

# 50 ans de lasers

Hélène Perrin

Laboratoire de physique des lasers

CNRS et Université Paris 13



Marseille

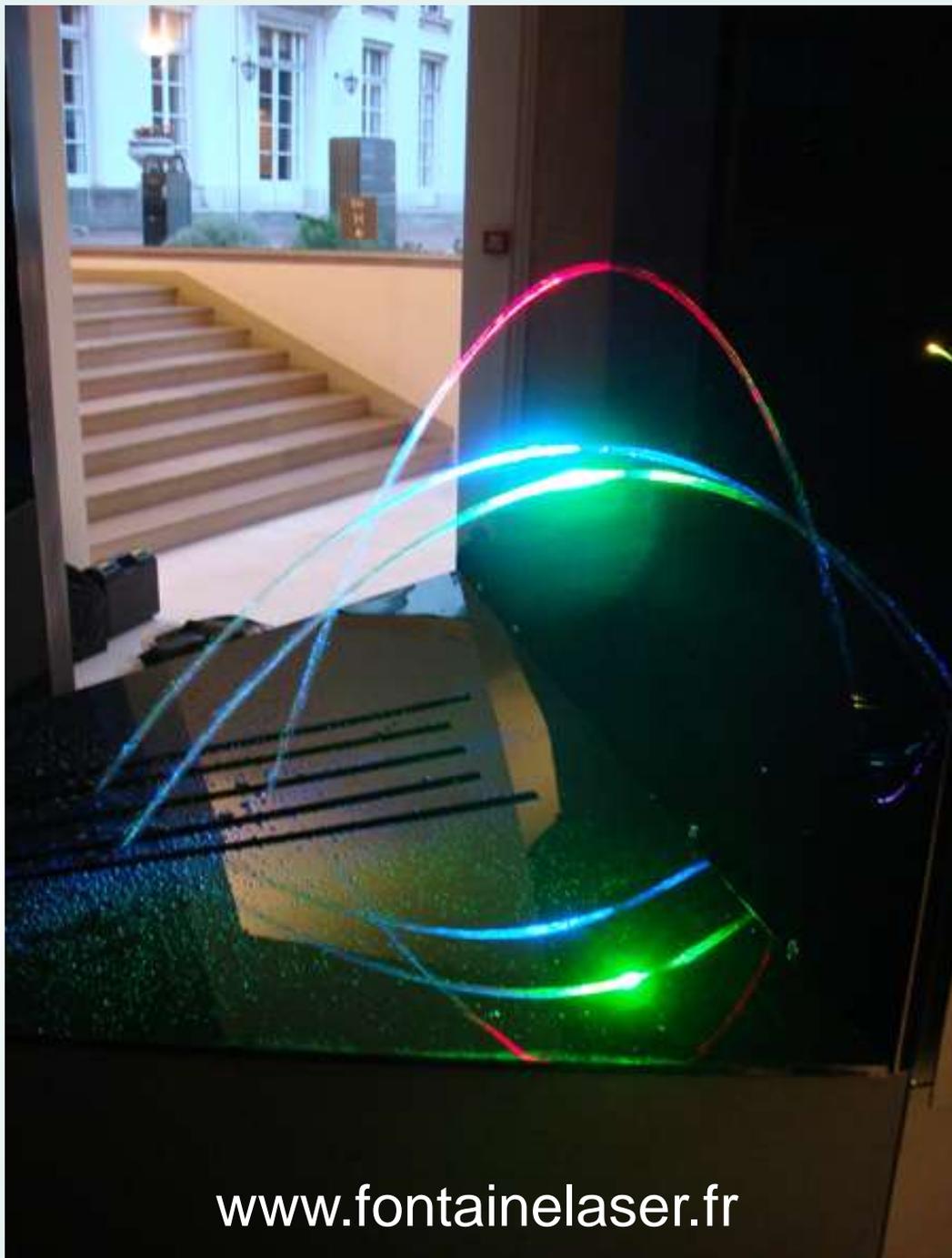


le 2010

merci à Lucile Julien

UNIVERSITÉ PARIS 13  
NORD

Présentation de  
la fontaine laser  
géante du LPL,  
en avant  
première au  
CNRS le 1er  
juin 2010.



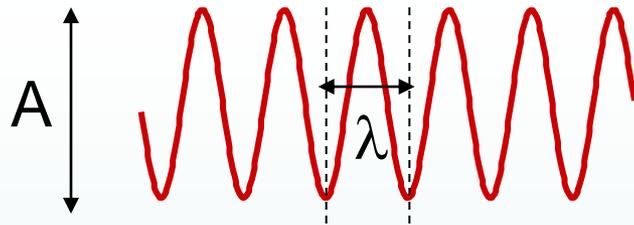
[www.fontainelaser.fr](http://www.fontainelaser.fr)

# Plan de l'exposé

- **Qu'est-ce qu'un laser ?**
- A quoi ça sert ?
- Comment ça marche ?
- 50 ans de lasers

# Qu'est ce que la lumière ?

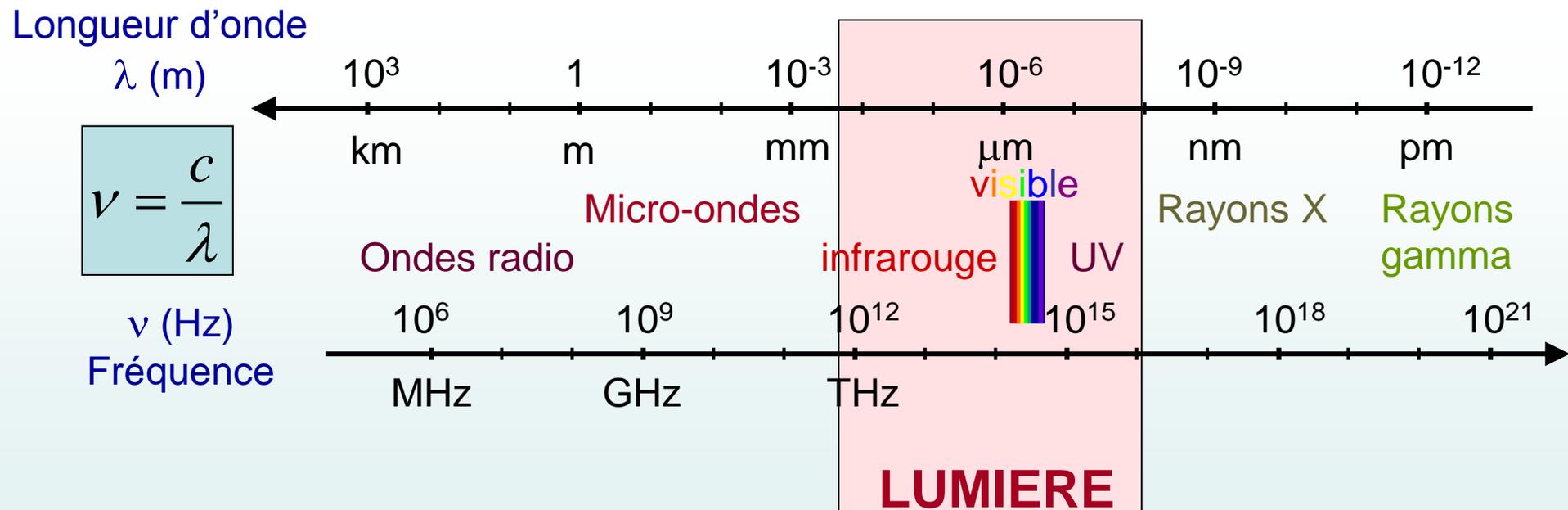
- la lumière fait partie de ce qu'on appelle le **rayonnement électromagnétique**
- un champ électrique et un champ magnétique ( $\vec{E}, \vec{B}$ ) couplés entre eux et oscillants dans le temps et dans l'espace
- l'oscillation est caractérisée par son amplitude  $A$  et sa période spatiale appelée la **longueur d'onde  $\lambda$**



- le rayonnement se propage dans le vide à la vitesse « de la lumière »  **$c = 299\,792\,458$  m/s**
- on peut le décrire à la fois par une onde et par un corpuscule, le **photon**

# Le rayonnement électromagnétique

- le rayonnement électromagnétique couvre un large domaine de fréquence / longueur d'onde
- la **lumière** est caractérisée par sa longueur d'onde comprise entre 0,01 et 100 micromètres ( $\mu\text{m}$ ).



# A quoi reconnaît-on un faisceau laser ?



**L'arme du jedi ?**

**Non : ce ne sont pas des lasers !**



“Sabre laser” = “light saber”

**sabre de lumière**

# Oui !



en 2005  
à  
Grenoble

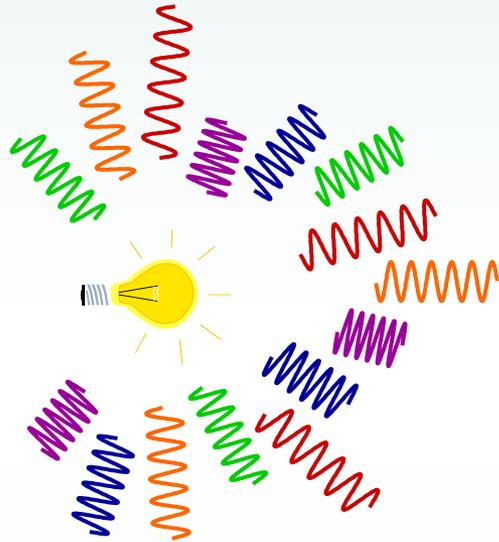
## Le faisceau laser

Un pinceau fin et directif : cohérence spatiale

Une couleur "pure" : cohérence temporelle

# A quoi reconnaît-on un faisceau laser ?

**Un faisceau laser, c'est de la lumière concentrée et bien ordonnée.**



Les photons émis par une lampe ont des directions de propagation et des couleurs variées.



