

LES SYSTEMES A DEUX ETATS

"DE L'EFFET TUNNEL A L'EFFET LASER DANS UN ESPACE DE HILBERT DE DIMENSION 2"

1. Physique dans un espace de Hilbert de dimension 2

L'exemple de la molécule NH_3

Un peu d'algèbre à deux dimensions...

2. La molécule NH_3 dans un champ électrique

Champ statique : inversion de population

Champ oscillant : émission stimulée

3. Le principe du LASER et quelques applications

Maser à ammoniac

Quelques exemples de lasers...

1. Physique dans un espace de Hilbert de dimension 2

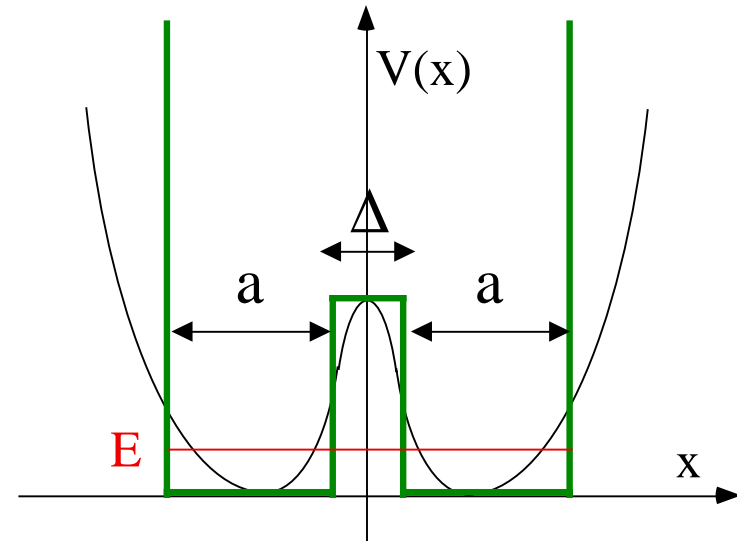
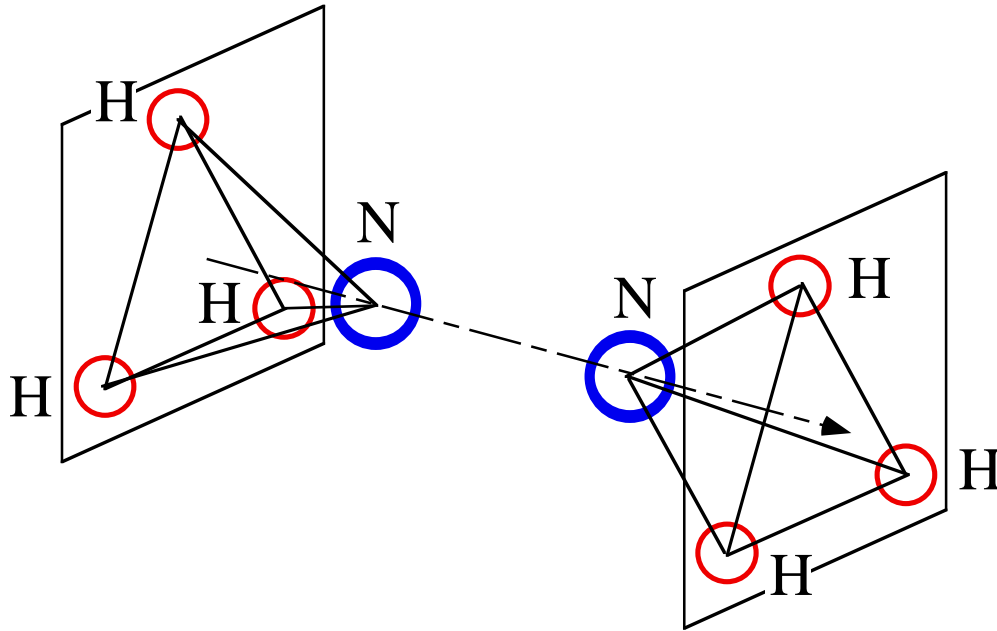
Retour sur la molécule NH_3

Un peu d'algèbre à deux dimensions...

L'opérateur « disposition »

MODELE SIMPLE DE LA MOLECULE D'AMMONIAC

NH₃ : un atome d'azote (Z = 7), 3 atomes d'hydrogène (Z = 1)

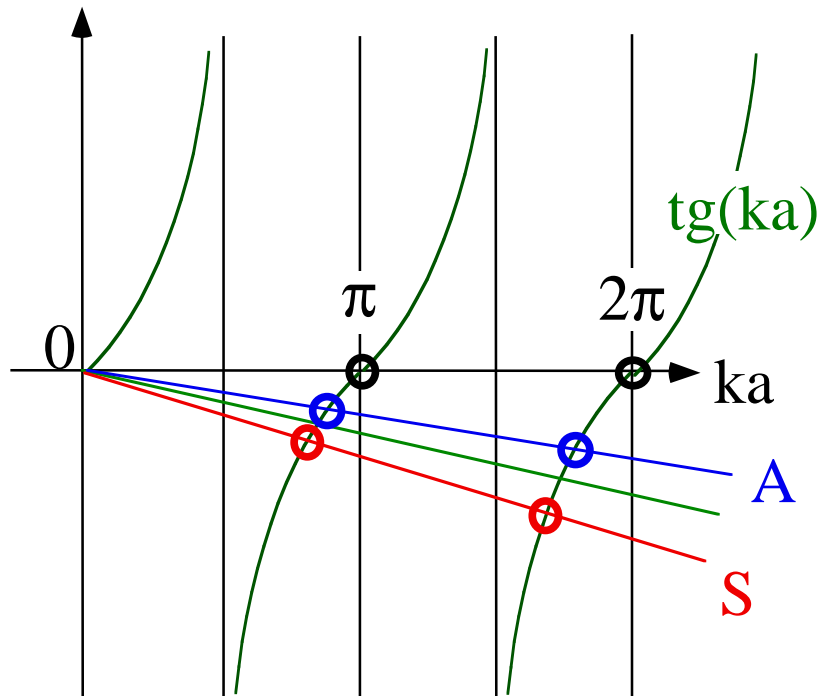


$$\hat{H} = \sum_{i=1}^{14} \frac{\hat{p}_i^2}{2m_i} + \sum_{i=1}^{14} \sum_{j=1, j \neq i}^{14} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

Modèle de "double puits"
pour la coordonnée relative x

Rôle crucial de l'effet tunnel !

DOUBLE PUIITS DE POTENTIEL

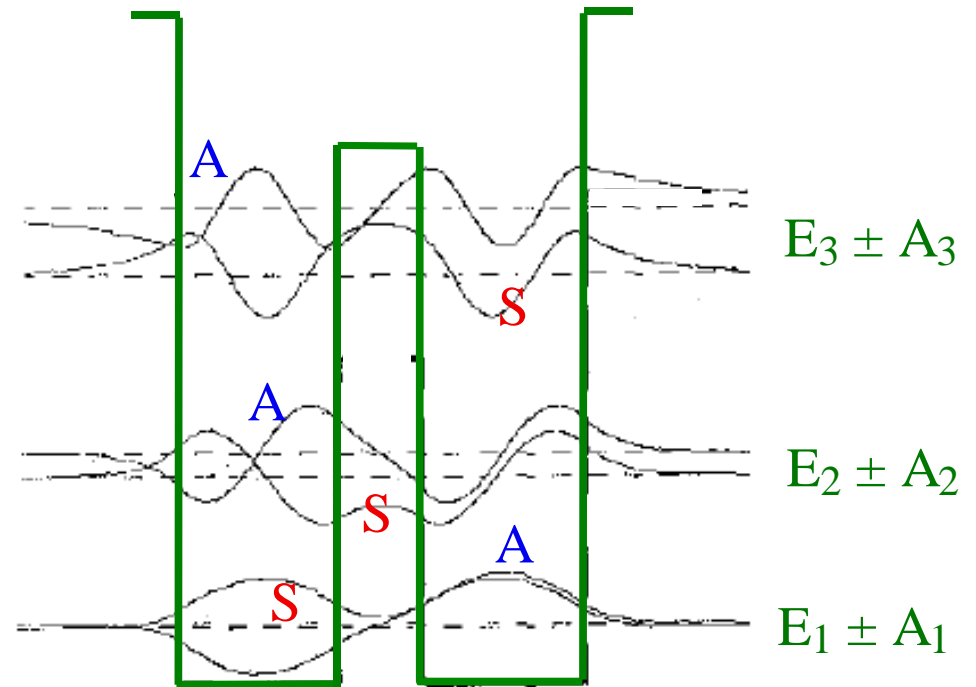


$$\operatorname{tg}(ka) = -ka \left(\frac{1 \pm 2e^{-\kappa \Delta}}{\kappa a} \right)$$

* $E_{S,A} = \hbar^2 k_{S,A}^2 / (2m)$

* "Clivage" des états S et A

Fonctions d'ondes symétriques (S)
ou antisymétriques (A)

