

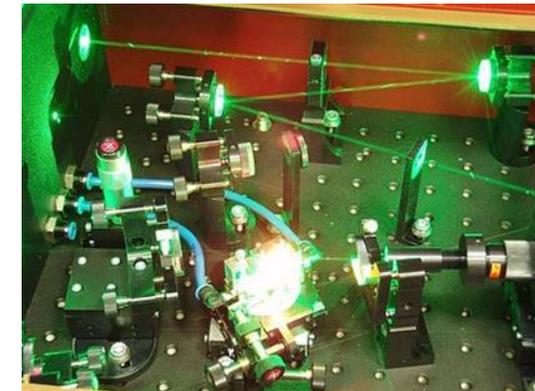
4 janvier 2022



La belle et brillante aventure des lasers à solide



*Georges Boulon
Institut Lumière Matière (iLM)
UMR 5306 CNRS-UCB Lyon 1
Campus LyonTech
La Doua*



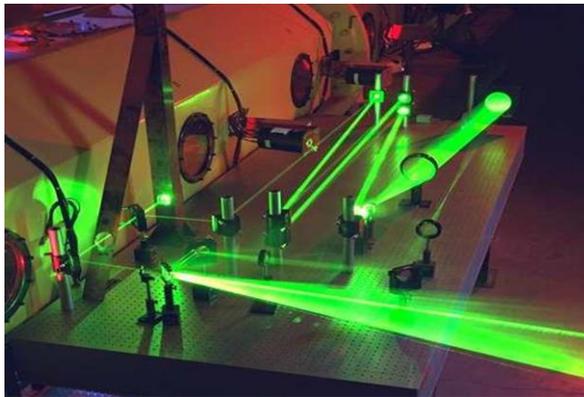
Rentrée solennelle
Sommaire du discours:

La belle et brillante aventure des lasers à solide

- 1. Comparaison entre source laser et source d'éclairage**
- 2. Quelle est la nature de la lumière?**
- 3. Quantification de l'énergie des atomes**
- 4. L'émission stimulée à l'origine du laser**
- 5. L'amplification par inversion de population**
- 6. Les types de cristaux**
- 7. Les ions dopants**
- 8. Des innovations marquantes**

1. Comparaison entre source laser et source d'éclairage.

Le laser? Une source de lumière bien différente de la lumière ordinaire produite par le soleil ou les sources d'éclairage habituelles.



“Au service de la science, de la médecine, du transport de l'information, de l'industrie et au cœur de notre vie quotidienne, le laser est partout présent.”

Un rayon laser vert issu d'un cristal YAG dopé Nd^{3+} dans le ciel de Lyon



Fête de la science, Lyon 2015

Que signifie le mot « LASER »?

LASER est un acronyme en anglais de:

« Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »

en français:

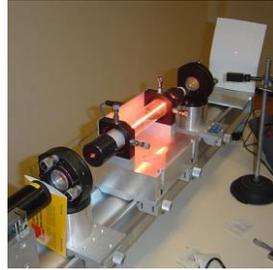
« amplification de la lumière par émission stimulée de radiation ».

La belle et brillante aventure des lasers « à solide »

Il existe 3 types de lasers selon l'état de la matière:

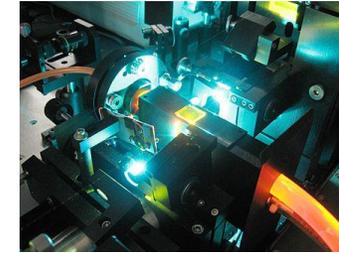
-lasers à **gaz** :

He-Ne, Ar, Kr, CO₂



-lasers à **liquide**:

colorants: fluoresceine, rhodamine 6G, coumarines



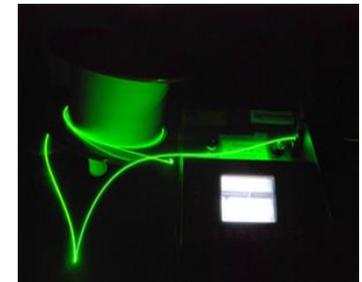
-lasers à **solide**:

les éléments actifs dopants sont des impuretés ou défauts:

rubis dopé Cr³⁺, saphir dopé Ti³⁺,

grenat dopé Nd³⁺, grenat dopé Yb³⁺,

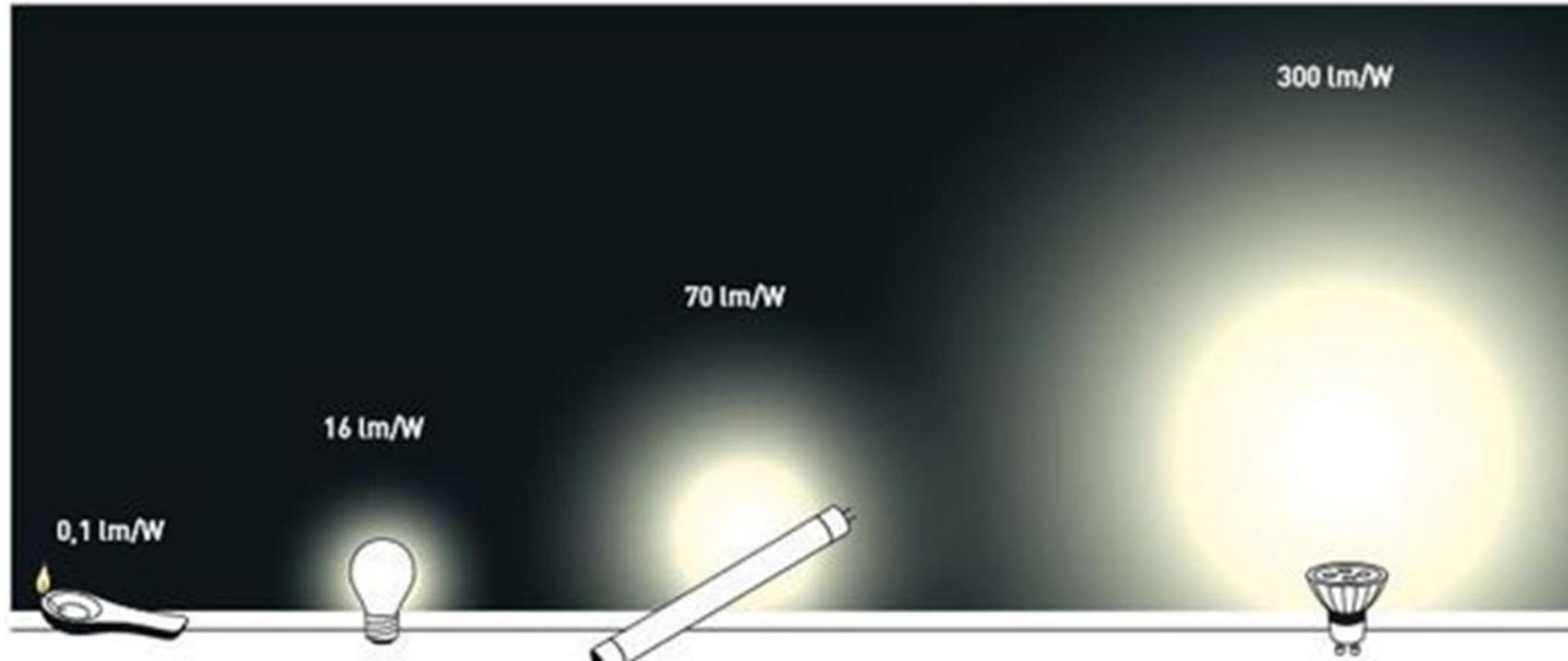
verre de silice dopé Nd³⁺, Er³⁺,



Parmi les sources lasers, ce sont celles constituées de solides inorganiques dopés par des ions luminescents qui sont plus robustes que les gaz et liquides et dont les développements ont été les plus spectaculaires.

Les sources d'éclairage habituelles au cours de l'histoire.

Puissance: quelques Watts ou plutôt en lumen/W



**Lampe
à huile**

Thermique
Chauffage huile

**Ampoule
incandescente**

Thermique
Chauffage filament
de tungstène

**Tube
luminescent**

pompage optique
émission du mercure
et excitation de 3
luminophores BVR=
BLANC

LED

pompage optique
diode bleue+
cristal luminescent
jaune=BLANC

Etablissons d'abord quelques différences fondamentales

Entre

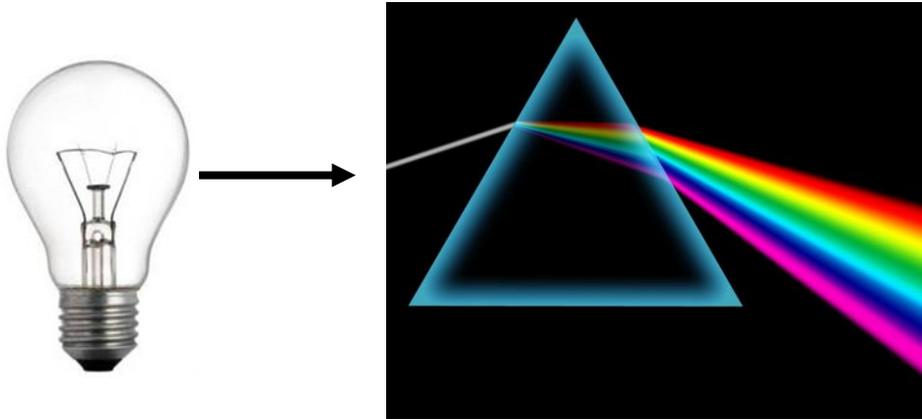
Sources d'éclairage habituelles

et

Sources LASER

La lumière issue d'une source d'éclairage: L'ampoule incandescente

La lumière blanche peut être décomposée par un prisme en plusieurs couleurs comme l'arc en ciel dans la nature.



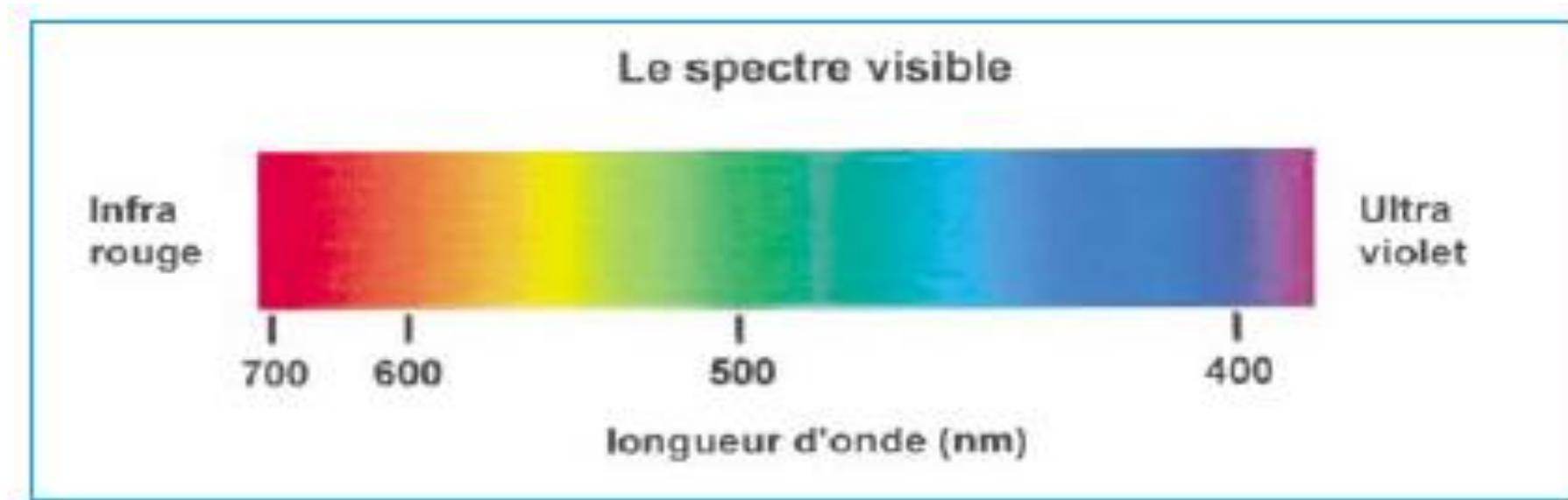
Lumière **polychromatique**

L'analyse prouve qu'elles sont créées dans toutes les directions et qu'elles ne sont pas émises en même temps.

Lumière **incohérente**

**Le spectre visible d'une source de lumière blanche (soleil)
caractérisé par :
les longueurs d'onde dans l'interprétation ondulatoire**

-



longueurs d'ondes λ (nm) comprises entre
380 nm (0,380 μ m) et 750 nm (0,750 μ m)

La lumière issue d'une source laser

Une seule couleur,
Laser de toutes les couleurs,

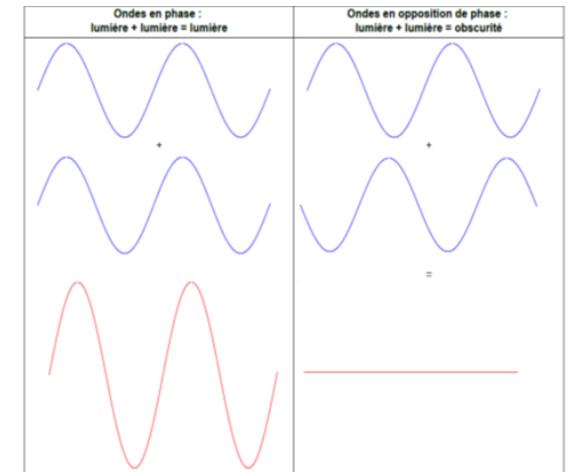
Unidirectionnelle, toutes les ondes
se déplacent dans la même direction

Les ondes sinusoïdales sont en phase et
forment des interférences constructives
On justifie l'aspect ondulatoire de la lumière

Rayonnement spatialement et temporellement cohérent.

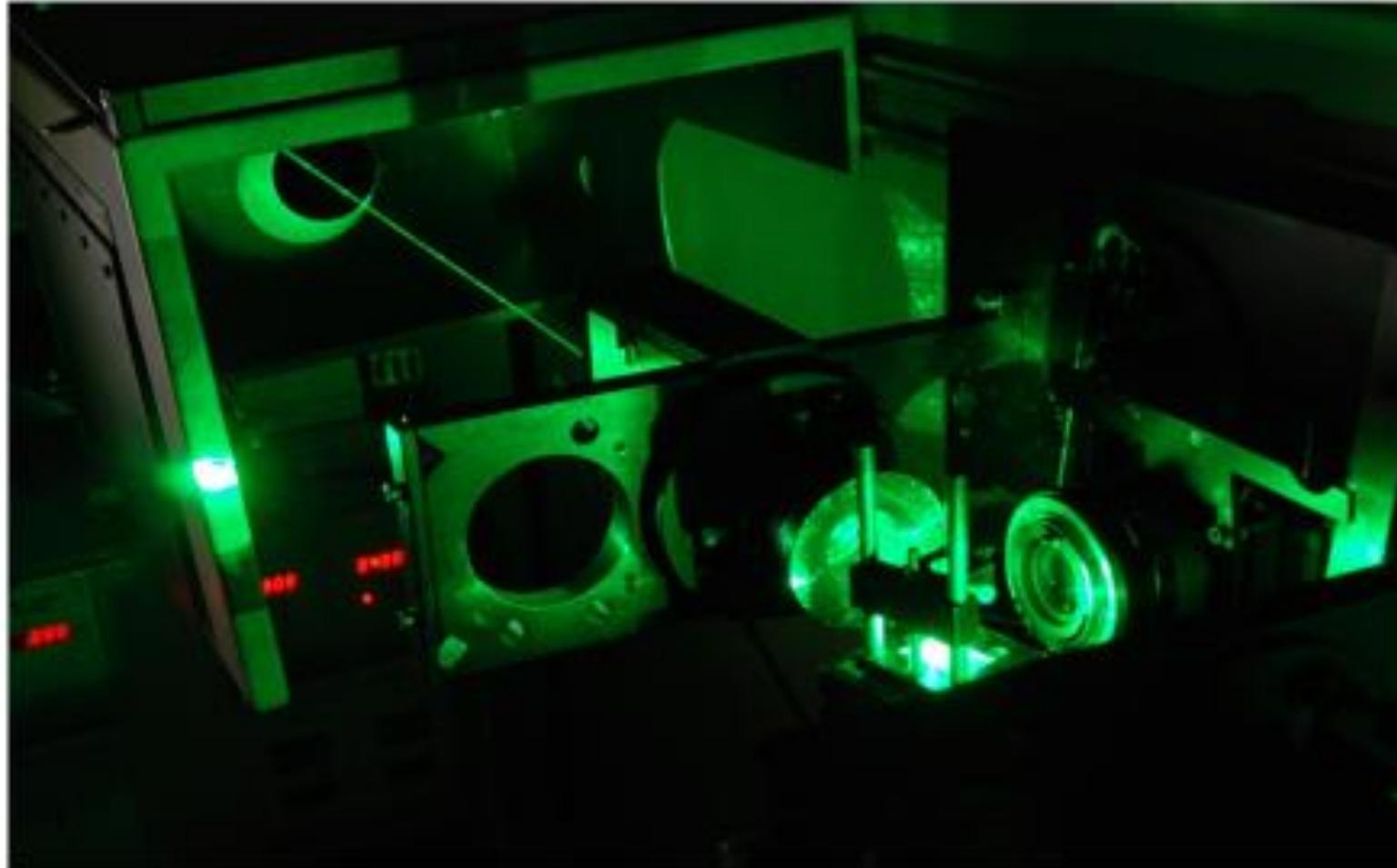
Lumière concentrée, très intense

Puissance: milliwatt au gigawatt



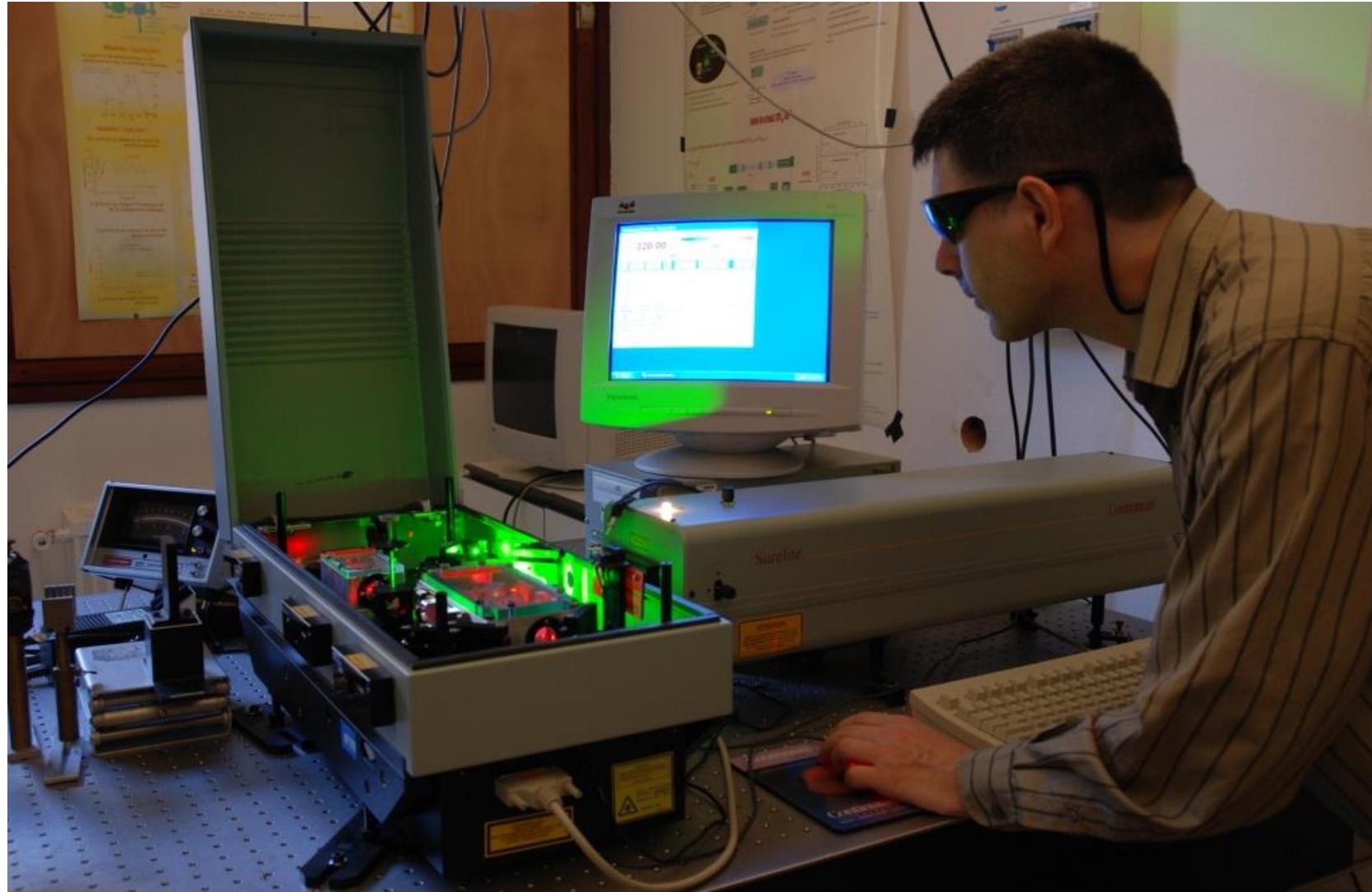
**Emission laser directive à 532nm
issue d'un cristal YAG:Nd³⁺**

