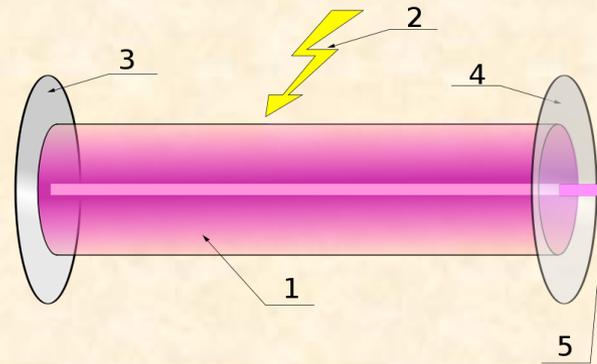


Introduction aux LASERs

I. Physique atomique et principes de base

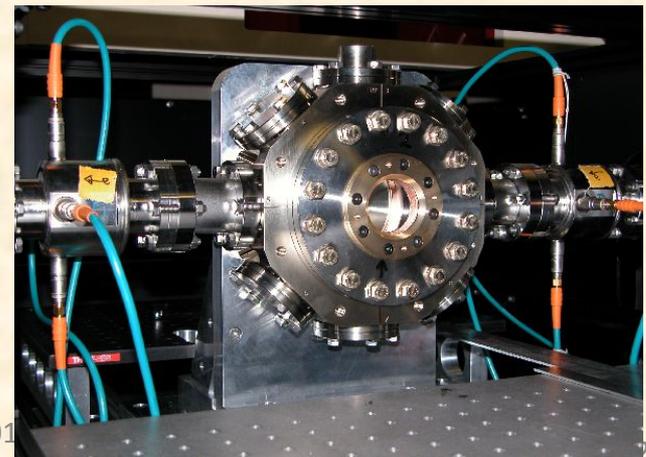
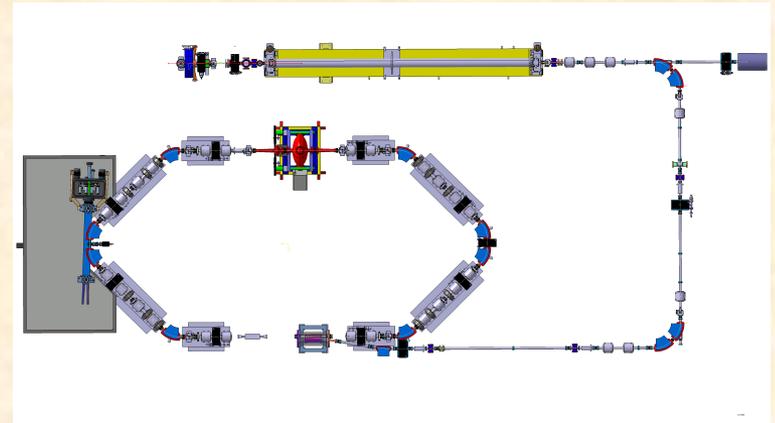
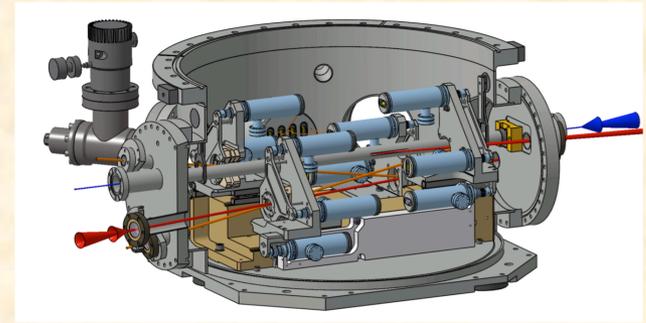


Nicolas Delerue

LAL (CNRS et Univ. Paris-Sud)

Qui suis-je ?

- Chercheur au LAL, Orsay:
 - interactions laser-électrons (ThomX,...)
 - Accélération d'électrons par des lasers de très haute puissance
 - Diagnostics de mesure de longueur de paquets
- Quelques projets précédents (KEK/Japon, Oxford):
 - Mesures de taille de faisceaux d'électrons avec des lasers.
 - Mesures d'émittance
 - Systèmes de retro-action rapides pour l'ILC



Principal notions de ce cours

- Mécanique quantique
- Structure des atomes
- Emission stimulée
- Conditions requise pour l'émission laser: inversion de population, systèmes à plusieurs niveaux.
- Principe de base d'un laser
- Application: séparation isotopique

Bibliographie

- Encyclopedia of laser physics and technology, R. Paschotta, <http://www.rp-photonics.com/> (en anglais)
- A. Siegman, « LASERS » (en anglais)
- S. Hooker, C. Webb, « Laser Physics », (en anglais)

- B. Cagnac et J.P. Faroux, *Lasers* (CNRS Editions, en français)

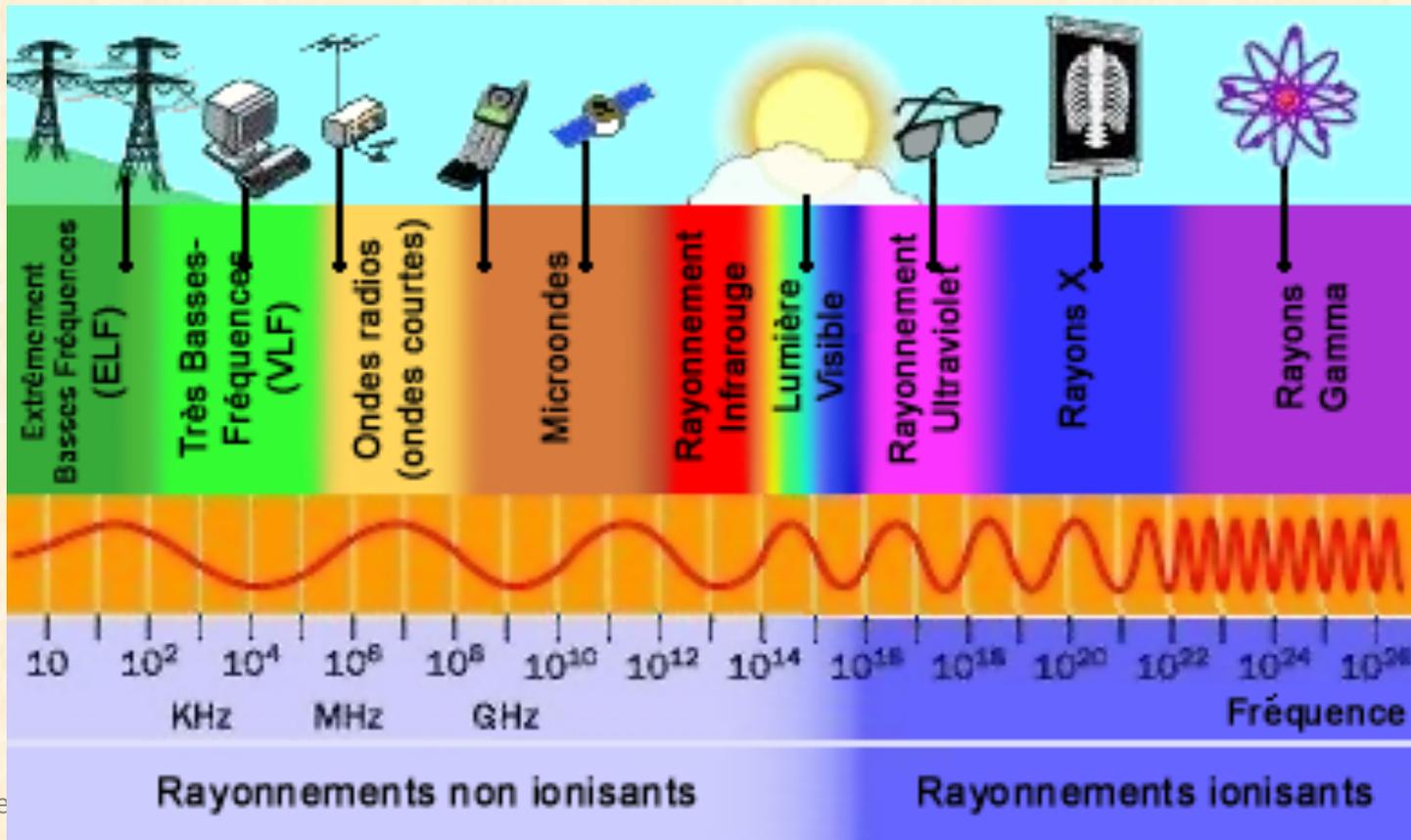
Qu'est-ce qu'un LASER?

- LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- Appareil capable d'émettre de la lumière de manière très intense.
- De nombreuses applications dans la vie courante mais aussi en physique.



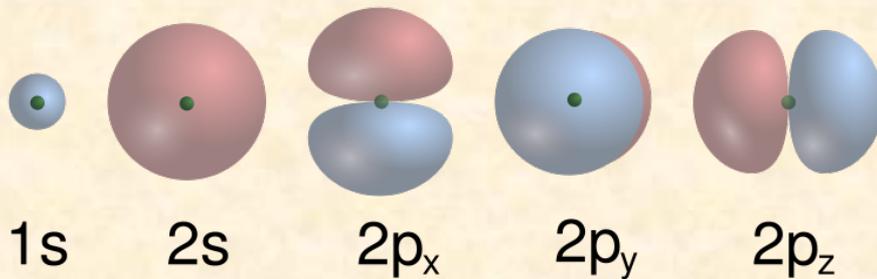
Spectre électromagnétique

- Les photons dont je vais parler dans ce cours ont une énergie plus basse que ceux que nous avons rencontré dans la plupart des autres cours, mais ce sont les même particules.
- Photon visible ~ 1 eV



Mécanique quantique

- Les LASERs utilisent des propriétés spéciales de la matière:
 - A des échelles très petites les objets obéissent à la mécanique quantique.
- En mécanique quantique objets sont tous décrits par des « fonctions d'onde » décrivant l'occupation de l'espace par ces objets.
- Un objet n'est plus en un seul lieu ou dans un seul état, il est partout, dans tous les états à la fois en infime fractions!



$$|\varphi\rangle = \sum_i a_i |\phi_i\rangle$$

Bosons et fermions

- Les fonctions d'ondes des particules obéissent à des statistiques différentes selon leur « spin ».
- Les électrons ont un spin $1/2$ ils obéissent à la statistique de Fermi-Dirac, ce sont des fermions. Leurs fonctions d'ondes sont anti-symétriques.

$$\Psi(x, y) = -\Psi(y, x)$$

- Les photons (particules de lumière) ont un spin 1 . Ils obéissent à la statistique de Bose-Einstein, ce sont des bosons.

Leurs fonctions d'ondes sont symétriques.

$$\Psi(x, y) = \Psi(y, x)$$

Statistique de Fermi-Dirac: Principe d'exclusion de Pauli

- Le principe d'exclusion de Pauli résulte de l'antisymétrie des fonctions d'ondes des fermions. $\Psi(x, y) = -\Psi(y, x)$
 $\Rightarrow \Psi(x, x) = 0$
- La probabilité que deux fermions se trouvent dans le même état est nulle!
- Deux fermions (par exemple deux électrons) ne peuvent pas se trouver au même endroit, dans le même état, au même moment!

