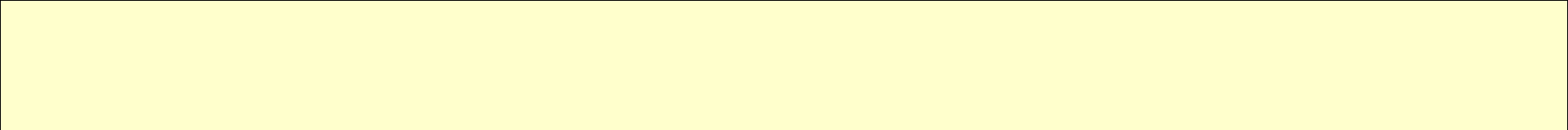


**Cours**  
**PMO – Photonique et Métrologie Optique**  
**Sources lumineuses et lasers**



# La lumière: dualité onde-particule

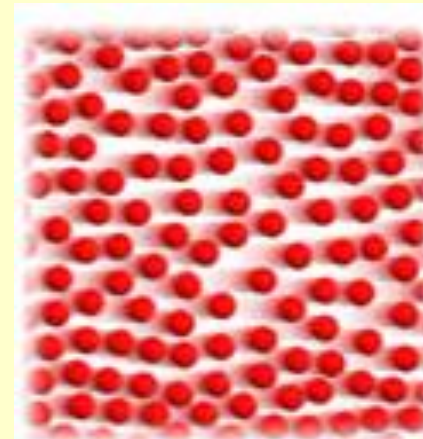
## Comportement ondulatoire

⇒ diffraction,  
interférences...



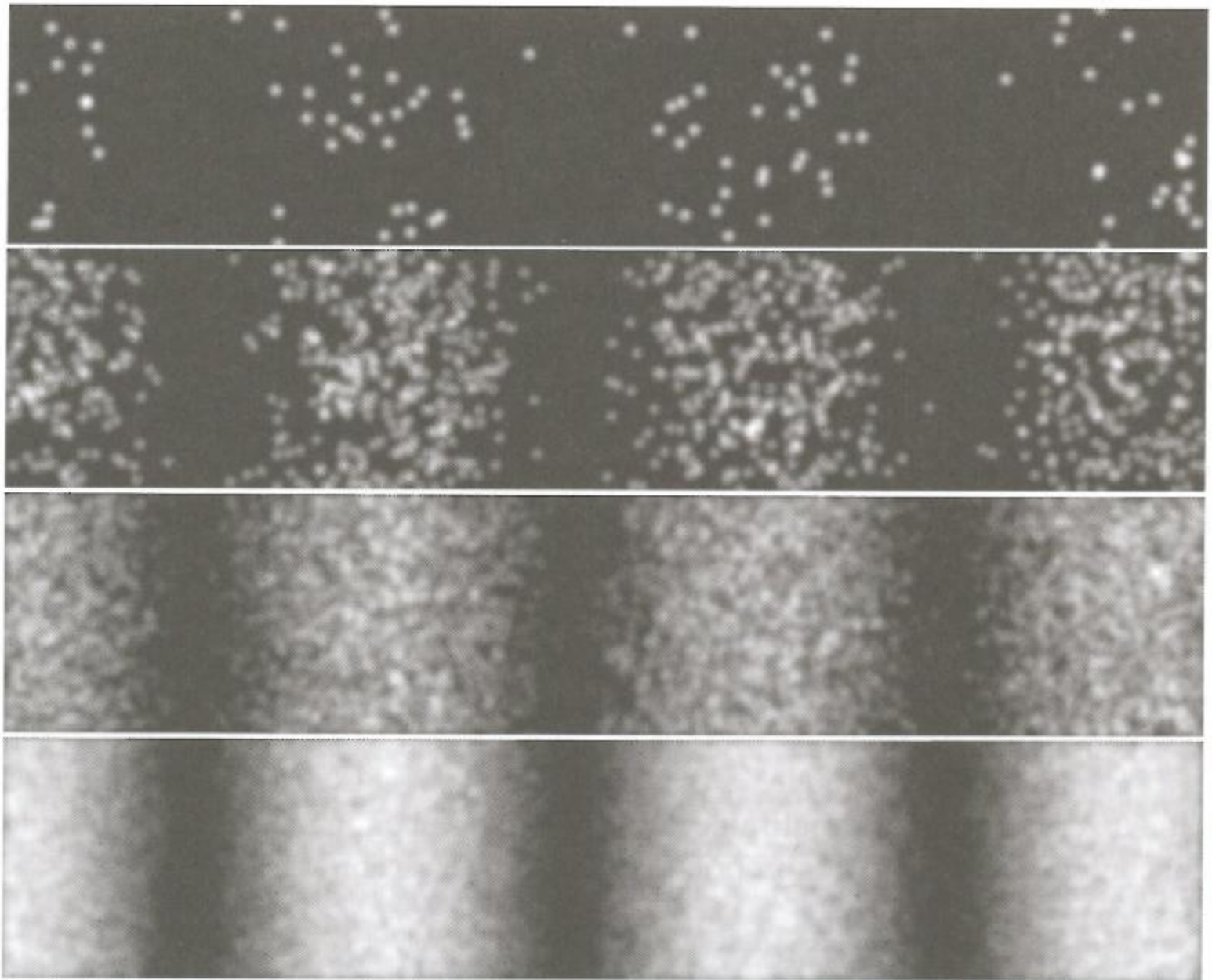
## Comportement corpusculaire

⇒ énergie quantifiée



Pour expliquer les expériences mettant en jeu la lumière, on est amené la traiter tantôt comme une onde, tantôt comme un ensemble de « grains de lumière» (les photons). C'est la **dualité onde-corpuscule**.

Figure d'interférence avec un nombre de photons détectés de plus en plus élevé.



# Quantification de l'énergie lumineuse

**Energie** du photon  
(corpusculaire)

**Fréquence**  
(ondulatoire):  
« couleur »

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

**Constante de Planck**  
 $6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$

## **Conséquence:**

Il existe une quantité minimale d'énergie que la lumière peut échanger avec son environnement: c'est l'énergie d'un photon.

## **LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

(Amplification de lumière par une émission stimulée de rayonnement)

### **Questions:**

- Qu'est-ce que l'émission stimulée ?
- Comment peut-on s'en servir pour amplifier la lumière ?

# Invention du laser

- Inventé en 1958 par Charles Townes et Arthur Schawlow (Bell Laboratories)



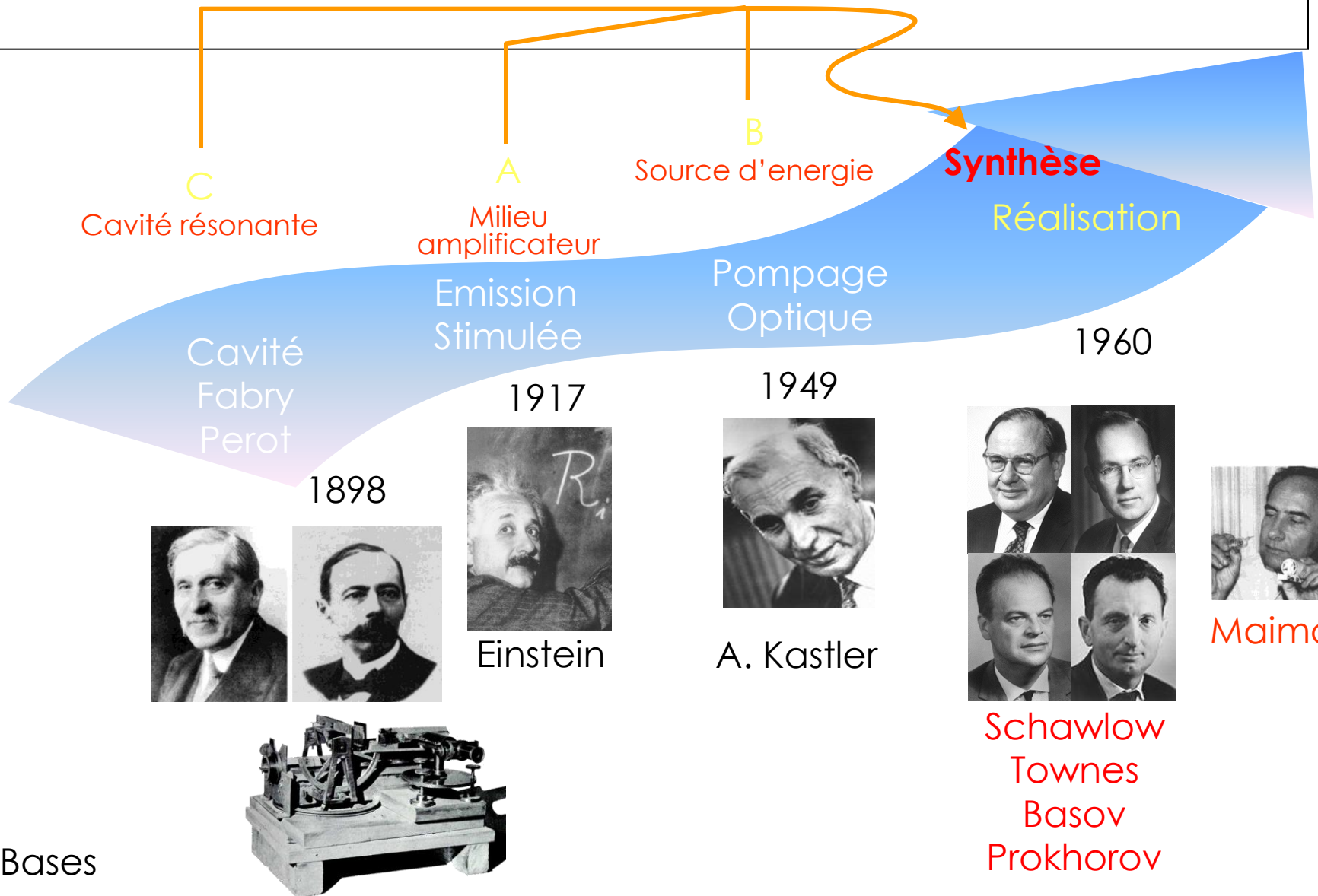
- « Concrétisation » des travaux théoriques d'Einstein



Le laser a été initialement qualifié de « *solution à la recherche d'un problème* ».

Son principe est relativement simple, mais il constitue toutefois un exemple d'application de la mécanique quantique dans la vie courante.

