



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



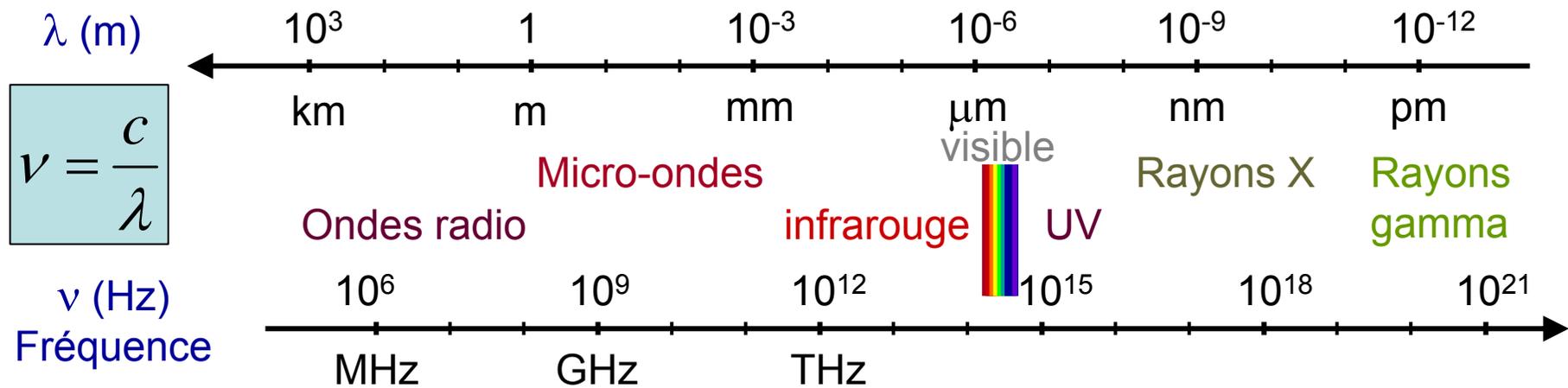
J. Brossel

- 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 $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- et se comporte à la fois comme une onde et comme un corpuscule (photon)



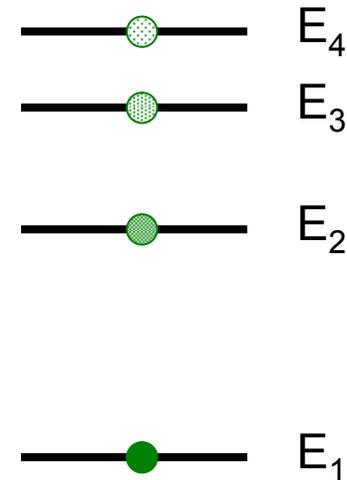
L'interaction atome - rayonnement



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 :

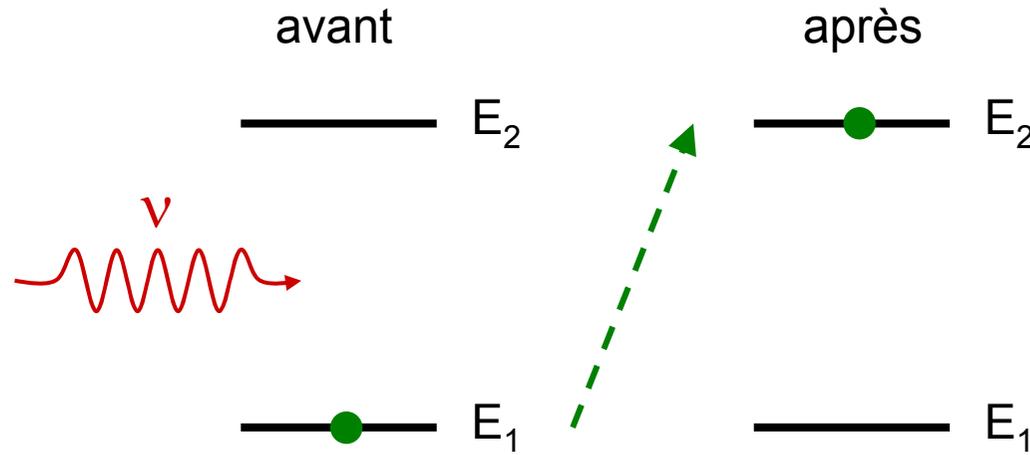
$$E_2 - E_1 = h\nu$$

(condition de résonance)

- Il le fait lors de "sauts quantiques"

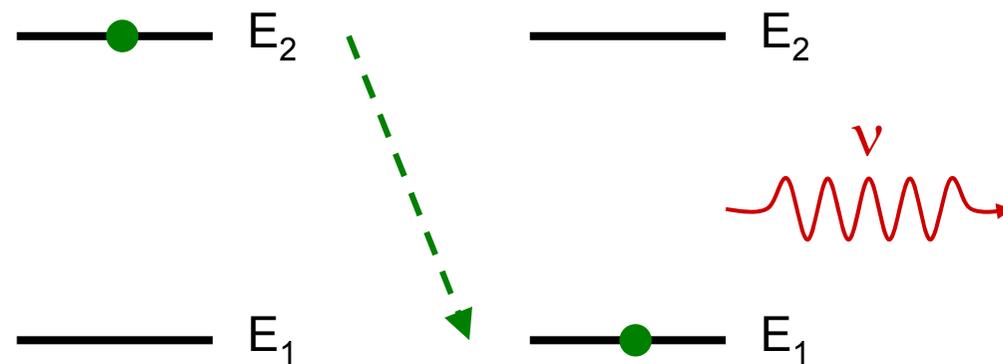
Deux processus d'interaction résonnante :

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

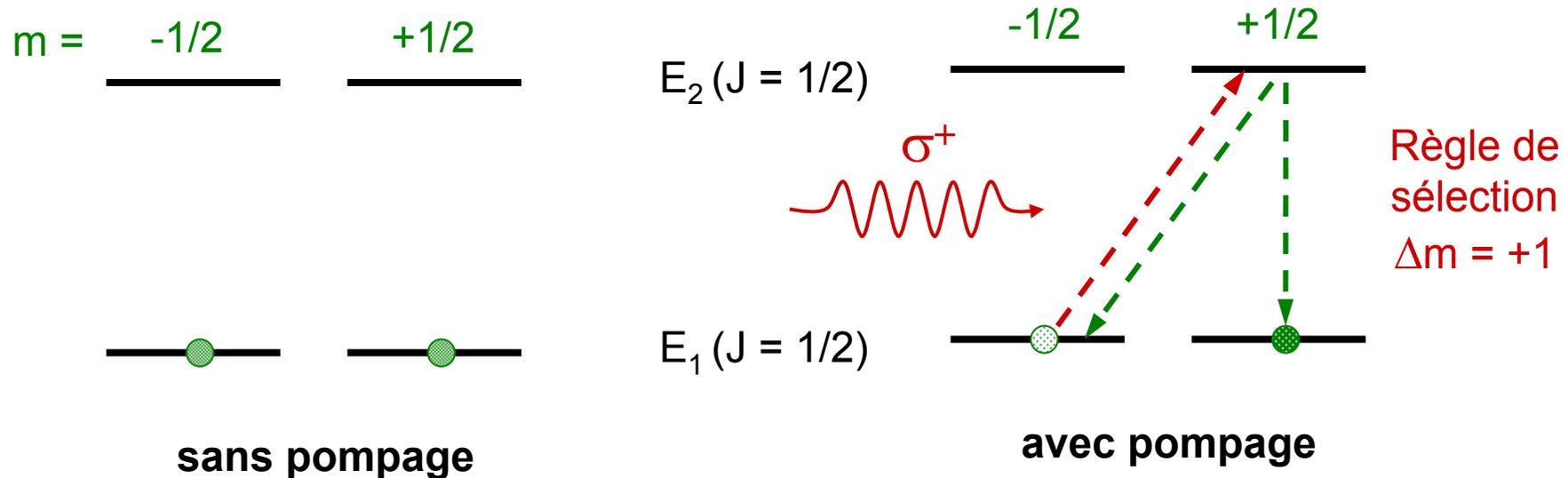
Utiliser la lumière et/ou une onde hertzienne pour
transférer de l'énergie et/ou du moment cinétique à un atome,
c'est faire du **pompage optique**

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

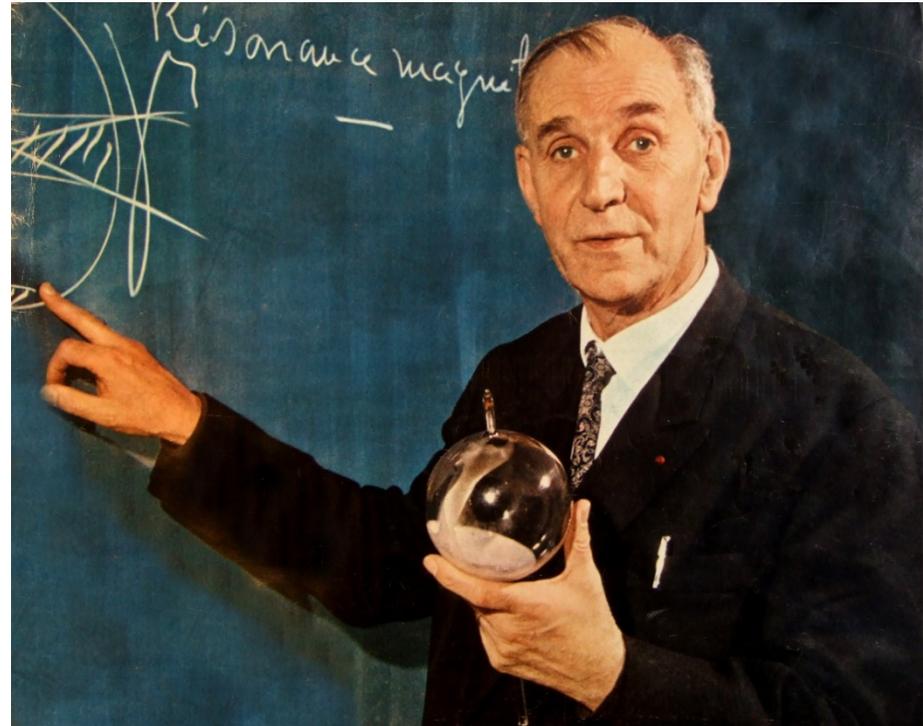


On crée ainsi de l'orientation atomique :
le moment cinétique de l'atome
(et donc son moment magnétique)
pointe dans une direction privilégiée.

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.

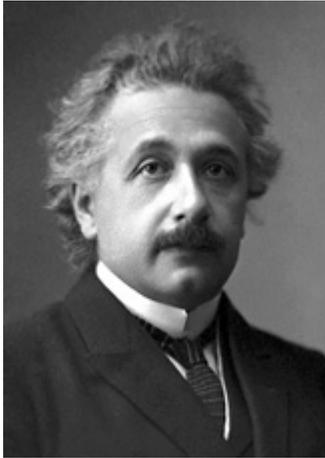
Exemple : imagerie des poumons
avec de l'hélium 3 polarisé.



Alfred Kastler
Prix Nobel 1966

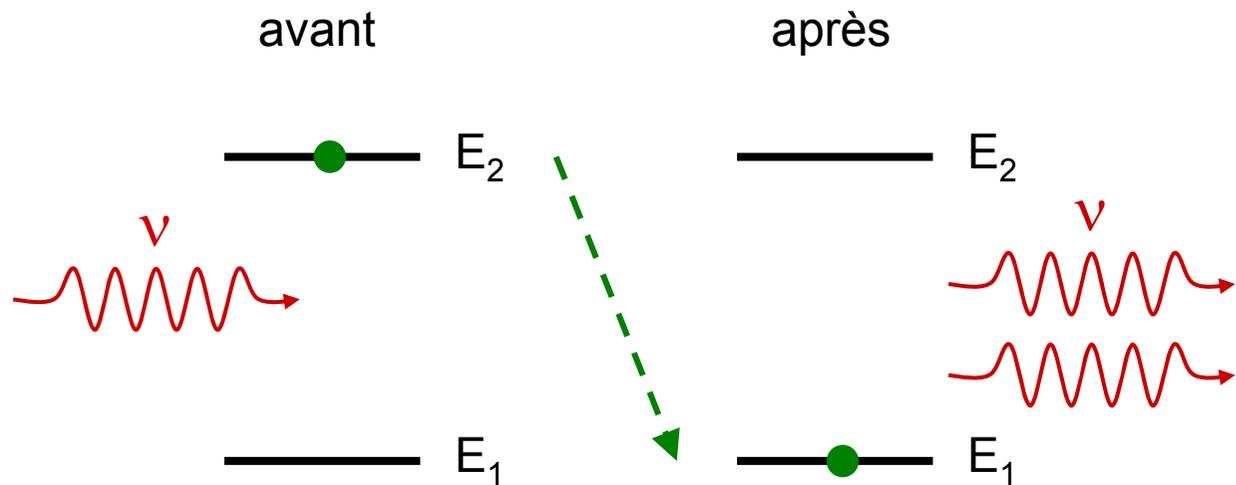
**Le pompage optique utilise les processus
d'absorption et d'émission spontanée**

Un troisième processus d'interaction résonnante !



Albert Einstein
(1917)

L'émission induite

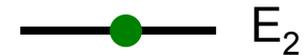


Le deuxième photon, émis par émission induite, a les mêmes propriétés que le photon incident : la lumière se trouve **amplifiée** par l'atome.

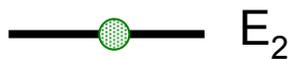
Comment observer l'émission induite ?

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

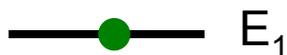
- l'absorption atténue le rayonnement incident
elle est proportionnelle à la population du niveau E_1
- l'émission induite l'amplifie
elle est proportionnelle à la population du niveau E_2



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**.

