

SPECTROSCOPIE

Les interactions des ondes électromagnétiques avec les organismes vivants

- Objectifs:
 - Donner les principes de la descriptions des organismes vivants par l'utilisation des ondes électromagnétiques
 - Evaluer les dangers des ondes électromagnétiques
- Définition de la spectroscopie
 - Etude de l'interaction des ondes électromagnétiques avec la matière
 - Un spectromètre est un appareil susceptible de détecter les OEM
 - Un spectromètre est l'oeil
- Exemple d'information obtenue par la spectroscopie
 - Une image optique
 - Une structure d'une molécule
 - La dynamique moléculaire
 - Une image RMN
 - Une image dans le plan de Fourier

Plan

I. Les lois de conservations

- A. Energie
- B. Quantité de mouvement
- C. Le moment cinétique
- D. La charge électrique
- E. Le nombre de Baryons
- F. Le nombre de Leptons

II. Thermodynamique et quantification de l'énergie

- A. Les différentes formes d'énergie: Premier principe de la thermodynamique
- B. Le sens des échange spontanée d'énergie
- C. Thermodynamique statistique
 - 1. Principe des états énergétique
 - 2. Population des états énergétique

III. Base de la spectroscopie

- A. Les OEM
- B. La matière
- C. Elements de physique nucléaire
- D. Les interactions des OEM et de la matière

IV. Spectroscopie des rayons X

- A. Production de rayons X
- B. Aspects Technologique
- C. Application

V. Spectroscopie moléculaire

- A. Le rayonnement du corps noir
- B. Spectromètre
- C. La loi de Beer-Lambert
- D. L'ultra Violet
- E. Le visible
- F. L'infra-Rouge
- G. La fluorescence

VI. Spectroscopie de résonance magnétique

- A. Généralités
- B. Principe de la résonance magnétique nucléaire
- C. Relaxation
- D. Spectroscopie RMN

I. Les lois de conservations

SPECTROSCOPIE

A. L'énergie

- Def: Quantité numérique qui ne change pas lors d'une transformation quelconque.
- Conservation d'énergie = Invariance par rapport au temps.

B. Quantité de mouvement

- Def: $P = m \cdot v$
- Conservation de quantité de mouvement = invariance par rapport à la translation

C. Moment cinétique

- Def: $J = r \text{ vec } P = m r \text{ vec } V$
- Conservation du moment cinétique = invariance par rapport à la rotation

D. Autre loi de la conservation

- La charge électrique
- Les baryons = particules lourdes, protons, neutrons...
- Les leptons = particules légères, électrons, neutrinos...

II. Thermodynamique

Définition de la thermodynamique:

- Thermodynamique et Physique statistique: étude des propriétés de la matière où interviennent des notions de température et de chaleur
 - Thermodynamique classique: Relation entre les propriétés macroscopiques
 - Thermodynamique statistique: Lois de la mécanique microscopique d'un grand nombre d'éléments
- Principes fondamentaux
 - Conservation d'énergie
 - Sens d'une transformation

A. Le premier principe de la thermodynamique

- **Conservation de l'énergie**
- Energie
 - Grandeur numérique qui se conserve
 - Produit d'une grandeur Extensive et d'une grandeur Intensive sauf pour $dQ = mc \, dT$
- Equivalence entre travail et chaleur
 - Lorsqu'un système parcourt un cycle, il existe un rapport constant entre les quantités de travail et de chaleur échangées
 - $W + Q = 0$ pour un cycle (joule)
- $W + Q$ ne dépend que de l'état initial et l'état final
- Définition d'une fonction de 2 variables
 - $df(x,y) = A(x,y)dx + B(x,y)dy$
 - En général l'intégrale dépend du chemin sauf si A et B sont les dérivées partielles de f, dans ce cas, f est appelé une **fonction d'état**.
- L'énergie interne
 - $W + Q$ est la fonction d'état appelé **Energie interne notée U**
 - Dans un cycle, l'énergie interne est conservée
 - Généralisation
 - $U_b - U_a = Q + \sum W$
 - avec + pour un gain et - pour une perte