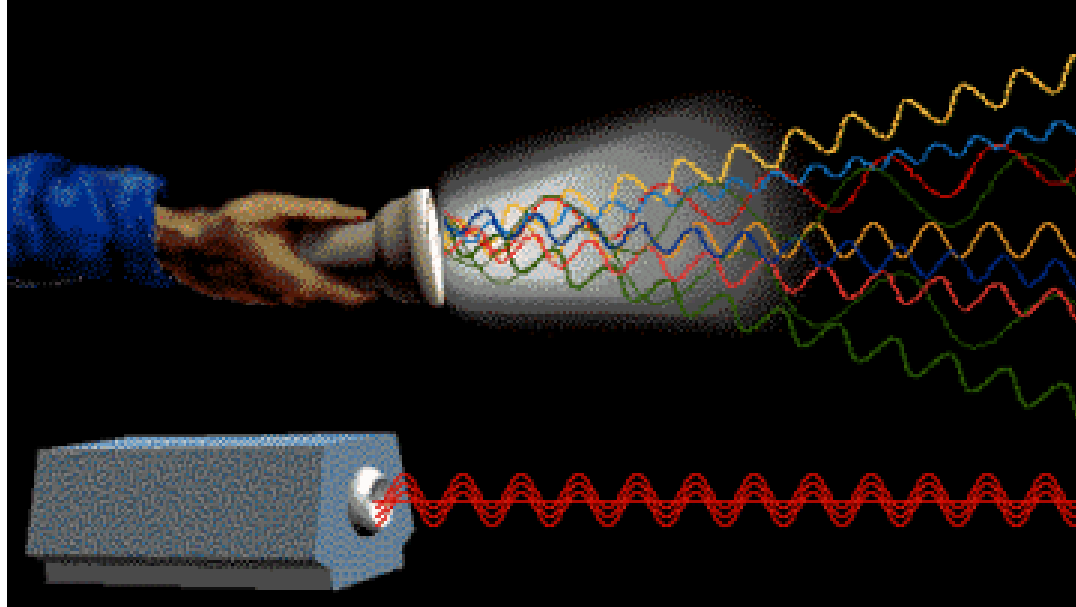
# Les morceaux du puzzle





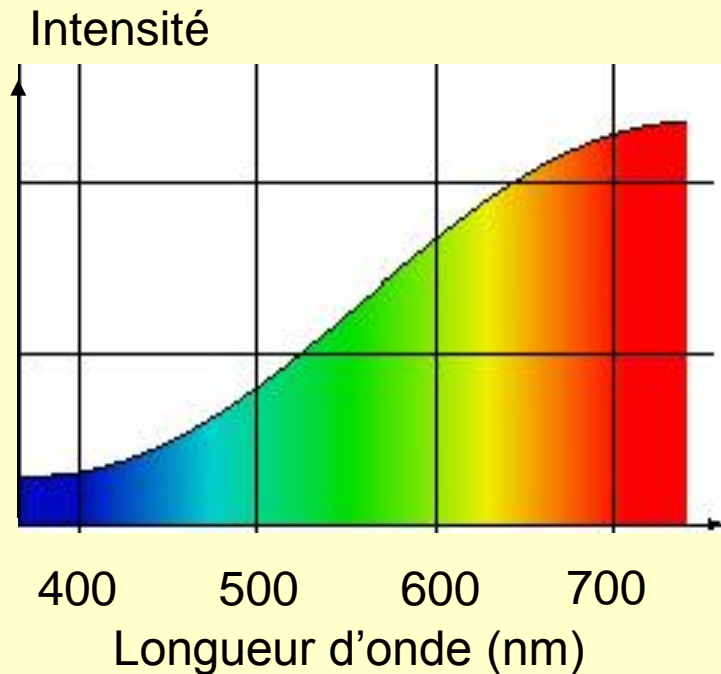
# Les Lasers

- Caractéristiques
  - Emission directionnelle
  - Emission cohérente (relation de phase)
  - Emission quasi-monochromatique

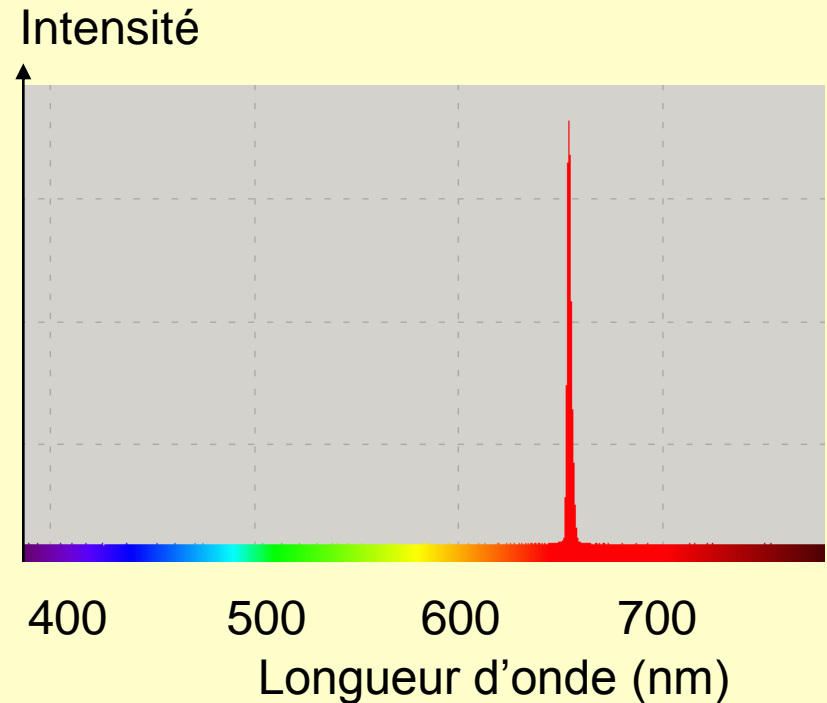


# 1) La lumière laser est monochromatique

Lumière émise par  
une lampe halogène



Lumière émise  
par un laser



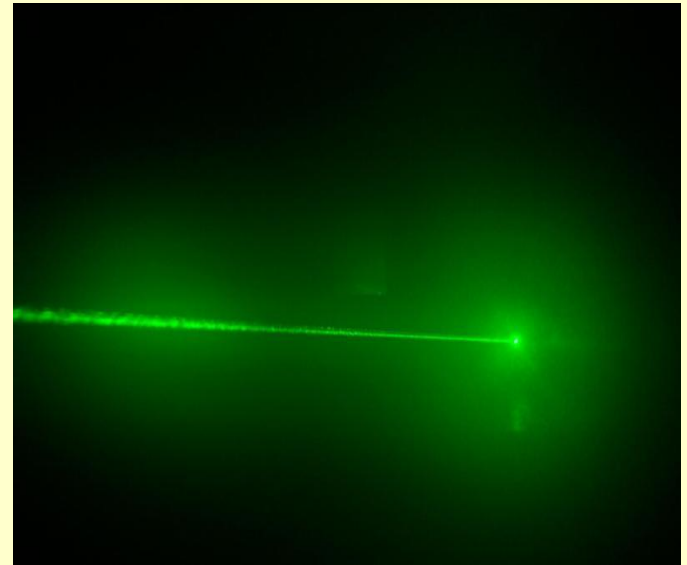
La lumière émise par un laser est (quasiment) **monochromatique**:  
C'est-à-dire qu'elle correspond à une seule couleur.

## 2) La lumière laser est directionnelle

**Une lampe traditionnelle émet de la lumière dans toutes les directions**



**Un laser émet dans une direction bien précise**



Faible divergence du faisceau pendant sa propagation

# Exercices

1. Un laser à vapeur d'or, ou laser Au, émet des photons dont l'énergie est de  $3,44 \cdot 10^{-19}$  [J]. Quelle est la longueur d'onde d'émission de ce laser ?
2. Dans un laser Nd-YAG, les photons sont émis avec une longueur d'onde de 1064 [nm]. Quelle énergie en [J] et en [eV] transporte chaque photon ?
- 3.\* En fonctionnant durant un temps de 39 [ns], un laser à CO<sub>2</sub>, dont la longueur d'onde est de 10,6 [μm], a émis une énergie de 63 [nJ]. Combien de photons sont émis chaque seconde ?
- 4.\* Un laser produit une émission de photons porteurs d'une énergie de 2,54 [eV] chacun. Quelle est la longueur d'onde d'émission de ce laser ? Quelle est la fréquence de cette émission ?

# Puissance du laser

- Pas forcément plus qu'une grosse lampe (10 à 100 W en continu), mais **concentré spatialement et spectralement** ;
- **2 exceptions : CO<sub>2</sub> et DF**
- Souvent aussi : **concentré temporellement (impulsions très courtes, ns à fs)**

# Le laser CO<sub>2</sub>

- Moyen IR (9.6 et 10.6  $\mu\text{m}$ )
- Très grandes puissances possibles (100 kW CW)
- Marché industriel énorme: découpe/soudure des matériaux

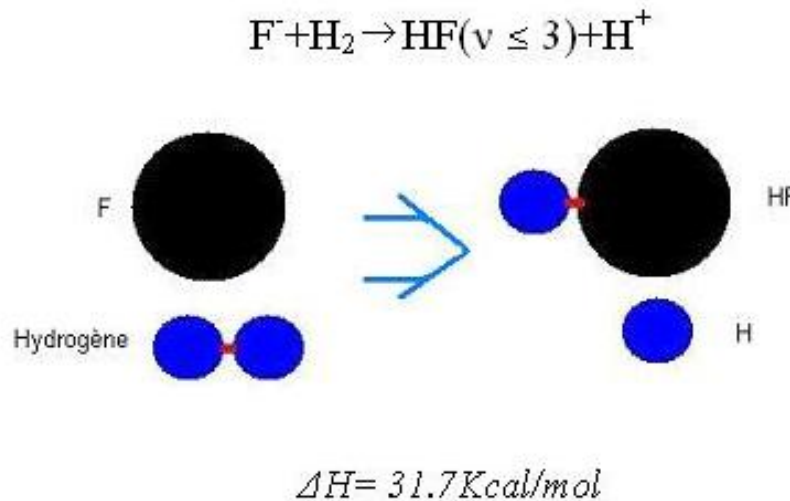


# Les lasers chimiques

- **Ex : le laser HF/DF** (Hydrogène-Fluor ou Deuterium-Fluor)

L'effet de *lasing* est produit par une **réaction chimique** exothermique dans le milieu amplificateur.

Ces réactions produisent des **molécules excitées** (l'inversion de population est donc automatique) à des niveaux de vibrations élevés, qui en se désexcitant, peuvent émettre de la lumière cohérente dans la gamme **3-5  $\mu\text{m}$** .



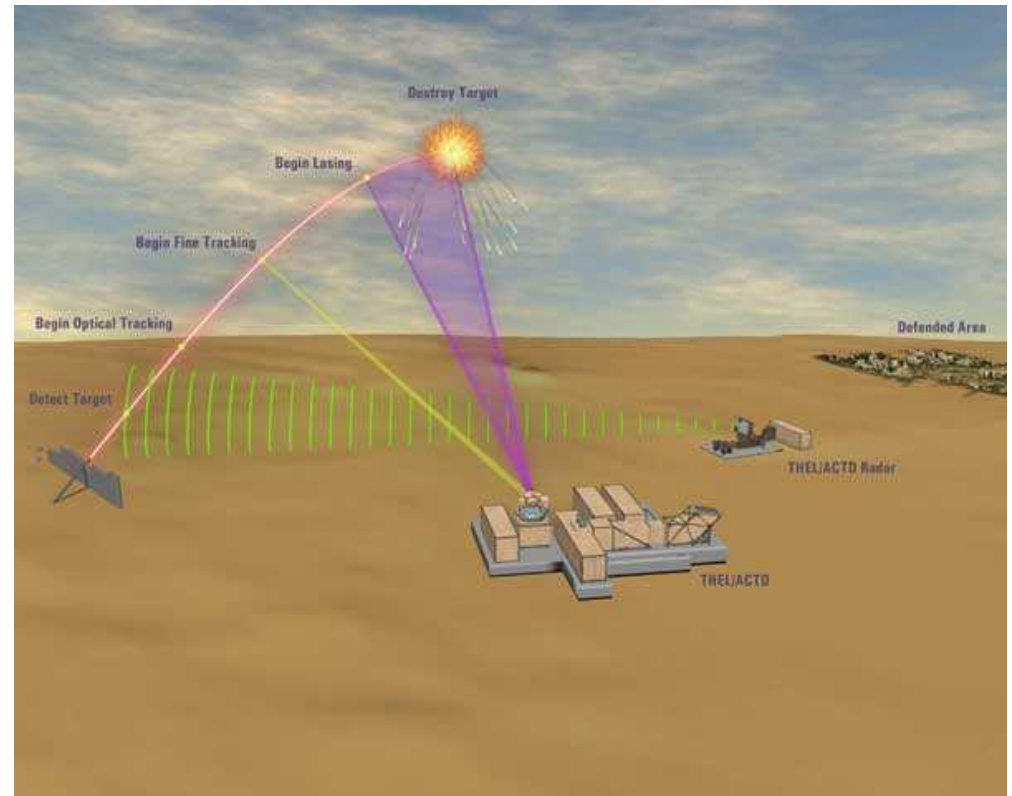
Application principale:  
**domaine militaire** (arme anti-missile ou anti-satellite).

Ex: laser MIRACL (US army) :

Aire faisceau = 14 cm<sup>2</sup> et  
Puissance = 2,3 MW.