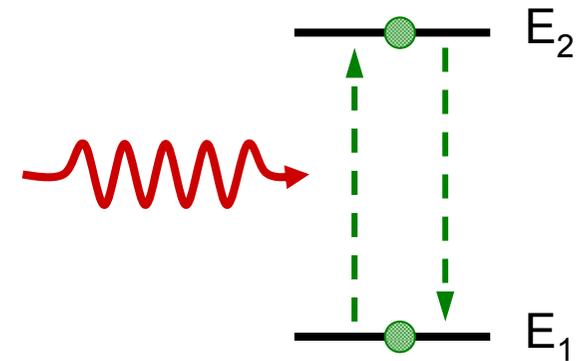


Mais dans son état "normal" (à l'équilibre thermodynamique)
l'état du bas est toujours le plus peuplé.

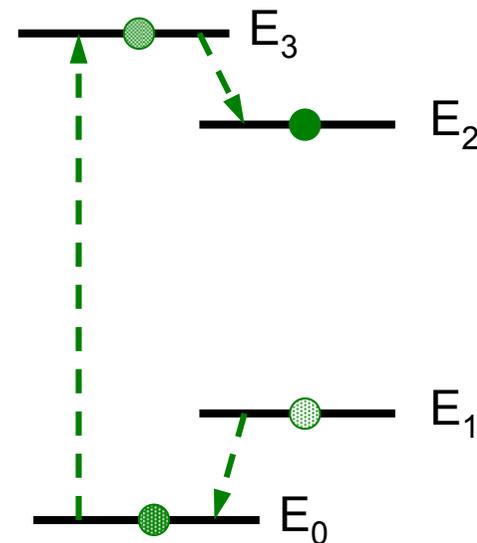
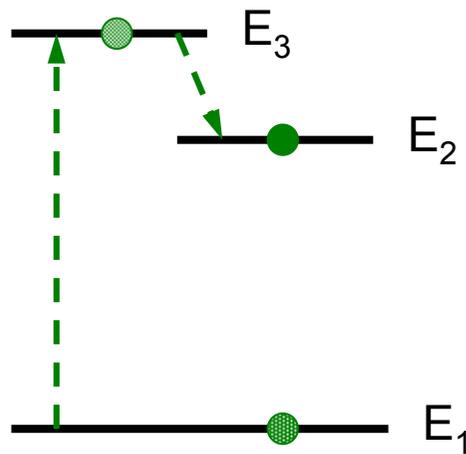


Le pompage optique pour créer une inversion de population

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



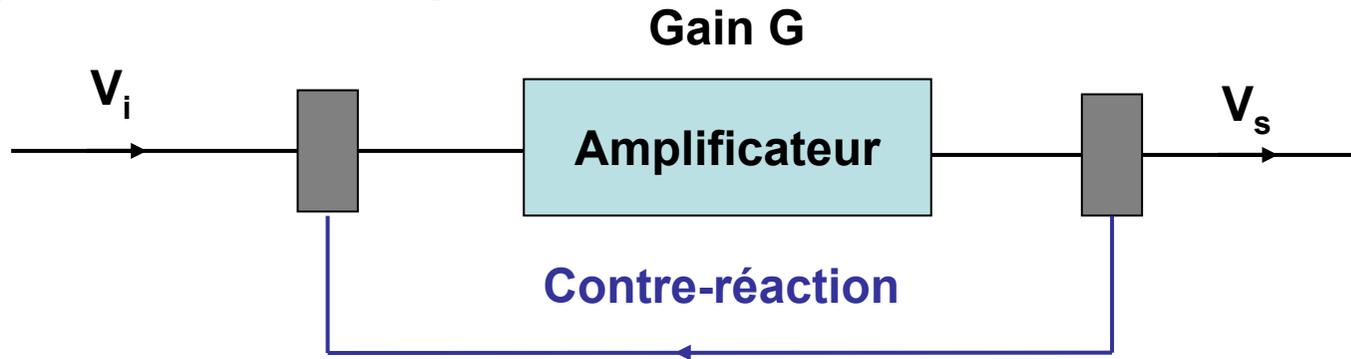
Mais possible avec trois ou quatre niveaux :



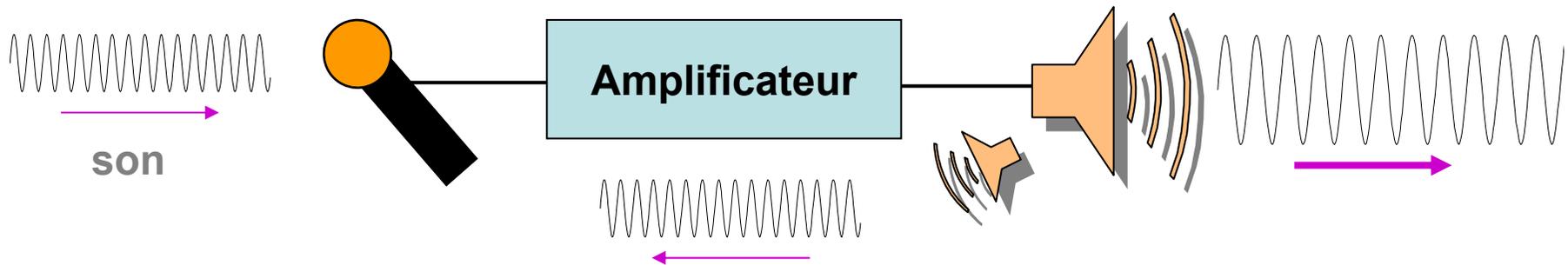
Amplificateurs et oscillateurs

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

Microwave **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 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 NH_3

Sélection par un champ électrique

Cavité micro-onde résonnante à 24 GHz

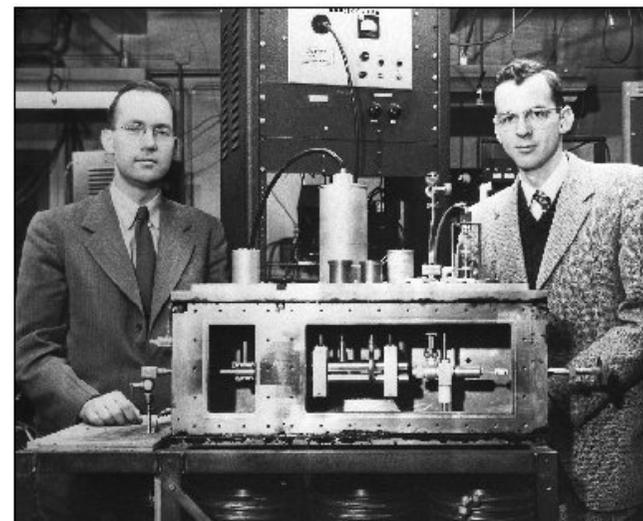
Longueur d'onde 1,25 cm

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

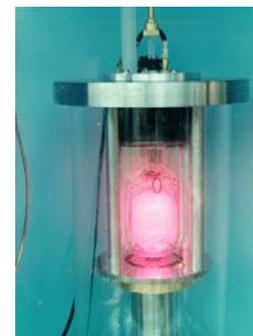
Townes, Basov et Prokhorov

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

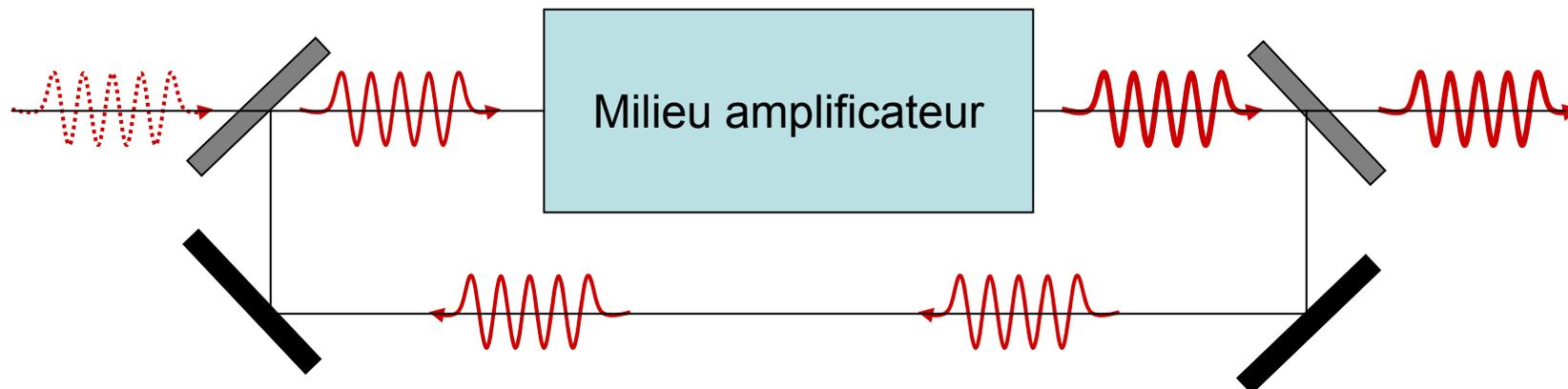
Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Appelé dans un premier temps "maser optique "

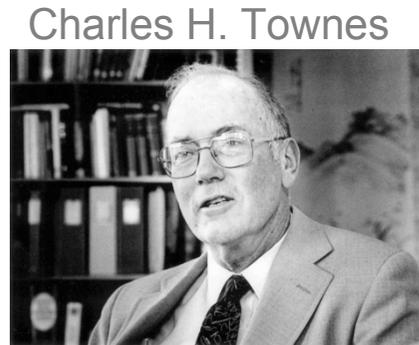
Diverses propositions sont faites dans les années 50 pour obtenir des populations différentes de l'équilibre dans un milieu atomique et réaliser l'amplification de rayonnement optique

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?

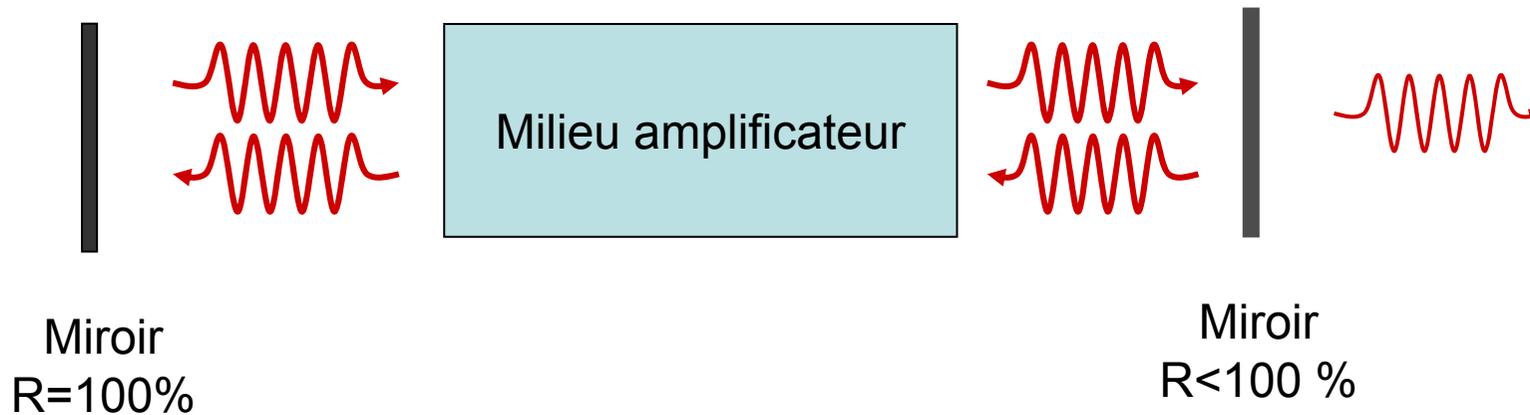


En 1958, Schawlow et Townes font la proposition d'un **maser optique** avec une cavité de type Fabry-Perot



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** :**

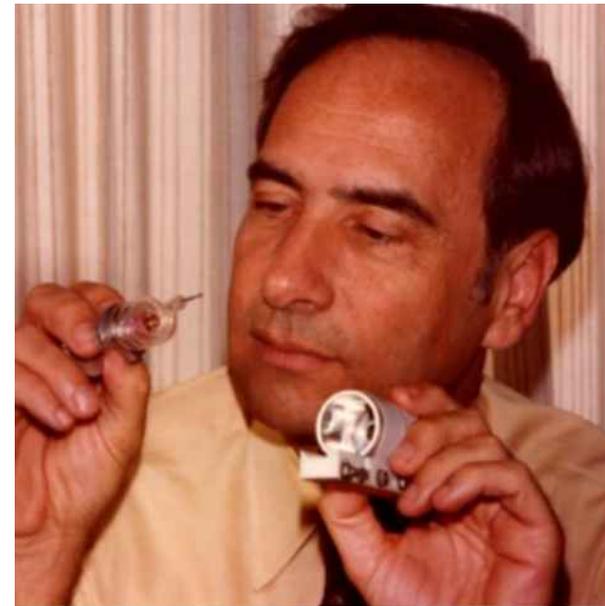
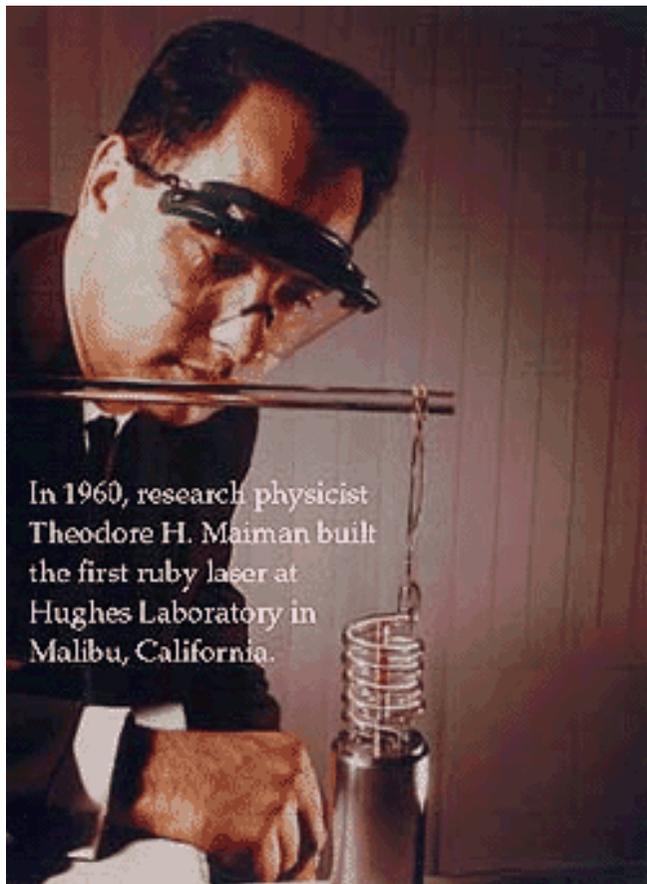
- à Columbia University (Townes)
- aux Bell Labs (Javan, Schawlow)
- à Moscou (Basov et Prokhorov)
- et dans des compagnies privées (Gould)
-