Les photons émis par un laser sont tous identiques entre eux en **direction** et en **couleur**.

**Le laser est une source de lumière cohérente.**

# Plan de l'exposé

- Qu'est-ce qu'un laser ?
- **A quoi ça sert ?**
- Comment ça marche ?
- 50 ans de lasers

# De la lumière de direction bien définie...

Pointeur laser



Spectacle

On peut utiliser le faisceau laser pour **matérialiser une ligne droite**.  
Applications dans les spectacles, le bâtiment...

# De la lumière de direction bien définie...

## alignement sur les chantiers



Laser de canalisation



Niveau laser

On peut utiliser le faisceau laser pour **matérialiser une ligne droite**.  
Applications dans les spectacles, le bâtiment...

...qui se propage à une vitesse fixe

**mesure de distances**

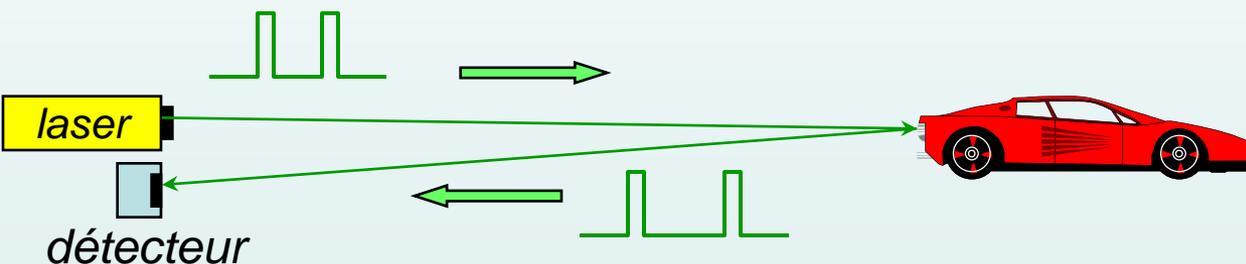


Télémètre laser

On mesure le temps d'aller-retour  $2t$  d'une impulsion brève. On en déduit  $d = c \times t$ .

**mesure de vitesses**

en plus des radars, les “jumelles laser”



# Mesurer la distance Terre - Lune



Impulsions de 100 ps

Télescope du CERGA  
Observatoire de la Cote d'Azur



5 réflecteurs  
déposés sur la Lune



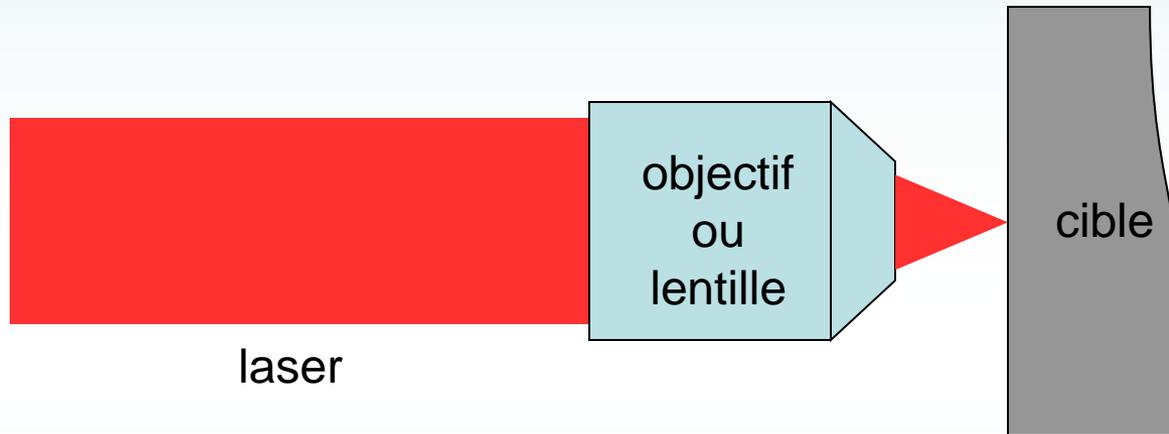
(aller - retour ~ 2 s)



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

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

# De l'énergie concentrée sur une petite surface



On peut utiliser le faisceau laser pour **concentrer de l'énergie lumineuse** sur une toute petite surface, ou dans un petit volume.

La surface sera plus **petite** si la longueur d'onde est plus faible (bleue ou UV).

Les contours sont d'autant plus **propres** qu'on utilise des **impulsions courtes**.

Applications dans l'industrie, l'art, la chirurgie, le stockage et la lecture d'informations...

# Dans l'industrie

**Découpe de plaques, tubes, pièces métalliques ...**



Lasers IR

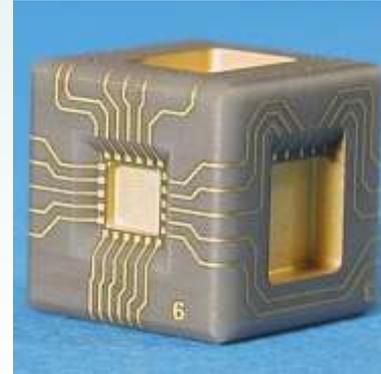
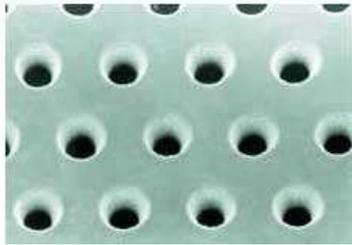
**... et aussi de bois, de tissu,  
de plastique**

**Le laser est un outil universel**



# Dans l'industrie (suite)

## Perçage



## Usinage

Supports en céramique pour microélectronique

Trous de 10  $\mu\text{m}$  dans un film en polymères



## Soudage

Petites pièces mécaniques



Réservoir de carburant pour fusée

# Dans le bâtiment

**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

Restauration du Musée national  
du Moyen Age



# Des lasers pour la chirurgie

Le laser détruit les cellules au centre, fait coaguler autour (évite une hémorragie).

## **Dermatologie**

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

## **chirurgie esthétique**

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



## **Chirurgie de contact " bistouri laser "**



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



**La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde et du tissu.  
Pour chaque usage, un laser différent.**

# Pour la chirurgie (suite)

## Ophthalmologie

Traitement du glaucome

Chirurgie réfractive

Traitement du décollement de la rétine

Laser vert

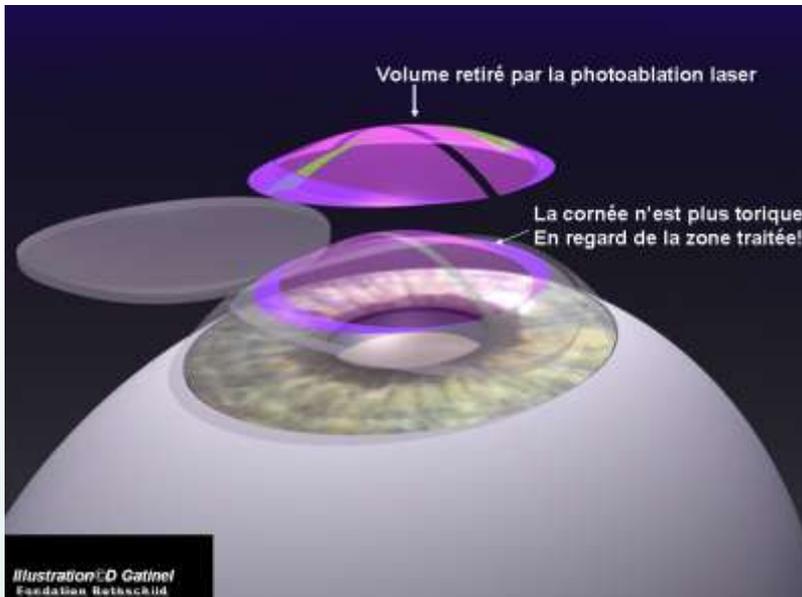


Découpe d'un mince volet de cornée

Laser rouge/IR en impulsions

Rectification de la courbure de la cornée

Laser UV



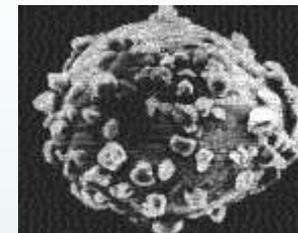
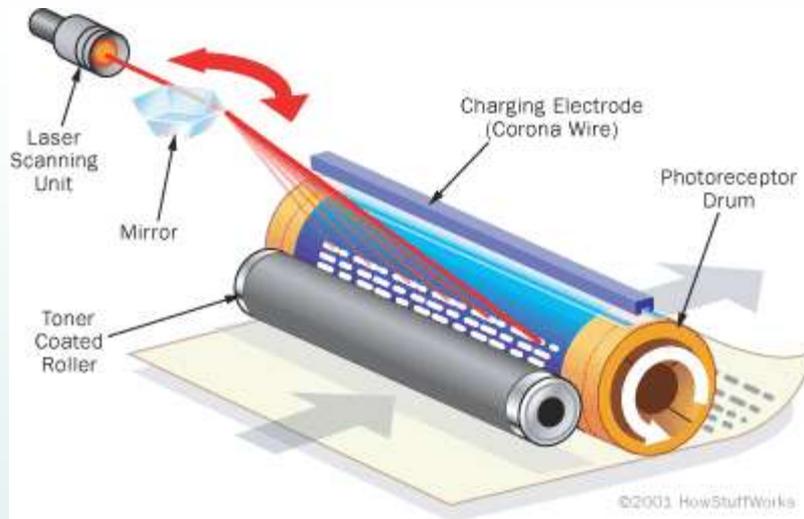
# Au bureau ou à la maison