Avec un cristal
doubleur de
fréquence
 $1064 \text{ nm}/2=532 \text{ nm}$



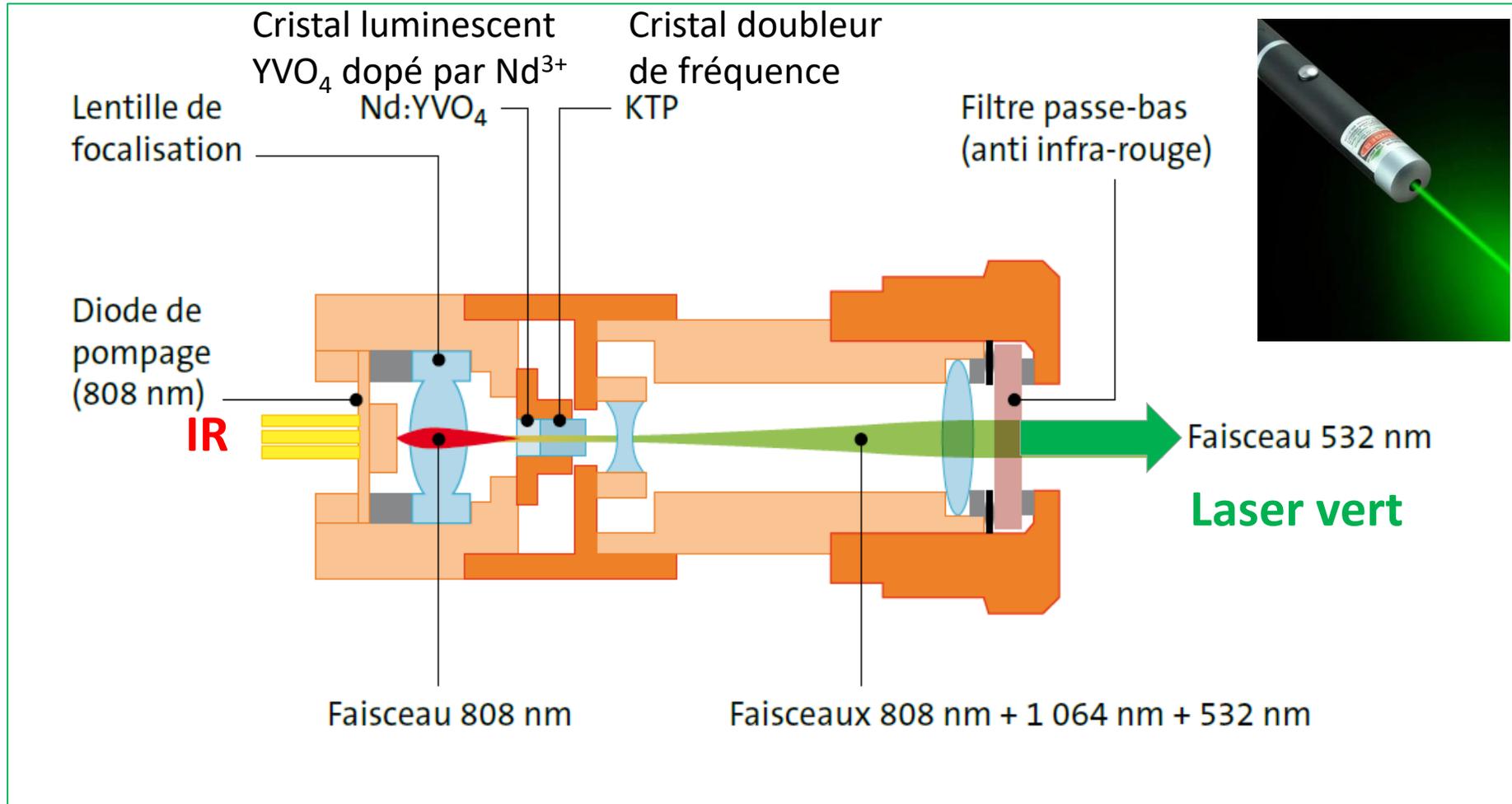
Source de pompage verte très utilisée dans les laboratoires

**Des outils quotidiens d'excitation des matériaux luminescents:
lasers à solide YAG:Nd³⁺ + cristaux non linéaires
accordables de l'UV à l'IR**



Y. Guyot à l'iLM

Le pointeur laser vert: une merveille de technologie à la portée de tous



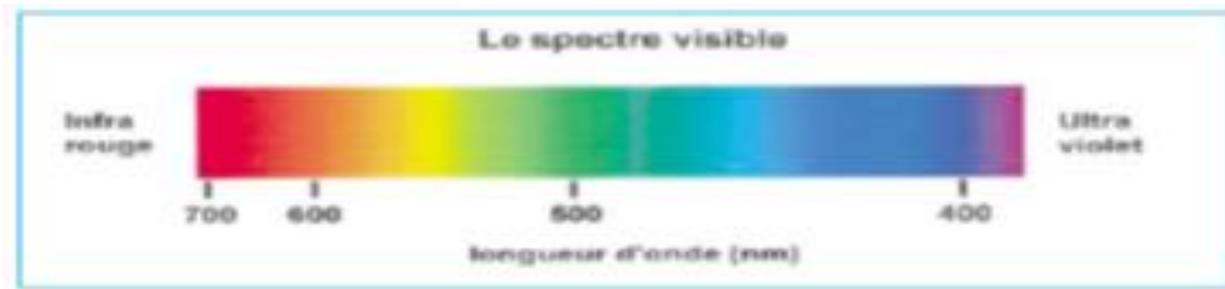
Le spectre du laser ne comprend qu'une raie fine: Source monochromatique

Spectre monochromatique



Laser à 532 nm

Longueur d'onde (nm)



2. Quelle est la nature de la lumière?

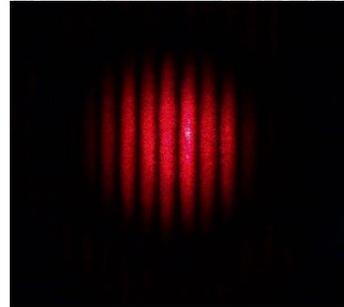
2.1. Nature ondulatoire de la lumière

384-322 avant J.-C. Aristote, Philosophe grec, *presentait la nature ondulatoire*

1629-1695 Huygens, ondelettes qui furent reprises par Fresnel

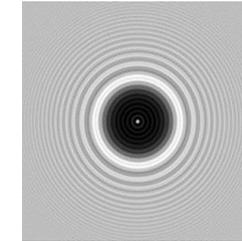
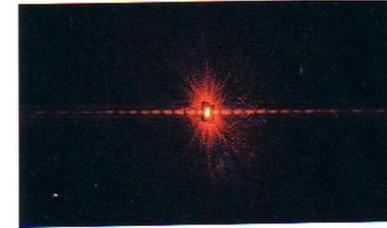
1801 Young:

interférences lumineuses



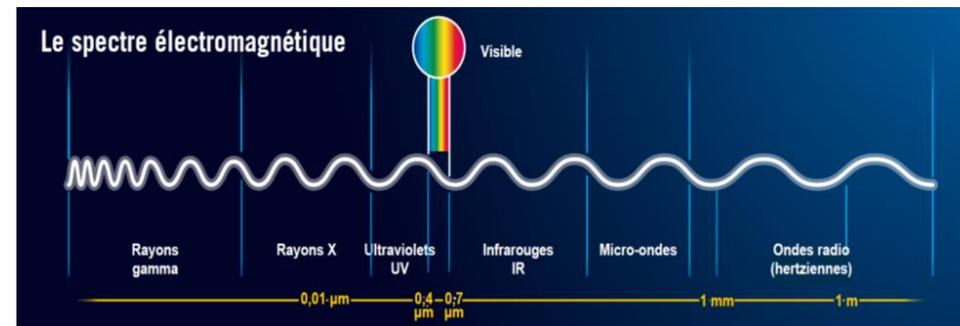
1815 Fresnel:

diffraction de la lumière



1865 Maxwell, propagation de champs électrique et magnétique

Fameuse tâche de Poisson



2.2. Nature corpusculaire de la lumière

580-495 avant J.C., Pythagore

490-430 avant J.C., Empédocle, Agrigente, Sicile

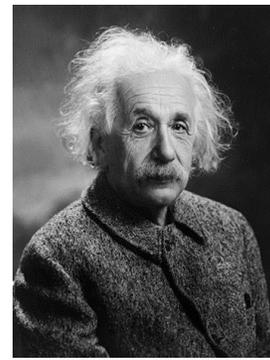
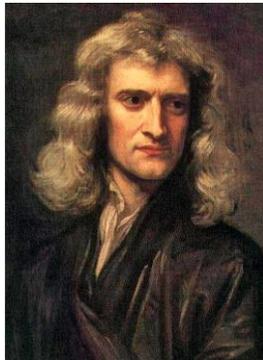
460-370 avant J.C. Démocrite, l'atomisme et le vide

« *pressentaient* » la nature corpusculaire.

1704 Newton: corpuscules très subtils

1900 Planck: le quantum $E = h\nu$, Nobel 1918

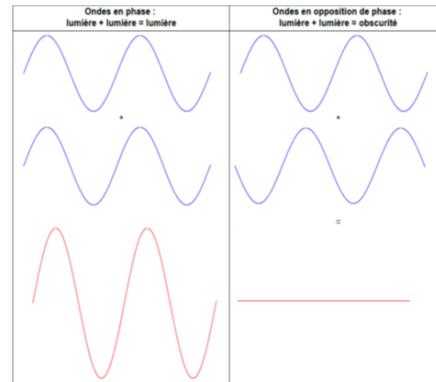
1905 Einstein: le photon, Nobel 1921



Aujourd'hui: Dualité onde-corpuscule

Après des siècles de réflexion, de recherche et de polémique, la science répond depuis 1900 par une formule qui peut paraître ambiguë mais qui, en fait, résume bien encore l'état de nos connaissances :

« la lumière se comporte tantôt comme des ondes, tantôt comme des corpuscules »

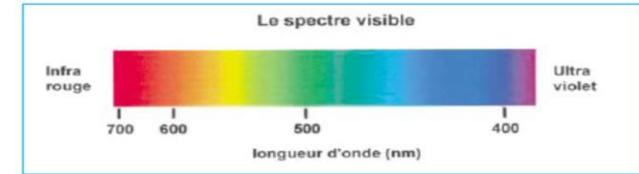
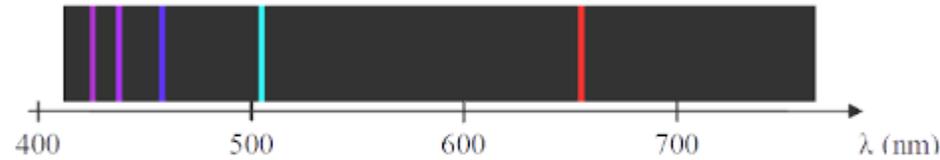


ou

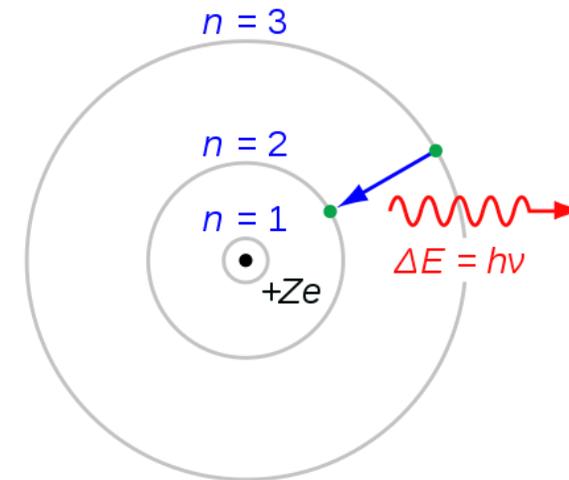
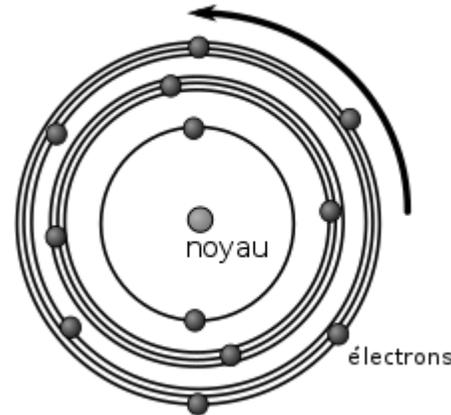


3. Quantification de l'énergie des atomes (1913). Les diagrammes des niveaux d'énergie.

Spectre de
l'Hydrogène



Raies spectrales



Niels Bohr
(1885-1962)

Prix Nobel Physique 1922

Cette théorie présente l'atome comme un noyau autour duquel gravitent des électrons, qui déterminent les propriétés chimiques de l'atome. Les électrons ont la possibilité de passer d'une couche à une autre, émettant un quantum d'énergie, **le photon, introduit en 1905 par Einstein**. C'est à la base de la **mécanique quantique**.

Représentation des transitions électroniques d'absorption et d'émission dans le diagramme des niveaux d'énergie des atomes

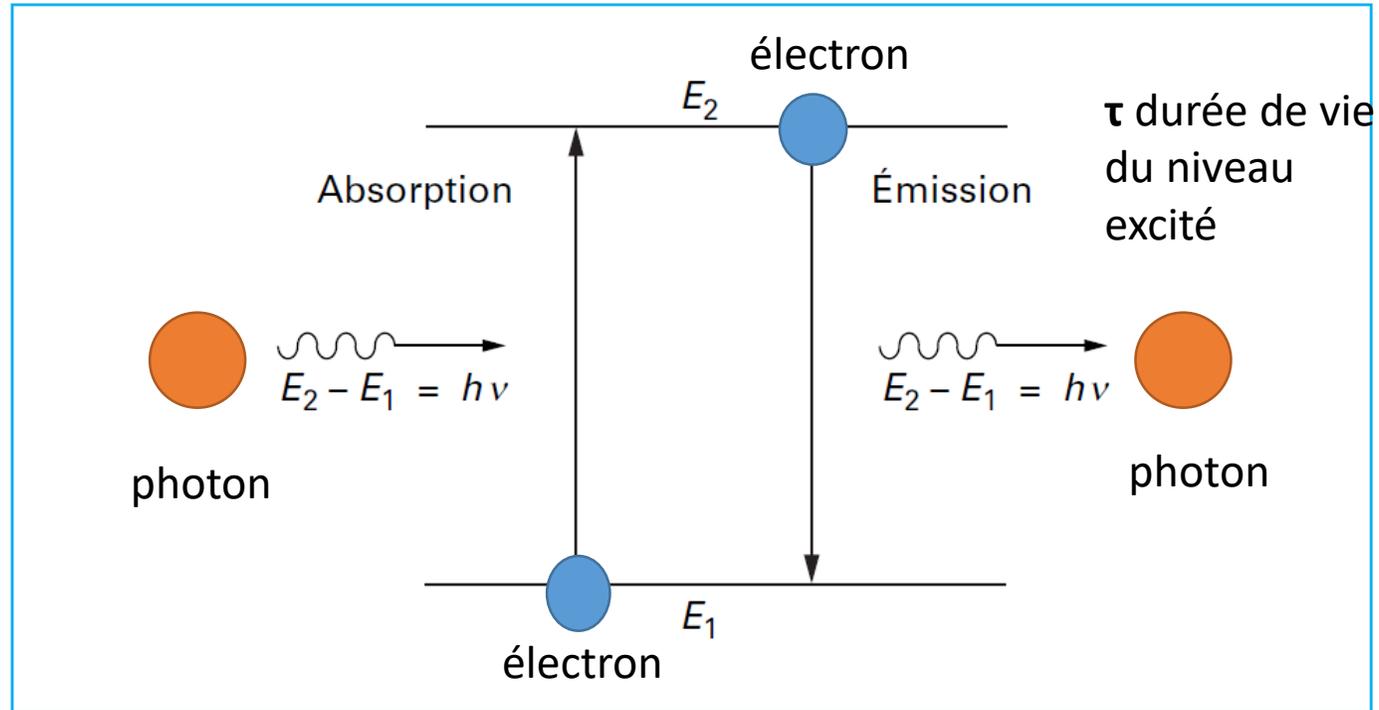
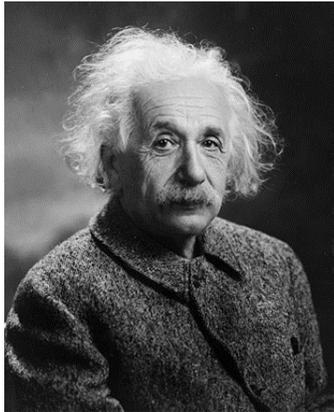


Figure 1 – Modèle idéalisé des transitions entre deux niveaux d'énergie d'un atome : absorption ou émission d'un photon d'énergie $h\nu$

4. L'émission stimulée introduite par A. Einstein à l'origine du laser

« amplification de la lumière par émission stimulée de radiation ».

L'article d'A. Einstein



A. Einstein

Nobel Physique 1921

Physikalische Zeitschrift 18, 121 (1917)
The Quantum Theory of Radiation.

introduit un nouveau type de lumière:

l'émission stimulée (ou induite)

pour rendre compréhensible les phénomènes
d'interaction avec la matière:

*Ce fut un pas décisif mais il a fallu attendre ensuite 43 ans
pour l'observer!*

**Comment se produit l'interaction de la lumière (les photons)
avec la matière (les électrons)?**

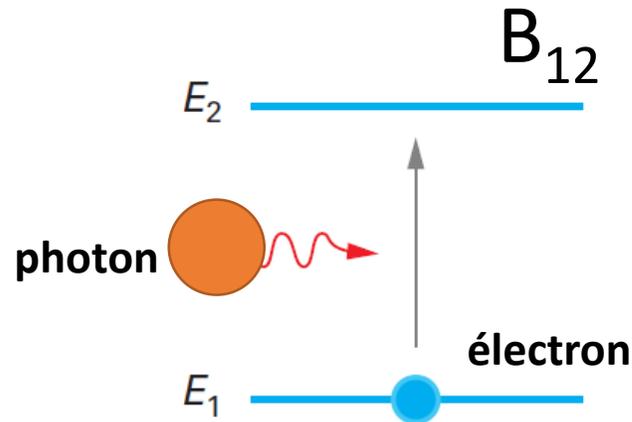
**Un jeu de billard entre
les photons de la lumière excitatrice
et les électrons des atomes de la matière
...avec des nombres (populations) considérables**

***Nombre d'Avogadro $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ par mole*
est défini comme le nombre d'entités élémentaires
(atomes, molécules, ou ions en général) qui se
trouvent dans une mole de matière.**

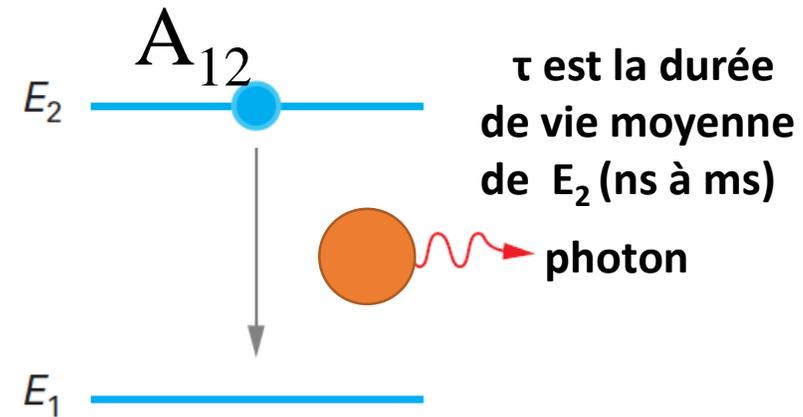
Interaction rayonnement-matière

Émission spontanée

La lumière des sources habituelles d'éclairage est issue essentiellement du processus d'émission spontanée.



