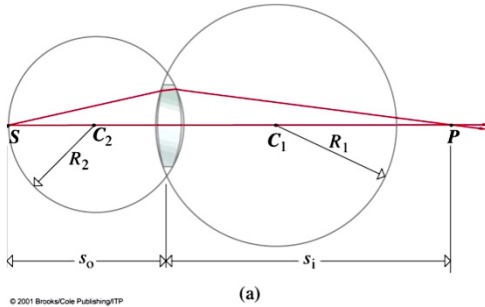


# OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE – Résumé

On a introduit les propriétés des lentilles minces sphériques.

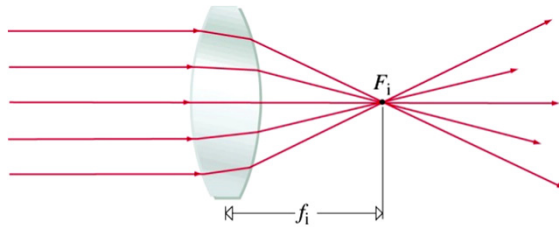


Équation des lunetiers

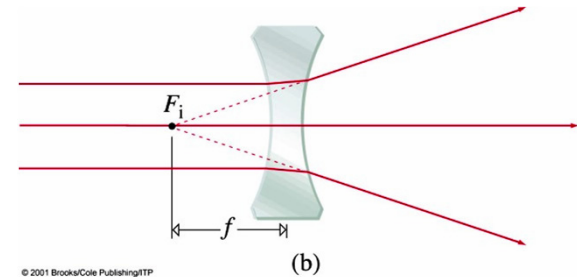
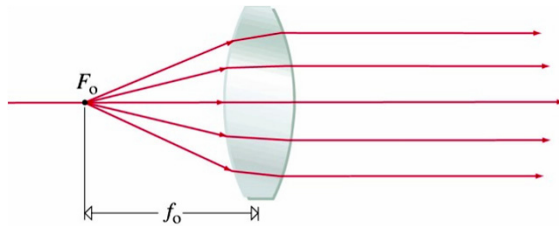
$$\frac{1}{f_o} = \frac{1}{f_i} = \frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Équation de conjugaison

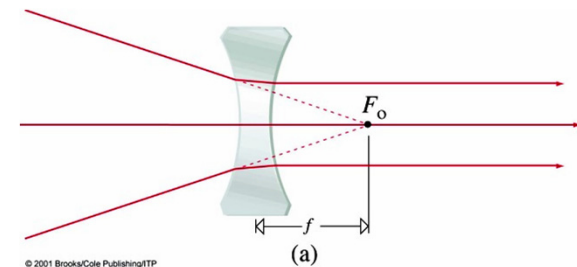
$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$



Lentille biconvexe –  $f > 0$

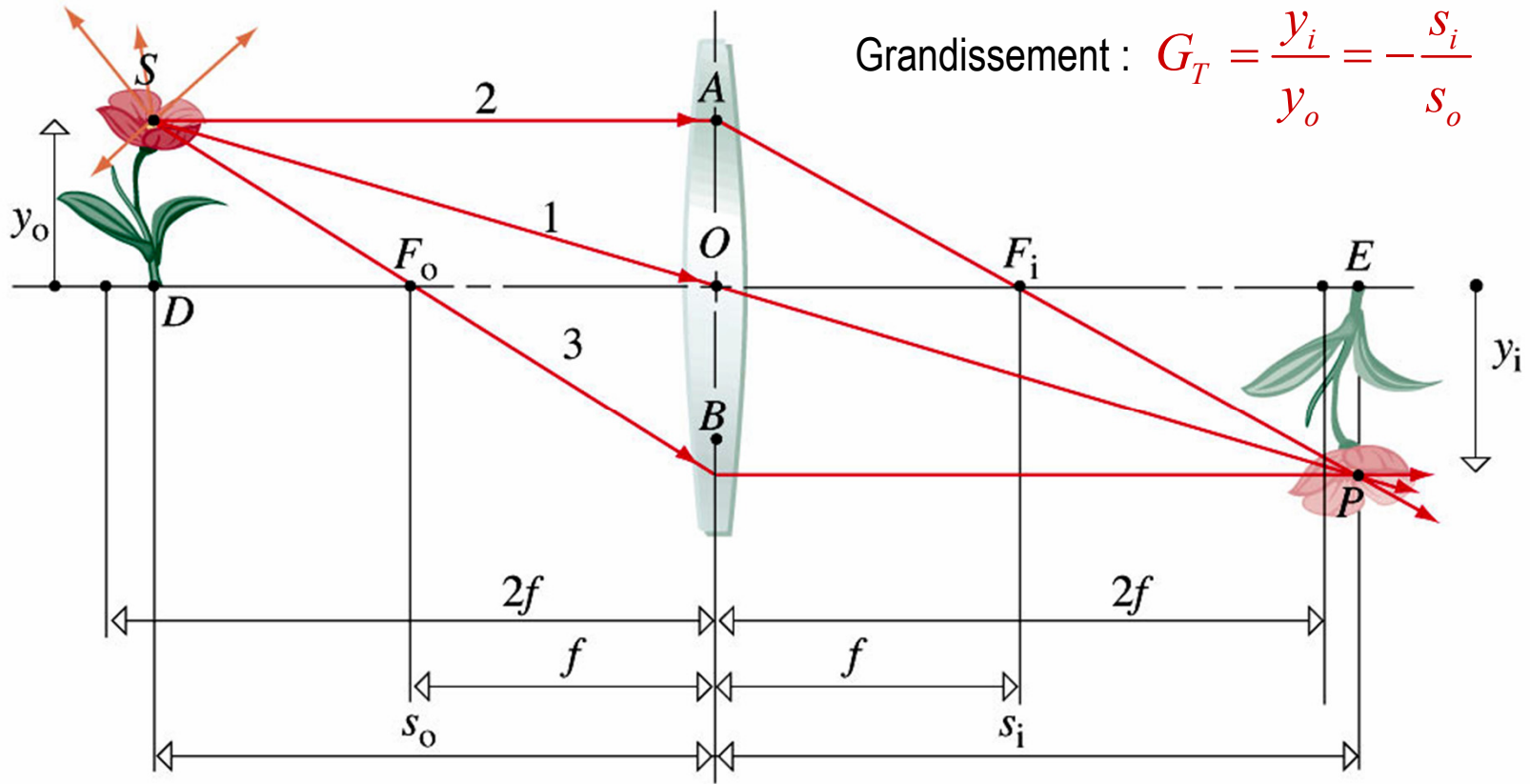


Lentille biconcave –  $f < 0$



# OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE – Résumé

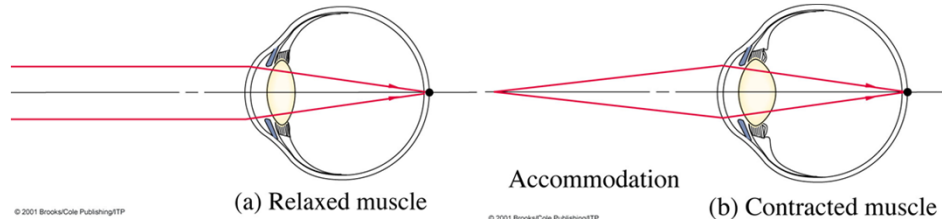
Les rayons 1, 2 et 3 permettent d'obtenir graphiquement la position d'une image (ou de l'objet) à partir de la seule connaissance de la focale  $f$  de la lentille et de la position de l'objet (ou de l'image).