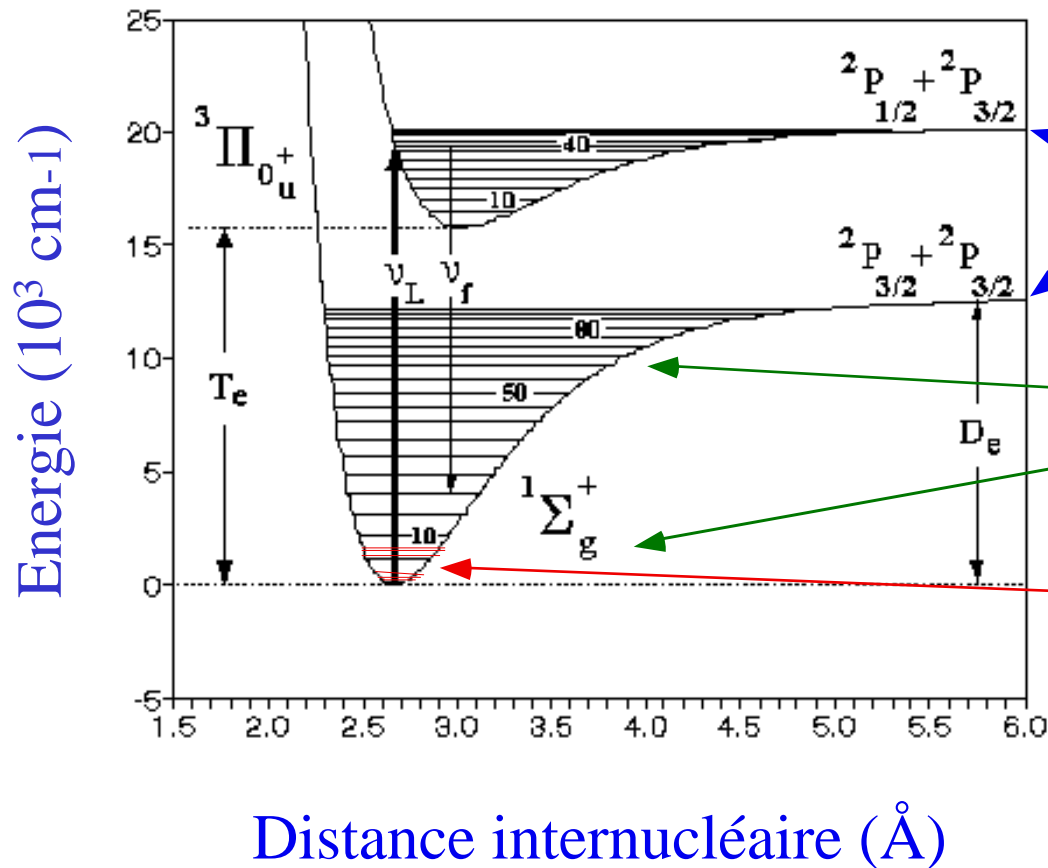


Pour NH₃ :

$$\begin{aligned} 2 A_1 &= 10^{-4} \text{ eV} \\ 2 A_2 &= 4 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \\ E_2 - E_1 &= 0.12 \text{ eV} \end{aligned}$$

NIVEAUX MOLECULAIRES

Ex : molécule d'iode I₂



Niveaux électroniques
(20000 cm^{-1} ou 0.5 μm ,
2.5 eV, 30000 K)

Niveaux de vibration
(1000 cm^{-1} ou 10 μm ,
0.15 eV, 1500 K)

Niveaux de rotation
(10 cm^{-1} ou 1 mm,
1.5 meV, 15 K)

$$E = h c / \lambda = k_B T$$

NIVEAUX MOLECULAIRES

Faut-il prendre en compte tous les niveaux ?

Loi de Boltzmann : $N_A / N_B = \exp\{-(E_A - E_B) / kT\}$

A température ambiante (300K) on a $kT = 25 \text{ meV}$:
seuls les niveaux les plus bas en énergie sont peuplés

$$\begin{array}{ll} \text{NH}_3 : N_2 / N_1 = 0.008 & N_{A1} / N_{S1} = 0.996 \\ E_2 - E_1 = 120 \text{ meV} & E_{A1} - E_{S1} = 0.1 \text{ meV} \end{array}$$

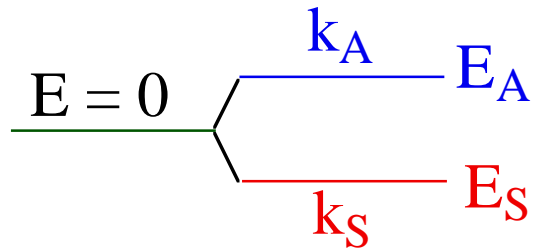
Couplage atome-champ (Planck - Einstein - Bohr...) : $h \nu_{AB} = E_A - E_B$

Excitation quasi-résonnante de E_A à E_B

→ Approximation de « système à deux niveaux »

RESTRICTION A DEUX ETATS

"Doublet" de plus basse énergie de NH_3 :

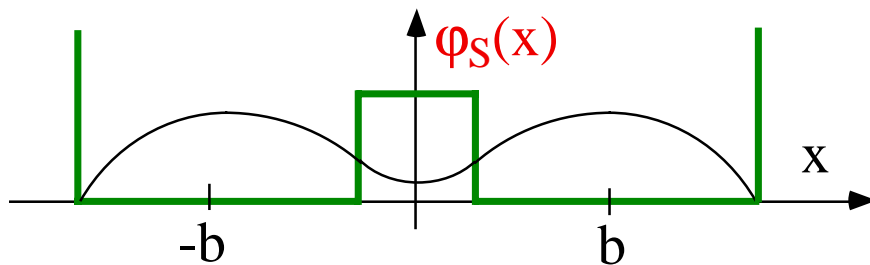
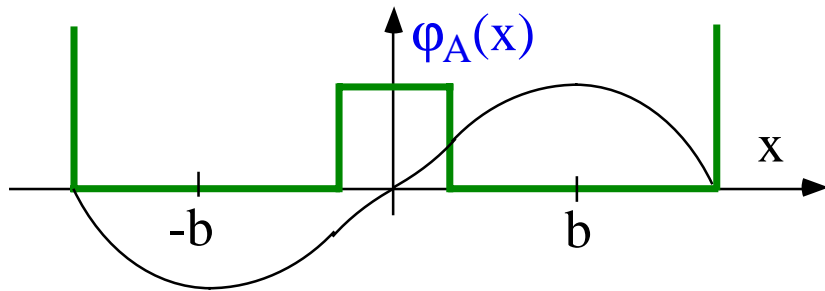


$$\Delta E = E_A - E_S = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} \times \frac{8 e^{-\kappa \Delta}}{\kappa a}$$

$$E_A - E_S = \hbar \omega_0, \quad E_A + E_S = 0$$

Pour les deux états A et S :

$$\rho_{A,S}(x, t) = |\psi_{A,S}(x, t)|^2 = |\phi_{A,S}(x)|^2$$

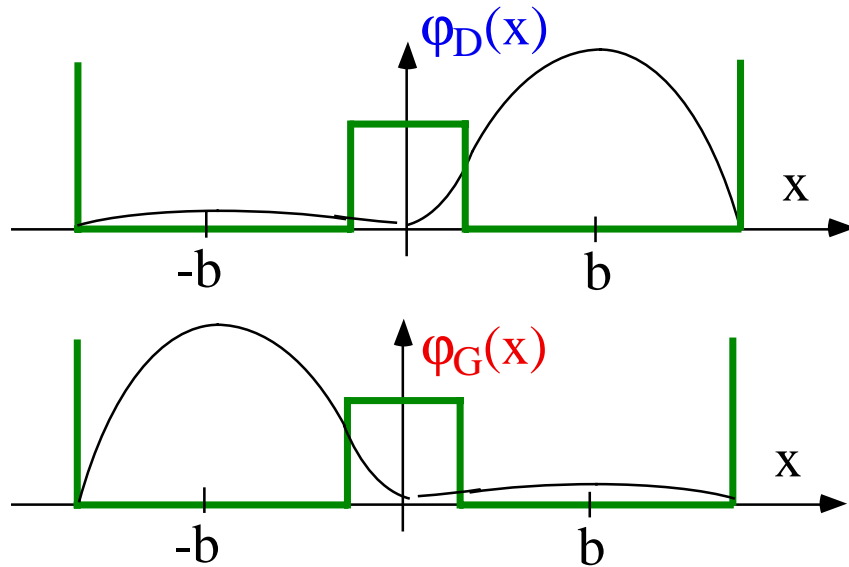


Densités de probabilité

- * symétriques
- * indépendantes du temps
(états stationnaires)

$$P(\text{droite}) = P(\text{gauche}) = 1/2$$

ETATS "GAUCHE" ET "DROIT"



Etats "Droit" et "Gauche"

$$\phi_D = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_S + \phi_A)$$

$$\phi_G = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_S - \phi_A)$$

ne sont pas des états stationnaires !

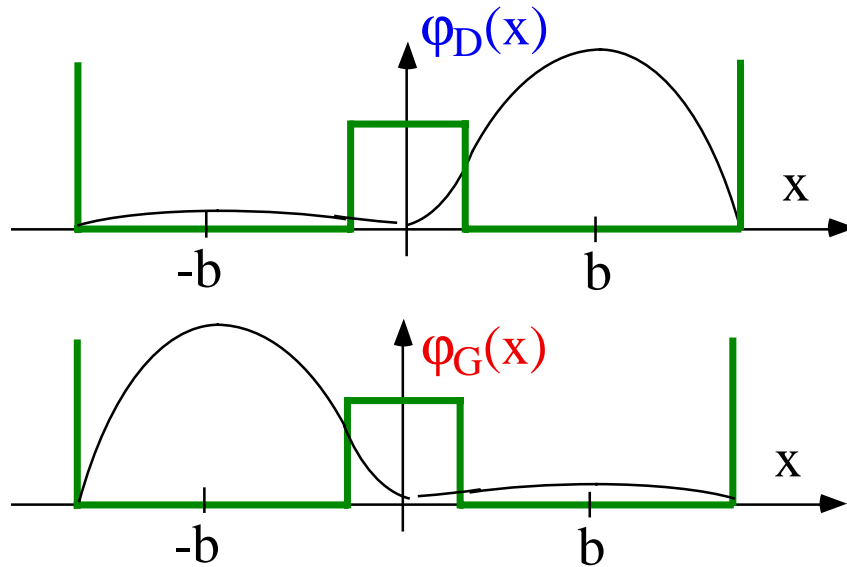
Si $\psi(t=0) = \phi_D = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_S + \phi_A)$

$$E_S = -\hbar\omega_0/2$$

$$E_A = +\hbar\omega_0/2$$

alors
$$\begin{aligned} \psi(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \phi_S \exp(-i E_S t/\hbar) + \phi_A \exp(-i E_A t/\hbar) \} \\ &= \{ (\phi_D + \phi_G) \exp(i\omega_0 t/2) + (\phi_D - \phi_G) \exp(-i\omega_0 t/2) \} / 2 \\ &= \phi_D \cos(\frac{\omega_0}{2} t) + i \phi_G \sin(\frac{\omega_0}{2} t) \end{aligned}$$

ETATS "GAUCHE" ET "DROIT"



Etats "Droit" et "Gauche"

$$\phi_D = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_S + \phi_A)$$

$$\phi_G = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_S - \phi_A)$$

ne sont pas des états stationnaires !

