

**Physique
Bachelor semestre 6
2011-2012**

Optique II

Romuald Houdré

Institut de Physique de la Matière Condensée, FSB



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Cours d'Optique II

Physique

Bachelor semestre 6

2013-2014

Romuald Houdré

Institut de Physique de la Matière Condensée, FSB
romuald.houdre@epfl.ch
Tel: 35487

1

Informations pratiques

Les notes de cours ou copie des transparents sont téléchargeables depuis le lien:

<http://wiki.epfl.ch/houdre>

Il est conseillé de les imprimer avant le cours. Les exercices et corrigés seront accessibles quelques jours après la séance.

Formalités de l'examen:

- Oral (en français ou en anglais)
- Une question de cours et un exercice au choix parmi deux tirés au sort
- 30 minutes de préparation, avec formulaire à montrer avant (maximum deux pages ou une recto-verso)
- Examen \approx 30 minutes

2

Bibliographie:

- * **Optics** / E. Hecht, existe en anglais, en français et en allemand
- * **Fundamentals of photonics** / B.E.A. Saleh et M.C. Tech, en anglais
- * **Principle of optics** / M. Born et E. Wolf, en anglais
- * **Lasers and electro-optics** / C.C. Davis, en anglais
- * **Lasers** / A.E. Siegmann, en anglais
- * **Optoélectronique** / E. Rosencher et B. Vinter, en français
- * **Optique** / J.P. Pérez, en français

Certaines figures des notes de cours sont inspirées ou copiées de ces livres

3

Plan

I Introduction

- 1.1 Rappels Optique I
- 1.2 Survol Optique II

2 Cohérence

- 2.1 Introduction.
- 2.2 Intensité spectrale, temps de cohérence.
- 2.3 Degré complexe de cohérence temporelle.
- 2.4 Présentation plus formelle de la cohérence temporelle.
- 2.5 Longueur de cohérence spatiale.
- 2.6 Degré de cohérence spatiale.
- 2.7 Formulation générale de la cohérence.
- 2.8 Polarisation partielle.

3 Rayonnement électromagnétique du corps noir et photométrie

- 3.1 Introduction.
- 3.2 Phénoménologie du rayonnement du corps noir.
- 3.3 Photométrie.
- 3.4 Densité d'états de modes électromagnétiques.
- 3.5 Rayonnement électromagnétique du corps noir.

4 Photons

- 4.1 Introduction.
- 4.2 Quelques expériences fondatrices simples.

- 4.3 Quantification du champ électromagnétique.
- 4.4 Propriétés élémentaires du photon.
- 4.5 Statistique des photons.
- 4.6 Etats quantiques de la lumière.
- 4.7 Remarques sur certains lieux communs sur le photon.

5 Interaction lumière-atomes

- 5.1 Introduction.
- 5.2 Interaction entre une onde électromagnétique et un atome.
- 5.3 Quelques remarques sur l'interaction matière-rayonnement.

6 Lasers

- 6.1 Amplificateur optique.
- 6.2 Résonateur optique.
- 6.3 Laser, description qualitative.
- 6.4 Seuil laser.
- 6.5 Fréquence d'émission laser.
- 6.6 Equations de bilan.
- 6.7 Efficacité externe et puissance émise.
- 6.8 Cas d'une cavité multimode.
- 6.9 Largeur spectrale ultime d'un mode laser.
- 6.10 Exemples particuliers.

4

Chapitre I

Cours d'Optique II

Physique Bachelor semestre 6 2013-2014

I Introduction

I.1 Rappels Optique I

I.2 Survol Optique II

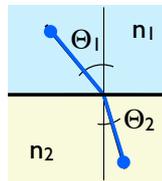
5

Optique géométrique

Principe de Fermat

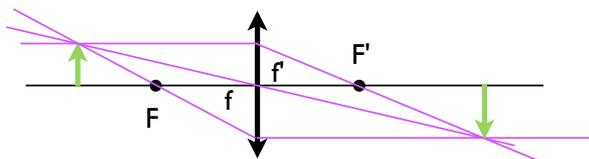
$$\delta \int_A^B n(r) dS = 0 \quad \text{temps de parcours extremum}$$

