

UNE BRÈVE HISTOIRE DU LASER

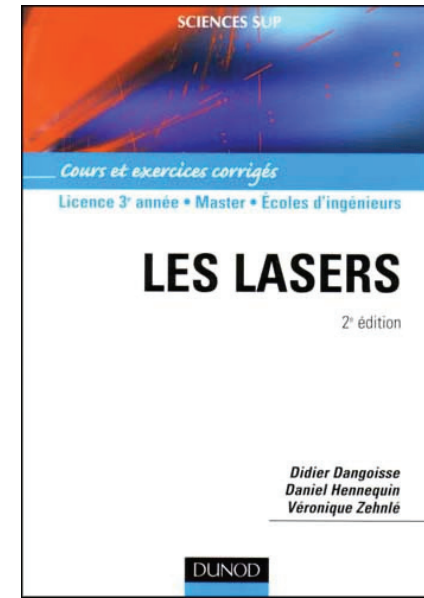
Daniel Hennequin

31 janvier 2013 – *Le laser au collège et au lycée*, dans le cadre du PAF 2012-2013

Daniel Hennequin

Chercheur au CNRS

Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules
Université Lille1, Villeneuve d'Ascq



UNE BRÈVE HISTOIRE DU LASER

16 mai 1960: Theodore Maiman réalise le premier laser



1917 - EINSTEIN



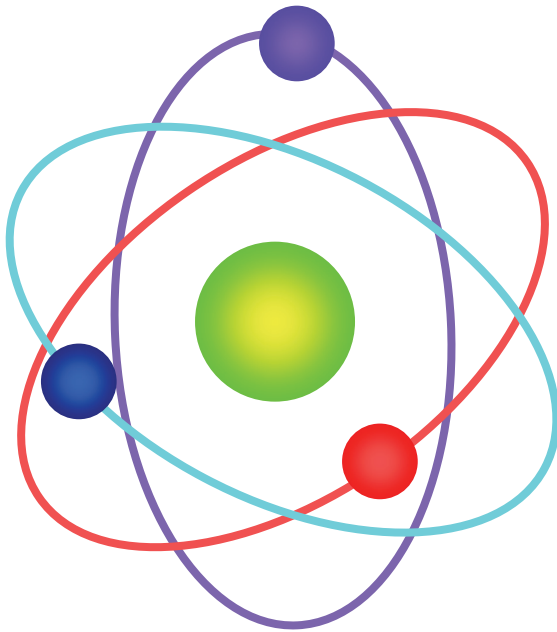
En 1917, Albert Einstein prédit l'émission stimulée

Il fait la synthèse des travaux de :

- Planck (quantification des niveaux d'énergie)
- Boltzmann (mécanique statistique)
- Bohr (quantification de la matière)

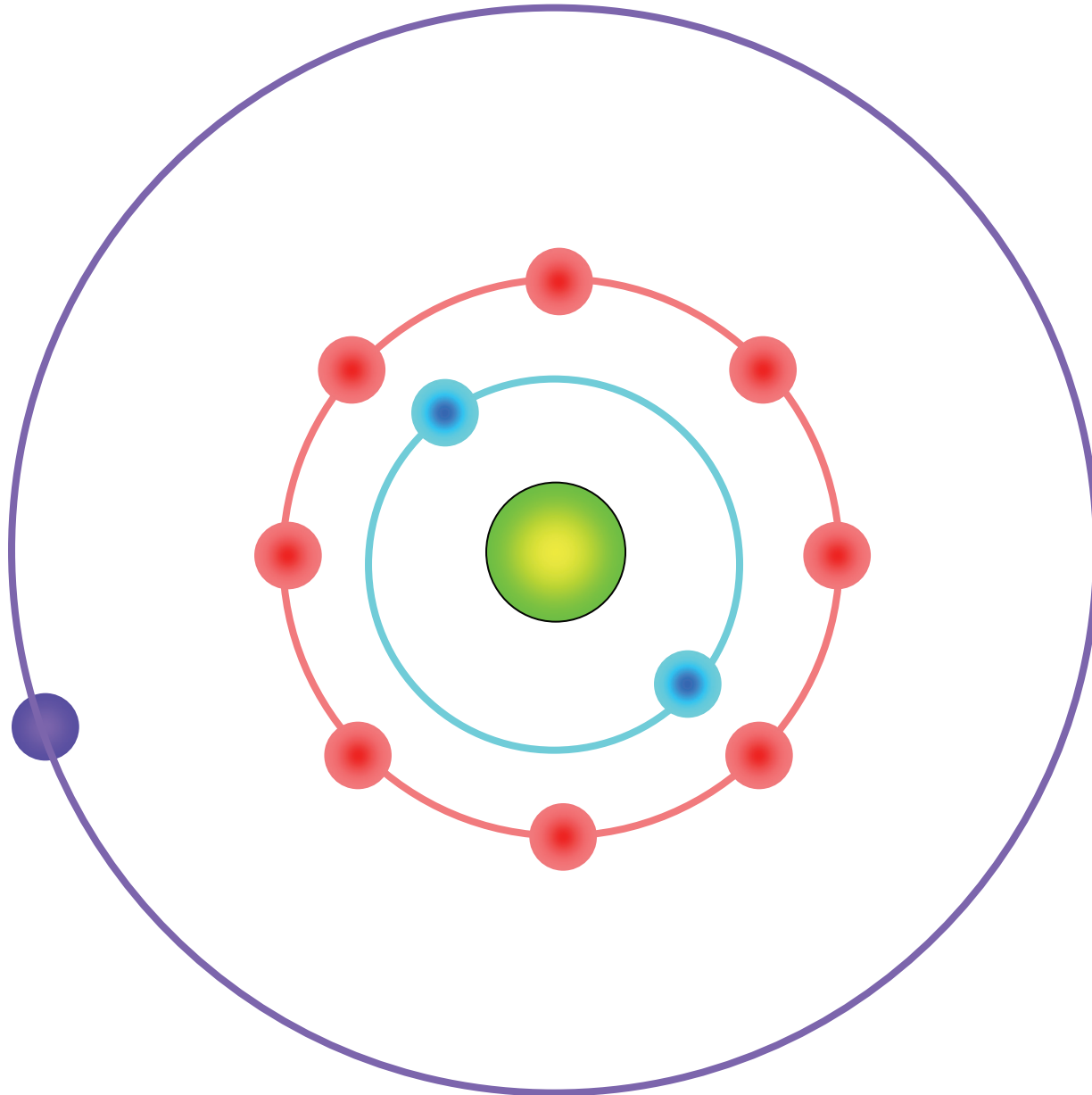
Pour résoudre les équations du corps noir, il est obligé de rajouter l'émission stimulée aux interactions matière-rayonnement connues (l'absorption et l'émission spontanée).

L'ATOME



Vision simplifiée d'un atome:
des électrons qui tournent
autour d'un noyau

LES NIVEAUX D'ÉNERGIE



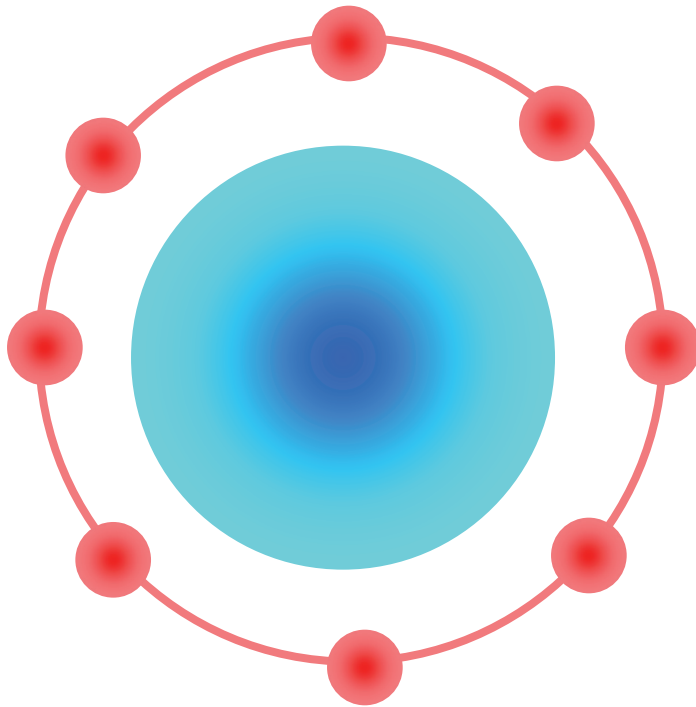
Sodium

Les électrons suivent des orbites de « diamètre » bien spécifique (pas d'orbites intermédiaires).

Il y a un nombre maximal d'électrons par orbite.

Les électrons les plus éloignés possèdent plus d'énergie.