Statistique de Bose-Einstein

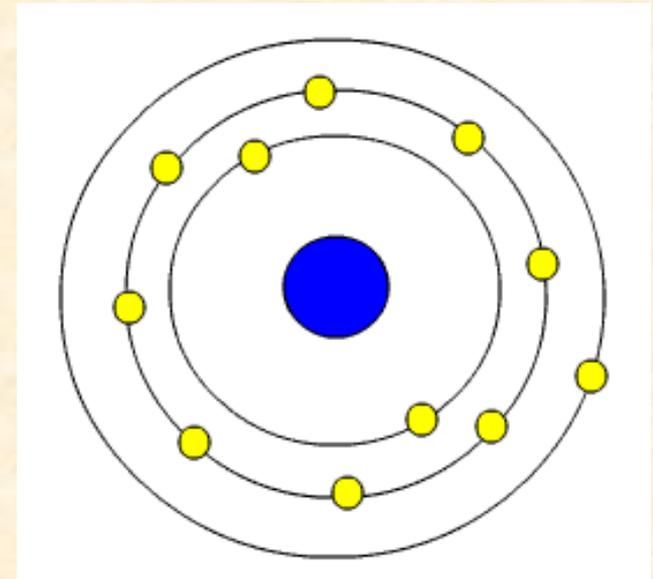
- Contrairement aux Fermions, les bosons peuvent se trouver dans le même état.

$$\Psi(x, y) = \Psi(y, x)$$

- Leur comportement est décrit par la statistique de Bose-Einstein.
- Deux bosons (photons) se trouvant dans des états quantique proche vont se mettre dans le même état quantique.
- C'est sur ce principe que repose l'émission LASER.

Structure d'un atome

- Le principe d'exclusion de Pauli a des conséquences importantes sur les structure des atomes.
- Les atomes sont formés d'un noyau entouré par un nuage d'électrons.
- Les électrons ne peuvent se trouver que sur des orbites définies.
- En application du principe d'exclusion de Pauli les électrons se trouvant sur une même orbite doivent se trouver dans des états différents (par exemple différents spin ou différent moment angulaire).



<http://www.school-for-champions.com>

Structure d'un atome (2)

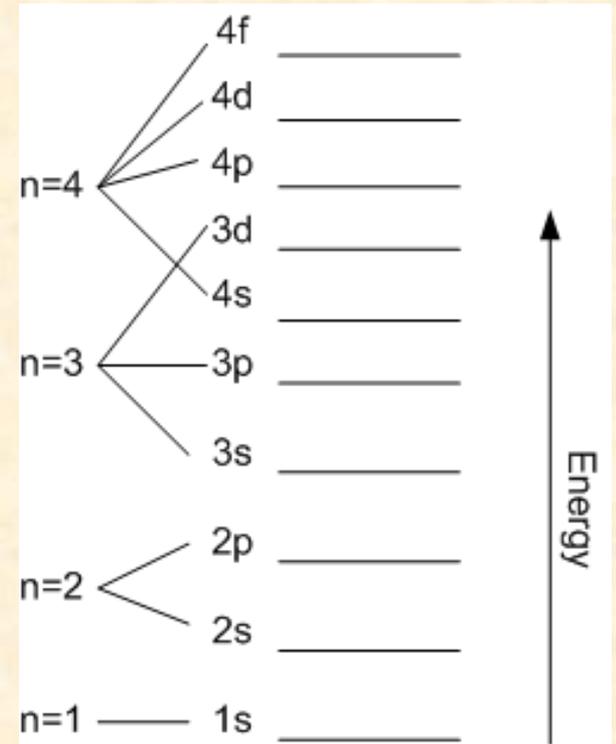
- Dans un atome au repos, les électrons remplissent les orbitales en commençant par celle la plus proche du noyau.
- Les orbitales suivantes ne sont remplies que lorsque les orbitales les plus basses sont complètement remplies.
- A chaque atome correspond une configuration électronique spécifique.

	1s	2s	2p _x	2p _y	2p _z
H: 1s	↑	○	○	○	○
He: 1s ²	↑↓	○	○	○	○
Li: 1s ² 2s	↑↓	↑	○	○	○
Be: 1s ² 2s ²	↑↓	↑↓	○	○	○
B: 1s ² 2s ² 2p	↑↓	↑↓	↑	○	○
C: 1s ² 2s ² 2p ²	↑↓	↑↓	↑	↑	○
N: 1s ² 2s ² 2p ³	↑↓	↑↓	↑	↑	↑
O: 1s ² 2s ² 2p ⁴	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑
F: 1s ² 2s ² 2p ⁵	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑
Ne: 1s ² 2s ² 2p ⁶	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓

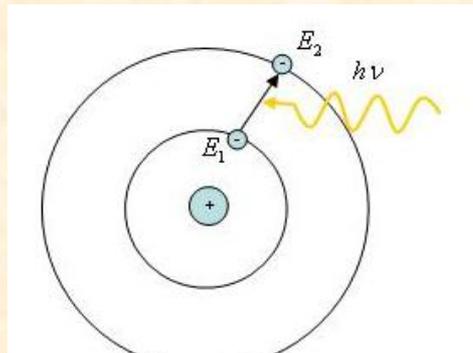
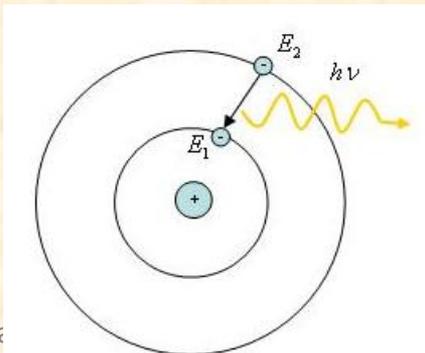
<http://www.culturediff.org>

Niveaux d'énergie

- L'orbite atomique définit l'énergie cinétique et les propriétés de l'électron.
- Chaque orbite correspond donc à un niveau d'énergie différent.
- Lorsque les électrons passent d'un niveau à un autre ils doivent absorber ou émettre de l'énergie sous la forme d'un photon.

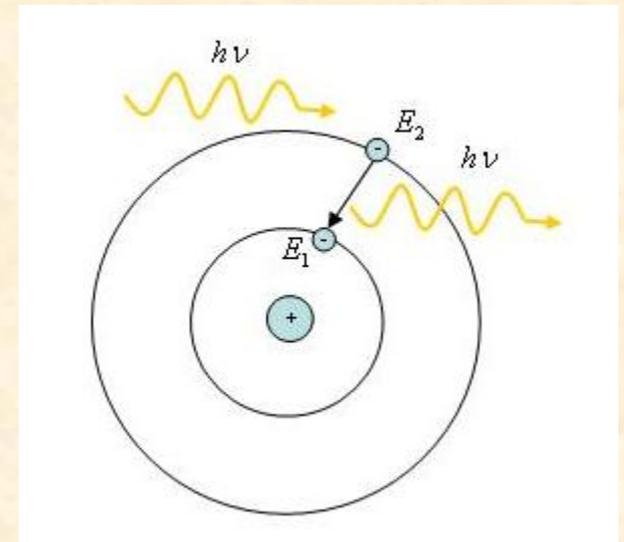
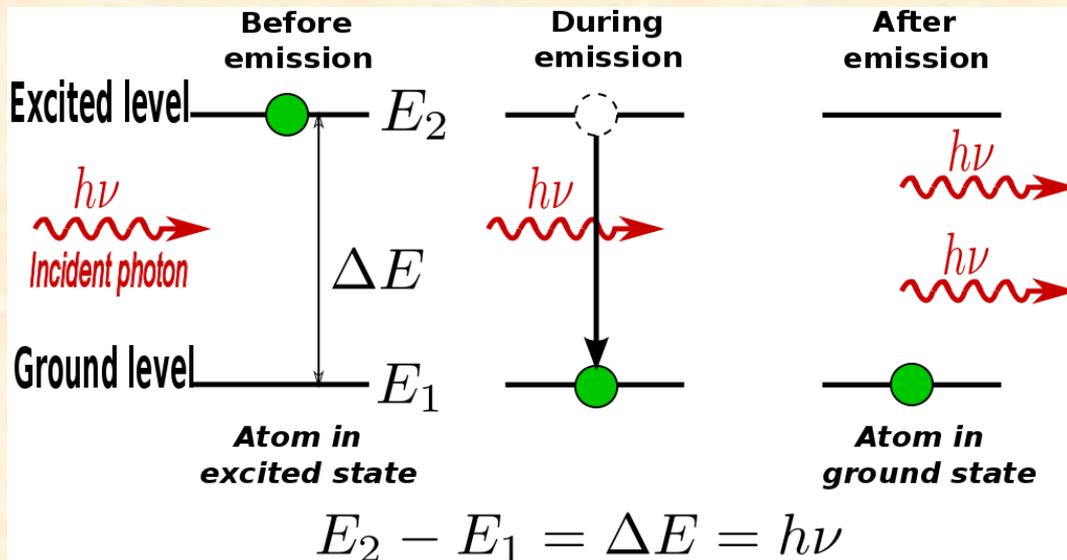


<http://wikipedia.org>



Emission stimulée

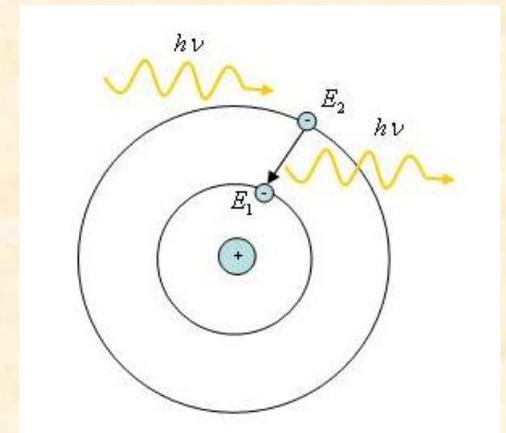
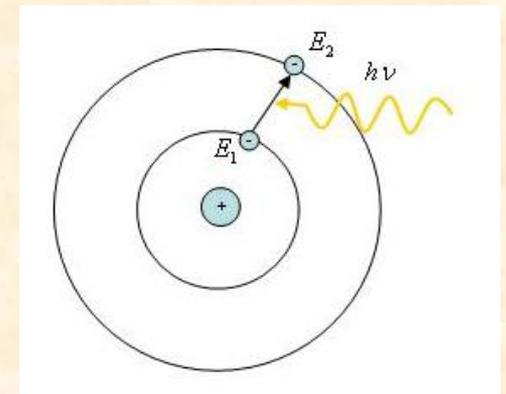
- Un photon incident sur un atome dans un état excité peut entraîner la désexcitation de cet atome (si il a la bonne longueur d'onde).
- Cela s'appelle une « émission stimulée ».
- Les lasers reposent sur l'émission stimulée.