Réfraction, réflexion



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Lentilles minces



Matrices de transfert ABCD

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

6

Théorie électromagnétique

Equation de propagation $\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{0}$

Equation harmonique de Helmholtz $\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + k^2 \vec{E}(\vec{r}) = \vec{0}$

k: vecteur d'onde $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$

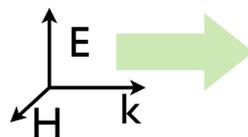
Vitesse de propagation $c^2 = \epsilon_0 \mu_0, v^2 = \epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r$

Indice de réfraction $n = c/v$

7

Théorie électromagnétique

Ondes monochromatiques, ondes planes



E, H, k trièdre direct

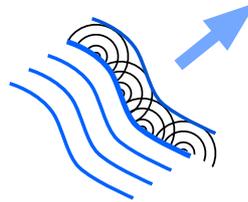
Vecteur de Poynting
propagation de l'énergie $\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H}$

Intensité $I \propto nE^2$

8

Propagation

Principe de Huygens, ondelettes



Approximation paraxiale

Fronts de phase \approx perpendiculaire axe optique

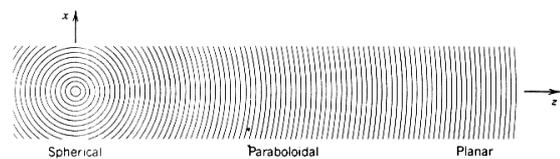
Onde scalaire

$$\nabla_{x,y}^2 A(\vec{r}) - 2ik \frac{\partial}{\partial z} A(\vec{r}) = 0$$

9

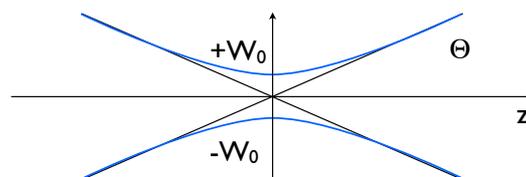
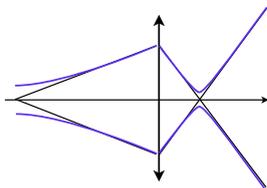
Propagation

Ondes sphériques, paraboloidale
plane, Gaussienne



Optique modes Gaussiens

Apex, W_0
Divergence, Θ_D
Longueur de Rayleigh, z_R
Effet d'une lentille



$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

$$z_R = \frac{\pi W_0^2}{\lambda}$$

$$\Theta_D = \frac{\lambda}{\pi W_0}$$

10

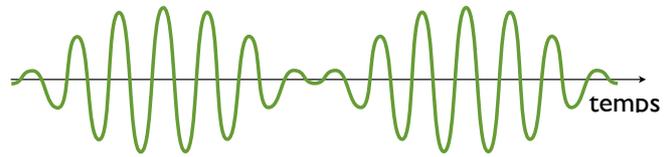
Superposition

Linéarité

E_1, E_2 solutions; $\alpha E_1 + \beta E_2$ est solution

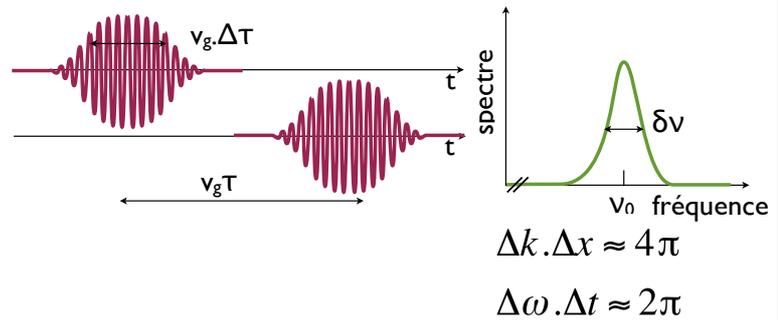
Superposition de deux ondes
Battements

$$f_{\text{battements}} = |f_1 - f_2|$$



Paquet d'onde

$$U(r,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u(\omega) e^{i(\omega t - kr)} d\omega$$