**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 !

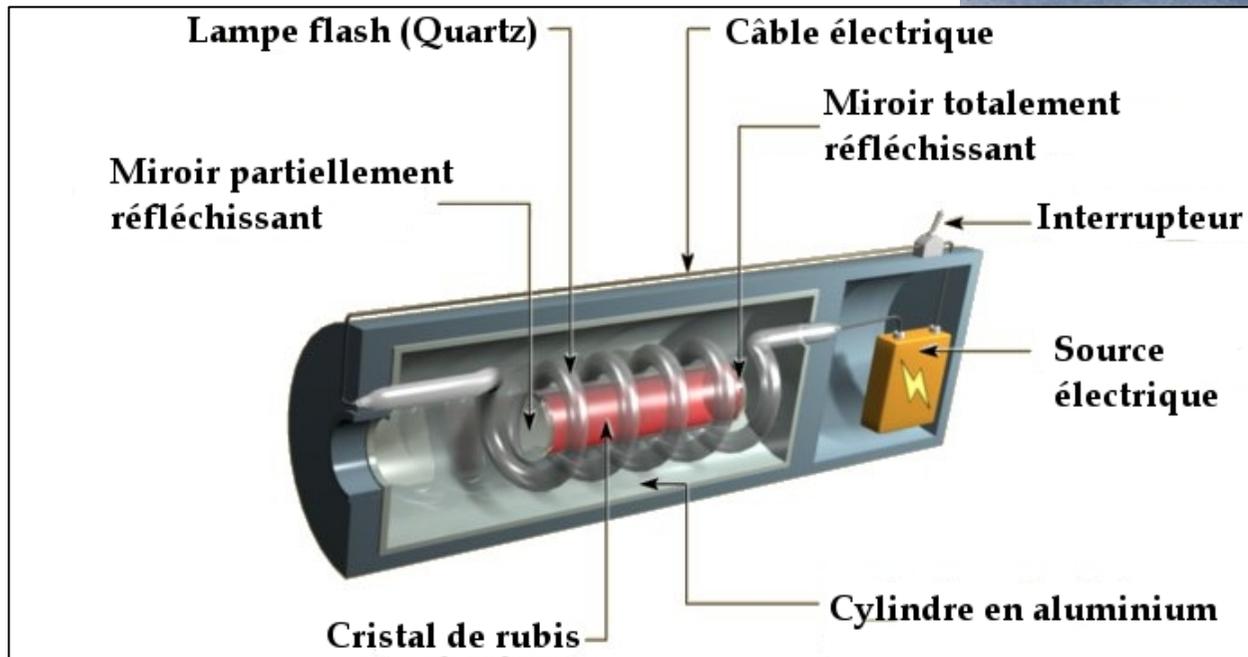
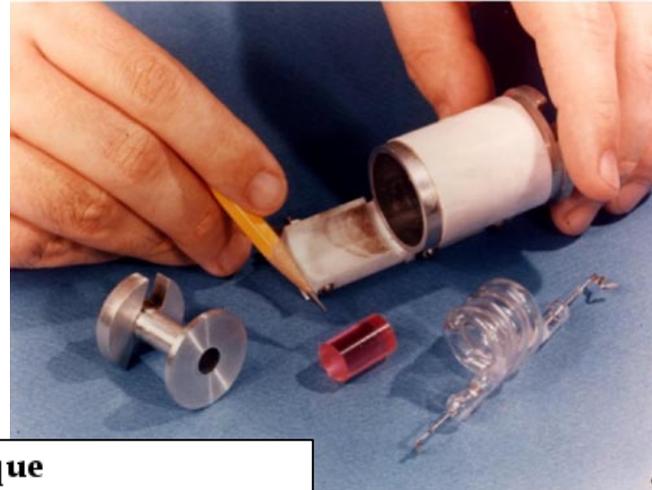
Longueur d'onde 694 nm

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



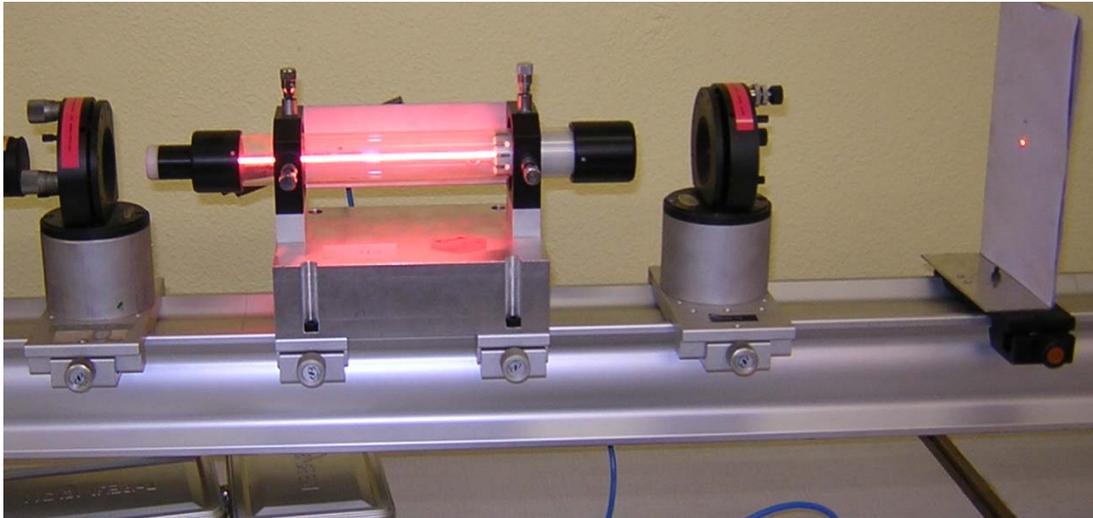
(*) rubis :
 Al_2O_3 dopé au Cr^{3+}

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**

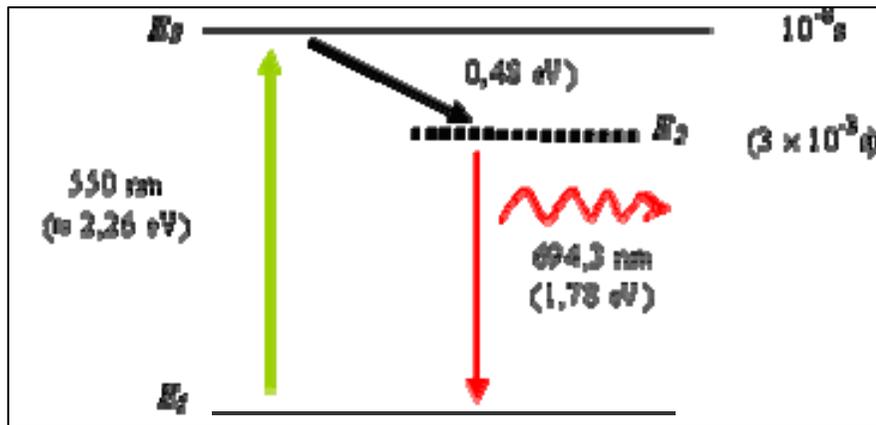
**Longueur d'onde
1,15 μm ...**



... puis 633 nm

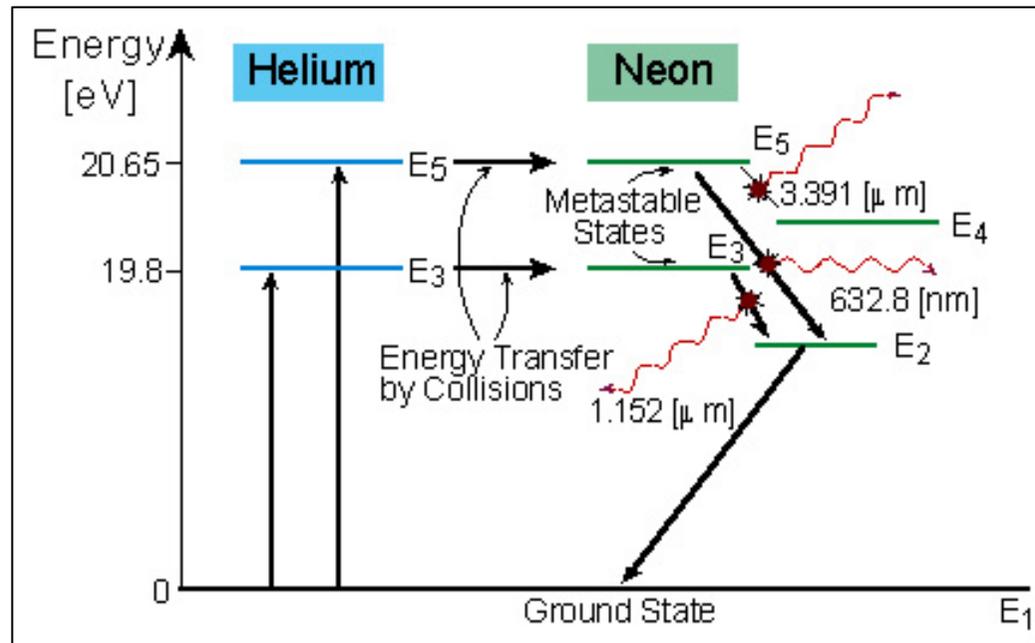
**A.D. White et J.D. Rigden
(1962)
Bell Labs**

Lasers à trois ou quatre niveaux ?



Laser à rubis

Laser Ne-Ne
Le premier laser émettant en continu



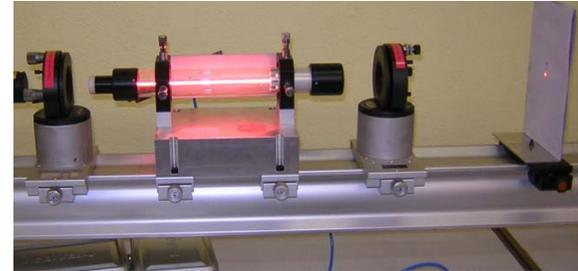
Le mécanisme de pompage "à quatre niveaux" est plus efficace et permet de fonctionner en continu

Début d'une longue série...

Milieux amplificateurs, pompages et longueurs d'onde variés

Lasers à gaz

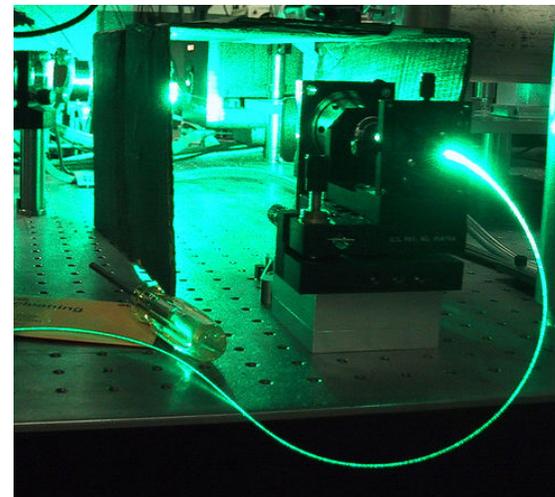
- laser He-Ne (1961), gaz atomique
Décharge électrique et collisions entre atomes
1,15 μm - 3,39 μm - 633 nm, 1 à 100 mW



Lasers les plus répandus pendant plus de 20 ans

- laser à vapeur de Cs (1961), gaz atomique, 3,2 μm - 7,2 μm
- laser CO₂, (1962), gaz moléculaire, 9,6 μm - 10,6 μm , 1 à 10 kW
- laser à azote (1963) gaz moléculaire N₂
- lasers ioniques, gaz atomique ionisé (1964)

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



Lasers à solides (1) Très répandus

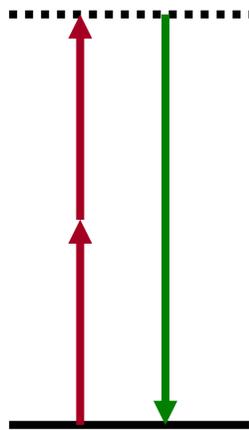
Lasers à rubis (les premiers lasers sont commercialisés en 1961)