© 2001 Brooks/Cole Publishing/ITP

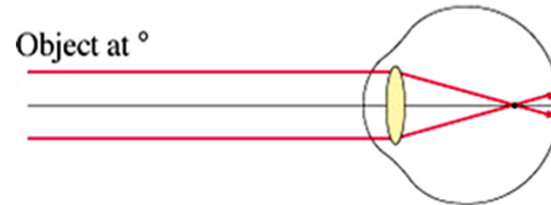
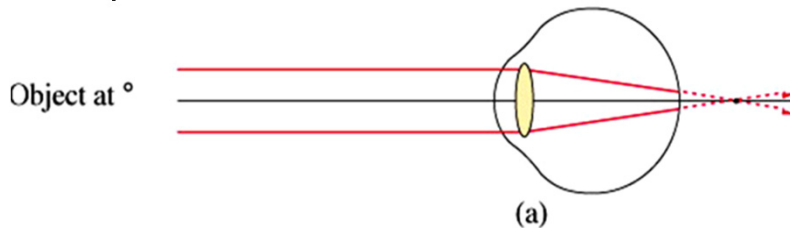
# L'ŒIL HUMAIN – Résumé

La distance image  $s_i$  de la lentille formée par l'œil est la distance  $d$  entre le cristallin et la rétine. Elle est fixe et le seul moyen de voir nettement des objets à différentes distances  $s_o$  est d'adapter la distance focale en déformant le cristallin.



Hypermétropie : la distance image est plus grande que la distance cristallin-rétine.

Myopie : la distance image est plus petite que la distance cristallin-rétine.



Ces défauts de vision se corrigent avec des lunettes.

Pour calculer l'effet de lunettes, on utilise la formule suivante qui donne la focale  $f$  d'une lentille formée de deux lentilles de focale  $f_1$  et  $f_2$  en contact :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

La puissance dioptrique  $D = \frac{1}{f}$  permet d'écrire cette relation comme  $D = D_1 + D_2$

# PHOTONS ET ATOMES

---

L'effet photoélectrique

Dualité onde-particule

Le photon

L'atome de Bohr

Le LASER

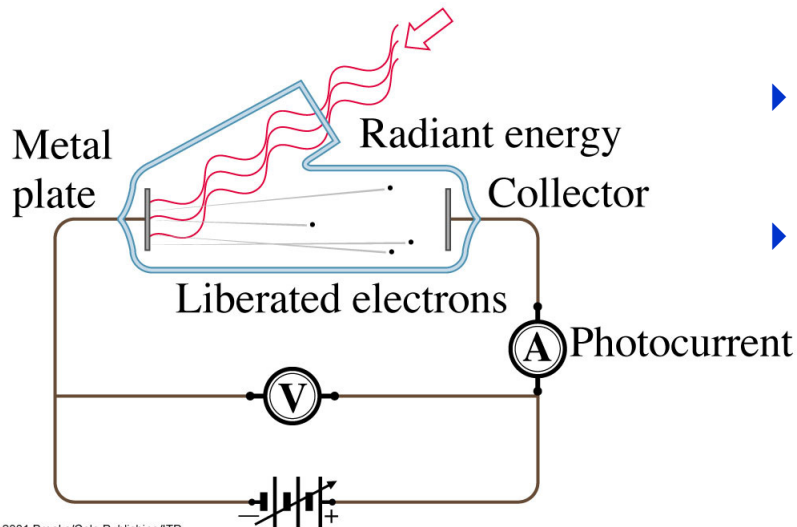
Kane chapitres 26-27  
Hecht chapitres 29-30

# EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

En 1857, Heinrich Hertz découvre l'effet photoélectrique, c'est-à-dire l'émission d'électrons par un métal illuminé par de la lumière.

Le concept classique de la lumière où l'énergie est uniformément distribuée sur la surface illuminée ne permettait pas de comprendre l'effet photoélectrique. Les propriétés suivantes ne sont pas compatibles avec une distribution d'énergie uniforme :

- ▶ Il existe pour chaque matériau une fréquence caractéristique  $f_{\text{seuil}}$  en-dessous de laquelle on ne mesure pas de courant photoélectrique.
- ▶ La vitesse d'éjection des électrons ne dépend pas de l'intensité du faisceau.
- ▶ La vitesse d'éjection ne dépend que de la fréquence du rayonnement. Si la fréquence augmente, alors la vitesse d'éjection augmente aussi.



© 2001 Brooks/Cole Publishing/ITP

# Quanta d'énergie: le photon

---

Dans sa tentative d'expliquer l'effet photoélectrique, en 1905 Einstein émit l'hypothèse que l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique n'est pas distribuée d'une façon continue dans l'onde électromagnétique (aspect ondulatoire), mais concentrée en certains points qui se déplacent avec elle (aspect corpusculaire) : la lumière est constituée d'un flux de particules énergétiques sans masse, les photons.

L'énergie d'un photon est :

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

$h$  est la constante de Planck:  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J/Hz} = 4.135669 \times 10^{-15} \text{ eV/Hz}$ .

Chaque photon dépose un quantum d'énergie  $hf$  lors de son impact avec la matière.

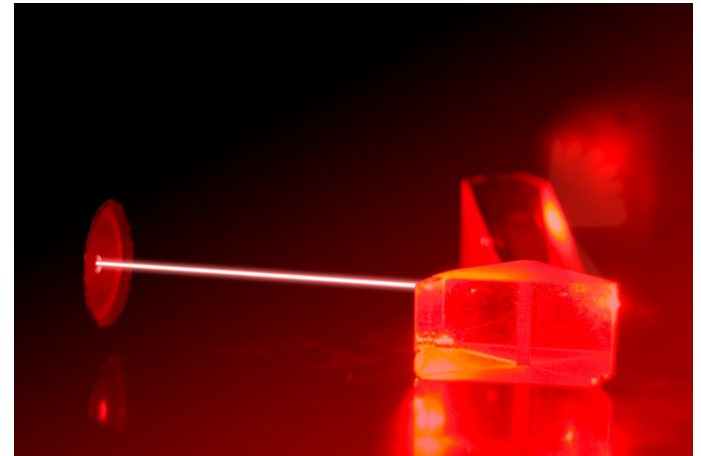
Ainsi :

- ▶ Si  $hf$  est suffisant, un seul photon est en mesure d'éjecter un électron.
- ▶ L'électron utilise une partie de cette énergie pour s'arracher du métal (travail d'extraction  $\Phi = hf_{\text{seuil}}$ ) et emporte le reste de cette énergie sous forme d'énergie cinétique.
- ▶ Si  $hf$  est insuffisant, augmenter le flux de photons (c'est-à-dire l'intensité du faisceau lumineux) n'aura aucun effet sur l'émission d'électrons.

# Les photons d'un faisceau laser – Exemple

**QUESTION :** Un laser à hélium-néon émet un faisceau de lumière rouge formé par une bande très étroite de fréquences centrée sur  $4.74 \times 10^{14}$  Hz.

- Déterminez l'énergie d'un photon à cette fréquence.
- Déterminez le flux de photons (nombre de photons tombant sur une surface plane et perpendiculaire par seconde) d'un tel laser d'une puissance de 1.0mW.
- Déterminez la densité de ce flux pour un faisceau de  $3.14 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup> de section, c'est-à-dire le flux par unité de surface.