# “Application” des lasers chimiques

- Lasers très volumineux, souvent “monocoup”
- Application exclusivement militaire: destruction de missiles





# The “airborne laser program”



But : détruire les missiles le plus tôt possible après leur lancement

7 Boeing 747 équipés (un laser chimique + lasers de pointé), 5 en vol en permanence

Projet lancé par le Pentagone en 1996 pour se terminer...en 2006

En février 2006 : déclassé au titre de programme expérimental

# L'ESSENTIEL en sécurité laser (1)

Lorsque l'on travaille sur un laser de classe supérieure à 1, il faut obligatoirement :

**avoir la maîtrise du faisceau laser**, de la source au détecteur.

C'est à dire qu'il est impératif:

- Que tout objet réfléchissant et partiellement réfléchissant doit être **solidement fixé**
- De **connaître parfaitement son expérience** et ainsi localiser parfaitement le trajet du faisceau laser lors de sa propagation. Cette connaissance permet en même temps de repérer les réflexions parasites et de les bloquer (En utilisant des bloqueurs absorbants et non réfléchissants).
- **De bloquer le faisceau**, il faut au maximum éviter les réflexions diffuses en utilisant par exemple un morceau de carton pour bloquer le faisceau laser puissant.

# L'ESSENTIEL en sécurité laser (2)

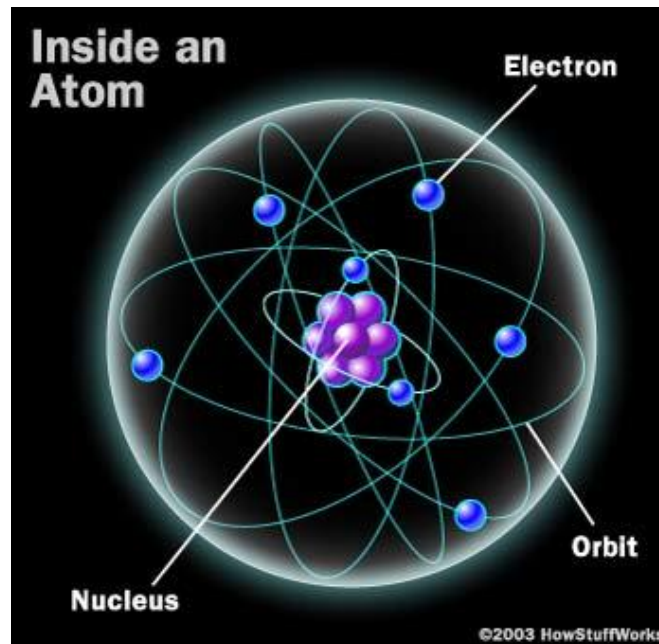
**L'expérimentateur doit prendre ses précautions.**

C'est à dire :

- Qu'il doit régler son expérience **à faible puissance**
- Qu'il ne doit **jamais mettre ses yeux dans l'axe** de propagation des faisceaux laser
- De toujours travailler nu de tout objet réfléchissant tel **qu'une montre, un bracelet, une alliance...**
- De toujours travailler **dans une pièce minimalement éclairée** pour ne jamais avoir sa pupille totalement ouverte.
- Et bien sur de **toujours porter ses lunettes de protection** adaptées dès que le risque existe.

# Les sources lumineuses

- Emission « atomique »
  - Les caractéristiques du rayonnement ne peuvent être comprises qu'en descendant à l'échelle de l'atome !

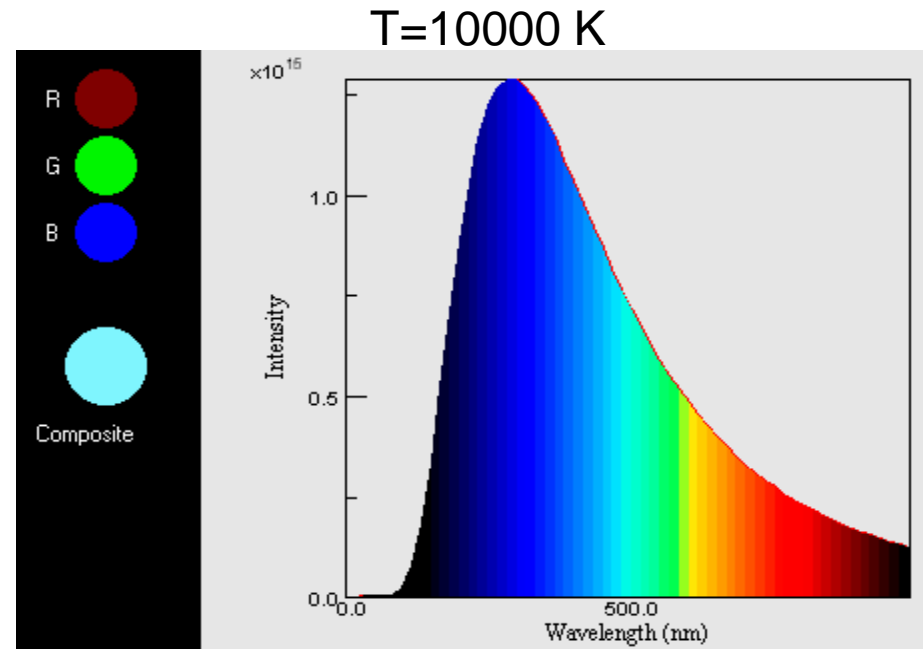
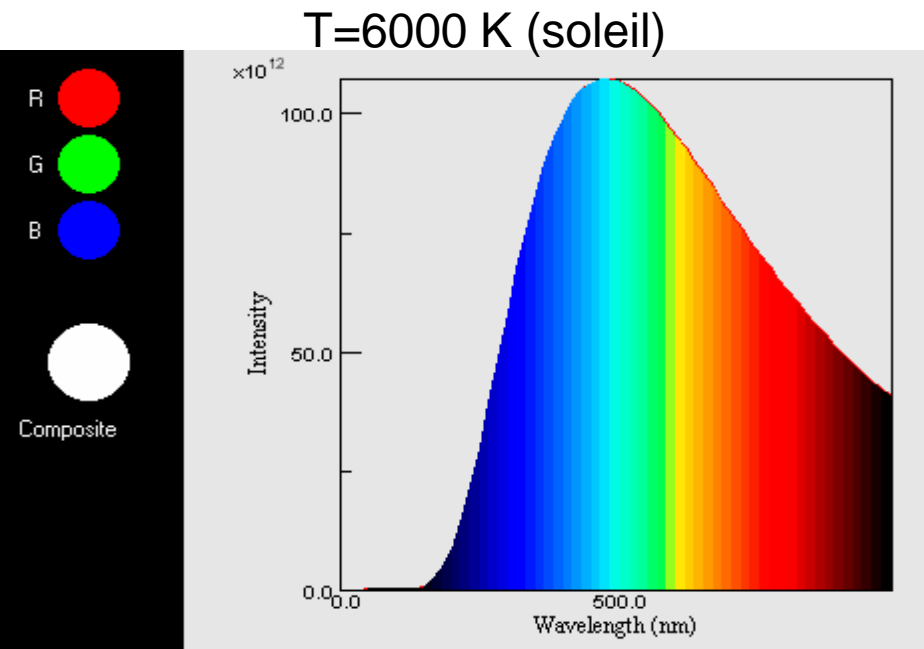
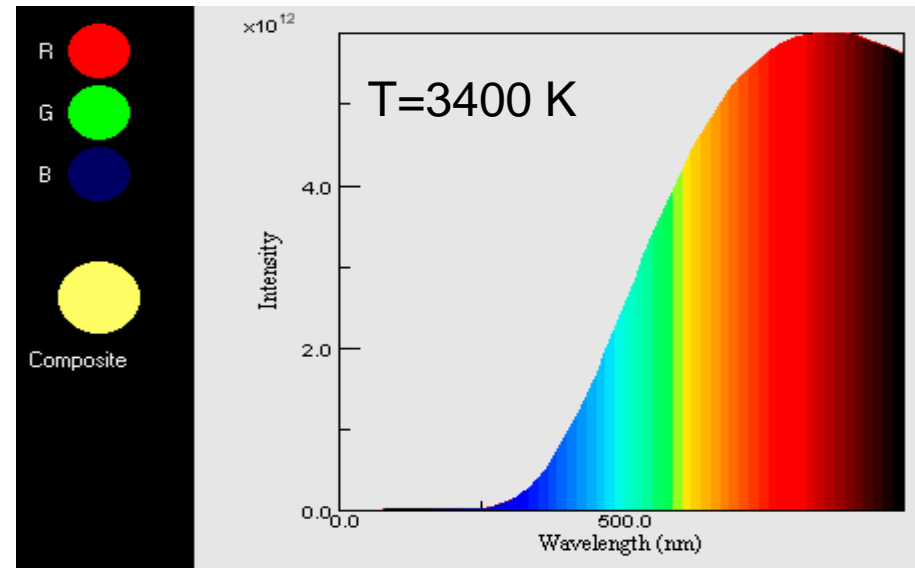
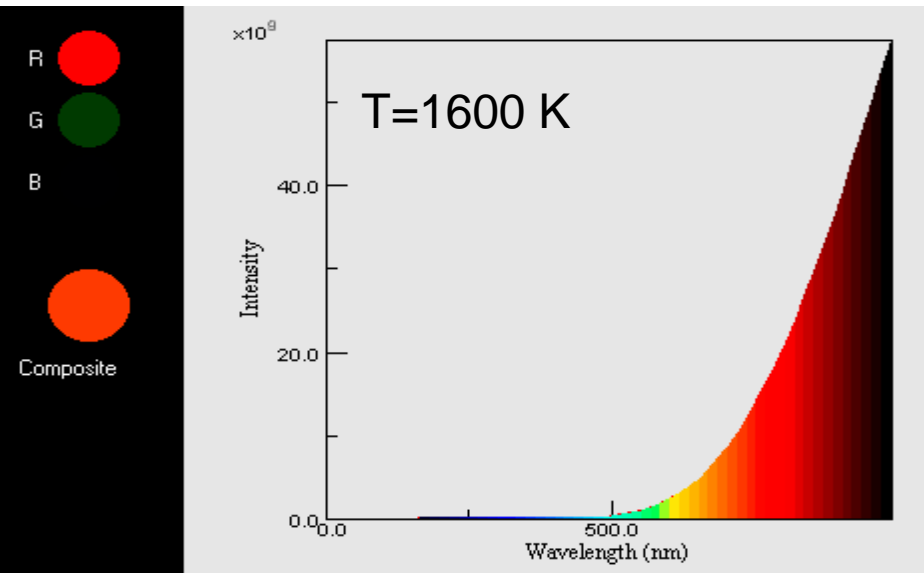


(revenons au début)

# Comment faire de la lumière ?

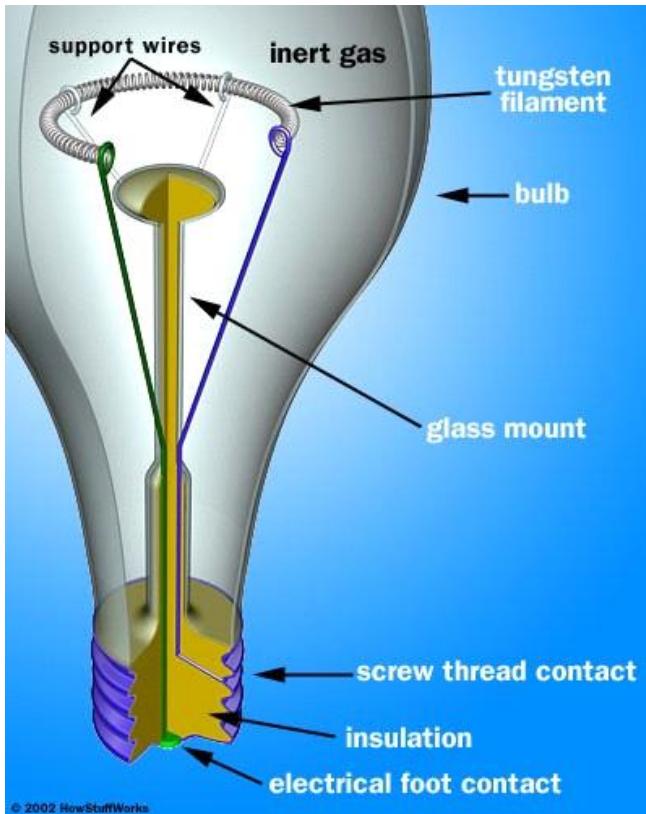
- Avec du feu (émission thermique)
- Avec un éclair – décharge électrique  
... et fluorescence
- Avec un ver luisant (réactions chimiques)
- Avec une LED