## 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

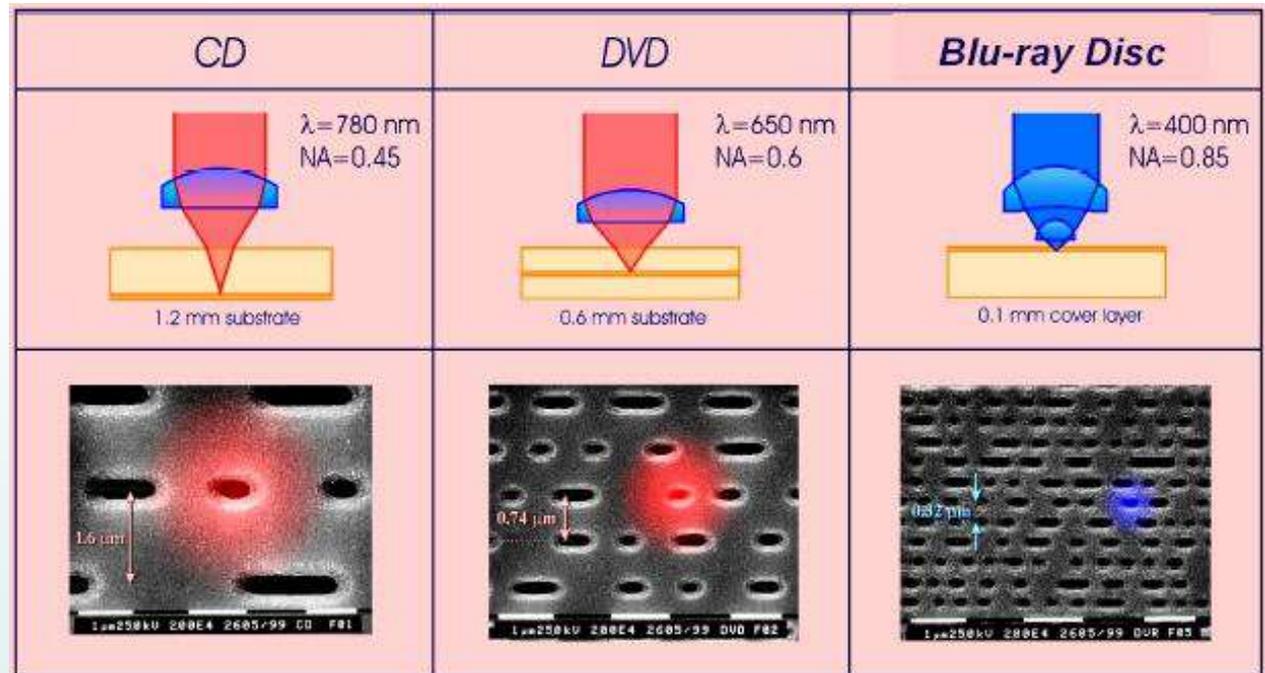
# Pour stocker l'information et la lire



Lecture de code-barres

Lasers à semiconducteurs

CD et DVD



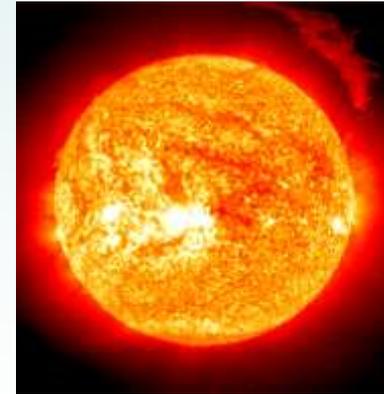
# Le laser pour la fusion nucléaire

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  $\mathbf{D + T \rightarrow \alpha + n}$

1 g ~ 10 tonnes de pétrole



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

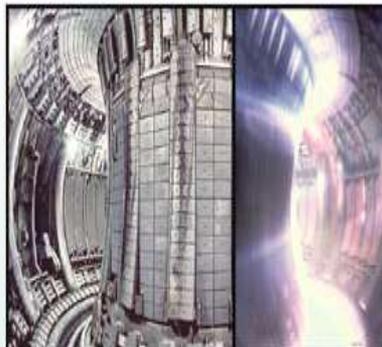
**Le Soleil**

## Vers la fusion contrôlée

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

Le confinement  
magnétique

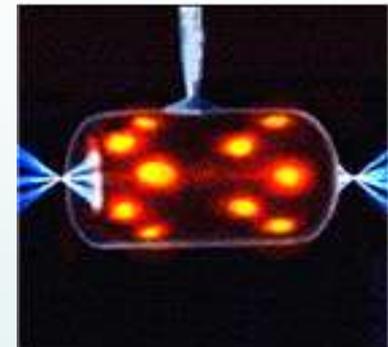
**projet ITER**



**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

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**

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

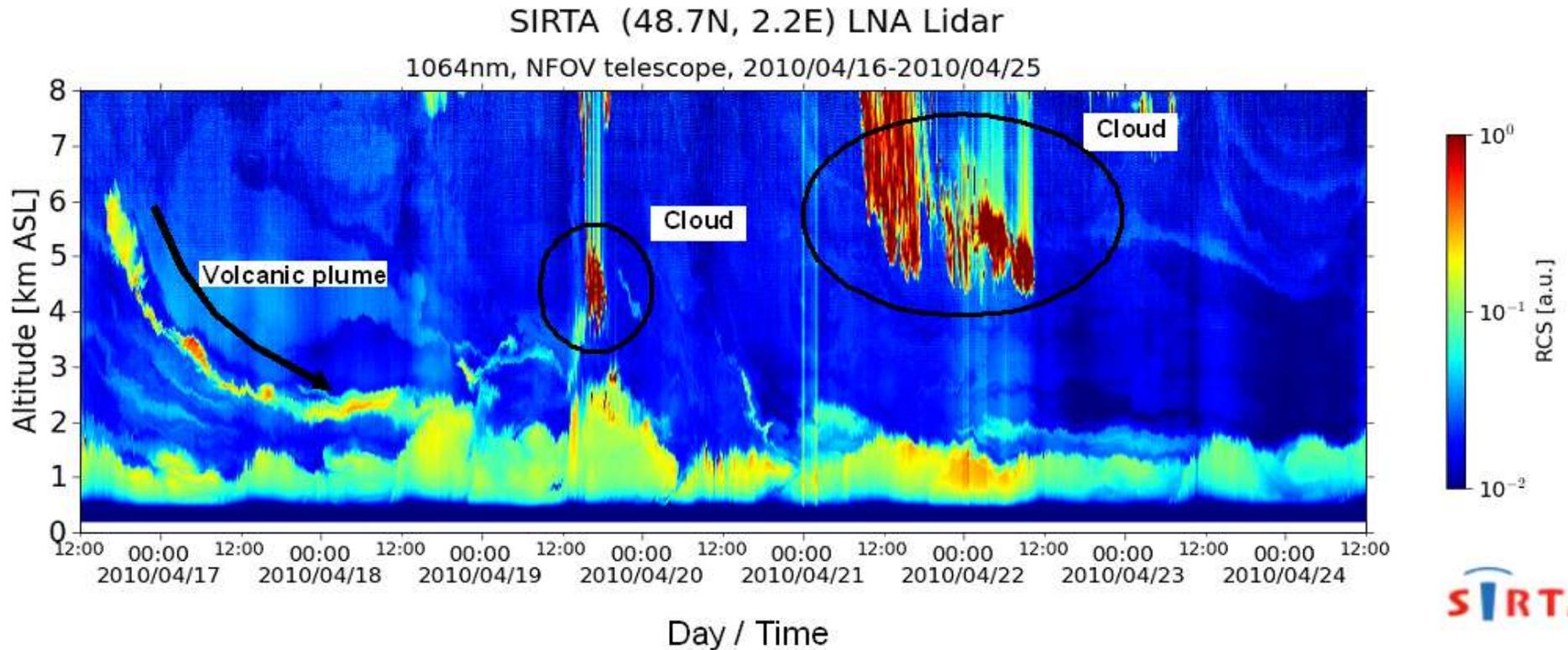


# Une seule couleur bien définie

L'arrivée des lasers a révolutionné la **spectroscopie** (diagnostic de la réponse à une fréquence lumineuse donnée).

exemple : analyse de la composition de l'atmosphère par LIDAR (concentration en ozone, etc).