(a) excitation d'un atome par absorption d'un photon.



(b) désexcitation d'un atome par émission spontanée d'un photon.

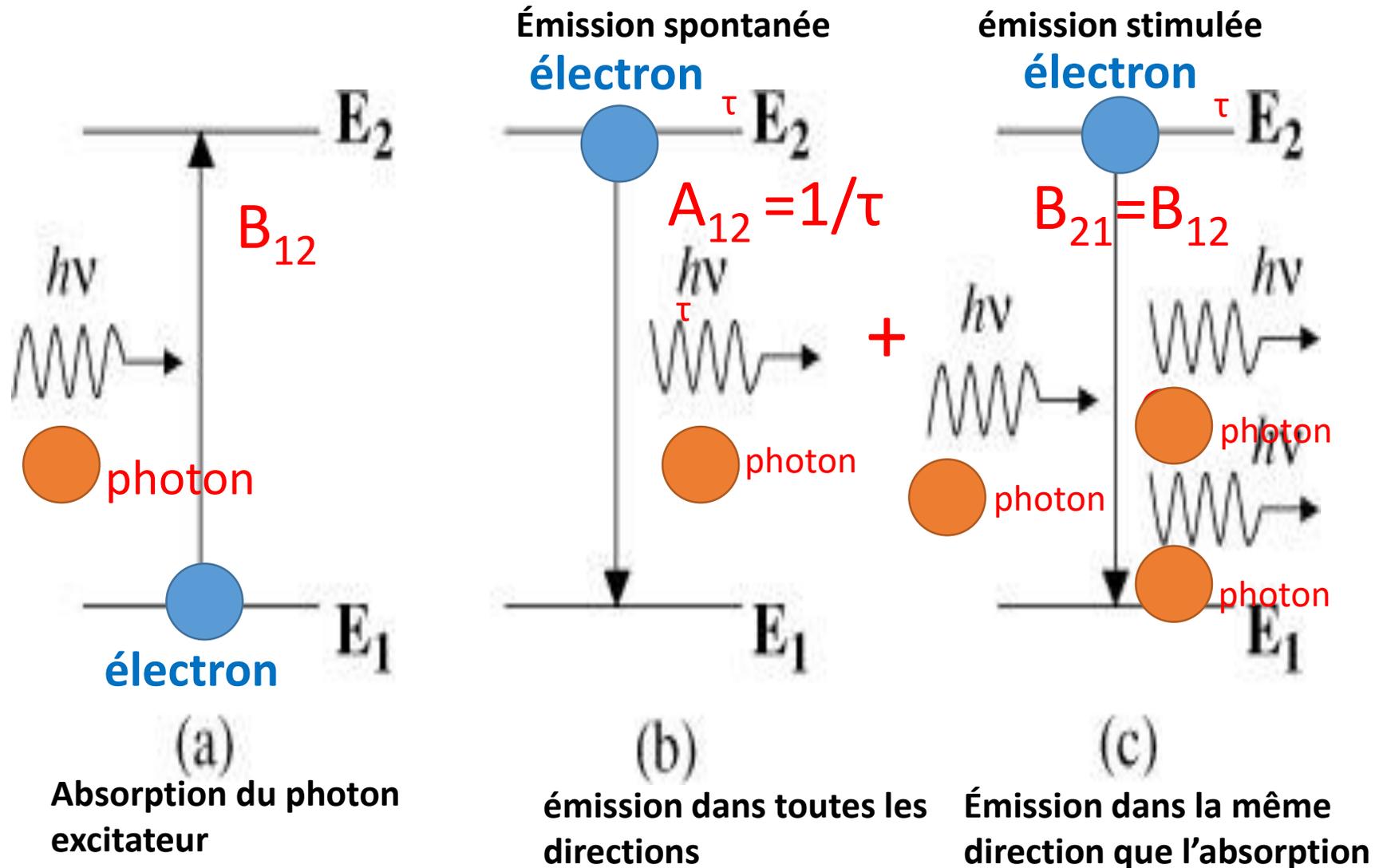
τ est la durée de vie moyenne de E_2 (ns à ms)

C'est la luminescence

Interaction rayonnement-matière

Émission stimulée

En réalité après l'absorption d'un photon, en 1917 Einstein avait démontré qu'il y a 2 mécanismes d'émission: l'émission spontanée et l'émission stimulée



Processus d'absorption, d'émission spontanée et d'émission stimulée

1950 **Pompage optique** des électrons de la matière
par les photons de la source d'excitation

A. Kastler, J. de Physique 11, (1950) 255



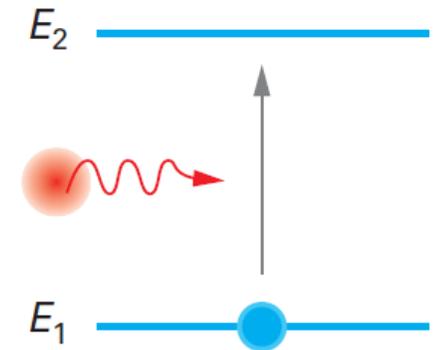
Alfred Kastler,

1902-1984

Faculté des Sciences de Paris

et ENS

Nobel Physique 1966



(a) excitation d'un atome par
absorption d'un photon.

Relation entre les coefficients d'absorption et d'émission (Einstein 1917)

$$\begin{aligned} A_{21} / B_{21} &= 8\pi h \nu^3 / c^3 = \% \nu^3 \quad (\nu \text{ fréquence au cube}) \\ &= \% 1/\lambda^3 \quad (\lambda \text{ longueur d'onde}) \end{aligned}$$

L'émission spontanée (A_{21}) domine largement dans le visible et l'UV. C'est l'inverse dans l'IR, c'est l'émission stimulée (B_{21}) qui prend le dessus.

*D'où la facilité à observer le **MASER***

Microwave amplification by stimulated emission of radiation
*dans l'IR avant le **LASER** dans le visible.*

MASER

Microwave amplification by stimulated emission of radiation.

1953 : 1^{er} amplificateur de microondes à émission stimulée

Townes (Columbia University, USA),

Basov et Prokhorov en URSS. 3 Nobels 1964

C'est l'ancêtre du laser pour les grandes λ dans l'IR.



LASER

1958 : Townes associé à son beau-frère Schawlow (Nobel 1981)

transpose la théorie du MASER au LASER dans le spectre visible.

**LASER: LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED
EMISSION OF RADIATION.**

Mais litige:

Terme inventé en 1957 par le physicien américain Gordon Gould.

En effet, après trente ans de litige, il a été reconnu en 1987 que Gordon Gould avait défini les principes essentiels de réalisation des lasers dans un travail non publié, ni breveté, mais enregistré.

Observation de MASER galactique

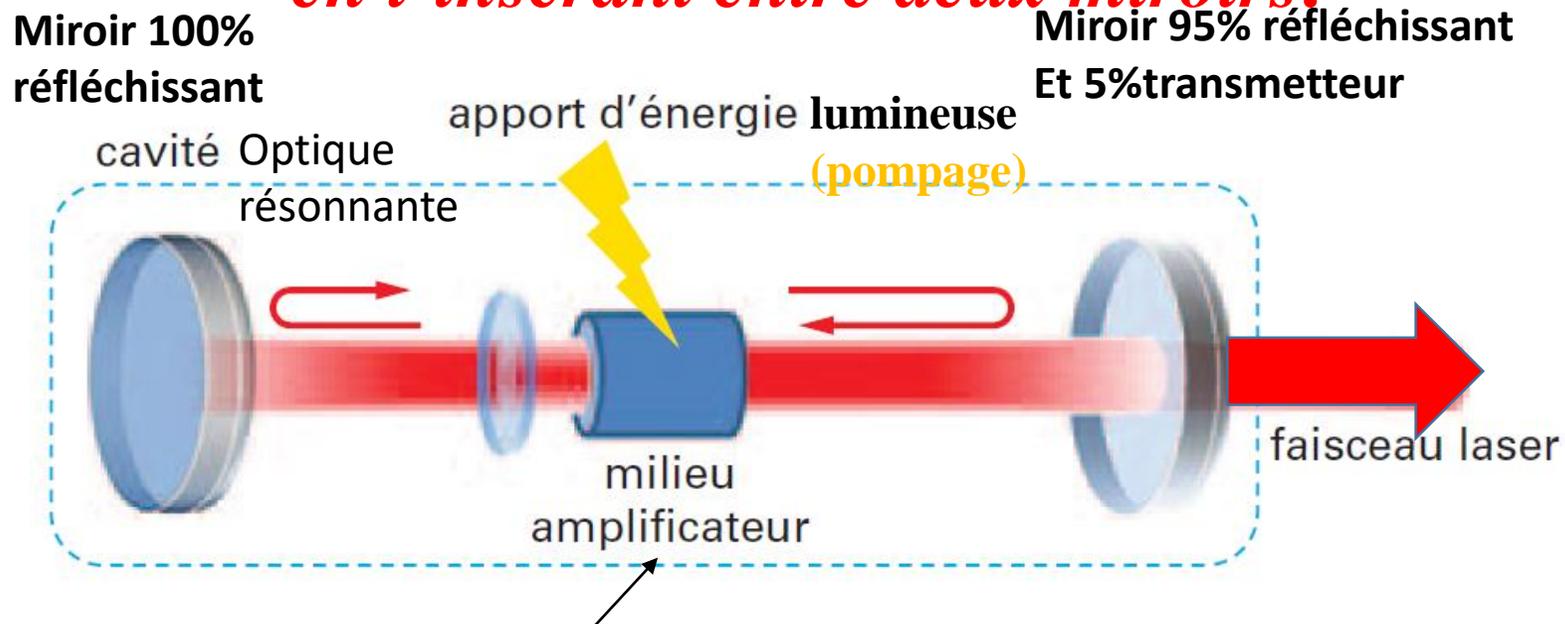
L'existence de MASER (hydroxyle, eau et formaldéhyde) est observée par les astronomes dans l'univers galactique



Image WISE de IC 443, un rémanent de supernova avec une émission **MASER**.

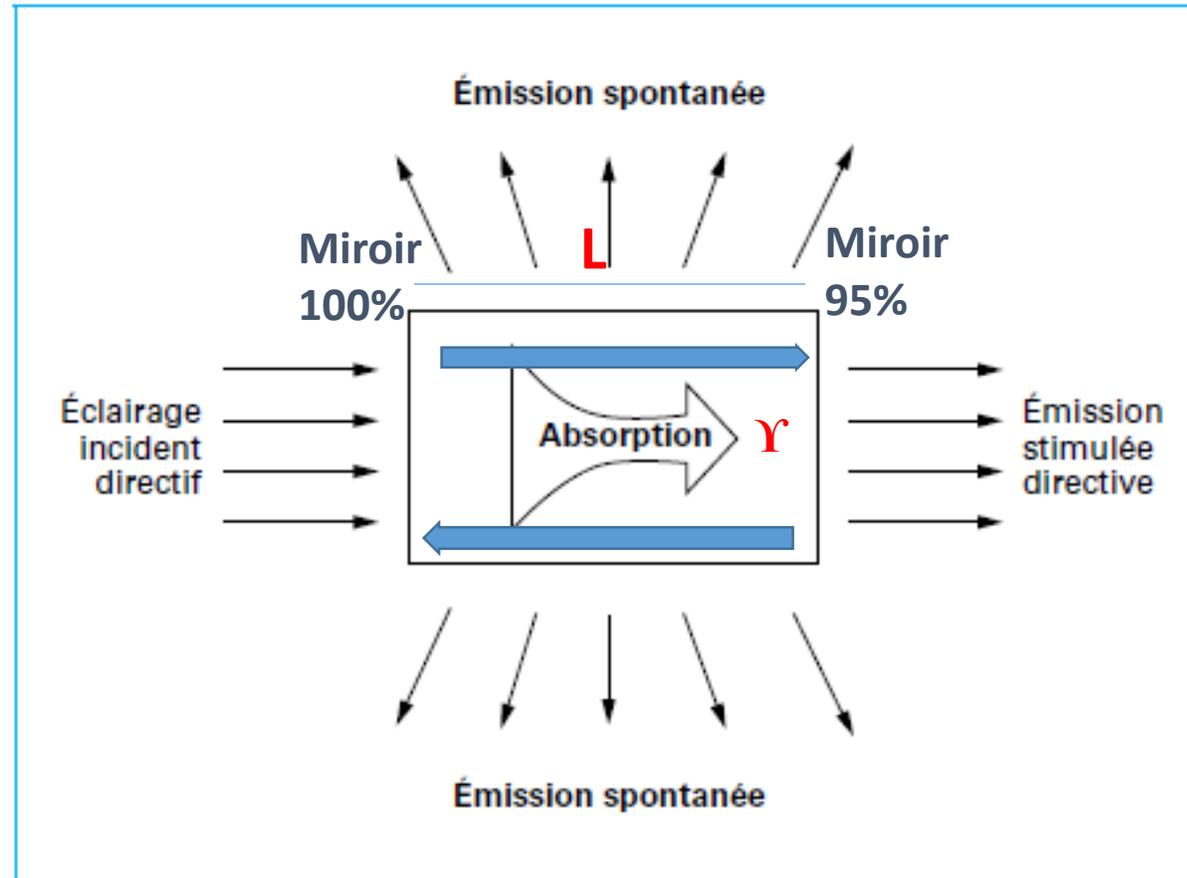
Revenons au laboratoire!

Le cristal luminescent transformé en cavité optique résonnante est un transformateur d'énergie lumineuse spontanée en stimulée. On renforce le parcours des rayons dans le cristal amplificateur en l'insérant entre deux miroirs.



**Cristal inorganique dopé par un ion luminescent
donc émetteur de lumière**

Cavité résonnante qui renforce le parcours des rayons stimulés dans le cristal amplificateur par des allers-retours entre les miroirs



On définit le Coefficient d'amplification $\gamma \% L$

Enfin: observation du 1^{er} laser le 16 mai 1960 par Théodore Maiman (Hughes lab. CA)

Rubis: Al_2O_3 dopé par les ions Cr^{3+}

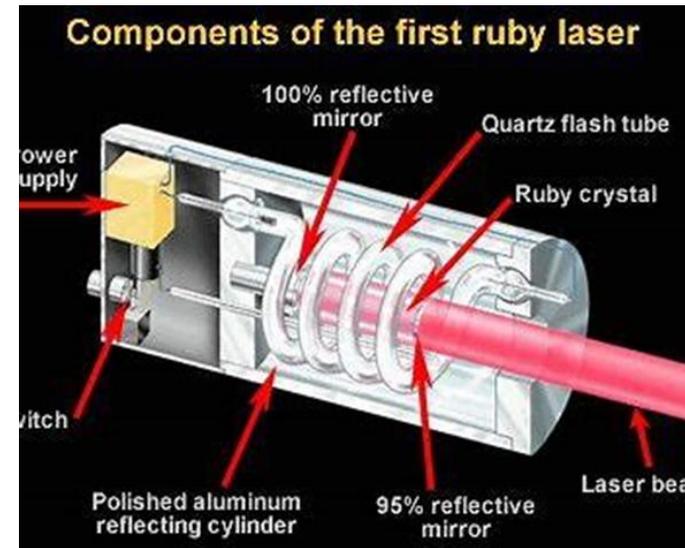
T. Maiman, Nature 187, 493 (1960)



Théodore Maiman
1927-2007

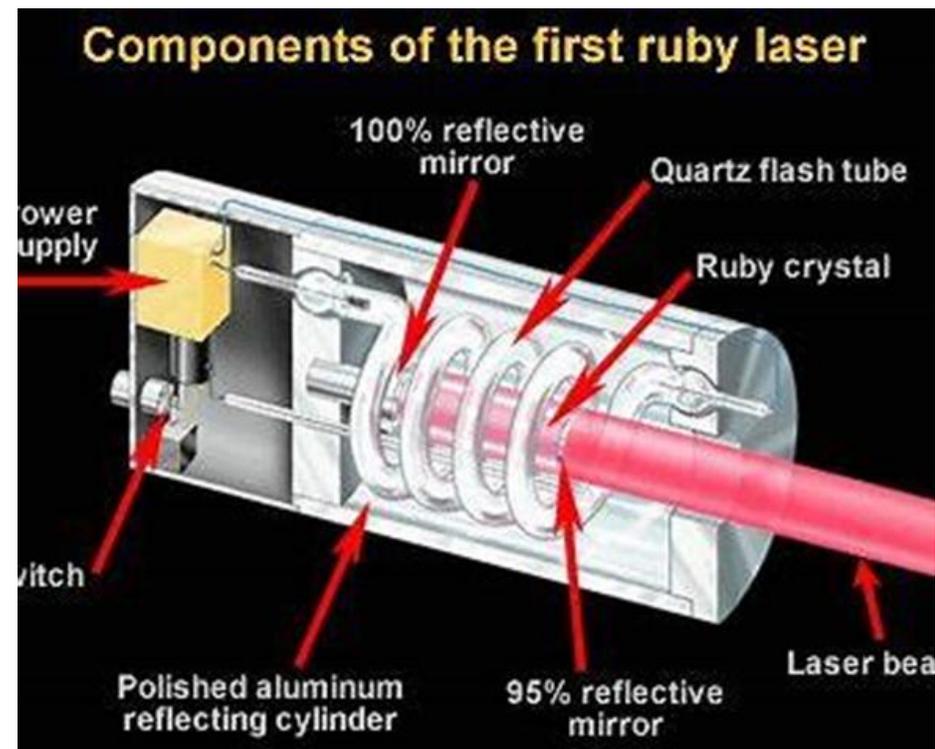
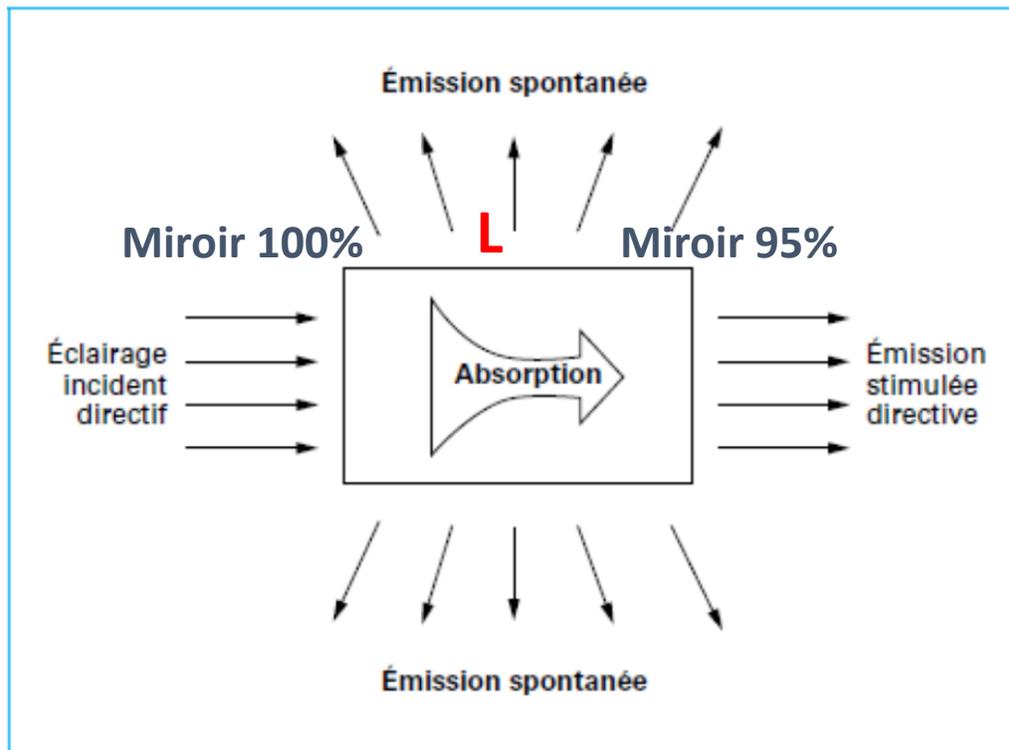