# Emission du corps noir à différentes températures (normalisée)



# Les sources thermiques

## Ampoules classiques sous vide



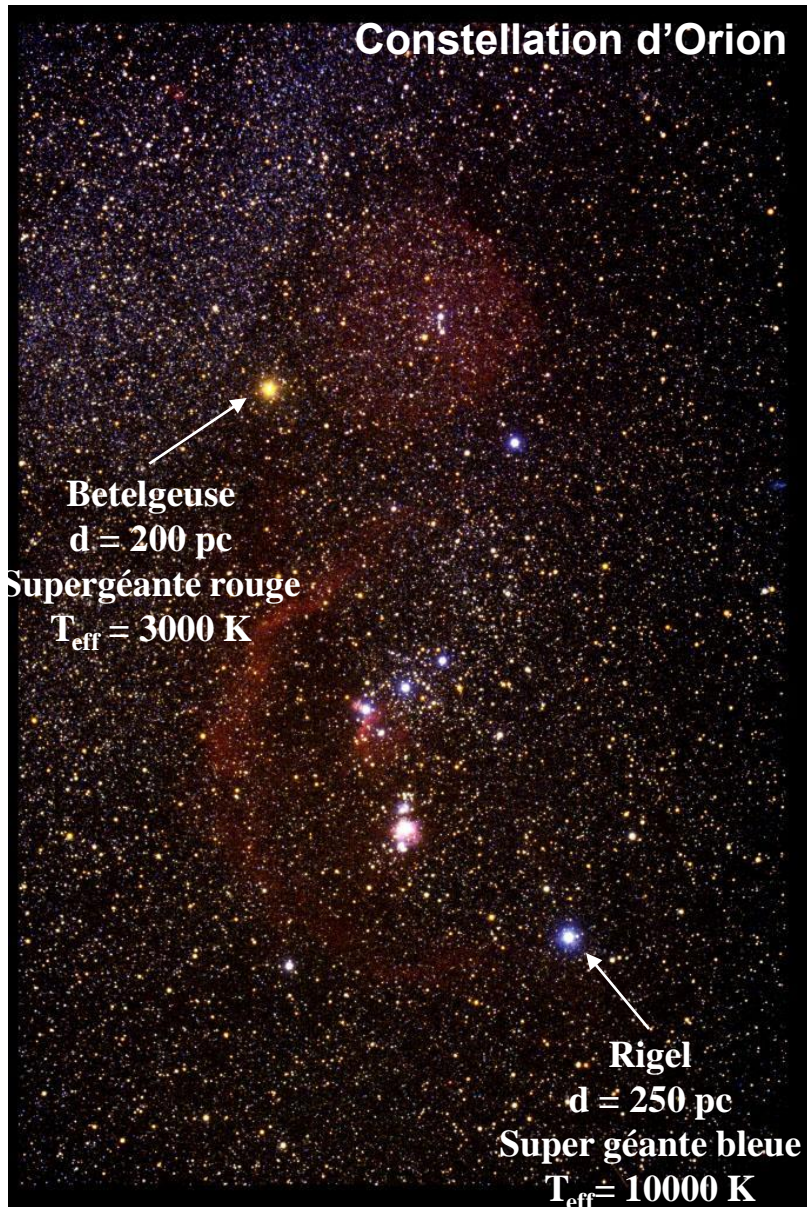
on chauffe un filament de tungstène (W) sous vide jusqu'à environ 2500 K (on ne peut pas chauffer beaucoup plus car le tungstène fond).

$\lambda_{\max} = 1,14$  microns.

durée de vie = 1000 heures environ

# Couleur et température des étoiles

## Constellation d'Orion



En première approximation:

**lumière stellaire ~ rayonnement du Corps Noir**

➤ **Loi de Wien**

**Couleur des étoiles ↔ Température de surface**

$$T = 2900 / \lambda_{max}$$

➤ **Loi de Stephan-Boltzmann**

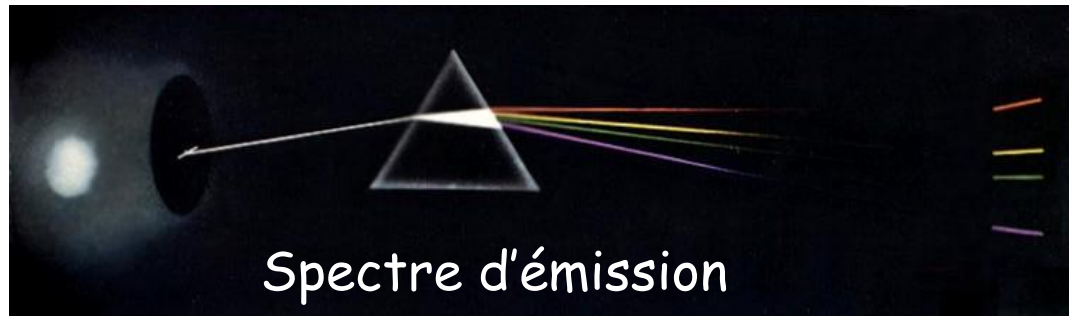
**Luminosité stellaire ↔ Taille des étoiles**

$$L = \sigma S T^4$$

Surface de l'étoile de rayon  $R$ :  $S = 2\pi R^2$



# Les spectres lumineux



## Les lois de Kirchhoff (1859)

➤ un gaz à pression élevée, un liquide ou un solide, s'ils sont chauffés, émettent un rayonnement continu qui contient toutes les couleurs.

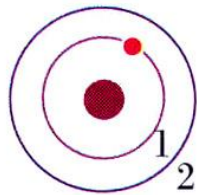
➤ Un gaz chaud, à basse pression, émet un rayonnement uniquement pour certaines couleurs bien spécifiques: le spectre de ce gaz présente des raies d'émission.

➤ Un gaz froid, à basse pression, s'il est situé entre l'observateur et une source de rayonnement continu, absorbe certaines couleurs, produisant ainsi dans le spectre continu des raies d'absorption. Ce gaz absorbe les mêmes couleurs qu'il émettrait s'il était chaud.

# Lumière émise par les atomes

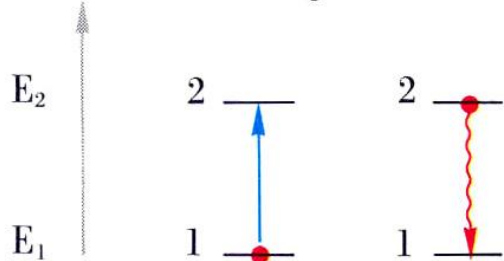
## CHOC D'UN ATOME A 2 NIVEAUX D'ÉNERGIE

**avec un électron  
processus collisionnel**



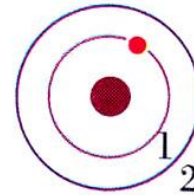
électron libre

échelle des énergies



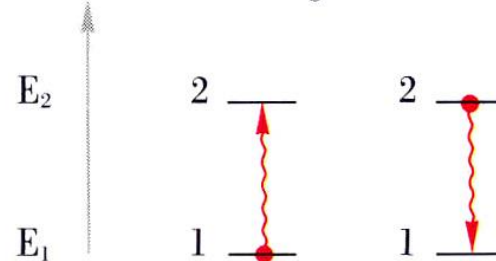
excitation par choc :  
l'électron de l'atome passe de 1 en 2  
*émission d'un photon :*  
l'électron de l'atome revient de 2 en 1

**avec un photon  
processus radiatif**



photon

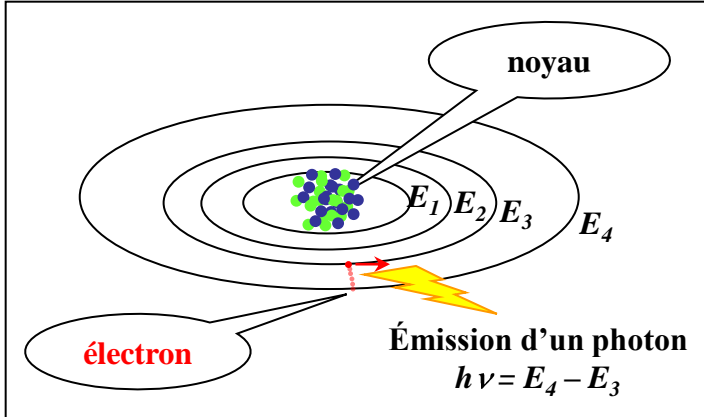
échelle des énergies



excitation par rayonnement :  
l'électron de l'atome passe de 1 en 2  
*émission d'un photon :*  
l'électron de l'atome revient de 2 en 1

# Lumière émise par les atomes

## L'atome de Bohr



- électrons (charge -) en orbite autour d'un noyau constitué de protons (charge +) et de neutrons.
- chaque orbite correspond à un niveau d'énergie de l'atome.
- émission ou absorption de lumière quand un électron change d'orbite

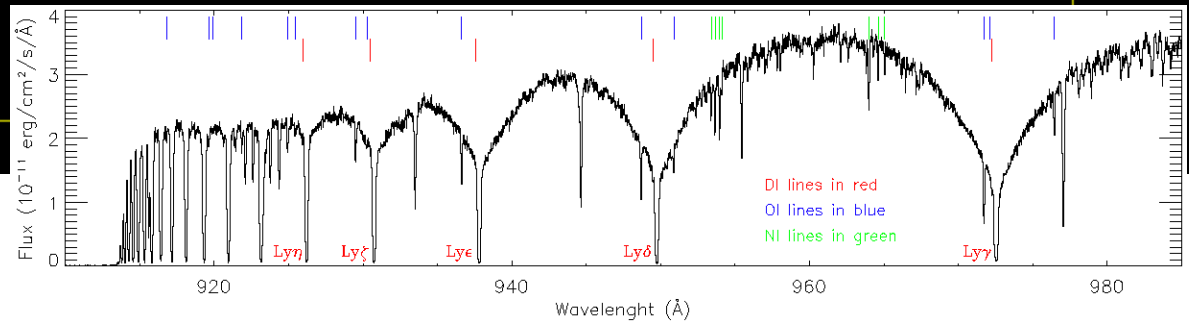
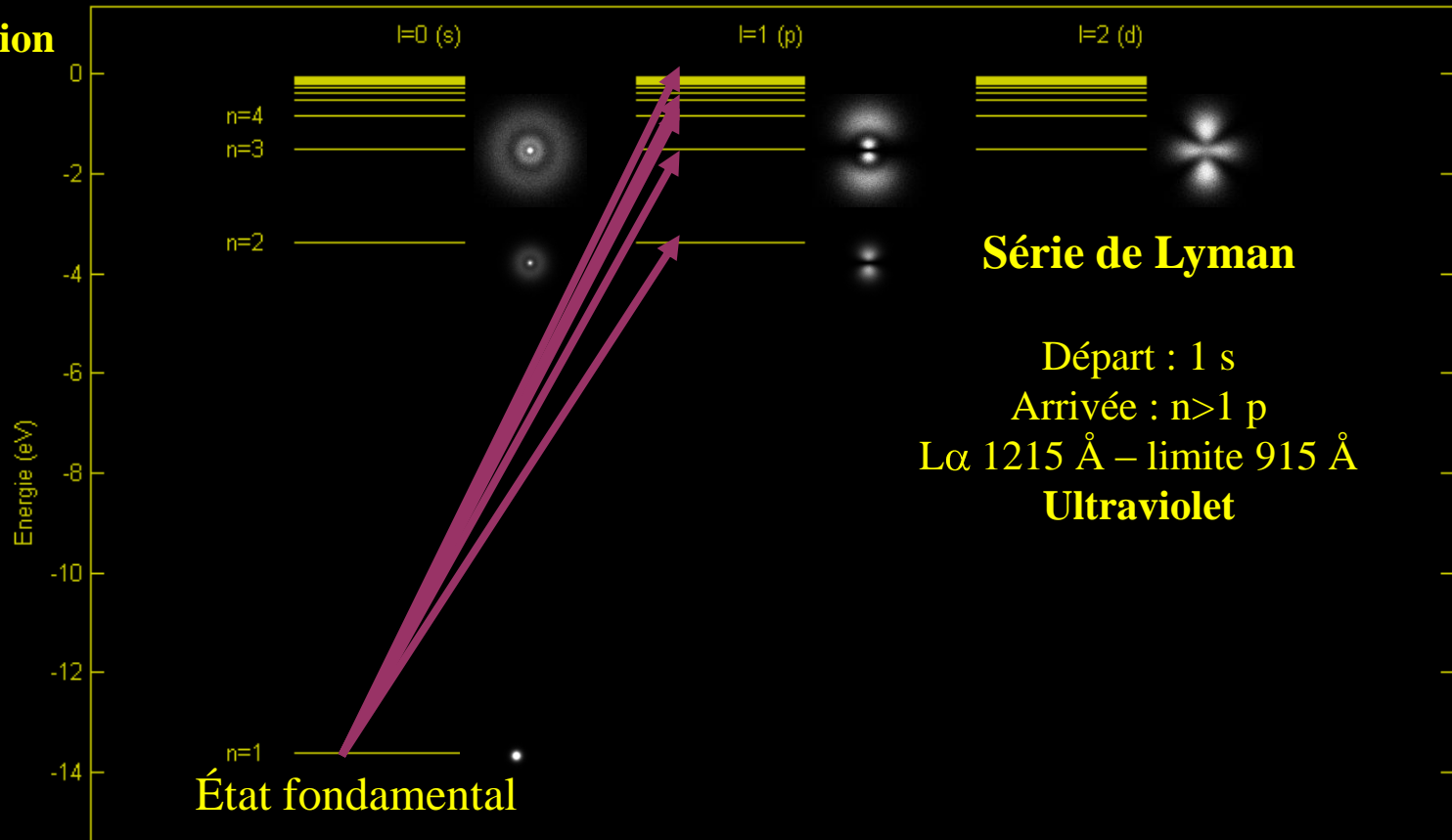
## L'atome « moderne »