**Observation du nuage de cendres du volcan Eyjafjöll en avril 2010.**



# Pour transporter l'information

**directivité** : on peut coupler les lasers avec des fibres optiques qui guident la lumière pendant des milliers de km.

**une seule couleur** : à la longueur d'onde de  $1,55 \mu\text{m}$  les pertes à grande distance sont très faibles.

**rapidité** : le signal se propage à la vitesse de la lumière.

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



**80% des communications à longue distance dans le monde sont transmises par le 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.

# Plan de l'exposé

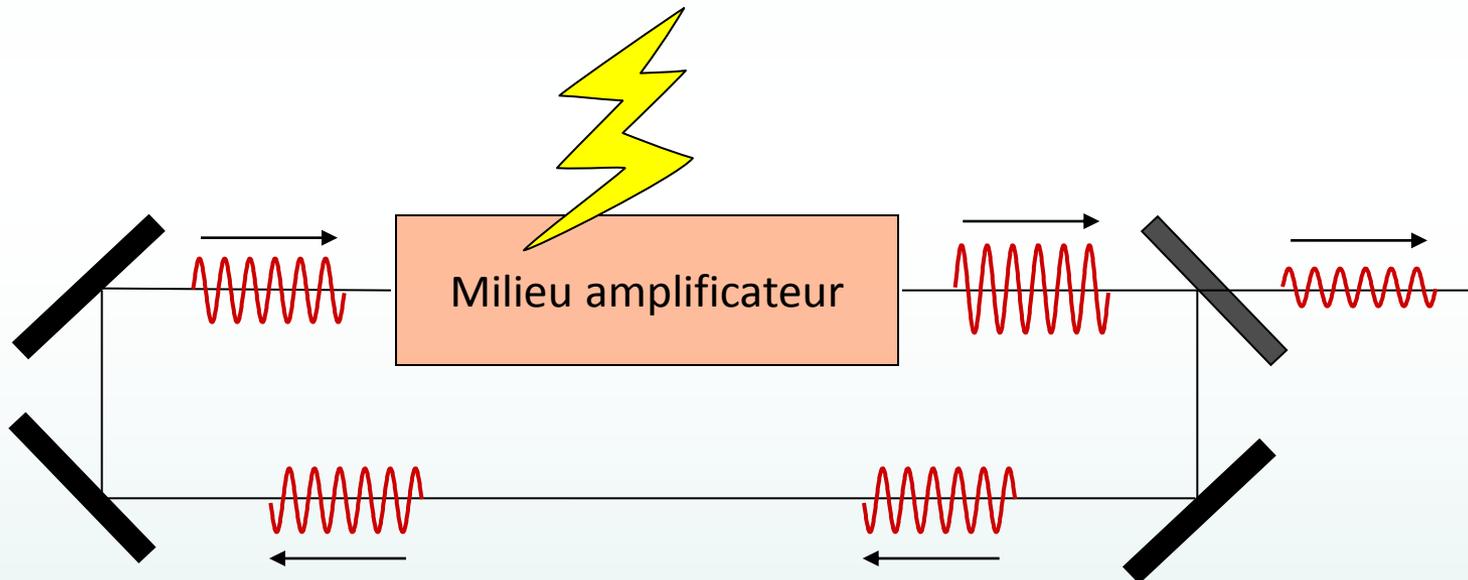
- Qu'est-ce qu'un laser ?
- A quoi ça sert ?
- **Comment ça marche ?**
- 50 ans de lasers

# Principe de base du laser

trois ingrédients :

- milieu amplificateur
- recyclage
- source d'énergie

émission stimulée  
cavité optique  
pompage



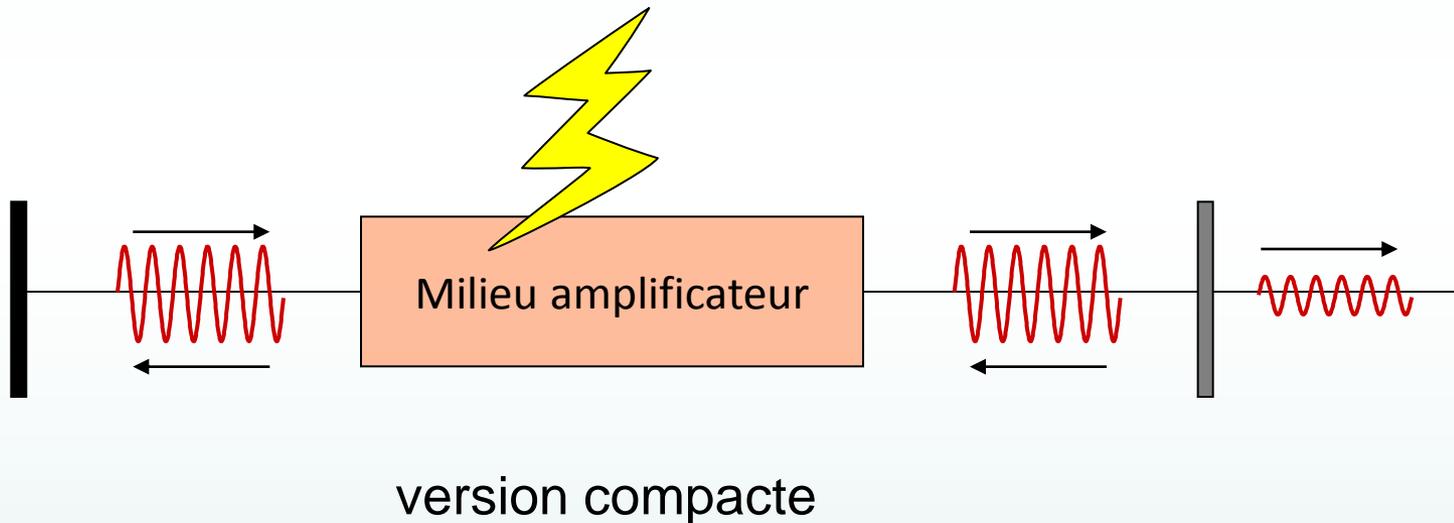
**L**ASER = **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation  
**A**mplification de **L**umièrre par **E**mission **S**timulée de **R**ayonnement

# Principe de base du laser

trois ingrédients :

- milieu amplificateur
- recyclage
- source d'énergie

émission stimulée  
cavité optique  
pompage



**L**ASER = **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation  
**A**mplification de **L**umièrè par **E**mission **S**timulée de **R**ayonnement

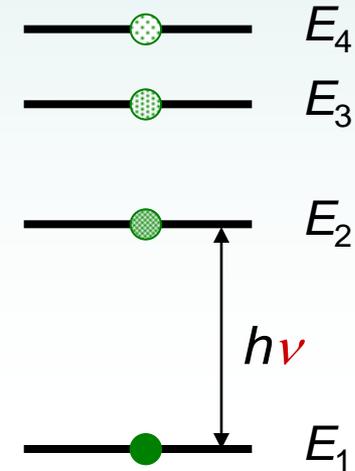
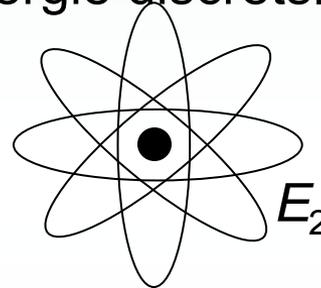
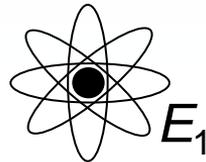
# L'interaction atome - rayonnement



Prix Nobel 1922

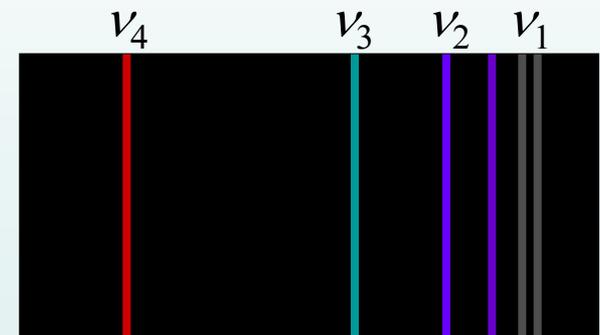
## Niels Bohr (1913)

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



- L'atome ne peut absorber ou émettre la lumière qu'à des **fréquences**  $\nu$  bien particulières telles que :  $E_1 - E_2 = h\nu$
- Il n'absorbe donc que certaines **couleurs**.