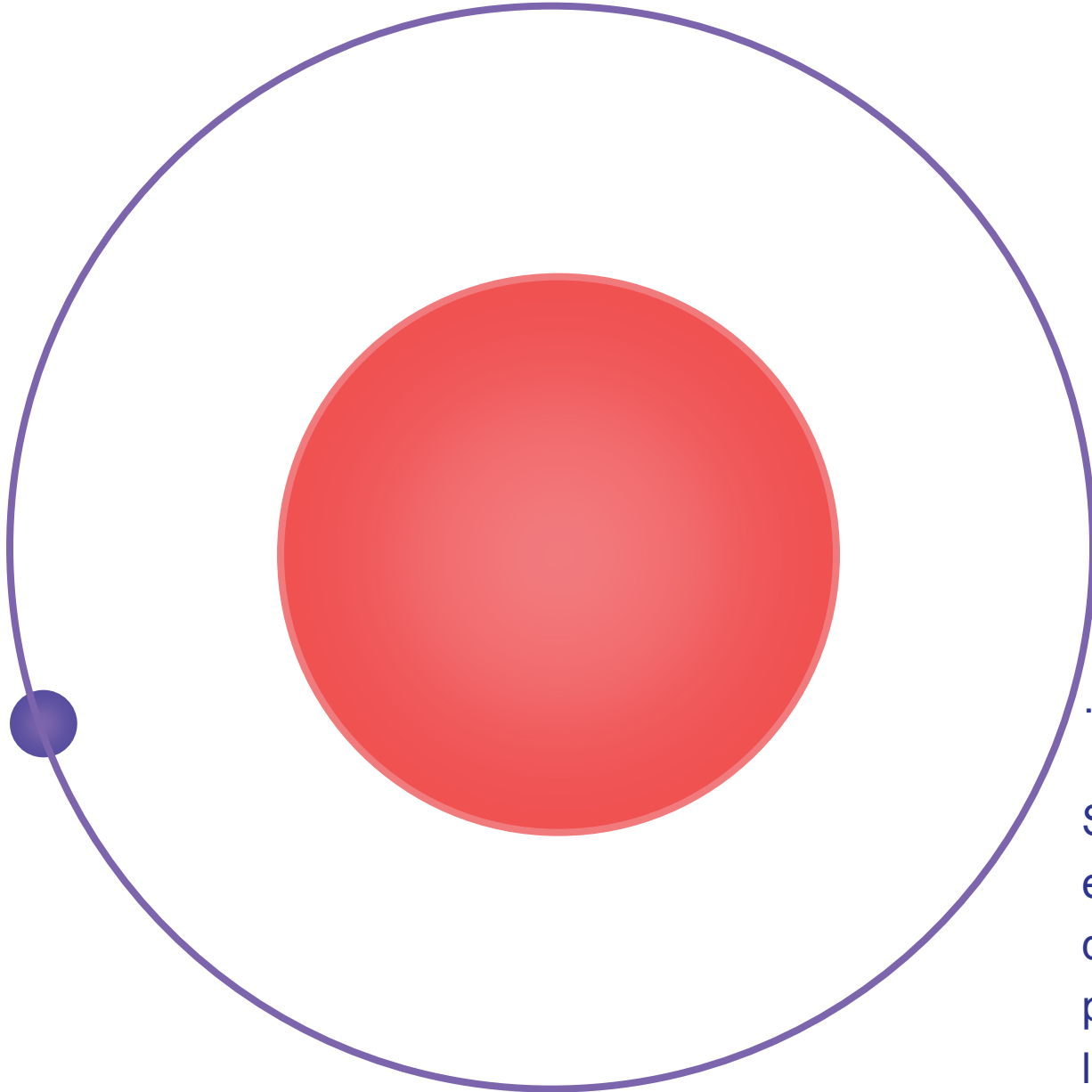
LES NIVEAUX D'ÉNERGIE



L'énergie totale de l'atome
inclue celle de ses électrons
les plus énergétiques.

Ici l'atome bleu a une
énergie plus faible que ...

LES NIVEAUX D'ÉNERGIE



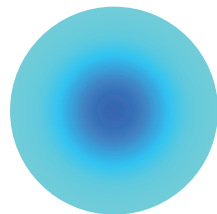
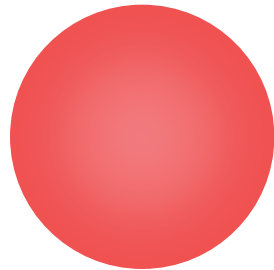
... l'atome rouge.

Si l'atome rouge est obtenu en faisant sauter un électron de l'atome bleu sur une orbite plus éloignée, on dit que l'atome rouge est « excité ».

LES NIVEAUX D'ÉNERGIE

Les niveaux d'énergie que peut prendre un atome sont quantifiés.

La façon dont les niveaux d'énergie se répartissent est caractéristique de l'atome (ou de la molécule).



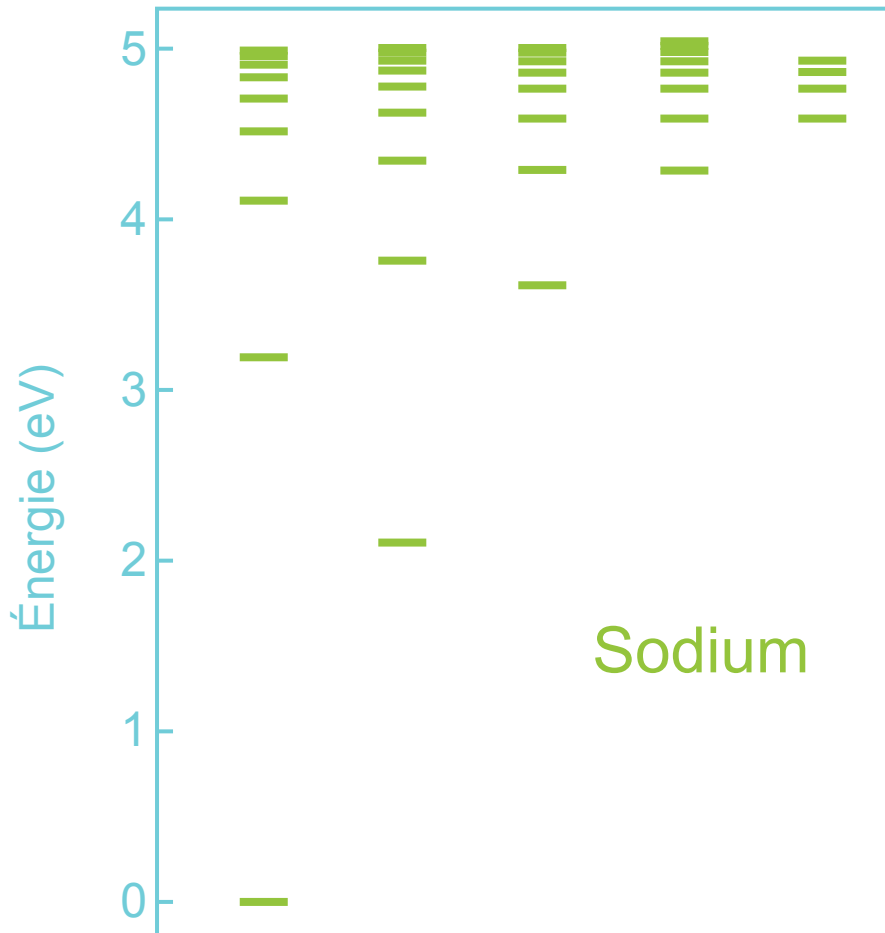
E_2



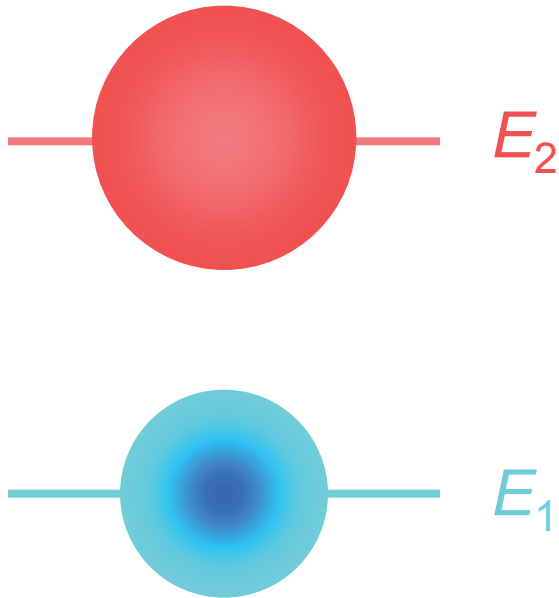
E_1

LES NIVEAUX D'ÉNERGIE

Les niveaux d'énergie de l'atome sont quantifiés.



LES NIVEAUX D'ÉNERGIE

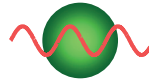


Si l'on veut que l'atome passe du niveau 1 au niveau 2, il faut fournir de l'énergie:

- énergie chimique
- énergie électrique
- énergie lumineuse
- ...

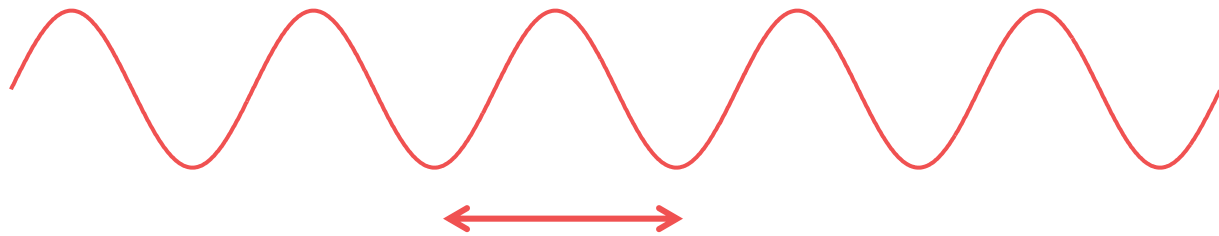
LA LUMIÈRE

La lumière est à la fois une onde et un corpuscule.



LA LUMIÈRE: L'ONDE

onde



Longueur d'onde λ

Vitesse de la lumière c

Fréquence $\nu = c/\lambda$

LA LUMIÈRE: L'ONDE

10⁻¹² mètres
1 picomètre

10⁻⁹ mètres
1 nanomètre

10⁻⁶ mètres
1 micromètre

10⁻³ mètres
1 millimètre

10⁰ mètres
1 mètre

10³ mètres
1 kilomètre

rayons
gamma



rayons X



ultraviolet



infrarouge



micro-ondes



radio



Longueurs d'onde courtes

Longueurs d'onde longues

ultraviolet
(UV)

infrarouge
(IR)