- L'électron n'est pas localisé en un point
- L'électron n'a pas de trajectoire mais est présent dans un volume appelé orbitale
- On ne perçoit qu'une probabilité de présence pour un point donné de l'espace.

# Lumière émise par l'atome d'hydrogène

**Ionisation**

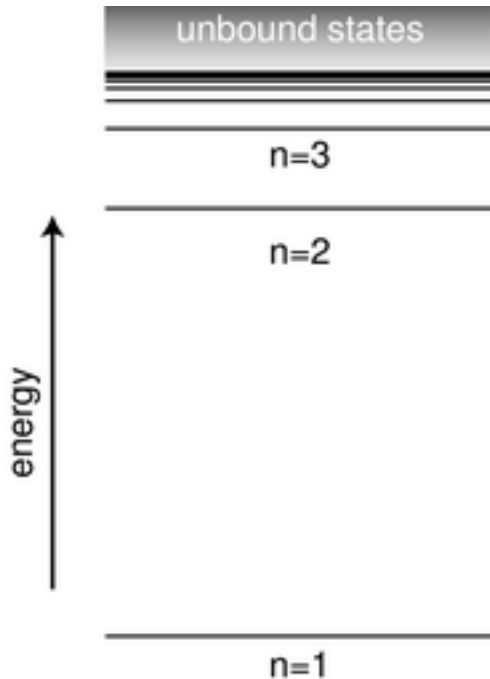
**Énergie**



# Quantification de l'énergie de la matière

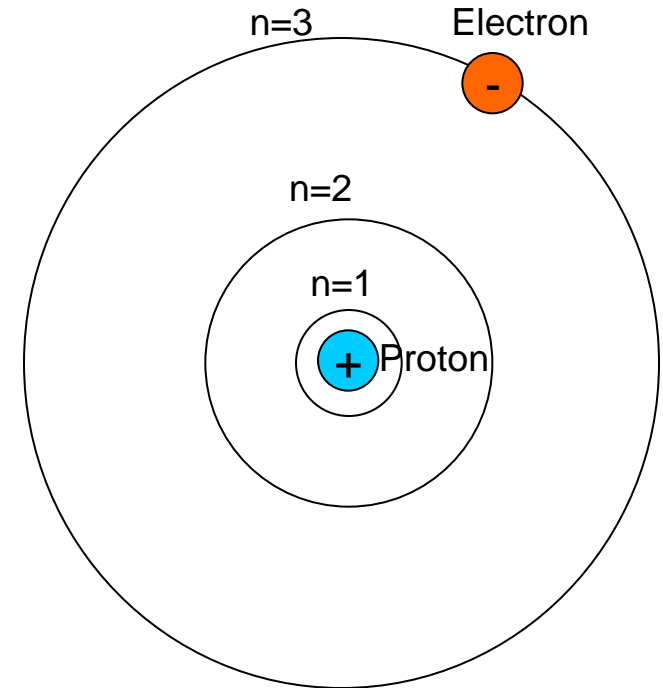
## Exemple: l'atome d'hydrogène

### niveaux d'énergie



$$E(n) = \frac{-13.6}{n^2} eV$$

### Orbites électroniques Vision schématique fausse



### Résultat (non intuitif !) de physique quantique:

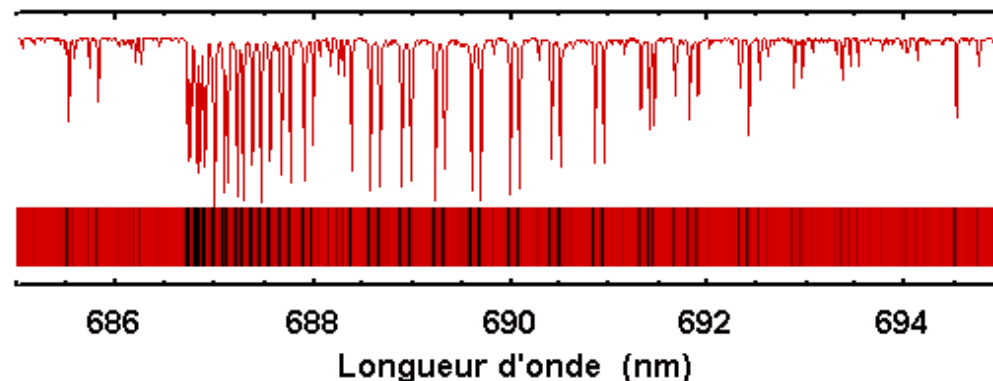
l'énergie est **quantifiée**: il existe un ensemble discret d'états accessibles, référencés par un indice  $n$ , correspondant chacun à une certaine énergie  $E(n)$ .

## Atomes autres que l'hydrogène

- Pour les atomes qui possèdent plusieurs électrons, la structure en niveaux d'énergies est plus complexe.
  - Les électrons se répartissent en "couches" et "sous-couches" d'énergies différentes.
- Il y a émission ou absorption de lumière quand il y a transition d'un électron d'un état d'énergie à un autre.

## Atomes regroupés en molécules

- Une molécule étant un assemblage d'atomes, les électrons de chacun d'eux se répartissent sur des niveaux d'énergies propre à la structure moléculaire.
- Il y a émission ou absorption de lumière quand il y a transition entre les différents niveaux d'énergie notamment quand la molécule se déforme sous l'effet de vibrations ou de la rotation.



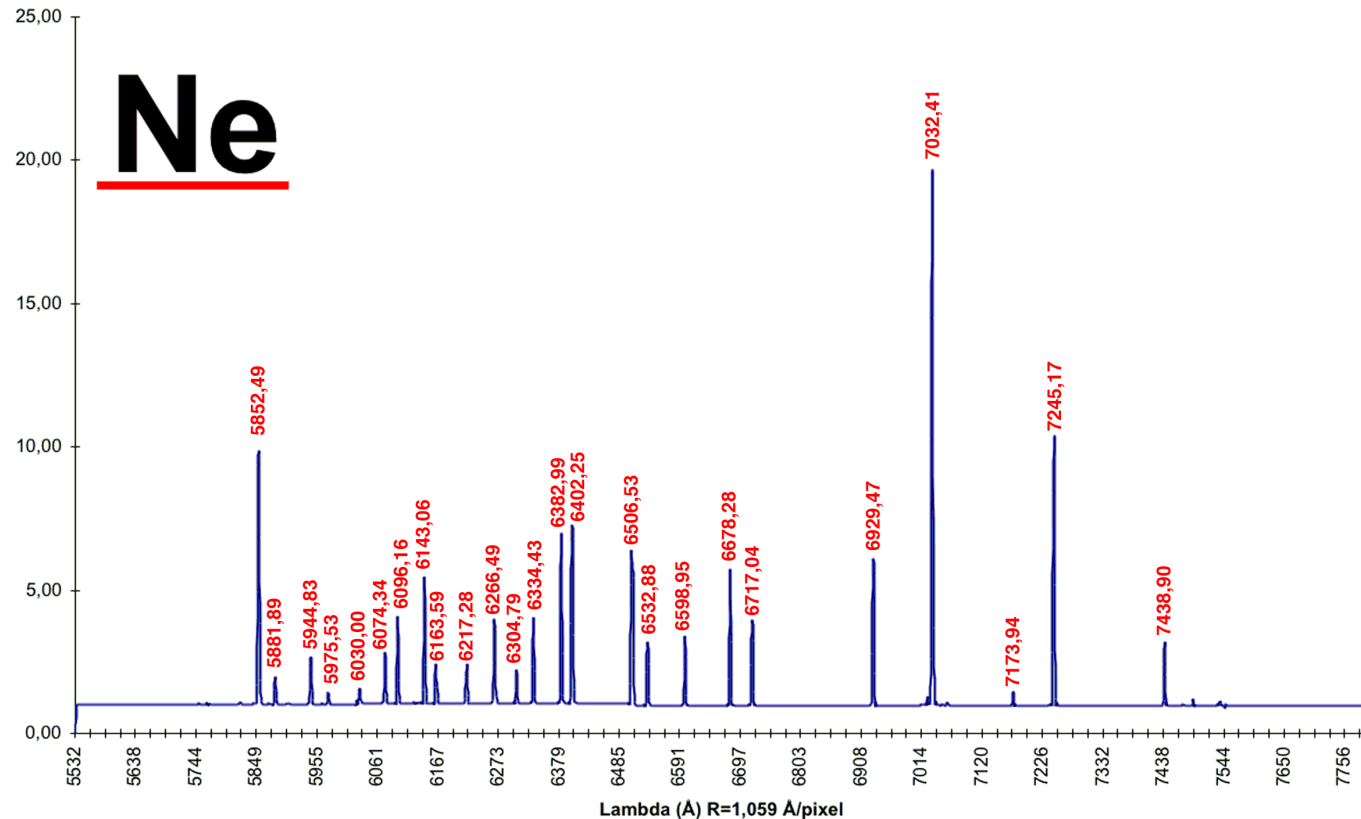
Spectre de vibration-rotation de la molécule O<sub>2</sub> dans l'atmosphère terrestre

## Gaz constitué par un mélange d'éléments chimiques différents

- Le spectre absorbé ou émis est la superposition des spectres des différents éléments.

