.lth.se/>



principe de la stroboscopie

# ... et pour les manipuler

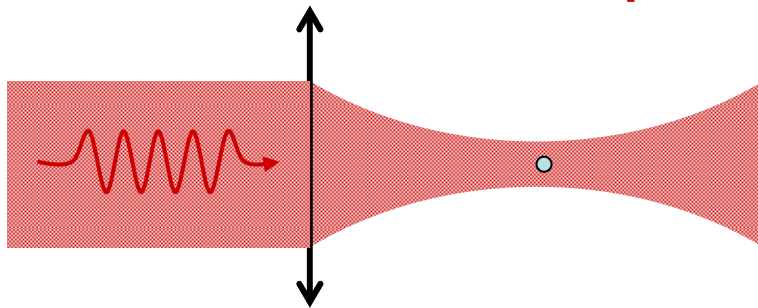
## La lumière exerce des forces sur les particules

### La pression de radiation

La queue des comètes est orientée à l'opposé  
du Soleil  
(celle constituée de poussières non chargées)

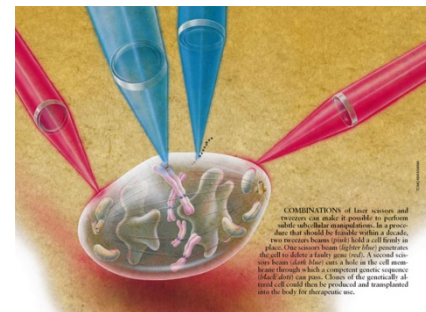


### et sur les petits objets diélectriques



Une microbille ou une macromolécule biologique  
est attirée là où le champ électrique est maximum,  
au point de focalisation du faisceau lumineux

C'est le principe de la pince optique  
découvert par Ashkin en 1970



**La lumière agit donc non seulement sur les variables internes de l'atome, mais aussi sur ses variables externes (position et vitesse)**

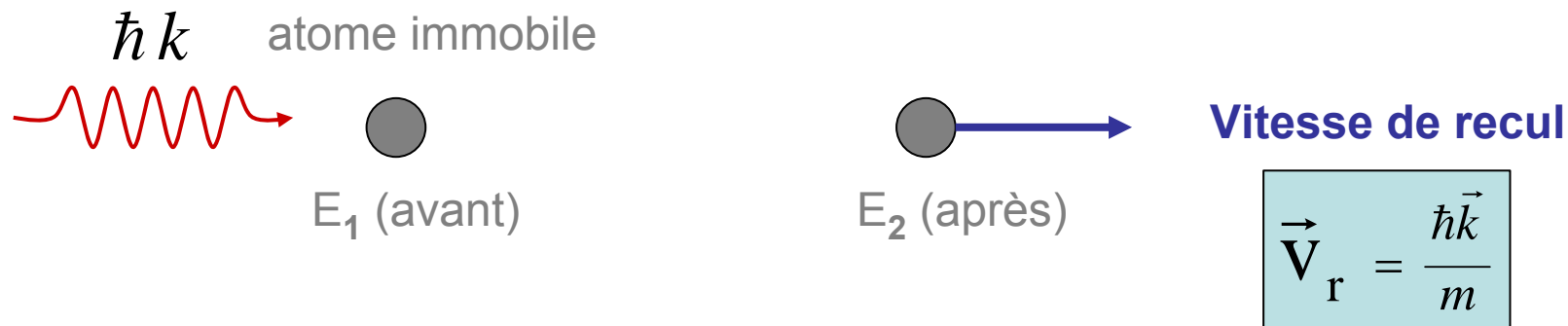
**Le photon possède une énergie, un moment cinétique et une quantité de mouvement :**

- l'énergie du photon est  $h\nu$
- son moment cinétique dépend de la polarisation de l'onde
- sa quantité de mouvement est  $\hbar k = h/\lambda$  ( $\hbar = h/2\pi$ )

$\vec{k}$  est le vecteur d'onde de la lumière incidente  
Il est dirigé dans le sens de propagation