400 nm

500 nm

600 nm

700 nm

Longueur d'onde = couleur

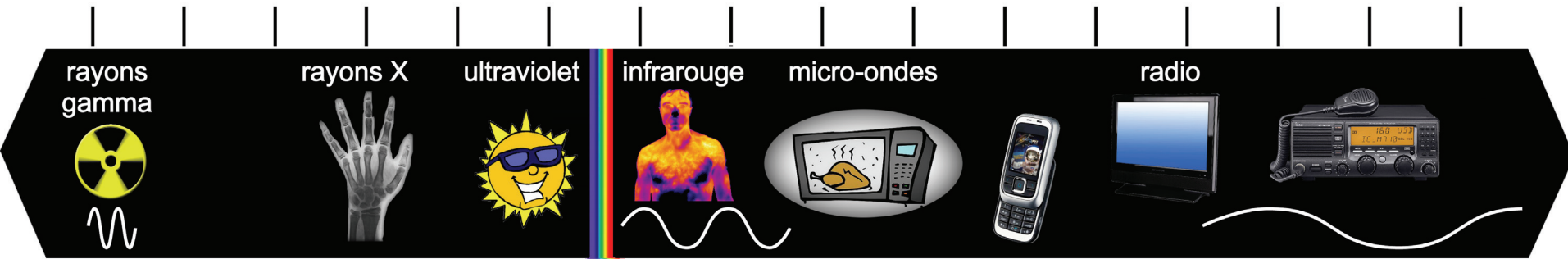
LA LUMIÈRE: LE PHOTON

corpuscule

Masse : 0

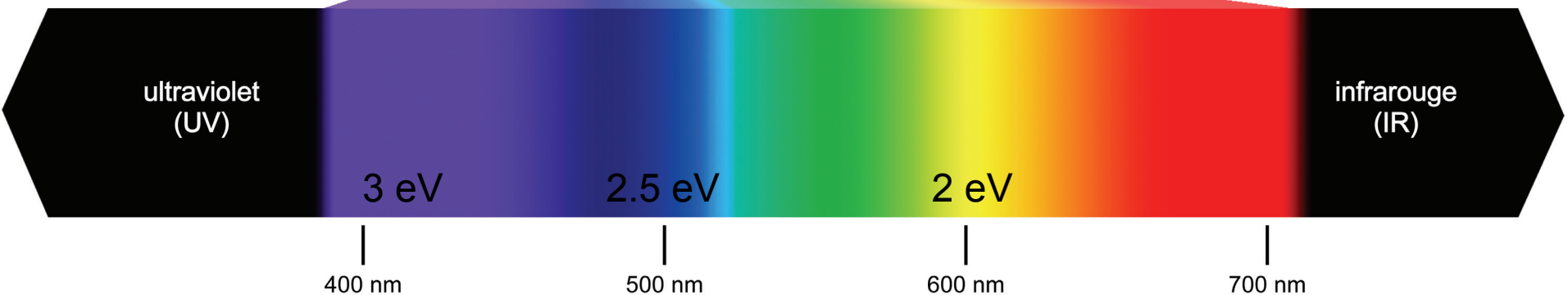
Énergie: $E = h\nu = hc/\lambda$ 600 nm = $3.3 \cdot 10^{-19}$ J = 2 eV

10⁻¹² mètres 10⁻⁹ mètres 10⁻⁶ mètres 10⁻³ mètres 10⁰ mètres 10³ mètres
1 picomètre 1 nanomètre 1 micromètre 1 millimètre 1 mètre 1 kilomètre

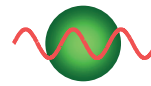
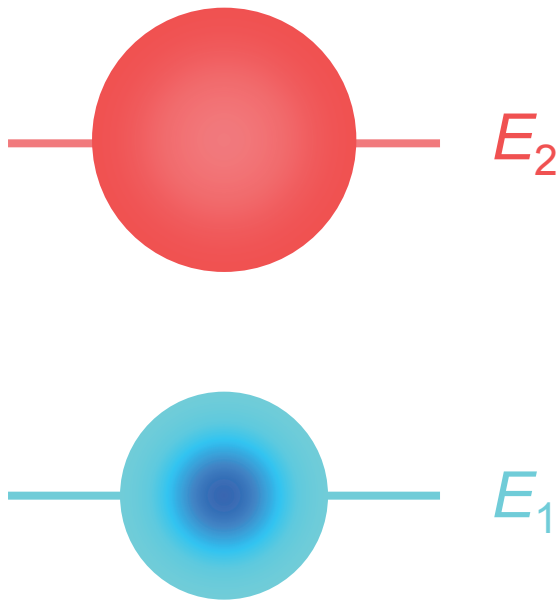


Longueurs d'onde courtes

Longueurs d'onde longues



L'ABSORPTION



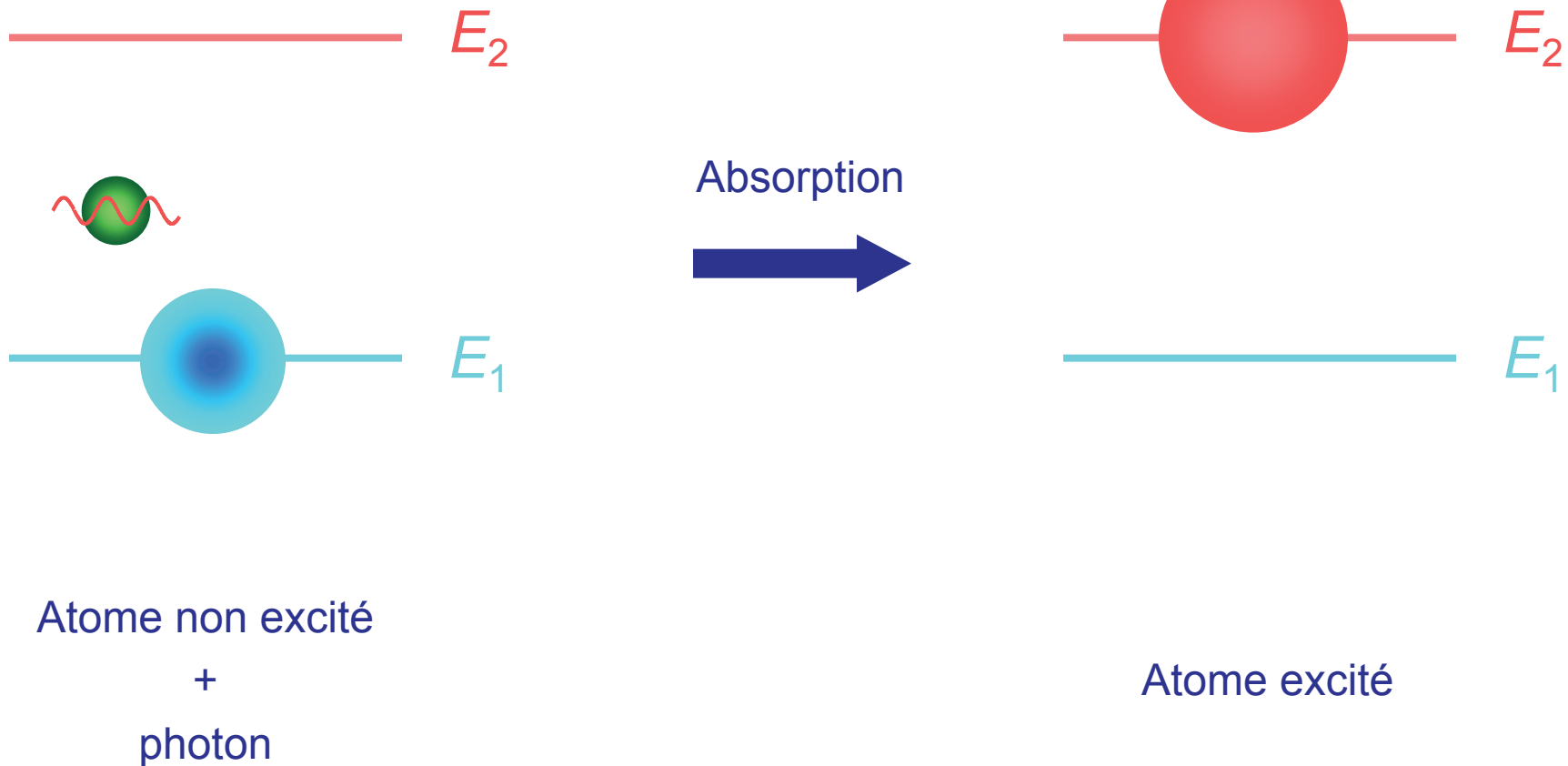
$$E_2 - E_1 = hc/\lambda$$

Pour faire passer l'atome du niveau 1 au niveau 2 avec de la lumière, il faut utiliser un photon qui a pour énergie la différence exacte entre les deux niveaux d'énergie de l'atome, et donc la bonne longueur d'onde.

Couple atome – longueur d'onde

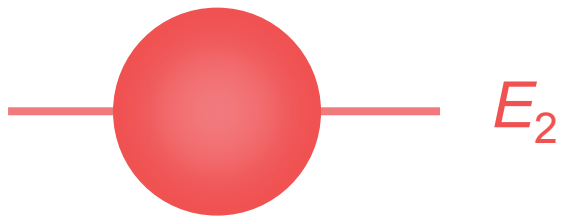
L'ABSORPTION

Si le photon a la bonne longueur d'onde, il est absorbé par l'atome, et l'atome est excité.



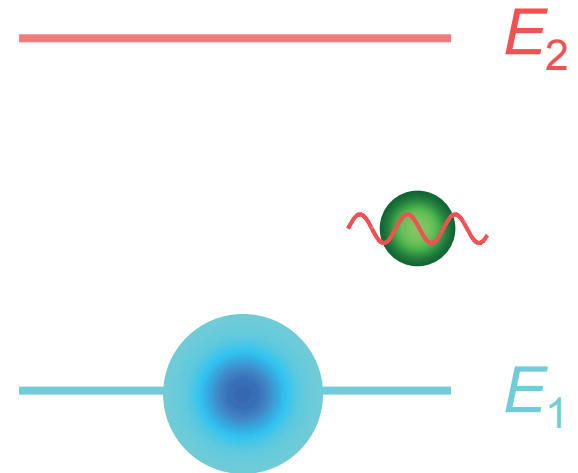
L'ÉMISSION SPONTANÉE

Un atome excité est instable: il émet un photon spontané au bout d'un temps aléatoire donné par la durée de vie du niveau.