<http://www.thespectroscopynet.eu/>

Inversion de population

- Un photon de longueur d'onde $(E_1 - E_2)/h$ peut donc:
 - soit faire passer un électron de E_1 à E_2
 - soit stimuler l'émission d'un photon de même longueur d'onde en faisant passer un électron de E_2 à E_1 .
- Ces deux processus sont en compétition.
- Pour que l'émission stimulée domine il faut que la probabilité de passer de E_2 à E_1 soit plus grande que la probabilité de passer de E_1 à E_2 .
- Il faut donc qu'il y ait plus d'électrons dans l'état 2 que dans l'état 1.
- Pour qu'il y ait émission stimulée il faut qu'il y ait « inversion de population » entre 1 et 2.
- Nous allons voir comment...



Agitation thermique

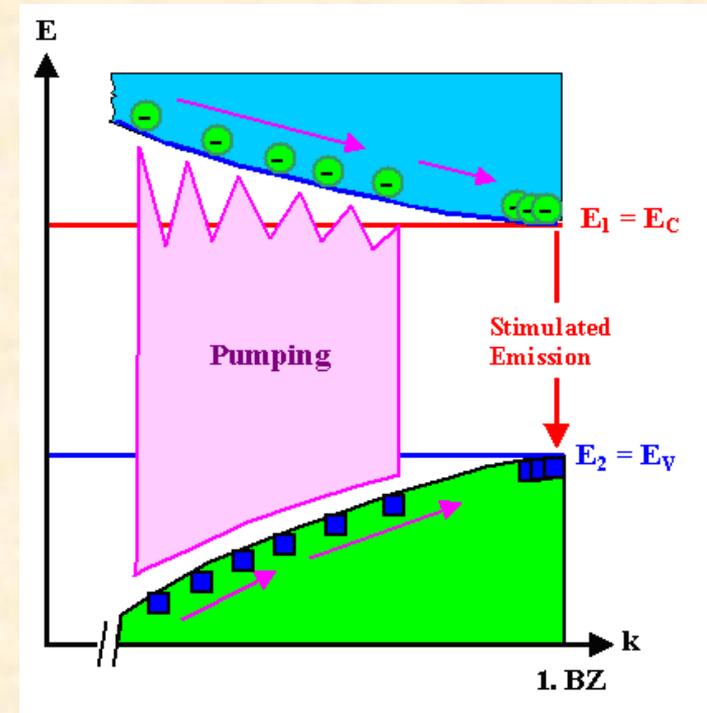
- Agitation thermique
=> Transition vers des niveaux plus haut.
- A l'équilibre thermique le rapport de population entre deux niveaux d'énergie est donné par la loi de Boltzmann:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}} = \frac{g_2}{g_1} e^{\frac{-h\nu}{kT}}$$

- g_1 et g_2 sont des constantes correspondant au nombre de sous-niveaux (dégénérescence).
- k est la constante de Boltzmann, T la température
- Retour au niveau le plus bas => émission de photon
- Vu qu'il y a équilibre thermique, il n'y a pas inversion de population!

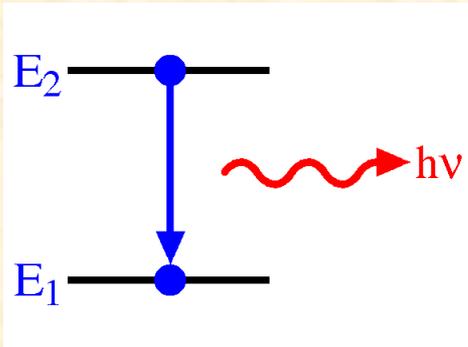
Pompage

- Une autre solution pour obtenir des électrons dans un niveau d'énergie haut est de les « pomper » d'un niveau bas vers un niveau haut. (nous verrons plus tard comment).
- Le pompage est indispensable pour obtenir une inversion de population.



<http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/>

Coefficients d'Einstein



$$\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{A_{21}} = A_{21}n_2$$

Einstein a proposé 3 coefficients pour décrire l'équilibre entre émission et absorption:

- émission spontanée

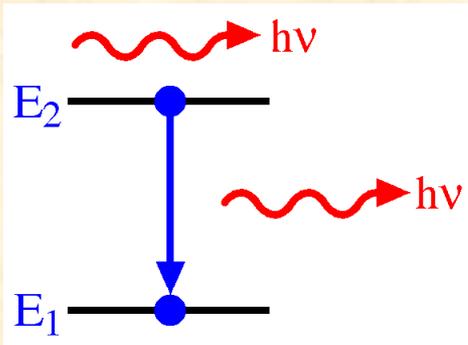
$$A_{21} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

- émission stimulée

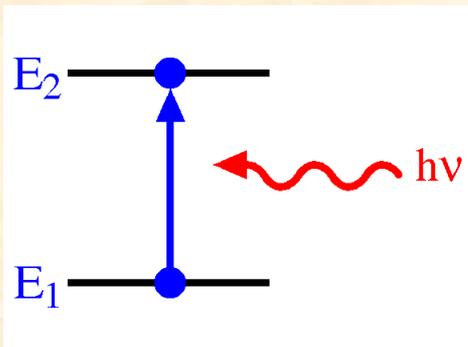
$$B_{21} \text{ (sr.m}^2\text{.J}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{)}$$

- Absorption de photon

$$B_{12} \text{ (sr.m}^2\text{.J}^{-1}\text{.s}^{-1}\text{)}$$



$$\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{B_{21}} = B_{21}n_2\rho(\nu)$$



$$\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{B_{12}} = -B_{12}n_1\rho(\nu)$$

Equilibre entre deux niveaux d'énergie

- Ces trois coefficients doivent s'annuler.

$$0 = A_{21}n_2 + B_{21}n_2I(\nu) - B_{12}n_1I(\nu)$$

- Nous avons vu précédemment la loi d'équilibre entre niveaux:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}} = \frac{g_2}{g_1} e^{\frac{-h\nu}{kT}}$$

- Ajoutons la loi de Planck (corps noir):

$$I(\nu) = \frac{F(\nu)}{e^{h\nu/kT} - 1}; F(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2}$$

Equilibre entre deux niveaux d'énergie (2)

- Ce qui donne la loi d'équilibre suivante:

$$A_{21}g_2e^{-h\nu/kT} + B_{21}g_2e^{-h\nu/kT} \frac{F(\nu)}{e^{h\nu/kT} - 1} = B_{12}g_1 \frac{F(\nu)}{e^{-h\nu/kT} - 1}$$

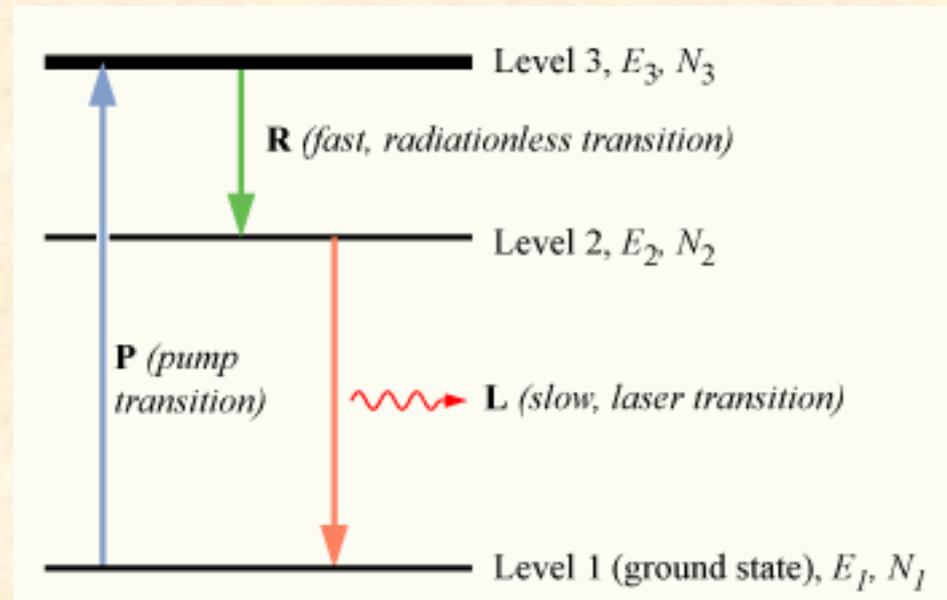
$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = F(\nu)$$

$$\frac{B_{21}}{B_{12}} = \frac{g_1}{g_2}$$

- Il n'est pas possible d'avoir une inversion de population simplement entre deux niveaux atomiques, les atomes pompés retombent toujours dans l'état le plus bas sans provoquer d'émission stimulée.

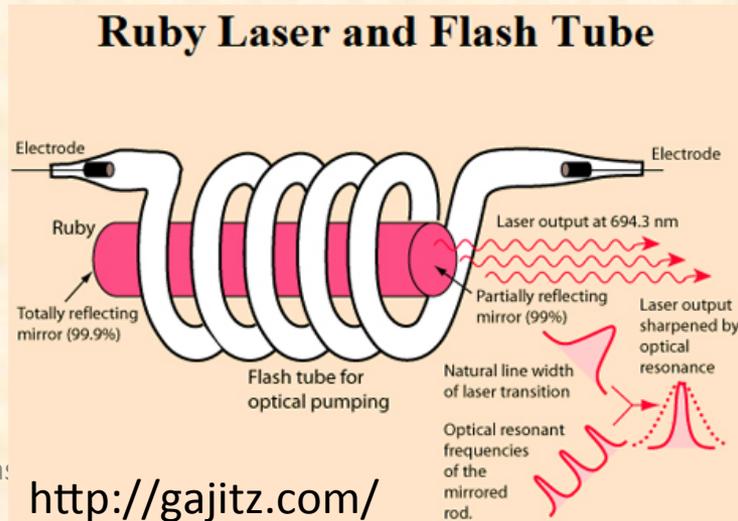
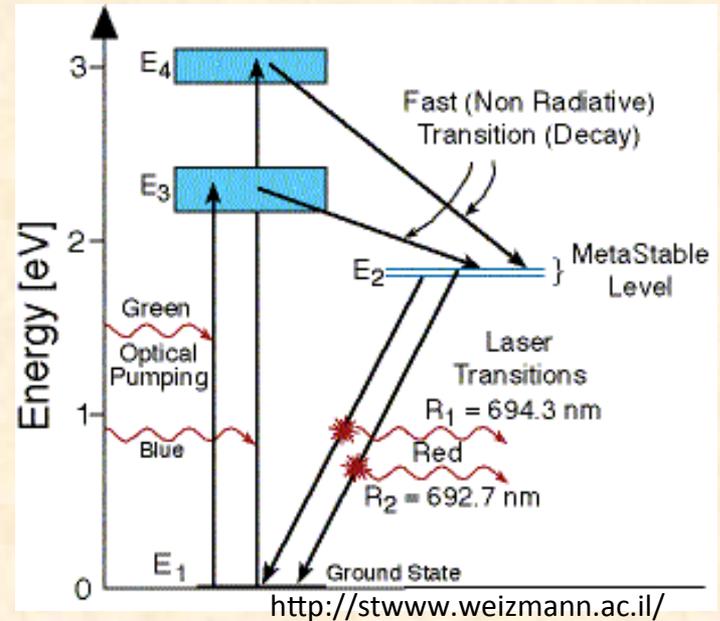
Systeme à 3 niveaux

- Pour atteindre une inversion de population, il est possible d'utiliser un système à 3 niveaux:
- La pompe amène les atomes du niveau 1 (état au repos) à un niveau 3 (excité).
- Le niveau 3 doit être choisi de manière à ce que les atomes dans cet état puissent passer facilement dans un autre état 2 (et non pas retomber dans l'état 1).
- Par contre le passage de 2 à 1 doit être difficile (hors émission stimulée).
- Une inversion de population est alors possible.
- Cela requiert un pompage rapide de manière à ce que au moins la moitié des atomes passent de l'état 1 à l'état 2 (via 3).