**La pression de radiation est due à l'effet de recul**

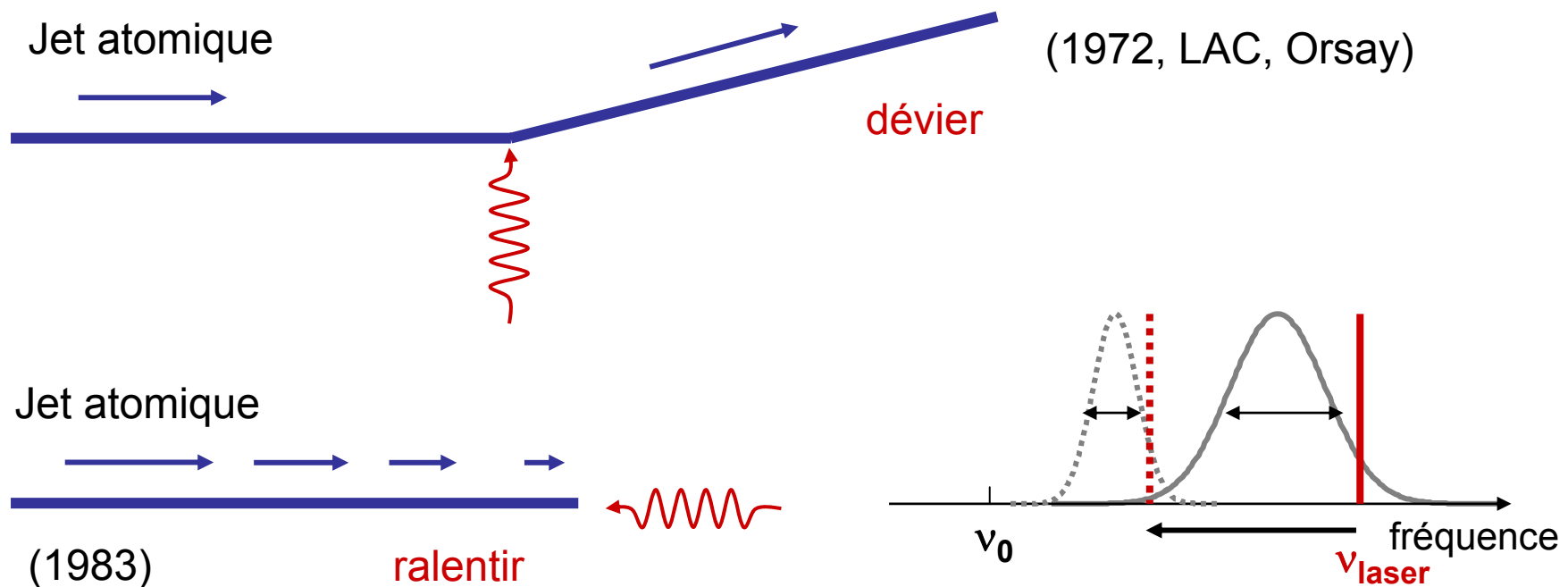
**Absorption d'un photon par un atome de masse  $m$**



# Dévier ou ralentir les atomes avec un laser

Pour un atome de sodium, la vitesse de recul est de 3 cm/s  
alors que sa vitesse à température ordinaire est de 400 m/s

L'émission spontanée se fait de façon isotrope :  
en moyenne, elle ne s'accompagne donc pas d'effet de recul



Pendant le ralentissement, il faut, pour ne pas sortir de résonance,  
balayer la fréquence du laser (ou celle de la raie)

# Refroidir les atomes...

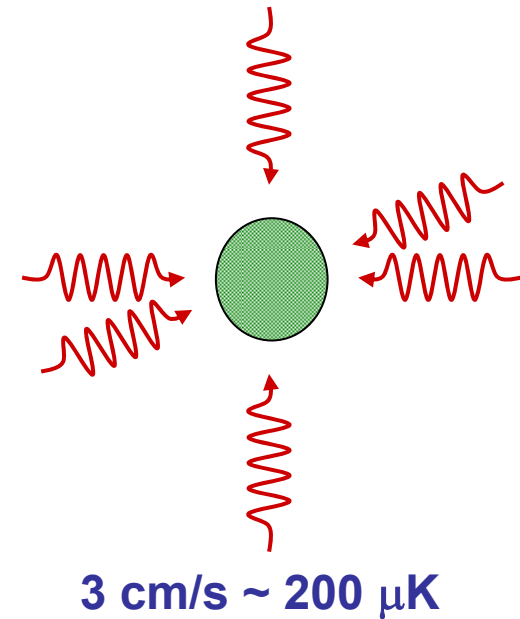
En diminuant leur vitesse dans toutes les directions

## La mélasse optique

Six faisceaux laser (un dans chaque direction de l'espace)  
de fréquence légèrement inférieure à  $\nu_0$

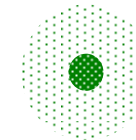
Les atomes qui vont à la rencontre d'un faisceau  
"voient" une fréquence augmentée par effet Doppler  
et l'absorbent donc davantage : ils sont ralentis

(refroidissement "Doppler")



## ... et les piéger

Piège magnéto-optique, piège dipolaire, ...



**Prix Nobel de physique 1997**

S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W. Philips

## des températures de plus en plus basses ...

- Refroidissement Sisyphé  $\rightarrow 2 \mu\text{K}$
- Refroidissement par évaporation  $\rightarrow 100 \text{ nK}$