Atome excité

Émission
spontanée
➔

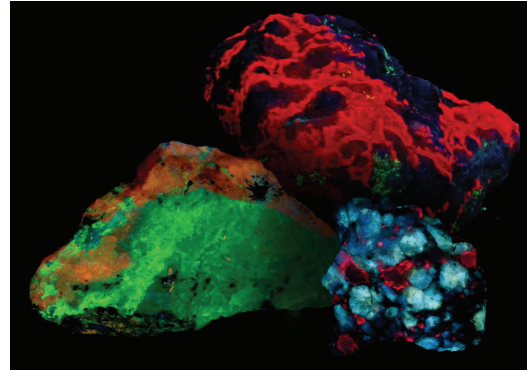


Atome non excité
+
photon

L'ÉMISSION SPONTANÉE



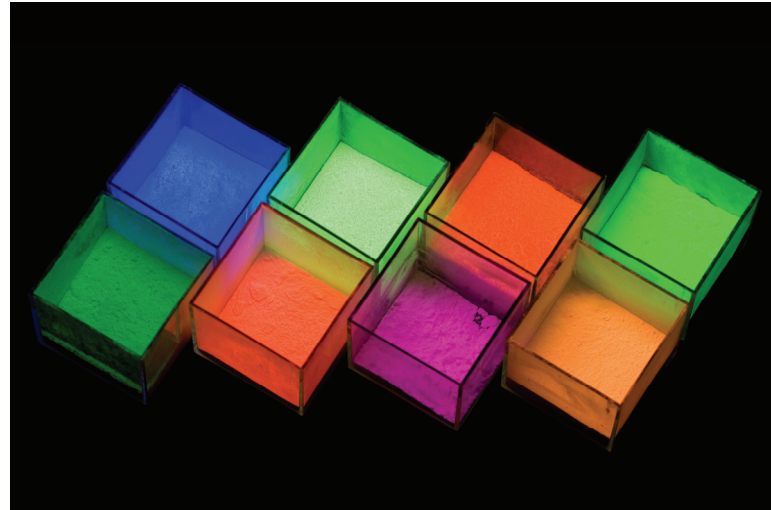
phosphorescence



fluorescence



luciole



L'ÉMISSION SPONTANÉE



Enseignes
au néon

Chimiluminescence



L'ÉMISSION SPONTANÉE



Méduse Aequorea Victoria

Protéine fluorescente verte (GFP)

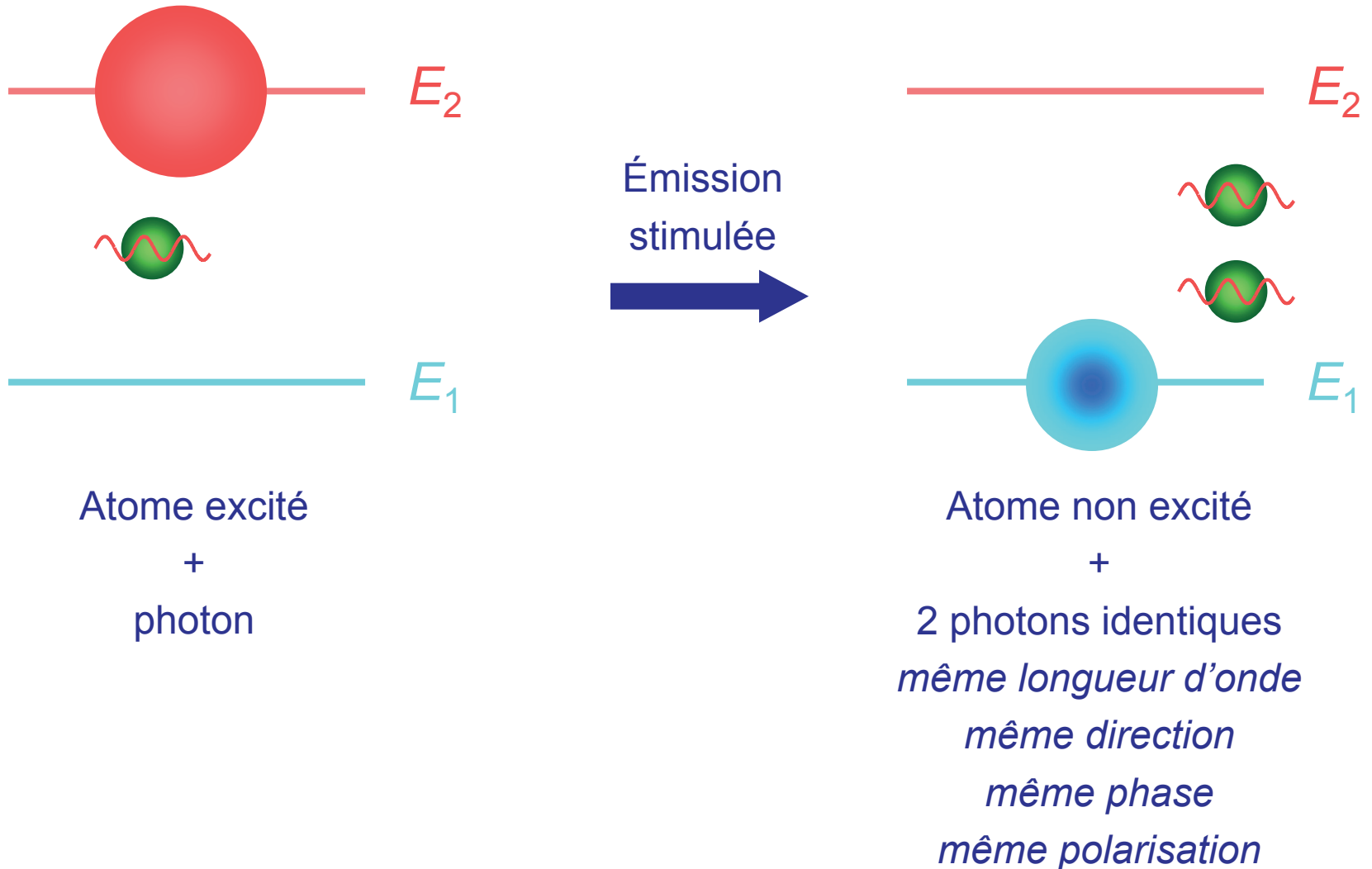
Prix Nobel de Chimie 2008

Osamu Shimomura

Martin Chalfie

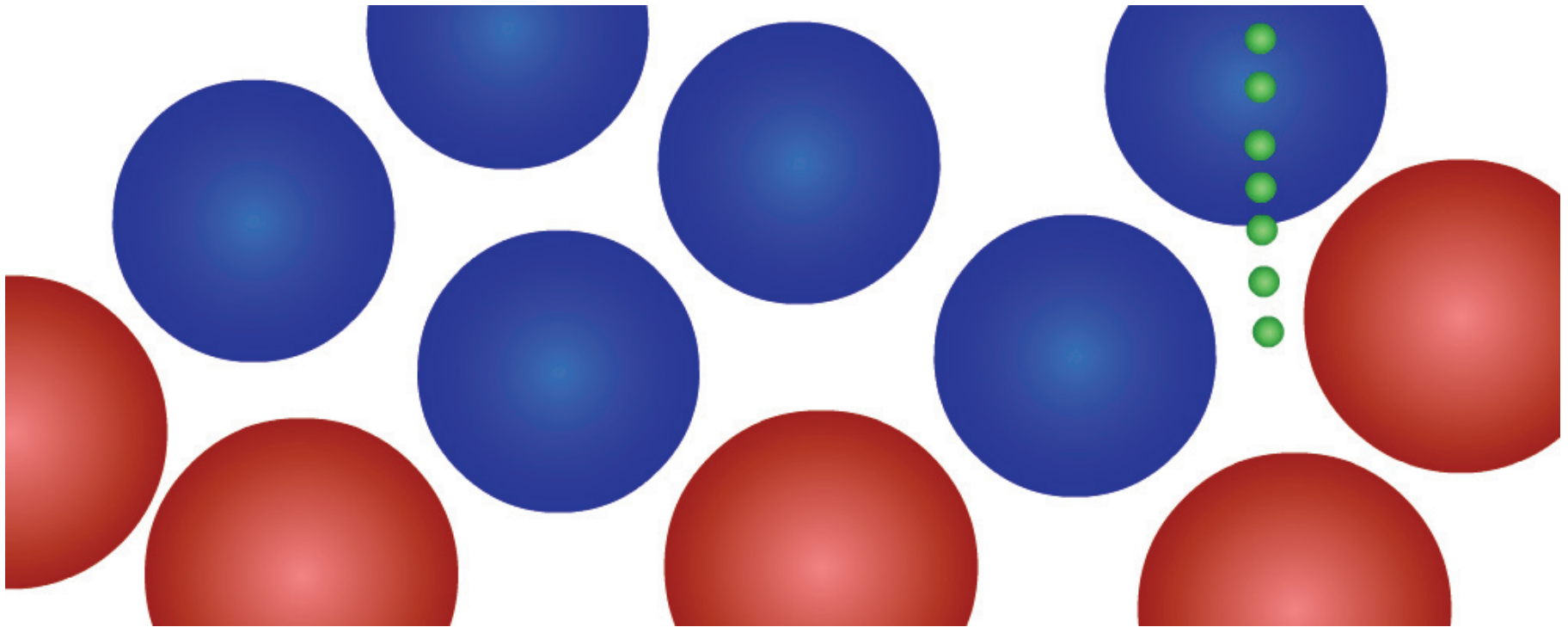
Roger Tsien

L'ÉMISSION STIMULÉE



L'ÉMISSION STIMULÉE

L'émission stimulée permet de multiplier les photons identiques.

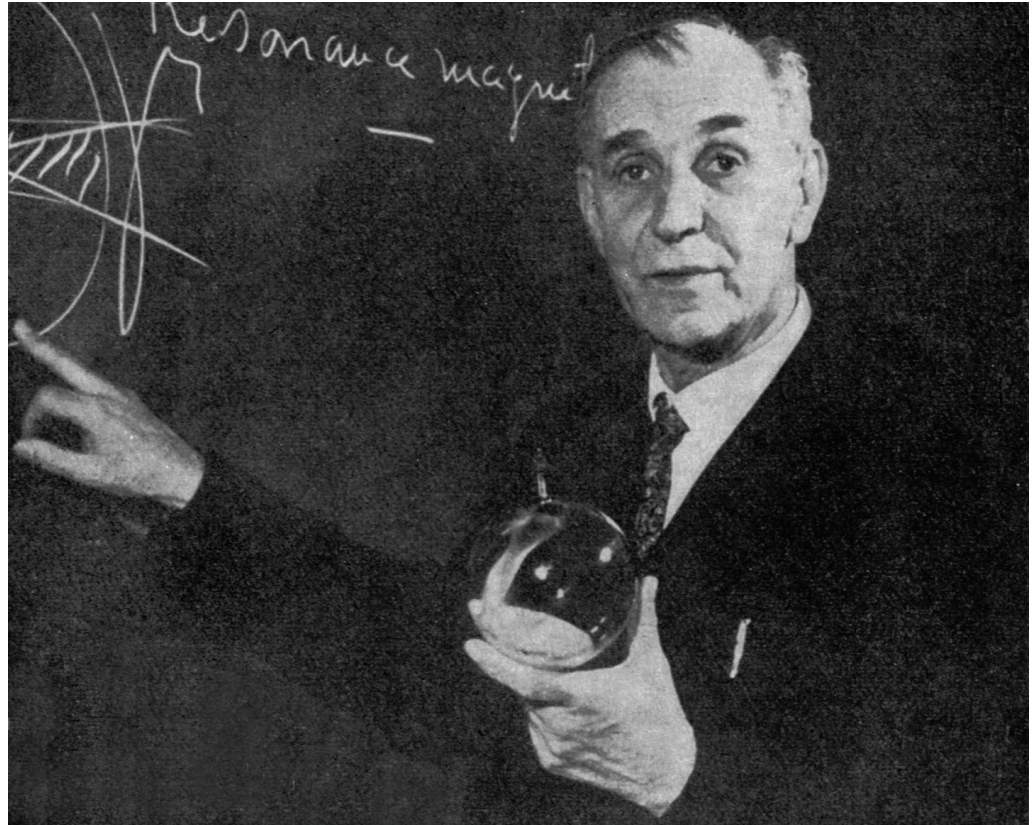


On a supposé qu'on avait initialement excité tous les atomes en même temps

1950 - KASTLER

En 1950, Alfred Kastler
découvre
le pompage optique

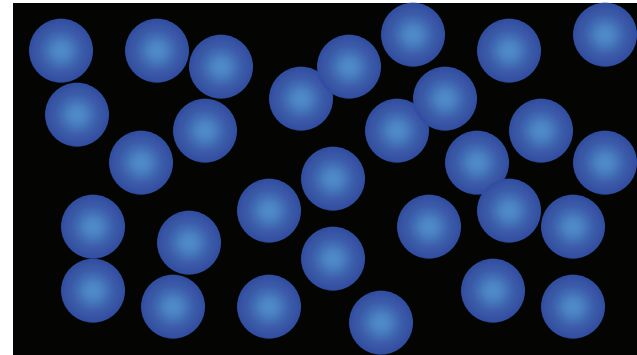
ou comment réaliser une
inversion de population...