Si $\psi(t=0) = \phi_D$ alors $\psi(t) = \phi_D \cos(\frac{\omega_0}{2} t) + i \phi_G \sin(\frac{\omega_0}{2} t)$

Mouvement d'inversion de la molécule

→ « dipôle oscillant » → rayonnement émis

**Comment décrire le couplage du mouvement
avec un champ électrique (statique ou oscillant) ?**

ESPACE DES ETATS DE DIMENSION DEUX

$$| \psi \rangle = \alpha | \psi_A \rangle + \beta | \psi_S \rangle$$

α, β coefficients complexes
Dimension = 2

Bra

Ket

$$\langle \psi | = \alpha^* \langle \psi_A | + \beta^* \langle \psi_S |$$

$$| \psi \rangle = \alpha | \psi_A \rangle + \beta | \psi_S \rangle$$

$$\langle \psi_A | = (1, 0) \quad \text{et} \quad \langle \psi_S | = (0, 1)$$

$$| \psi_A \rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad | \psi_S \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{donc} \quad \langle \psi | = (\alpha^*, \beta^*)$$

$$\text{donc} \quad | \psi \rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$$\langle \psi | \psi \rangle = (\alpha^*, \beta^*) \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad \text{Norme}$$

$$\langle \varphi | \psi \rangle = (\lambda^*, \mu^*) \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \alpha \lambda^* + \beta \mu^* \quad \text{Produit scalaire}$$

ESPACE DES ETATS DE DIMENSION DEUX

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} a & b+ic \\ b-ic & d \end{pmatrix}$$

Opérateur le plus général (a, b, c, d réels)

$$\langle \psi_A | \hat{A} | \psi_A \rangle = (1, 0) \begin{pmatrix} a & b+ic \\ b-ic & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = a$$

$$\langle \psi_A | \hat{A} | \psi_S \rangle = (1, 0) \begin{pmatrix} a & b+ic \\ b-ic & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = b+ic$$

$$\langle \psi_S | \hat{A} | \psi_A \rangle = (0, 1) \begin{pmatrix} a & b+ic \\ b-ic & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = b-ic$$

$$\langle \psi_S | \hat{A} | \psi_S \rangle = (0, 1) \begin{pmatrix} a & b+ic \\ b-ic & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = d$$

ESPACE DES ETATS DE DIMENSION DEUX

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} a & b+ic \\ b-ic & d \end{pmatrix} \quad \text{Opérateur le plus général (a, b, c, d réels)}$$

Exemple : Hamiltonien dans la base $\{ |\psi_A\rangle, |\psi_S\rangle \}$?

$|\psi_A\rangle, |\psi_S\rangle$ sont états propres de H

avec les valeurs propres $E_A = \hbar\omega_0/2$, $E_S = -\hbar\omega_0/2$

$$\text{donc : } \hat{H}_{\text{NH}_3} = \begin{pmatrix} E_A & 0 \\ 0 & E_S \end{pmatrix} = \hbar \begin{pmatrix} \omega_0/2 & 0 \\ 0 & -\omega_0/2 \end{pmatrix}$$

ESPACE DES ETATS DE DIMENSION DEUX

Opérateur position dans la base $\{|\psi_A\rangle, |\psi_S\rangle\}$?

$$\langle \psi_{A,S} | \hat{X} | \psi_{A,S} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x |\varphi_{A,S}|^2 dx = 0 \quad (\text{parité})$$

$$\langle \psi_A | \hat{X} | \psi_S \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_A^* x \varphi_S dx = x_0 \quad (\varphi_A(x) \text{ et } \varphi_S(x) \text{ réels})$$

$$\langle \psi_S | \hat{X} | \psi_A \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_S^* x \varphi_A dx = x_0 \quad (\varphi_A(x) \text{ et } \varphi_S(x) \text{ réels})$$

Donc
$$\hat{X} = \begin{pmatrix} 0 & x_0 \\ x_0 & 0 \end{pmatrix}$$

Opérateur non diagonal

Opérateur « disposition »

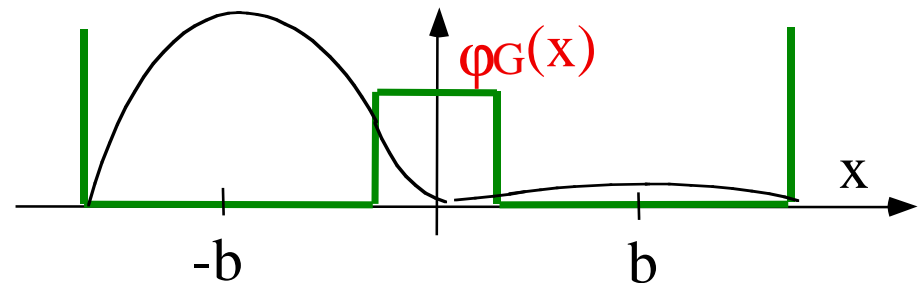
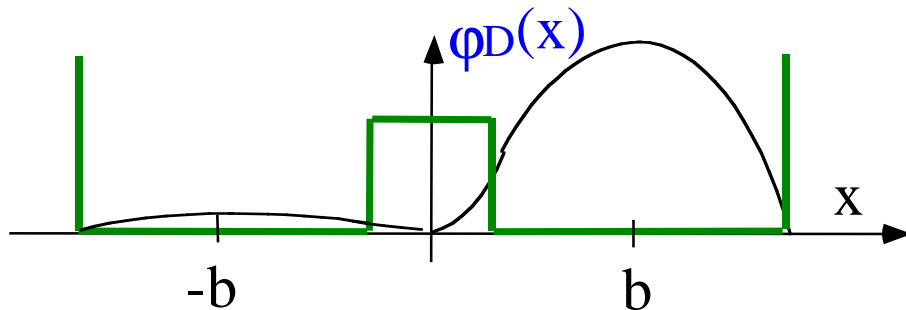
ESPACE DES ETATS DE DIMENSION DEUX

Valeurs propres et vecteurs propres de l'opérateur « disposition » ?

$$\begin{pmatrix} 0 & x_0 \\ x_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} -\lambda & x_0 \\ x_0 & -\lambda \end{vmatrix} = 0 \quad \text{donc} \quad \lambda = \pm x_0 \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm 1 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_A\rangle + |\psi_S\rangle) = |\psi_D\rangle \quad \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_A\rangle - |\psi_S\rangle) = |\psi_G\rangle$$



ESPACE DES ETATS DE DIMENSION DEUX

Valeur moyenne et dispersion de l'opérateur « disposition » ?

$$\widehat{X} = \begin{pmatrix} 0 & x_0 \\ x_0 & 0 \end{pmatrix} \quad \widehat{X}^2 = \begin{pmatrix} x_0^2 & 0 \\ 0 & x_0^2 \end{pmatrix}$$

Etats $\{ |\psi_A\rangle, |\psi_S\rangle \}$ (états propres de H)

$$\langle \psi_A | \widehat{X} | \psi_A \rangle = \langle \psi_S | \widehat{X} | \psi_S \rangle = 0 \quad \Delta X_{S,A} = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} = |x_0|$$

Etats $\{ |\psi_G\rangle, |\psi_D\rangle \}$ (états propres de X)

$$\begin{aligned} * \text{ à } t=0 \quad & \langle \psi_D | \widehat{X} | \psi_D \rangle = x_0 \\ & \langle \psi_G | \widehat{X} | \psi_G \rangle = -x_0 \end{aligned} \quad \Delta X_{G,D} = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} = 0$$

La « disposition » est parfaitement connue dans les états D et G

EVOLUTION AU COURS DU TEMPS

On a vu que si $|\psi(t=0)\rangle = |\psi_D\rangle$ alors :

$$|\psi(t)\rangle = |\psi_D\rangle \cos\left(\frac{\omega_0}{2}t\right) + i |\psi_G\rangle \sin\left(\frac{\omega_0}{2}t\right)$$

$$P(D) = |\langle \psi_D | \psi(t) \rangle|^2 = \cos^2(\omega_0 t / 2)$$

$$P(G) = |\langle \psi_G | \psi(t) \rangle|^2 = \sin^2(\omega_0 t / 2)$$

$$\langle \psi(t) | \hat{X} | \psi(t) \rangle = x_0 P(D) - x_0 P(G) = x_0 \cos(\omega_0 t)$$

Exercice : montrer qu'on retrouve le même résultat avec les matrices

La valeur moyenne de la disposition oscille au cours du temps :
on retrouve le mouvement d'inversion de la molécule

2. La molécule NH_3 dans un champ électrique statique ou oscillant

Objectif : utiliser la molécule comme source de rayonnement

Deux étapes : (1) communiquer de l'énergie à la molécule :