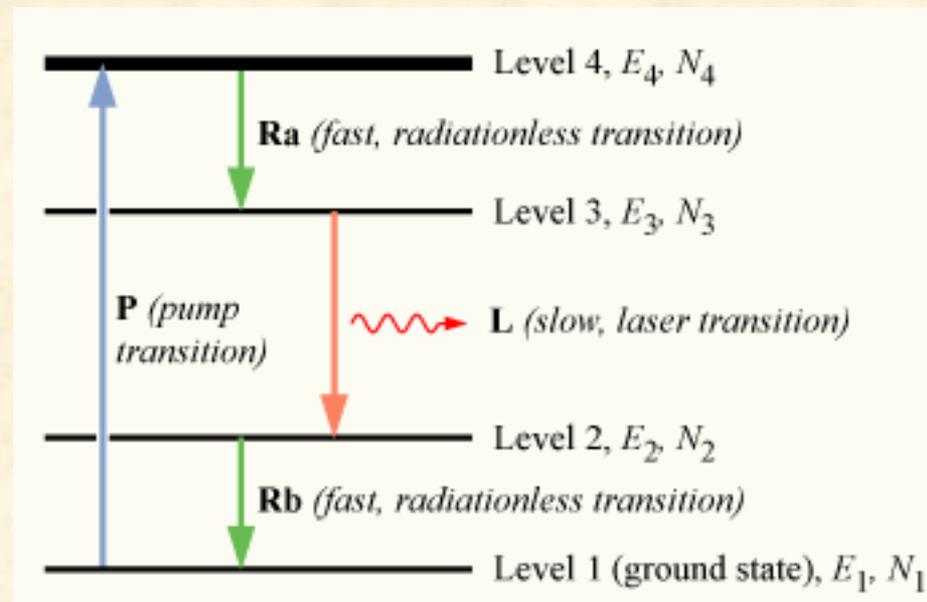
Le laser à Rubis

- Le premier laser construit (en 1960) utilisait un rubis ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) (artificiel) comme milieu d'amplification.
- Il était pompé par une lampe à décharges (flash) enroulée autour du cristal de rubis.
- Un laser à rubis repose sur un système à 3 niveaux.



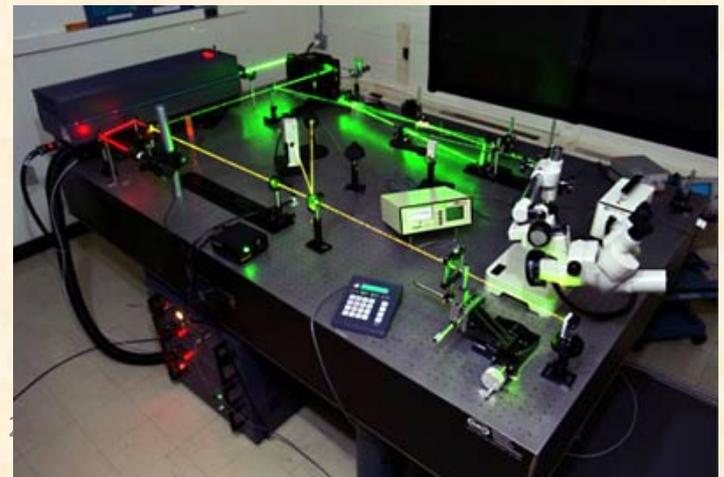
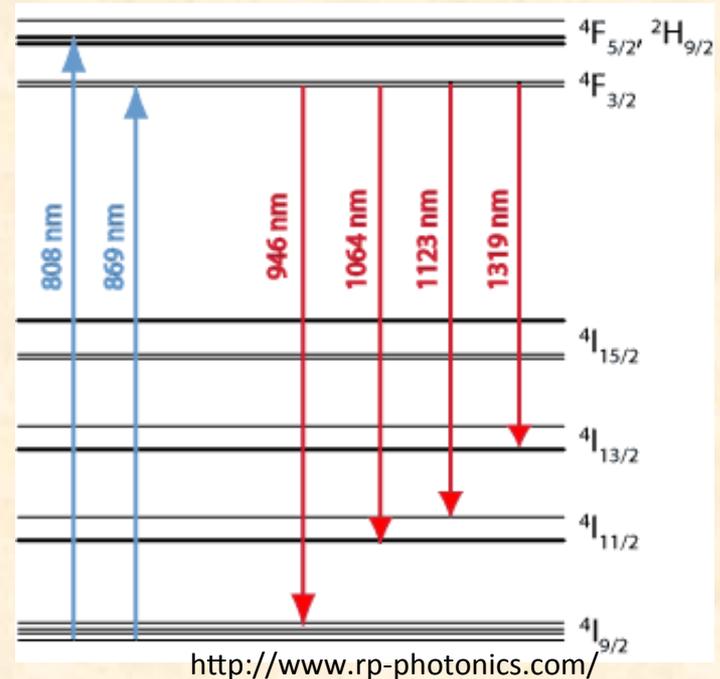
Système à 4 niveaux

- Il est possible de créer un système plus efficace en utilisant un système à 4 niveaux.
- Dans un système à 4 niveaux, la pompe amène les atomes du niveau fondamental 1 au niveau 4.
- Comme dans un système à 3 niveaux les atomes effectuent alors une transition rapide vers le niveau 3.
- En bas, il faut aussi qu'il existe une transition rapide du niveau 2 vers le niveau 1 de manière à ce que très peu d'atomes restent dans le niveau 2.
- Il devient alors très facile d'obtenir une inversion de population: un atome dans le niveau 3 et aucun dans le niveau 2 suffit.



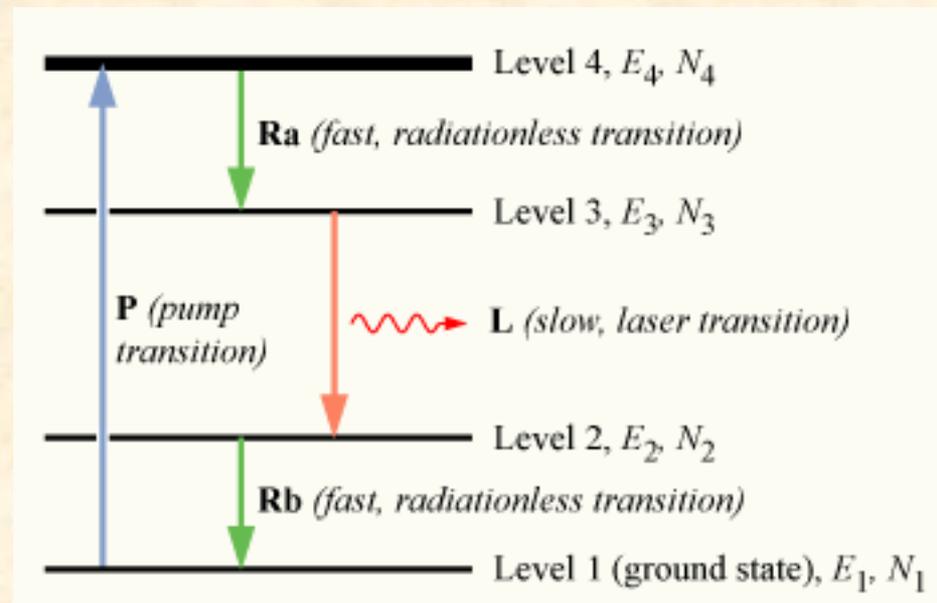
Laser Nd:YAG

- Le laser Nd:YAG (grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme, $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) est l'un des plus populaires.
- L'émission à 1064nm se fait par un processus à 4 niveaux (pompage à 808nm).
- Les cristaux de Nd:YAG sont relativement facile à produire.
- Les lasers Nd:YAG sont capable de produire des faisceaux de plusieurs MW.



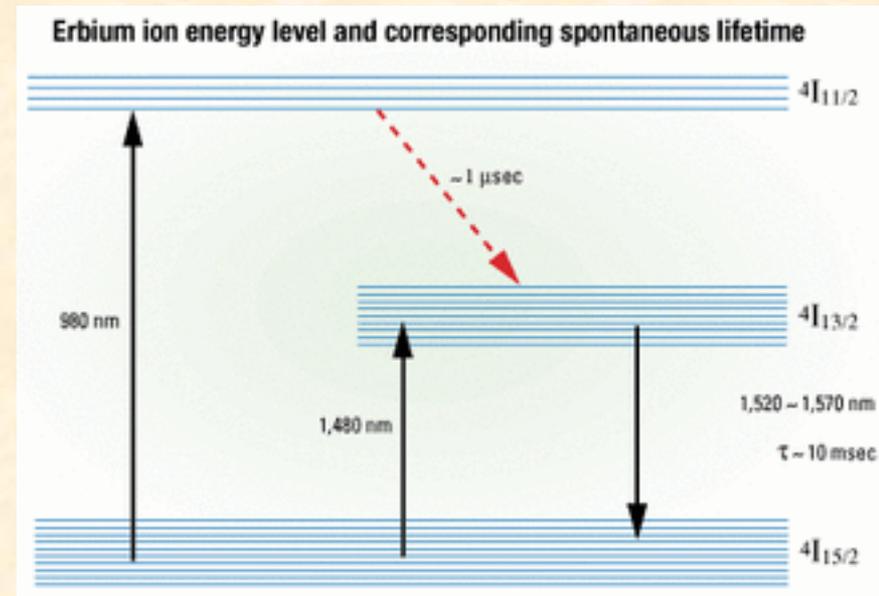
Systeme à quasi-3 niveaux

- Si la distance entre les niveaux 1 et 2 d'un système à 4 niveaux est trop faible, le niveau 2 va être partiellement peuplé.
- Dans ce cas il ne suffit pas de quelques atomes dans le niveau 3 pour avoir une inversion de population, il en faut plus.
- Il en faut tout de même moins que dans un système à 3 niveaux.
- Cela s'appelle un système à quasi-3 niveaux.