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

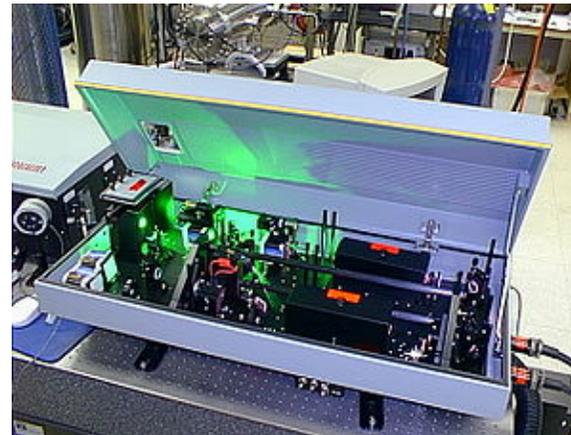
On peut doubler (ou tripler) leur fréquence dans un cristal non-linéaire



YAG doublé
532 nm



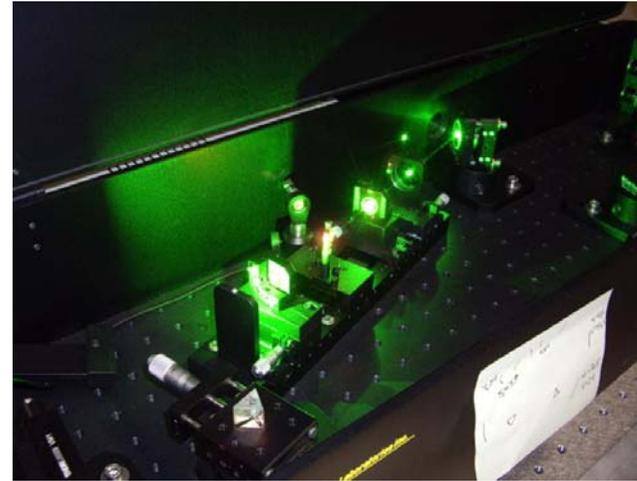
Pointeur laser vert



Lasers à solides (2)

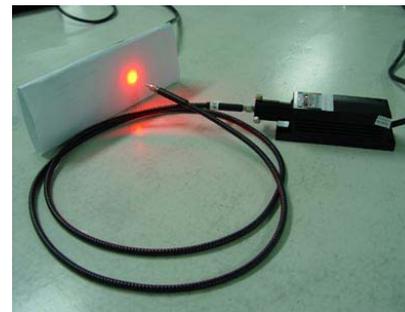
Lasers Ti:saphir

Pompage optique par YAG doublé ou 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



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

Les fibres optique 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

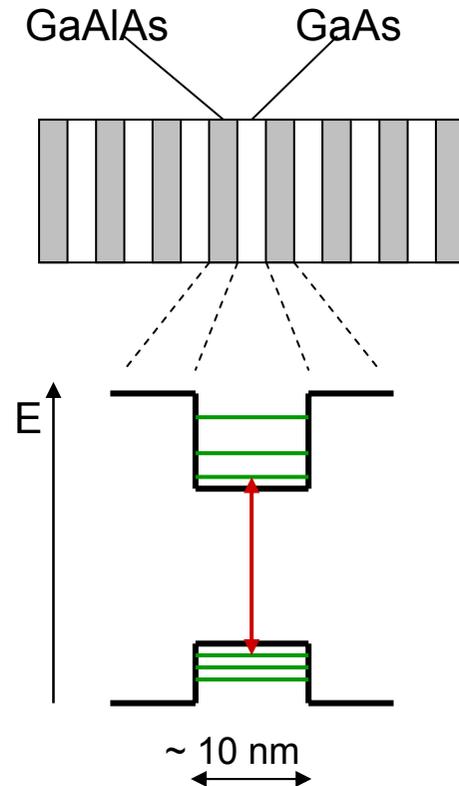
Dans un puits quantique les électrons sont confinés entre deux plans (2D)

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)

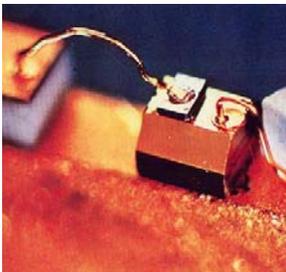
Nombreux développements dans les matériaux et les structures

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

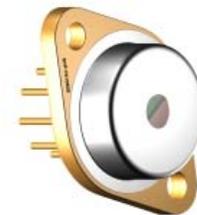
Extension des longueurs d'onde vers le bleu et l'UV
ainsi que vers l'IR lointain et le domaine des THz

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



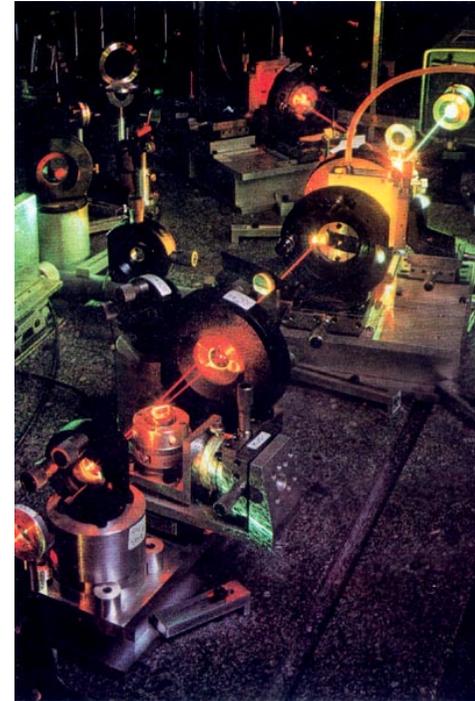
Lasers à liquides

Lasers à colorants (1966)

Pompage optique par un autre laser

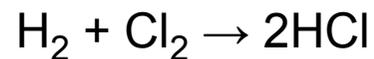
Possibilité d'accorder la fréquence
sur une large plage dépendant du colorant

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)

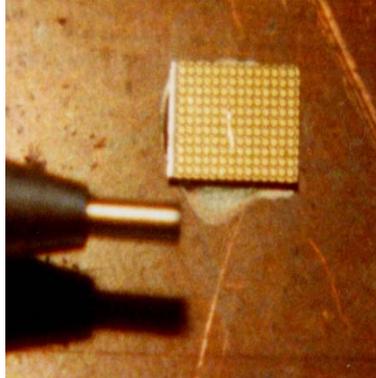
Ultraviolet : KrF (248 nm), XeBr (282 nm), etc. (exciplexes)



Une grande variété de réalisations et de propriétés

• Géométries et dimensions

100 microlasers
à semiconducteur



Laser Nova pour la fusion nucléaire

• Puissances

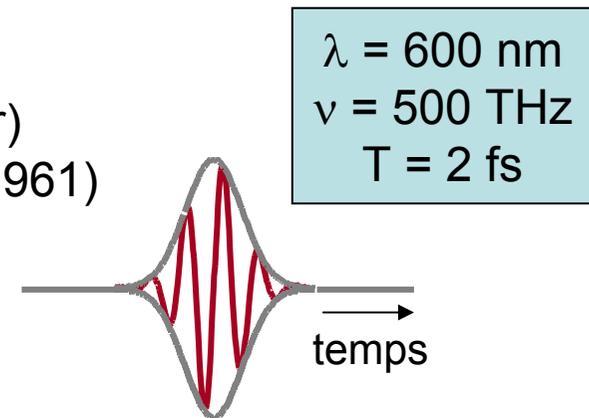
du microwatt au pétawatt ($1\text{PW} = 10^{15}$ watts)

• 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)



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 CO₂



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

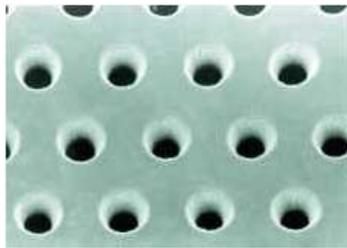
Le laser est un outil universel



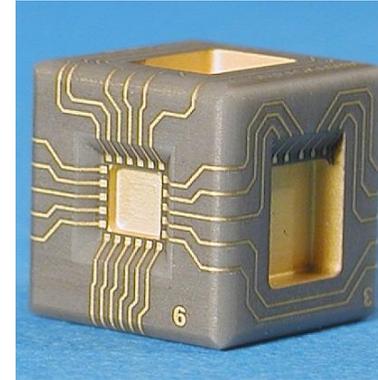
Dans l'industrie (suite)

Perçage

Laser YAG ou CO₂

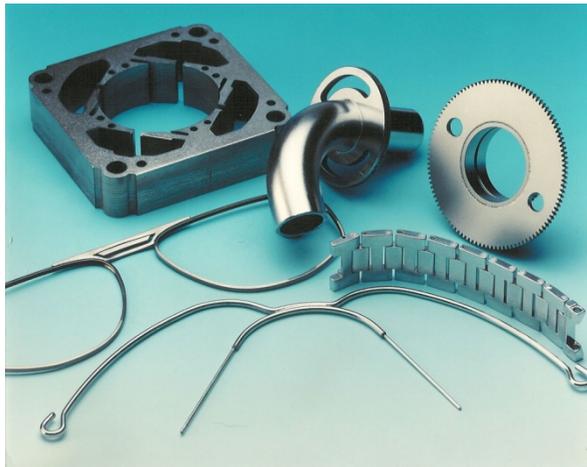


Trous de 10 µm dans un film en polymères



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)

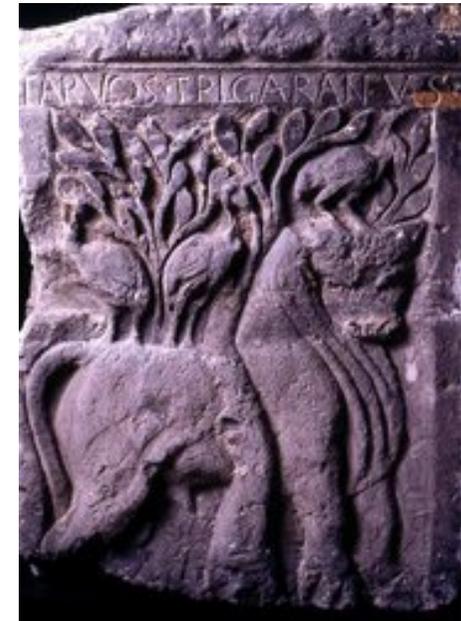
**Nettoyage de la pierre des monuments et des sculptures :
sans eau, sans produit chimique, sans abrasif, sans pression**



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 ...

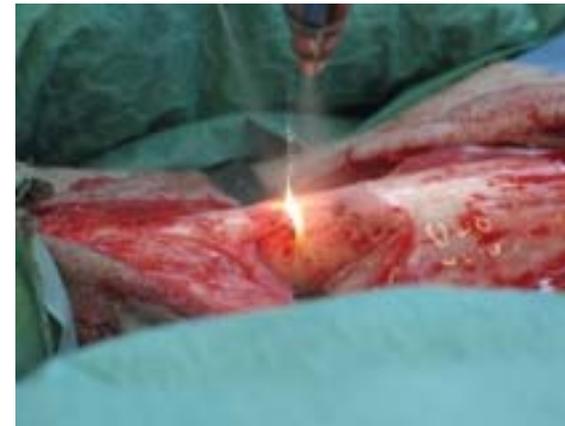
... ou stimulation de la repousse des cheveux !



**Chirurgie de
contact
" bistouri laser "**

Lasers holmium-YAG

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



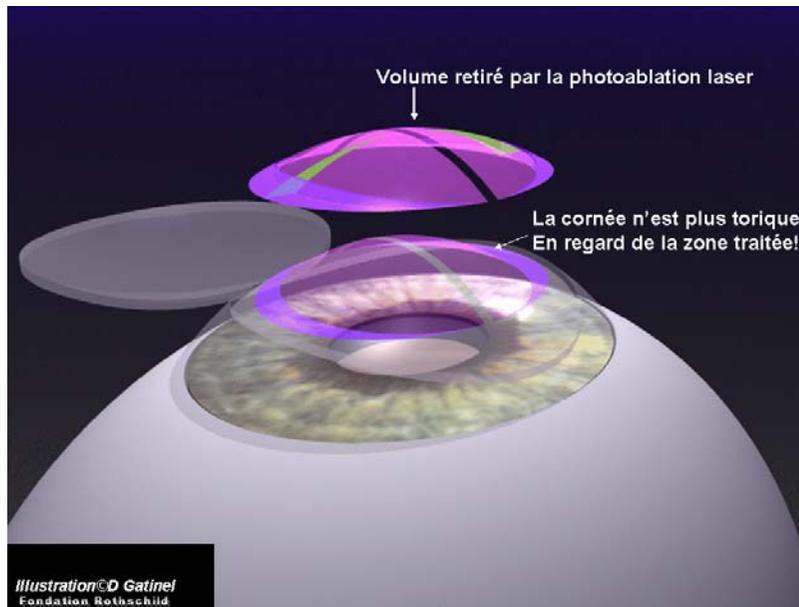
La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde et du tissu

Pour la médecine (suite)

Ophthalmologie

Traitement du glaucome
Lasers YAG, Ar⁺ ou diode

Chirurgie réfractive



Traitement du décollement de la rétine
Laser à Ar⁺



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

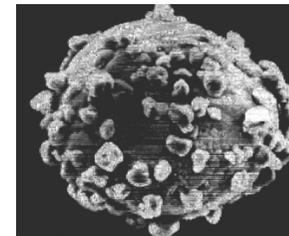
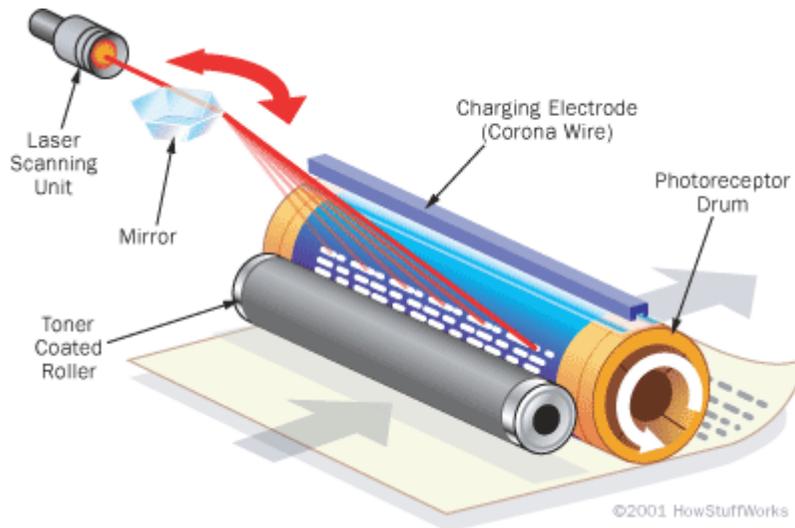
Au bureau ou à la maison