**SOLUTION :** a) L'énergie d'un photon est donnée par :

$$\begin{aligned} E_{\gamma} = hf &= (6.626 \times 10^{-34} \text{ J/Hz})(4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3.14 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= (4.1357 \times 10^{-15} \text{ eV/Hz})(4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 1.96 \text{ eV} \end{aligned}$$

# Les photons d'un faisceau laser – Exemple

---

b) La puissance (= énergie par unité de temps ) est connue. En la divisant par l'énergie de chaque photon, on obtient le flux de photons:

$$\Phi_{Photons} = \frac{P}{hf} = \frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ W}}{3.14 \times 10^{-19} \text{ J}} \approx 3.2 \times 10^{15} \text{ photons/s}$$

c) La densité de ce flux est simplement le flux par unité de surface:

$$\frac{\Phi_{Photons}}{A} = \frac{3.2 \times 10^{15} \text{ photons/s}}{3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 1.0 \times 10^{21} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

# Dualité entre aspects ondulatoire et corpusculaire

---

La **lumière** et toutes les autres formes de **rayonnements électromagnétiques** qui interagissent avec la matière lors de l'émission et de l'absorption d'énergie rayonnée, se comportent comme un flux de paquets d'énergie (photons) qui se déplacent à la vitesse de la lumière et se propagent dans l'espace comme une onde.

Cette dualité onde-particule est au cœur même de la mécanique quantique. Il n'est pas possible de dire si la lumière est de nature corpusculaire ou ondulatoire: ce sont deux aspects d'une seule et même entité physique.

Selon le phénomène étudié, un aspect ou l'autre peut dominer le comportement.

Ensemble, ils forment une description moderne de la lumière.

# Atomes et lumière

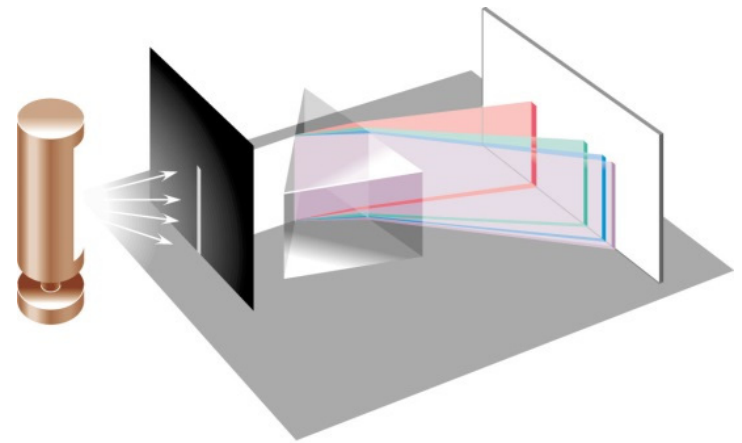
Le système le plus important capable de rayonner de la lumière est l'électron lié à son atome. Presque tous les phénomènes optiques sont dominés par l'absorption et l'émission de lumière par les électrons de valence (ceux des couches électroniques les plus éloignés du noyau atomique).

Chaque électron occupe habituellement son état d'énergie le plus bas, et l'atome dans son ensemble est dans son état fondamental. Sans perturbation extérieure, il y reste. Si un processus fournit de l'énergie à l'atome, un électron peut être excité vers un niveau énergétique plus élevé.

L'excitation est un phénomène de résonance de courte durée. Habituellement, après un temps de l'ordre de  $10^{-9}$  s, l'électron retourne à son état fondamental en restituant l'énergie qu'il a reçu sous forme de radiation électromagnétique, aussi dans le spectre visible.

Les premières expériences de spectroscopie, effectuées en projetant de la lumière émise par un gaz chauffé vers un prisme, révèlent des bandes de couleurs discrètes.

Pour chaque substance, le rayonnement électromagnétique a de longueurs d'onde bien spécifiques.



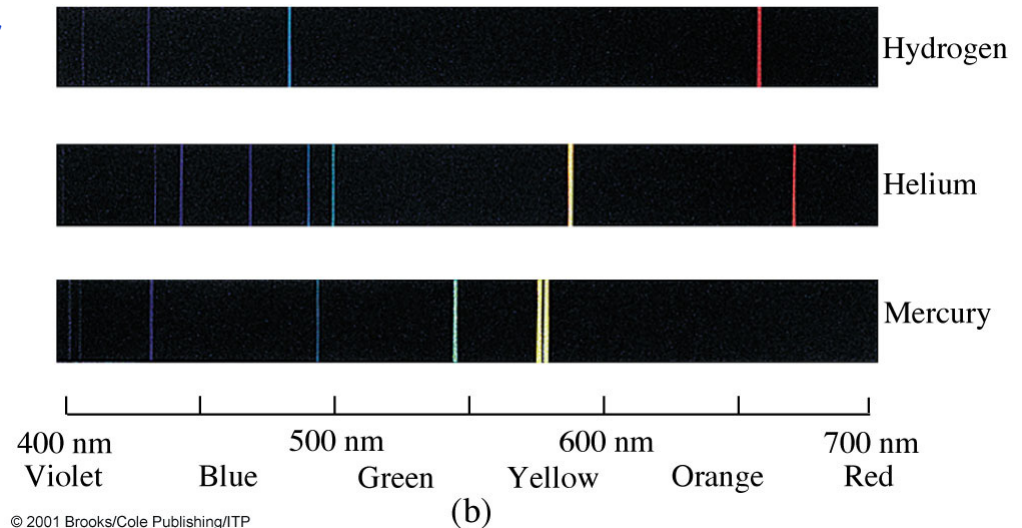
© 2001 Brooks/Cole Publishing/ITP

(a)

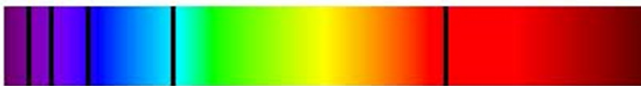
# Atomes et lumière

Chaque substance est caractérisée par un spectre d'émission particulier.

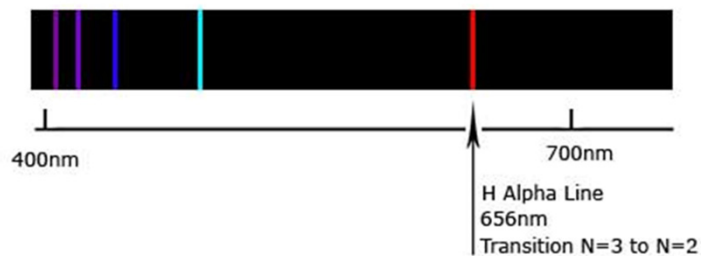
Ces même substances absorbent la lumière blanche aux longueurs d'onde correspondant aux raies d'émission.