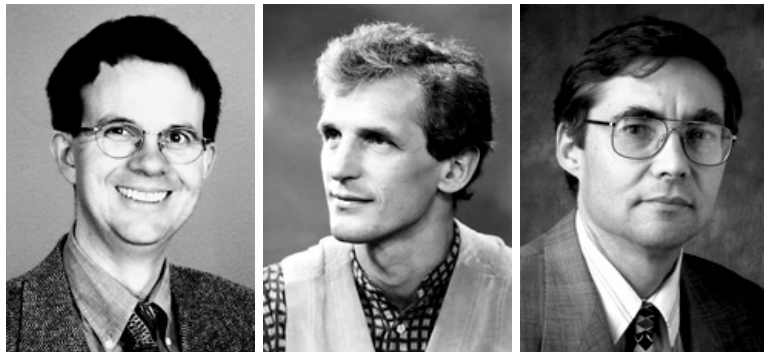
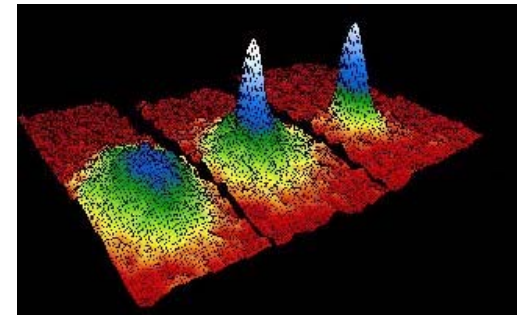
## ... et des densités de plus en plus fortes

On atteint le régime de dégénérescence quantique ou la longueur d'onde associée à l'onde atomique  $\lambda_{\text{De Broglie}}$  est supérieure à la distance entre atomes

## jusqu'à la condensation de Bose - Einstein

pour les atomes bosoniques (1995)

tous les atomes sont dans le même état quantique



**Prix Nobel de physique 2001**  
E.A. Cornell, W. Ketterle et C.A. Wieman



# Plan de l'exposé

---

## I . Les origines du laser

- l'interaction atome-rayonnement
- un oscillateur optique
- des réalisations multiples

## II . Des propriétés ...

- un rayon lumineux
- de longueur d'onde bien définie

### ... et leurs applications

dans la vie quotidienne et pour la recherche

## III . Un instrument

- pour stocker et transporter l'information
- pour étudier et manipuler atomes et molécules
- **pour mesurer de plus en plus précisément**

# Les lasers pour mesurer

Mesure de distance : temps mis par la lumière pour faire un aller-retour



Télémètre laser

5 réflecteurs  
déposés sur la Lune

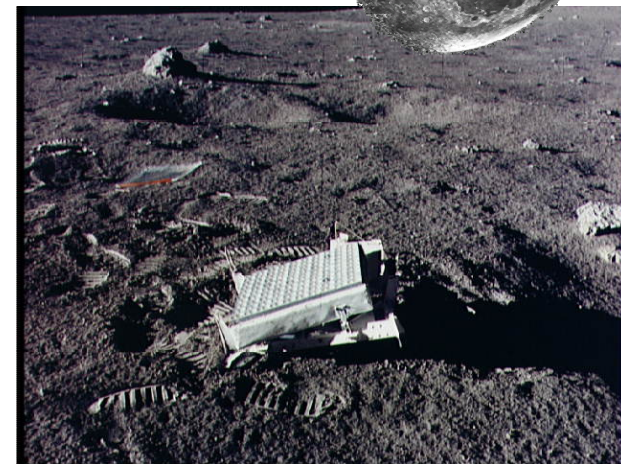


## La distance Terre-Lune



(aller - retour ~ 2 s)

Telescope du CERGA  
Observatoire de la Cote d'Azur



Les tirs laser avec un laser YAG (IR + vert)  
permettent de mesurer la distance Terre-Lune  
**avec une précision de 6 mm (20 ps)**  
sur 384 000 km

Impulsions de 100 ps

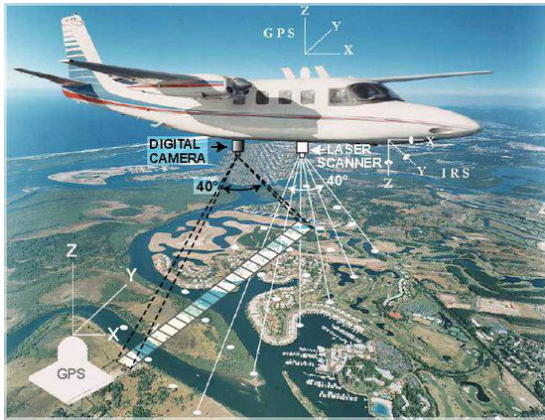
La Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an

# Le LIDAR

est l'équivalent du RADAR  
mais dans le domaine optique

(Light Detection And Ranging)