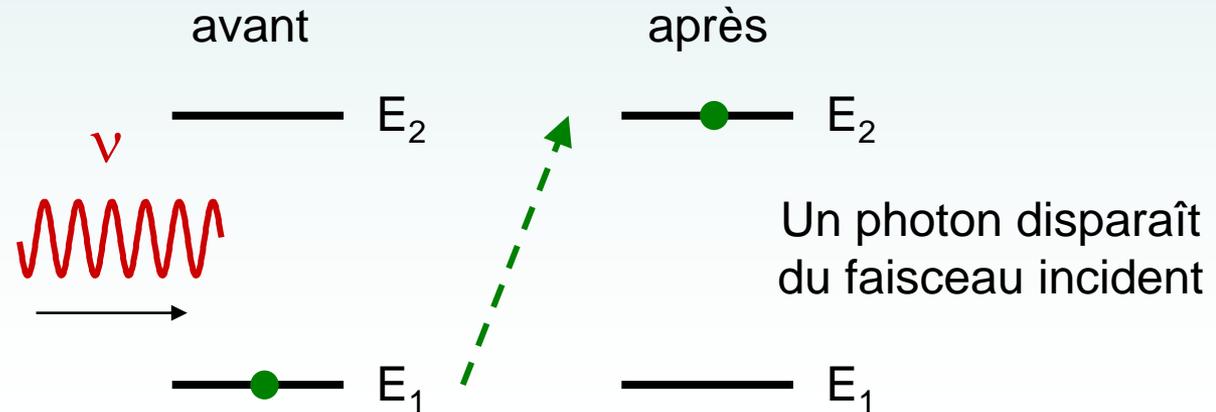
Bohr explique le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène



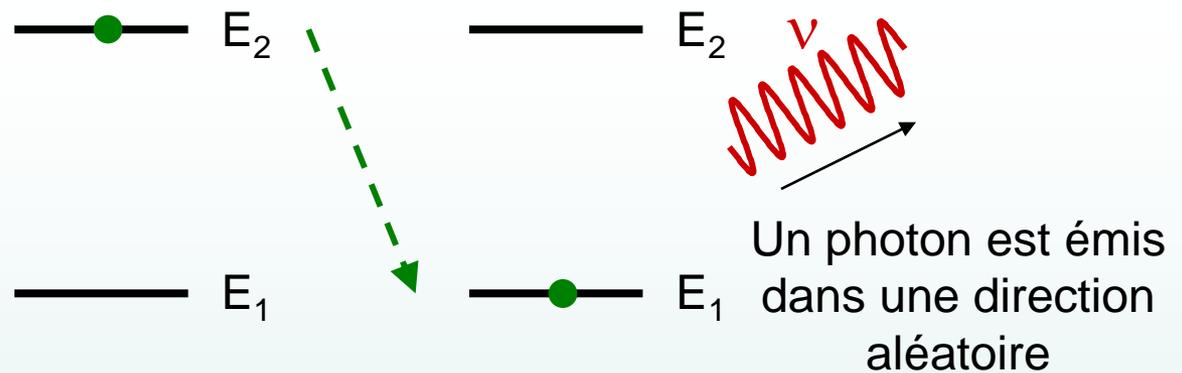
# 2 processus d'interaction résonnante

## Absorption

$$E_1 - E_2 = h\nu$$



## Emission spontanée



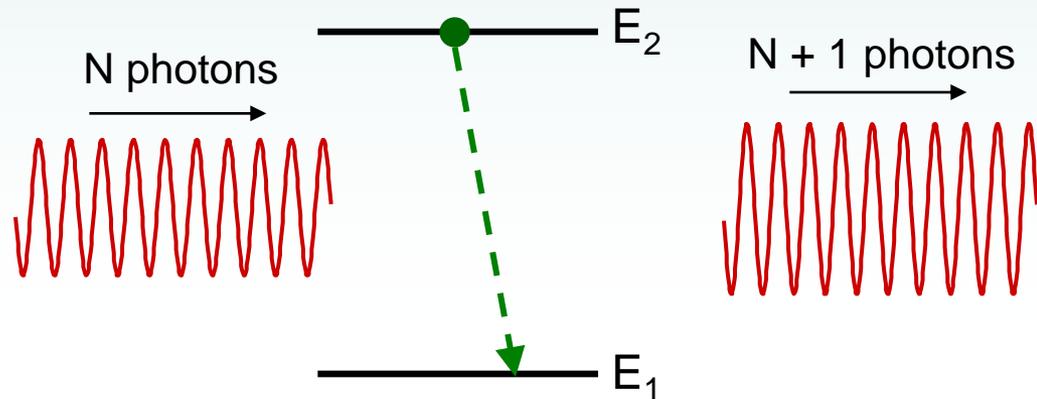
- l'énergie du photon est  $h\nu$
- lors du processus d'interaction atome + photon, il y a conservation de l'énergie comme pour tout système isolé (loi de la physique)

# Einstein 1917 : troisième processus



## l'émission stimulée, inverse de l'absorption

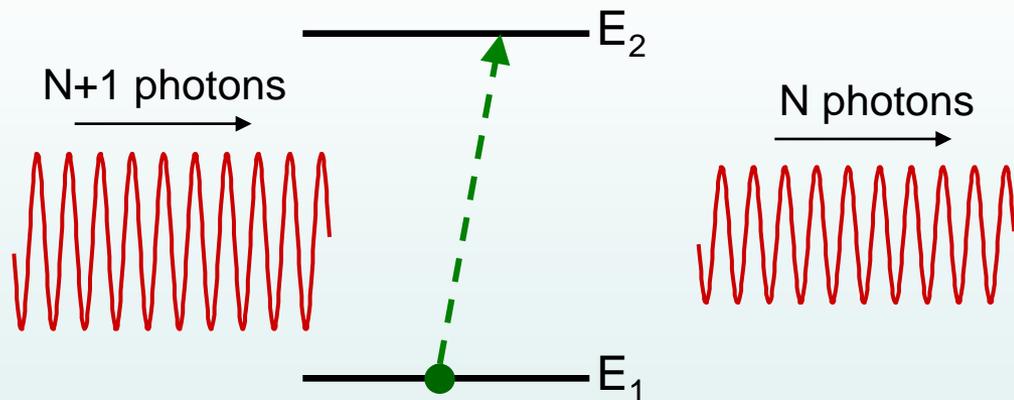
émission  
stimulée



Le photon émis est dans le même mode du champ que les photons incidents :  
l'onde est amplifiée.

absorption

L'onde est atténuée.



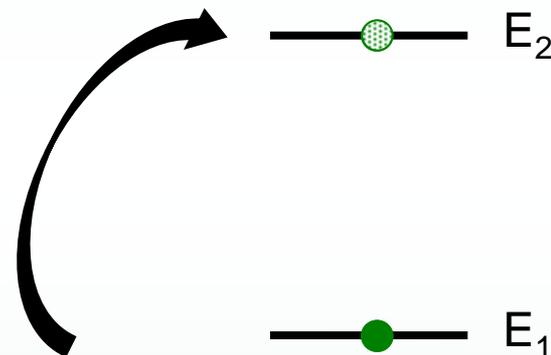
# Comment observer l'émission stimulée ?

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

- absorption proportionnelle à la population du niveau  $E_1$
- émission stimulée proportionnelle à la population du niveau  $E_2$

Il faut avoir plus d'atomes dans l'état  $E_2$  que dans l'état  $E_1$  : **inversion de population**.

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

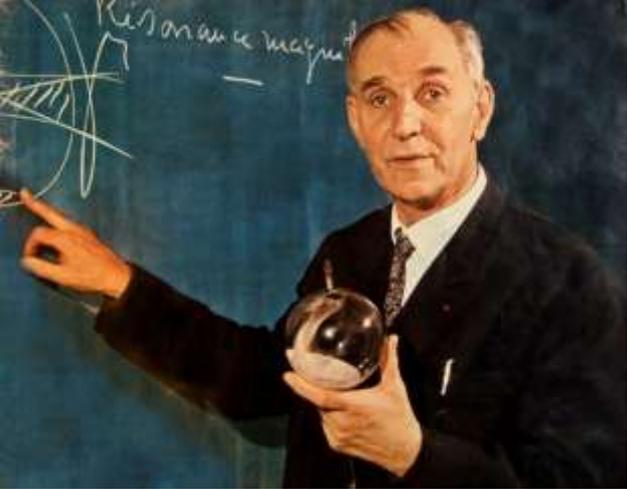


**il faut « pomper » les atomes de bas en haut !**

**inversion de population**  $\Rightarrow$  milieu amplificateur de lumière

**pompage** = fournir de l'énergie restituée ensuite sous forme de lumière

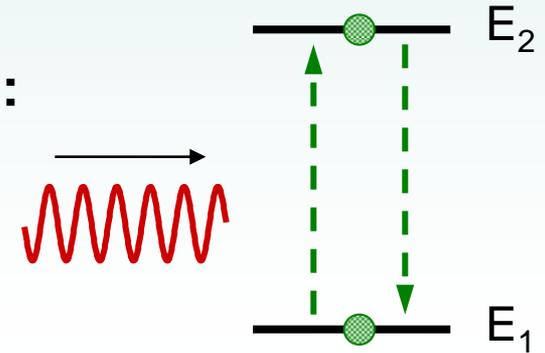
différents types de pompage : électrique, optique, chimique, ...