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

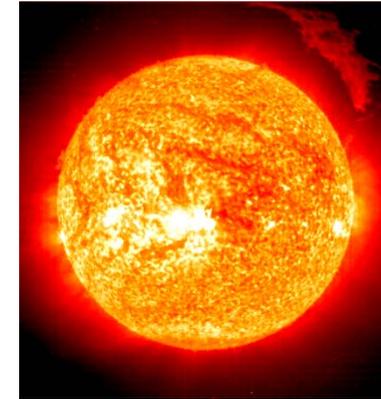
L'énergie de la liaison chimique : de l'ordre de 1 eV
- combustion du charbon, du pétrole

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

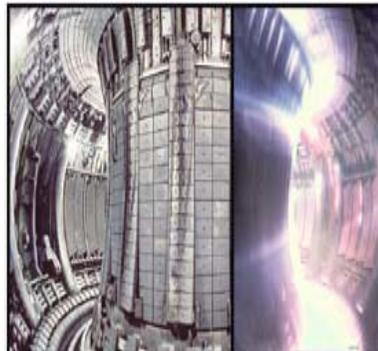
Le Soleil

Vers la fusion contrôlée

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

Le confinement
magnétique

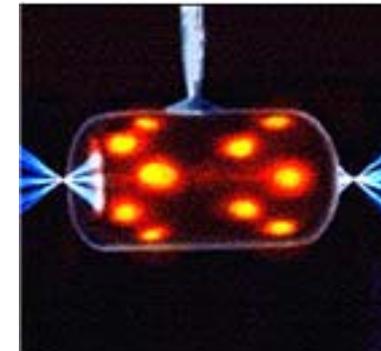
projet ITER



Tokamak JET

Le confinement
inertiel

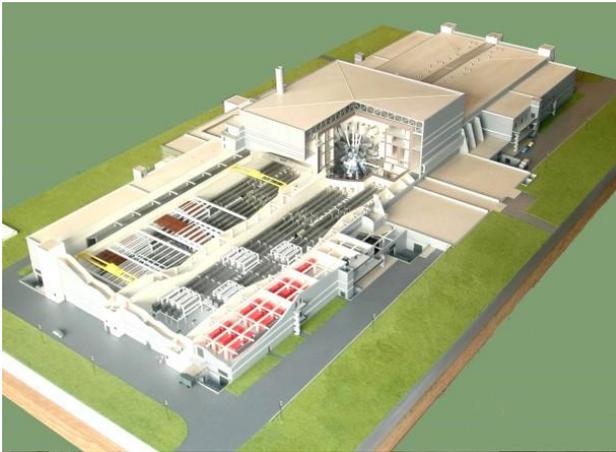
projet laser MJ



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 m²)
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

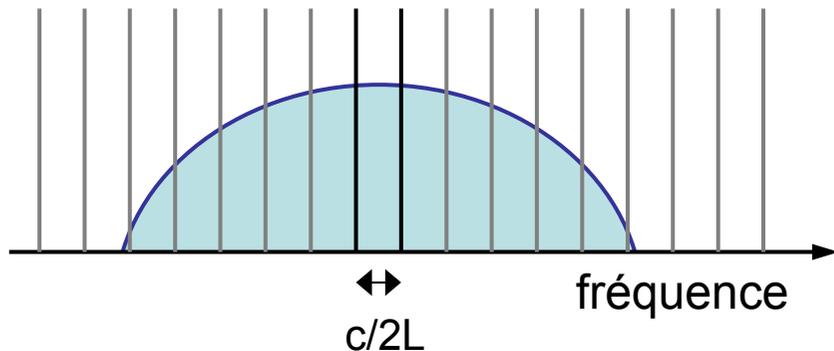
L'énergie produite à chaque impulsion sera de **1,8 MJ**

focalisée sur moins de 1mm²

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

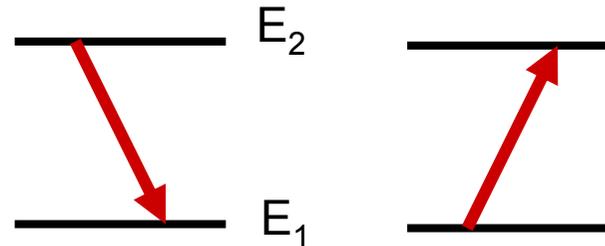
Depuis les années 70, on sait de plus faire des lasers monomodes et accordables
lasers à colorants continus, puis lasers titane-saphir (1986)

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 ν_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 :

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

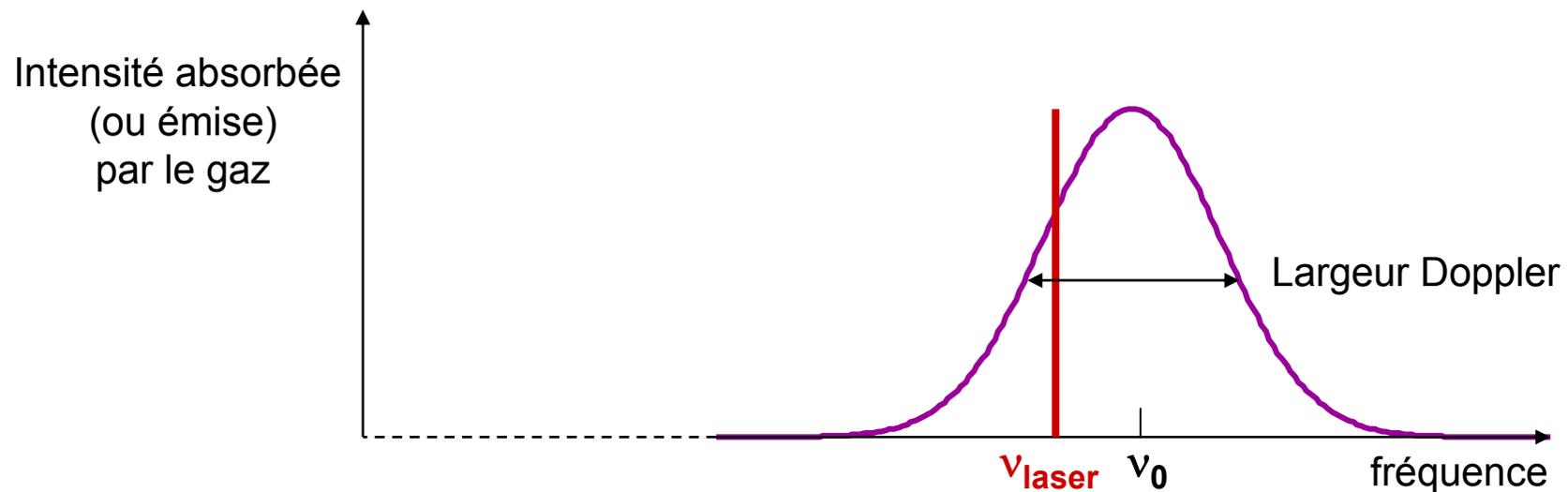
Le décalage Doppler est proportionnel à ν_0

- 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



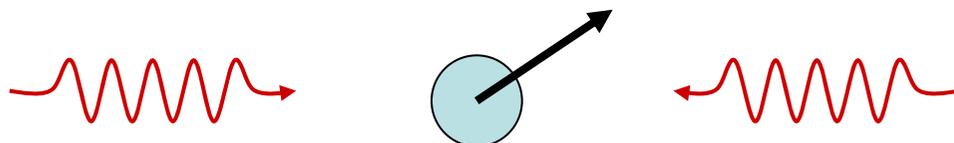
La largeur de raie est reliée à la température

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

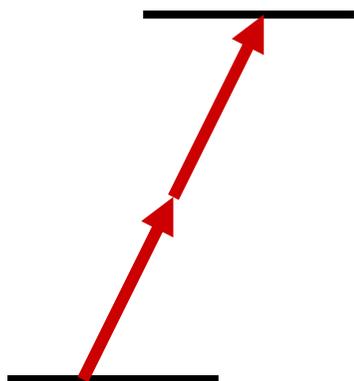
Les lasers accordables permettent d'éliminer l'effet Doppler, par exemple en faisant absorber à l'atome deux photons de directions opposées issus du même laser



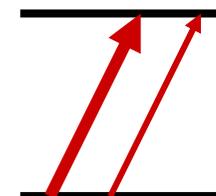
Les décalages Doppler se compensent

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

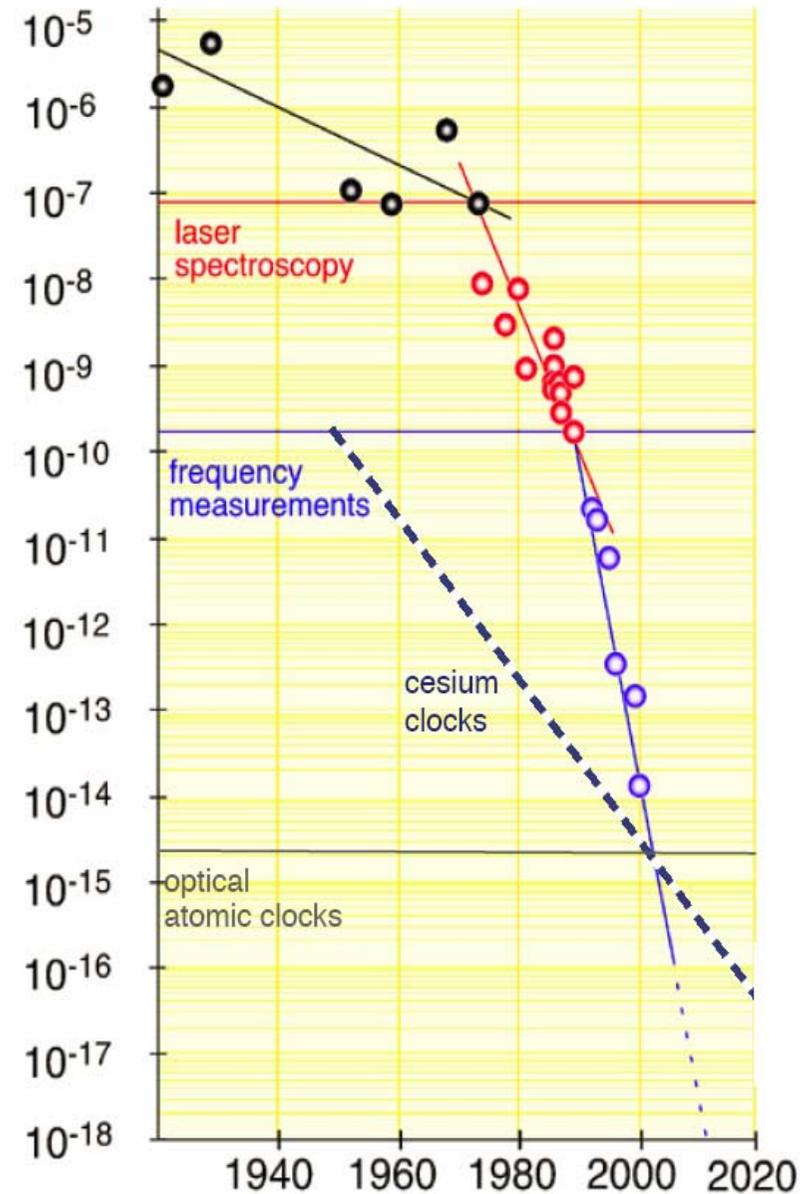
La résolution obtenue passe de 10^{-6} à 10^{-9}
(ou beaucoup mieux selon la largeur naturelle de la transition)

La spectroscopie laser

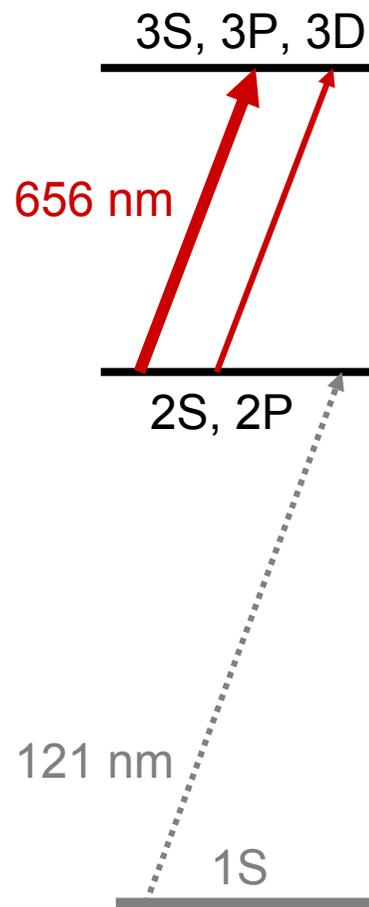
**Exemple de l'atome d'hydrogène
(1 proton + 1 électron)**

Intérêt de la confrontation
expérience - théorie (QED)