Spectre d'absorption de l'Hydrogène



Spectre d'émission de l'Hydrogène

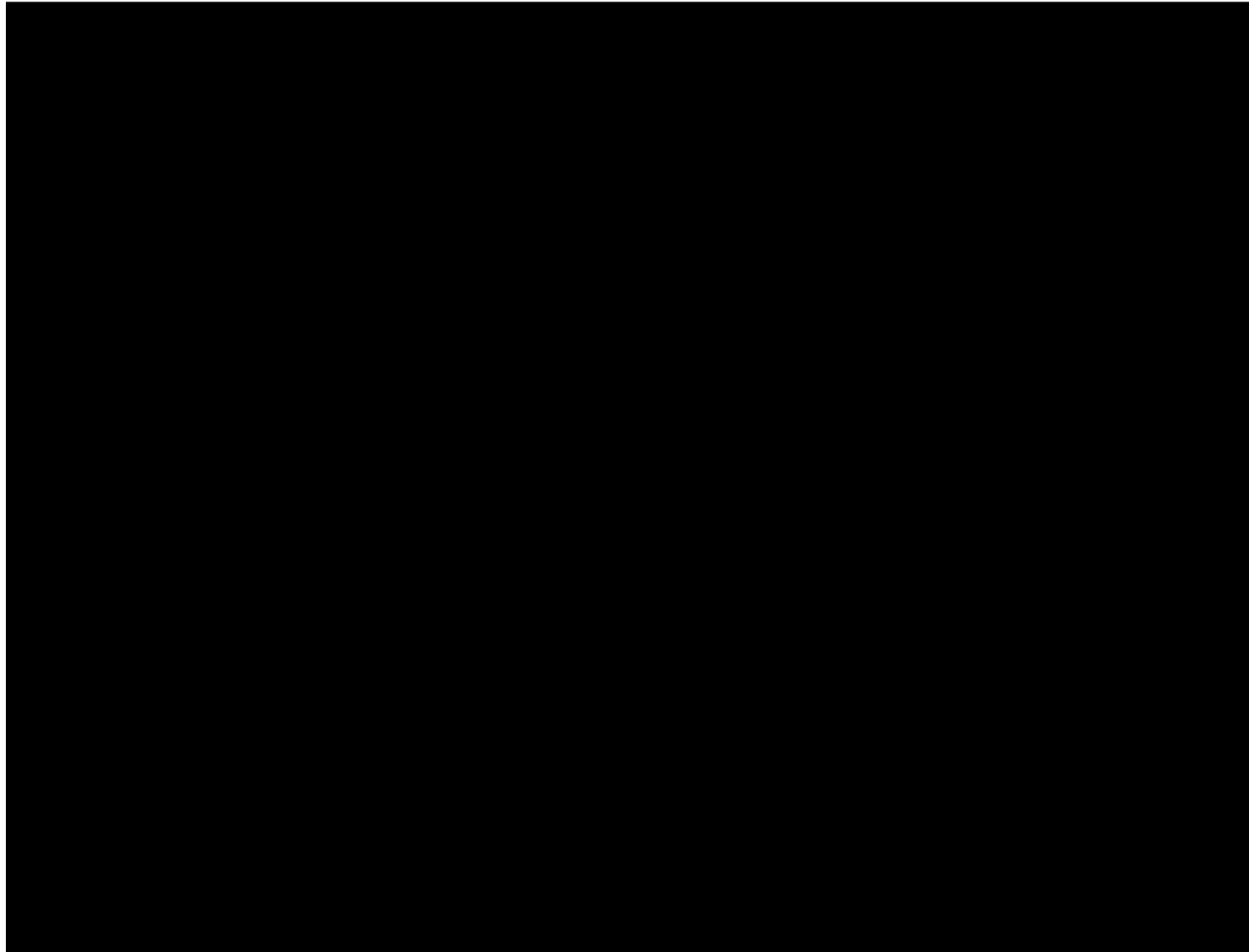


Ces raies de lumière discrètes émises par un atome ne peuvent s'expliquer par les équations classiques (Newton, électromagnétisme classique, etc..).

Tout indique que les atomes ont une structure interne complexe avec valeurs d'énergie bien particulières, dont on observe le passage de l'un à l'autre, au travers d'émission de photons d'énergie  $hf$ .

# Atomes et lumière

---



# Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène

---

La découverte de l'électron par Thomson en 1897 et les expériences de Rutherford en 1911 conduisent les scientifiques à envisager que les atomes aient une structure interne, formée d'un très petit noyau positif entouré d'une distribution étendue d'électrons négatifs.

Une série d'hypothèses clés sur la nature de ce nuage pour un système à un seul électron furent énoncées en 1913 par N. Bohr. Selon lui, cet électron:

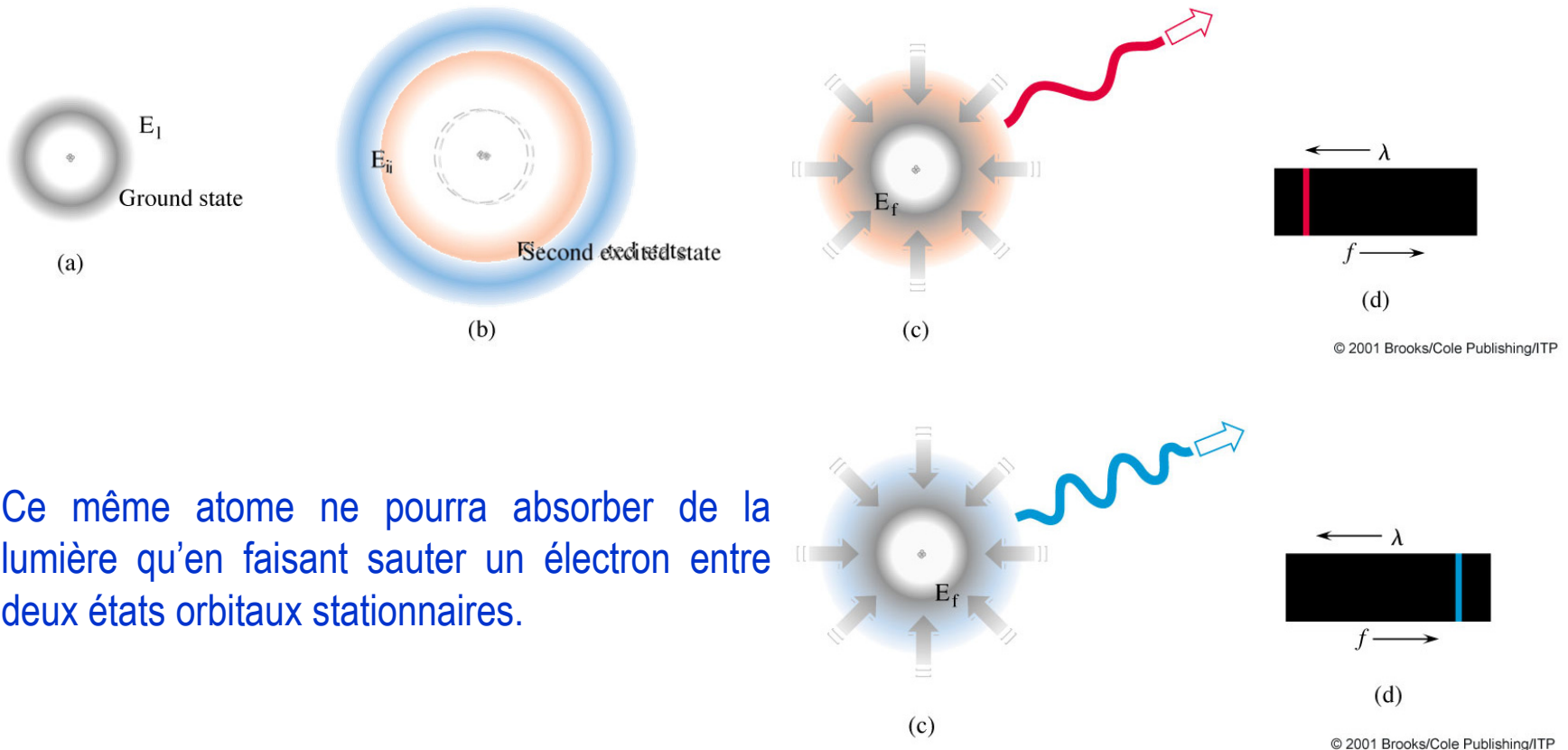
- ▶ décrit une orbite circulaire autour du noyau
- ▶ n'existe que sur certaines orbites discrètes (orbitales stationnaires)
- ▶ n'émet pas de radiation tant qu'il reste sur une de ces orbites \*

\* Selon l'électromagnétisme classique, une charge en mouvement non uniforme, comme l'est un mouvement circulaire, perd son énergie sous forme de rayonnement électromagnétique.