SPECTROSCOPIE

B. Deuxième principe de thermodynamique

- Expérience:
 - Clausius: la chaleur passe spontanément du corps chaud vers le corps froid
 - Kelvin: la conservation d'énergie thermique en énergie mécanique nécessite une différence de température
- Définition de l'entropie:
 - Toute forme d'énergie sont le produit d'une grandeur extensive et d'une grandeur intensive, sauf la chaleur
 - On définit une nouvelle grandeur appelé entropie (S) associé à la température pour que $dQ=TdS$ d'ou:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

- On peut montrer
 - Que le 2ieme principe correspond au fait que l'entropie est une fonction d'état
 - Que pour une transformation réversible

$$\int_{M_1}^{M_2} \left(\frac{dQ}{T} \right) = S(M_2) - S(M_1)$$

- Que pour une transformation irréversible

$$\int_{M_1}^{M_2} \left(\frac{dQ}{T} \right) < S(M_2) - S(M_1)$$

- L'entropie

- Calcul: soit un corps passant de T1 à T2

$$dS = \frac{dQ}{T} = mc \frac{dT}{T} \Rightarrow \Delta S = mc \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$$

- Signification macroscopique
 $S = k \ln \omega$ avec $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K/molécule}$
- ω le nombre de configuration énergétique possibles du système
Notion d'ordre et de désordre du système.

- Troisième principe de thermodynamie

- A T=0, S=0

C. Introduction à la thermodynamique statistique

Definition:

- Système
 - Gaz mono atomique
 - N molécules
 - V volumes
 - U énergie interne totale constante
- Espace des phases
 - Molécule caractérisée par des coordonnées d'où le système est caractérisé par un point dans un espace à 6N dimensions.

$$[X_i, Y_i, Z_i, V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}] = \text{Espace des phases}$$

- Etat macroscopique
 - Soit un gaz de N molécules correspond à N point dans l'espace des phases
 - Soit Delta un petit volume à 3 dimension de l'espace des phase ou dv est petit: les molécules ont à peu pres l même énergie E_i . Delta est appelé un niveau énergétique.
 - Le nombre de molécules dans chaque niveau énergétique décrit l'état macroscopique du système
- Complexion
 - Si l'on individualise (donne un nom à...) chaque molécule, la répartition des molécules dans

SPECTROSCOPIE

- chaque niveau énergétique s'appelle une **complexion**.
- En général un état macroscopique peut être réalisé par un grand nombre de complexions différentes. Le nombre de complexions se note Ω
- Exemple:
 - Etat macroscopique: toutes les molécules dans un seul niveau énergétique $\Omega = 1$
 - Etat macroscopique: une molécule par niveau énergétique: Ranger N molécules dans N niveaux énergétiques revient à faire:

$$\Omega = N(N-1)(N-2)\dots 1 = N!$$
 - Système de 2 niveaux énergétiques et 5 molécules se répartissant en groupe de 2 et 3

$$\Omega = \frac{[N!]}{(\prod N_i!)}$$
- Hypothèse de Boltzmann
 - Particules discernables
 - Toutes les complexions sont également probables
 - La probabilité d'un état macroscopique se mesure par le nombre de complexions
 - Equilibre correspond à l'état le plus probable
 - $S = k \ln \Omega$
- Population des niveaux d'énergie à l'équilibre
 - Population des états:

$$N = Cst e^{-(E_i/kT)} \quad \text{avec} \quad k = R/N_A$$
 - Propriétés
 - U = 3/2 kT
 - PV = NkT = nRT

III. Les bases de la spectroscopie

A. Les ondes électromagnétiques

- Une onde correspond à la propagation de l'énergie suivant l'équation de Maxwell
- Une onde électromagnétique se définit selon:
 - $E = E_0 \cos(\omega x - kx)$ en $\text{m.kg.s}^{-2}.\text{C}^{-1}$
 - $B = B_0 \cos(\omega x - kx)$ en $\text{kg.s}^{-1}.\text{C}^{-1} = \text{Tesla}$
 - E, B et c forment un trièdre direct.
 - $E = cB$
- Énergie: la densité d'énergie $E_{\{n\}}$ est exprimée en J.m^{-3}
 - Associé au champ électrique: $E_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$
 - Associé au champ magnétique: $E_b = \frac{1}{2 \mu_0} B^2$
 - Les énergies sont équivalentes: $\frac{1}{2 \mu_0} B^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$
- Intensité: Énergie passant par unité de temps à travers une surface unité
 - $I = E_n c = c \epsilon_0 E_{x;t}^2$
 - $I_{\text{moyen}} = c \epsilon_0 (E^2)_{\text{moyen}} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$
 - Pour une onde sinusoïdale

