

LES DÉTECTEURS À SCINTILLATION

Le passage d'un rayonnement incident dans un matériau scintillant permet la production et l'émission de la lumière visible ou UV (les photons de luminescence). La lumière produite a deux principaux mécanismes:

- La **fluorescence** (quand l'émission de la lumière est très rapide).
- La **phosphorescence** (quand l'émission est retardée avec grande longueur d'onde).

1. Propriétés générales des scintillateurs

Les Caractéristiques recherchées des scintillateurs sont:

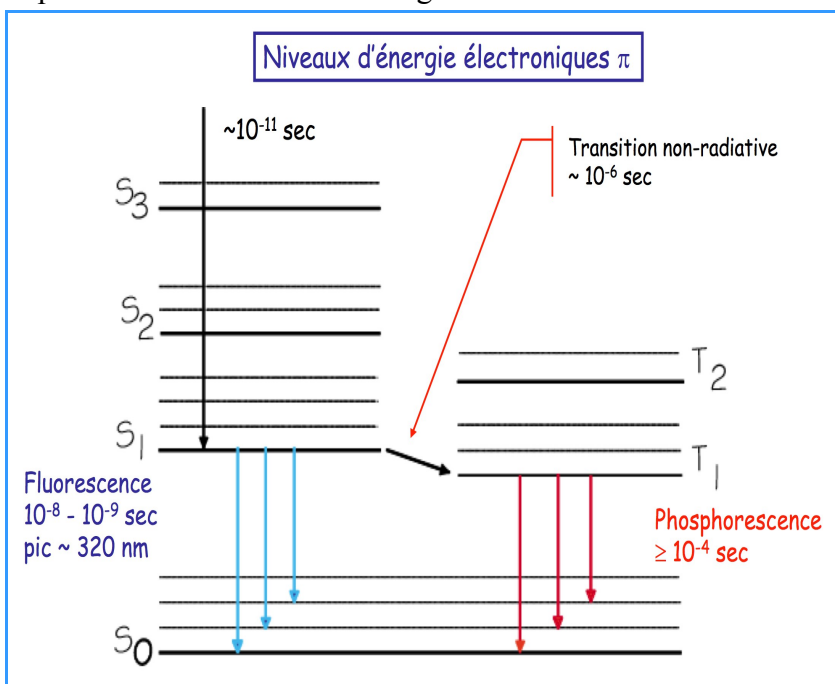
- **L'efficacité S de scintillation** : le rapport S entre le nombre moyen de photons émis L et l'énergie du rayonnement incident absorbée dans le scintillateur E doit être haut. $\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx}$ ou $L = S E$.
- **Linéarité** : la lumière produite doit être proportionnelle à l'énergie déposée.
- **Luminescence rapide** : le temps de décroissance τ de 1 - 2 ns pour les plus rapides. (La décroissance de l'intensité lumineuse de la fluorescence est donnée par $I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$).
- **Longueur d'onde de la luminescence de préférence dans le bleu ou le visible**
- **La transparence** : à la longueur d'onde d'émission.
- **Indice de réfraction proche de 1.5 (du verre)** : pour permettre un bon couplage optique avec le dispositif photosensible afin de minimiser les pertes de lumière.
- **Densité élevée** : suffisantes pour arrêter des particules électromagnétiques de très hautes énergies.
- Peut être fabriquer en gros volumes. - Matière non hygroscopique. - Matière mécaniquement résistante.

2. Types de scintillateurs

a) Scintillateurs organiques : il sont constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils sont très efficace pour la spectroscopie β et la détection de neutrons rapides. Ils sont aussi très bien adaptés pour la mesure du temps car ils ont un temps de décroissance très court. Ils existent sous forme :

- Cristaux organiques : l'anthracène $C_{14}H_{10}$, stilbène, ... ,
- Plastiques : obtenus en dissolvant un scintillateur organique dans un polymère.
- Liquides : le xylène, toluène, ...

Le processus de fluorescence surgit de transitions dans la structure de niveaux d'énergie de molécules simples.



A température ambiante, la molécule est dans son état fondamental S_{00} . L'absorption de l'énergie du rayonnement incident conduit la molécule dans un état excité : - Les états supérieures à S_1 se désexcitent rapidement (10^{-13} s) non radiativement.

- **La fluorescence correspond à la lumière émise lors des transitions vers les niveaux S_0 .**

- Les états T_1 peuvent aussi être excités après ionisation des molécules mais le temps de leur vie caractéristique est beaucoup plus long. Ce phénomène parasite est appelé **phosphorescence**.