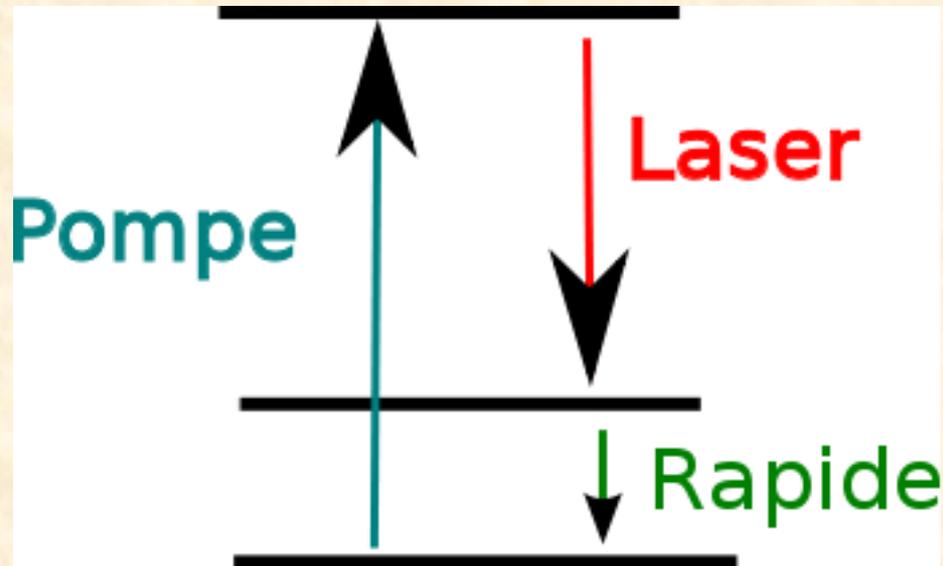
Les lasers dopés à l'erbium

- Les lasers dopés à l'erbium sont parmi les plus courants puisqu'ils sont utilisés dans les télécommunications.
- Ce sont des lasers quasi-3 niveaux.
- L'erbium peut facilement se mélanger à la silice pour former des fibres optiques, d'où son utilisation comme amplificateur à fibre dans les télécommunications.



Question

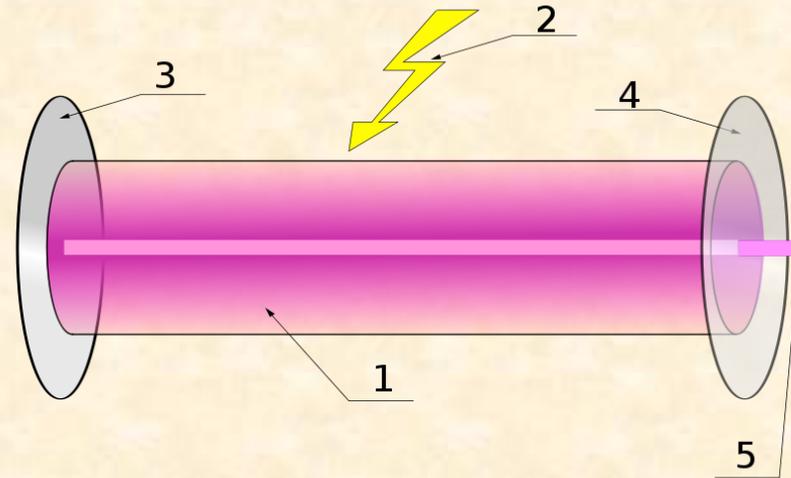
- Quelles seraient les propriétés d'un système à 3 niveaux inversés?



Réponse

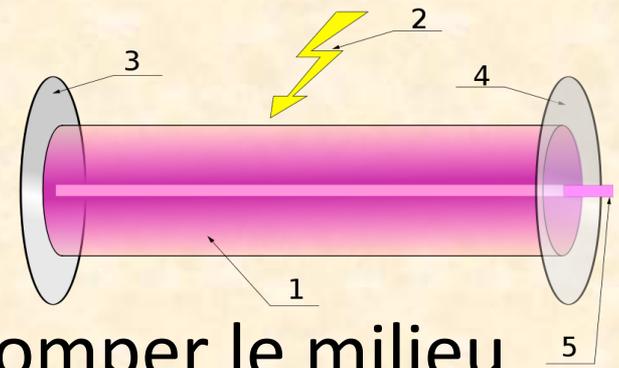
- Dans ce système il existe une transition du niveau fondamental au niveau le plus haut.
- Il est difficile de maintenir suffisamment de population dans l'état haut sans que celle-ci ne retombe dans l'état fondamental sans attendre une émission stimulée (cas d'un système à deux niveaux).

Principe de base d'un laser

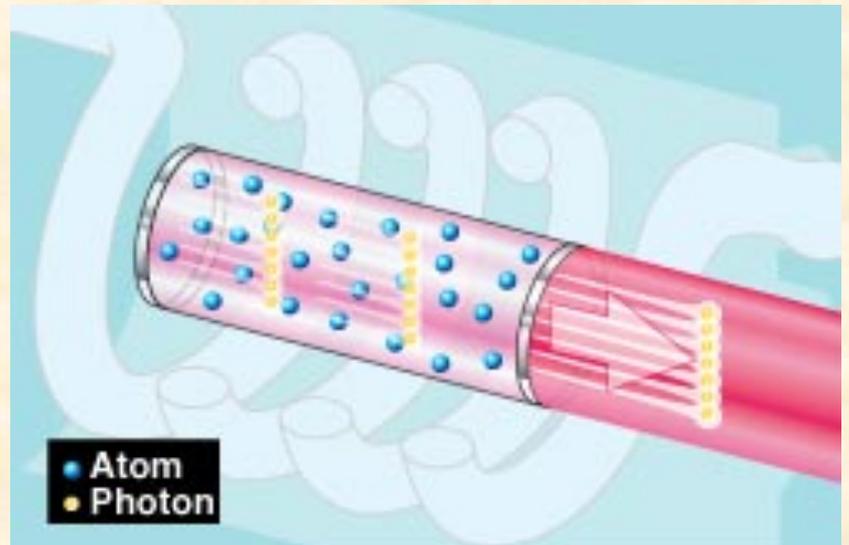
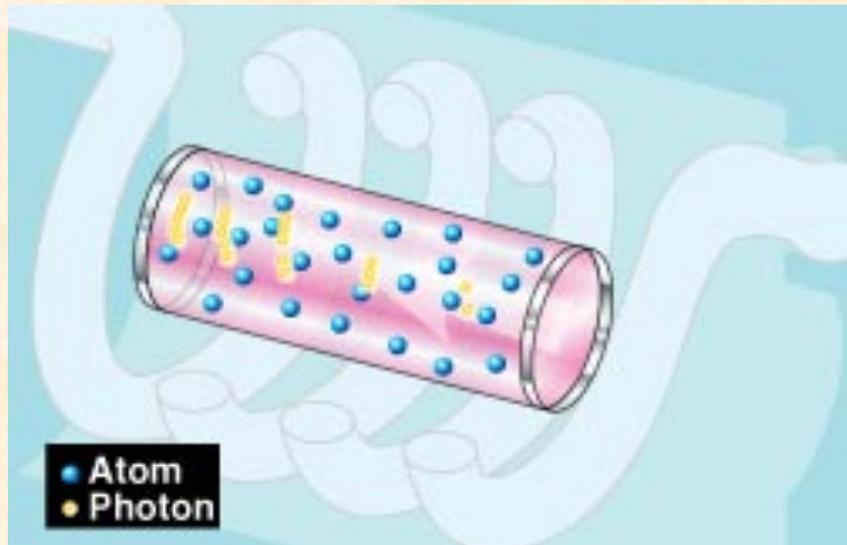
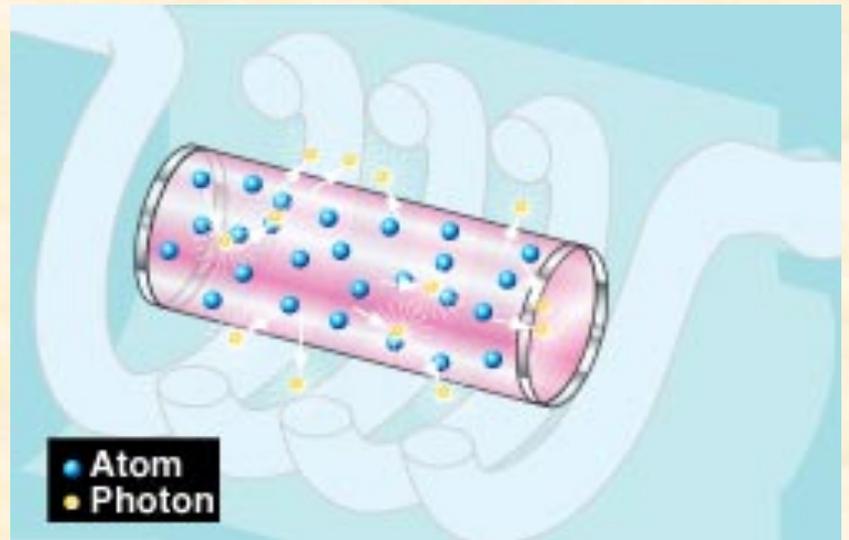
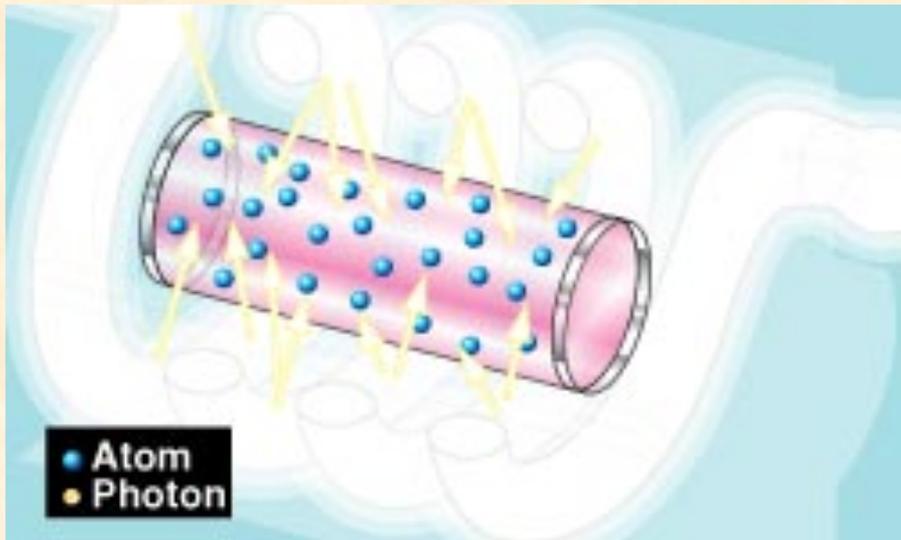


- (1) Milieu amplificateur (le plus souvent un cristal mais parfois un gaz)
- (2) Pompe (lumière ou autre)
- (3) Miroir de haute réflectance
- (4) Miroir ayant une transmittance non nulle
- (5) Radiation (lumière) émise

Fonctionnement

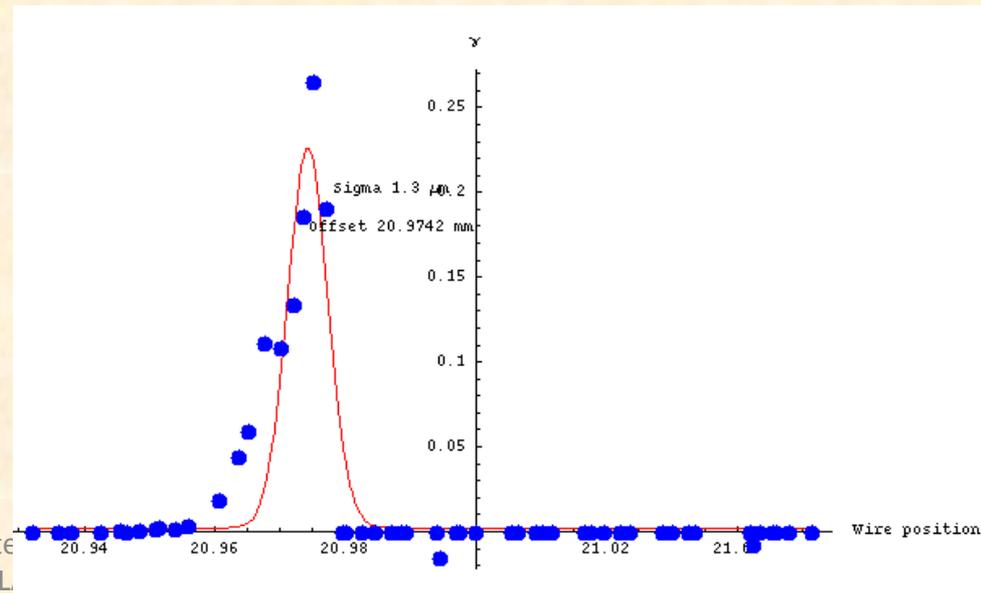


- Pour démarrer un laser il faut pomper le milieu amplificateur.
- Des photons vont alors être émis par émission spontanée.
- Ils vont entraîner avec eux d'autres photons par émission stimulée.
- Progressivement un régime continu s'installe: une partie des photons émis est réfléchi sur les miroirs et remplit la cavité entraînant l'émission de d'autres photons.