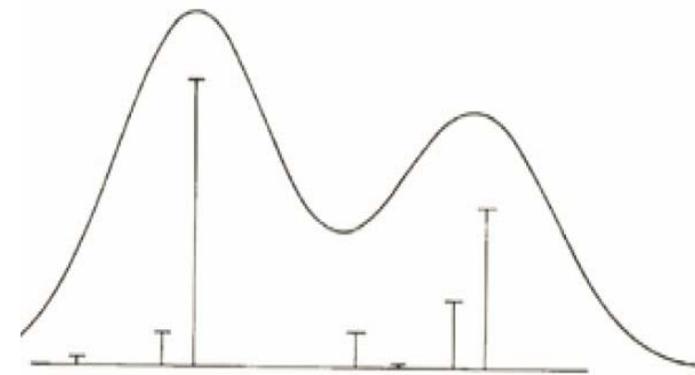
évolution de la précision relative
des fréquences de transition



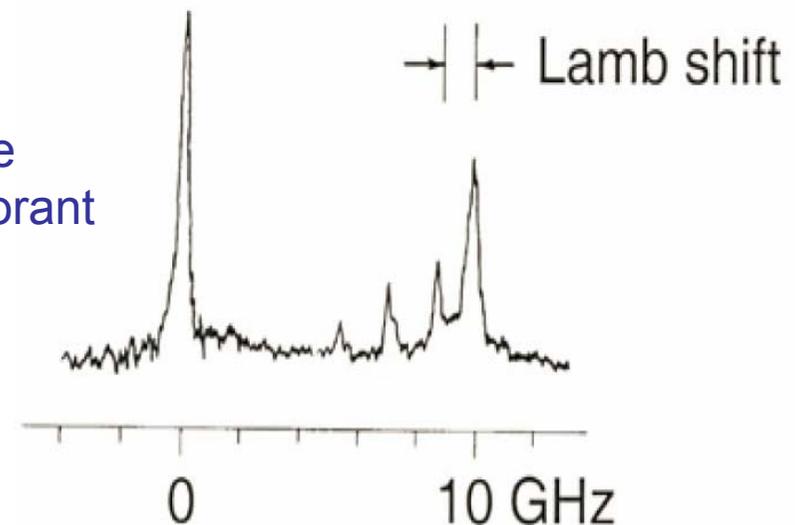
L'absorption saturée de la transition Balmer α



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



Spectre d'absorption saturée observé avec un laser à colorant



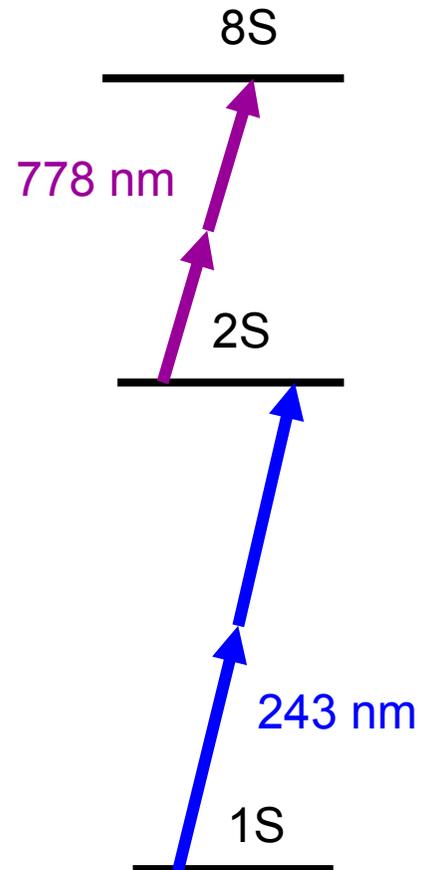
Première observation du déplacement de Lamb (écart 2S-2P) dans le domaine visible

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

Les transitions à deux photons

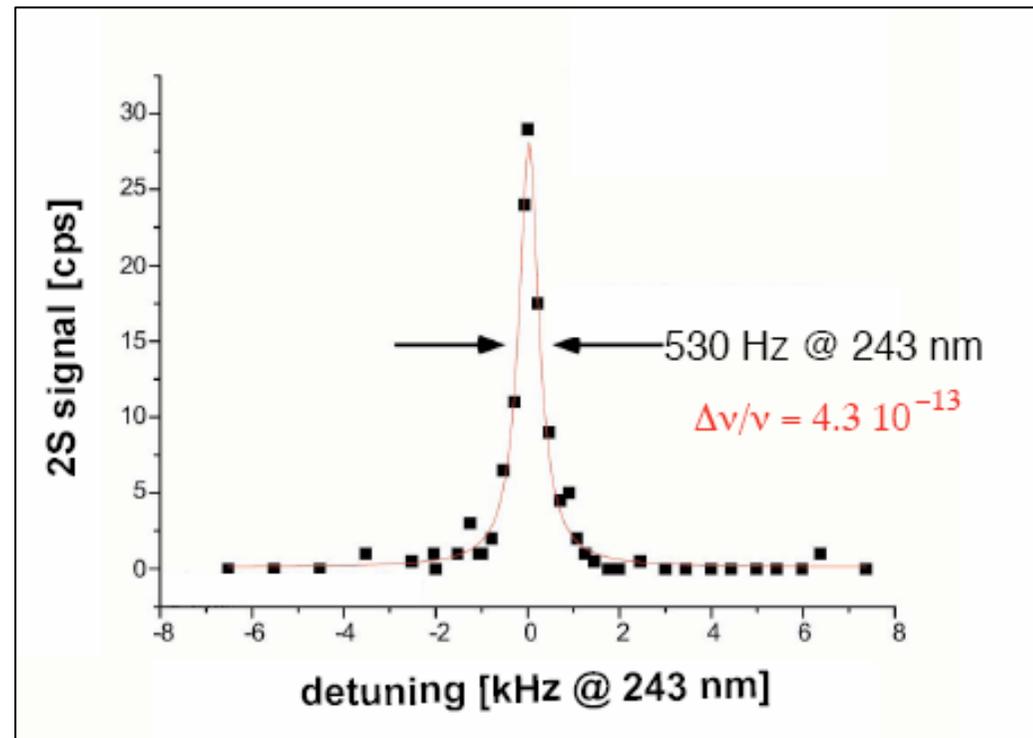
Groupe du LKB à Paris :
F. Biraben, L. Julien, F. Nez ...

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

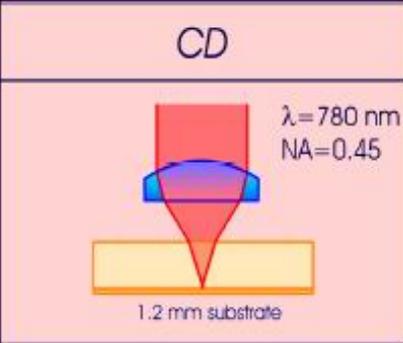
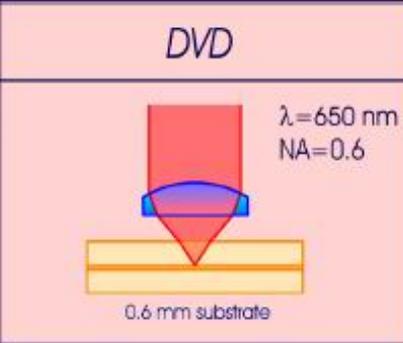
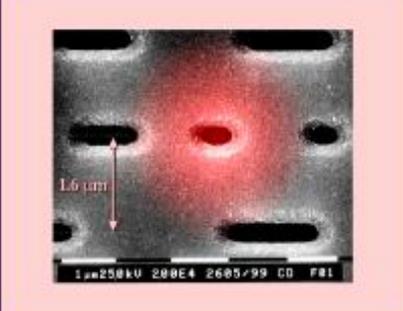
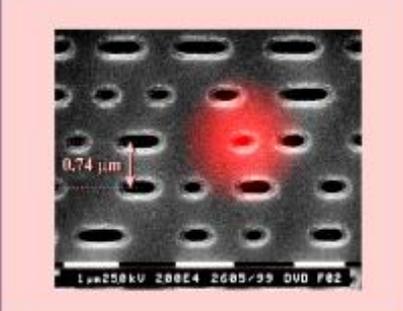
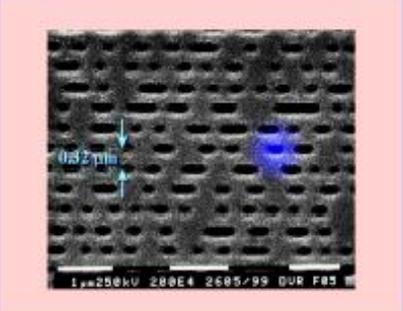


Lecture de code-barres

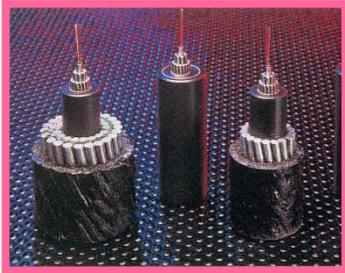
Lasers à semiconducteurs

CD et DVD



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



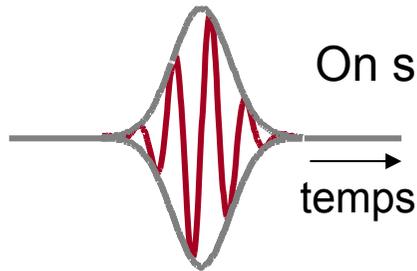
**80% des communications à longue distance dans le
monde le sont grâce au réseau de fibres optiques**

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

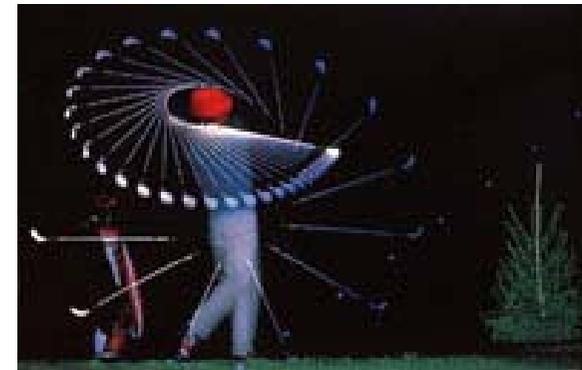


On sait maintenant faire des lasers avec des impulsions très brèves de quelques femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)

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

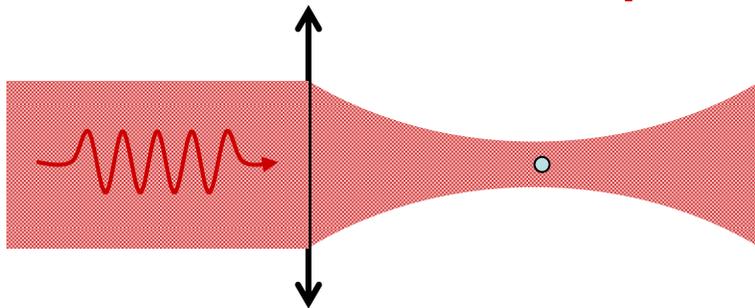
La lumière exerce des forces sur les particules

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)

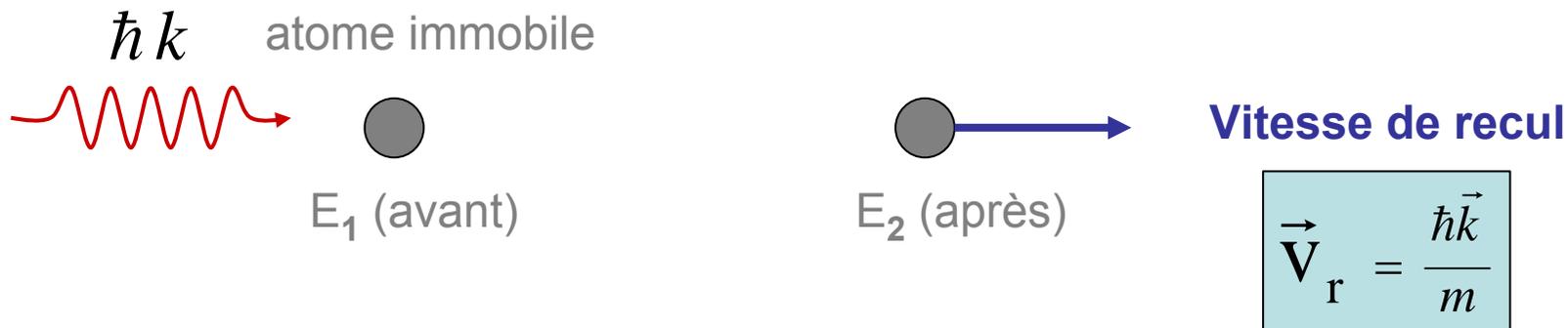
Le photon possède une énergie, un moment cinétique et une quantité de mouvement :

- 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

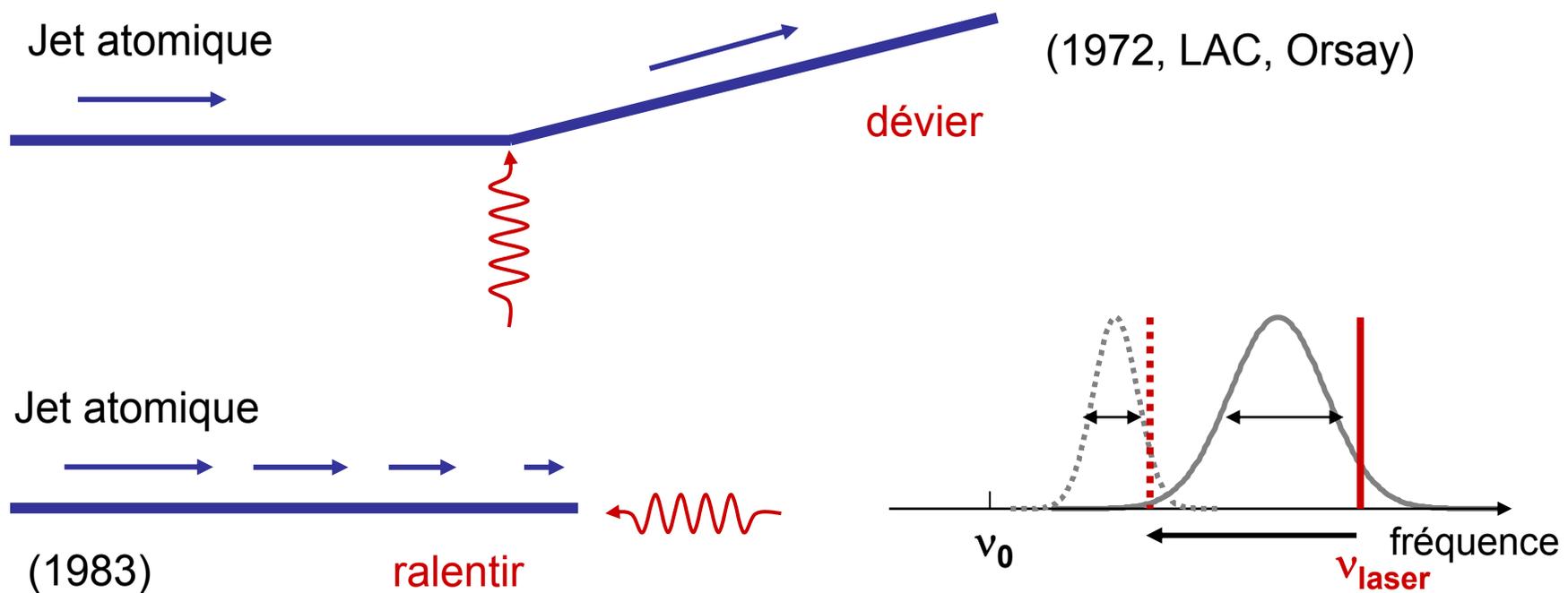
Absorption d'un photon par un atome de masse m



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...