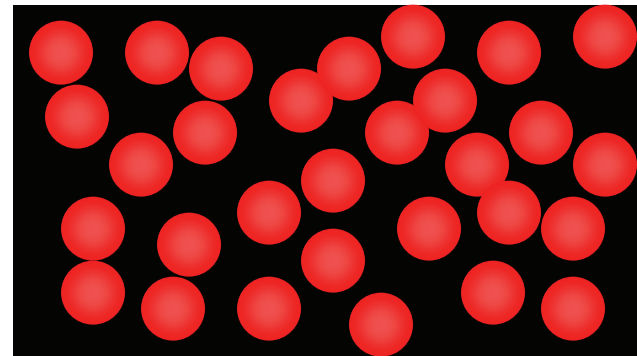
1950 - KASTLER

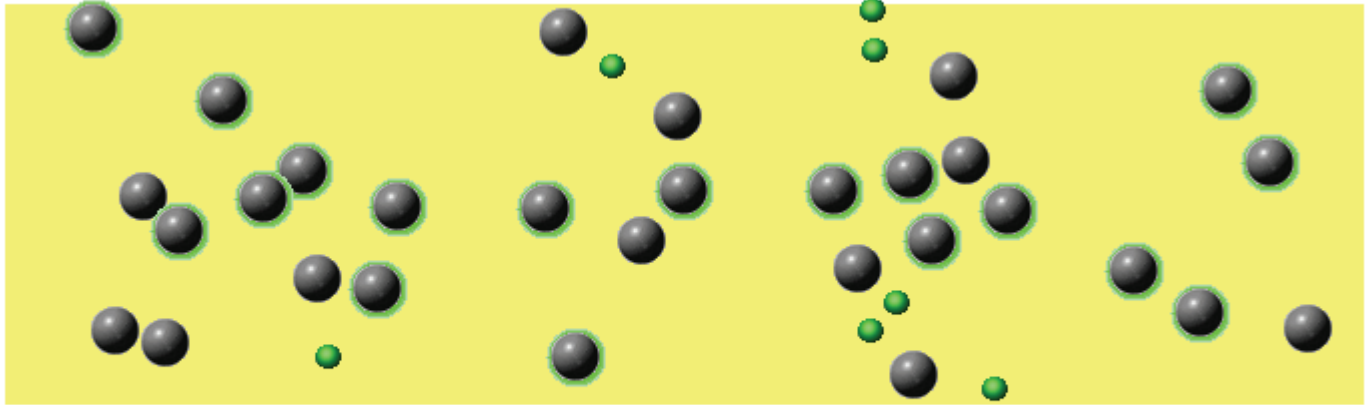
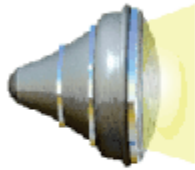
En 1950, Alfred Kastler
découvre
le pompage optique

ou comment réaliser une
inversion de population...



pompage





1951 - 1954 : LE MASER



1951 - 1954 : LE MASER

Université Columbia, New York

1951 : Charles Townes pense trouver la solution pour construire un maser

1953 : Charles H. Townes, J. P. Gordon, et H. J. Zeiger construisent le premier maser

Juillet 1954 : Townes, Gordon, et Zeiger publient leurs résultats.

Institut de Physique Lebedev, Moscou

1952 : Nikolay G. Basov et Aleksandr M. Prokhorov présentent le principe du maser lors d'une conférence organisée par l'Académie des Sciences soviétique à Moscou.

Octobre 1954 : Basov et Prokhorov publient leurs premiers résultats.

1955 : Basov et Prokhorov construisent un maser.

1951 - 1954 : LE MASER



Basov

Townes

Prokhorov

1951 - 1954 : LE MASER

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Amplification de Microondes par Émission Stimulée de Radiation



1951 - 1954 : LE MASER

Que faut-il faire ?

- trouver le bon couple

atome
ou
molécule

longueur
d'onde

facile (spectroscopie moléculaire)

- exalter le processus d'amplification

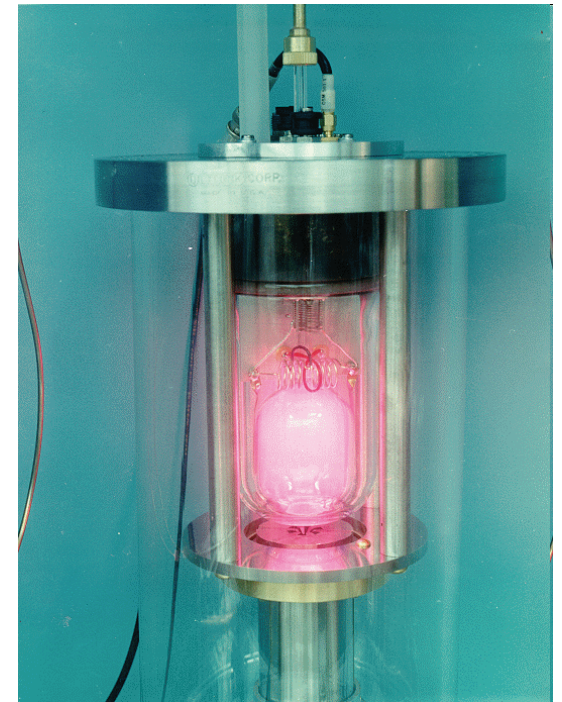
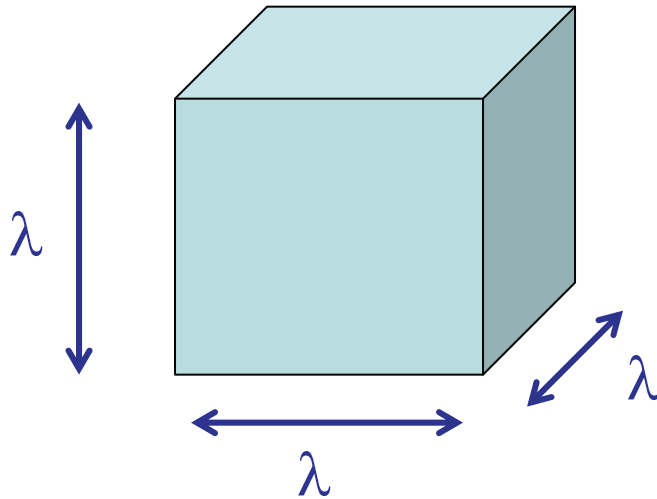
cavité résonnante

1951 - 1954 : LE MASER

Cavité résonnante

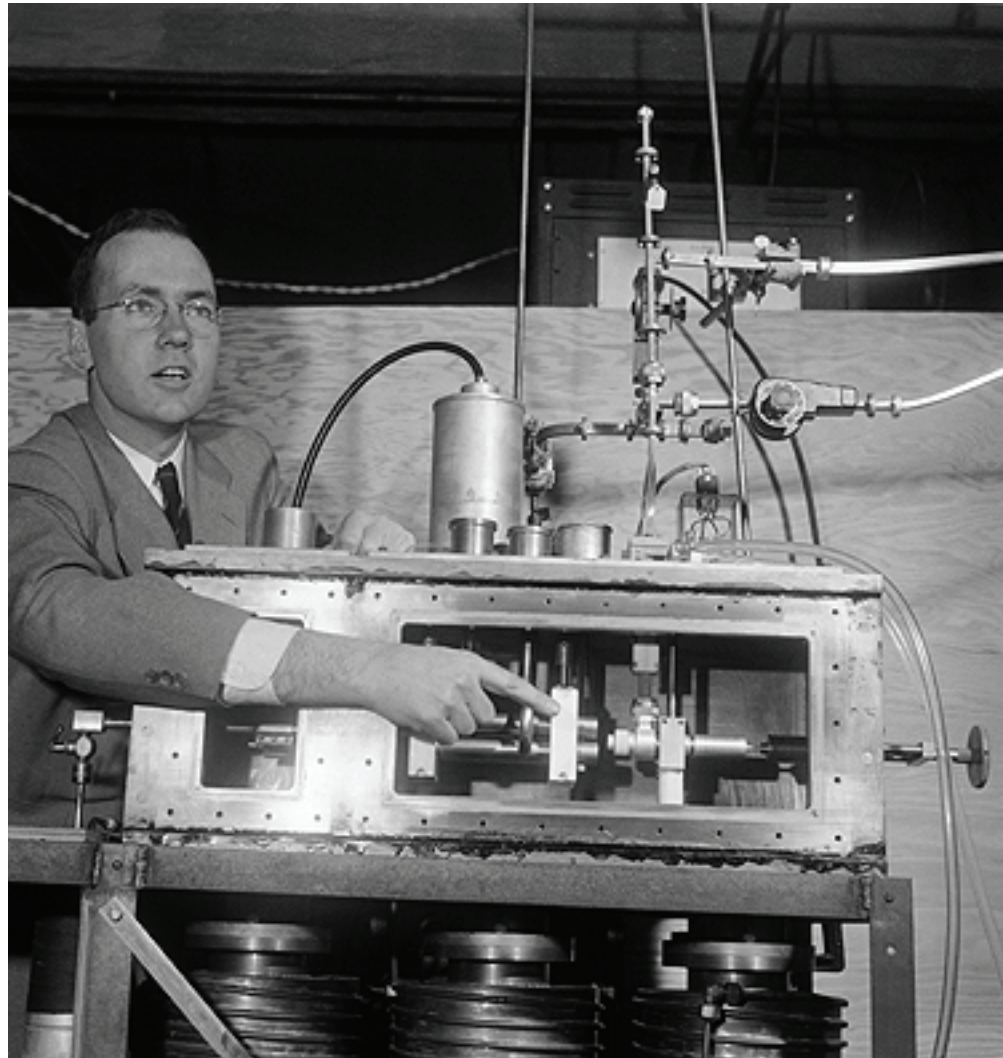
La lumière est piégée dans la cavité

Microonde: mm ou cm, facile !



décharge
radiofréquence
dans
l'hydrogène

1951 - 1954 : LE MASER



1955 - 1960 : LE LASER

Que faut-il faire ?