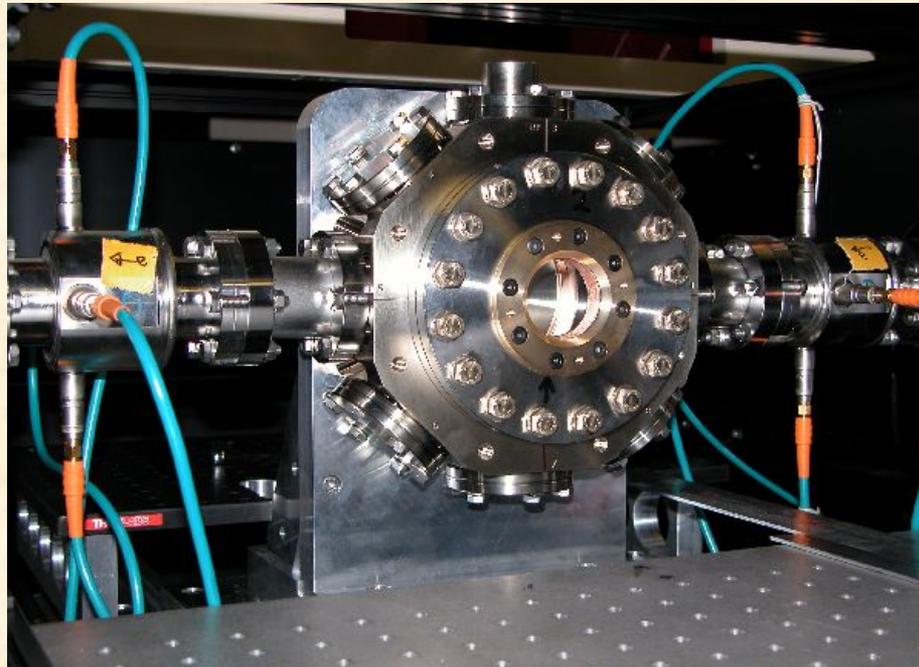
Application: laser-wire

- Dans un accélérateur de particules il est important de connaître la taille des faisceaux de particules.
- L'une des méthodes utilisées pour faire cela est d'utiliser un fil métallique « wire-scanner » qui traverse le faisceau de particules.
- Cependant avec des faisceaux de haute intensité ce fil peut casser.



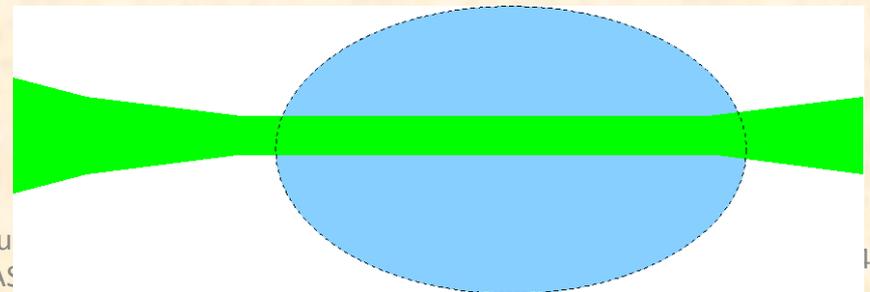
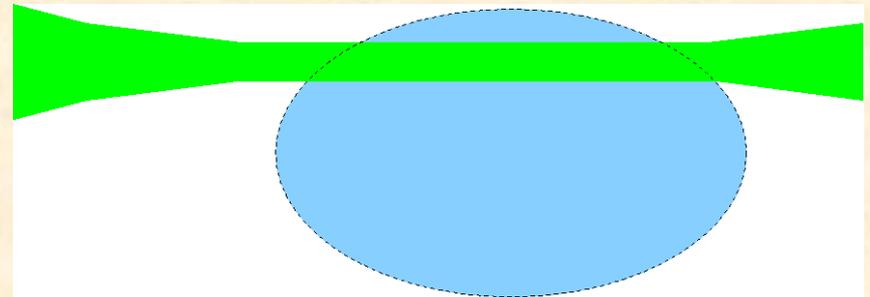
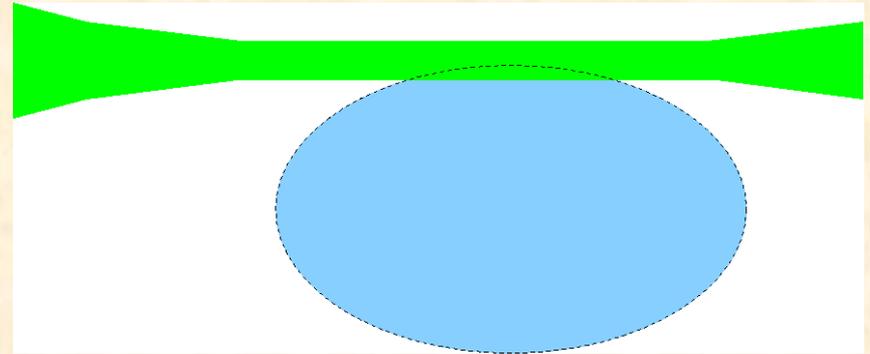
Application: laser-wire (2)

- Pour éviter ce genre d'incident il a été proposé de remplacer le fil par un laser.
- Le laser est progressivement inséré dans le faisceau.



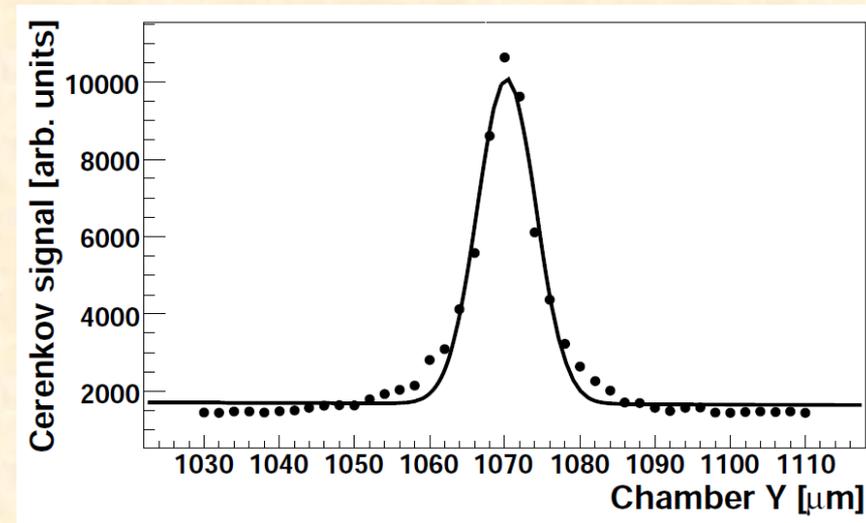
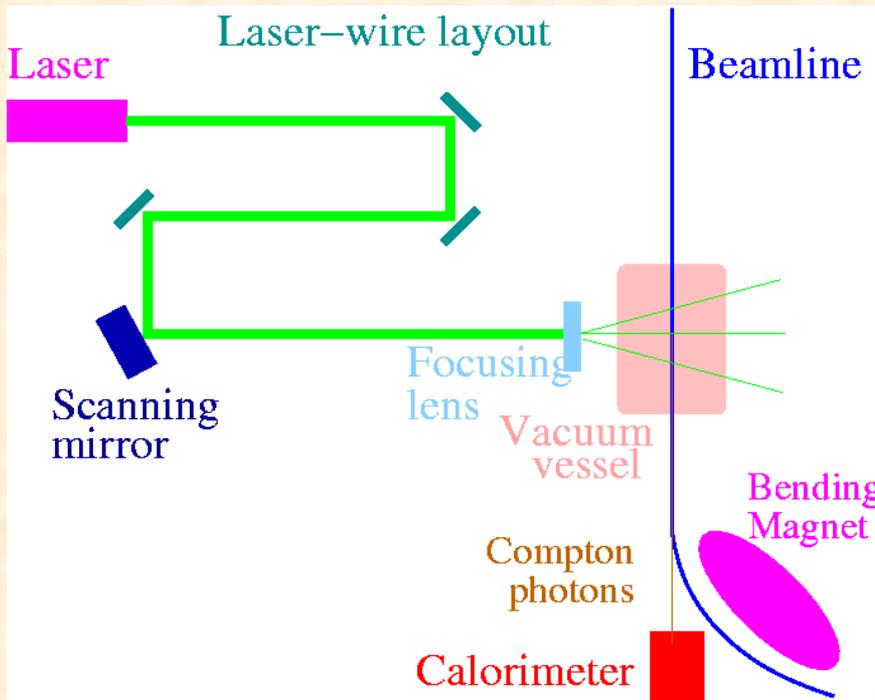
Application: laser-wire (3)

- Le laser est progressivement inséré dans le faisceau.
- A chaque pas il interagit avec les électrons par interaction Compton, amenant à la production de rayons X.