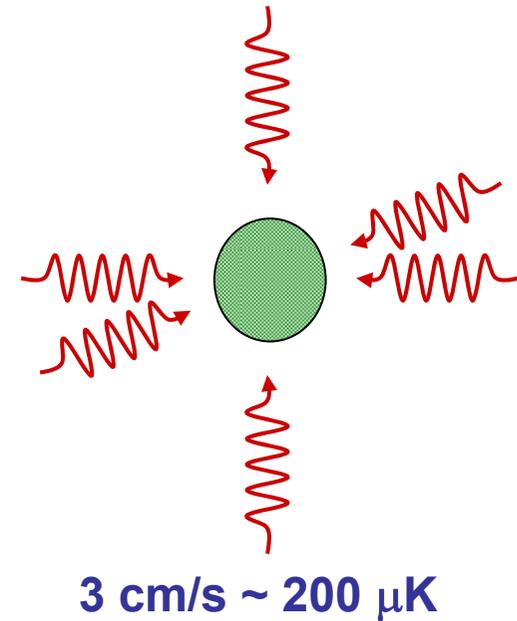
En diminuant leur vitesse dans toutes les directions

La mélasse optique

Six faisceaux laser (un dans chaque direction de l'espace)
de fréquence légèrement inférieure à ν_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")



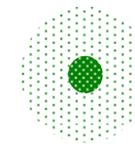
... et les piéger

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 → 2 μK
- Refroidissement par évaporation → 100 nK

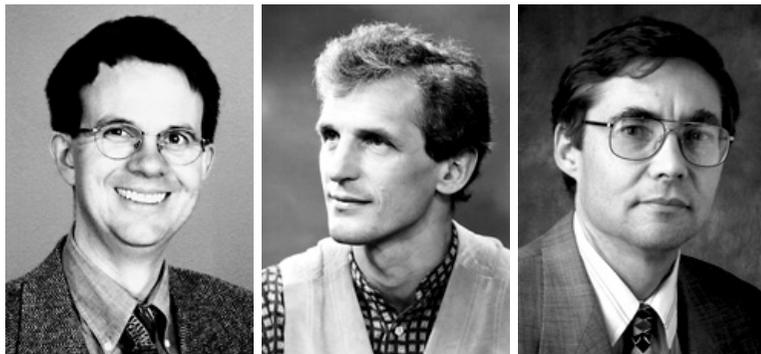
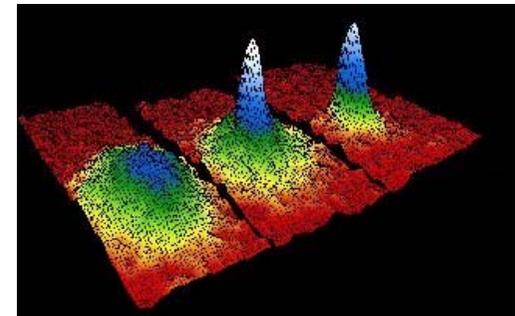
... et des densités de plus en plus fortes

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**

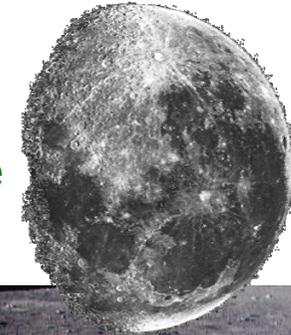
Les lasers pour mesurer

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



Télémètre laser

5 réflecteurs
déposés sur la Lune

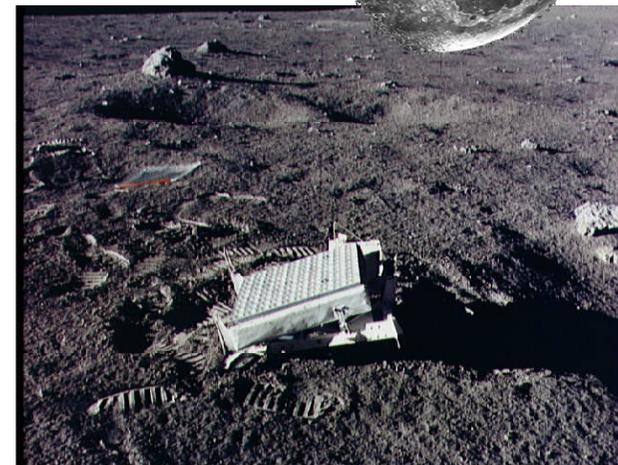


La distance Terre-Lune



(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

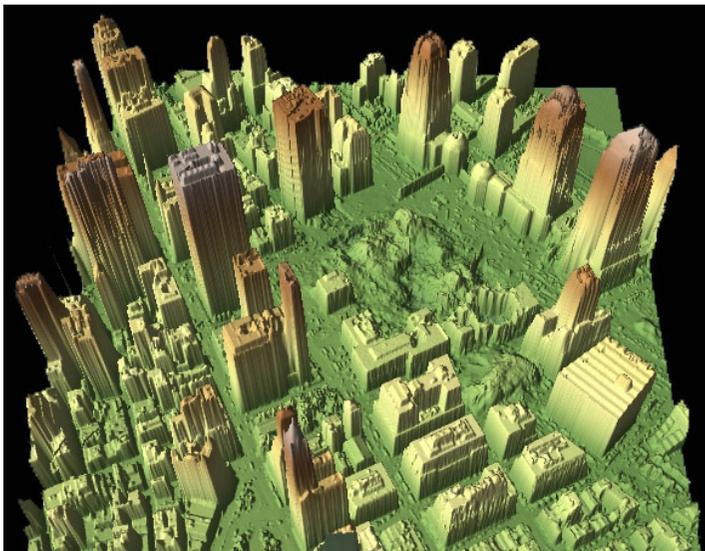
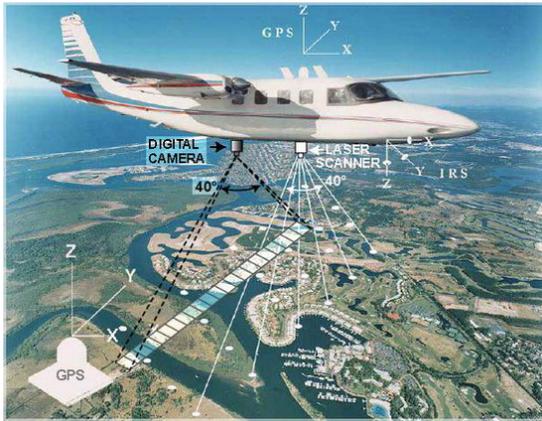
Impulsions de 100 ps

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

Le LIDAR

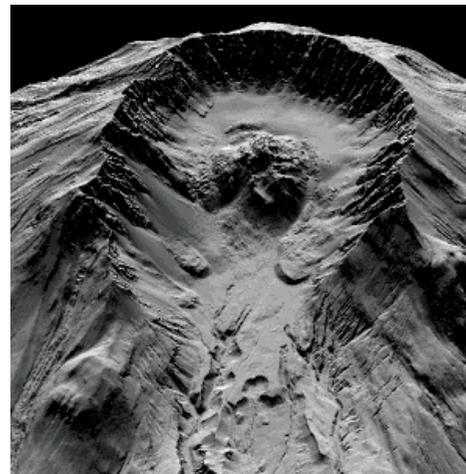
(Light Detection And Ranging)

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



est l'équivalent du RADAR mais dans le domaine optique

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



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)



LIDAR

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

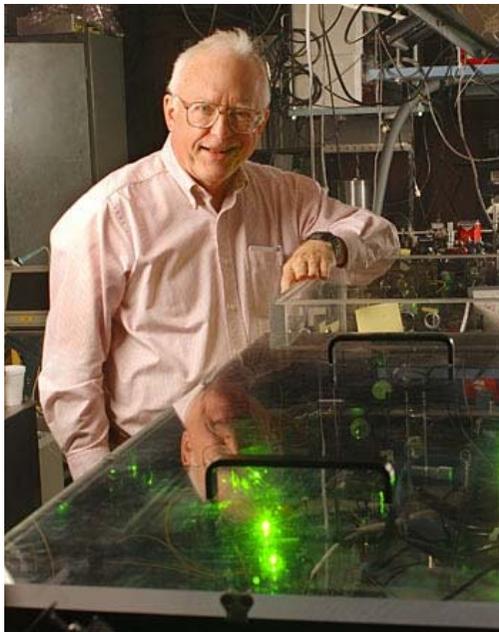
Mesure de déplacement de 10^{-18} m soit un millièème de la taille d'un noyau atomique

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

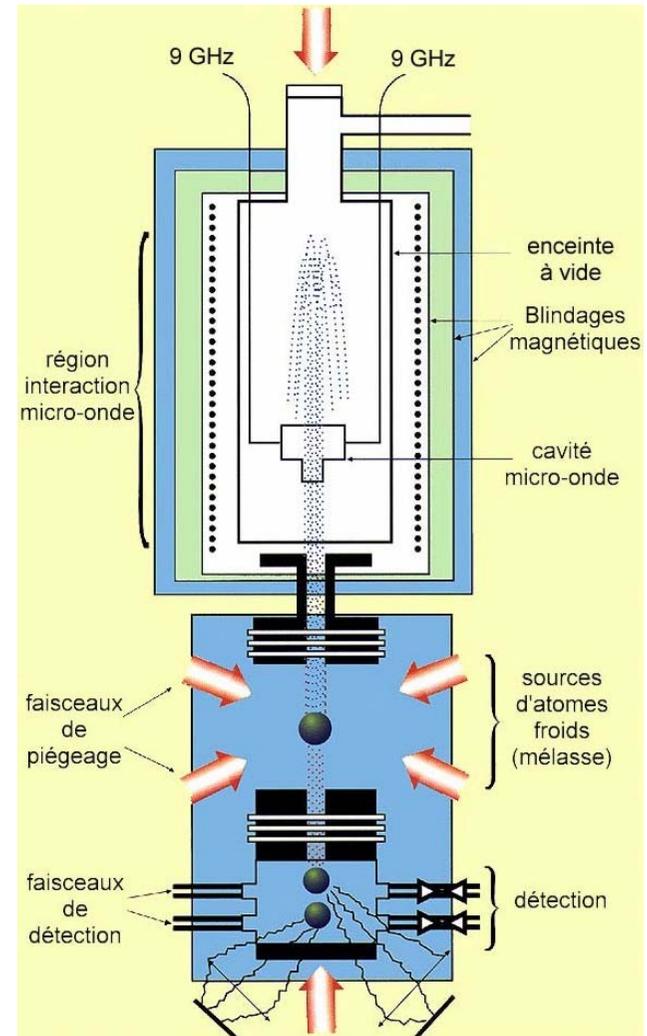
Utilisation de faisceaux lasers :

- 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 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 CH₄ 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** »