SPECTROSCOPIE

- Quantité de mouvement:
 - $P = \frac{E_n}{c} = \epsilon_0 E^2 \frac{(x, t)}{c}$
 - Quantité de mouvement par unité de volume
 - \vec{P} est dans la direction de propagation
- Moment cinétique: $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{P}$
- Spin: Onde plane circulairement polarisée
 - $S = \pm \hbar$
 - +I est une rotation directe, -I est une rotation horaire
 - En physique classique: $S = q \frac{E}{\omega}$
 - Combinaison linéaire de +1 et -1
- Une onde électromagnétique transporte:
 - Énergie
 - Quantité de mouvement
 - Moment Cinétique
- Rayonnement d'une charge accélérée
 - Une charge accélérée ou ralentie rayonne de l'énergie électromagnétique
 - $\frac{dE}{dT} = \frac{(q^2 a^2)}{(6 \pi \epsilon_0 c^3)}$
 - q est la charge de la particule ; a est l'accélération ; ϵ_0 ; c est la vitesse de la lumière
 - L'intensité d'un rayonnement dans une direction Θ à une distance r

$$I(\Theta) = \frac{(q^2 a^2)}{(16 \pi^2 c^3 \epsilon_0 r^2)} \sin^2 \Theta$$
- Rayonnement d'un dipole oscillant
- Le photon
 - Interaction d'une onde électromagnétique avec la matière se fait par des processus élémentaires indivisibles et de la quantité de mouvement.
 - L'intensité du rayonnement correspond au flux de photons par unité de surface et par unité de temps
 - Onde et particule:
 - Onde pour les interférences
 - Particule/photon pour les phénomènes énergétiques
- Résumé des ondes électromagnétiques:
 - E et B se propagent à la même vitesse
 - $C = 3.10^8$
 - $E \gg B$ dans le système MKSA
 - Énergie $E = h \nu$
 - Onde et/ou particule
 - $E = E_0 \cos(\omega t - kx)$

SPECTROSCOPIE

B. La matière

1. Les Elements

- **Atome** à A nucléons
- **Noyau** à Z charge
- **Electrons**
- **Molécule**: ensemble défini d'atome dénombrable
- **Cristal**: ensemble indéfini d'atomes (non dénombrable)

- Nuage électronique:
 - La probabilité de trouver une particule est décrite par la fonction d'onde Ψ dans l'intervalle autour de x:
$$[\Psi(x)]^2 dx$$
 - $$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + E_p(x) \Psi = E \Psi$$
 Equation de Schrodinger

2. Les nombres quantiques

a. L'énergie

- Est quantifié en valeur n: 1,2,3
- $$E_{liaison} = E_{cin} + E_{pot} = \frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}$$

b. Le moment cinétique orbital

- $L = mvr$
- l prend des valeur 0 à n-1
- m prend des valeur de -l à +l

c. Le moment cinétique intrinsèque: spin

- $\vec{S} = s \hbar$ S est multiple de $\frac{1}{2}$
- Les moment cinétiques se combinent pour donner le moment cinétique total: $J=L+S$

3. Population des niveaux d'énergie

- Population des niveaux d'énergie est donnée par la DISTRIBUTION DE BOLTZMANN
- $$N_e = e^{(-E/kT)}$$

4. Cadre théorique

- Physique classique: Grandeurs continues, Objet macroscopique (pas de h)
- Physique quantique: quantification d'énergie, moment cinétique, quantité de mouvement.
- 2 théories équivalentes: Fonction d'onde et Matriciel: Niveau d'énergie quantifié.