cristal de rubis



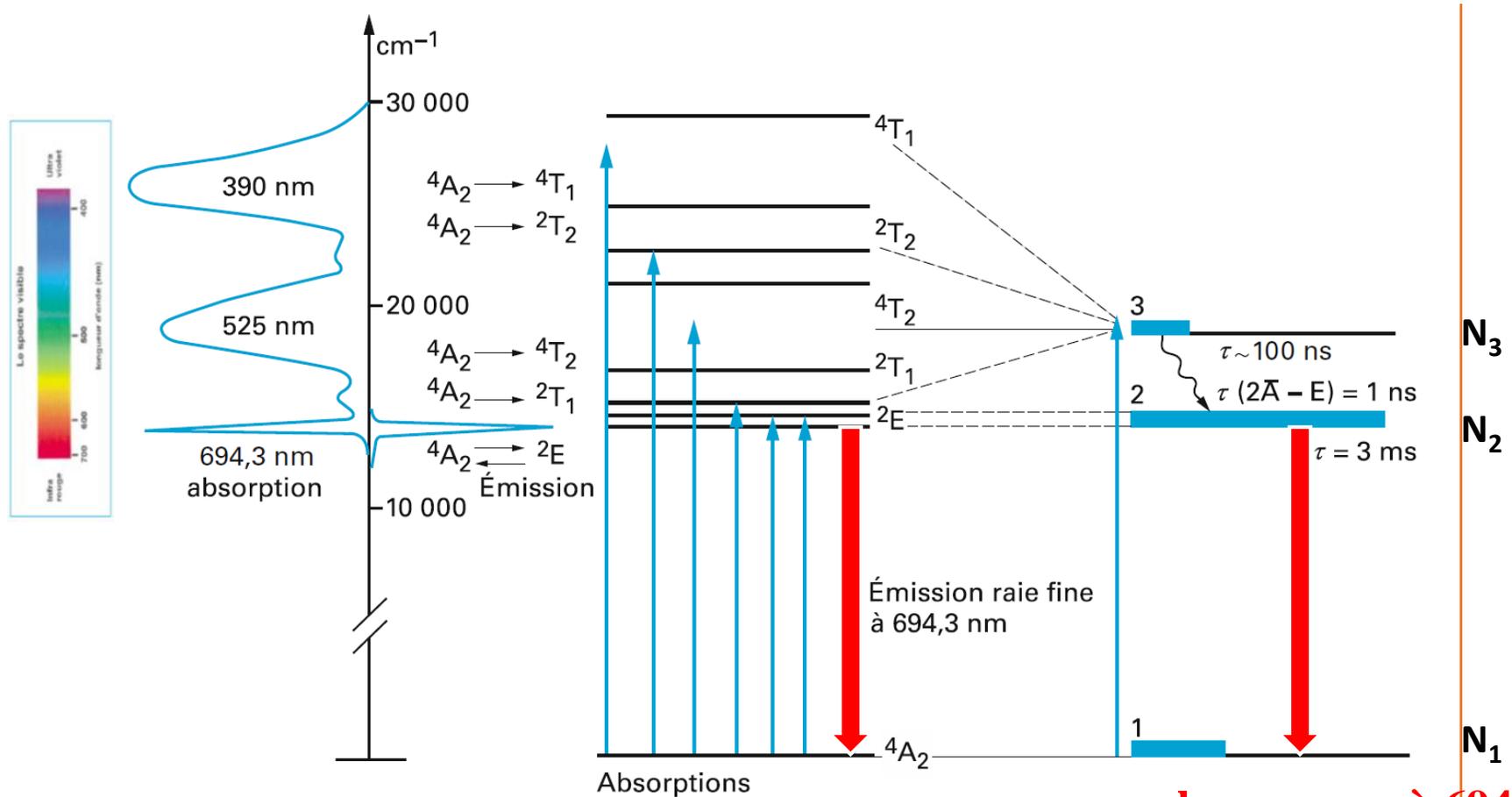
Faisceau laser

*On attendait en fait le laser He-Ne à gaz émettant à 632,8 nm dans le rouge aussi.
Il a été fabriqué plus tard en décembre 1960 par A. Javan, W. Bennett, D. Herriot.*



Les ions actifs de Cr^{3+} dans Al_2O_3

Diagramme des niveaux d'énergie (Bohr)



laser rouge à 694.3 nm

**Γ coefficient d'amplification:
($N_2 - N_1$) L**

5. Amplification par inversion de population

L'Inversion de population entre les niveaux d'énergie des ions actifs permet d'amplifier l'émission stimulée donc l'émission laser.

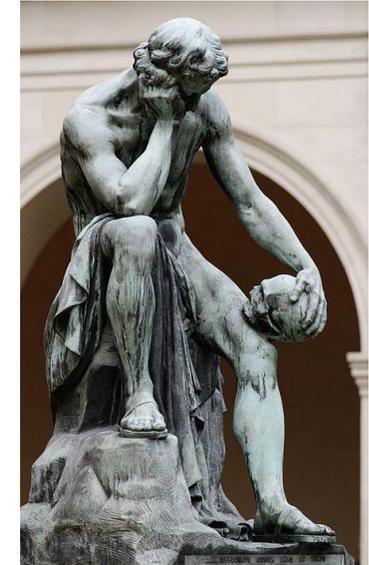
Nécessité de connaître la **statistique de Boltzmann**

Statistique de Boltzmann



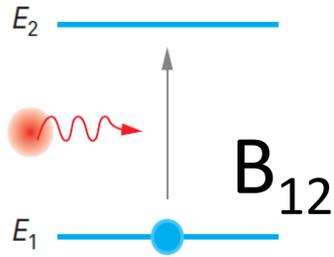
Ludwig Boltzmann
1844-1906

Boltzmann est considéré comme le père de la physique statistique et un fervent défenseur de l'existence des atomes. Validant l'hypothèse de l'atomiste grecque **Démocrite** selon laquelle « la matière peut être considérée comme un ensemble d'entités indivisibles »,

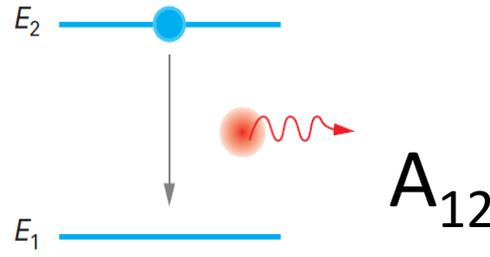


*Démocrite (460 – 370 BC)
méditant sur le siège de l'âme
par Léon-Alexandre Delhomme dans
le jardin du musée des beaux-arts de Lyon*

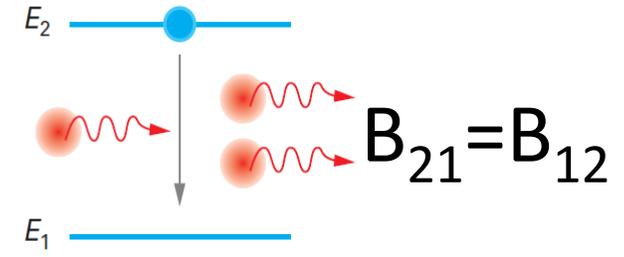
Amplification de l'émission stimulée par l'inversion de population



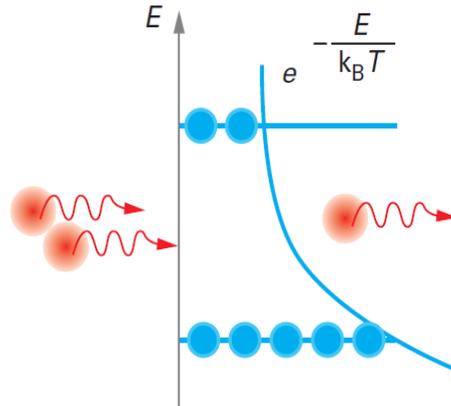
(a) excitation d'un atome par absorption d'un photon.



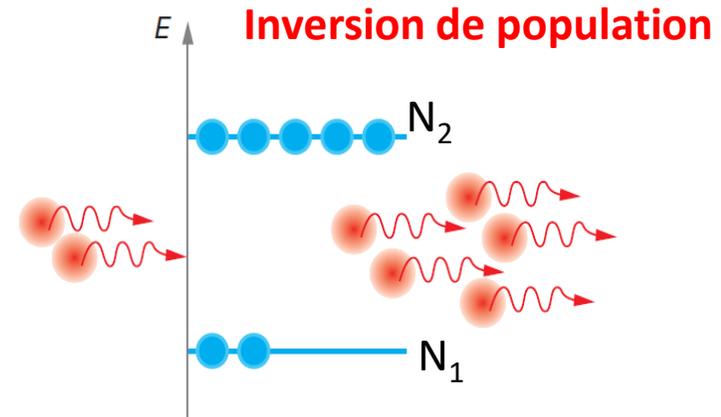
(b) désexcitation d'un atome par émission spontanée d'un photon.



(c) désexcitation d'un atome par émission induite par le rayonnement, ou émission stimulée.



(d) une population à l'équilibre thermodynamique présente un niveau fondamental plus peuplé que le niveau excité, le milieu est alors absorbant.



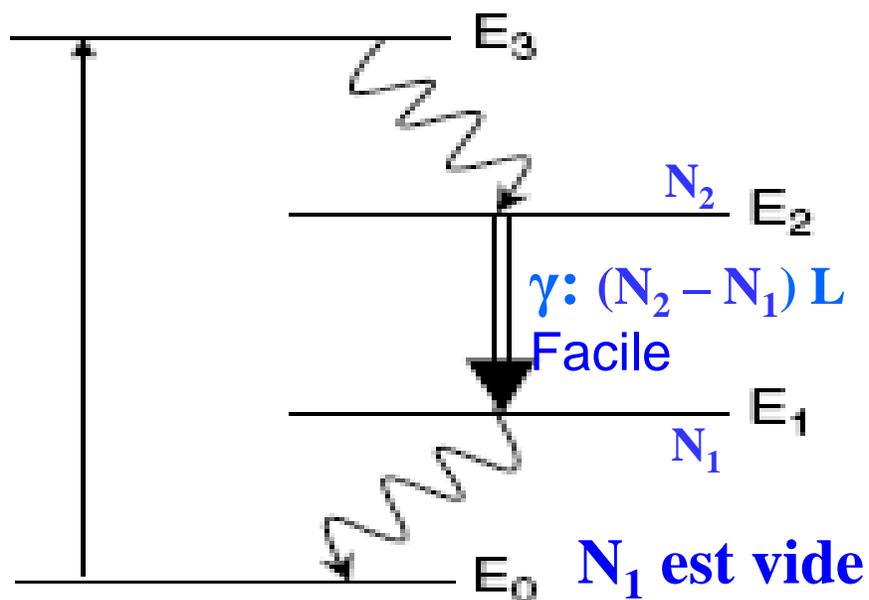
(e) lorsque le niveau excité est plus peuplé (inversion de population), la population d'atomes se comporte comme un amplificateur vis-à-vis du rayonnement incident, grâce au phénomène d'émission stimulée.

$$N_2/N_1 = \exp - (E_2 - E_1)/kT$$

amplification γ : % $(N_2 - N_1) L$

Amplification par inversion de population

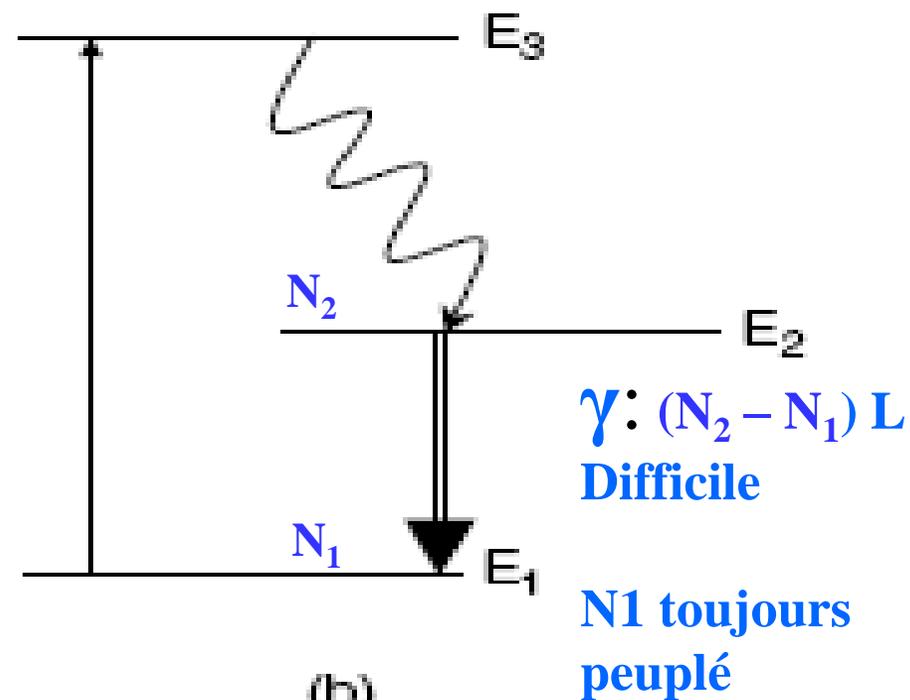
a) système à 4 niveaux



(a)

Centre laser Nd^{3+} dans le grenat YAG
1964 Par Geusic aux USA
Idéal

(b) système à 3 niveaux



(b)

Centre laser Cr^{3+} dans le rubis
1960 Très difficile (pas de chance pour commencer!)

6. Les types de cristaux

Gros avantage des solides:

**populations des atomes mis en jeux plus élevées
qu'avec les gaz.**

C'est la matière condensée.

Rubis, un bijou certes mais ...pour la science
c'est l'une des beautés définies au début



Al_2O_3 dopé par Cr^{3+}

La plupart des cristaux utilisés pour leurs émissions laser sont des bijoux!

Rubis, saphirs, grenats, alexandrites, émeraudes, spinelles,...

Sélection des réseaux cristallins

Sélection de matériaux possédant la capacité à extraire la chaleur à cause de la source d'excitation

Valeurs de conductivités thermiques en $W m K^{-1}$

Al_2O_3	28
MgF_2	21
$ZnSe$	18
$Y_3Al_5O_{12}$	10.8
Lu_2O_3	13
Verre	0.8



Ce fut donc le 1^{er} laser à solide.
Avant 1960 on savait tirer des rubis artificiels d'où le succès du rubis.

La conductivité thermique d'un matériau désigne son pouvoir à laisser passer la chaleur ou, au contraire, à l'isoler

7. Les ions dopants

Des **dopants** luminescents (**impuretés** ou **défauts**) comme:

- les ions de transition 3d
- les ions terres rares 4f

Ils sont insérés en **substitution** des ions des réseaux cristallins
Intentionnellement dopés dans les réseaux de **cristaux isolants**,
fondant à très haute température donc résistants,
de préférence de même rayon d'ion et de même charge que l'ion
substitué.

**Relation entre « Luminescence cristalline»
et « dopants », « défauts », « impuretés » des cristaux**

« Les gens sont comme les cristaux.

Ce sont leurs défauts qui les rendent intéressants »

Sir Charles Frank, physicien britannique

La classification périodique des éléments chimiques de Mendeleïev répond à la recherche des ions actifs

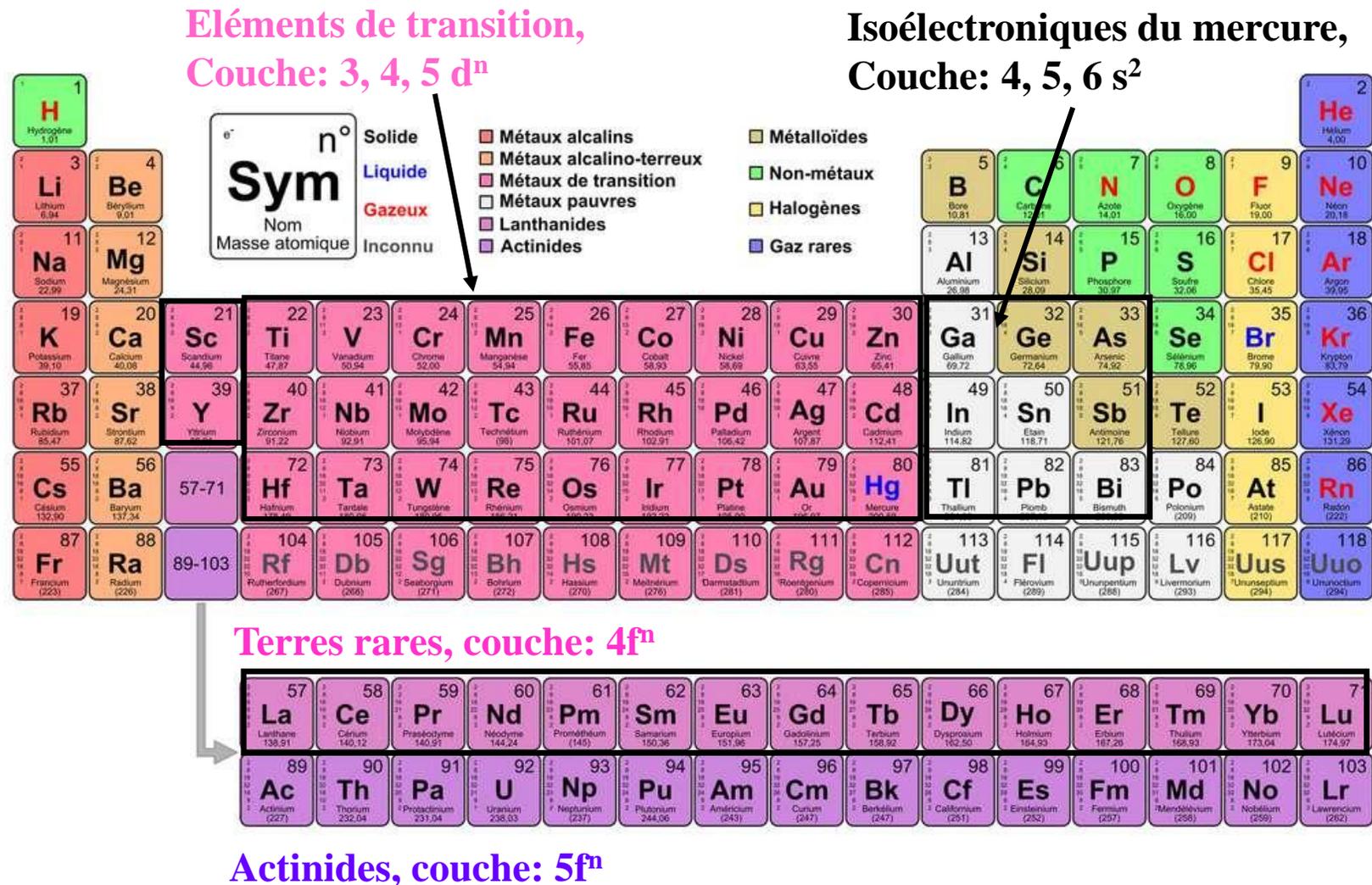


1834-1907



**Université de Saint-Petersbourg
le 17 février 1869**

Classification périodique des éléments chimiques de Mendeleïev



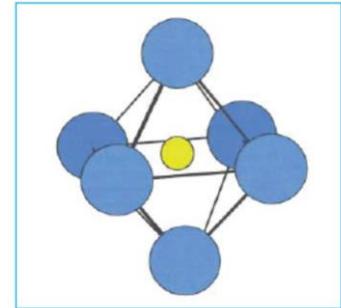
La configuration électronique d'un atome est la répartition des électrons sur les couches de différents niveaux d'énergie.