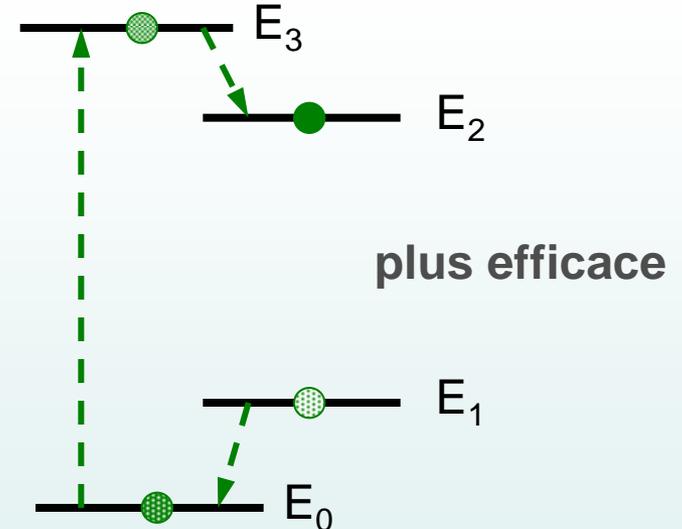
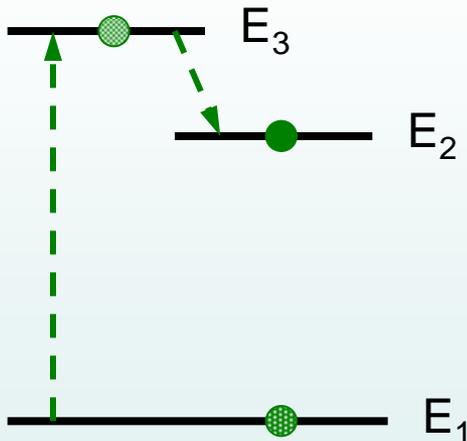
Alfred Kastler

# Le pompage optique

**Impossible avec seulement deux niveaux :**  
autant d'absorption que d'émission induite  
égalité des populations



**Possible avec trois ou quatre niveaux :**



# Le recyclage : cavité Fabry-Pérot

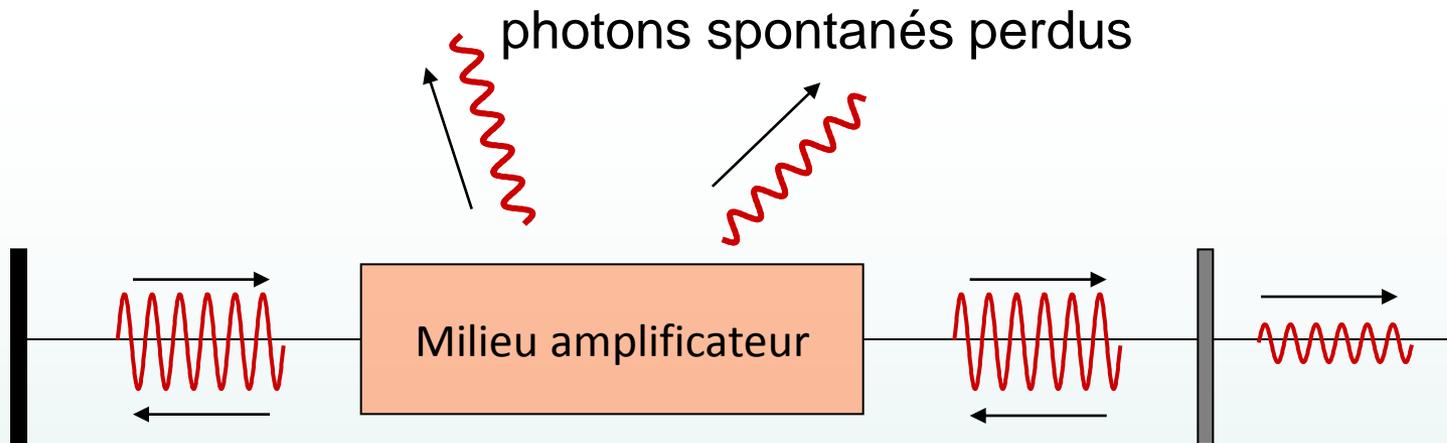


Alfred Pérot 1863 - 1925



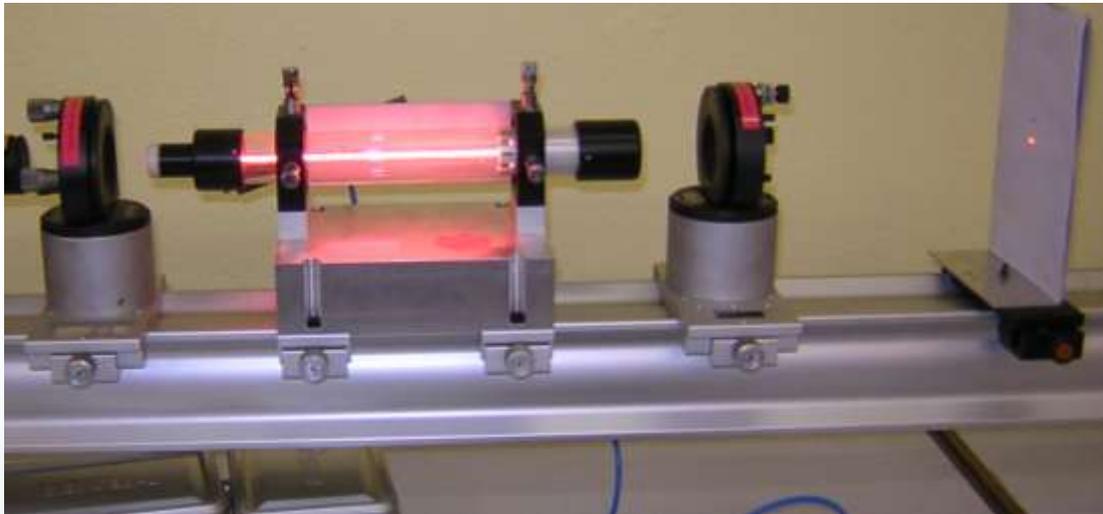
Charles Fabry 1867 - 1945

- deux miroirs face à face permettent de stocker les photons.
- ceux qui sont émis dans l'axe de la cavité peuvent repasser dans le milieu et être amplifiés.



La lumière fait des allers-retours entre les deux miroirs et sort par le miroir de sortie qui ne réfléchit pas à 100%. L'émission laser démarre à partir du "bruit" (photons spontanés).

# Exemple du laser Hélium - Néon



**Ce laser est un convertisseur d'énergie électrique en énergie lumineuse  
(avec un certain rendement)**

# Plan de l'exposé

- Qu'est-ce qu'un laser ?
- A quoi ça sert ?
- Comment ça marche ?
- **50 ans de lasers**

# Avant le laser : le maser (1954)

**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

**Molécules d'ammoniac NH<sub>3</sub>**

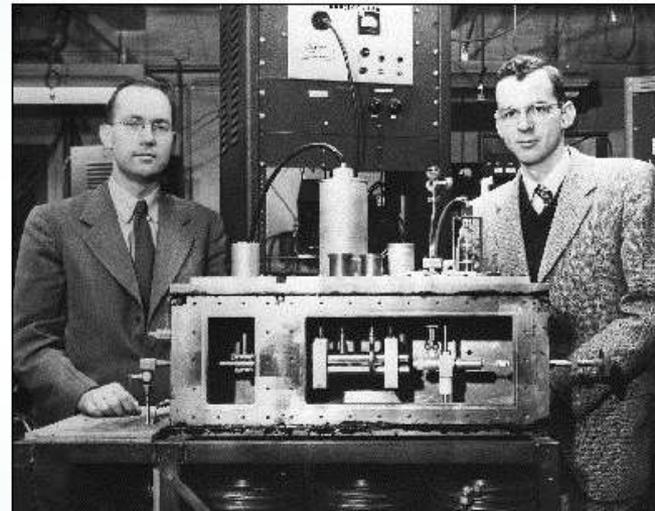
Fréquence  $\nu = 24$  GHz ( $\lambda = 1,25$  cm)



**Prix Nobel de physique 1964**

Townes, Basov et Prokhorov

**Maser à hydrogène (1960)**

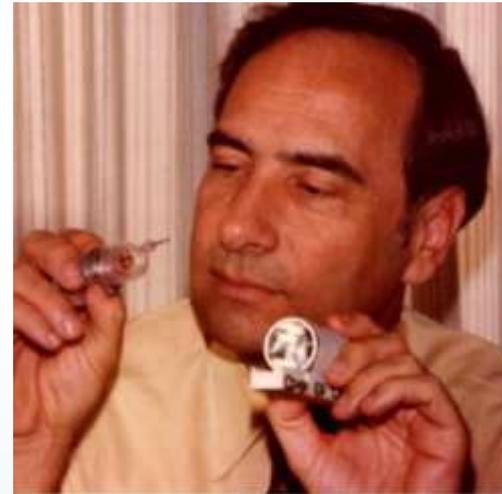
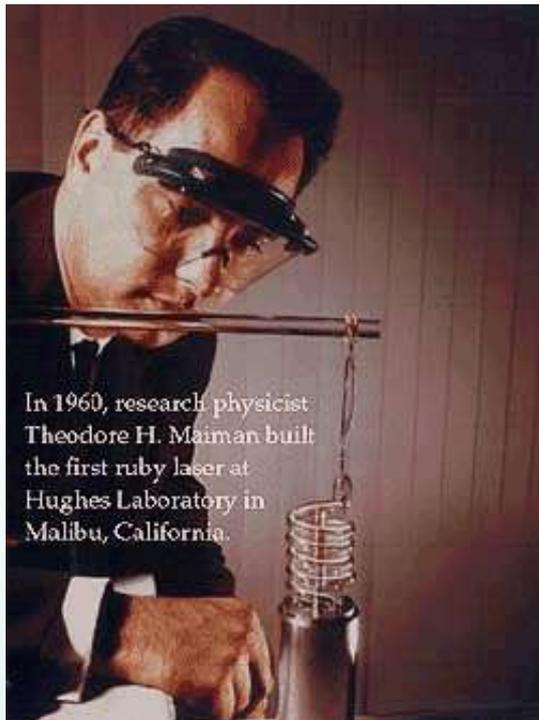


référence  
de fréquence  
ultra-stable

# Le premier laser, il y a 50 ans

Un article de Schawlow et Townes en 1958 marque le début d'une véritable **course au laser** dont le gagnant fut un outsider