SPECTROSCOPIE

C. Elements de Physique nucléaire

1. Generalité

➤ Equivalence masse/énergie

• $E = mc^2$ avec
$$m = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- 1 unité de masse atomique : 1/12 de la masse d'atome de C12
1 u.m.a = $1,66 \times 10^{-27}$ kg

➤ Les forces en physique

- Gravitationnelle
- Electromagnétique
- Nucléaire faible: Désintégration Beta
- Nucléaire force: Cohésion nucléaire

➤ Noyaux

- Energie de liaison = Excès de masse: (M-A) en u.m.a.
- Rayon nucléaire: $R = R_0 A^{(1/3)}$ et $R_{\{0\}} = 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$

2. Désintégrations radioactives

➤ **Désintégration Beta-**

- $n = [p] + [e] + [\bar{\nu}]$
- Loi de conservation:

	A,Z	A,Z+1	Electron	Anti neutrino
Charge	Z	Z+1	-1	0
Baryon	A	A	0	0
Lepton	0	0	+1	-1

- Energétique

$$E_{Beta} = M(A, Z) - [M(A, Z+1) + m_e + m_{\bar{\nu}}]c^2$$

$$E_{BetaMAX} = [M(A, Z) - M(A, Z+1)]c^2$$

➤ **Désintégration Beta +**

- $n = [p] + [positron] + [\nu]$
- Loi de conservation

	A,Z	A,Z-1	Positron	Neutrino
Charge	Z	Z-1	+1	0
Baryon	A	A	0	0
Lepton	0	0	-1	+1

- Energétique:

$$E_{Beta} = M(A, Z) - [M(A, Z-1) + m_e + m_{\nu}]c^2$$

$$E_{BetaMAX} = [M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e]c^2$$

SPECTROSCOPIE

➤ Désintégration Alpha

- Loi de conservation

	A,Z	A-4,Z-2	Helium
Charge	Z	Z-2	+2
Baryon	A	A-4	+4
Lepton	0	0	0

- Il y a une force P_r qui est l'énergie de recul (du à l'envoi de l'atome)
- Energétique:

$$E = E_\alpha - E_r = [M(A, Z) - (M(A-4, Z-2) + M(\alpha))]c^2$$

$$E_r = \frac{(P_r^2)}{(2M_d)} = \frac{(P_\alpha^2)}{(2M_\alpha)} = \frac{M_\alpha}{M_d} P_\alpha$$

➤ Emission gamma

- Energétique

$$E = E_R - E_\gamma = [\Delta M]c^2$$

$$E_r = \frac{(P_r^2)}{(2M_d)} = \frac{(P_\gamma^2)}{(2M_\alpha)} = \frac{(E_\gamma^2)}{(2M_0 c^2)}$$

- En général, on néglige E_R

3. Radioactivité

- Désintégration d'un seul isotope. La probabilité pour qu'un noyau se désintègre pendant dt est indépendant de toute influence extérieure.

$$p(dt) = \lambda dt$$

$$N = N_0 e^{(-\lambda t)}$$

- 1 désintégration par seconde = 1 Bequerel.
1 Cu = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

- Production par bombardement nucléaire

- Bombardement d'un échantillon avec des neutrons produisant une quantité Q de radioisotope.

$$\frac{DN}{dt} = Q - \lambda N$$

$$N = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{(-\lambda t)})$$

- Il n'est pas utile de bombarder plus de 2 à 3 périodes (5 périodes crée 1%)

4. Applications civiles

- Production d'énergie
- Médecine nucléaire
 - Scintigraphie monophotonique
 - Tomographie par émission de positron
 - Dosage radio-immunologique
- Evaluation du risque d'infection avec un marquage isotopique
 - Les cellules cancéreuses utilisent plus d'énergie et de comburant (oxygène, glucose....)

SPECTROSCOPIE

D. Principes généraux des interactions des OEM et de la matière.

- Absorption et émission: $\Delta E = h\nu$
- Les chances d'émission spontanée ou stimulée est égale à
$$\frac{[\text{Prob Emission spontanée}]}{[\text{Prob Emission stimulée}]} = \nu^3$$
- Diffusion: oscillation d'un nuage électronique entraîne une réémission d'une OEM:
 - $\lambda \gg$ maille rigide : Réfraction
 - $\lambda =$ maille rigide : Diffraction
 - $\lambda \gg$ maille fluctuante : Diffusion constante
 - $\lambda =$ particule fluctuante : Diffusion = f(θ)