Superposition

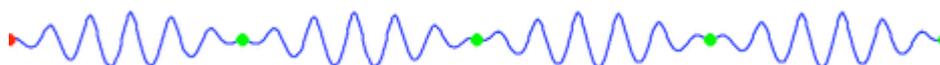
Paquet d'onde

Vitesse de phase, indice de phase

$$v_\varphi = \frac{\omega}{k}, n_\varphi = \frac{c}{v_\varphi}$$

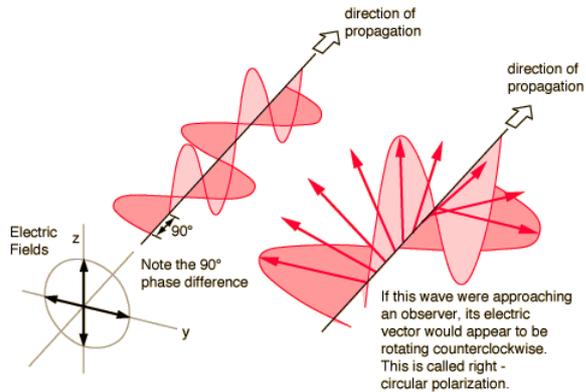
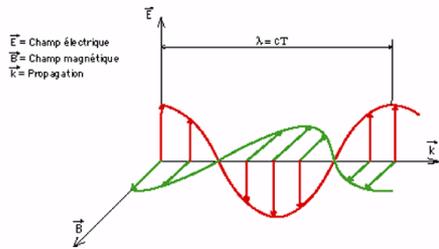
Vitesse de groupe
Indice de groupe

$$v_g = \frac{d\omega(k)}{dk}, n_g = \frac{n(k)}{1 - \frac{k}{n(k)} \frac{dn(k)}{dk}} = \frac{n(\lambda)}{1 + \frac{\lambda}{n(\lambda)} \frac{dn(\lambda)}{d\lambda}}$$



Polarisation

Polarisation linéaire, circulaire, elliptique



Vecteur de Jones, matrice de Jones

$$E = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{pmatrix} \quad E_2 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} E_1$$

$$E_h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, E_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, E_{\sigma^+} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, E_{\sigma^-} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$$

Polariseurs, lame retardatrice, lame demi-onde, lame quart d'onde

13

Diffraction

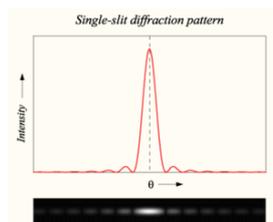
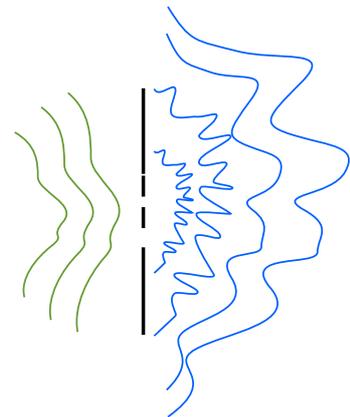
Nombre de Fresnel $N_F = \frac{a^2}{\lambda z}$

a = dimension de la fente

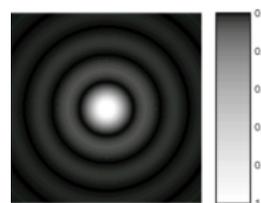
Diffraction de Fresnel, Champ proche, $N_F > 1$

Diffraction de Fraunhofer, champ lointain, $N_F < 1$

Diffraction par une fente, une lame, une ouverture carrée, circulaire



$$\theta_{fente} = \frac{\lambda}{D}$$



$$R_{Airy} = 1.22 \frac{R\lambda}{2a}$$

Résolution angulaire des systèmes optiques

a = dimension de la fente
 R = distance depuis la fente

14

Interférences

Interférences de deux ondes monochromatiques

Fréquences différentes, Σ intensités. $I=I_1+I_2$

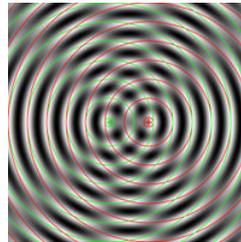
Fréquences égales, terme croisé. $2E_1(r)E_2(r)\cos\Delta\varphi(r)$