# L'atome de Bohr

Selon le modèle de Bohr, un atome ne peut émettre de la lumière que lorsque l'électron saute d'un état orbital stationnaire à un autre.

$$hf = E_{\text{initiale}} - E_{\text{finale}}$$



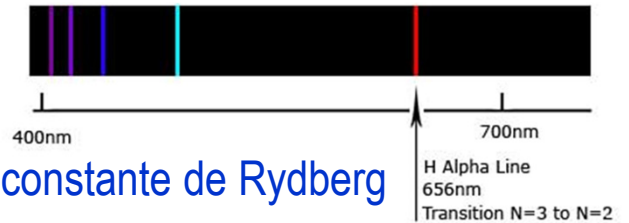
Ce même atome ne pourra absorber de la lumière qu'en faisant sauter un électron entre deux états orbitaux stationnaires.

# L'atome de Bohr

Bohr avait connaissance des spectres d'absorption et d'émission atomiques, dont ceux de l'hydrogène, élément le plus simple mesuré par Balmer en 1885. Balmer avait trouvé que les 4 raies dans le visible ( $\lambda=656$  nm, 486 nm, 434 nm et 410 nm: la série de Balmer) obéissent à la formule :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right] ; n = 3, 4, 5, 6$$

$R$  est la constante de Rydberg



Bohr découvrit qu'il pouvait concilier cette formule avec sa théorie s'il supposait que le moment cinétique angulaire de l'électron  $L$  était égal à un nombre entier  $n$  fois  $h/2\pi$ . Si  $m_e$  est la masse de l'électron et  $v_n$  la vitesse de l'électron sur la  $n^{\text{ième}}$  orbite possible de rayon  $r_n$  on peut montrer que:

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} ; n = 1, 2, 3, \dots \quad \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

$n$  est appelé nombre quantique de l'orbite.

Le moment cinétique est quantifié et ses valeurs possibles sont des multiples entiers de  $h/2\pi$ .

# L'atome de Bohr – rayon atomique

Un électron sur une orbite circulaire de rayon  $r_n$  subit une accélération centripète  $v^2/r_n$  produite par la force d'attraction électrique entre l'électron négatif et le noyau positif, selon la loi de Coulomb :

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Ze)e}{r^2}$$

ainsi: 
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n} \quad \text{d'où} \quad r_n = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v_n^2}$$

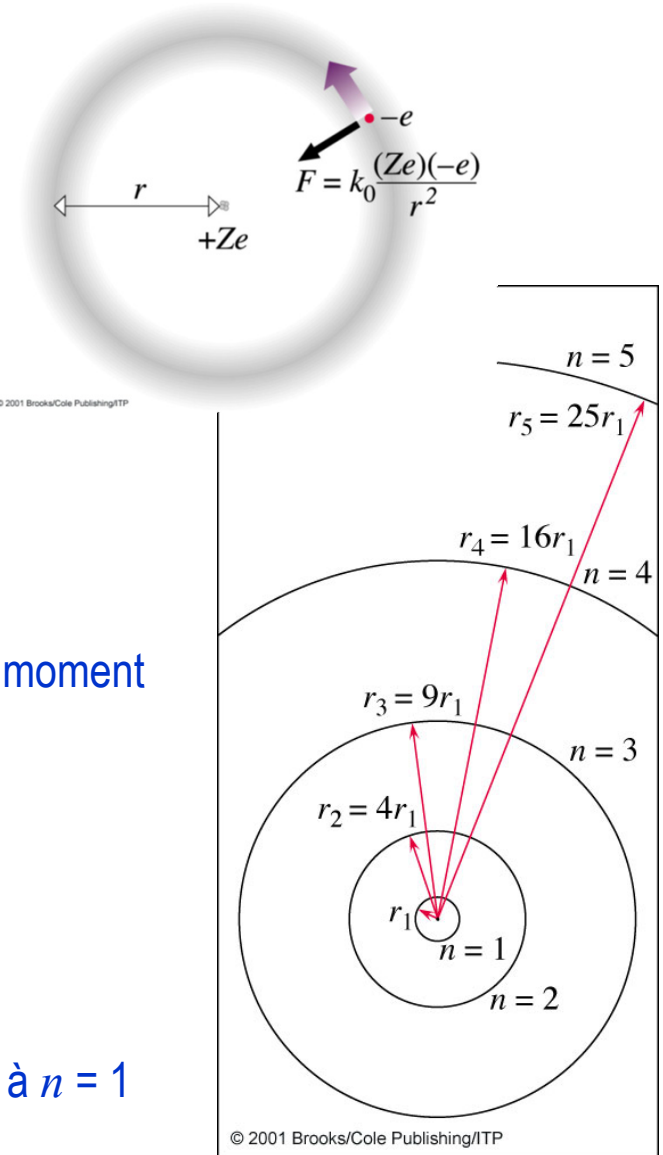
La quantité  $v_n$  peut être éliminée en utilisant l'expression du moment cinétique angulaire:

$$L_n = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$v_n = n \frac{h}{2\pi r_n m_e}$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{Ze^2 \pi m_e} = n^2 r_1$$

Pour l'hydrogène avec  $Z = 1$ , la plus petite orbite correspond à  $n = 1$  et a un rayon  $r_1 = 0.0529177 \text{ nm}$



# L'atome de Bohr – niveaux d'énergie

---

Sur chacune de ces orbites, l'électron doit avoir une énergie définie.

L'énergie totale équivaut à la somme des énergies cinétique et potentielle.

L'énergie potentielle de l'électron est donné par  $E_p = qV = -eV$ , où  $V$  est le potentiel dû à une charge ponctuelle  $+Ze$  donné par:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze}{r}$$

Alors :

$$E_p = -eV = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

L'énergie totale d'un électron dans la  $n^{\text{ième}}$  orbite de rayon  $r_n$  s'écrit alors :

$$E_n = \frac{1}{2} m_e v_n^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n}$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{Ze^2 \pi m_e}$$

$$v_n = n \frac{h}{2\pi r_n m_e}$$

# L'atome de Bohr – niveaux d'énergie

En remplaçant  $v_n$  et  $r_n$  par leurs valeurs trouvées précédemment, on obtient :

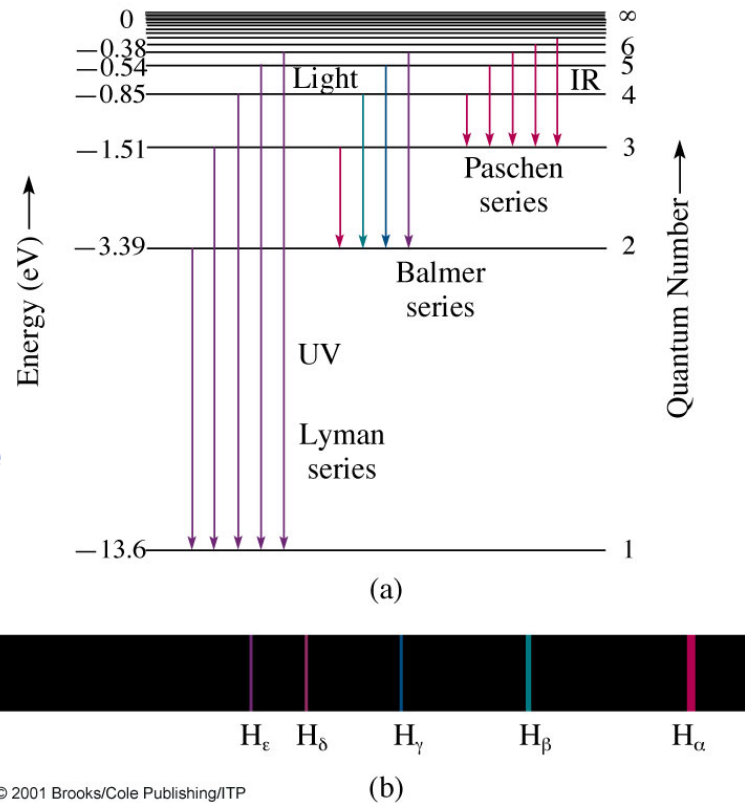
$$E_n = -\left(\frac{Z^2 e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2}\right)\left(\frac{1}{n^2}\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Pour l'hydrogène, le niveau le plus bas avec  $n = 1$  est :

$$E_1 = -2.17 \times 10^{-18} \text{ J} = -13.6 \text{ eV}$$

En notant que l'énergie de l'état fondamental ( $n = 1$ ) de l'hydrogène ( $Z = 1$ ) vaut  $-13.6 \text{ eV}$ , nous pouvons écrire l'équation pour  $E_n$  ainsi:

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



# Modèle de l'atome – hypothèse de Louis de Broglie

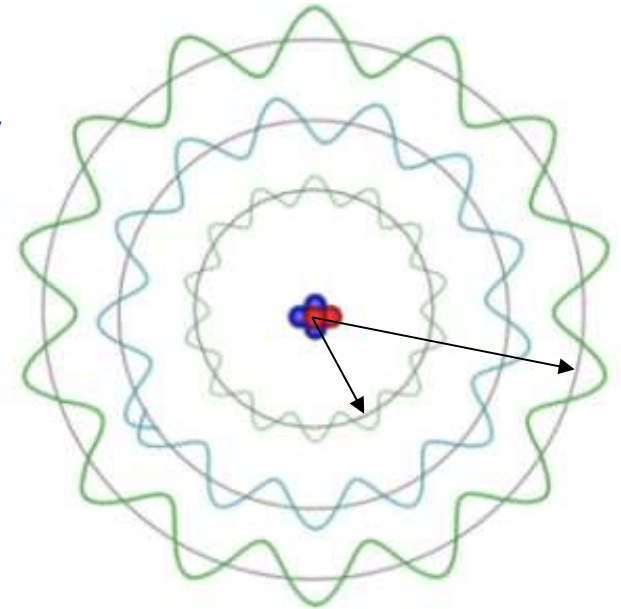
Le modèle de Bohr était empirique: ses supposition visaient en effet à mettre la théorie en accord avec l'expérience. En 1923 Louis de Broglie répandit l'idée de la dualité onde-particule. Il supposa que si la lumière se comportait tantôt comme une onde et tantôt comme une particule, il se pouvait aussi que les choses que nous concevons comme des particules (les électrons et autres corps matériels) aient peut être aussi des propriétés ondulatoires.

De Broglie émit l'idée qu'à toute particule matérielle de masse  $m$  et de vitesse  $v$  doit être associée une onde dont la longueur d'onde vaut:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Dans le cas des orbites électroniques, seules les ondes dont la circonférence de l'orbite circulaire contient un nombre entier de  $\lambda$  existent, soit

$$2\pi r_n = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



# Modèle de l'atome – hypothèse de Louis de Broglie

En remplaçant  $\lambda$  par  $h/mv$ , nous obtenons

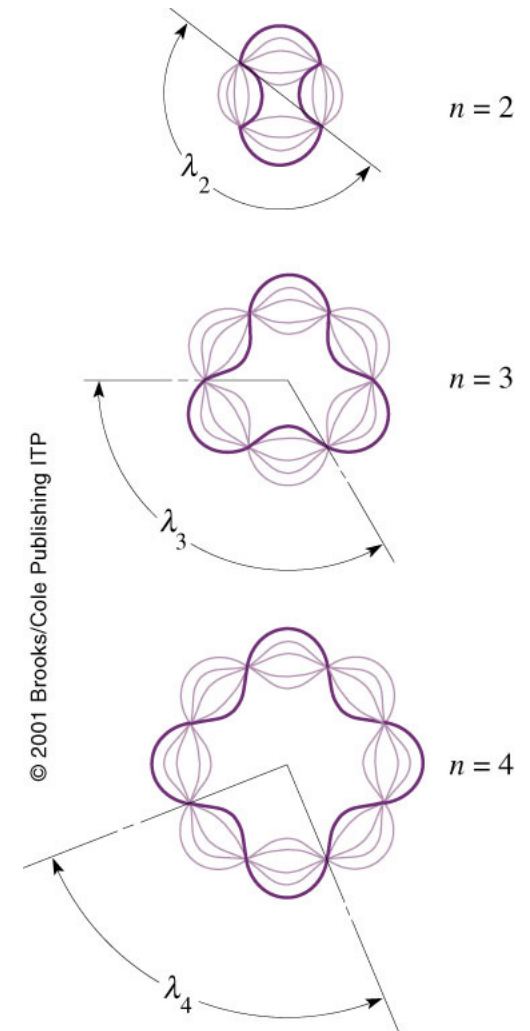
$$2\pi r_n = n\lambda = n \frac{h}{mv} \Rightarrow L = m v r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

ce qui est la condition quantique proposée par Bohr.

Les orbites et les états d'énergie quantifiés du modèle de Bohr sont dus à la nature ondulatoire de l'électron et au fait que seules des ondes résonnantes persistent.

Ceci suppose que la dualité onde-particule est à la base de la structure de l'atome.

Mais qu'est-ce qui correspond à l'amplitude d'une onde de matière?

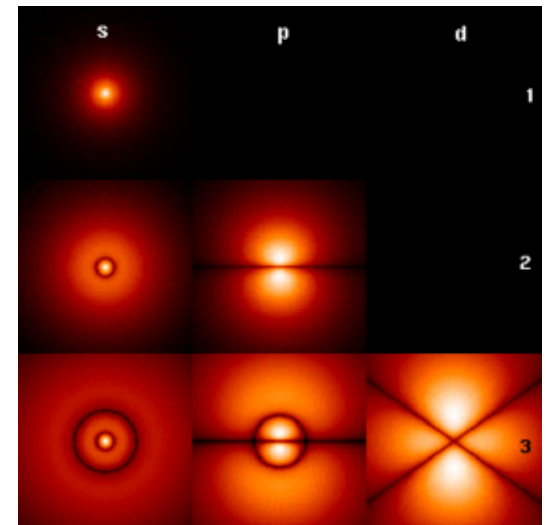


# La Mécanique Quantique

Si le modèle de Bohr constitua une avancée remarquable, il s'avéra cependant inexact. En particulier, seul le spectre de l'atome d'hydrogène put être reproduit. Le modèle échoua avec tous les autres atomes.

En 1925, Schrödinger et Heisenberg développèrent une nouvelle théorie, la **mécanique quantique**. À une particule de matière, comme l'électron, la théorie associe une **fonction d'onde**, désignée par  $\Psi$ , qui représente le déplacement en fonction du temps et de la position. Le carré de la fonction d'onde  $|\Psi|^2$ , en tout point de l'espace, représente la probabilité de trouver la particule en ce point.

Ainsi on doit abandonner le concept de trajectoire et le remplacer par le concept de probabilité de trouver une particule à un certain endroit. Les électrons d'un atome n'occupent pas des orbites bien définies mais existent plutôt sous forme de «nuages» qu'on peut considérer comme une distribution de probabilité.