1. Interaction des rayonnements avec la matière

- Rayons X: produits par les électrons
- Rayons γ : créé par les noyaux
- Résultat expérimentaux: Les rayons X ne subissent pas de diffraction/réfraction, ils diffusent partout.
 - $E = E_0 e^{-\mu x}$
 μ est le coeff d'atténuation (d'extinction) en m^{-1} dépend de l'énergie du rayonnement et de la nature du matériau
 - CDA (Couche de Demi Atténuation): $X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$
 - Ne marche que pour les OEM, pas pour les particules qui ont une masse
- $\mu x = \frac{\mu}{\rho} \rho x = \frac{\mu}{\rho} \frac{m}{v} x$
 $E = E_0 e^{-\left[\frac{\mu}{\rho} m_0\right]}$

2. Effet photoélectrique

- Electron de conduction d'un métal ou autre substance
 - ϕ_0 énergie nécessaire à un électron pour s'échapper du métal
 - $E = h\nu$ énergie du photon incident
- L'électron absorbe l'énergie du photon
 - $\frac{1}{2} m v^2 = h\nu - \phi_0$
- Seuil photoélectrique: Energie de liaison $\nu_0 = \frac{\phi_0}{h}$
- Ionisation de la substance (y compris l'air)
- Electron lié au réseau/atome/molécule:
 - Des rayonnements secondaires peuvent être créés (l'électron de la couche K partant, les électrons des couches supérieures vont le remplacer en émettant un photon)
 - Permet de connaître les énergies des couches électroniques.
 - Sur les courbes, les pics soulignent les énergies de résonance des électrons.

SPECTROSCOPIE

3. Effet Compton

- Diffusion du rayonnement électromagnétique par un électron **libre (couche de valence externe)**
- $P = mv = \frac{E}{c^2} \cdot v = \frac{E}{c}$
- $E_c = \frac{p^2}{2m}$
- Si transfère
 - de l'énergie: $E_e = \frac{[p^2]}{2m} = h\nu = E$
 - de quantité de mouvement: $\frac{E^2}{[2mc^2]} = E \Rightarrow E = 2mc^2$ impossible
 - Hautes énergies: impossible aussi
- L'expérience montre un départ de photon d'un côté, électron de l'autre selon des angles définis
- Coefficient d'atténuation Compton: vu qu'il y a des interactions avec des électrons libres, n'importe quel matériau fera l'affaire.
- Le coefficient d'atténuation: $\frac{\sigma}{\rho}$ est indépendant du matériau

4. Création de paires

- Si l'énergie est supérieure à 1,022 MeV on a création de deux photons $h\nu = 511 \text{ KeV}$
- Ils auront des directions diamétralement opposées si ils étaient au repos

IV. Spectroscopie des rayons X

A. Découverte

- 8 Novembre 1895, Wilhelm Conrad Röntgen découvre les rayons X, prix Nobel en 1901
- Étudie les rayons X par écrans luminescents de Platinocyanure de Baryum
- Établit le lien entre intensité de courant et intensité lumineuse
- Origine: électrons des atomes
- La longueur d'onde est de l'ordre de la taille des atomes.
- Production de rayons X: principe physique
 - Anode/Cathode dans le vide soumise à une différence de potentiel
 - Écran de tungstène à grand nombre d'électrons libres
 - Les charges de même signe se repoussent: les électrons sont ralentis et il y a création d'une onde électromagnétique: c'est le rayonnement de freinage
 - Probabilité qu'un électron soit complètement arrêté est faible.
 - Certaines raies sur les courbes sont caractéristiques des atomes utilisés.
- Interaction des électrons dans la cible
 - Les électrons sont légèrement déviés par la présence des atomes.
 - Les électrons déviés faiblement émettent de la chaleur
 - Les électrons déviés fortement créent un rayon X
- Rayonnement de freinage
 - Électron à l'approche d'un noyau présente une attraction due à la force électrique
 - $E_{ray} = \frac{dE}{dT} t = \frac{[e^2 a^2]}{[6\pi\epsilon_0 c^3]} t$