Figures d'interférences

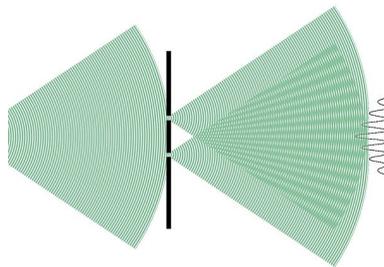
Franges d'interférences

Visibilité

$$v = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



Fentes de Young

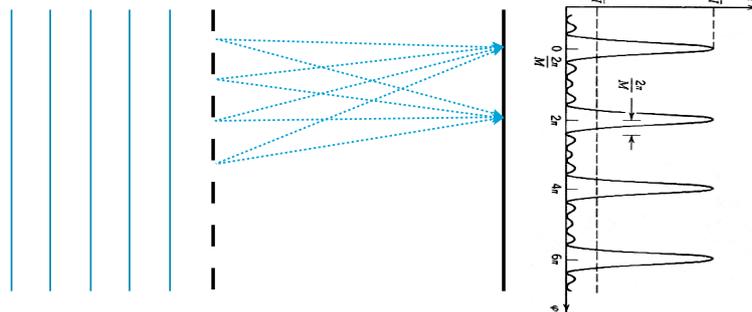


15

Interférences

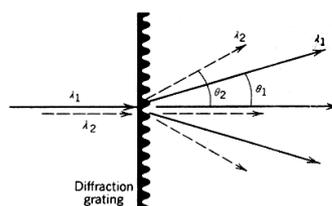
Interférences multiples

Réseaux



Résolution

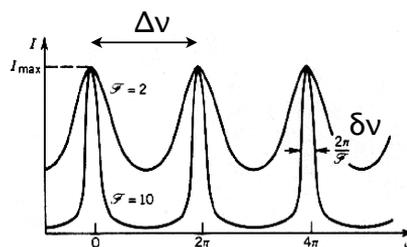
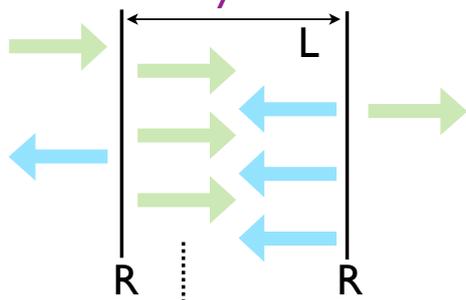
$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad m: \text{ordre}, N: \text{nombre total de traits}$$



16

Interférences

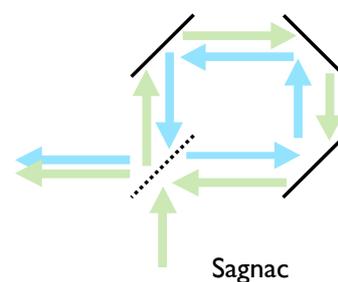
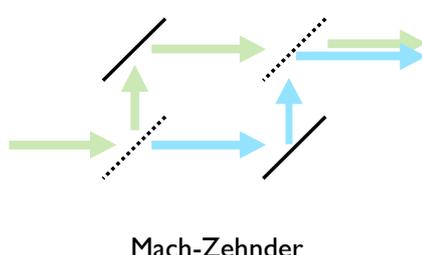
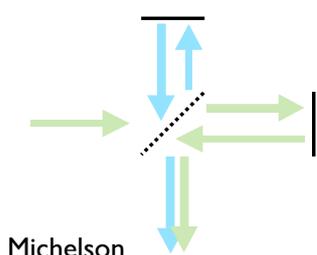
Résonateur Fabry-Perot



Finesse, facteur de qualité, fonction d'Airy

$$F = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad \Delta\nu = \frac{c}{2L}, \quad Q = \frac{\nu}{\delta\nu}$$

Interféromètres



17

Plan

I Introduction

- 1.1 Rappels Optique I
- 1.2 Survol Optique II

2 Cohérence

- 2.1 Introduction.
- 2.2 Intensité spectrale, durée et longueur de cohérence.
- 2.3 Largeur de cohérence, étendue spatiale de la source.
- 2.4 Degré complexe de cohérence temporelle.
- 2.5 Présentation plus formelle de la cohérence temporelle.
- 2.6 Degré de cohérence spatiale.
- 2.7 Formulation générale de la cohérence.
- 2.8 Polarisation partielle.