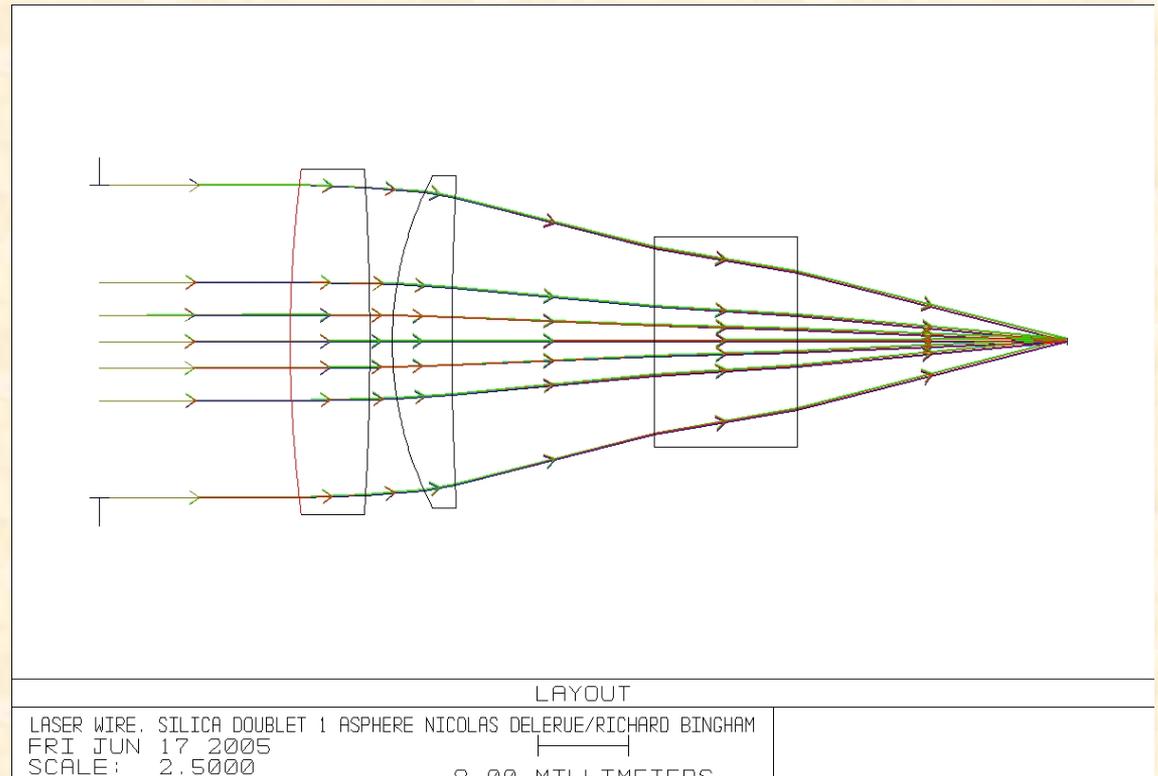
Application: laser-wire (4)

- Les rayons X sont détectés par un calorimètre situé plus loin.
- L'amplitude de ces rayons X en fonction de la position du laser permet de reconstruire la largeur du faisceau.



Application: laser-wire (5)

- Un laser-wire a besoin d'un laser capable de délivrer suffisamment de puissance pour créer un bon contraste.
- Le laser doit aussi être de très bonne qualité pour permettre la création d'un faisceau très fin.
- Une optique de focalisation très puissante est aussi nécessaire.



Gain optique

- Dans un milieu amplificateur nous avons:

$$[N_2 B_{21} - N_1 B_{12}] g_H(\omega - \omega_0) \rho(\omega, z) \delta\omega \cdot A \delta z$$

g_H : forme de la ligne atomique

ρ : densité d'énergie

A : aire du faisceau

Ce qui donne:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = [N_2 B_{21} - N_1 B_{12}] g_H(\omega - \omega_0) \rho(\omega, z) \frac{\hbar\omega}{c} I(\omega, z)$$

Ce qui permet de définir la section efficace de gain optique:

$$\sigma_{21}(\omega - \omega_0) = \frac{\hbar\omega_0}{c} B_{21} g_H(\omega - \omega_0)$$

Gain de faible intensité

- Si le signal n'est pas trop intense, il est

possible d'écrire: $\frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial z} = \alpha_{21}(\omega - \omega_0)$

et donc:

$$I(\omega, z) = I(\omega, 0) e^{\alpha_{21}(\omega - \omega_0)z}$$

quand I devient trop intense cela n'est plus vrai...

Loi de Beer-Lambert (absorption)

- Lorsque le signal se propage dans le milieu amplificateur il est aussi absorbé.
- La loi d'absorption, dite loi de Beer-Lambert est très simple:

$$I(\omega, z) = I(\omega, 0)e^{-k_{12}(\omega - \omega_0)z}$$

- Ce qui donne finalement (amplification +absorption):

$$I(\omega, z) = I(\omega, 0)e^{[\alpha_{12}(\omega - \omega_0) - k_{12}(\omega - \omega_0)]z}$$

Dépendance du gain sur la fréquence

- Section efficace optique typique (lorentzienne):

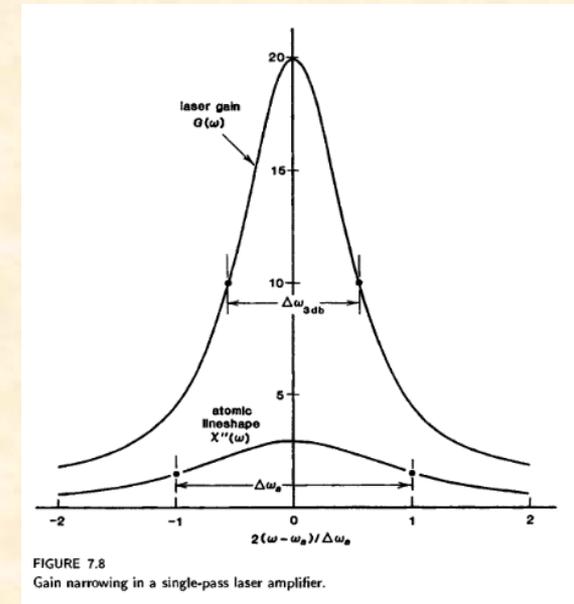
$$\sigma_{21}^L = \frac{\hbar\omega_0}{c} B_{21} \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\omega_L/2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Delta\omega_L/2)^2}$$

ce qui donne

$$\frac{\partial I}{\partial z} = [N_2 B_{21} - N_1 B_{12}] g_H(\omega - \omega_0) \rho(\omega, z) \frac{\hbar\omega}{c} \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\omega_L/2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Delta\omega_L/2)^2} I(\omega, z)$$

Le signal plus proche de la fréquence centrale est plus amplifié

=> la largeur de spectrale l'impulsion diminue.



Élargissement de la ligne

- Inversement il y a des phénomènes qui élargissent la largeur spectrale de l'impulsion.
- Par exemple, l'agitation thermique des atomes entraîne des vibrations qui modifient légèrement leur fréquence d'absorption/émission par effet Doppler. On parle d'élargissement Doppler.

$$P_\lambda(\lambda)d\lambda = \sqrt{\frac{mc^2}{2\pi kT\lambda_0^2}} e^{-\frac{mc^2(\lambda-\lambda_0)^2}{2kT\lambda_0^2}} d\lambda$$

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} \lambda_0$$

Saturation

- Considérons l'évolution de la population des deux niveaux d'un laser:

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - N^* \sigma_{21} \frac{I}{\hbar\omega_L} - \frac{N_2}{\tau_2}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = R_1 + N^* \sigma_{21} \frac{I}{\hbar\omega_L} + N_2 A_{21} - \frac{N_1}{\tau_1}$$

R_1, R_2 : Pompage niveau 1 et 2

N^* = densité d'inversion de population

ce qui donne:

$$N^*(I) = \frac{N^*(0)}{1 + I/I_s}$$

$$I_s = \frac{\hbar\omega_L}{\sigma_{21}\tau_r}$$

Il y a une intensité dite de saturation.

Saturation (2)

- Dans le régime saturé le coefficient de gain devient:

$$\alpha_I = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_S}$$

et donc:

$$\frac{dI}{dz} = \alpha_I I = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_S} I$$

Croissance du signal dans un amplificateur

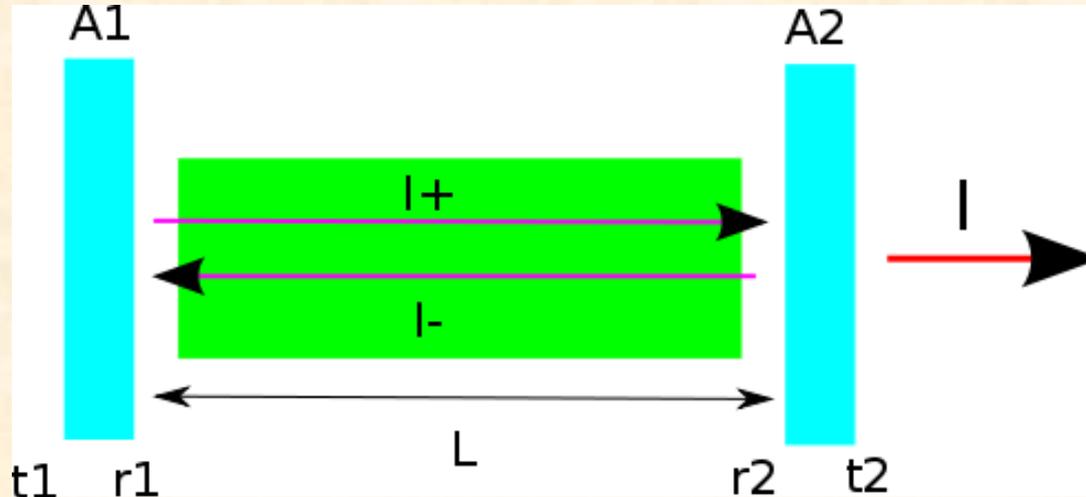
- La croissance de l'intensité d'un signal laser dans un peut donc suivre deux régime différents:

$$I(z) = I(0)e^{\alpha_0 z} \quad \text{si } I(z) \ll I_s$$

$$I(z) = I(0) + \alpha_0 I_s z \quad \text{si } I(z) \gg I_s$$

- Bien que le gain soit plus grand dans le premier cas, le second cas permet d'extraire plus d'énergie du milieu amplificateur.