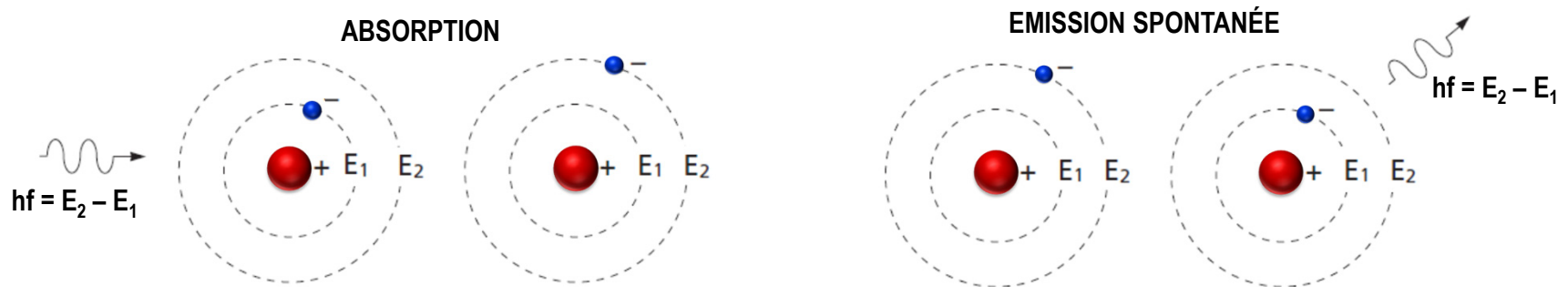


Densité de probabilité des électrons dans un atome

# LASER

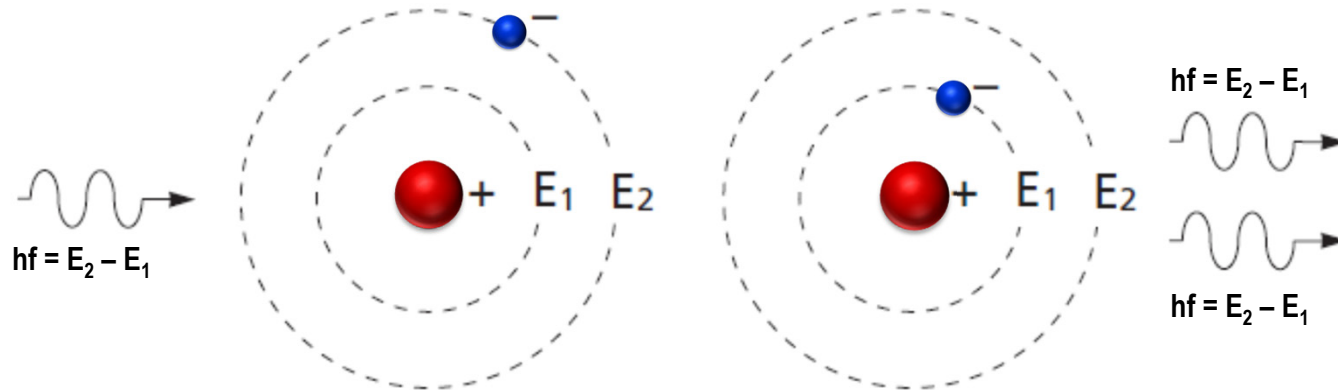
Nous avons vu précédemment que la lumière pouvait être absorbée lors de l'excitation d'un atome, et émise lors de sa désexcitation spontanée. Einstein, en 1917 émit l'idée qu'une **photon arrivant sur un atome déjà excité** pouvait stimuler sa désexcitation. C'est l'**émission stimulée**, au cœur de l'émission des LASERS:

## LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION



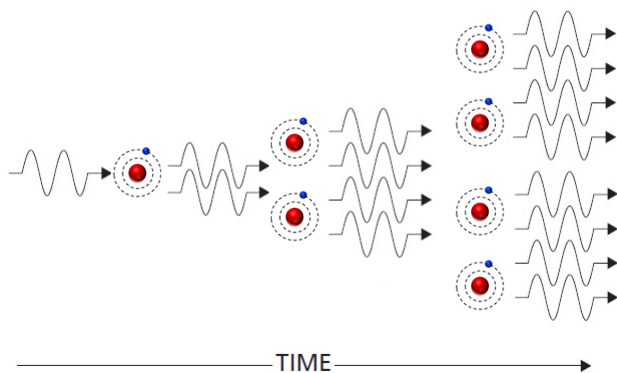
# LASER – Émission stimulée

Dans le processus d'émission stimulée, un photon incident induit l'atome déjà excité à se désexciter. Pour cela, il faut que le photon incident soit, lui aussi, de fréquence  $f = (E_2 - E_1)/h$ . Si cette condition est réalisée, alors deux photons sont émis simultanément par l'atome (le photon incident + celui produit par émission stimulée), de même fréquence  $f$ , en phase, et avec le même direction.



Comme cette interaction double le nombre de photons, on a donc bien une **amplification de la radiation par émission stimulée** (= LASER).

Pour que le processus d'amplification fonctionne, il faut plus d'atomes excités que d'atomes dans l'état fondamental: c'est ce qu'on appelle une **inversion de population**.

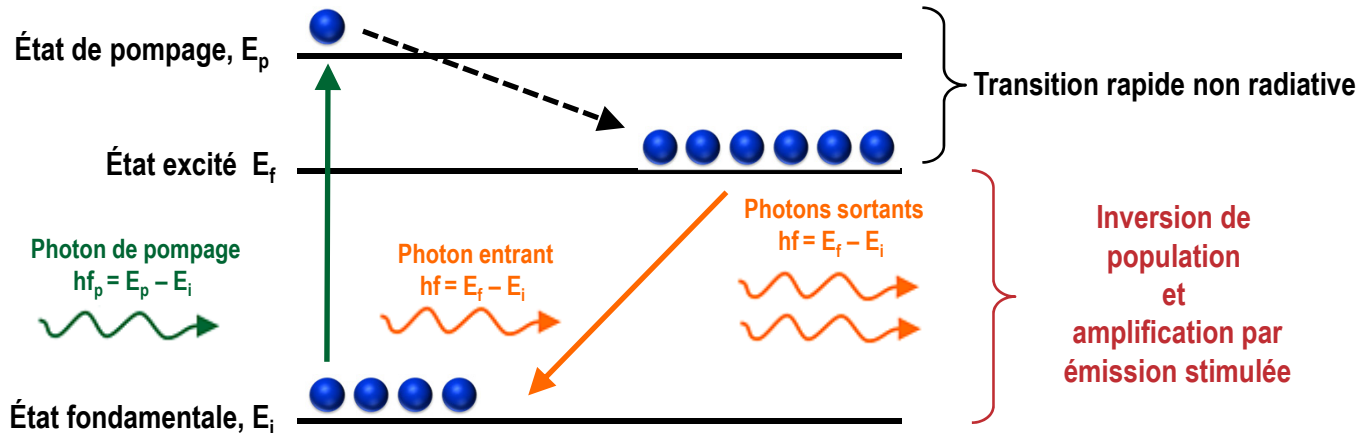


# LASER – Inversion de population

L'émission, tant stimulée que spontanée, a lieu tout le temps dans des sources de lumière ordinaires, mais l'émission spontanée est plus probable. Pourquoi?

Un électron dans un atome reste excité pendant un temps très court. Il émet spontanément un photon avant de rencontrer un autre photon avec la bonne énergie pour une émission stimulée. En plus, les atomes sont beaucoup plus susceptibles d'absorber un photon (ou tout simplement de l'ignorer totalement) que de subir une émission stimulée.

Pour que le processus d'émission stimulée ait lieu, il est nécessaire de trouver un moyen de maintenir les électrons bloqués dans un état excité pendant une longue période. Cette situation s'appelle une **inversion de population** et le processus par lequel les électrons sont poussés dans cet état excité de longue durée prend le nom de **pompage**. Ceci demande un système à trois niveaux d'énergie.