3 Rayonnement électromagnétique du corps noir et photométrie

- 3.1 Introduction.
- 3.2 Phénoménologie du rayonnement du corps noir.
- 3.3 Densité d'états de modes électromagnétiques.
- 3.4 Photométrie.
- 3.5 Rayonnement électromagnétique du corps noir.

4 Photons

- 4.1 Introduction.
- 4.2 Quelques expériences fondatrices simples.

- 4.3 Quantification du champ électromagnétique.
- 4.4 Propriétés élémentaires du photon.
- 4.5 Statistique des photons.
- 4.6 Etats quantiques de la lumière.
- 4.7 Remarques sur certains lieux communs sur le photon.

5 Interaction lumière-atomes

- 5.1 Introduction.
- 5.2 Interaction entre une onde électromagnétique et un atome.
- 5.3 Quelques remarques sur l'interaction matière-rayonnement.

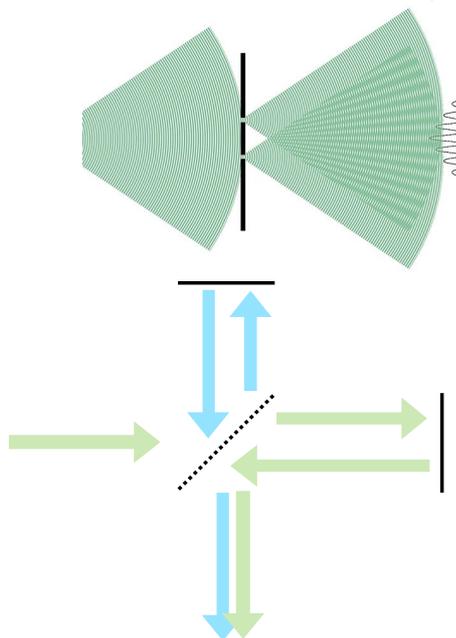
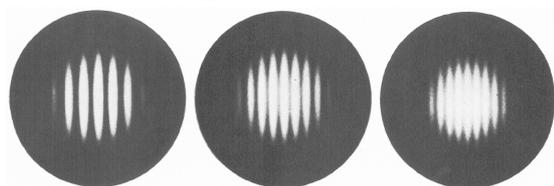
6 Lasers

- 6.1 Amplificateur optique.
- 6.2 Résonateur optique.
- 6.3 Laser, description qualitative.
- 6.4 Seuil laser.
- 6.5 Fréquence d'émission laser.
- 6.6 Equations de bilan.
- 6.7 Efficacité externe et puissance émise.
- 6.8 Cas d'une cavité multimode.
- 6.9 Largeur spectrale ultime d'un mode laser.
- 6.10 Exemples particuliers.

18

Aperçu cours II, Cohérence

Interférences de deux ondes provenant d'une source étendue, visibilité des franges



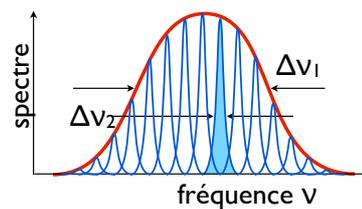
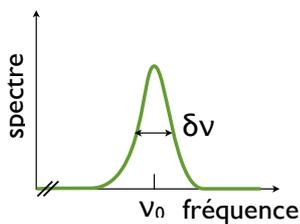
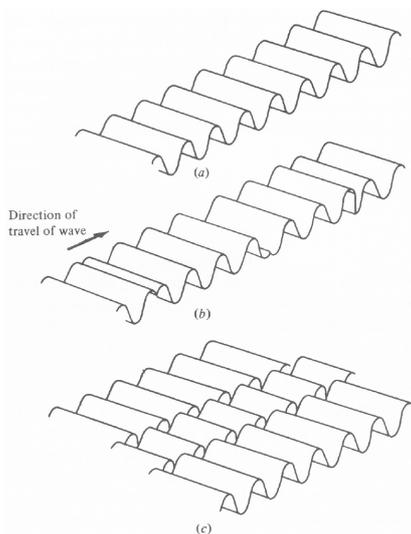
Source étendue
Séparation spatiales des ondes initiales
Cohérence spatiale
Séparation temporelle des ondes initiales
Cohérence temporelle
Cohérence partielle