- trouver le bon couple

atome
ou
molécule

longueur
d'onde

pas évident, mais on trouvera bien

- exalter le processus d'amplification

impossible de faire une cavité résonnante
(fraction de μm)

1955 - 1960 : LE LASER

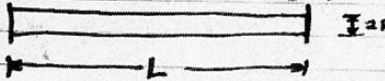
- Nov. 1957 : Townes cherche comment faire un maser avec des longueurs d'onde plus courtes, voire un maser optique. Il en discute notamment avec Gordon Gould, doctorant à Columbia.
- Nov. 1957 : Gould trouve la solution. Il la note dans son cahier de laboratoire, et réalisant l'importance de sa découverte, confie son cahier à un notaire, pour déposer ultérieurement un brevet.
- Fév. 1958 : Aux Bell Labs, dans le New Jersey, Arthur Schawlow, collaborateur et beau-frère de Townes, trouve la solution.
- Août 1958 : Schawlow et Townes soumettent leur article « Infrared and Optical masers » à Physical Review.
- Déc. 1958 : L'article de Schawlow et Townes est publié.

1955 - 1960 : LE LASER

14

Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

conceive a tube terminated by optically flat



partially reflecting parallel mirrors. The mirrors might be silvered or multilayer interference reflectors. The latter are ^{almost} lossless and may have an arbitrarily high reflectance depending on the number of layers. ~~a~~ a practical achievement is 98% in the visible for a 7-layer ~~flat~~ reflector. Flats with closer tolerances than $\frac{1}{100} \lambda$ are not available so if a resonant system is desired, higher reflectance would not be useful. However for a nonresonant system, the 99.9% reflectances which are possible might be useful.

Consider a plane ^{standing} wave in the tube. There is the effect of a closed cavity; since the ~~wave~~ wavelength is small the diffraction and hence the lateral loss is negligible.

① O.S. Heavens, "Optical Properties of Thin Solid Films" (Butterworths Scientific Publications, London, 1955), p.220.

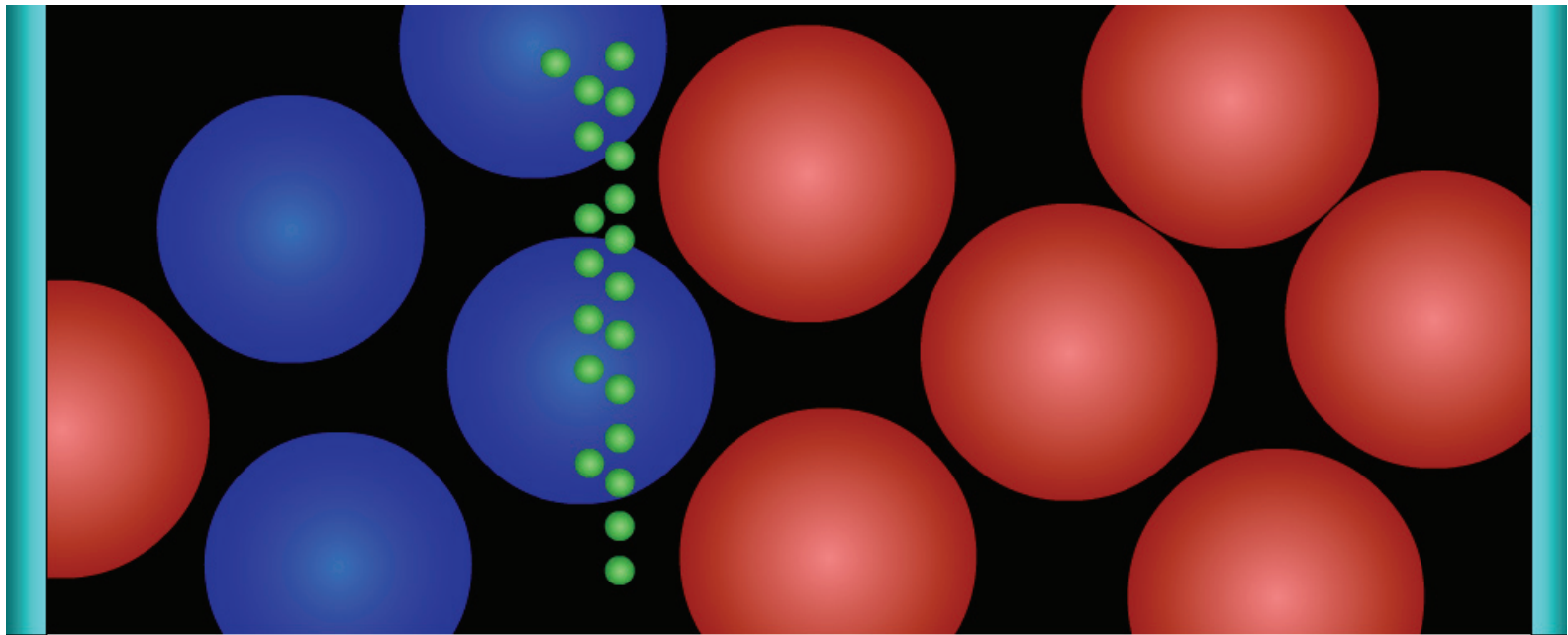
Jack Gould
Nobly Public, State of New York
No. 08-1821960
Qualified in Bronx County
Commission Expires March 30, 1967

La page du cahier de laboratoire de Gordon Gould

Il invente l'acronyme LASER.

LA CAVITÉ PEROT-FABRY

La cavité Perot Fabry est composée de 2 miroirs parallèles

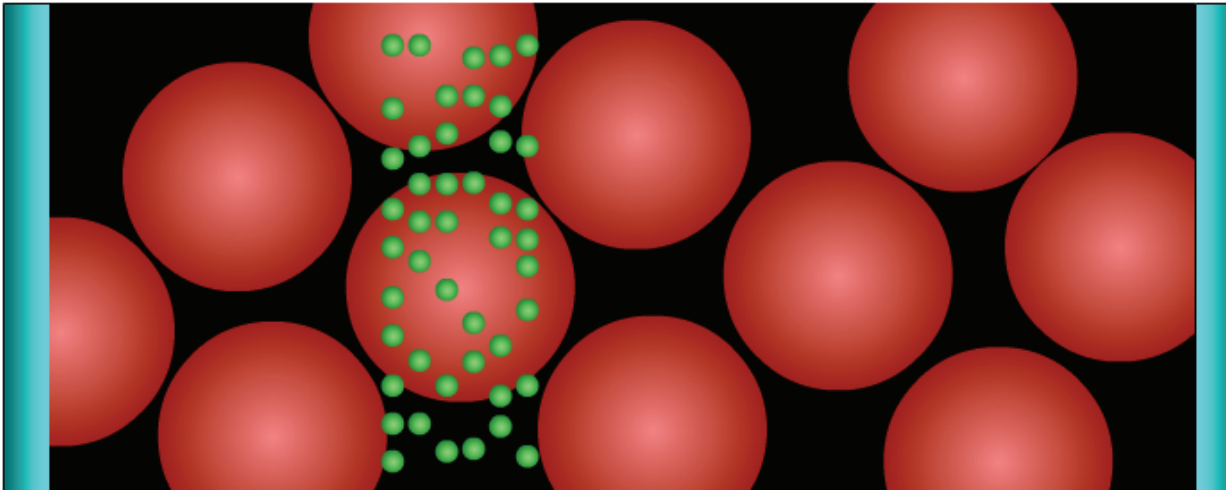


On laisse le pompage en permanence: les atomes se ré-excitent rapidement.