- * **inversion de population**

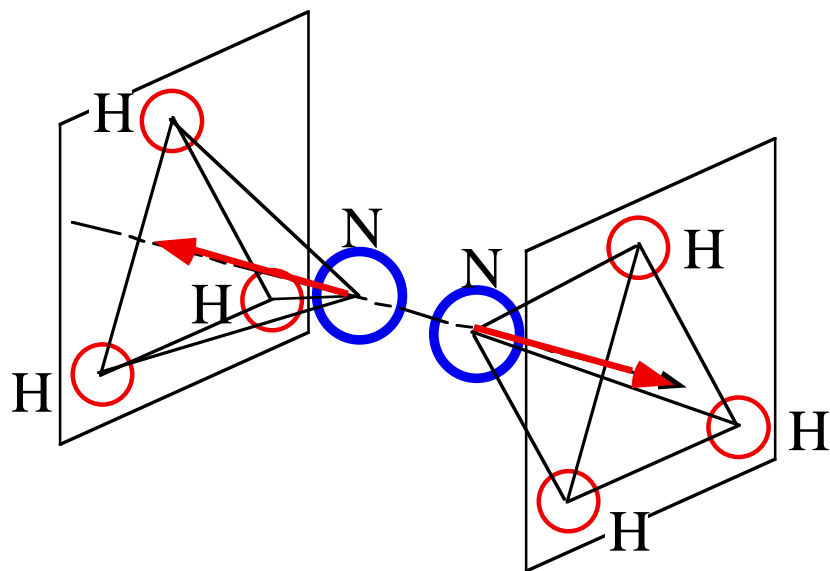
- * obtenue ici en appliquant un **champ statique**
qui sélectionne un état moléculaire

(2) extraire cette énergie sous forme de rayonnement :

- * **émission stimulée**

- * obtenue en appliquant un **champ oscillant**
de fréquence ω proche de ω_0

MOLECULE D'AMMONIAC DANS UN CHAMP ELECTRIQUE



Champ électrique statique E

Dipole électrique : $\hat{D} = q \hat{X}$

Energie d'interaction entre
le dipole et le champ électrique :

$$\hat{W} = -\hat{D} \cdot E = \hbar \begin{pmatrix} 0 & \xi/2 \\ \xi/2 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hbar \xi / 2 = -q x_0 E = -d_0 E$$

$$\hat{H}_{\text{NH}_3} = \begin{pmatrix} E_A & 0 \\ 0 & E_S \end{pmatrix} = \hbar \begin{pmatrix} +\omega_0/2 & 0 \\ 0 & -\omega_0/2 \end{pmatrix}$$

$$H = H_{\text{NH}_3} + W \quad \rightarrow \quad \hat{H} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \omega_0 & \xi \\ \xi & -\omega_0 \end{pmatrix}$$

MOLECULE D'AMMONIAC DANS UN CHAMP ELECTRIQUE

$$\widehat{H} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \omega_0 & \xi \\ \xi & -\omega_0 \end{pmatrix}$$

$$\hbar \xi = -2 d_0 E$$

$$\hbar \omega_0 = E_A - E_S$$

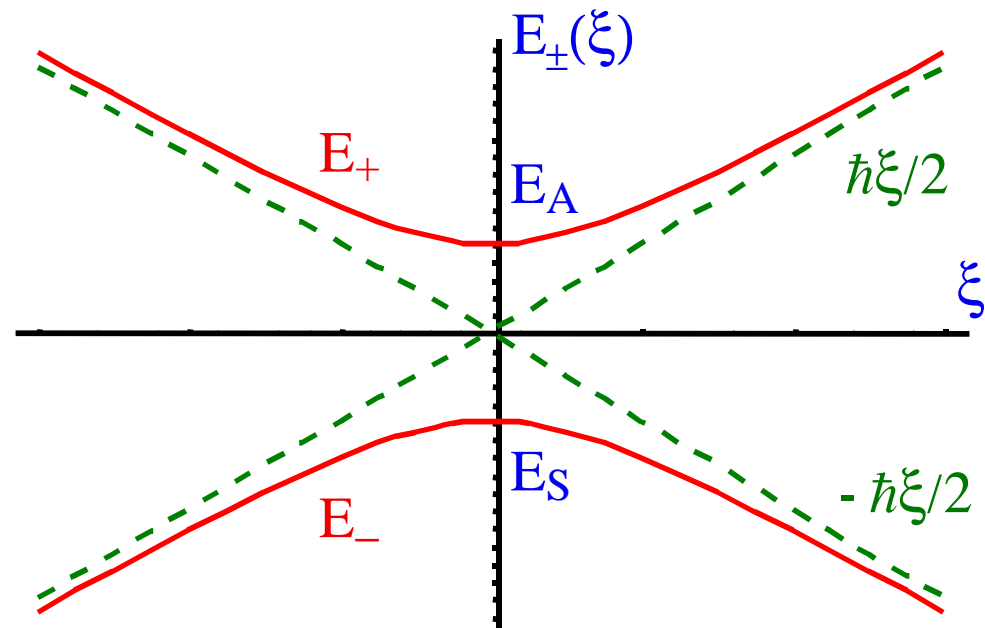
Valeurs propres :

$$\begin{vmatrix} \omega_0 - \lambda & \xi \\ \xi & -\omega_0 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\lambda^2 - \omega_0^2 - \xi^2 = 0$$

$$\lambda_{\pm} = \pm \sqrt{\omega_0^2 + \xi^2}$$

$$E_{\pm} = \pm \frac{\hbar}{2} \sqrt{\omega_0^2 + \xi^2}$$



MOLECULE D'AMMONIAC DANS UN CHAMP ELECTRIQUE

Vecteurs propres : $\cos(\theta) = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_0^2 + \xi^2}}$ $\sin(\theta) = \frac{\xi}{\sqrt{\omega_0^2 + \xi^2}}$

$$|\varphi_+\rangle = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \end{pmatrix} \quad |\varphi_-\rangle = \begin{pmatrix} -\sin(\theta/2) \\ \cos(\theta/2) \end{pmatrix}$$

Evolution dans le temps :

$$|\varphi(t=0)\rangle = |\varphi_A\rangle = \cos(\theta/2)|\varphi_+\rangle - \sin(\theta/2)|\varphi_-\rangle$$

$$\begin{aligned} |\varphi(t)\rangle &= \cos(\theta/2) e^{-iE_+t/\hbar} |\varphi_+\rangle - \sin(\theta/2) e^{-iE_-t/\hbar} |\varphi_-\rangle \\ &= \cos\left(\frac{E_+ - E_-}{2\hbar} t\right) |\varphi_A\rangle - i \sin\left(\frac{E_+ - E_-}{2\hbar} t\right) (\cos(\theta) |\varphi_A\rangle + \sin(\theta) |\varphi_S\rangle) \end{aligned}$$

Probabilité de « transition » (passage de A à S)

$$P(A \rightarrow S) = \sin^2(\theta) \sin^2 \frac{(E_+ - E_-) t}{2\hbar} = \frac{\xi^2}{\omega_0^2 + \xi^2} \sin^2 \frac{\sqrt{\omega_0^2 + \xi^2} t}{2}$$

2. La molécule NH_3 dans un champ électrique statique ou oscillant

Molécules NH_3 dans un champ électrique :

- états propres et valeurs propres

Champ statique :

- potentiel sensible à l'état interne
- préparation dans l'état
- inversion de population

Champ oscillant :

- oscillations de Rabi (absorption - émission)
- émission stimulée

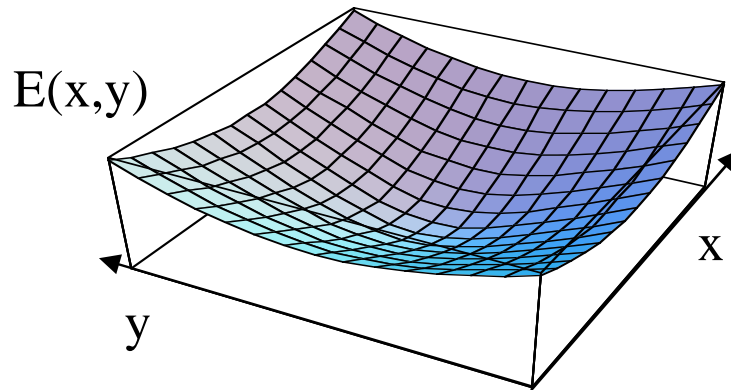
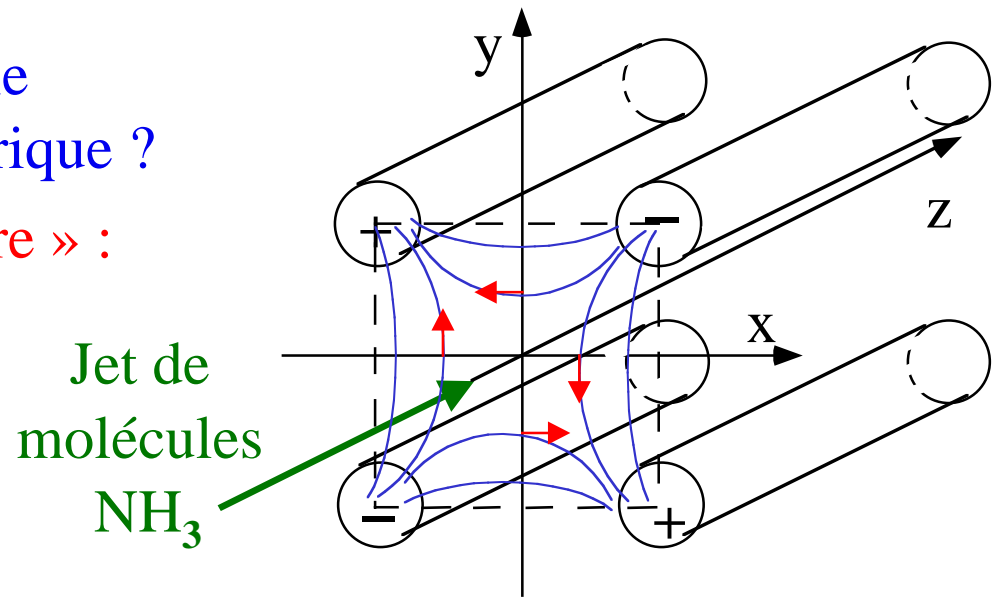
CHAMP STATIQUE INHOMOGENE

Propagation d'un jet de molécule
dans un gradient de champ électrique ?