7.1. Les ions de transition de configuration électronique $3d^n$

Cr^{2+} , Cr^{3+} , Ti^{3+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+}

Rubis Al_2O_3 dopé par Cr^{3+} , émet une raie rouge.

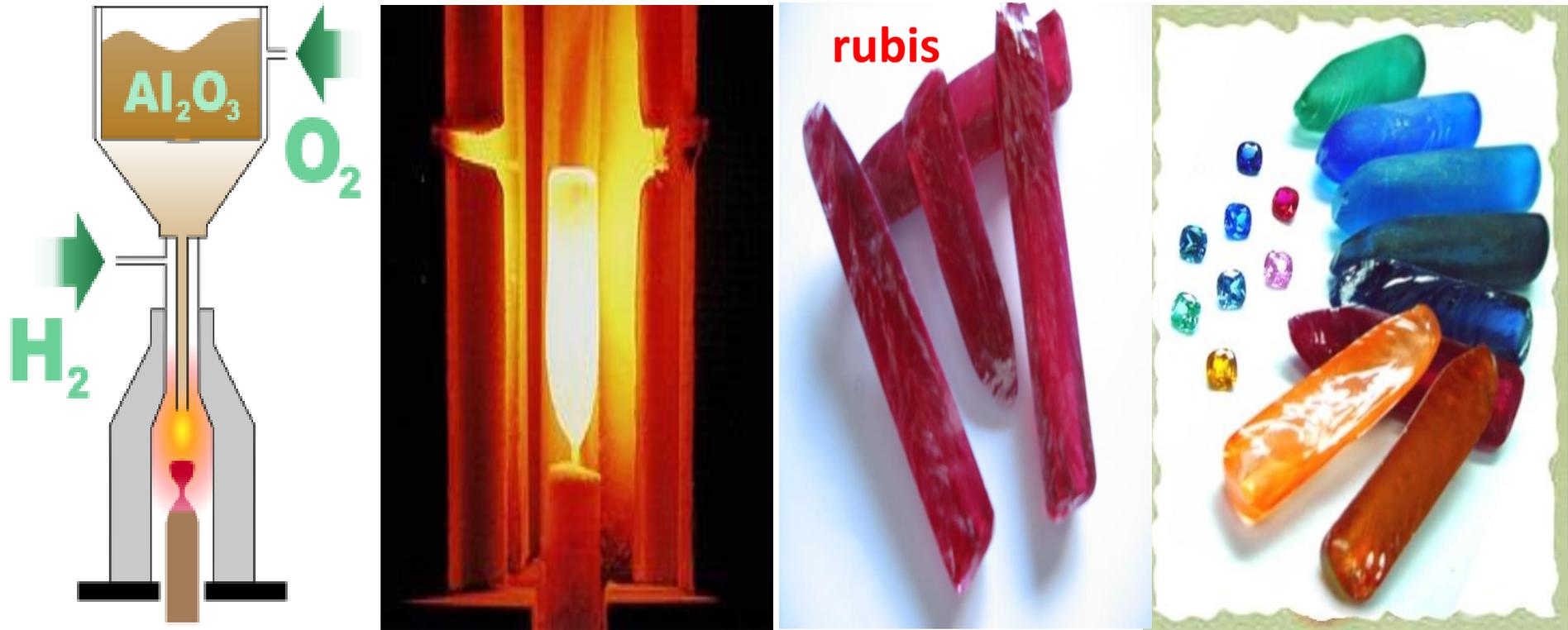
Saphir Al_2O_3 dopé par Ti^{3+} , émet une bande rouge.



Les ions Cr^{3+} ou les ions Ti^{3+} se substituent aux ions Al^{3+} de symétrie **octaédrique dans le réseau cristallin**

Production industrielle de rubis, saphirs, spinelles par la méthode de Verneuil.

« Rubis Synthétique des Alpes » (RSA), Jarrie (38)



Al_2O_3 très fin et à l'état pur est fondu à l'aide d'un chalumeau oxyhydrique (oxygène + hydrogène) à une température de 2050°C . Cette matière tombe goutte à goutte sur un germe cristallin qui grandit continuellement comme une stalagmite et fait ainsi naître un cristal.

Cristaux d'alexandrite BeAl_2O_4 dopé par Cr^{3+}



Saphir Al_2O_3 dopé par Ti^{3+}

Coopération LPCML-iLM UCB Lyon1-University of Paris 11- RSA company

Pour Laser petawatt (10^{15} W)



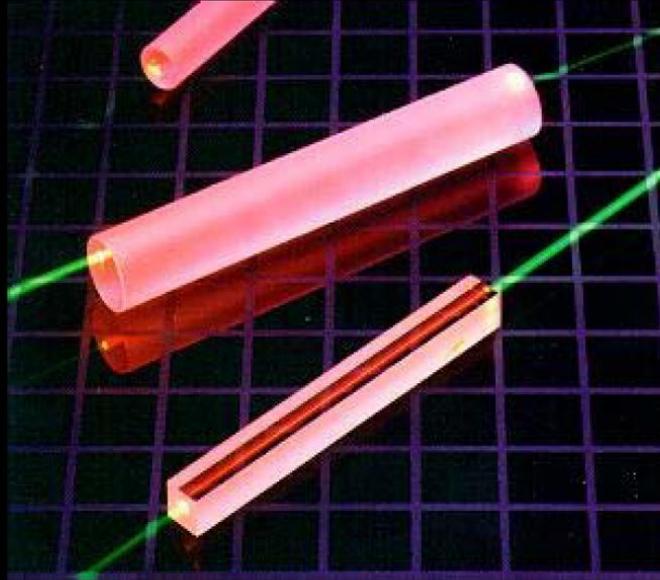
iLM
INSTITUT LUMIÈRE MATIÈRE



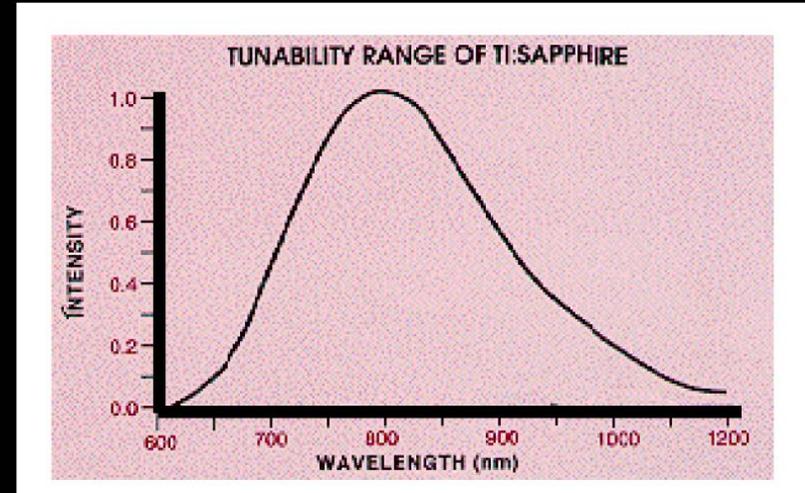
Cristal tiré par K.Lebbou (iLM)

Saphir Al_2O_3 dopé par Ti^{3+}

- Principal laser solide accordable



$\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$



Accordabilité utile pour la production de laser à impulsions de durée la femtoseconde $1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$.

Bande d'émission large liée à: $\Delta\nu \cdot \Delta t \geq cte$

Projets récents

Lasers de recherche femtoseconde de classe pétawatt (PW)

- Le laser BELLA, réalisé par le groupe Thales (France), est installé au Laboratoire national Lawrence-Berkeley (Californie). Capable de délivrer une puissance d'environ un pétawatt ($\sim 1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$),
- le laser APOLLON installé au CEA Saclay de 5 PW installé en 2018
- Le laser ELI-NP (Extreme Light Infrastructure for Nuclear Physics) construit à Bucharest par Thalès a atteint la valeur de 10 PW le 7 mars 2019.
- Il est prévu quatre installations en Europe Centrale (Roumanie, Hongrie, Rep Tchèque) qui devraient être les plus puissantes au monde.

7.2. Les ions de terres rares de configuration électronique $4f^n$

Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+}

Les cristaux les plus utilisés:

Grenat $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ou $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ (YAG)

dopé par Nd^{3+} ou Yb^{3+}

Ils se substituent aux ions Y^{3+} du réseau cristallin en symétrie dodécaédrique.

(Rayons d'ions: $\text{Y}^{3+}=0.900 \text{ \AA}$ $\text{Nd}^{3+}=0,983 \text{ \AA}$)

De même dans les verres (silicates, phosphates) les terres rares trouvent une substitution facile.

D'où le développement des fibres optiques vitreuses dopées terres rares (Er^{3+} , Tm^{3+}) pour les réseaux internet.

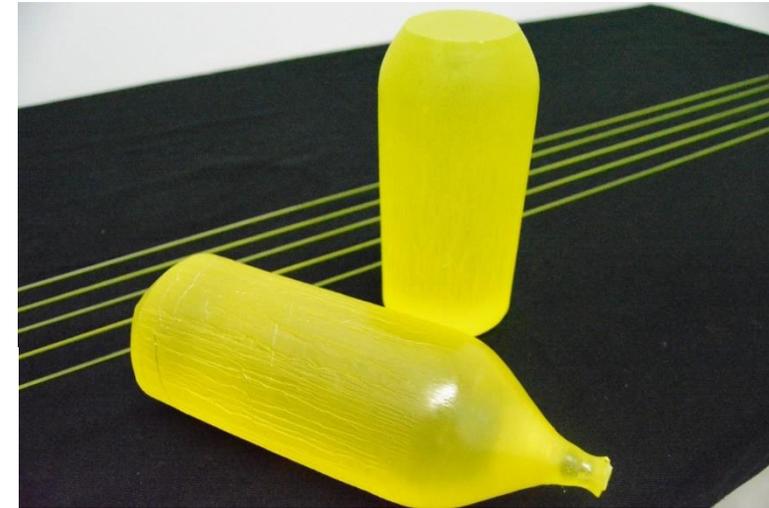
Les ions de terres rares de configuration électronique $4f^n$

Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+}



Cristal de Grenat
 $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)
dopé par l'ion Nd^{3+}

$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG): Yb^{3+}
(K. Lebbou, iLM UCBLyon1)



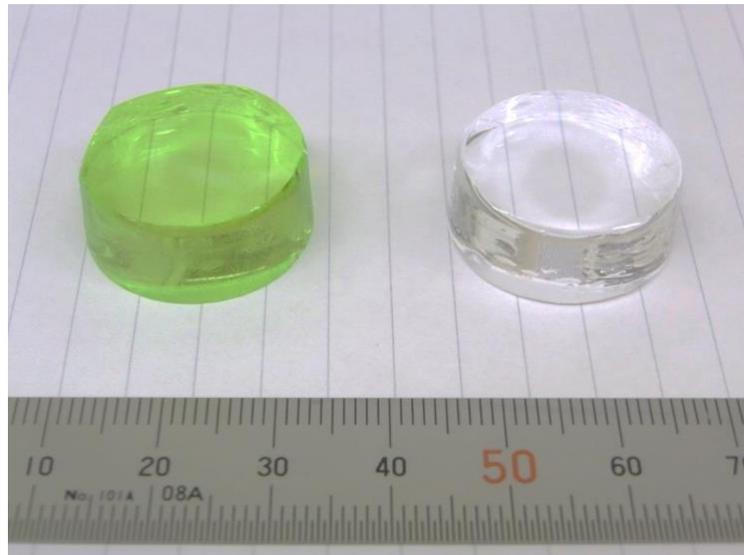
Cristal de Grenat
 $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)
dopé par l'ion Ce^{3+}
(tiré par K. Lebbou, iLM)



Verres dopés par des ions terres rares
20 Al(PO₃)₃+80LiF dopés par
Pr³⁺ Ce³⁺ Nd³⁺ Er³⁺
Coopération avec l'ILE à Osaka (Japon)

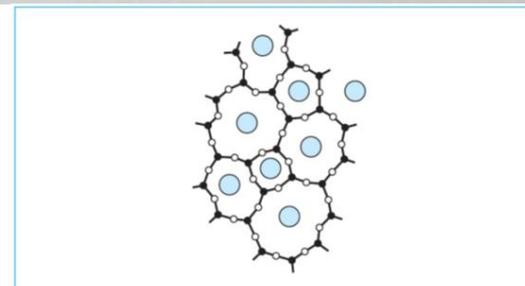
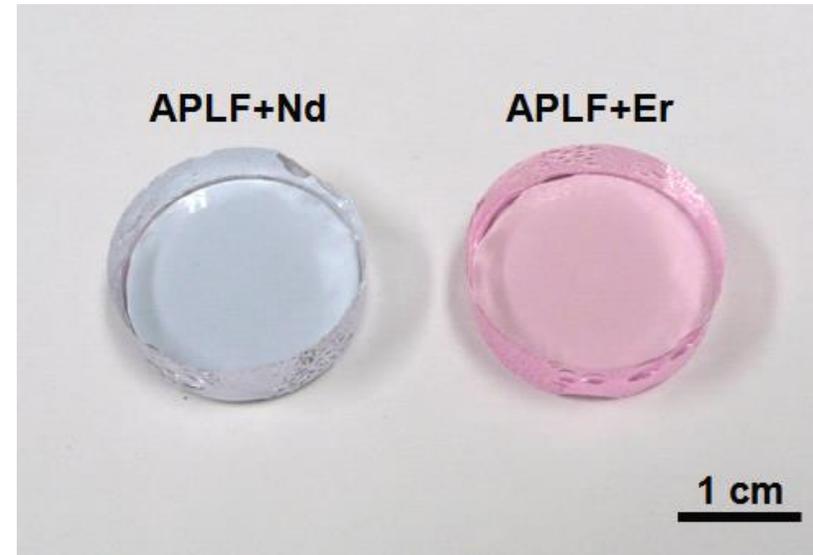
APLF:Pr