LA CAVITÉ PEROT-FABRY

miroir

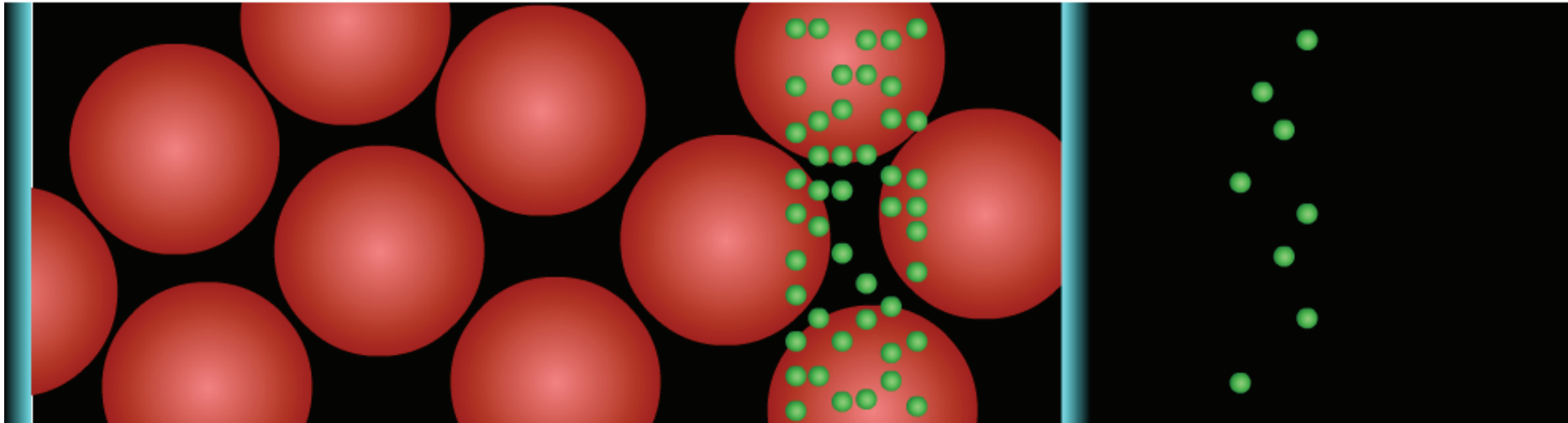
miroir

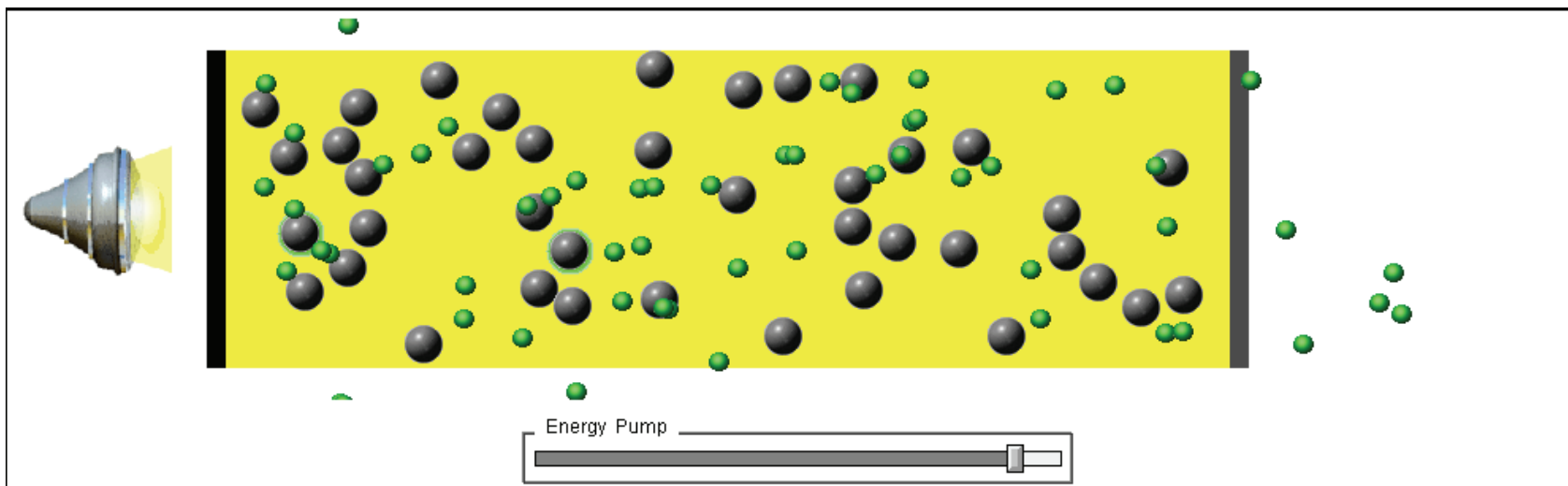


LE LASER

miroir

miroir
partiellement
réfléchissant





1955 - 1960 : LE LASER

Que faut-il faire ?

- trouver le bon couple

atome
ou
molécule

longueur
d'onde

pas évident, mais on trouvera bien

- exalter le processus d'amplification

impossible de faire une cavité résonnante
(fraction de μm)

OK

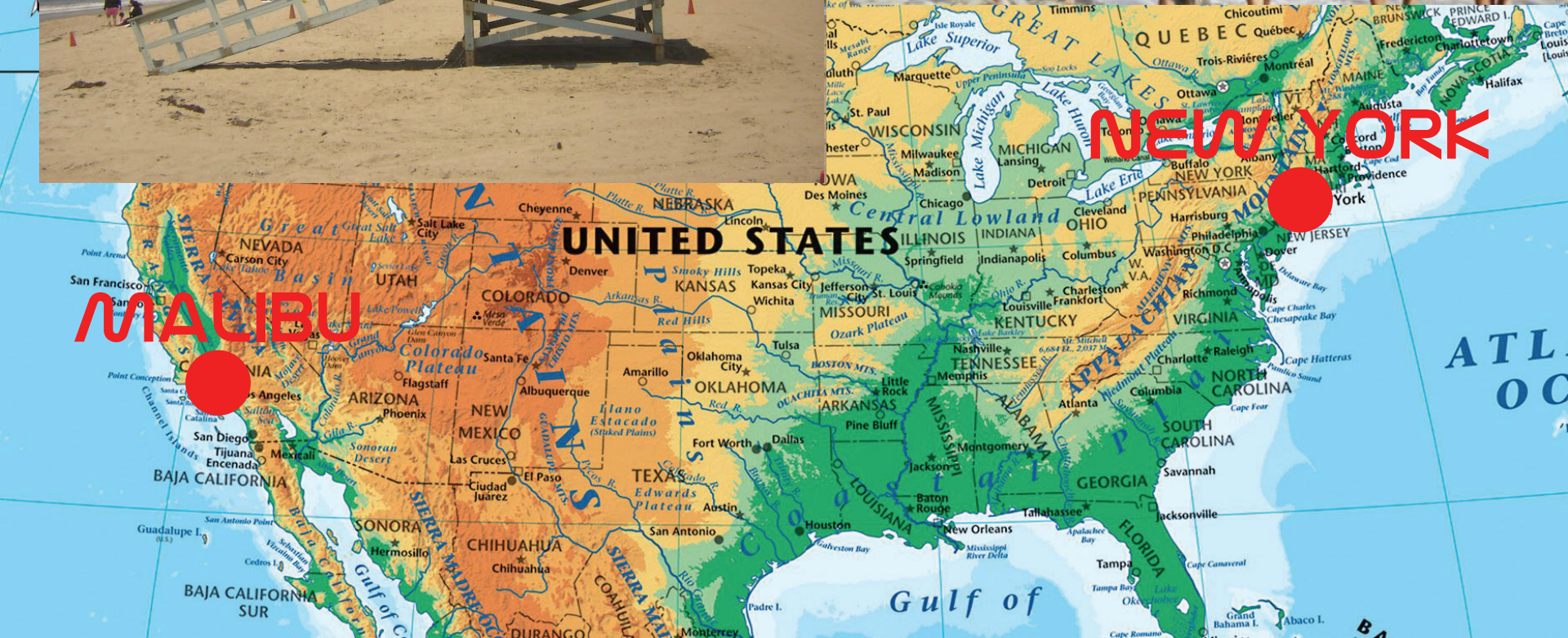
cavité Perot Fabry

1955 - 1960 : LE LASER

- Nov. 1957 : Gould trouve la solution. Il la note dans son cahier de laboratoire, et réalisant l'importance de sa découverte, confie son cahier à un notaire, pour déposer ultérieurement un brevet.
- Fév. 1958 : Arthur Schawlow, un collaborateur de Townes, trouve la solution.
- Mars 1958 : Gould quitte Columbia, et accepte un emploi à TRG (Technical Research Group)
- Août 1958 : Schawlow et Townes soumettent leur article « Infrared and Optical masers » à Physical Review.
- Sept. 1958 : TRG signe avec l'ARPA un contrat de \$1 million pour développer le laser... sans Gould!
- Déc. 1958 : L'article « Infrared and Optical masers » de Schawlow et Townes est publié.

Commence alors la course à la réalisation du premier laser.

1955 - 1960 : LE LASER



1955 - 1960 : LE LASER

Déc. 1958 : L'article « Infrared and Optical masers » de Schawlow et Townes est publié.

Juin 1959 : Conférence à l'Université du Michigan
Gould introduit l'acronyme LASER, Schawlow désapprouve (LOSER)

Sept. 1959 : Conférence à New York (1st Quantum Electronics Conference)
Schawlow exclut le rubis des candidats possibles

16 mai 1960 : Theodore Maiman réalise le premier laser
Hughes Research Laboratories (Malibu)



1955 - 1960 : LE LASER



1955 - 1960 : LE LASER



1955 - 1960 : LE LASER



Laser à rubis
pompé par flash

1955 - 1960 : LE LASER



Laser à rubis
pompé par flash

1955 - 1960 : LE LASER



Kao	Zewail	Townes	C-T	Kroemer	Bloembergen
2009	1999	1964	1997	2000	1981
fibres	spectro		optoélectronique		onl

LA SOLUTION

1964: prix Nobel de Physique à

Charles Townes

Nikolay G. Basov

Aleksandr M. Prokhorov

Pour des travaux fondamentaux dans le domaine de l'électronique quantique, conduisant à la construction d'oscillateurs et d'amplificateurs basés sur le principe du maser-laser.

1966: prix Nobel de Physique à

Alfred Kastler

Pour la découverte et le développement de méthodes optiques pour l'étude des résonances hertziennes dans les atomes.

1981: prix Nobel de Physique à

Arthur Schawlow

Pour le développement de la spectroscopie laser

LA SOLUTION

Théodore Maiman

nominé 2 fois pour le Nobel mais ne l'a jamais eu
Wolf prize en 1984
Japan prize en 1987

Gordon Gould

National Inventor Hall of Fame in 1991

Il intente de nombreux procès pour que l'on reconnaisse ses brevets et ses droits sur l'invention du laser
En 1987, il remporte enfin sa bataille juridique. Il touche des droits sur l'ensemble des lasers fabriqués, et devient millionnaire.

1955 - 1960 : LE LASER

- Déc. 1958 : L'article « Infrared and Optical masers » de Schawlow et Townes est publié.
- Juin 1959 : Conférence à l'Université du Michigan
Gould introduit l'acronyme LASER, Schawlow désapprouve (LOSER)
- Sept. 1959 : Conférence à New York (1st Quantum Electronics Conference)
Schawlow exclut le rubis des candidats possibles
- 16 mai 1960 : Theodore Maiman réalise le premier laser
- Juin 1960 : Maiman soumet ses résultats pour publication à Physical Review Letters. Son article est refusé. Il soumet un résumé de 300 mots à Nature, qui l'accepte.
- 7 juillet 1960 : Hughes Research Labs organise une conférence de presse pour annoncer la réalisation du premier laser.

1955 - 1960 : LE LASER

Light Amplification Claimed by Scientist

By JOHN A. OSMUNDSEN

Achievement of the first true amplification of light was claimed here yesterday by a Hughes Aircraft Company scientist.