SPECTROSCOPIE

- Indicatrice d'intensité:
 - Si les énergies sont faible <100 KeV, I_{max} se trouvera perpendiculaire à l'onde
 - Si les énergies sont élevé > 1 MeV, I_{max} sera perpendiculaire à l'onde
- Rayonnement caractéristique
 - Electrons cathodiques arrachent les électrons des atomes de l'anode: comblement des trou induit une perte d'énergie résonante.
 - Permet d'avoir des informations sur les couches
- Théorie de Bohr: $\nu = a^2 Z^2$
- Effet des autres électrons: constante d'écran β , empêchant les courbes de passer par 0.
- Rayonnement synchrotron
 - Rayonnement de freinage quand l'accélération est perpendiculaire à vec v comme dans le cas d'une orbite circulaire
 - $$\left(\frac{dE}{dT}\right)_{\perp} = \frac{[q^2 a^2]}{[6\pi\epsilon_0 c^3 (1 - \frac{v^2}{c^2})^2]}$$
 - Le rayonnement est proportionnel à l'accélération et donc au rayon.
 - Permet de créer une OEM monochromatique

B. Aspects technologique

- **Tubes de Coolidge:** Chauffage d'une anode tournante
- **Accélérateur de Van de Graaf:** sphère creuse se chargeant. Un tube avec du vide est placé pas loin et recoit un éclair d'énergie qui libèrera des électrons qui seront ensuite ralenti
- **Accélérateur linéaire:** Comme le cyclotron, mais linéaire.
- **Cyclotron:** les electrons peuvent parcourir plus de 100km avant d'atteindre leur cible.

C. Applications

- Structure des atomes et des molécules par diffraction des rayons X
- Imagerie
 - Radiographie planaire (l'os a beaucoup d'électrons, donc absorbe les rayonnements)
 - Tomographie (scanner)
 - L'imagerie par rayons X: detecte la densité d'electron dans un materiau
 - Iode utilisé pour faire des rayons X sur les vaisseaux
- Effet compton utilisé plutôt en radiothérapie

V. Spectroscopie moléculaire

A. Le rayonnement du corps noir

- Un corps chauffé emit des OEM jusqu'à une certaine fréquence

B. Spectromètre

- Source: Corps noir, Laser
- Monochromateur: Filtre l'énergie des ondes, Prisme, réseau
- Detecteur: Calorimètre, Cellule photoélectrique
- Densité Optique: $DO = \log_{10} \frac{I_0}{I_t} = \epsilon c l$ définie l'absorbance

SPECTROSCOPIE

C. L'ultra-Violet

- Domaine: 200-400nm
- Application:
 - Mesure de concentration
 - Etude interaction Ligand-macromolécule
 - Sterilisation
 - Sterol UV VitD

D. Visible

- Domaine: 400-750nm
- Applications
 - Vision
 - Mesure de concentration (chromophore)
- Mécanisme: transition électronique
- Energie: 1eV soit 1300°C
- Mécanisme de transition du Cis-retinol en Trans-retinol attaché à l'Opsin-R

E. L'infra-rouge

- Domaine: $\bar{\nu} = 1400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$
- Applications:
 - Etude des liaisons H
 - Conformation des macromolécules
 - Détermination de groupes chimiques
- Mécanisme: transition de vibrations
- T= 20-50°C
- E= 1/100 eV

Modèle du ressort:

$$\frac{1}{\mu_r} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B} \quad \omega = \sqrt{\left(\frac{K}{\mu_r}\right)} \quad \nu = \frac{\omega}{(2\pi)} \quad \frac{\omega_{HO}}{\omega_{DO}} = \frac{\nu_{HO}}{\nu_{DO}} = \sqrt{\left[\frac{(1617)}{(916)}\right]}$$

F. Fluorescence

- Définition: fluorescence: émission d'une onde électromagnétique quand une molécule retourne d'un état excité vers l'état fondamental
- Domaine: visible, UV, rayons X
- Application: dosage par anticorps fluorescents.
- La fluorescence se fait dans toutes les directions: élimine le bruit de fond du faisceau incident.
- Paramètre:
 - OEM d'énergie plus faible: $\nu' < \nu$ ou $\lambda' > \lambda$
 - Bilan d'énergie: $h\nu = h\nu' + \text{énergie non radiante}$
 - Rayonnement isotrope
 - Lorsque l'état excité a une durée de vie très longue c'est la phosphorescence

Rappel: la potentialité d'émission d'un photon est proportionnel à ν^3