# Les lampes à décharge : excitation électrique

Exemple : le **néon** (Ne) émet essentiellement dans le rouge

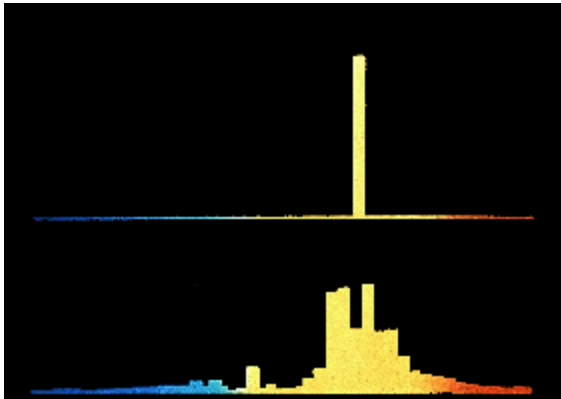


# Les lampes à décharge



Excitation **électrique**

Exemple : le **Sodium** (Na) émet essentiellement dans le jaune-orangé



Basse Pression

Haute Pression

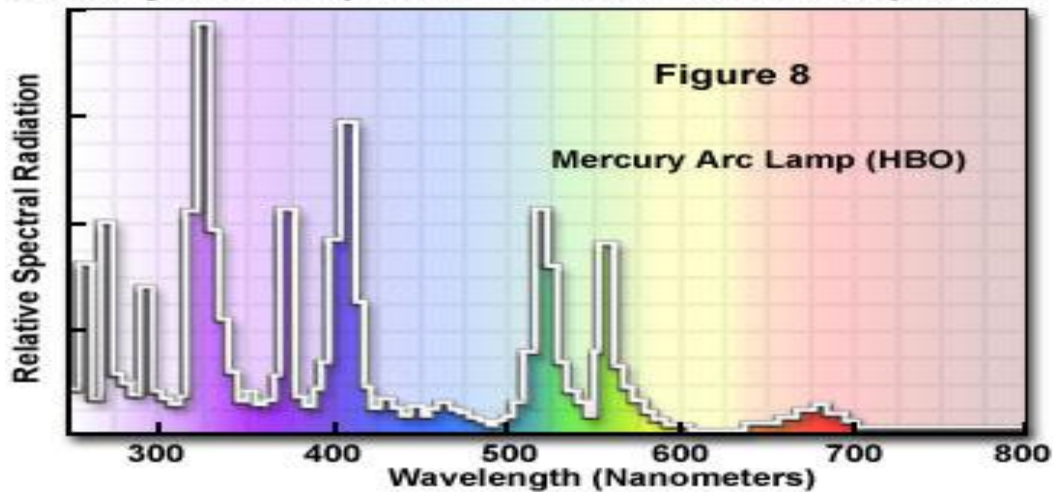


# Les lampes à décharge

Excitation **électrique**

Exemple : le **Mercure** (Hg) émet essentiellement dans le blanc bleuté

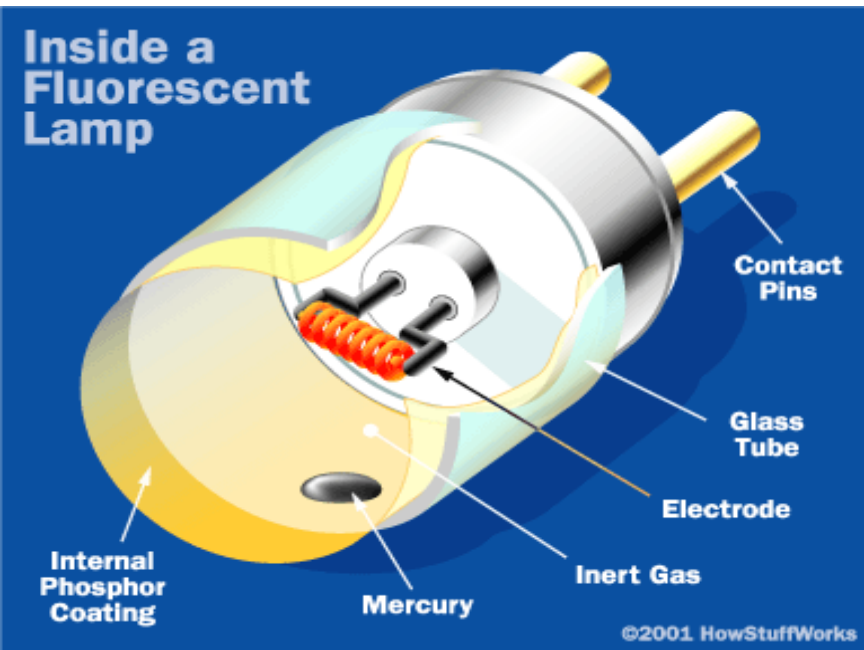
Mercury Arc Lamp UV and Visible Emission Spectrum



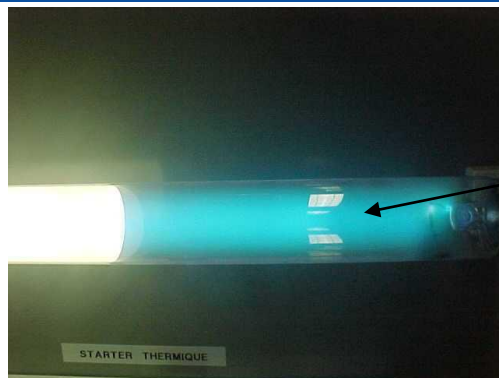
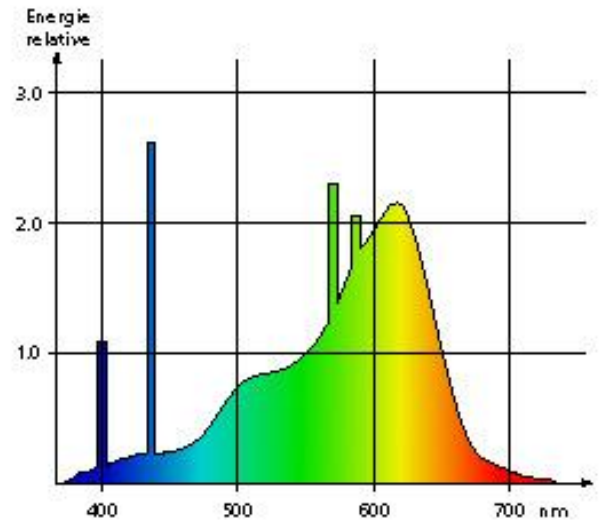
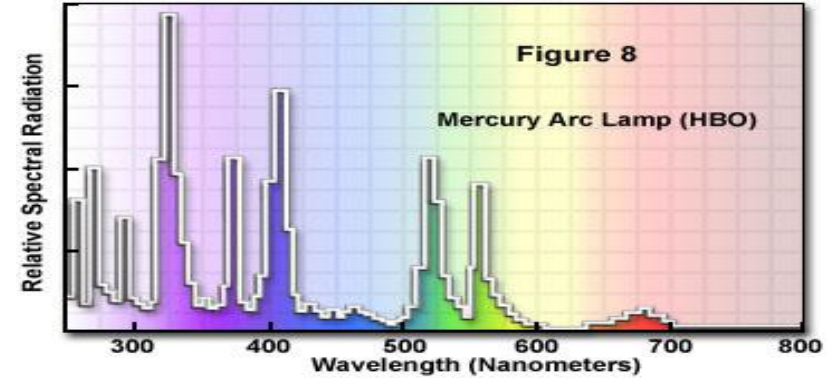
À basse  
pression : +  
d'UV

Médecine, bronzage,  
« lumière noire »

# Le « néon » ou mieux dit « tube fluorescent » »



Mercury Arc Lamp UV and Visible Emission Spectrum

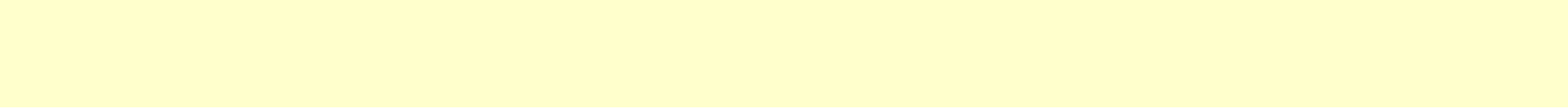


Sans poudre fluorescente

# Les lampes économiques à fluorescence

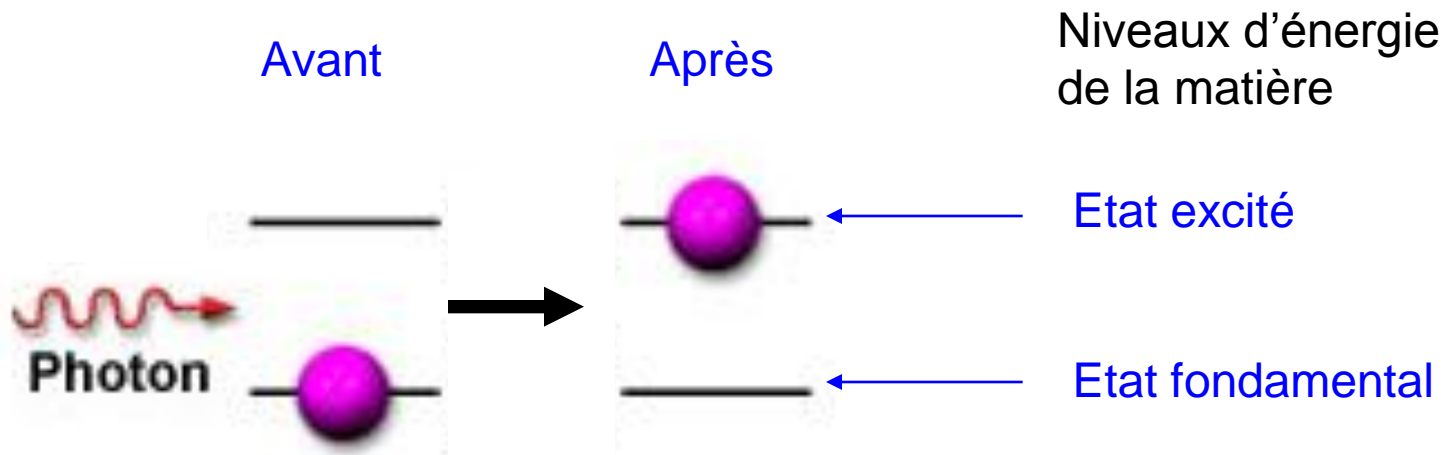
## *Le « tube fluorescent »*





et pour faire un laser ?

# Absorption



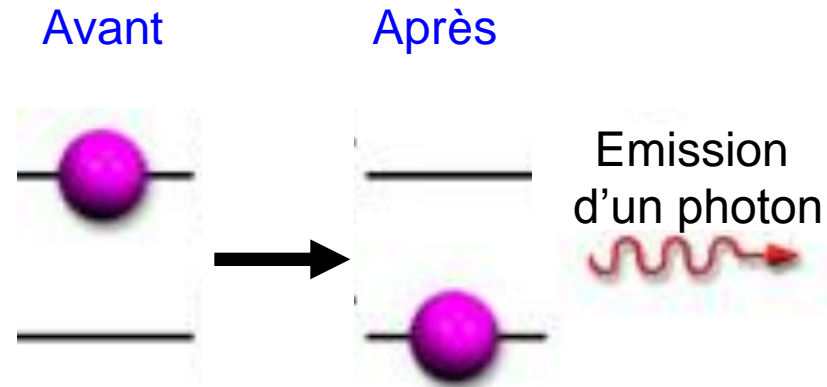
## Caractéristiques:

Energie transférée de la lumière à la matière

- Destruction d'un photon
- Atome placé dans un état excité

L'absorption n'a lieu que si l'énergie du photon correspond à la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité.

# Emission spontanée



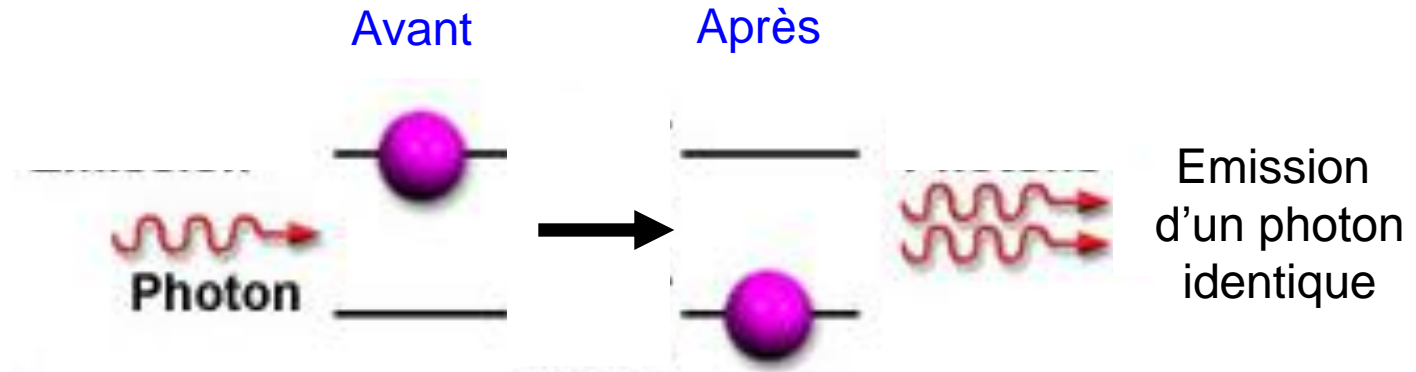
## Caractéristiques:

Energie transférée de la matière à la lumière:

- Création d'un photon
- Désexcitation de l'atome

Le photon émis a une énergie qui correspond à la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité **dans une direction aléatoire**.