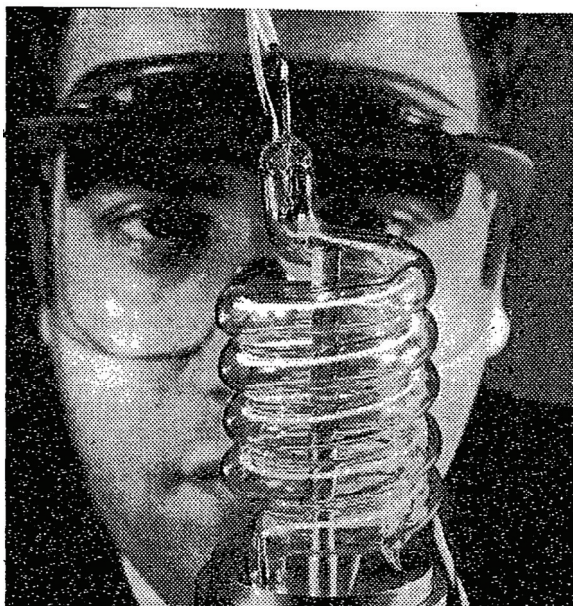
The feat was said to have been accomplished with an experimental device developed at the company's research laboratories in Culver City, Calif.

Such a device, once perfected, could generate a fine light beam of sufficient intensity to illuminate from the earth small swaths of the moon's surface or to vaporize materials placed in its path. The distance to the moon is 238,840 miles.

A light signal is said to be amplified if its power is increased without changes in its wave length or frequency.

The light would also be of such purity as to permit more precise studies of the structure

Continued on Page 7, Column 5



SUPER LIGHT SOURCE: Dr. Theodore H. Maiman of Hughes Aircraft Company, Culver City, Calif., studies new electronic device called a laser. A light source surrounds a rod of synthetic ruby crystal that, when properly activated, can generate a "coherent" beam of light brighter than that emitted by the center of the sun.

LAMP TO AMPLIFY LIGHT IS REPORTED

Continued From Page 1, Col. 1

of matter than are now possible. It also could be used as an information-carrier of unprecedented fidelity.

Thus, new systems for space and earth-bound communications, new tools for scientific research, and conceivably even a death ray—classical in concept—are potential developments that might come from the sort of device described to the press by Dr. Theodore H. Maiman of Hughes' research laboratories. The meeting was held at the Delmonico Hotel.

The light amplifier belongs to a class of devices called "masers." Maser is an acronym for "microwave amplification by stimulated emission of radiation." Microwaves—like radio waves and visible light—are a form of electromagnetic radiation. The Hughes device is an optical maser, or "laser." (The "l" standing for "light") because it amplifies visible electromagnetic radiation (light) rather than the invisible microwave type.

According to the maser principle as conceived in 1955 by Dr. Charles H. Townes of Columbia University, electromagnetic radiation can be amplified from one level of power to a higher one by taking advantage of its interactions with matter.

In the case of the laser, it is light that interacts with a certain group of negatively charged particles called electrons in the crystalline structure of a synthetic ruby.

The electrons involved can occupy one of four energy states, but they spend most of the time in the lowest one.

If the electrons are somehow forced into one of the higher energy states, they absorb energy at a specific frequency. When they "fall" back to the lower energy state, they radiate energy of the same frequency. The electrons can be "pumped" up or made to fall down by sending into the crystal they occupy a signal of electromagnetic energy of that frequency.

The trick is to see that most of the electrons are in a high energy state so that when the electromagnetic signals come in they will fall and radiate, thereby adding to the strength of the incoming signal or amplifying it. It is also necessary to trap the amplified signal in the crystal so that it will bounce back and forth, stimulating more electrons to radiate and add to the amplification.

The Hughes scientists appear to have solved both of these problems with techniques described earlier by Dr. Townes.

To excite the electrons into a high energy state, they flash a burst of green light at the pinkish crystal. This is called "optical pumping."

To trap the amplified signal, they silvered both ends of the ruby. These "mirrors" then reflect the electromagnetic wave back and forth, permitting it to gain power from electron radiation. A small hole in each mirror allows the input signal to gain entrance to the crystal and the output to leave in a fine beam of pure reddish light.

Dr. Maiman reported a power gain of five for the amplified signal over the input. Amplification by a factor of more than 100 is believed to be necessary for applying the laser.

1955 - 1960 : LE LASER



1955 - 1960 : LE LASER

16 mai 1960 : Theodore Maiman réalise le premier laser

Juin 1960 : Maiman soumet ses résultats pour publication à Physical Review Letters. Son article est refusé. Il soumet un résumé de 300 mots à Nature, qui l'accepte.

7 juillet 1960 : Hughes Research Labs organise une conférence de presse pour annoncer la réalisation du premier laser.

8 juillet 1960 : Les chercheurs de la côte est (Bell Labs, Columbia) lisent le New York Times.

1^{er} août 1960 : Schawlow obtient l'effet laser avec le rubis: observation de l'effet de seuil et du faisceau laser.

6 août 1960 : L'article de Maiman dans Nature paraît.

1^{er} oct. 1960 : L'article de Schawlow dans Physical Review Letters paraît.

Déc. 1960 : Ali Javan (Bell Labs) réalise le premier laser à gaz (HeNe)

LA SOLUTION

1960 : LIDAR

1960 : Première communication téléphonique par laser (Bell Labs)

1961 : Premier recollement de rétine au laser

1962 : Premier laser à semi-conducteur

1963 : Laser CO₂

1963 : Soudage laser

1963 : Théodolite laser

1964 : Premier accident laser (macula brûlée)

1964 : Interview de Maiman dans le New York Times

LA SOLUTION

Developer of the Laser Calls It 'A Solution Seeking a Problem'

*President of Korad Spends
Spare Time Gardening
and Fixing TV Sets*

By **WILLIAM M. FREEMAN**

The man who developed the laser has a six-year-old daughter named Sheri and she has a positive way of speaking: "Daddy can fix anything."



LA SOLUTION

Goldfinger (1964)



LA SOLUTION

- 1966 : Première transmission de données par fibre optique
- 1969 : Mesure de la distance Terre-Lune par laser
- 1974 : Lecteurs de codes barres laser
- 1975 : Commercialisation des imprimantes laser
- fin des 70's : Généralisation de l'usinage laser
- 1982 : Premiers disques optiques
- 1987 : Refroidissement d'atomes par laser
- 1988 : TAT8
- 1993 : Restauration au laser de la façade de la cathédrale d'Amiens
- fin 90's : Développement des micro-ordinateurs grâce aux lasers
- 2000 : Première arme de destruction laser (THEL)

LA SOLUTION

- 1987 : Refroidissement d'atomes par laser
- 1988 : TAT8
- 1993 : Restauration au laser de la façade de la cathédrale d'Amiens
- fin 90's : Développement des micro-ordinateurs grâce aux lasers
- 2000 : Première arme de destruction laser (THEL)
- 2000's : Développement des écrans LCD grâce aux lasers
- 2010 : Picoprojecteurs intégrés aux téléphones mobiles
- fin 2000's : Développement des cellules photovoltaïques grâce aux lasers
- 2010 : Traitement du cancer par laser
- 2012 : Remplacement des bougies d'allumage moteur par des lasers
- 2015 : Fusion par confinement inertiel par laser: 10 millions de degrés

LA SOLUTION

- 2000 : Première arme de destruction laser (THEL)
- 2000's : Développement des écrans LCD grâce aux lasers
- 2009 : Picoprojecteurs intégrés aux téléphones mobiles
- fin 2000's : Développement des cellules photovoltaïques grâce aux lasers
- 2010 : Traitement du cancer par laser
- 2013 : Remplacement des bougies d'allumage moteur par des lasers
- 2015 : Fusion par confinement inertiel par laser: 10 millions de degrés
- 2018 : Déclenchement de la pluie par laser
- 2020 : Le laser stoppe le réchauffement climatique
- 2025 : Le laser résout le problème de la faim en Afrique

EN FRANCE...

En 1960, Jean Robieux travaille à la CSF (aujourd'hui Thalès).

CSF: contribution majeure à l'invention du magnétron et du radar



En 1962, il propose le programme de fusion contrôlée par laser.

Programme lancé par le général De Gaulle

Les américains et les anglais refusent de s'y associer.

Basov a la même idée, indépendamment.

Le programme est lancé dans les laboratoires du CEA et de la CGE (aujourd'hui Alcatel).

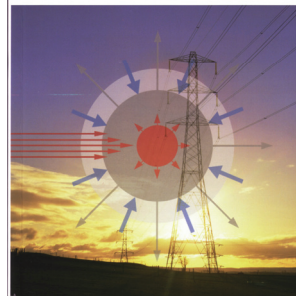
En 1967, la France sait fabriquer des lasers 30 fois plus puissants que les autres pays (500J contre 20J).

Les Etats Unis rejoignent le programme.

1969: première production de protons par fusion laser

**Vers l'Énergie
Abondante
Sans Pollution**

LA FUSION NUCLÉAIRE PAR LASER
Jean Robieux



À LILLE...

En 1966, la CGE et Saint Gobain créent CILAS

CILAS: Compagnie Industrielle des Lasers

L'un des premiers clients: Jean Lemaire, jeune docteur du LSH (V. d'Ascq)

LSH: Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne, créée en 1958 à Lille par R. Wertheimer

Jean Lemaire améliore et développe des lasers CO₂

1971: premiers résultats dans le domaine de la spectroscopie

1978: CERLAM au CHRU de Lille (Jean Marc Brunetaud)

CERLAM: Centre de Recherche sur les Lasers et leurs Applications Médicales

→ Centre Photomédecine (Serge Mordon)

1982: premiers résultats sur la dynamique non linéaire des lasers (LSH)

1982: premiers travaux sur les diodes laser (CHS → IEMN)

CHS: Centre Hyperfréquences et Semiconducteurs

→ IEMN: Institut d'Electronique, Microélectronique et Nanotechnologies

1991: premiers travaux sur les fibres (LDMP)

Centrale photonique de l'IRCICA

IRCICA: Institut de Recherches sur les Composants pour l'Information et la Communication Avancée

Intelligence ambiante

À LILLE...

1982: premiers résultats sur la dynamique non linéaire des lasers (LSH)

1982: premiers travaux sur les diodes laser (CHS → IEMN)

CHS: Centre Hyperfréquences et Semiconducteurs

→ IEMN: Institut d'Electronique, Microélectronique et Nanotechnologies

1991: premiers travaux sur les fibres (LDMP)

Centrale photonique de l'IRCICA

IRCICA: Institut de Recherches sur les Composants pour l'Information et la Communication Avancée
Intelligence ambiante

1994: création du CERLA

CERLA: Centre d'Etudes et de Recherche sur les Lasers et leurs Applications

1998: LSH + LDMP = PhLAM

PhLAM: Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules

2002: création d'Osyris

2004: lancement au PhLAM de l'activité Atomes Froids