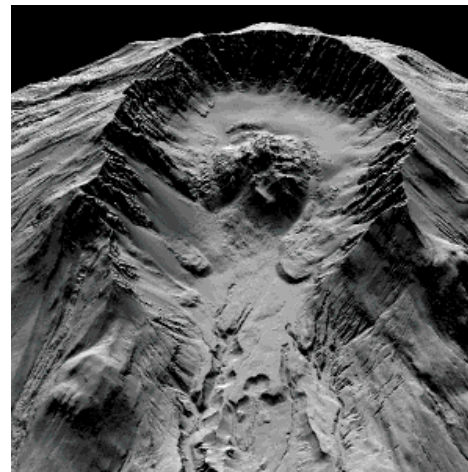
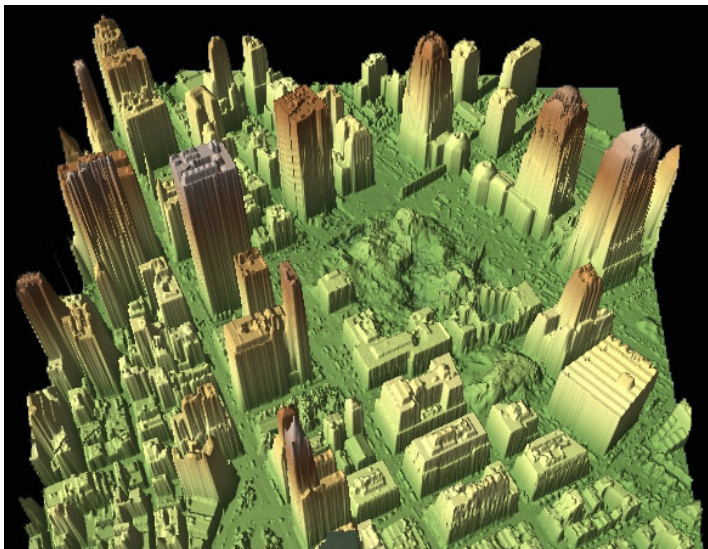
Il peut être soit au sol, soit embarqué dans un avion ou un satellite  
(satellite CALIPSO lancé en avril 2006)



Il est utilisé pour la cartographie  
et la géodésie  
**mesure de distance**



LIDAR



Eruption du Mont  
Sainte Hélène en 2004

pour la climatologie et  
la météorologie  
**mesure de vitesse  
(décalage Doppler)**

ou la détection de molécules dans l'atmosphère  
**(décalage Raman)**

# Le laser pour détecter les ondes gravitationnelles

**Théorie de la gravitation (Einstein 1916) :**

L'espace-temps est déformé en présence de matière

Un évènement violent (explosion de supernova) génère une onde gravitationnelle qui modifie les distances sur Terre :  $\Delta L / L \sim 10^{-22}$



L'interféromètre VIRGO  
près de Pise (Italie)  
joue le rôle d'une antenne  
de détection

Interféromètre de Michelson  
bras de 3 km

Laser YAG ultra-stable

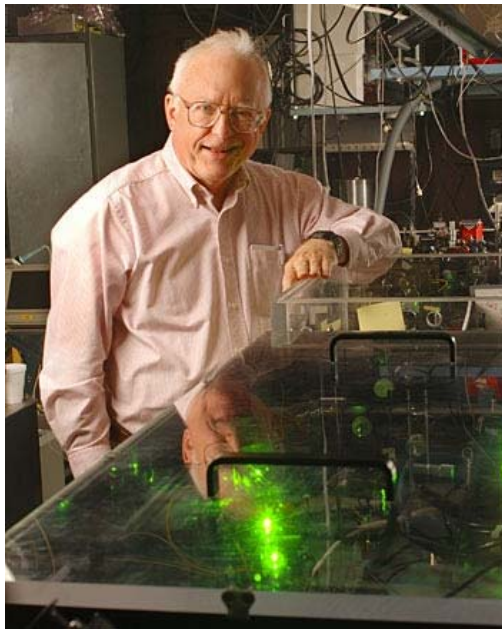
Mesure de déplacement de  $10^{-18}$  m soit un millième de la taille d'un noyau atomique

# Les lasers pour la métrologie de haute précision

Pour faire une mesure très précise, il faut :

- un bon instrument de mesure
- un bon étalon qui matérialise l'unité de mesure

Les lasers pour mesurer les distances et les fréquences  
Les lasers pour définir la seconde et le mètre



John L. Hall



Ted W. Hänsch

**Prix Nobel 2005**

pour la spectroscopie laser de précision  
et la technique des peignes de fréquences optiques

En 1960, la dixième Conférence Générale des Poids et Mesures adopte le **système d'unités international** (SI) : la **seconde** est la durée de **9 192 631 770** périodes de la transition hyperfine du césium 133