APLF:Ce



APLF:Nd

APLF:Er

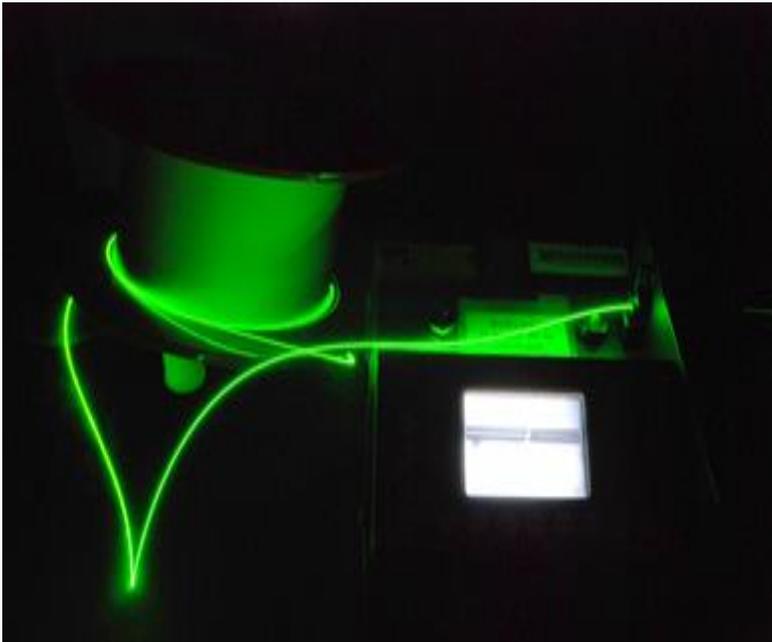


Les ions de terres rares de configuration électronique $4f^n$

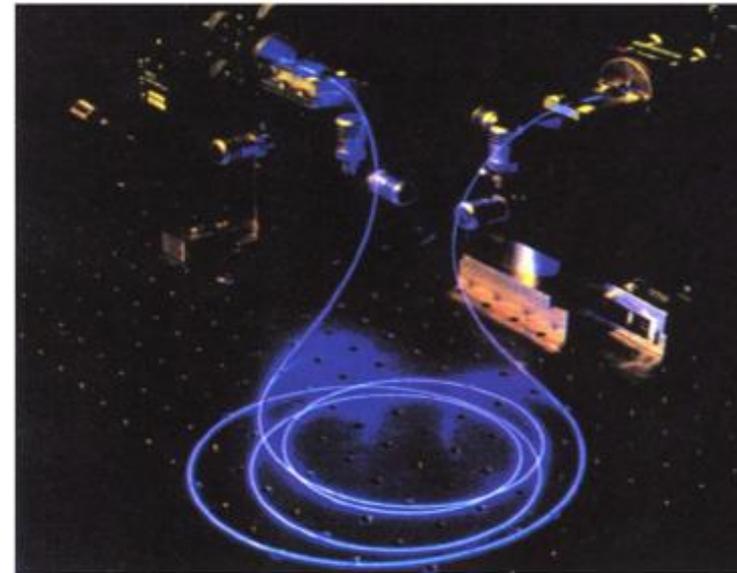
dans les fibres de verre de silice

Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+}

Fibre laser de silice vitreuse dopée par la terre rare
thulium Tm^{3+}

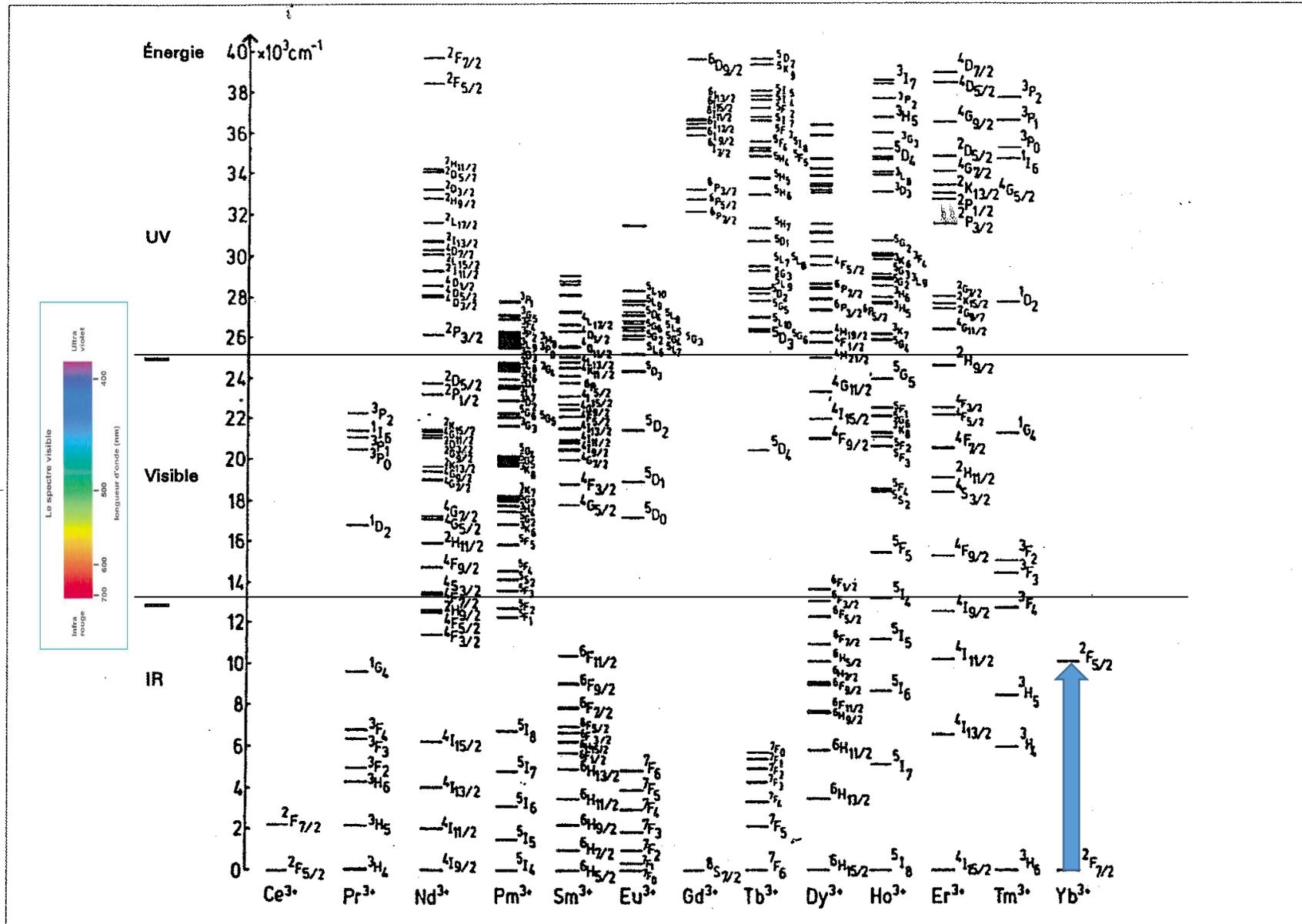


Fibre de silice dopée
par la terre rare Er^{3+}



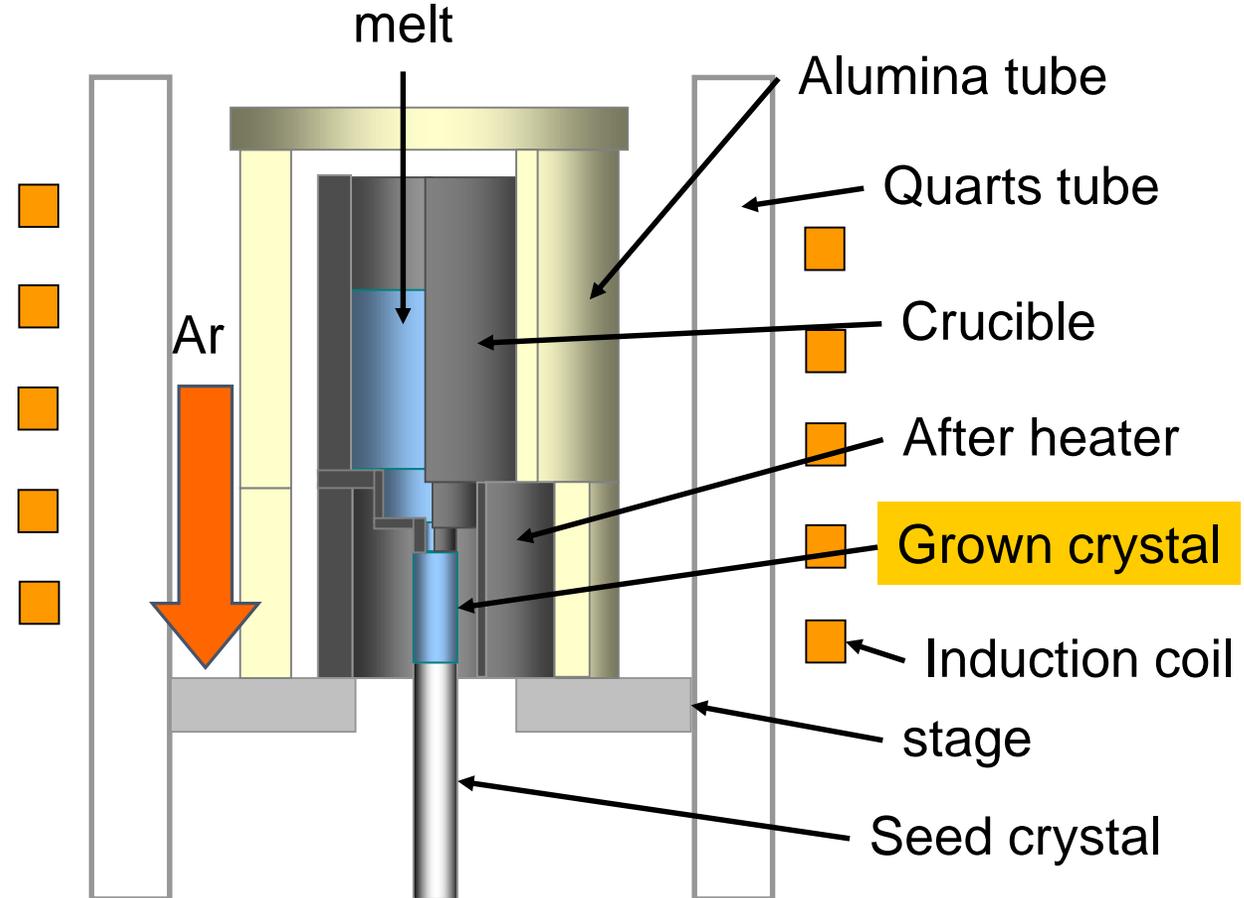
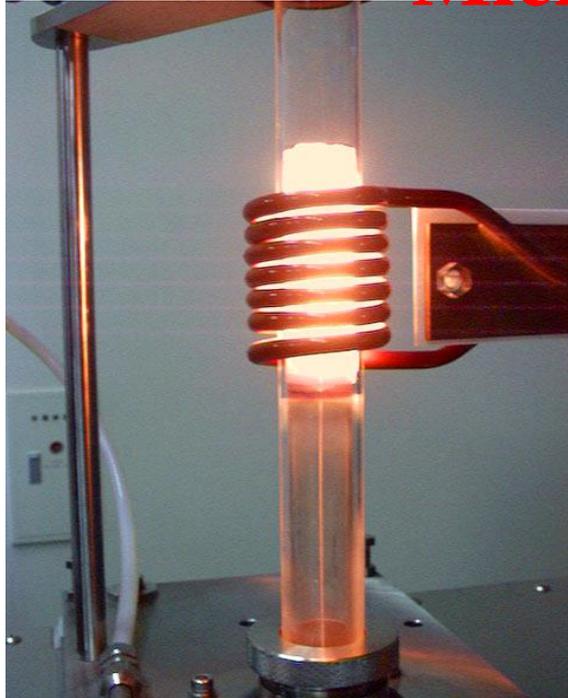
Fibre de silice dopée
par la terre rare Tm^{3+}

Les niveaux d'énergie des ions terres rares 4f



Intérêt apporté par les lasers: Leur finesse spectrale permet d'exciter chaque niveau

Technique de tirage de fibres cristallines par Micro-Pulling-Down Technique



Quick Materials screening ~2-5h/1crystal

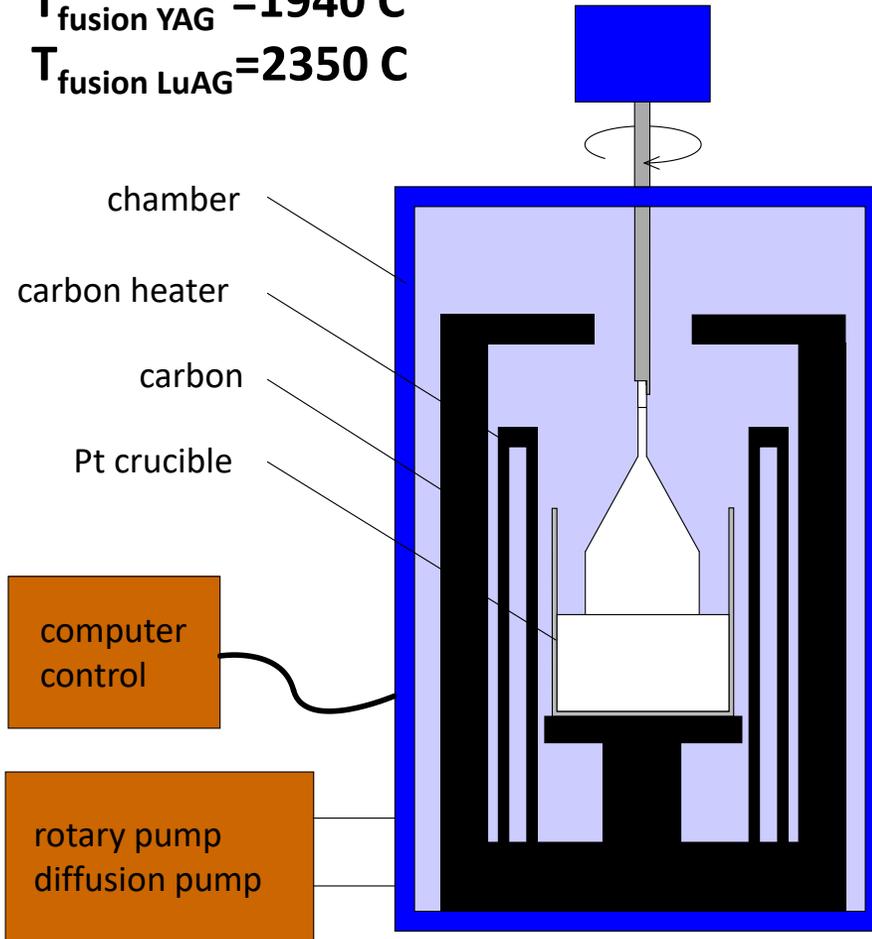
$k_{eff} \sim 1$ (homogeneous distribution of dopant)

Coopération avec l'Université Tohoku à Sendai, Japon depuis 1987

Technique de Czochralski

$T_{\text{fusion YAG}} = 1940 \text{ C}$

$T_{\text{fusion LuAG}} = 2350 \text{ C}$



atmosphere	: CF_4
vacuum	: $\sim 10^{-3} \text{ Pa}$
pulling rate	: $0.8 \sim 1.0 \text{ mm/h}$
rotation rate	: $8 \sim 15 \text{ rpm}$
body diameter	: $1 \sim 4 \text{ inch (X } 2.54\text{cm)}$

1week-10days/1crystal

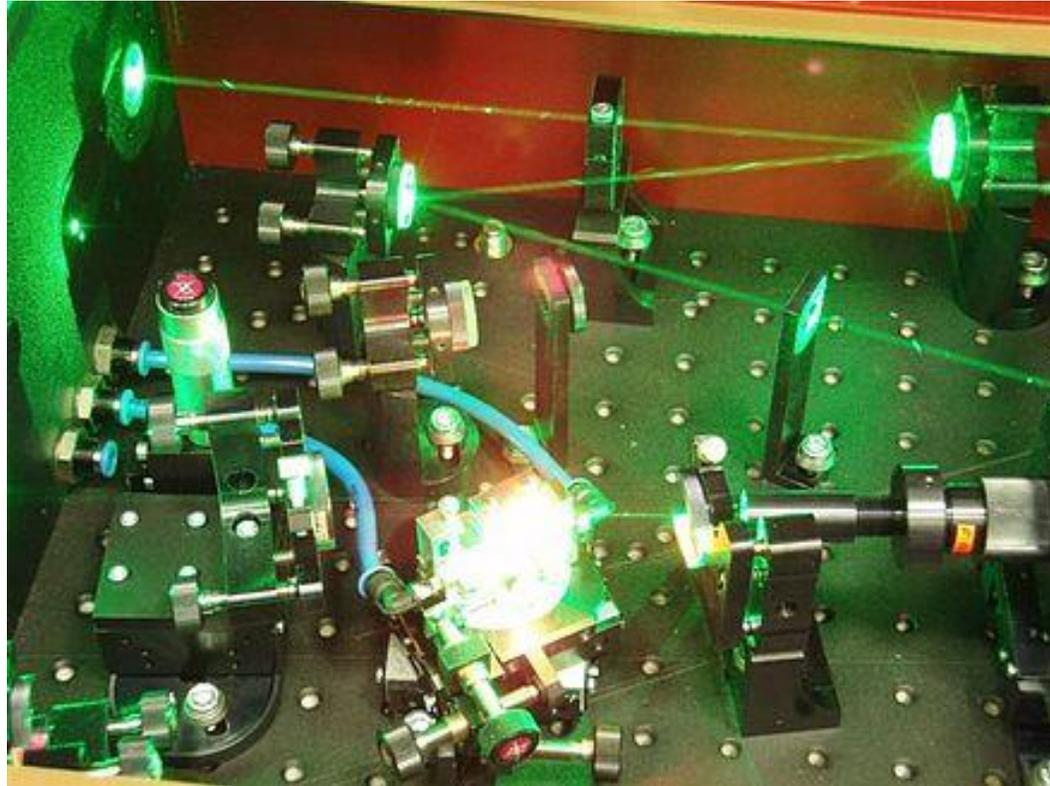
Grenats $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG), $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG), Saphir Al_2O_3 dopé par Ti^{3+} , CaF_2 , ...

Le rêve est plus fort que l'expérience.

Gaston Bachelard

8. Quelques exemples d'innovations marquantes en cours de développement

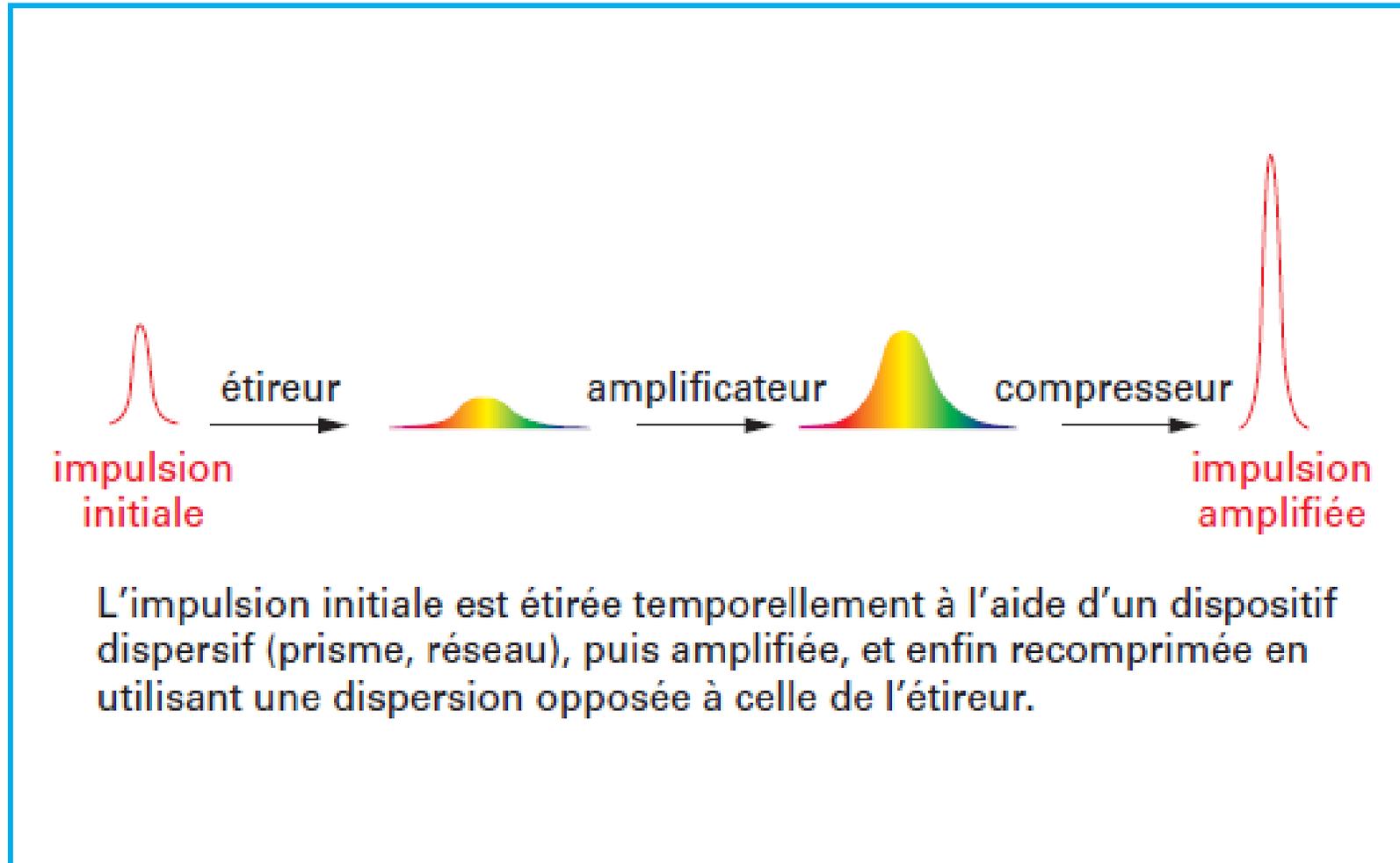
1. Laser femtoseconde ($1\text{f}= 10^{-15}\text{ s}$) utilisant des cristaux amplificateurs de Ti^{3+} : Saphir sont courants



$$\Delta\nu \cdot \Delta t = \text{cte}$$

Pour l'étude des cinétiques ultra-rapides. Actuellement, recherche de sources encore plus rapides, l'attoseconde 10^{-18} s .