Champ électrique « quadrupolaire » :

$$E(x=0, y=0) = 0$$

$|E(x,y)|$ augmente
hors d'axe



Energie « vue » par une
molécule dans l'état $|\varphi_A\rangle$: $E_+ \geq E_A$

Energie « vue » par une
molécule dans l'état $|\varphi_s\rangle$: $E_- \leq E_s$

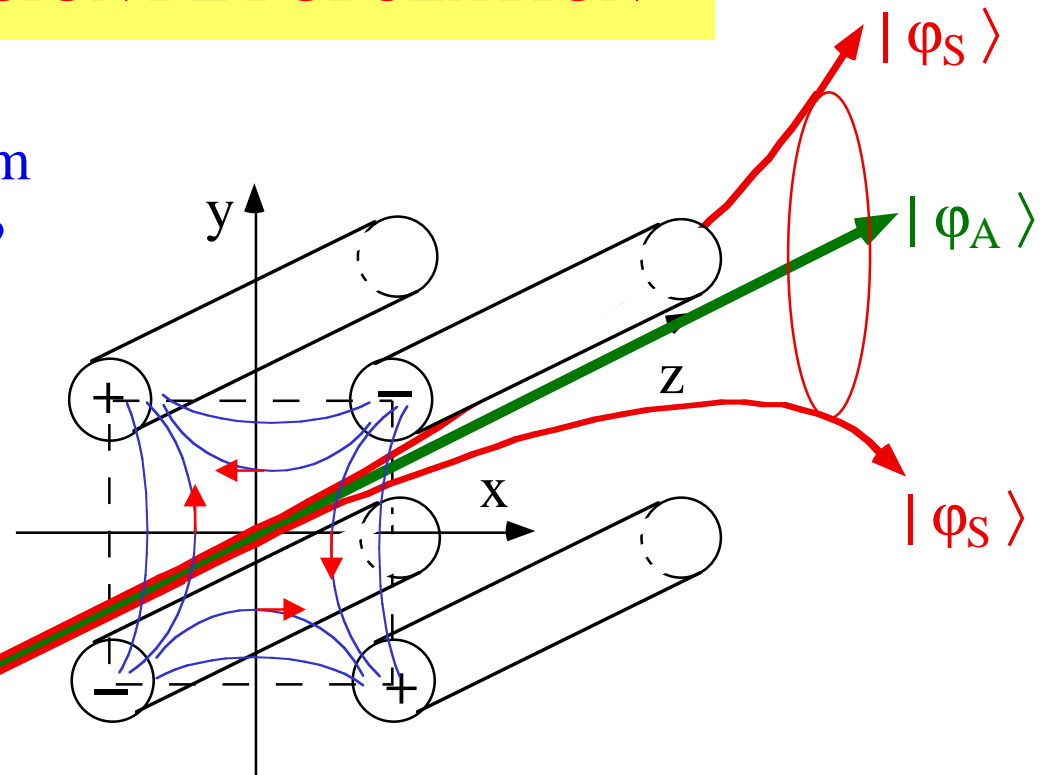
Apparaît comme une énergie potentielle qui guide le mouvement !

INVERSION DE POPULATION

Comment réaliser un minimum local de E (à 2 dimensions) ?

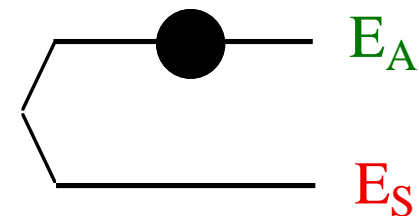
Champ quadrupolaire

Jet de molécules NH_3



Les molécules dans l'état $|\varphi_A\rangle$ sont guidées
Les molécules dans l'état $|\varphi_S\rangle$ sont éjectées

En sortie le système est
hors d'équilibre thermodynamique :
"inversion de population"



2. La molécule NH_3 dans un champ électrique statique ou oscillant

Molécules NH_3 dans un champ électrique :

- états propres et valeurs propres

Champ statique :

- potentiel sensible à l'état interne
- préparation dans l'état
- inversion de population

Champ oscillant :

- oscillations de Rabi (absorption - émission)
- émission stimulée

CHAMP HOMOGENE OSCILLANT

Energie d'interaction entre le dipole et le champ électrique :

$$\widehat{W}_t = - \widehat{D} \cdot E_0 \cos(\omega t) = \hbar \begin{pmatrix} 0 & \xi_0 \cos(\omega t) \\ \xi_0 \cos(\omega t) & 0 \end{pmatrix} \quad \hbar \xi_0 = - d_0 \cdot E_0$$

$$\widehat{H} = \hbar \begin{pmatrix} \omega_0/2 & \xi_0 \cos(\omega t) \\ \xi_0 \cos(\omega t) & -\omega_0/2 \end{pmatrix} \quad \hbar \omega_0 = E_A - E_S$$

Equation de Schrödinger avec Hamiltonien **dépendant du temps** :

$$i \hbar \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix} = \widehat{H} \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix} \quad \begin{cases} i \dot{\alpha}(t) = +\omega_0/2 \alpha(t) + \xi_0 \cos(\omega t) \beta(t) \\ i \dot{\beta}(t) = -\omega_0/2 \beta(t) + \xi_0 \cos(\omega t) \alpha(t) \end{cases}$$

La méthode usuelle (trouver les états propres de H...) ne s'applique pas

Que fait-on ?

CHAMP HOMOGENE OSCILLANT

Equation de Schrödinger avec Hamiltonien dépendant du temps :

$$i \hbar \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} i \dot{\alpha}(t) &= +\omega_0/2 \alpha(t) + \xi_0 \cos(\omega t) \beta(t) \\ i \dot{\beta}(t) &= -\omega_0/2 \beta(t) + \xi_0 \cos(\omega t) \alpha(t) \end{aligned}$$

Principe du calcul :

* Changement de variable :

$$\alpha(t) = \tilde{\alpha}(t) e^{-i\omega t/2}$$

$$\beta(t) = \tilde{\beta}(t) e^{+i\omega t/2}$$

$$\begin{aligned} i \dot{\tilde{\alpha}}(t) &= (-\omega + \omega_0) \tilde{\alpha}(t)/2 + \xi_0 (1 + e^{2i\omega t}) \tilde{\beta}(t)/2 \\ i \dot{\tilde{\beta}}(t) &= (\omega - \omega_0) \tilde{\beta}(t)/2 + \xi_0 (1 + e^{-2i\omega t}) \tilde{\alpha}(t)/2 \end{aligned}$$

Apparition du « désaccord de fréquence » $\delta = \omega - \omega_0$

* Quelques approximations et manipulations (hors programme...)

... et on retrouve le cas statique en remplaçant ω_0 par $\delta = \omega - \omega_0$

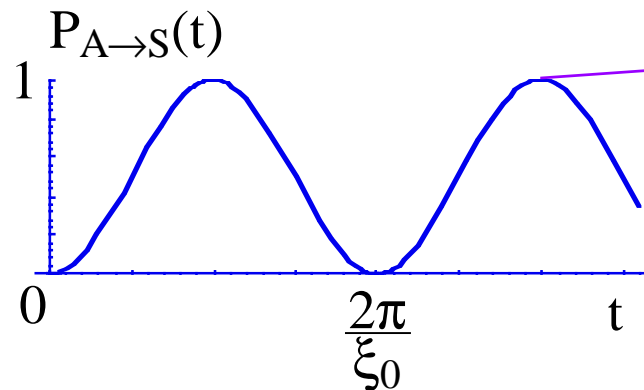
LA « FORMULE DE RABI »

Condition initiale : $|\psi(t=0)\rangle = |\varphi_A\rangle \Rightarrow \tilde{\beta}(t) = \frac{\xi_0 \sin\left(\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 + \xi_0^2} \frac{t}{2}\right)}{i \sqrt{(\omega - \omega_0)^2 + \xi_0^2}}$

Formule de Rabi : $P_{A \rightarrow S}(t) = \frac{\xi_0^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \xi_0^2} \sin^2\left(\sqrt{(\omega - \omega_0)^2 + \xi_0^2} \frac{t}{2}\right)$