## L'horloge à Cs aujourd'hui : une fontaine à atomes froids

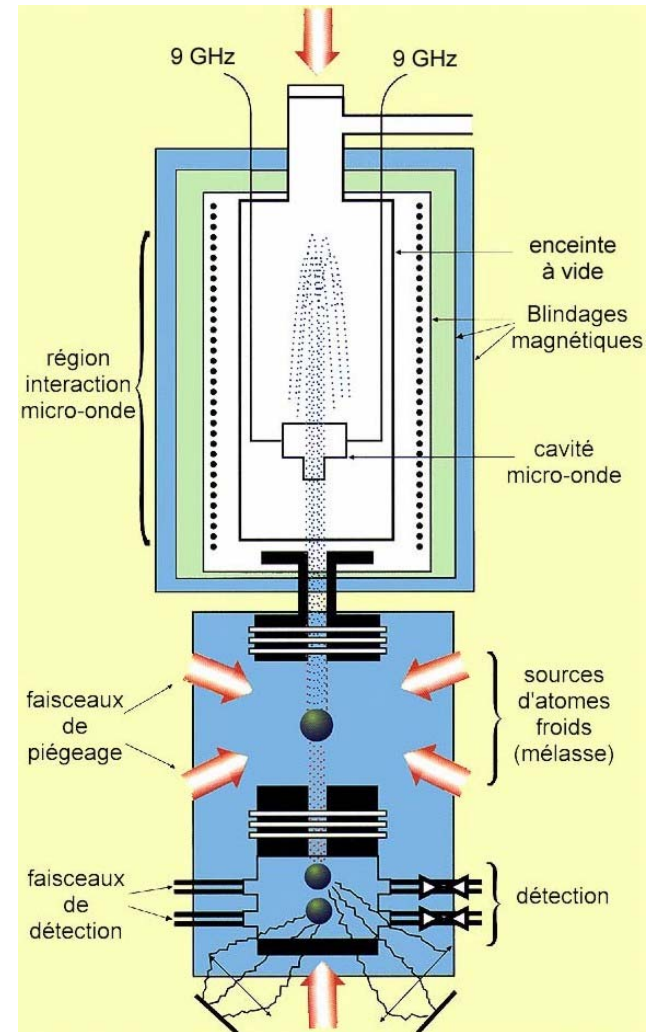
Utilisation de faisceaux lasers :

- pour sélectionner un sous-niveau atomique
- pour détecter la transition
- pour refroidir et piéger les atomes

Amélioration due aux atomes froids :

- augmentation du temps d'interaction entre les atomes et la micro-onde
- affinement Doppler

**Gain de l'ordre de 100  
sur la stabilité et l'exactitude :  
on passe de  $10^{-14}$  à  $10^{-16}$**



**ce qui correspond à moins de 1 seconde d'erreur sur 300 millions d'années !**

# Les lasers comme références de fréquences

On peut asservir la fréquence d'un laser

- sur une cavité optique

  - « External dye-laser frequency stabilizer »

  - J.L. Hall, T.W. Hänsch, Opt. Lett. 9 p. 502 (1984)

- ou sur une raie atomique ou moléculaire étroite

On obtient ainsi une **référence de longueur d'onde ou de fréquence**

**Radiations recommandées par le Comité International des Poids et Mesures en 1983 :**

- laser He-Ne stabilisé sur une transition de  $\text{CH}_4$  à  $3,39 \mu\text{m}$

- lasers He-Ne stabilisés sur des transitions de  $^{127}\text{I}_2$  dans le visible

(de nombreuses autres transitions atomiques, moléculaires et ioniques suivront)

**Il fallait auparavant mesurer très précisément leur fréquence et leur longueur d'onde**

... c'est ce qui a été fait pour le laser He-Ne stabilisé sur CH<sub>4</sub> à 3,39 μm  
de plus en plus précisément

« Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser »

K.M. Evenson, J.S. Wells, F.R. Petersen, B.L. Danielson, G.W. Day, R.L. Barger and J.L. Hall, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 1346-1349 (1972).

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

La précision était limitée par l'étalon de longueur (lampe à Kr) !  
Il fallait changer d'étalon

**En 1983 : nouvelle définition du mètre**

La 17ème Conférence Générale de Poids et Mesures attribue une valeur exacte à la vitesse de la lumière en redéfinissant le mètre :

**« Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant un intervalle de temps de 1 / 299 792 458 seconde »**

**Il n'y a plus qu'un seul étalon pour les longueurs et les temps / fréquences : l'horloge à césium**

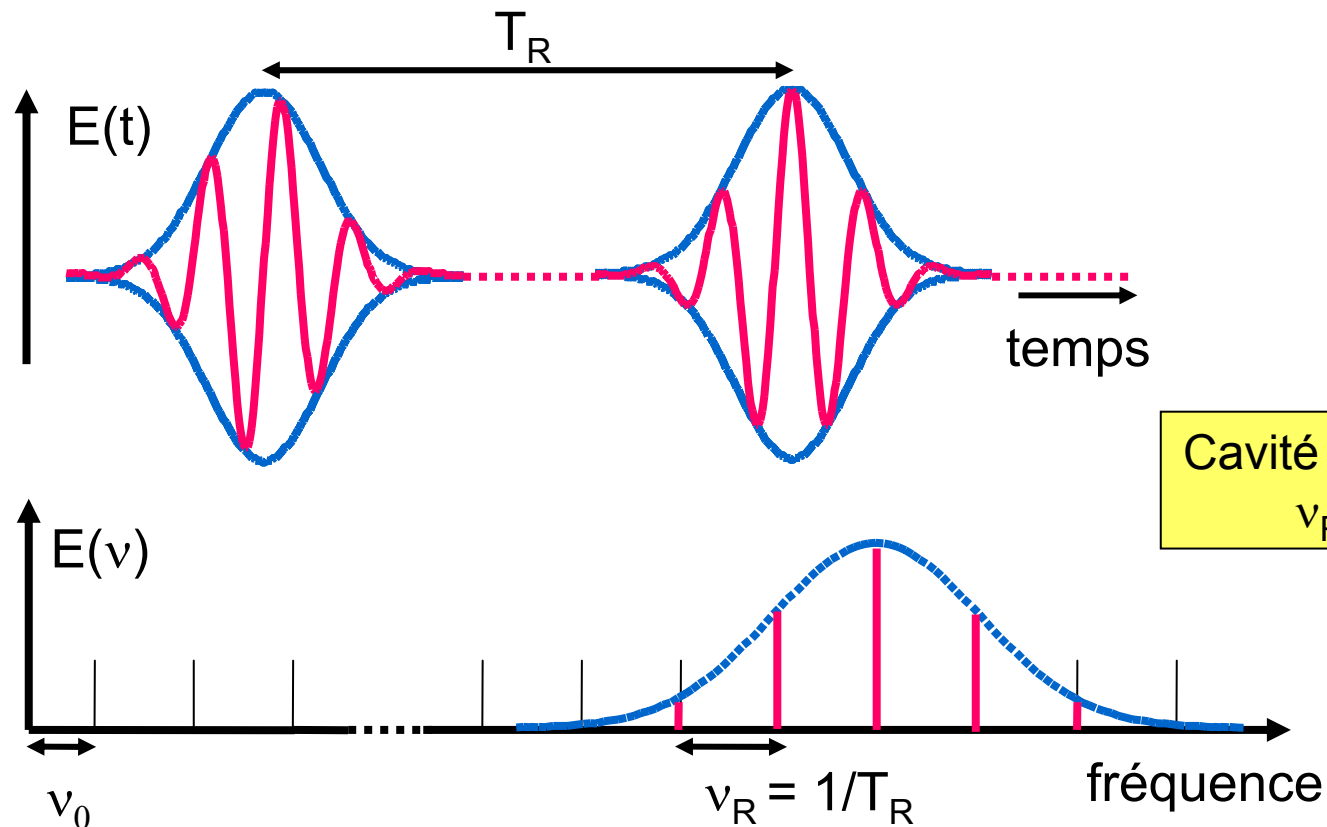


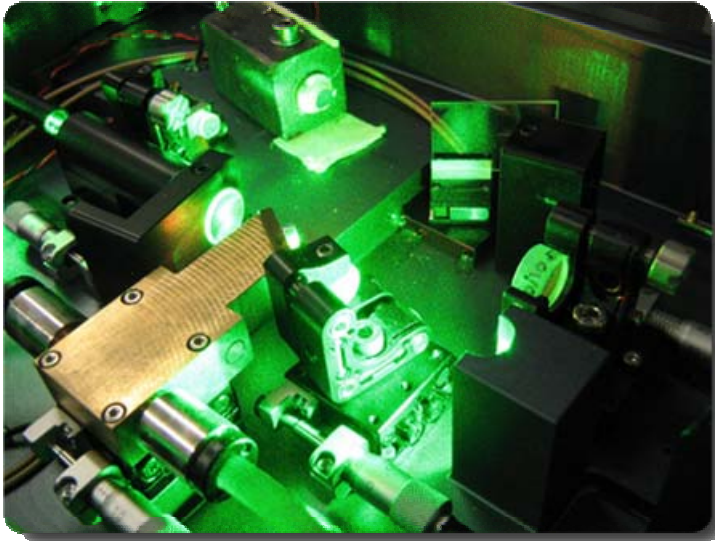
# Pour mesurer les fréquences optiques : la révolution des peignes de fréquences

Lasers à modes bloqués « mode locking » : la synchronisation des modes émis dans la cavité concentre l'énergie dans des impulsions courtes de quelques femtosecondes (1993)