# Emission stimulée (ou émission induite)



## Caractéristiques:

Energie transférée de la matière à la lumière:

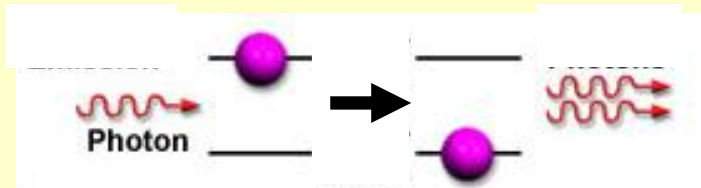
- Désexcitation de l'atome **en présence de photons**
- Emission d'un photon identique à ceux déjà présents (même énergie, même direction et même phase).

L'émission stimulée (postulée par Einstein en 1916) permet potentiellement d'**amplifier** un rayonnement électromagnétique.

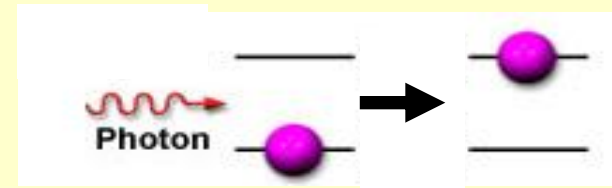


# Compétition absorption/émission stimulée

L'émission stimulée  
amplifie la lumière...



...Alors que l'absorption  
la réduit.



Pour obtenir une amplification de la lumière, il faut que l'émission stimulée soit plus importante que l'absorption.

Ceci nécessite une **inversion de population**: plus d'atomes dans l'état excité que dans l'état fondamental

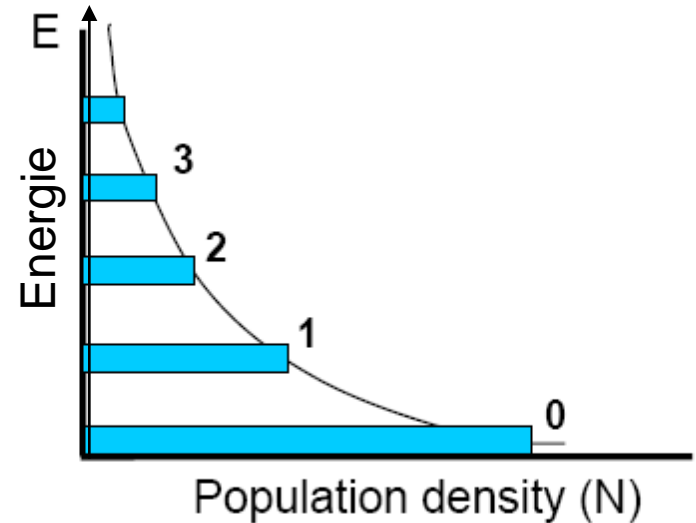
# Occupation des niveaux d'énergie à l'équilibre thermodynamique

## Probabilité d'un état à l'équilibre thermodynamique

La probabilité d'un état en fonction de son énergie est donnée par le facteur de Boltzmann:

$$p(E) \propto e^{-\frac{E}{kT}}$$

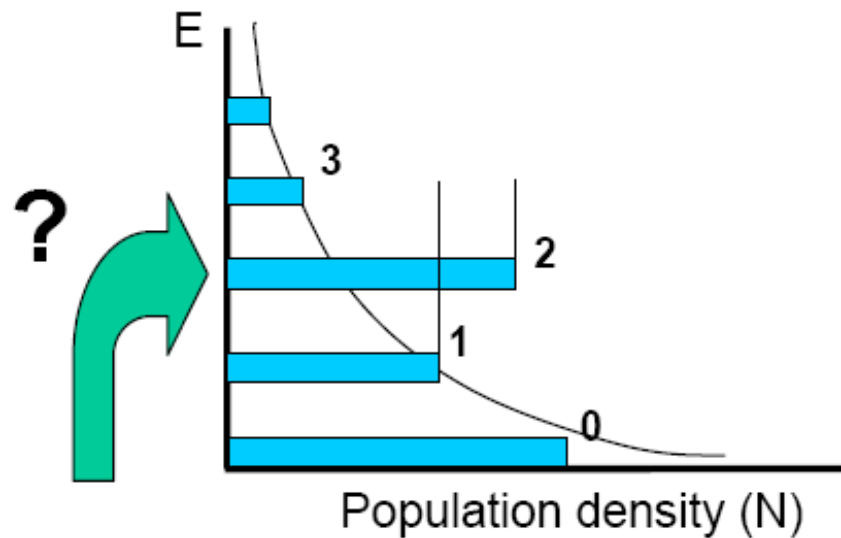
( $k$ : constante de Boltzmann,  $T$  température)



A l'équilibre thermodynamique, un état d'énergie élevée est toujours moins peuplé que l'état fondamental.

⇒ **Pas d'inversion de population possible**

# Création d'une inversion de population



## Principe:

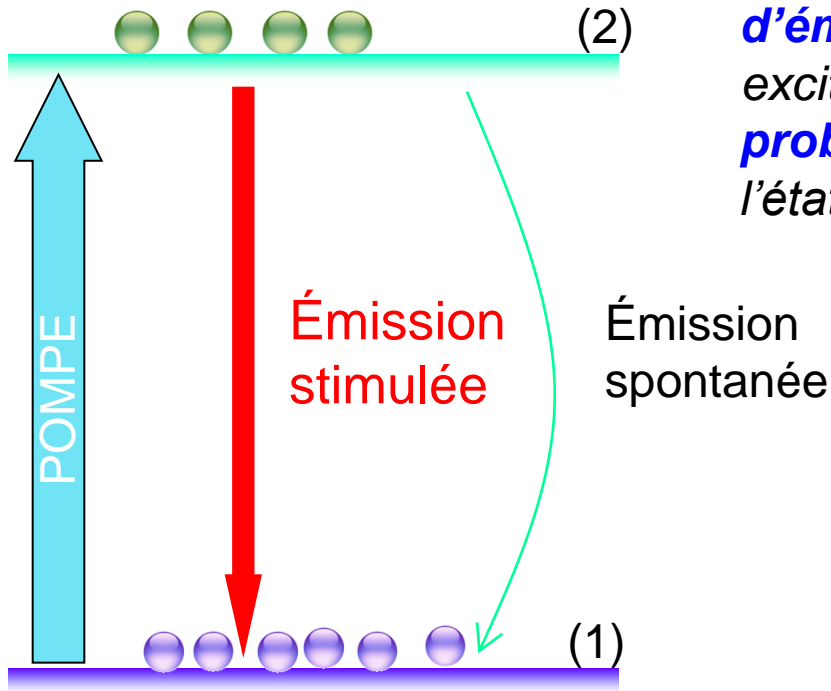
**1) Apporter en permanence de l'énergie au système pour peupler les états excités**

pompage électrique, optique...

**2) Jouer sur la cinétique:**

Réaliser l'émission de lumière plus vite que l'établissement de l'équilibre thermodynamique.

# Un laser à 2 niveaux ?



Résultat de physique atomique (Einstein 1917):

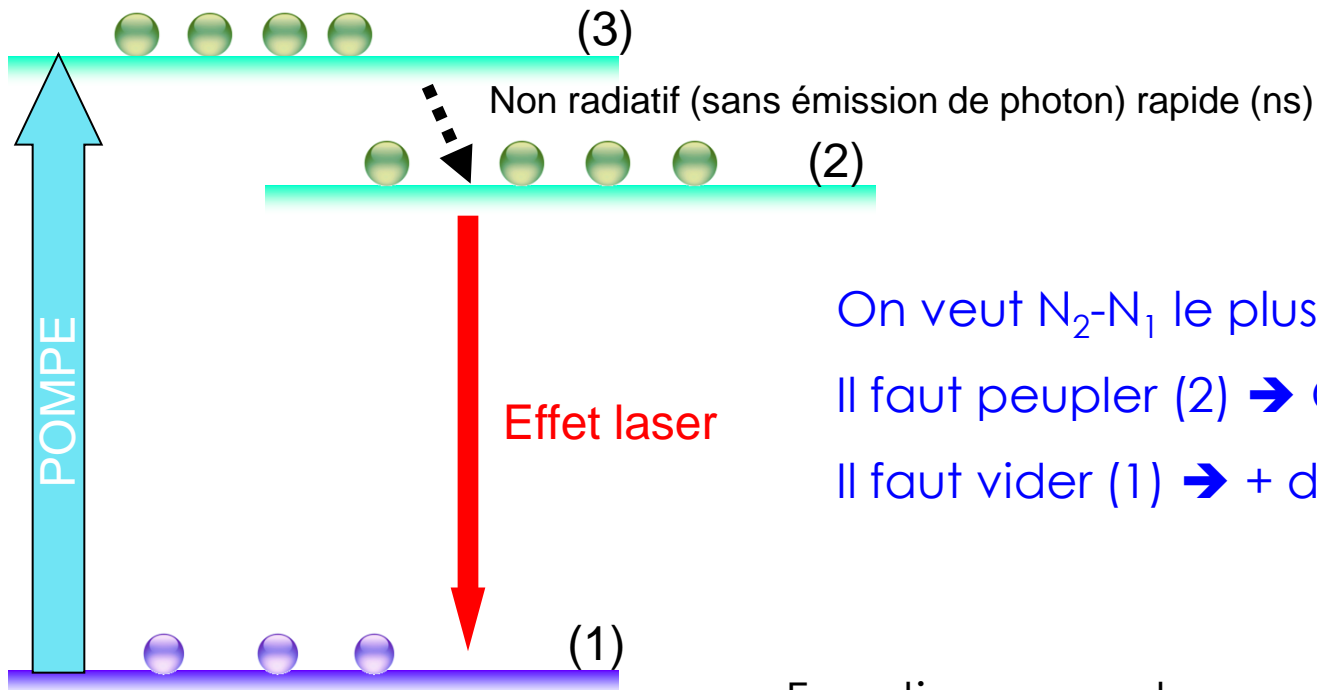
« Pour une transition donnée **la probabilité d'émission stimulée** (pour 1 atome dans l'état excité éclairé par 1 photon) **est égale** à la **probabilité d'absorption** (pour 1 atome dans l'état fondamental éclairé par un photon) »

Donc : il est impossible en pompant une seule transition atomique d'obtenir une inversion de population  $N_2 > N_1$

Au maximum (fort pompage) :  $N_1 = N_2$

# Systeme à 3 niveaux

Inversion de Population difficile !