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



**Le vrai !**

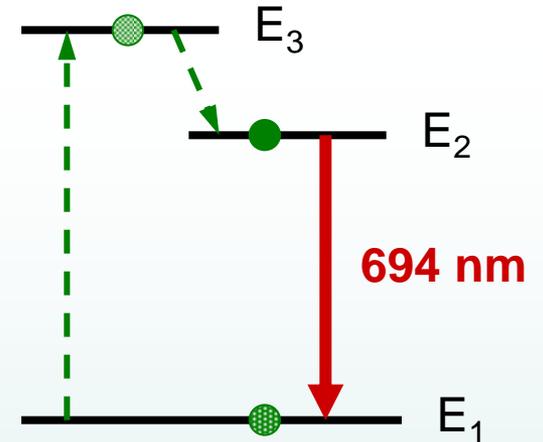
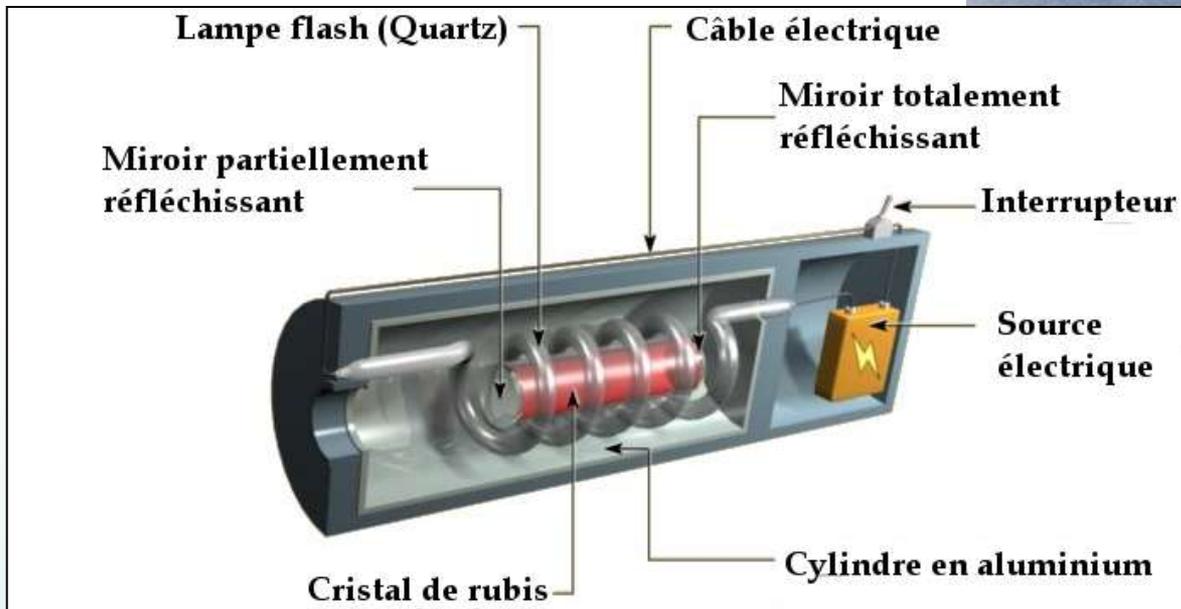
**laser à solide (rubis) pompé par flash**

Le photographe avait trouvé le dispositif trop petit ...

# 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  $\text{Cr}^{3+}$



pompage optique  
" à trois niveaux "

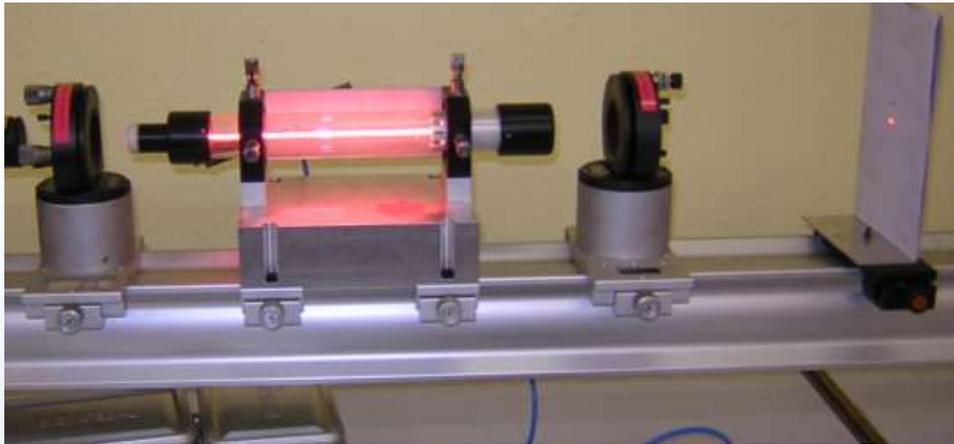
**Le laser émet des impulsions rouges**

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

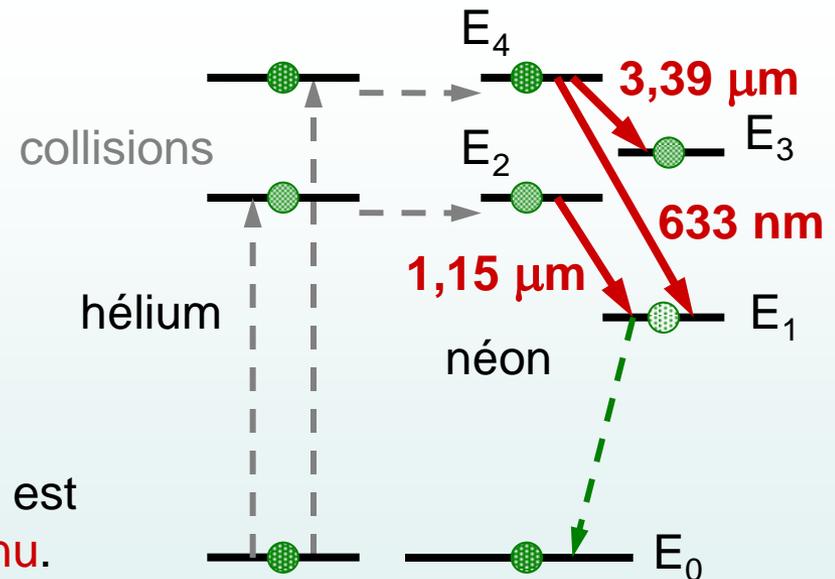
Ali Javan (1961)  
Bell Labs

Longueur d'onde  $1,15 \mu\text{m}$   
puis  $633 \text{ nm}$

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



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



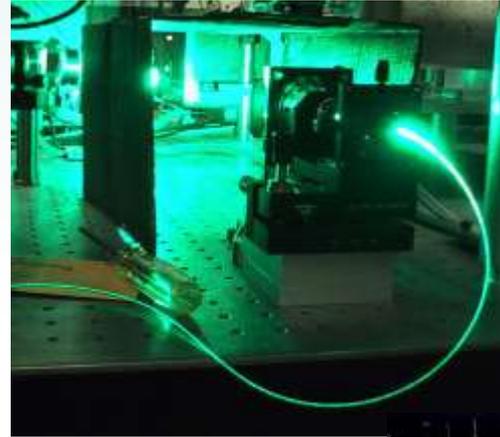
# Début d'une longue série...

Milieux amplificateurs, pompages et longueurs d'onde variés

## Lasers à gaz

(atomes, molécules, ions)

- laser He-Ne (1961)
- laser CO<sub>2</sub>, (1962) autour de 10 μm
- lasers ioniques
  - Hg<sup>+</sup> (1963) IR
  - Ar<sup>+</sup> (1964), nombreuses raies : 514 nm ...