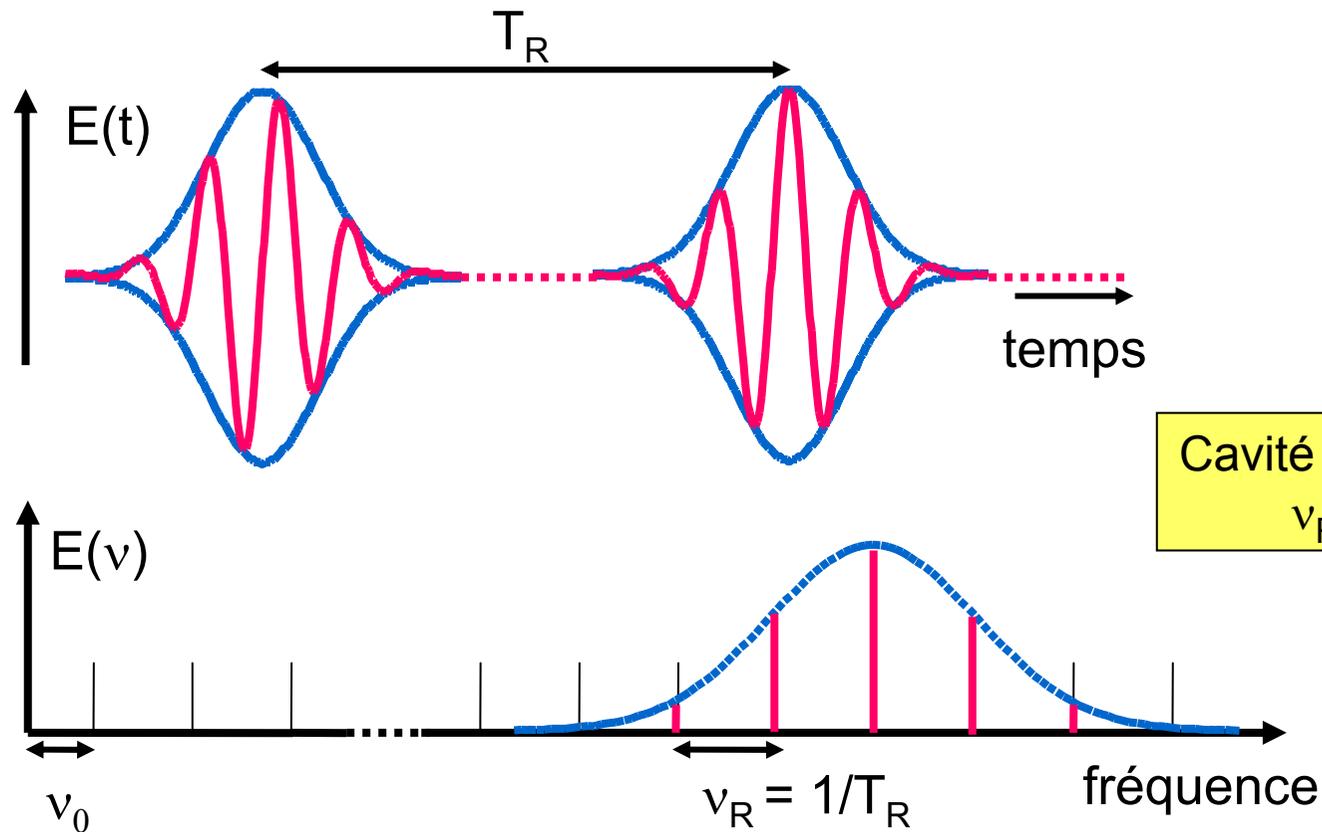
Il n'y a plus qu'un seul étalon pour les longueurs et les temps / fréquences : l'horloge à césium

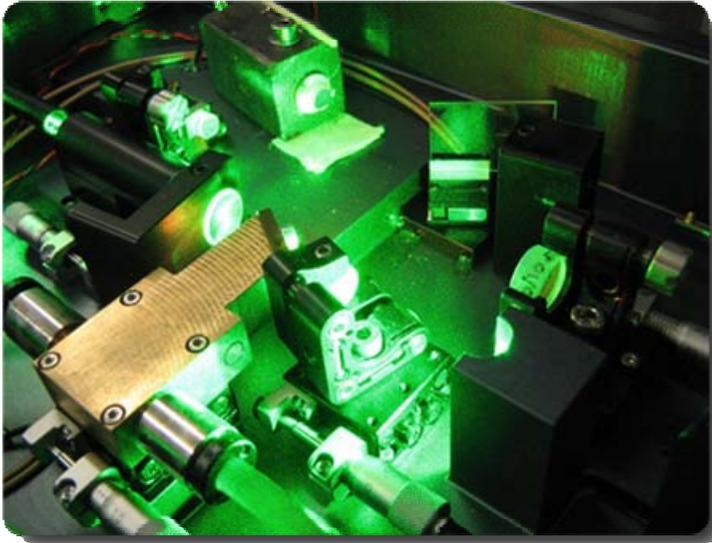
Pour mesurer les fréquences optiques : la révolution des peignes de fréquences

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)



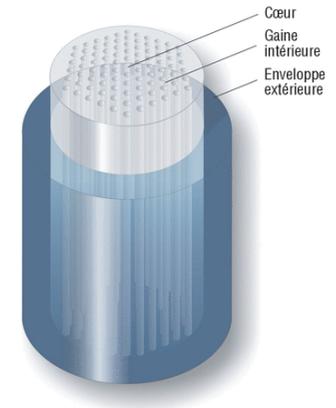
Ted W. Hänsch



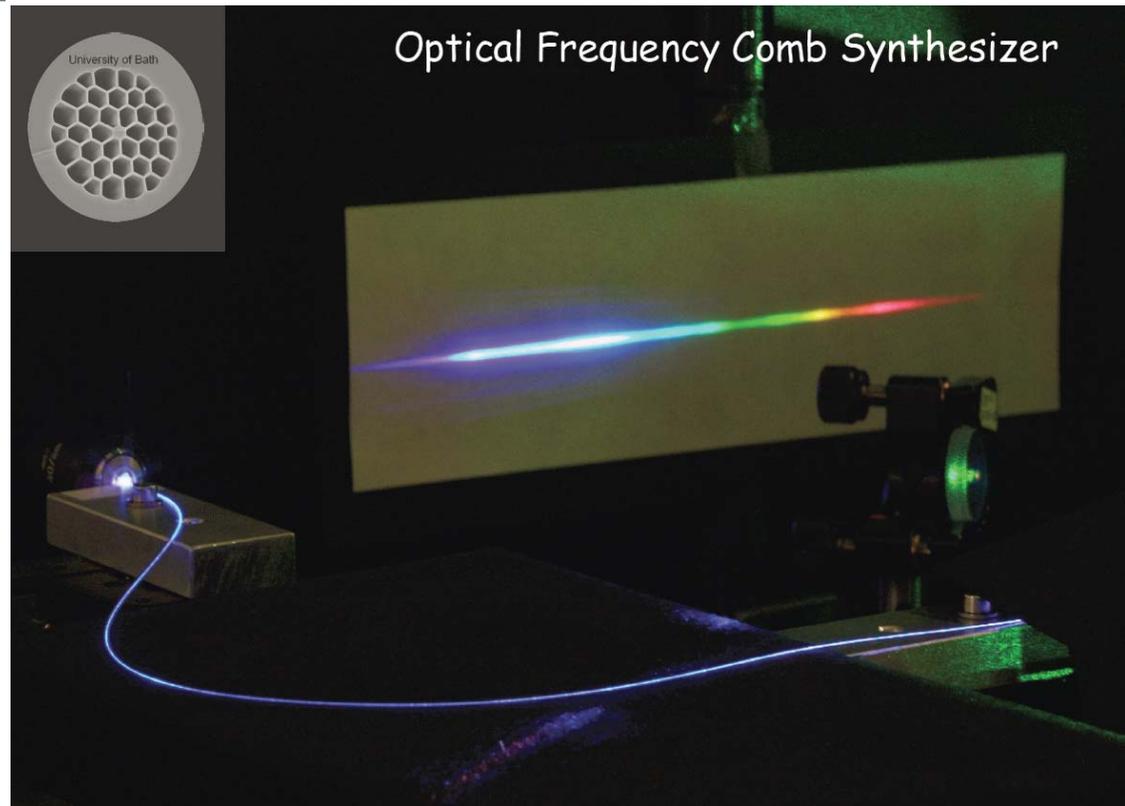


Les impulsions fs sont produites
par un laser titane-saphir

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

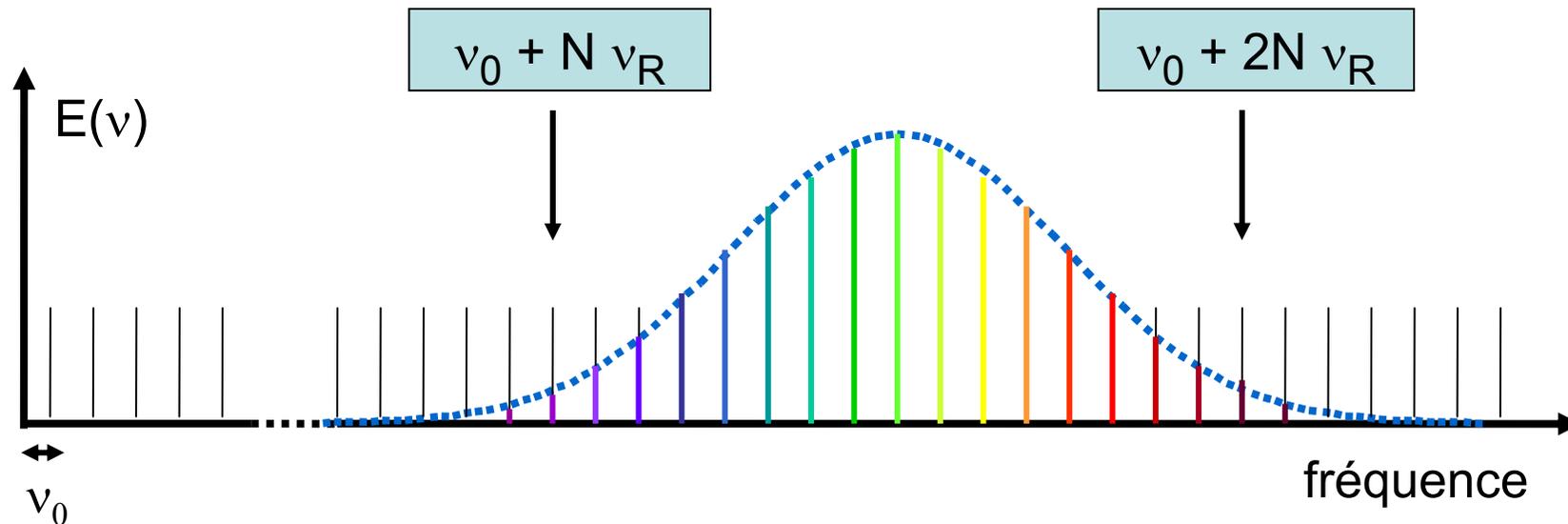


...dans laquelle leur spectre
en fréquence se trouve étendu



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

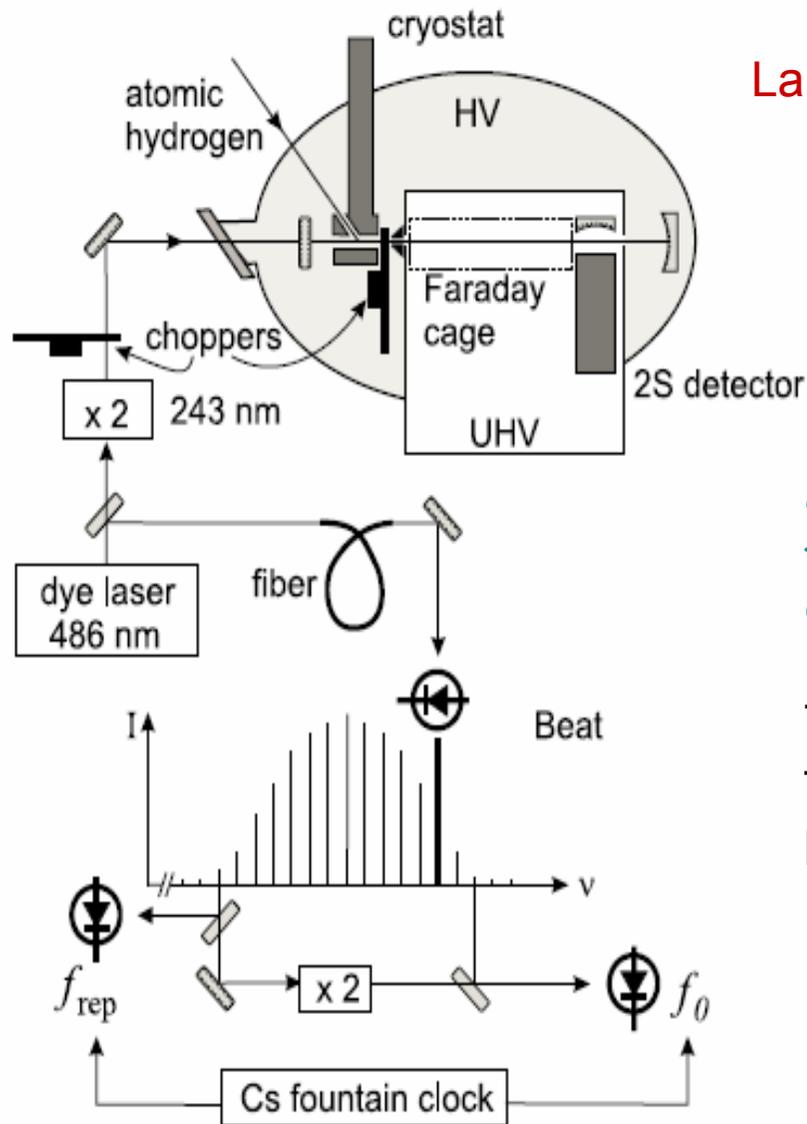


En comparant la fréquence du premier pic doublée
à celle du second pic, on obtient ν_0

L'ensemble du peigne de fréquences se trouve alors étalonné
car on connaît alors à la fois ν_0 et ν_R
(ν_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

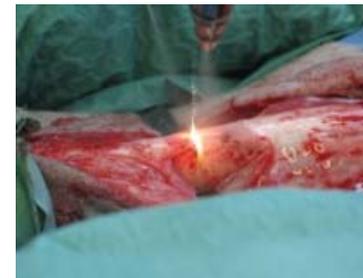


La fréquence de la transition 1S-2S est remesurée avec une précision de $1,4 \times 10^{-14}$

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/>