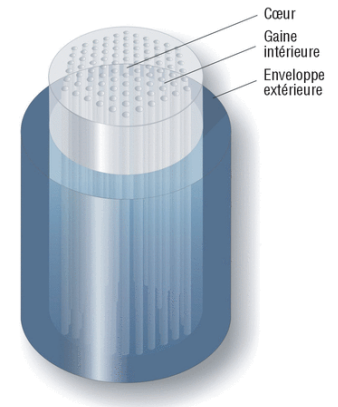
Ted W. Hänsch



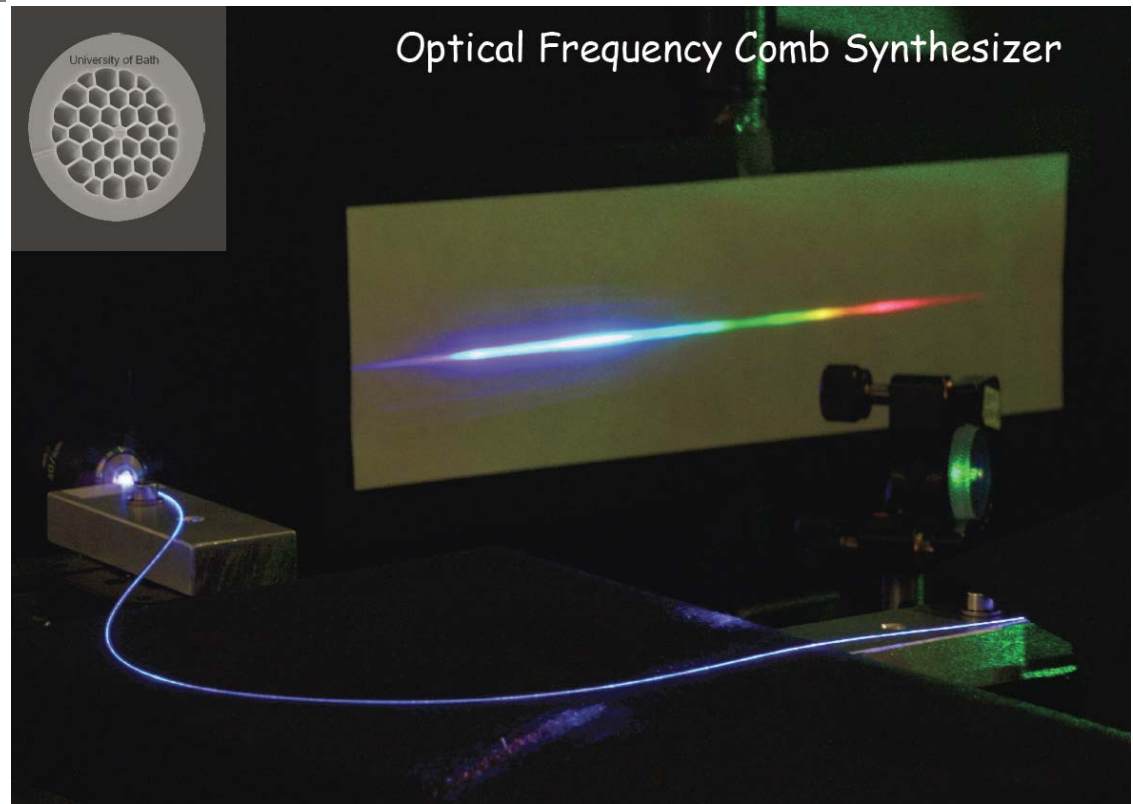


Les impulsions fs sont produites par un laser titane-saphir

... puis injectées dans une fibre à cristal photonique ...

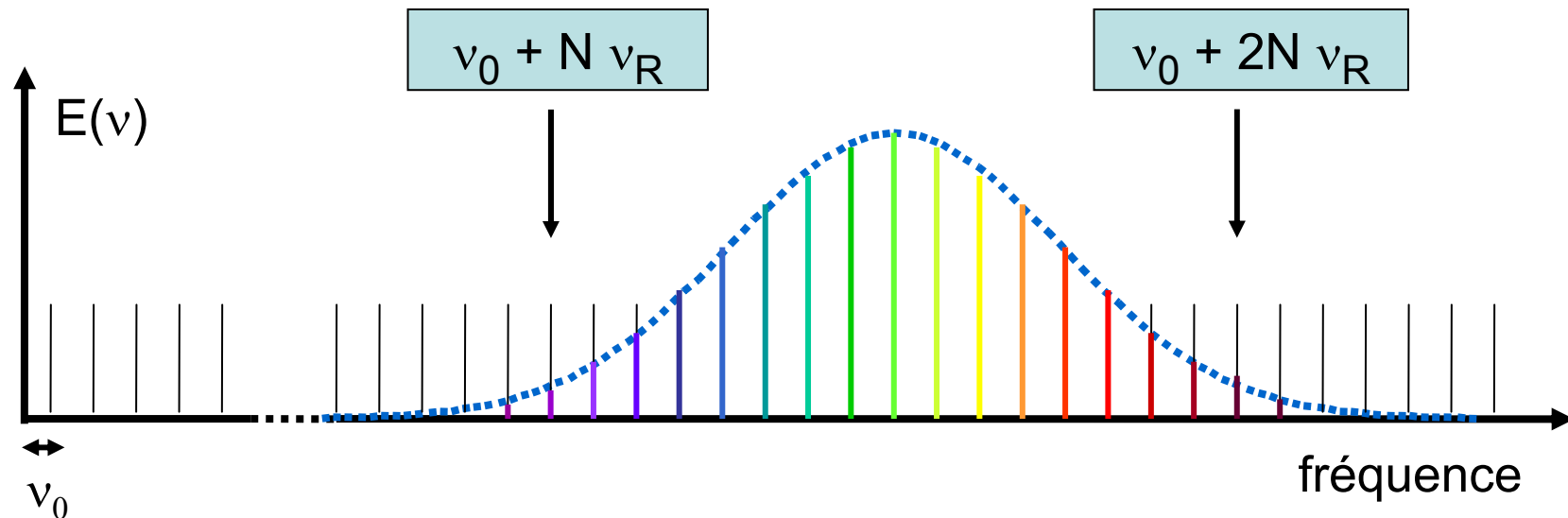


...dans laquelle leur spectre en fréquence se trouve étendu



Le peigne est suffisamment large pour contenir à la fois  
une fréquence et son harmonique