# Applications des LASERS en médecine

---

Un laser est caractérisé par une longueur d'onde très bien définie (pureté spectrale) et une grande directivité qui permet de le focaliser sur des cibles extrêmement petites (micrométriques). Ses utilisations principales en médecine sont:

- La **photo-coagulation**: on induit la coagulation des tissus par un chauffage modéré ( $T \sim 50^\circ\text{C}$ ). Cette technique est utilisée pour cicatriser les tissus ou pour arrêter le saignement (hémostase).
- La **photo-vaporisation**: on chauffe localement et dans un temps très court à  $T \sim 100^\circ\text{C}$ . Ceci provoque l'ébullition de l'eau dans le tissu ciblé et donc son élimination par évaporation. Cette technique est utilisée, par exemple, pour faire des incisions très précises en ophtalmologie.
- L'**absorption sélective**: la longueur d'onde du laser est choisie selon le type de molécule ciblée. L'eau absorbe dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet mais elle est transparente dans le visible. L'hémoglobine et la mélanine absorbent dans le visible et dans l'ultraviolet mais pas dans l'infrarouge. On utilise les propriétés d'absorption propres des différents tissus pour créer des dommages sélectifs.

# Applications des LASERS en médecine

---

**Chirurgie:** Coagulation pendant le traitement, micro-incision

**Dermatologie:** Taches Lie-de-Vin, nævus, taches brunes, épilation, effacement de tatouage

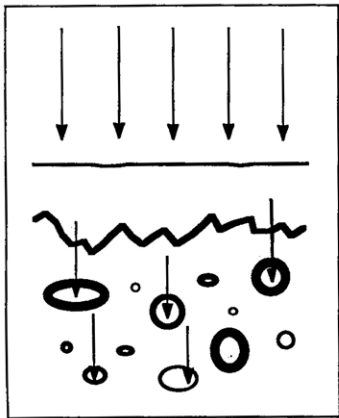
**Odontologie:** Caries, plaque dentaire

**Oncologie:** Photothérapie dynamique des cancers

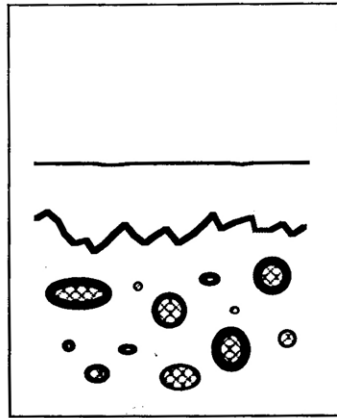
**Ophthalmologie:** Cataracte, décollement de rétine, glaucome, dégénérescence maculaire, traitement de la myopie

**Urologie:** Lithotritie (calculs rénaux)

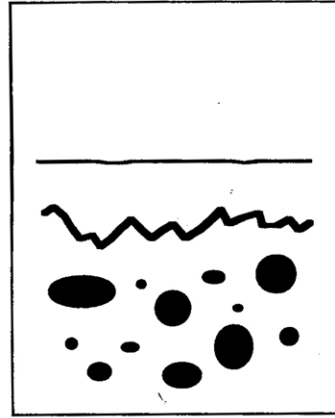
# Applications en Dermatologie: Taches Lie-de-Vin



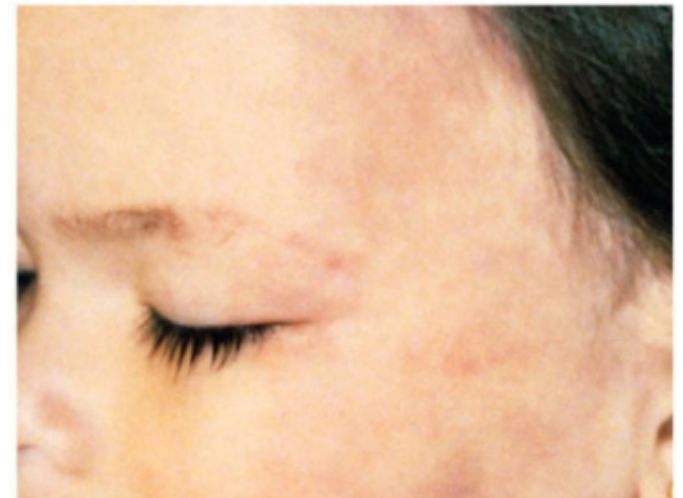
Absorption sélective par les vaisseaux sanguins



Diffusion de la chaleur à travers les vaisseaux sanguins



Destruction des vaisseaux sanguins



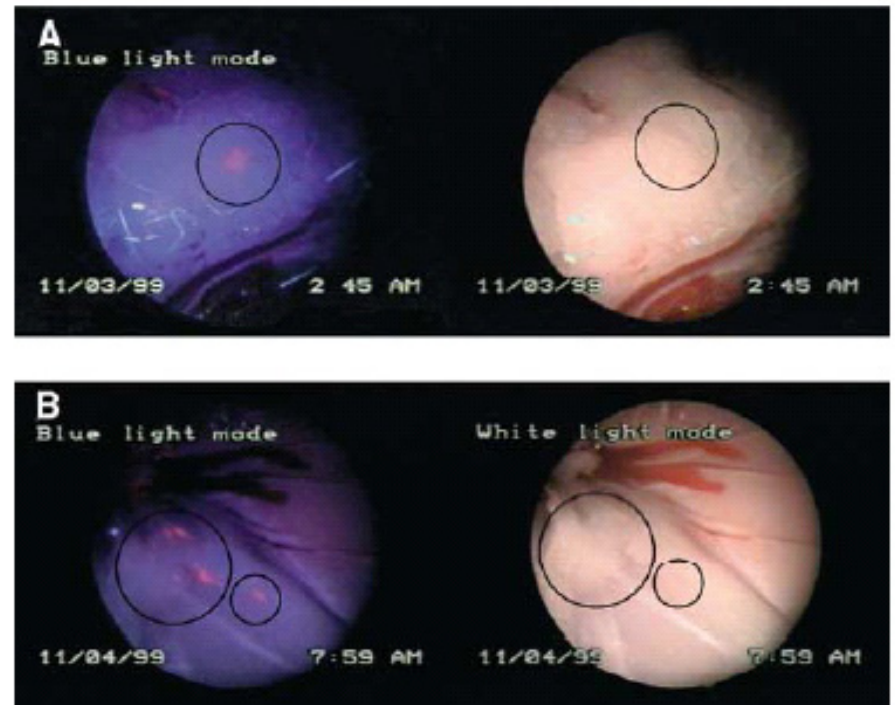
# Applications en Oncologie: Photothérapie dynamique

Cette technique endoscopique est basée sur les propriétés d'une molécule non-toxique à l'origine dérivée du sang: l'**hématoporphyrine** (HpD).

Les cellules cancéreuses éliminent l'**hématoporphyrine** plus lentement que les cellules saines: on peut donc injecter cette substance au patient pour marquer les cellules malades.

Puisque l'hématoporphyrine est luminescent dans le rouge lorsqu'elle est exposé à la lumière ultraviolette, les zones où l'hématoporphyrine se concentre brillent en rouge. Ainsi, les médecins peuvent utiliser ce phénomène pour localiser et déterminer la taille d'une tumeur.

De plus, l'hématoporphyrine se désintègre chimiquement lorsqu'il est irradié avec une lumière d'une longueur d'onde de 630 nm. Ce faisant, elle tue également les cellules de la tumeur.



Métastases dans le péritonéal (cancer de l'ovaire)

# Calendrier des prochaines séances PGA

---

## PROCHAINE SÉANCE D'EXERCICES

Mardi 17 Mars 13:15 – 15:00

Salles Müller et S1-S2