On veut  $N_2 - N_1$  le plus grand possible :

Il faut peupler (2) → OK

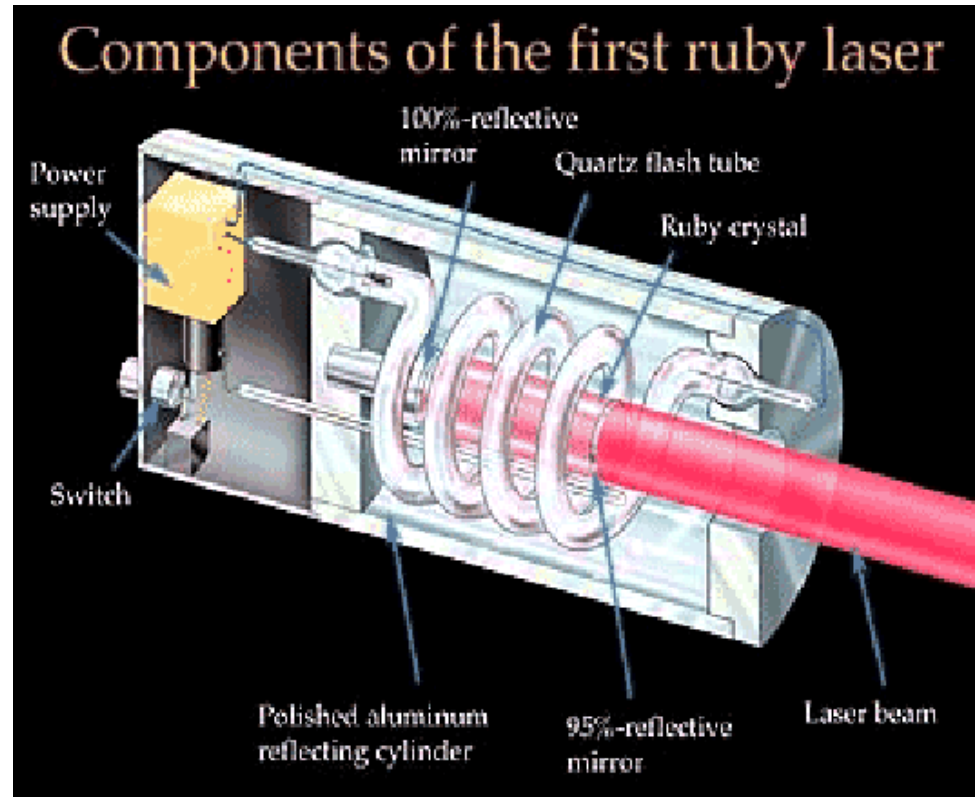
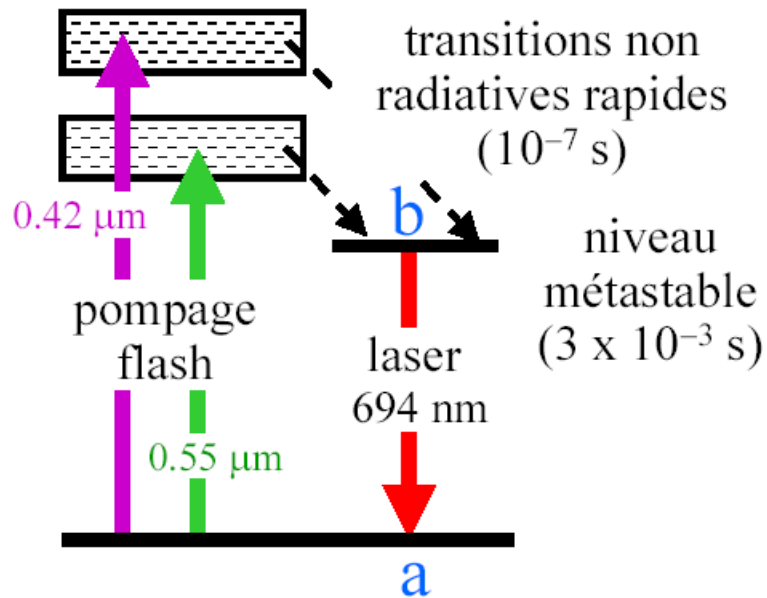
Il faut vider (1) → + dur !! (niveau fondamental)

Fonctionnement en continu difficile à atteindre (le niveau (1) se repeuple dès que le laser marche !)

Il existe un seuil de transparence (il faut pomper pour atteindre  $\Delta N = 0$ )

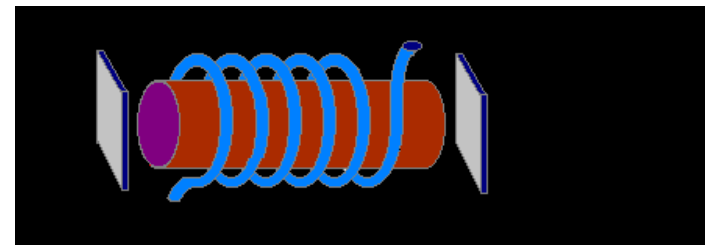
# Systeme à 3 niveaux: exemple

Rubis : ion  $\text{Cr}^{3+}$  en substitution de  $\text{Al}^{3+}$  dans matrice d'alumine

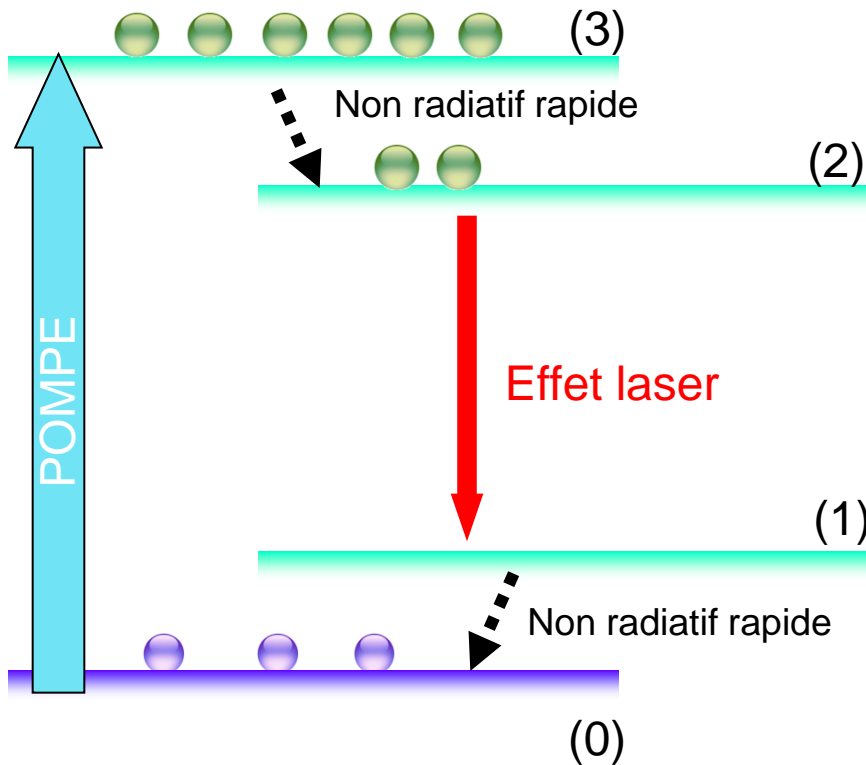


Th. Maiman, 1960

(Impulsionnel  $\mu\text{s}$ )



# Systeme à 4 niveaux



Inversion de Population **facile** !

Il faut peupler (2) → OK

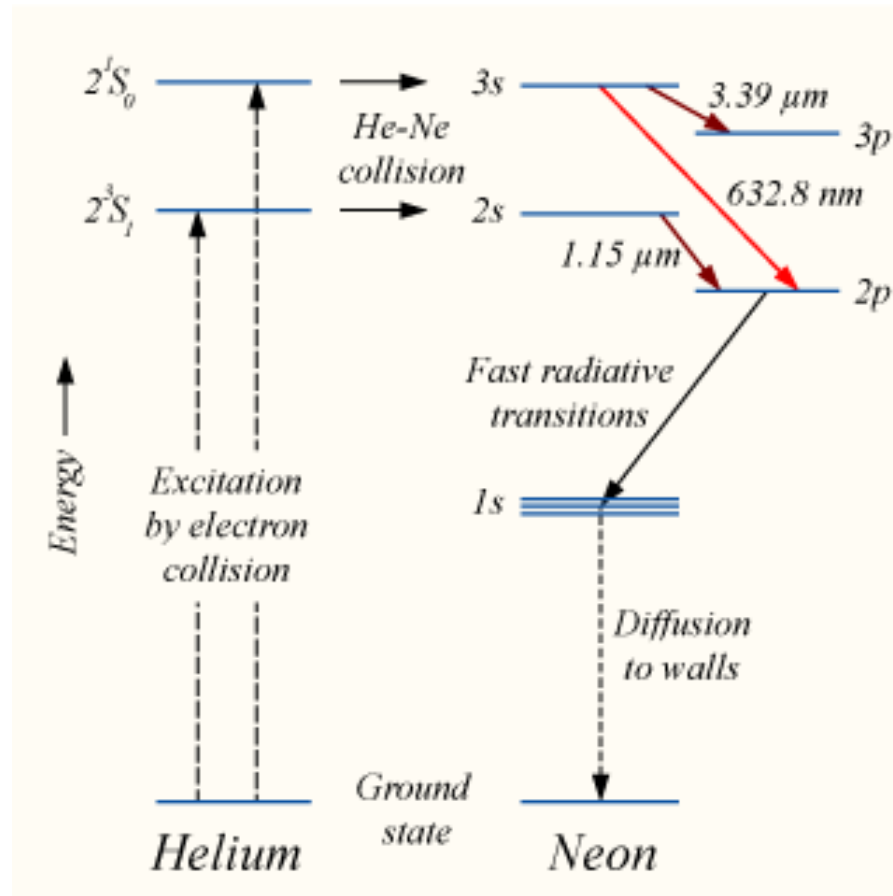
Il faut vider (1) → OK (vite dépeuplé vers (0))

Dès que le pompage est actif ( $N_2 \neq 0$ )  
l'inversion de population est atteinte ( $N_1 = 0$ )

Fonctionnement en continu possible  
Pas de seuil de transparence

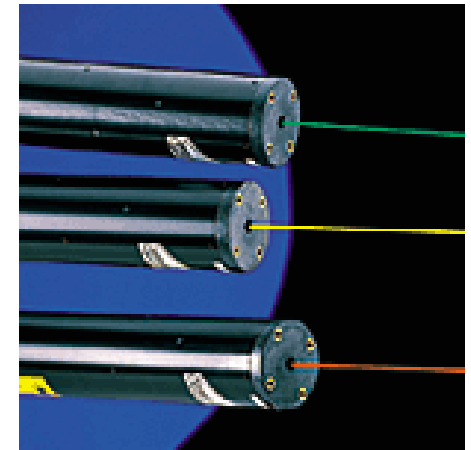
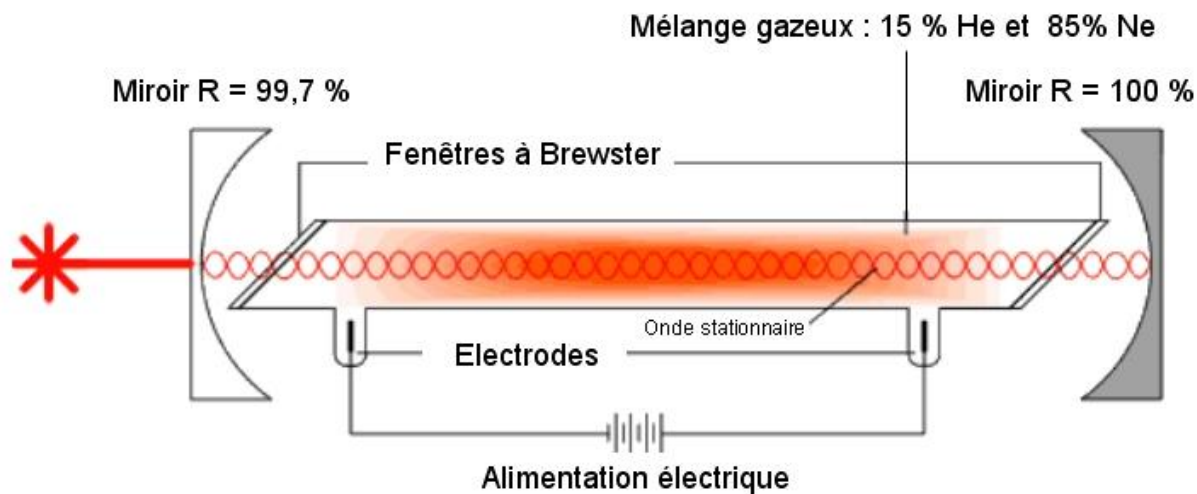
# Le laser He-Ne

- Premier laser à gaz réalisé (JAVAN 1960)
- Principe : pompage par décharge électrique + transfert d'énergie entre l'Helium et le Néon





- La transition la plus connue est à **633 nm**
  - Très utilisée pour l'alignement (faible puissance)



TEM<sub>00</sub>, polarisé, faible puissance (quelques mW)