19

Aperçu cours II, Cohérence

Comment la cohérence d'une source évolue dans le temps et durant la propagation

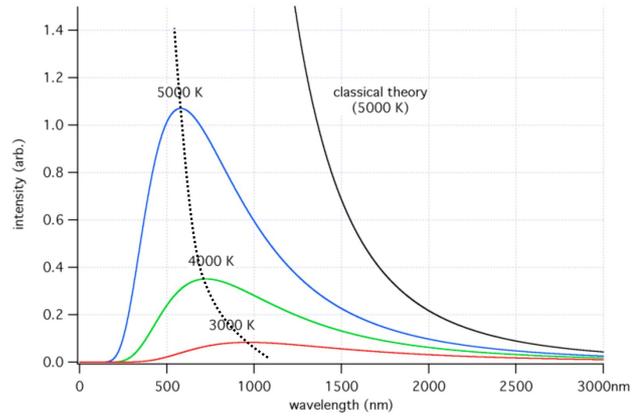
Cohérence et largeur de raie



20

Aperçu cours II, Rayonnement du corps noir

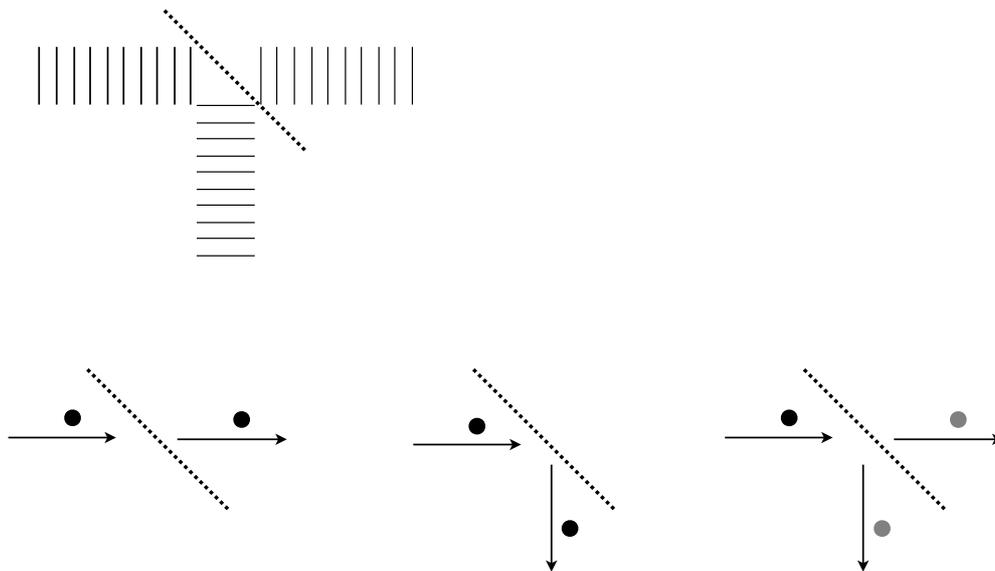
Comprendre le spectre d'émission d'un corps incandescent