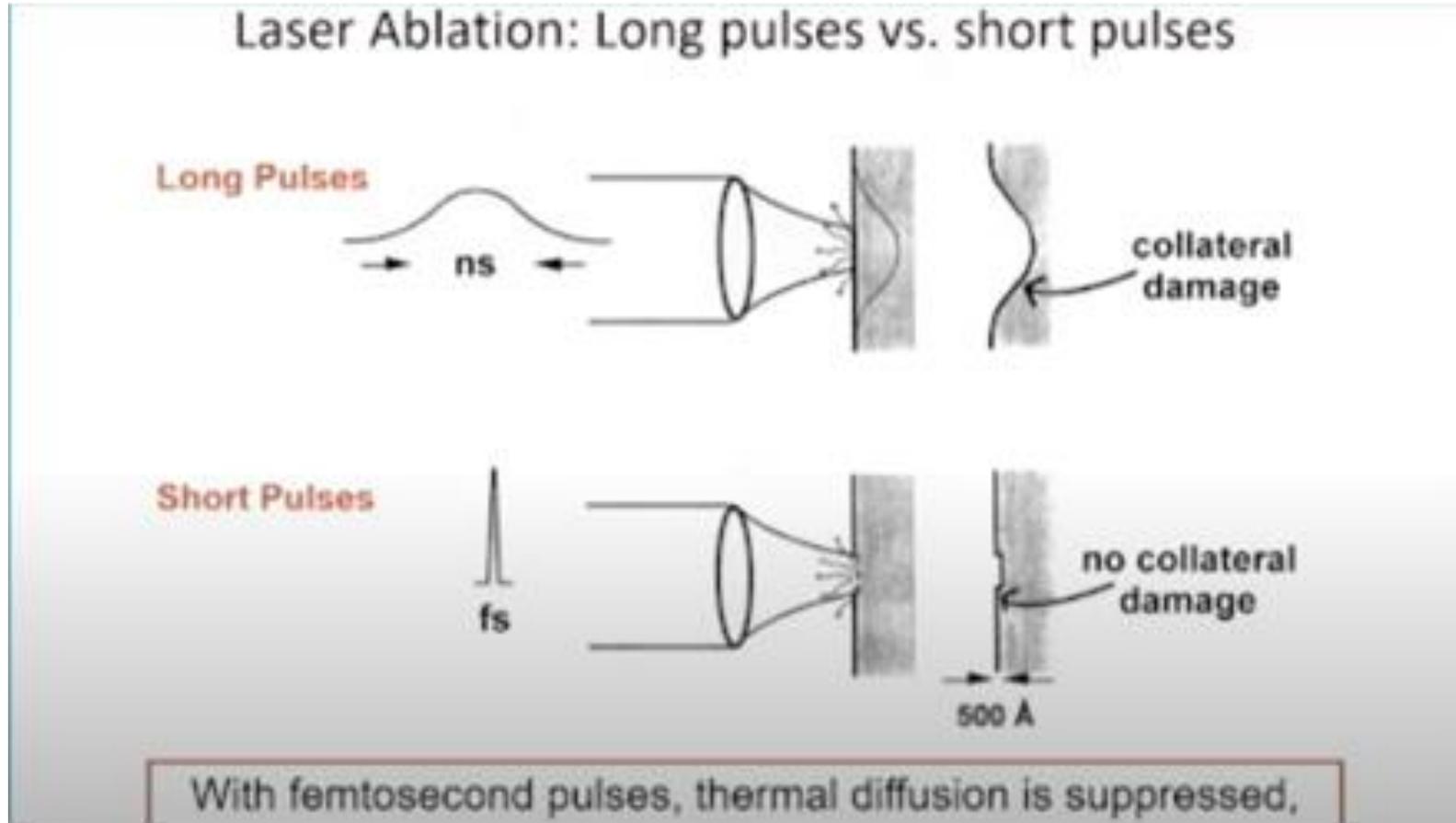
2. Amplification d'impulsions courtes: Technique CPA (Chirp Pulse amplification)



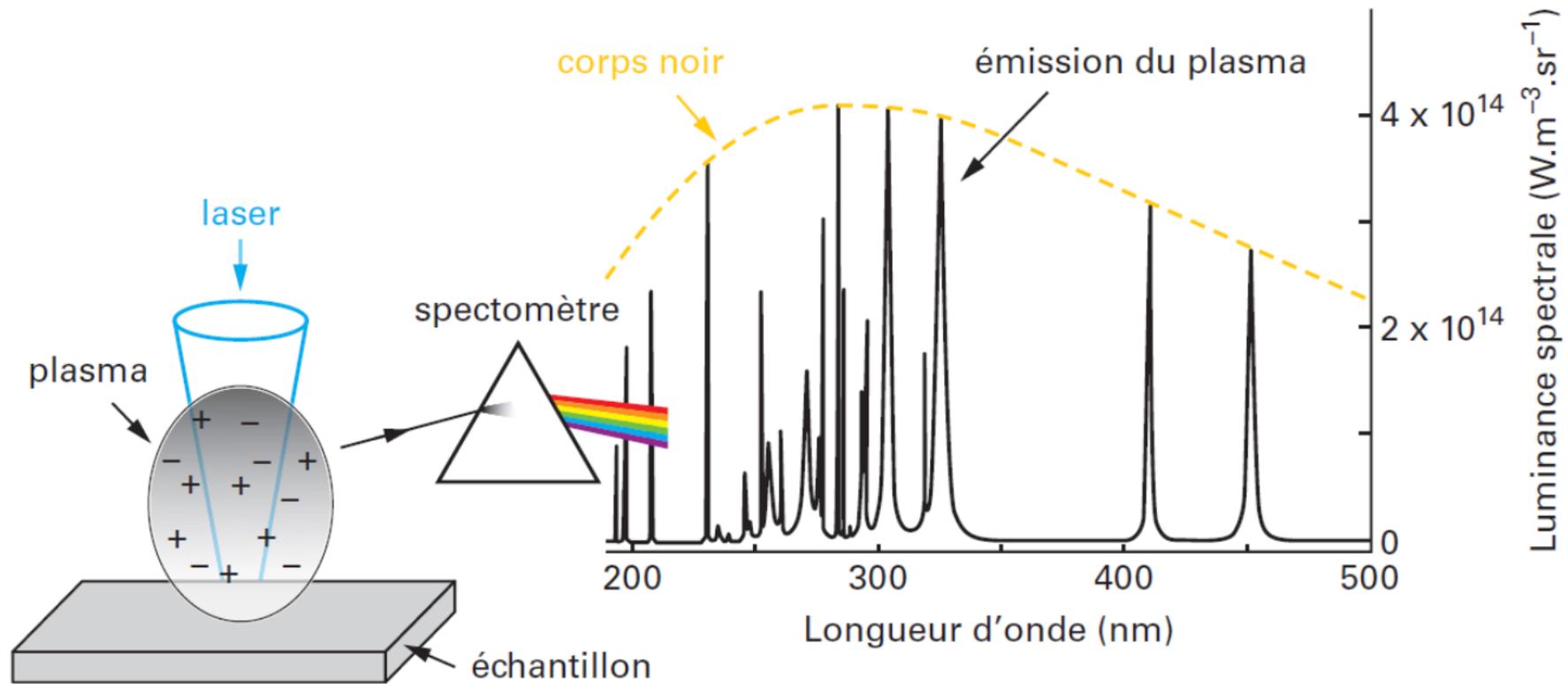
G. Mourou (France) et D. Strickland (Canada): Prix Nobel de Physique 2018

3. Lasers médicaux

Lasers femtoseconde s'est imposé dans la chirurgie oculaire: chirurgie réfractive de la cornée, pour traiter la myopie.



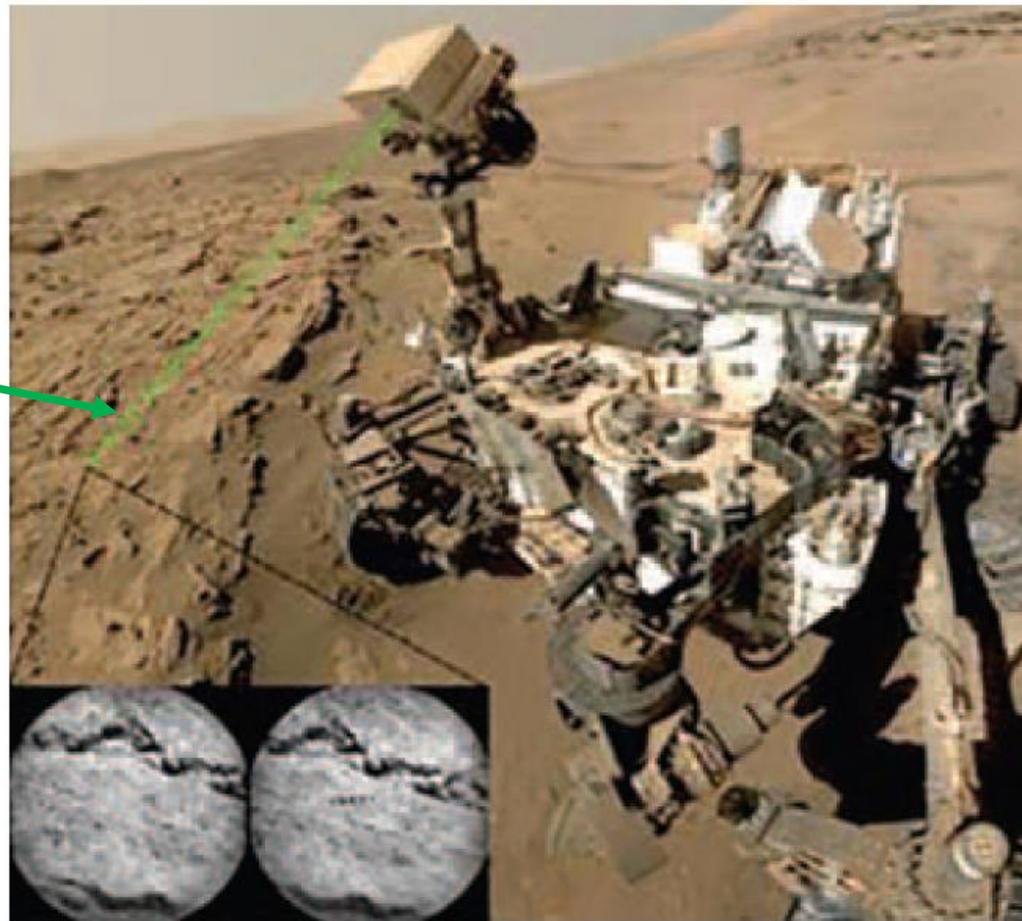
4. Analyse LIBS (Laser Inducted Breakdown Spectroscopy)



- (a) principe de la technique : une impulsion laser focalisée sur l'échantillon crée un plasma, dont l'analyse du spectre d'émission renseigne sur la composition du matériau

**ChemCam (2012) et
SuperCam est arrivé sur Mars
en décembre 2021.**

**Faisceau vert de
 $\text{KGdWO}_4:\text{Nd}^{3+}$**



**(b) analyseur LIBS sur un rover martien Curiosity
(instrument ChemCam, en haut à gauche)**

Supercam est l'héritier de l'instrument ChemCam installé à bord de l'astromobile Curiosity (mission Mars Science Laboratory) qui explore le sol martien depuis 2012. Comme ChemCam il est développé conjointement par l'institut de recherche en astrophysique et planétologie (France), qui fournit la tête optique, le laser et le spectromètre infrarouge et le Laboratoire national de Los Alamos (Etats-Unis) qui fournit les spectromètres Raman et LIBS.

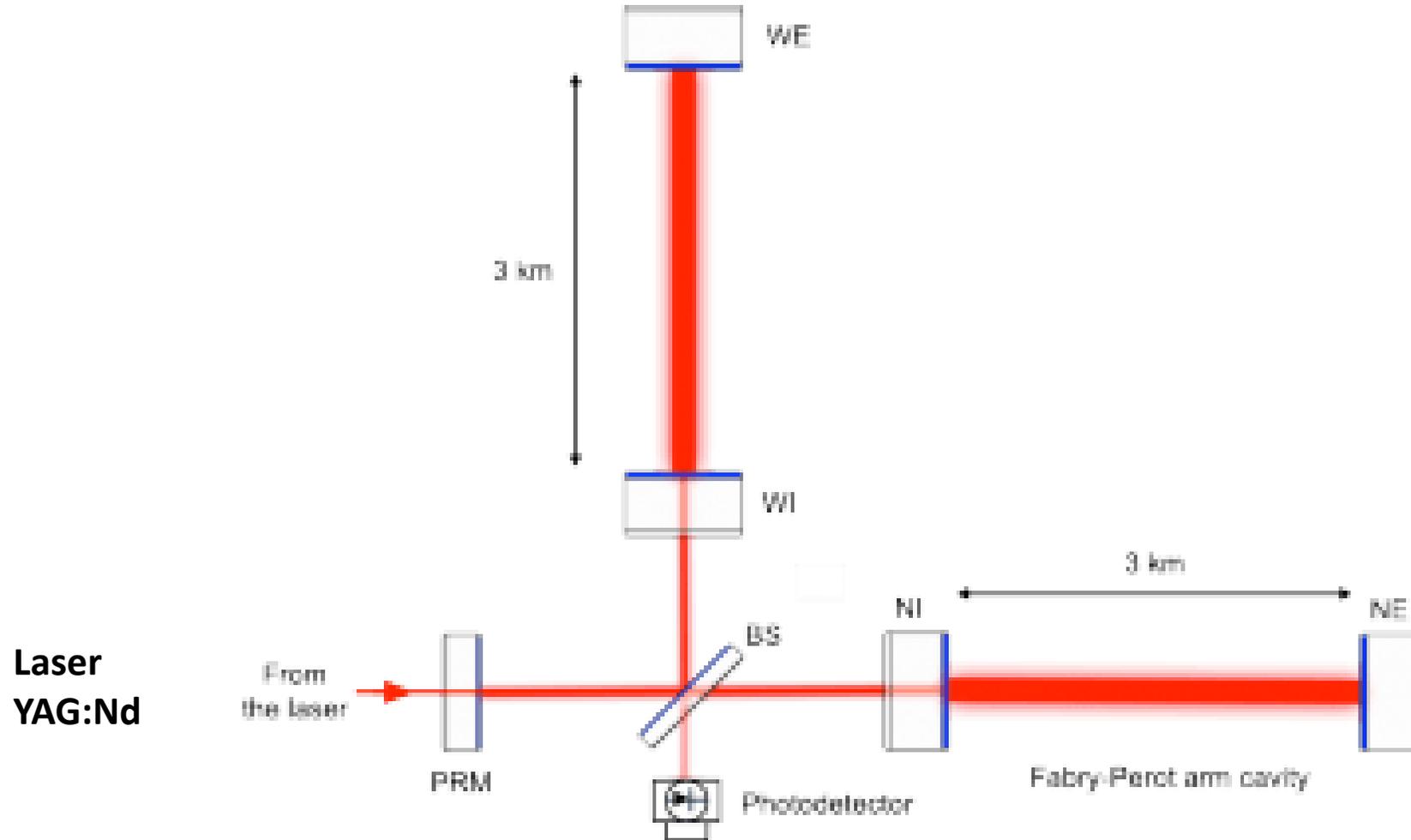
6. Nouvelle science, celle des ondes gravitationnelles



**Le projet européen VIRGO à Pisa (Italie), principalement Italie, France, Pays Bas.
Deux LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) aux États-Unis.**

Interféromètre géant de Michelson

On ajoute des interféromètres de Fabry-Pérot pour encore augmenter la distance parcourue par la lumière laser.



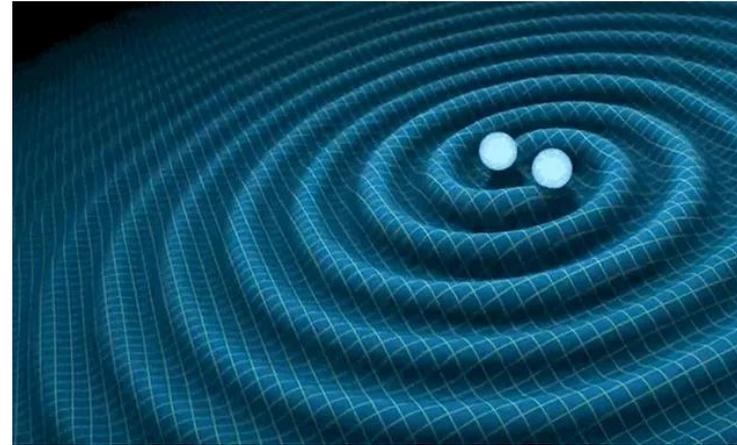
Détection de variation relatives de longueur de 10^{-22} .
Déplacement mesuré de 10^{-18} m!!

Détection d'ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont une conséquence de la théorie de la relativité générale décrites par Albert Einstein en 1916.

Ce sont des « ondulations » dans le tissu de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière.

Les ondes gravitationnelles sont des oscillations dans la courbure de l'espace-temps produites par les phénomènes les plus violents du cosmos.



Première détection d'une onde gravitationnelle le 14 septembre 2015 par LIGO aux USA alors que VIRGO était à l'arrêt afin d'améliorer ses performances.

Le nouveau Advanced VIRGO a réalisé sa première observation d'une onde gravitationnelle le 14 août 2017.

7. Four de croissance de saphir pour les supports des miroirs

Machine de tirage de cristaux de saphir *non dopés* pour les miroirs des interféromètres nécessaires à la détection des ondes gravitationnelles

Masse à fondre =500Kg et diamètre du cristal 450mm

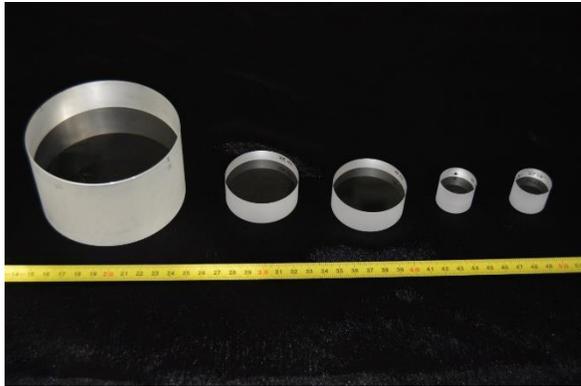


Messieurs Lissalde (Cyberstar, Grenoble) et K. Lebbou (iLM)

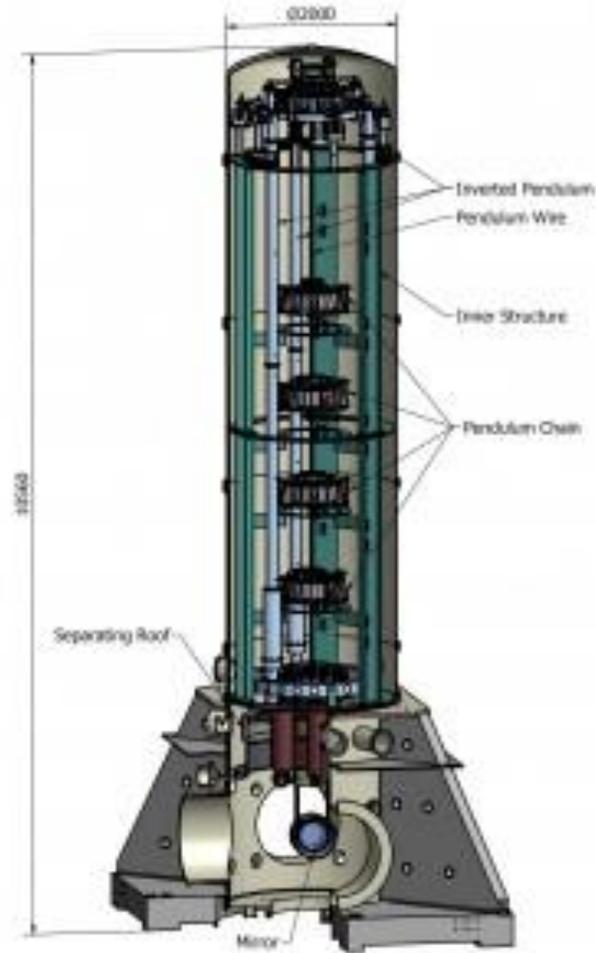
Une chaîne de pendules à laquelle est suspendu un miroir de Virgo

L'interféromètre Virgo a été conçu avec une attention particulière pour réduire les bruits instrumentaux.

Ces miroirs sont des cylindres de 35 cm de diamètre pour 20 cm d'épaisseur. Ils sont fabriqués avec du verre de silice et doivent être remplacés par des saphirs qui amélioreront les performances.



Premiers miroirs de saphir fabriqués par K. Lebbou (iLM, UCBLyon1) avec des fours Cyberstar.



Actuellement ces miroirs de silice sont fabriqués par le LMA à la Doua (UCBLyon1)

8. Le Laser Mégajoule (LMJ) du CEA, Le Barp (Gironde)

Tout comme le projet ITER à Cadarache, un des buts du LMJ est de parvenir à produire de l'énergie grâce à la fusion du deutérium et du tritium.

Le Laser Mégajoule utilise la technique du confinement inertiel par laser pour laquelle les lasers à haute énergie permettent de recréer des environnements extrêmes tels que des plasmas similaires à ceux présents à l'intérieur d'étoiles ou de planètes

C'est un des principaux éléments du programme militaire français *Simulation*, destiné à assurer la pérennité de la dissuasion nucléaire de la France après l'arrêt définitif des essais nucléaires en conditions réelles.

Intérêt pour l'astrophysique expérimentale

Intérêt aussi pour la recherche médicale (protonthérapie)

Difficulté dans la stabilisation de la réaction:c'est une explosion!