Cavité amplificatrice



- Comme discuté précédemment le milieu amplificateur se trouve dans une cavité formée par deux miroirs.
- A l'équilibre le gain lors d'un aller retour est:

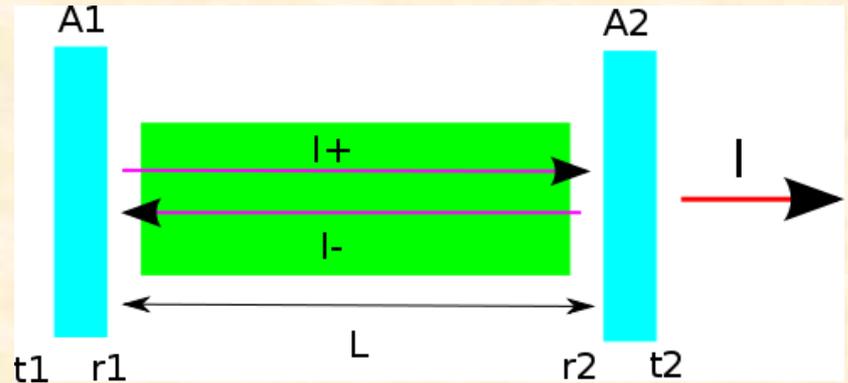
$$I_1 = I_0 e^{2(\alpha_I - k)L}$$

$$\frac{I_1 - I_0}{I_0} = e^{2(\alpha_I - k)L} - 1 \simeq 2(\alpha_I - k)L$$

- Et le gain lors d'un aller-retour doit exactement compenser les pertes:

$$2\alpha_1 L = 2kL - \ln(r_1 r_2) \simeq 2kL + t_1 + A_1 + t_2 + A_2$$

Cavité amplificatrice (2)

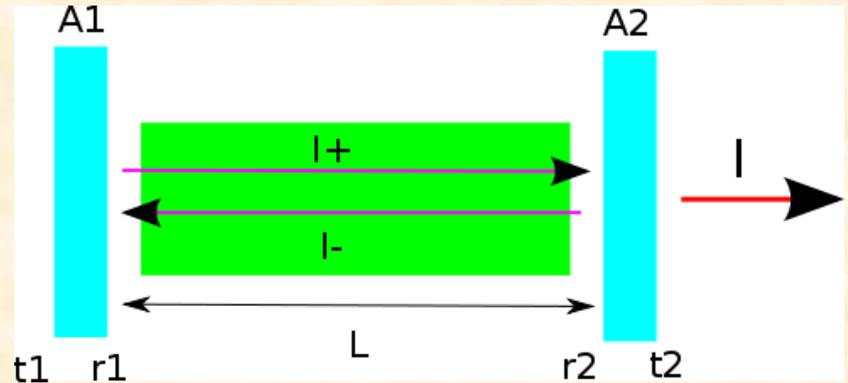


- La puissance transmise est: $I = I_+ t_2$
- Sur un miroir: $r_i + t_i + A_i = 1$
- L'équilibre peut donc aussi s'écrire:

$$2\alpha_1 L \simeq (2kL + t_1 + A_1 + A_2) + t_2$$

$$2\alpha_1 L \simeq \delta_{loss} + t_2$$

Cavité amplificatrice (3)

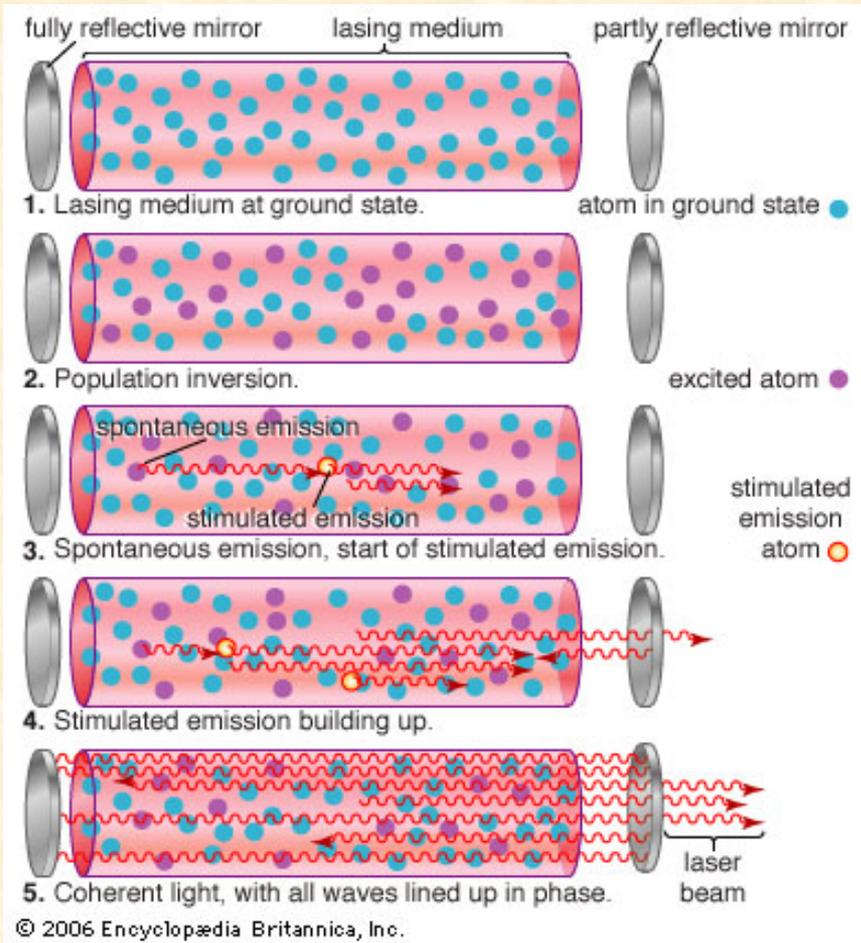


- La cavité opère le plus souvent en régime saturé: $\alpha_I = \frac{\alpha_0}{1 + (I_+ + I_-)/I_S} \simeq \frac{\alpha_0}{1 + 2I_+/I_S}$

- D'où: $2 \frac{\alpha_0}{1 + 2I_+/I_S} L = \delta_{Loss} + t_2$ $I_+ = \frac{1}{2} I_S \left(\frac{2\alpha_0 L}{t_2 + \delta_{loss}} \right)$

$$I = 2I_+ = t_2 I_S \frac{1}{2} \left(\frac{2\alpha_0 L}{t_2 + \delta_{loss}} \right)$$

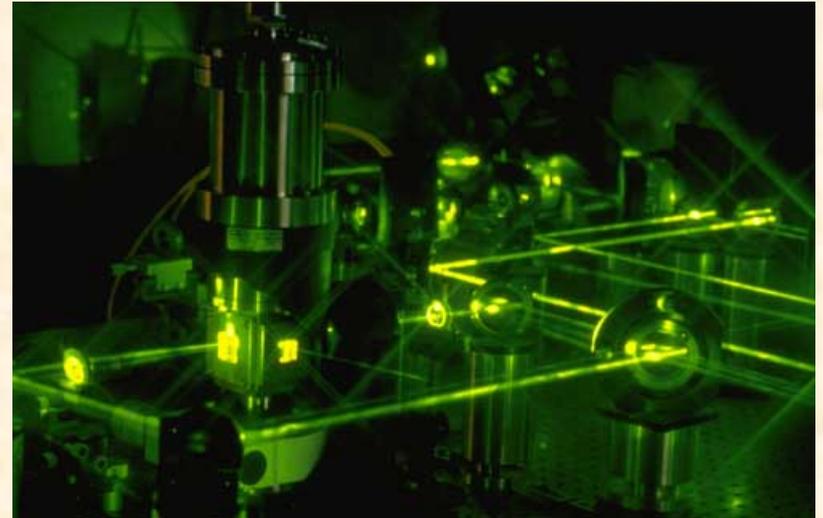
Résumé: fonctionnement d'un laser



- Une source laser est formée d'un milieu amplificateur entre deux miroirs.
- Le milieu amplificateur doit être pompé pour créer une inversion de population.
- Cette inversion de population permet des émissions stimulées.
- Si les conditions sont réunies ces émissions stimulées entraînent une réaction en chaîne et un faisceau laser sort de la cavité.

Application: Séparation isotopique

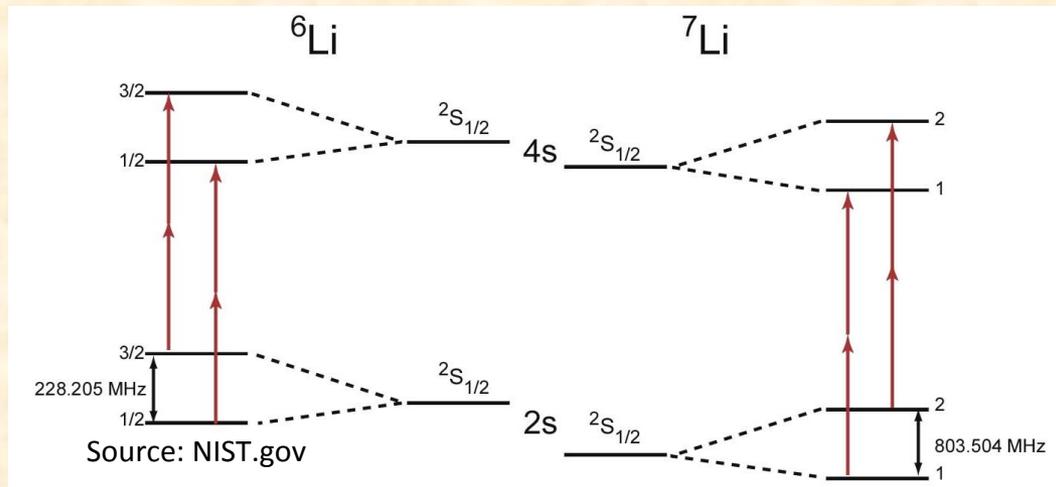
- Chaque élément chimique peut exister sous la forme d'isotopes différents.
- Lorsque les propriétés nucléaires sont importantes il faut effectuer une séparation isotopique.
- C'est le cas, par exemple, lors de l'étude de désintégrations radioactives ou pour enrichir le combustible nucléaire.
- Cette séparation isotopique peut se faire par laser.



Source: <http://www.laradioactivite.com/site/pages/laseparationisotopique.htm>
© COGEMA

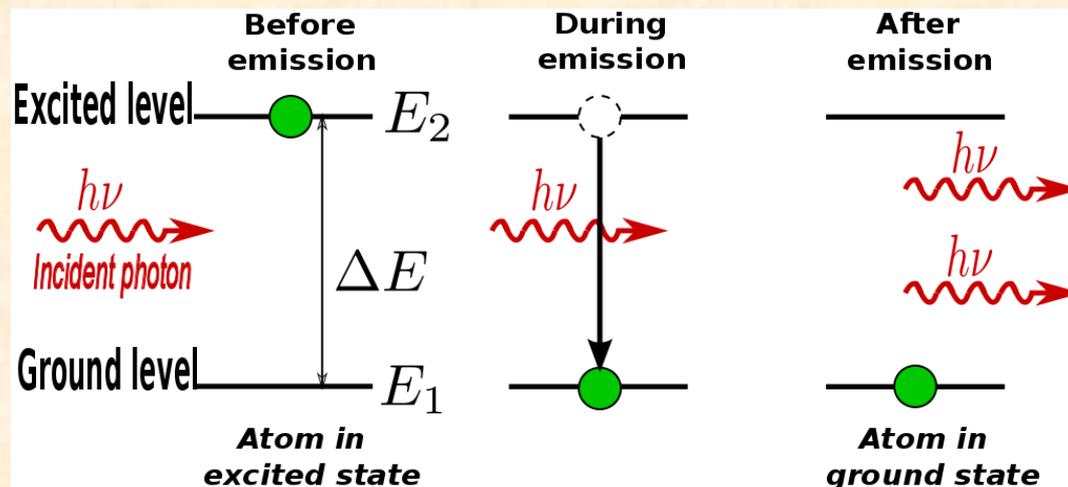
Séparation isotopique: Niveaux d'énergie

- Nous avons discuté précédemment que les niveaux d'énergie correspondent à la configuration électronique de chaque atome et lui sont donc spécifique.
- En fait les niveaux d'énergie sont aussi sensible à la masse du noyaux atomique.
=> deux isotopes (différent nombre de neutrons) du même atome ont donc des niveaux d'énergie différents.



Résumé

- Les propriétés quantiques des photons les incitent à se mettre dans le même état.
- Dans un milieu favorable, un photon peut entraîner de nombreux autres par émission stimulée.
- Les LASERs utilisent l'émission stimulée pour produire des faisceaux intenses de lumière.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$