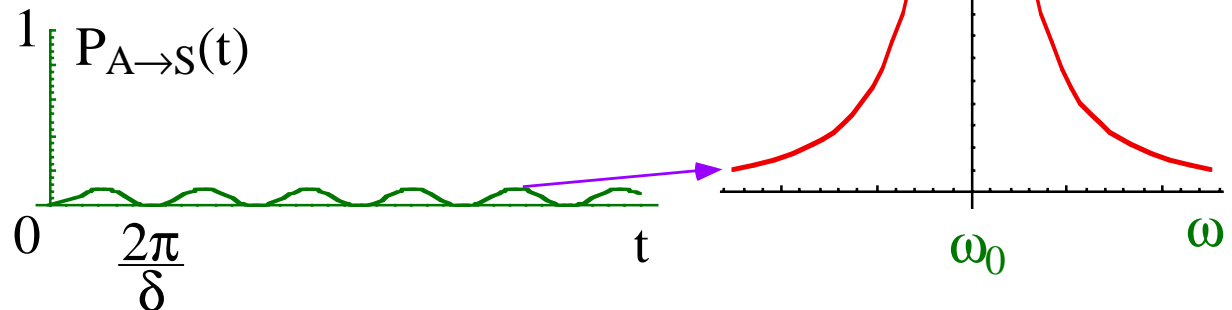
$$\omega = \omega_0$$

$$P_{A \rightarrow S}(t) = \sin^2\left(\xi_0 \frac{t}{2}\right)$$



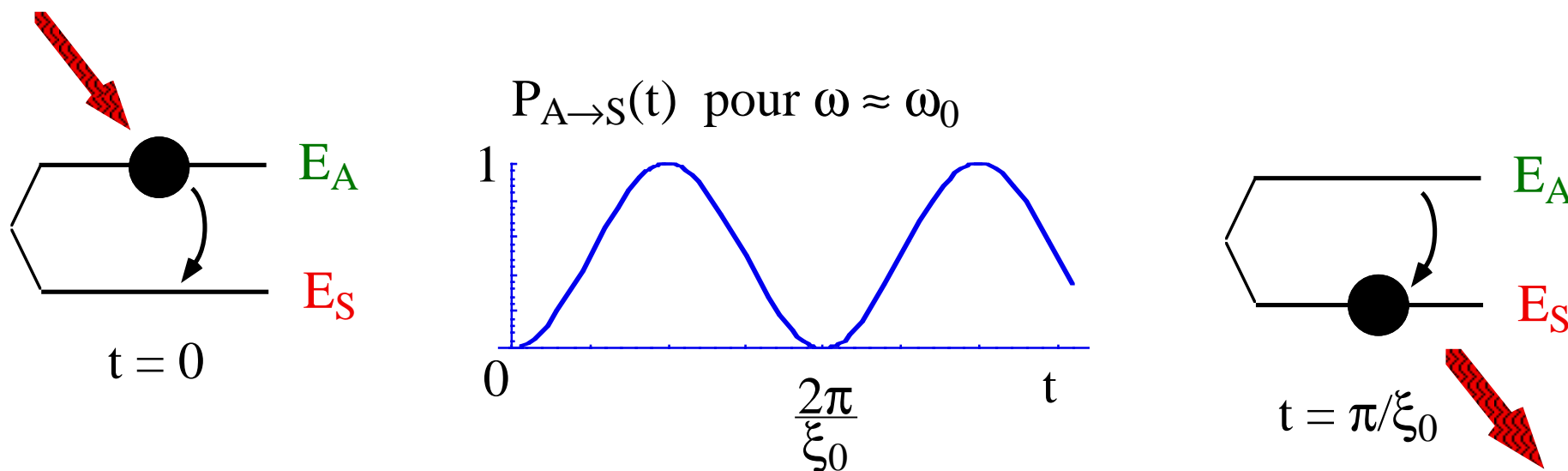
$$\delta = \omega - \omega_0, |\delta| \gg \xi_0$$

$$P_{A \rightarrow S}(t) = \frac{\xi_0^2}{\delta^2} \sin^2\left(\delta \frac{t}{2}\right)$$



L'EMISSION STIMULEE

Molécule dans l'état d'énergie E_A et champ oscillant de fréquence $\omega \approx \omega_0$



- * Le champ "induit" l'émission de la molécule
- * La molécule cède son énergie au champ
- * Processus réversible si le champ est confiné dans une cavité
- * En fait le champ s'échappe de la cavité avec une énergie augmentée :

amplification par émission stimulée de rayonnement

3. Le principe du LASER et quelques applications

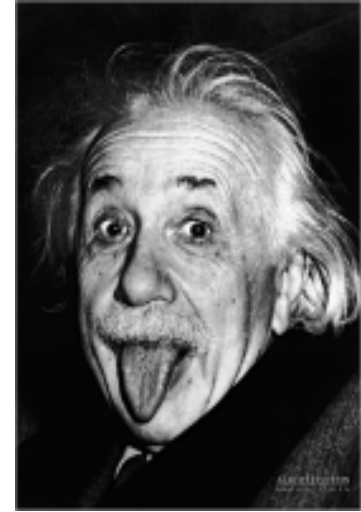
Maser à ammoniac

Quelques exemples de lasers...

Masers et Lasers



Albert Einstein a découvert le principe de l'émission stimulée en 1917 (à partir d'une étude thermodynamique détaillée de la loi de Planck)



Il en résulte qu'un ensemble d'atomes convenablement préparés peuvent amplifier le rayonnement (radiofréquence ou lumineux)

* Comment passer d'un amplificateur à un oscillateur ?

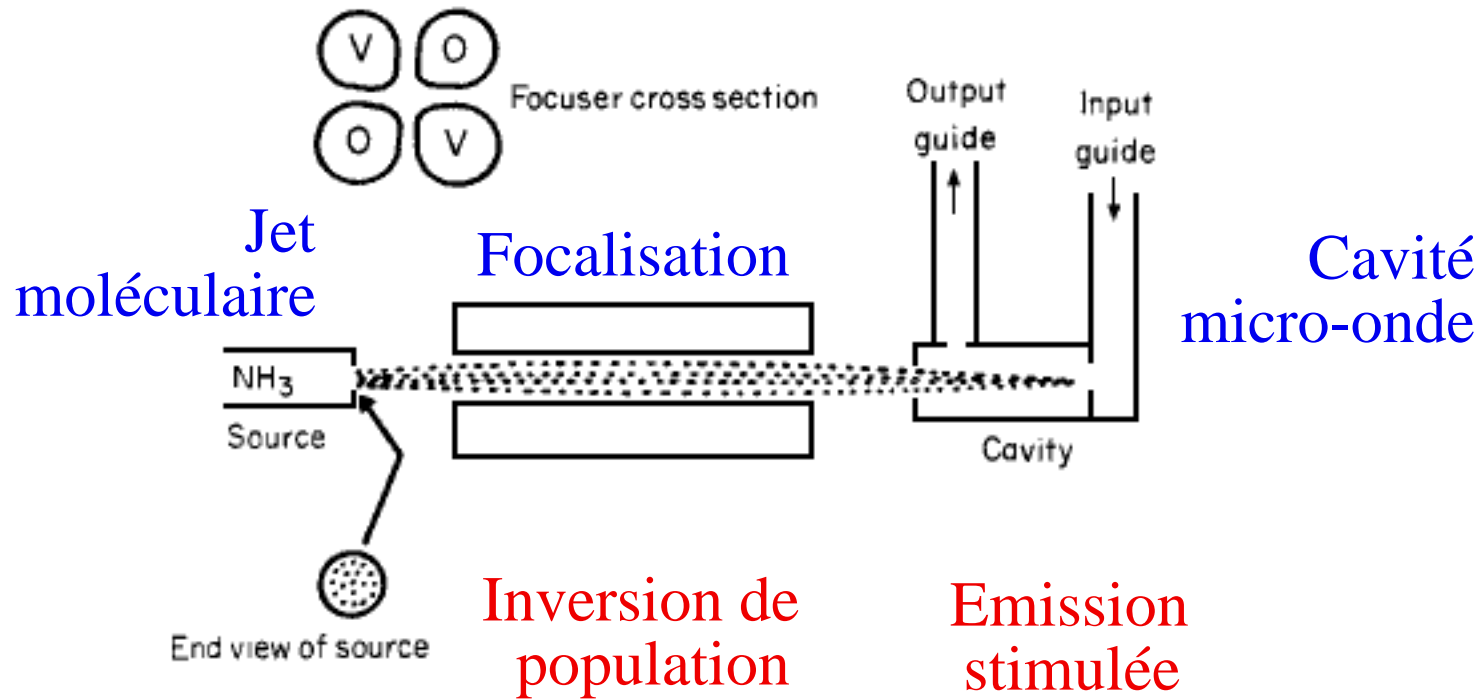
Rétroaction ! (cf. effet Larsen...)

* Méthode la plus simple :

placer l'amplificateur dans une cavité résonnante

Principe du MASER (micro-ondes) et du LASER (lumière)

LE MASER A AMMONIAC



-> Oscillation auto-entretenue !

1954 : 10^{14} molécules/sec, $P = 10^{-9}$ W, $f = 24$ GHz

LE MASER A AMMONIAC

Charles
Townes,
1954

(+Basov,
Prokhorov :
Nobel 1964)



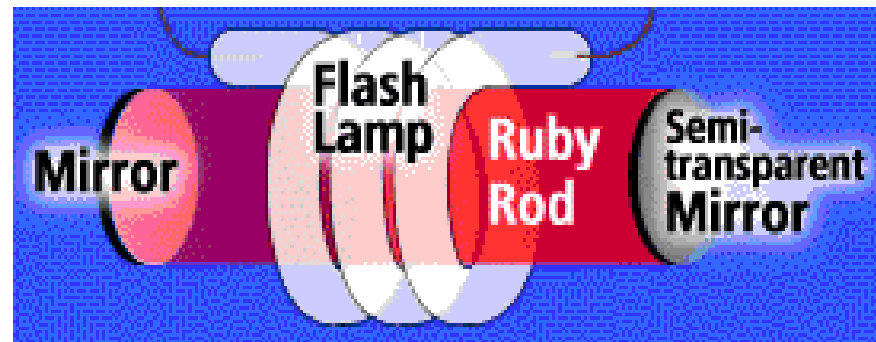
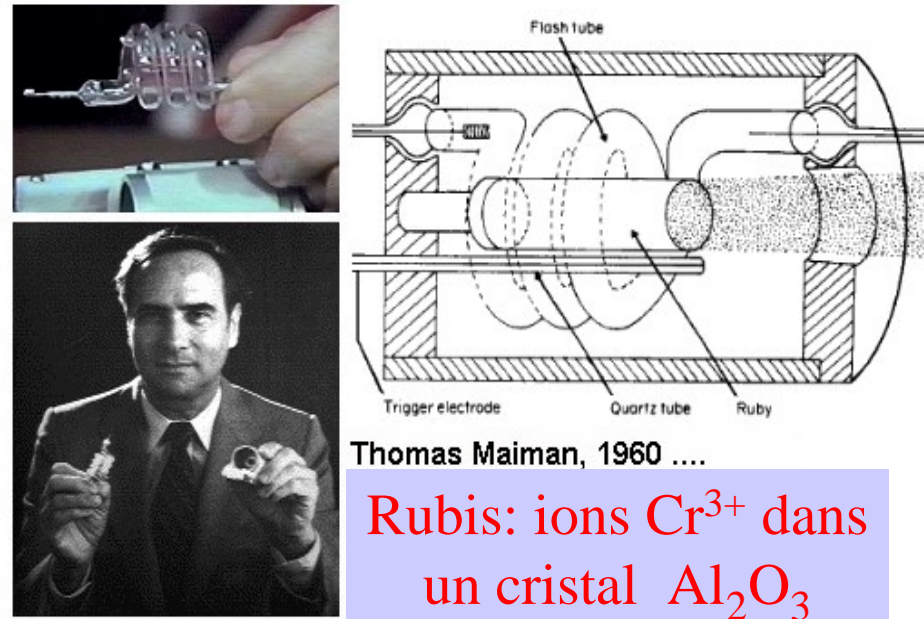
**MASER : Microwave Amplification by
Stimulated Emission of Radiation.**
(Means of Acquiring
Support for Expensive Research !)