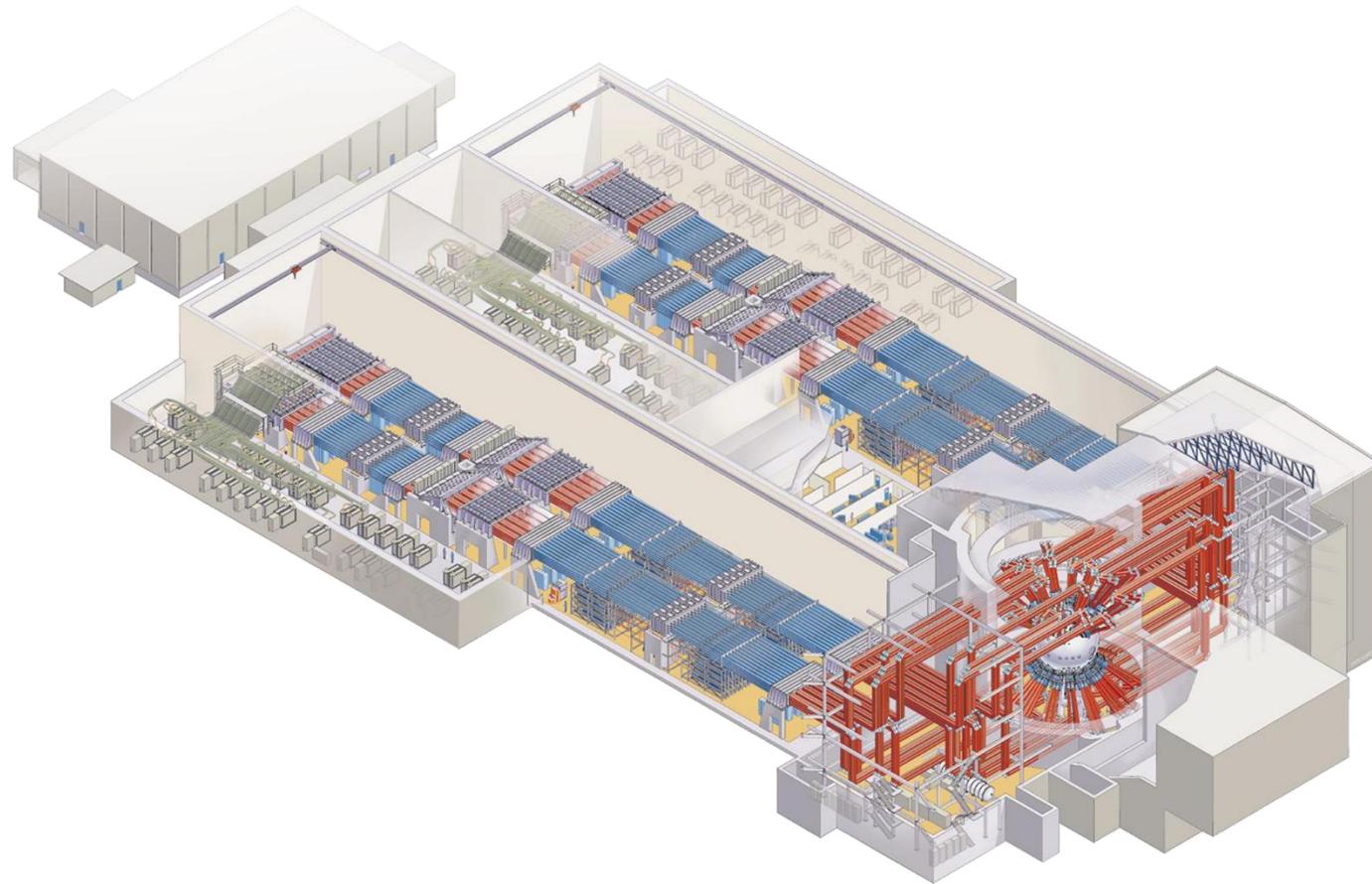
Plus d'espoir avec le Tokamak ITER à confinement magnétique à Saint-Paul les Durance

Laser Mégajoule (LMJ) du CEA, Le Barp

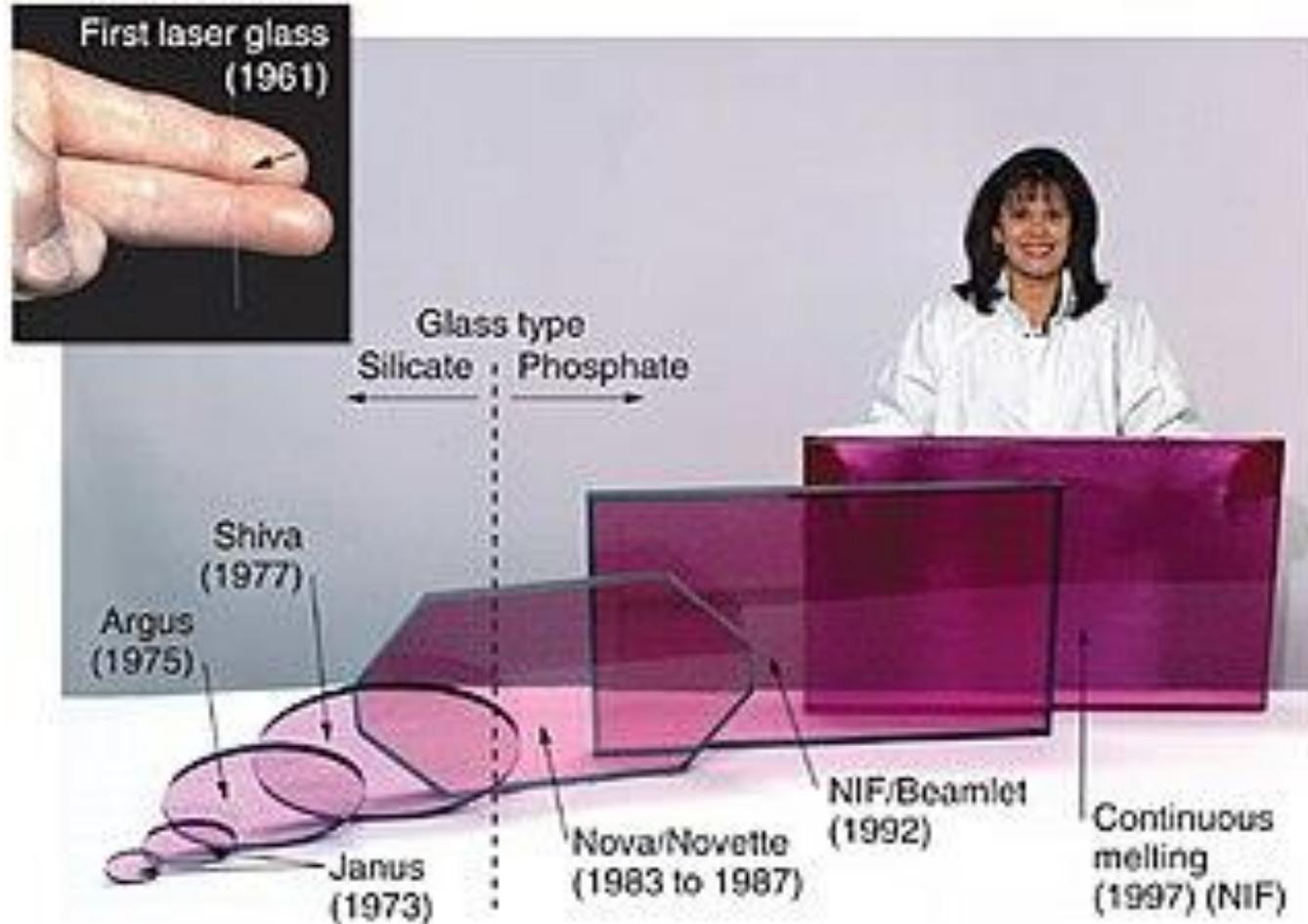
Vue extérieure du bâtiment du laser Mégajoule (LMJ).



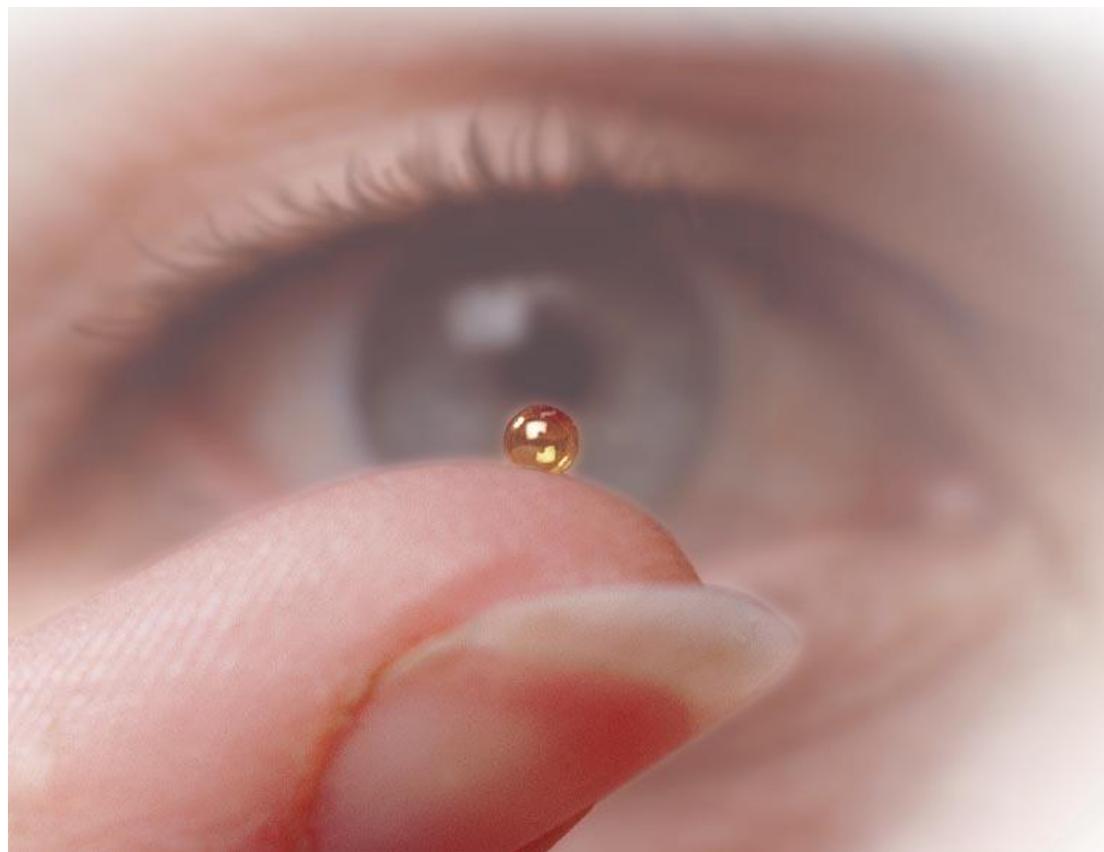
192 faisceaux identiques seront focalisés sur la cible



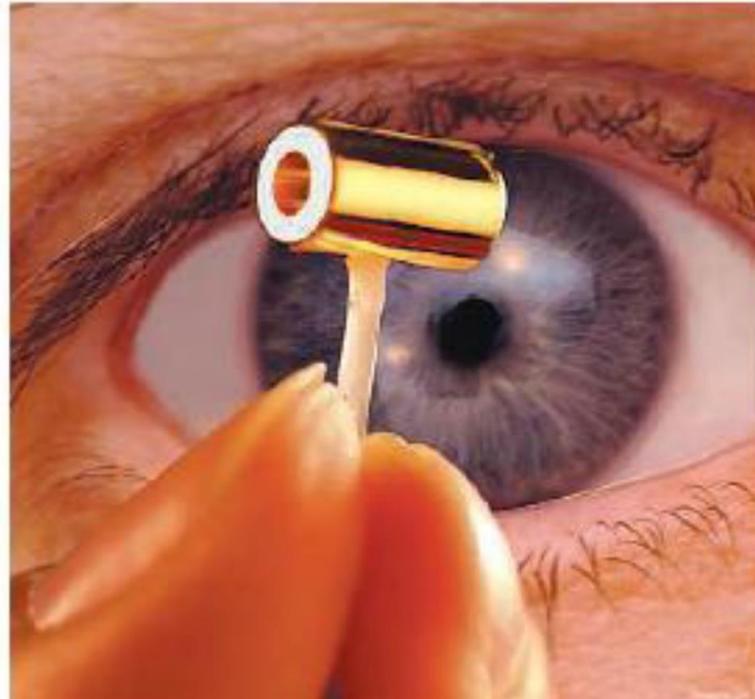
Verres de phosphate dopés Nd^{3+} comme amplificateurs



Cible de D + T



**Target of 192 beams laser in NIF (USA),
176 beams laser in LMJ (France).
Today 24 in Firex (Osaka, Japan), 48 in Shen Guang III (China), x in
Moscow (Russia)**



Pin point. All 192 beams must shine into the ends of this gold cylinder, which encloses the target.

Laser NIF à Livermore (CA-USA)

National Ignition Facility (NIF)

National Ignition Facility laser performance status
Applied Optics Vol. 46, No. 16 June 2007 p 3276



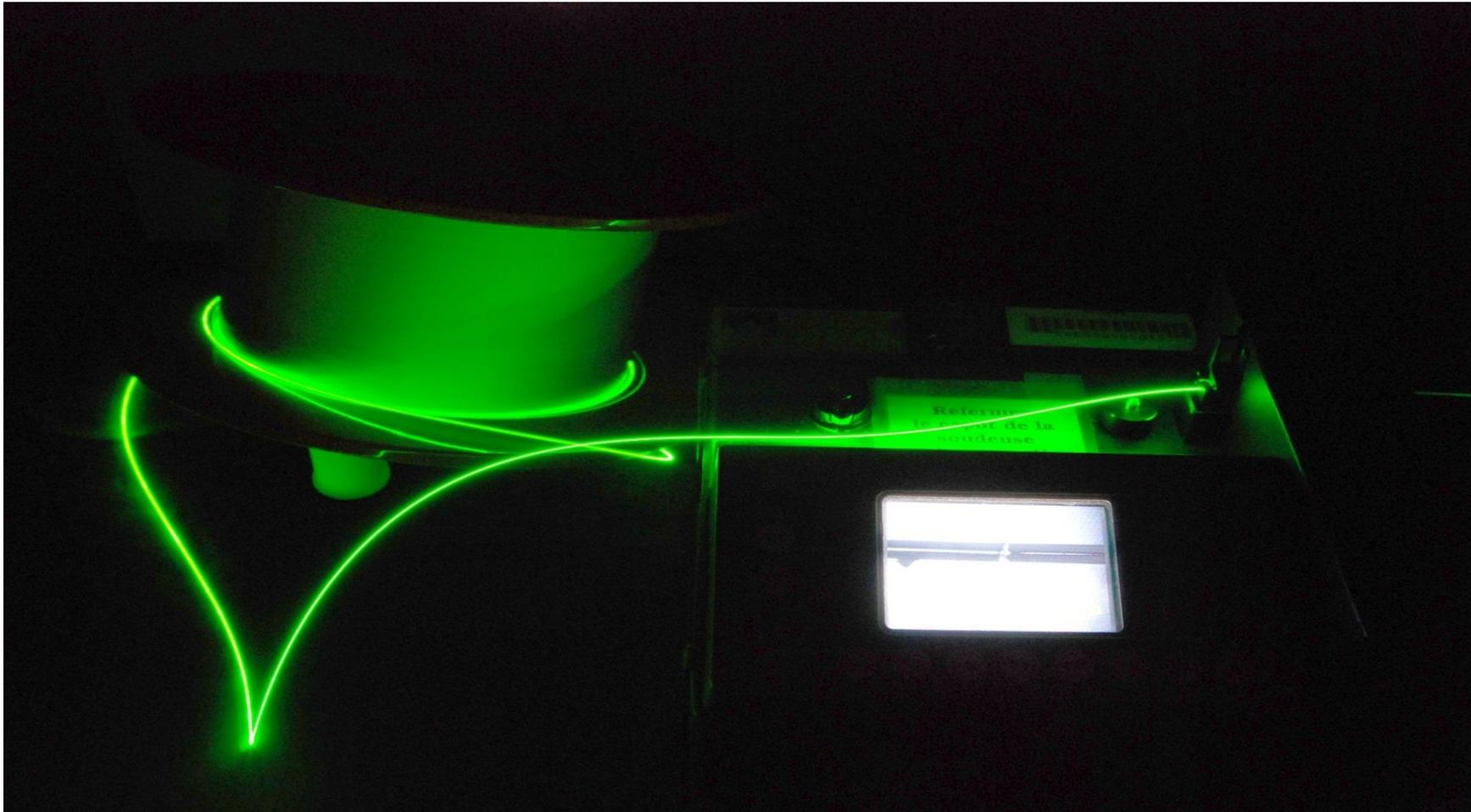
9. Développement d'internet par les amplificateurs composés de fibres vitreuses de silice dopées Er³⁺

Télécommunications transatlantiques

Nécessité d'amplifier le faisceau laser de $\lambda = 1.55\mu\text{m}$
qui transporte le signal dans la fibre,
tous les 100km,
par une autre émission laser
à la même λ de $1.55\mu\text{m}$
que celle du signal dans la fibre.

Solution avec une fibre de silice dopée Er^{3+}

Les verres sont aussi des matériaux lasers
Fibre de silice vitreuse SiO_2 amplificatrice
co-dopée Yb^{3+} - Er^{3+}
Pompage de Yb^{3+} à 980nm et émission de Er^{3+}



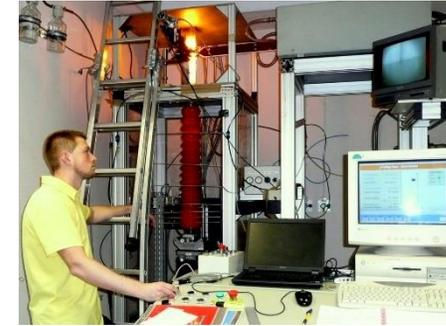
Conclusion

Le développement des cristaux pour laser est le fruit de longues recherches dans les laboratoires internationaux qui conduisent à des réalisations insoupçonnées.

La belle et brillante aventure des lasers à solide

Brillant c'était évident! Mais où était la beauté?

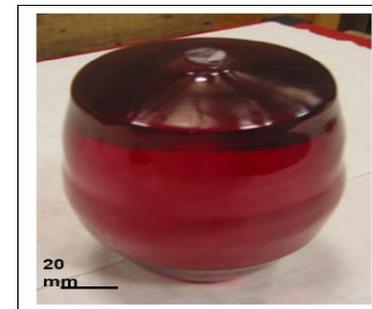
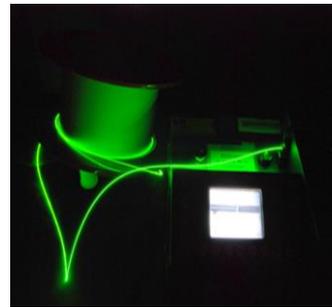
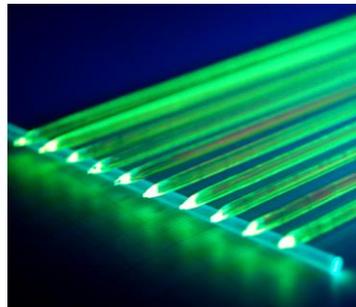
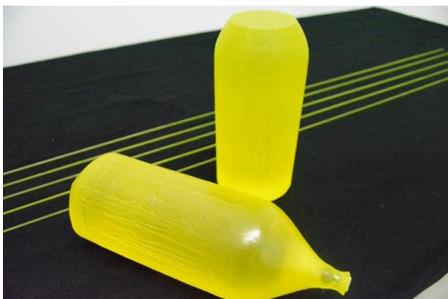
1. Créer et tirer un cristal, c'est combiner "Art et Science"
2. La beauté des matériaux émetteurs de lumière
3. La beauté des modèles mathématiques simples associés aux interprétations des observations expérimentales



principe d'incertitude $\Delta\nu \cdot \Delta t \geq 1/2\pi$

$$A_{21} / B_{21} = 8\pi h / c^3 \cdot \nu^3 \quad \text{ou} \quad N_2 / N_1 = \exp - (E_2 - E_1) / kT$$

4. La beauté des résultats scientifiques inattendus
5. La beauté des applications observées dans notre vie quotidienne



Merci de votre attention!

ACADEMIE
DES
SCIENCES
BELLES-LETTRES
ET ARTS
DE
LYON