21

Aperçu cours II, Photons

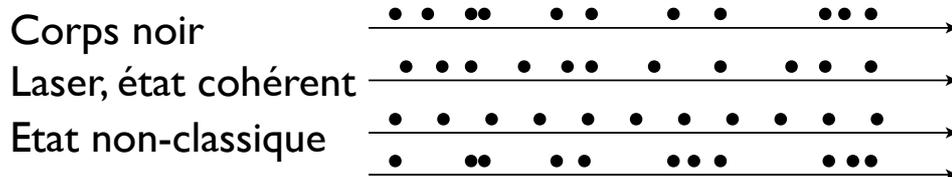
Expériences fondatrices



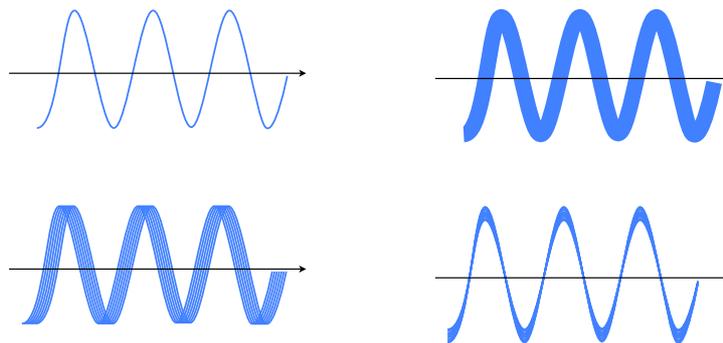
22

Aperçu cours II, Photons

Statistique des photons

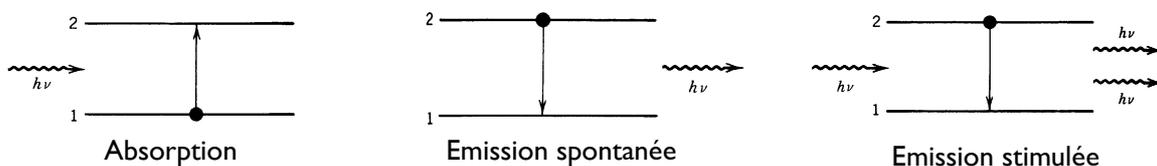


Etats classiques et non-classiques de la lumière



Aperçu cours II, Lumière et atomes

Absorption, émission spontanée, émission stimulée



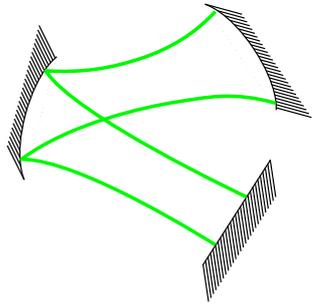
Ces trois mécanismes sont ils indépendants ? Non

Ces trois mécanismes sont ils universels ? Non

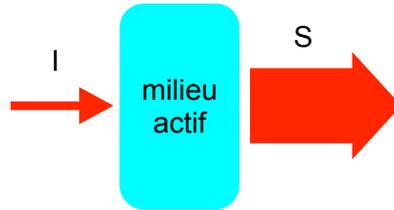
Peut on faire un amplificateur optique ? Oui, sous certaines conditions

Aperçu cours II, Lasers

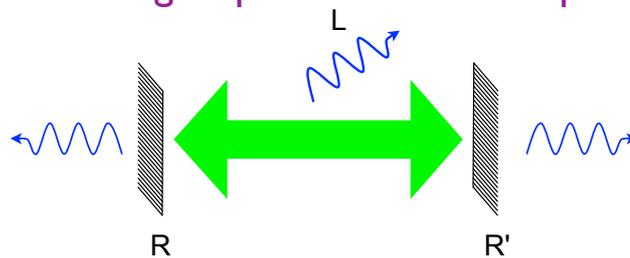
Résonateur optique



Milieu actif avec du gain optique

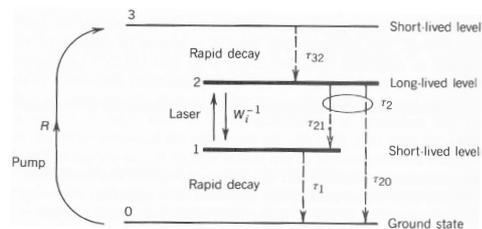
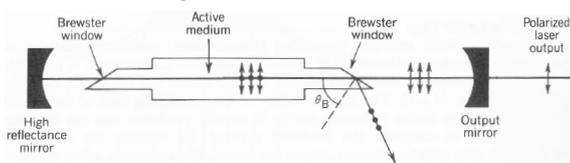


Que se passe t'il si le gain par aller-retour dépasse les pertes ?



Aperçu cours II, Lasers

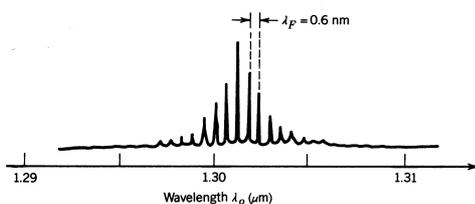
Lasers atomiques



Lasers accordables

Caractéristiques physiques

- Spectre
- Rendement
- Continu ou impulsions



Spectre d'émission laser multimode