Le premier laser...

Le premier « brevet »
pour fabriquer des lasers
a été déposé en 1958 par
Arthur Schawlow et
Charles Townes

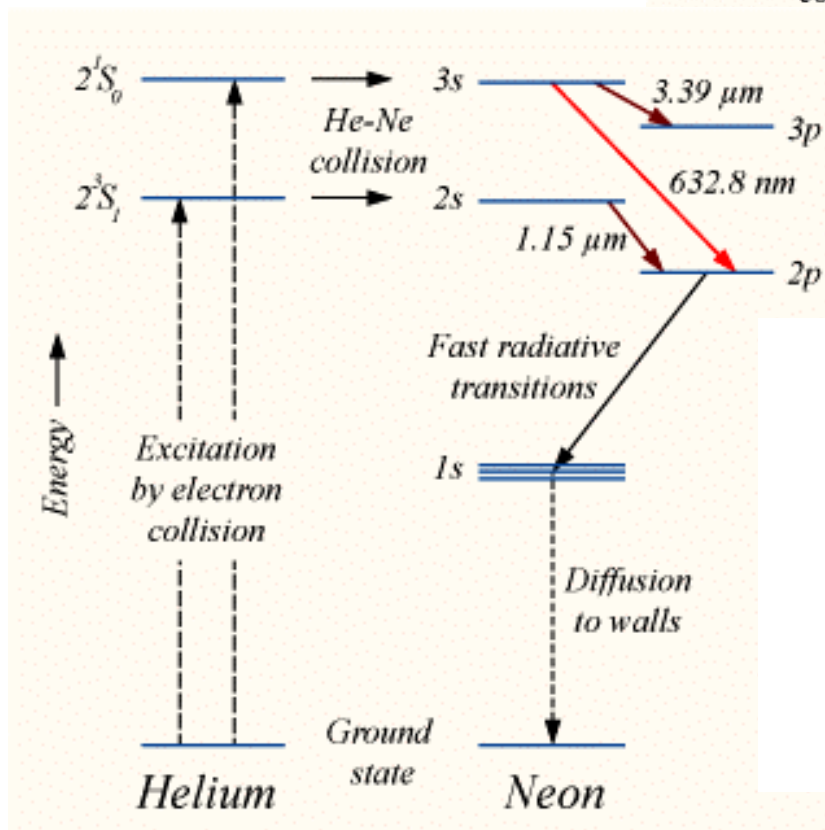
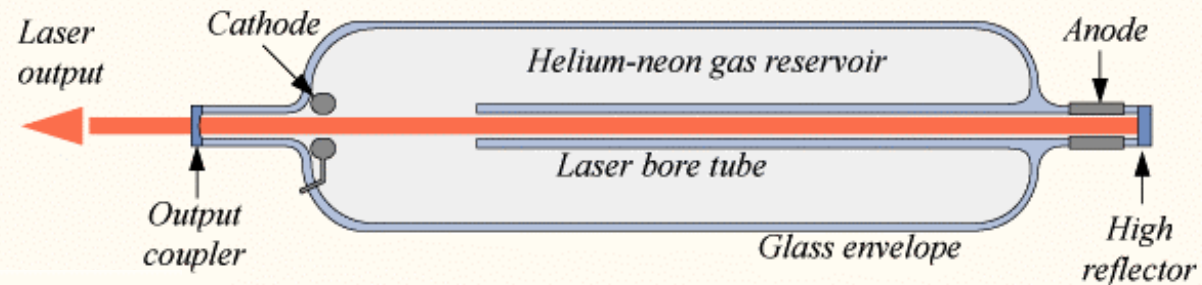


... et le premier laser a été fabriqué
en 1960 par Thomas Maiman



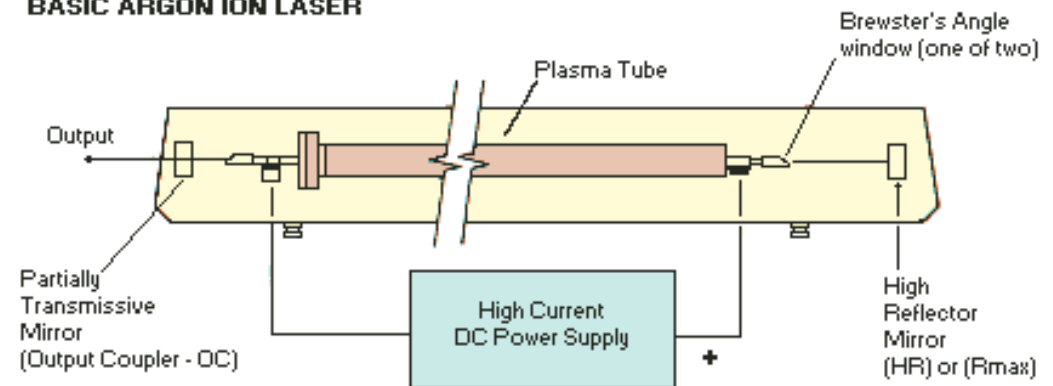
Les lasers « à gaz »

Laser Helium-Neon (Ali Javan, 1960)



$3s \rightarrow 3p$: infra-rouge (3.39 μm)
 $2s \rightarrow 2p$: infra-rouge proche (1.15 μm)
 $3s \rightarrow 2p$: rouge (632.8 nm)

BASIC ARGON ION LASER



Laser ioniques (Ar, Kr, Xe)

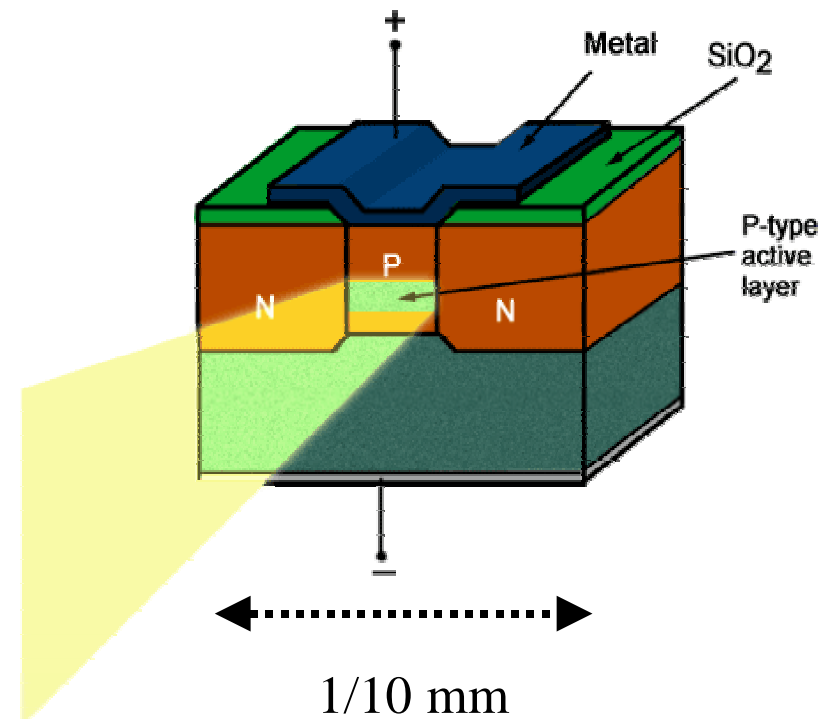
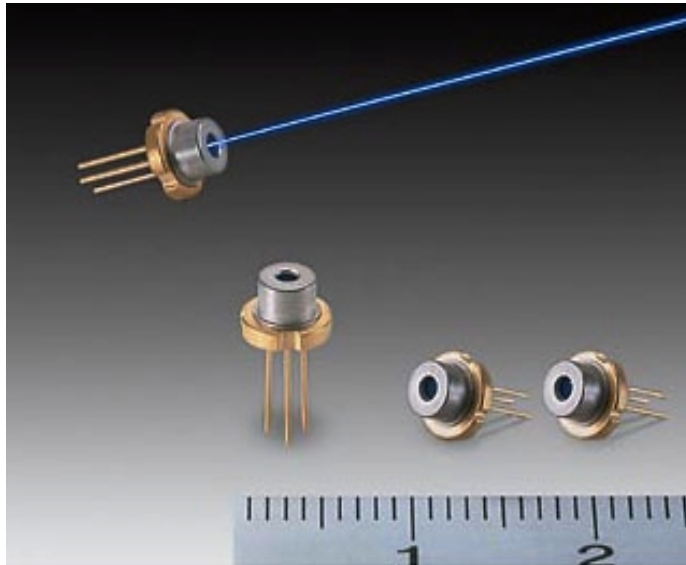
Forte puissance ($> 10 \text{ W}$)

Très mauvais rendement ($< 0.001\ldots$)