**ce qui permet une mesure absolue de la fréquence par auto-référence**

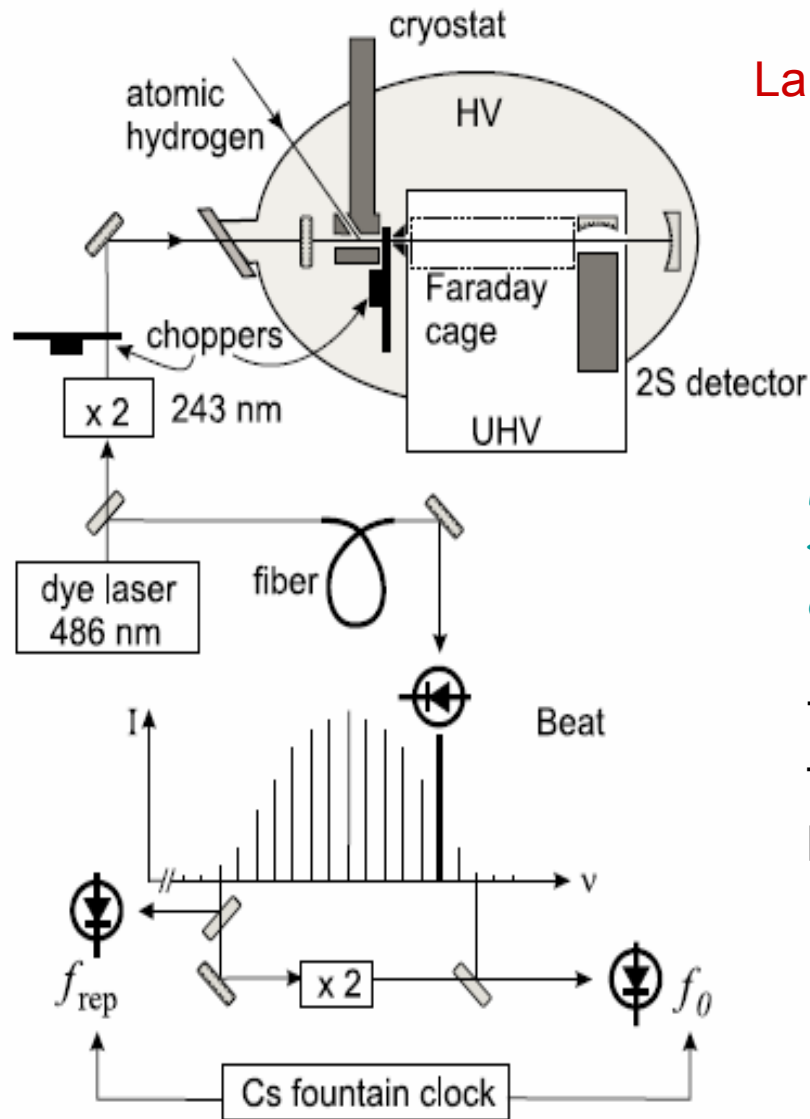


En comparant la fréquence du premier pic doublée  
à celle du second pic, on obtient  $\nu_0$

L'ensemble du peigne de fréquences se trouve alors étalonné  
car on connaît alors à la fois  $\nu_0$  et  $\nu_R$   
( $\nu_R$  est mesuré directement par comparaison avec l'horloge à Cs)

**On a une "règle graduée" en fréquences**

# Mesure de la transition 1S-2S de l'atome d'hydrogène



La fréquence de la transition 1S-2S est remesurée avec une précision de  $1,4 \times 10^{-14}$

M. Fischer et al., Phys. Rev. 92, 230802 (2004)  
« New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements »

Test de l'invariance des constantes fondamentales :  
pas d'effet observé au niveau de  $10^{-15}$  par an

# Après bientôt 50 ans d'histoire les lasers sont partout...



... et n'ont pas fini de nous étonner

**Merci de votre attention !**

**Et merci aussi à tous les collègues qui  
m'ont fait profiter de leur documentation et  
qui m'ont prodigué leurs conseils**

# Bibliographie

## **Historique :**

- " Masers and lasers : an historical approach " Mario Bertolotti, Adam Hilger (1983)
- " Laser pioneers " (Rev. Ed.) Jeff Hecht, Academic Press (1992)
- " Beam : the race to make the laser " Jeff Hecht, Oxford University Press (2005)

## **Lasers et applications :**

- " Les lasers et leurs applications scientifiques et médicales "  
C. Fabre et J.P. Pocholle, Editions de Physique (1996)
  - " Einstein aujourd'hui " (article de J.P. Pocholle : " De l'émission stimulée d'Einstein  
aux lasers aujourd'hui "), EDP Sciences (2005)
  - " La lumière dans tous ses états " Dossier Pour la Science n°53 (oct.-déc. 2006)
  - " Panorama de la physique " Bibliothèque scientifique Belin (2007)
- Le site des prix Nobel : <http://nobelprize.org/>