## Lasers à liquides

Lasers à colorants (1966)

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

*spectroscopie*

Visible et proche infrarouge



# Lasers chimiques

Pompage par une réaction chimique (1965)

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

*chirurgie de l'œil*

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



# Lasers à solides

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

- **laser à YAG** (**G**renat d'**Y**ttrium et d'**Al**uminium  $\text{Y}_3^{3+}\text{Al}_5^{3+}\text{O}_{12}^{2-}$ ) (1964)

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

1064 nm, proche infrarouge

*découpe, chirurgie...*



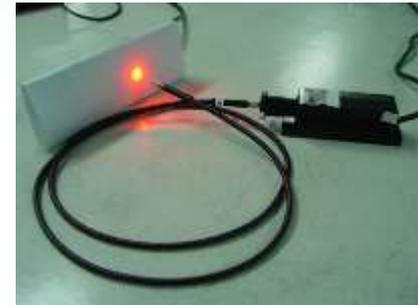
## Lasers titane saphir

large spectre de 700 à 1100 nm, accordable  
*spectroscopie...*

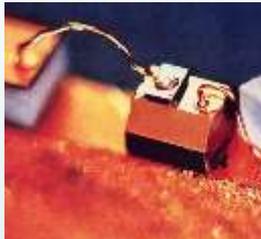
## Lasers à fibres optiques

La lumière est guidée dans le milieu  
amplificateur qui peut être très long

Er<sup>3+</sup>:verre, IR 1550 nm  
*télécoms...*



## Lasers à semi-conducteurs (diodes lasers)



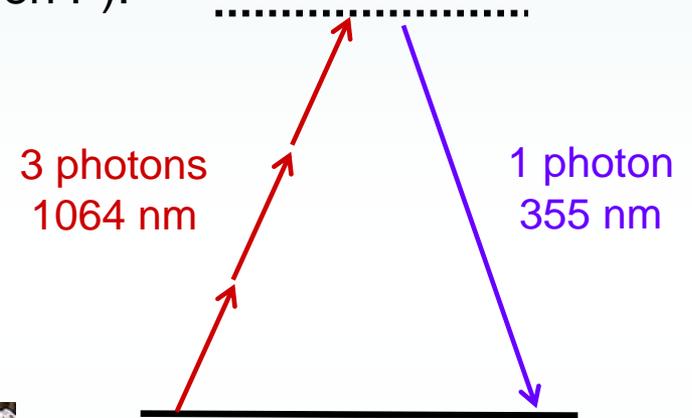
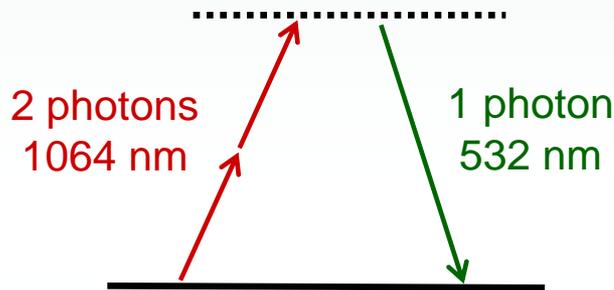
très faible coût, petite taille,  
grande durée de vie (100 ans), robuste  
(les plus vendus actuellement)  
*télécom, imprimantes, lecteurs code  
barre, lecteurs CD/DVD...*



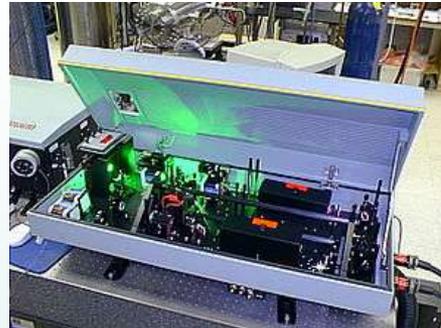
# L'optique non linéaire

## Nouveaux effets apparaissant à forte intensité lumineuse

Si l'on éclaire un cristal non-linéaire par un laser IR à 1064 nm (d'intensité  $I$ ), on peut générer de la lumière à la **fréquence double** à 532 nm (effet en  $I^2$ ), **ou triple** à 355 nm (effet en  $I^3$ ).



C'est ce qu'on fait pour réaliser un pointeur laser vert.



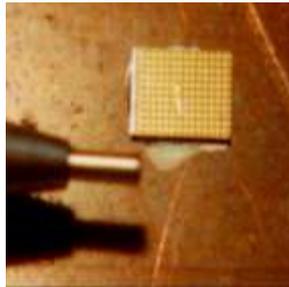
Avec deux faisceaux incidents, on peut aussi générer la **fréquence somme** ou la **fréquence différence**

# Des lasers de toutes sortes

- des longueurs d'onde et des milieux amplificateurs variés  
gaz, liquides, verres, semi-conducteurs

- de toutes dimensions

100 microlasers  
à semiconducteur



Laser Nova pour la fusion nucléaire

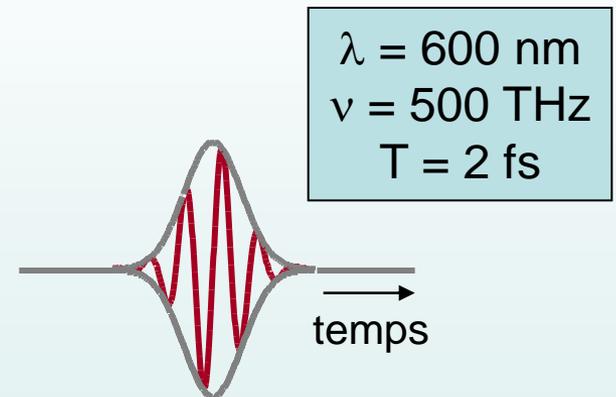
- de plus en plus puissants

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

- continus ou impulsionnels

des impulsions de plus en plus courtes

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



# En direct du labo : le laser, un instrument pour manipuler les atomes

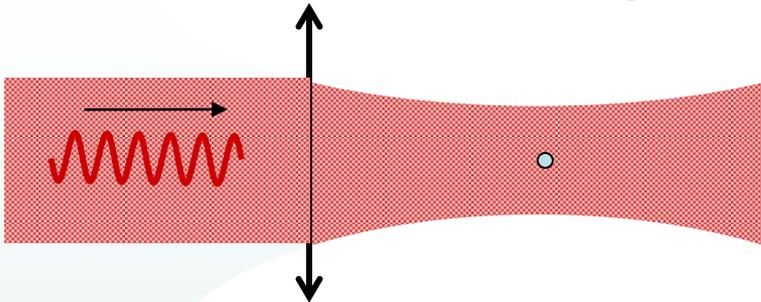
**La lumière exerce des forces sur les particules**

## 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**



# Refroidir les atomes...

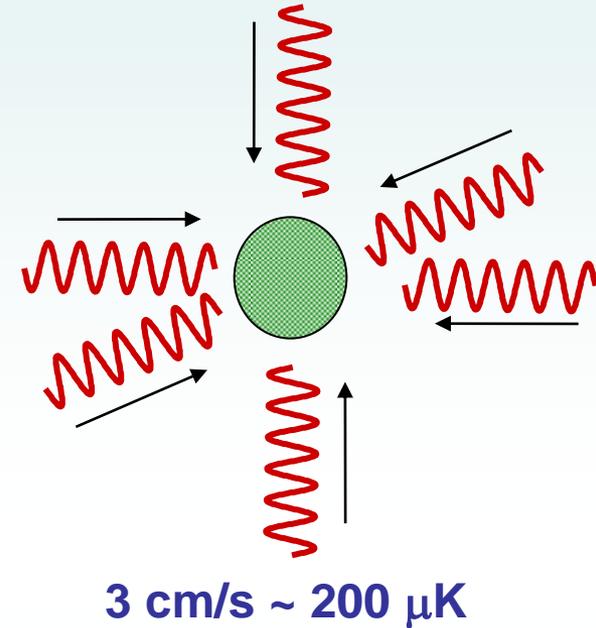
En diminuant leur vitesse dans toutes les directions

## 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 ...

On peut descendre à 100 nK

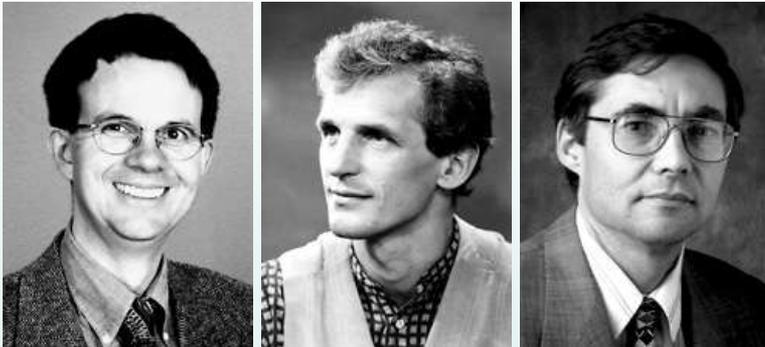
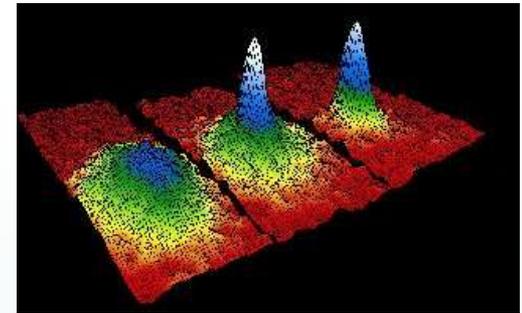
... et des densités de plus en plus fortes

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

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



... et ont encore un bel avenir