Les lasers à semiconducteurs

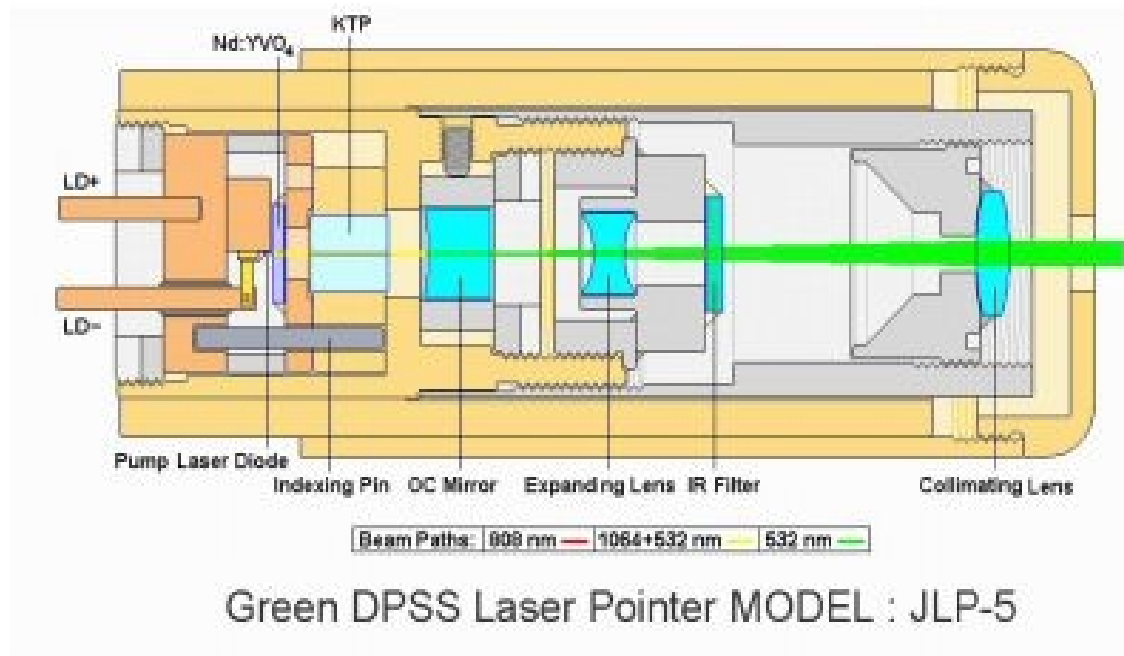
Les « diodes lasers » sont partout :

- lecteurs de CD et DVD
- disques durs d'ordinateur
- systèmes de télécommunications...



Les lasers « solides »

Les « diodes lasers » sont partout :
pointeurs laser...
(plus compliqué : conversions de
fréquence !)



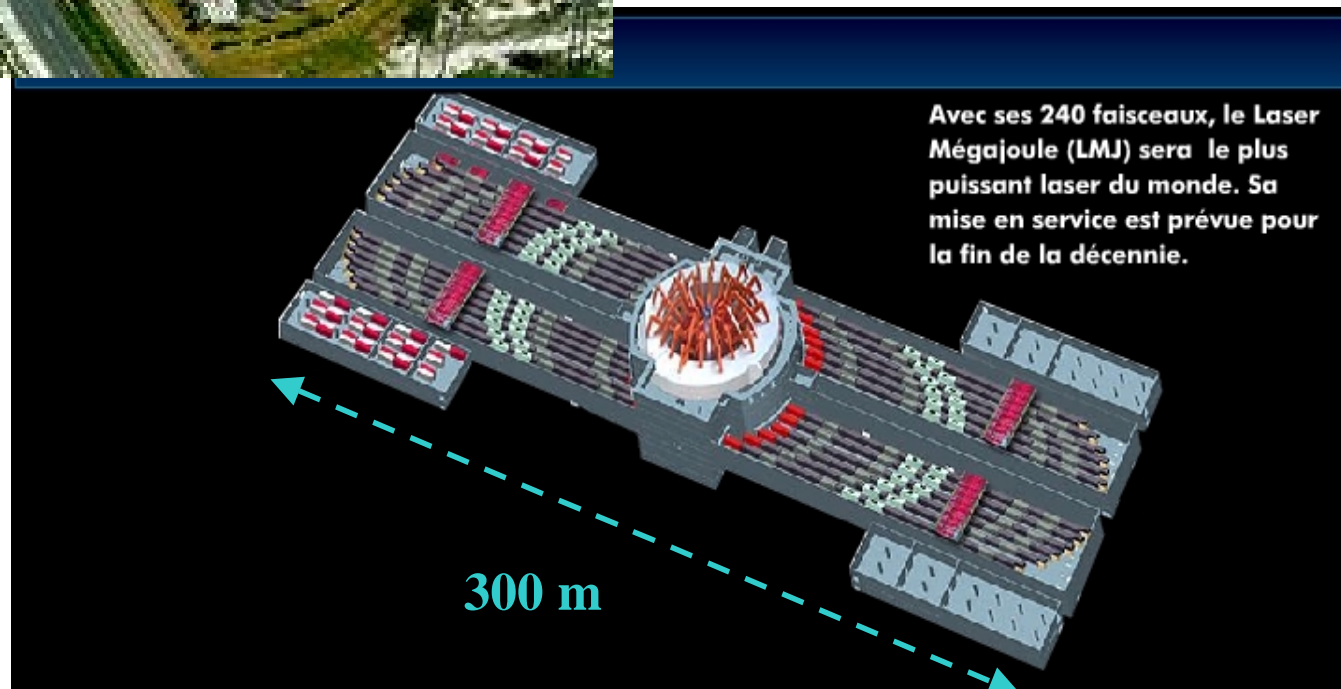
Diode Laser : 808 nm
Nd:YVO₄ : 1064 nm
KTP : 532 nm



Les lasers géants



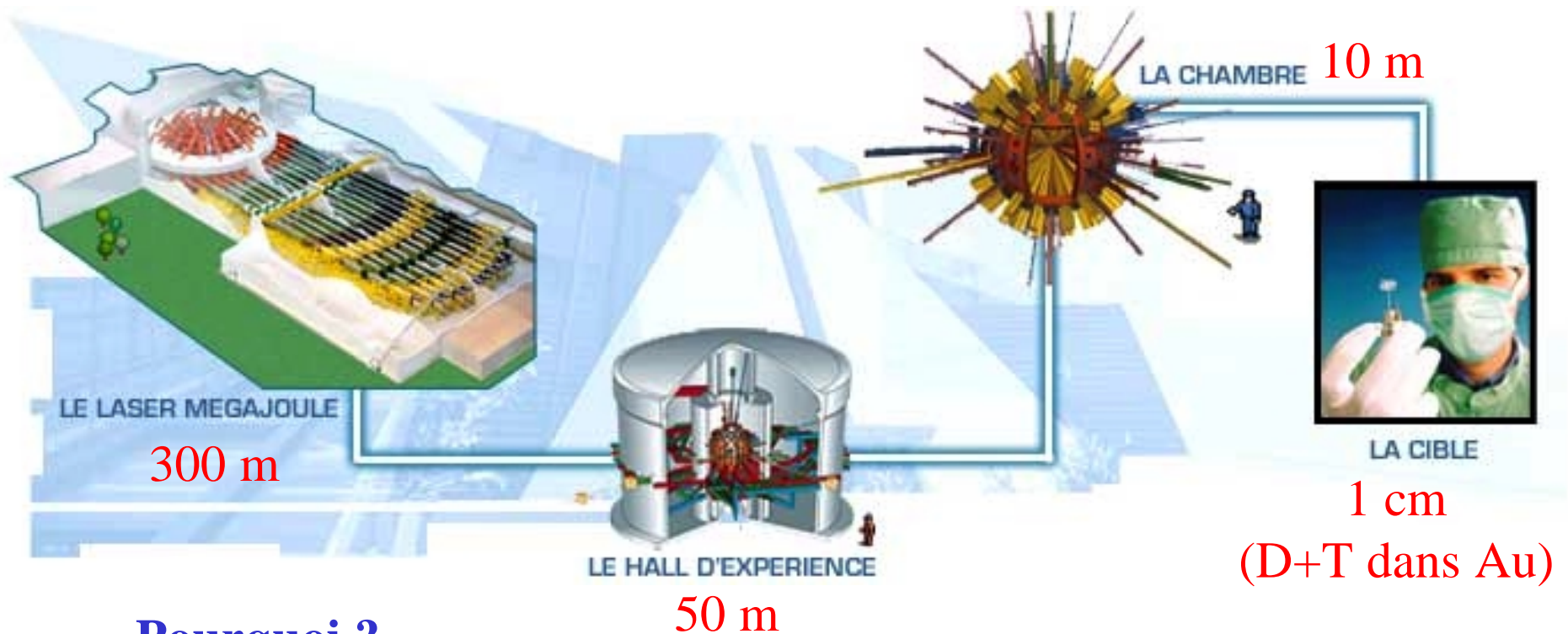
Le plus puissant laser du monde :
le laser « Mégajoule »
(en construction près de Bordeaux)



Avec ses 240 faisceaux, le Laser Mégajoule (LMJ) sera le plus puissant laser du monde. Sa mise en service est prévue pour la fin de la décennie.

Les lasers géants

Objectif du laser « Mégajoule » (LMJ) :
expérimentations sur la fusion thermonucléaire



Pourquoi ?

- interdiction des essais thermonucléaires
- nécessité de « maintenir à niveau » les armes de dissuasion
- option retenue : expérimentation et modélisation intensive

Les lasers

Les lasers servent (presque) à tout !

- * Ecouter de la musique, discuter sur internet, ou au téléphone...
- * Remplacer les essais nucléaires...
- * Outils essentiels en recherche (spectroscopie atomique et moléculaire, optique, piégeage d'atomes, de molécules, de cellules, biologie, astronomie...)
- * Très nombreuses applications industrielles (percage, usinage, découpage de tissus, de matières plastiques, de métaux...)
- * Très nombreuses applications en médecine (scalpel, chirurgie oculaire, chirurgie esthétique, diagnostics biologiques...)

Bonne illustration de la complexité du chemin qui mène d'une découverte fondamentale (1917) aux applications (1977 ->)

PHENOMENES PHYSIQUES DECRITS DANS DES ESPACES DE DIMENSION FINIE

De façon exacte :

- * Le moment cinétique des particules

- moment cinétique "orbital" (nombres quantiques l , m ...)
- moment cinétique "intrinsèque" : **spin**

ex. d'espaces de dimension 2 : spin $1/2$ (électron, proton, neutron...)

polarisation du photon

- * La physique des "mésons neutres" étranges ou beaux : K

- * Les oscillations quantiques de neutrinos *etc...*

De façon approchée :

- * La résonance magnétique nucléaire (RMN)

- * La physique de l'interaction matière rayonnement

- * La physique des lasers (systèmes à 2, 3, 4 niveaux...)

- * La liaison chimique *etc...*