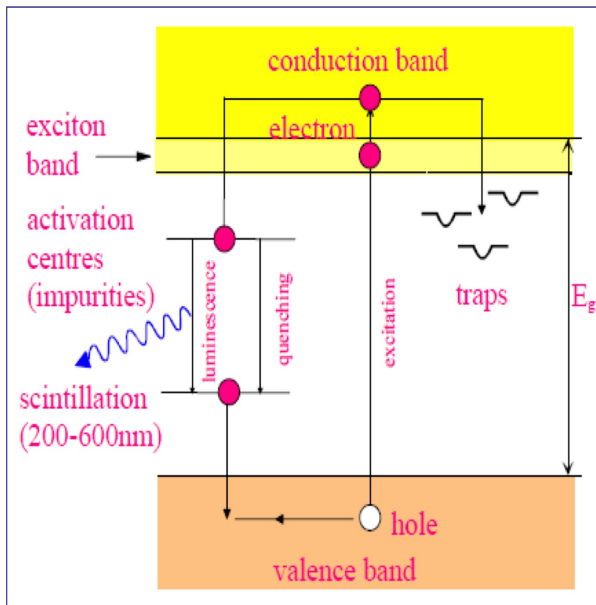
- Dans certains cas encore, des molécules dans l'état T_1 peuvent réabsorber de l'énergie et se retrouver dans l'état S_1 , donnant lieu à un nouveau phénomène de fluorescence décalée dans le temps, appelé **fluorescence retardée** (elle sont gênantes expérimentalement).

b) Scintillateurs inorganiques : (cristaux intrinsèques ou avec activateurs)

Les scintillateurs inorganiques sont des matériaux (en général un isolant) → l'existence d'un grand "gap" en énergie (bande interdite) de quelques eV entre la bande de valence et de conduction. On les trouve uniquement en phase solide. On peut utiliser soit des cristaux purs (intrinsèques avec structure cristalline parfaite ou avec des défauts) soit des cristaux dopés (extrinsèques avec un comportement qui va être dominé par les atomes d'impuretés appelés activateurs ou dopants quand ils sont introduits volontairement).

Le mécanisme de scintillation est lié au comportement collectif des atomes du réseau cristallin.

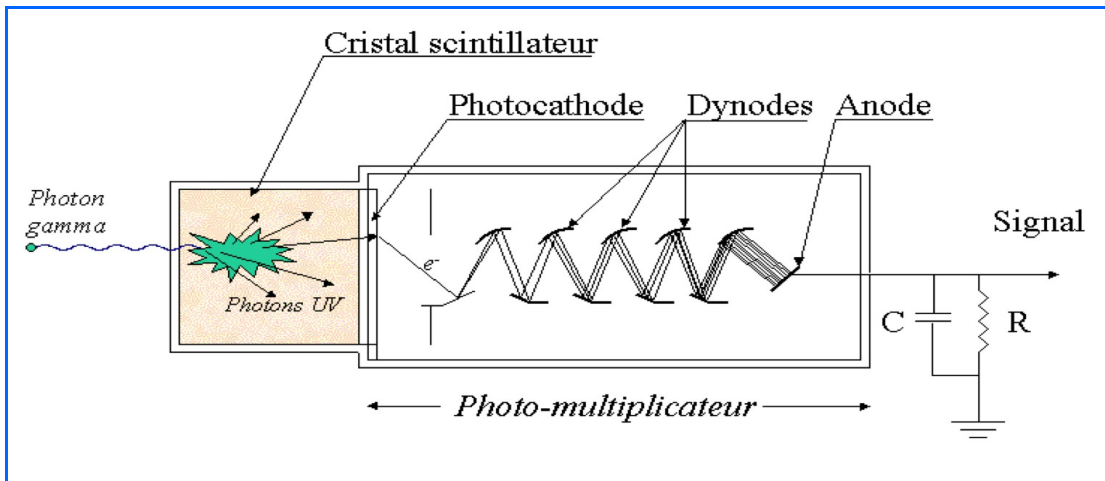
Structure de bandes dans les cristaux inorganiques dopés



- Les cristaux intrinsèques sont très délicats à utiliser car ils génèrent des photons ultraviolets.

- On préfère utiliser des cristaux extrinsèques : l'ajout d'impuretés (activateur) modifie la structure cristalline → l'apparition de bandes d'énergie intermédiaire entre la bande de valence et la bande de conduction. Il y a alors possibilité de transitions d'électrons de la bande de valence vers des niveaux d'énergie de l'activateur puis désexcitations avec émissions de photons dans le visible.

3. Les photomultiplicateurs (PM)



Le photomultiplicateur (PM) convertit la lumière de scintillation en signal électrique. Il est composé de : **1** photocathode + **N** dynodes + **1** anode et d'une embase électronique (H.T croissantes) permettant l'alimentation des différentes parties et la pré-amplification du signal.

- Le principe est directement basé sur l'effet photo-électrique (absorption d'un photon par un atome avec l'éjection d'un électron de l'atome) se passant sur la fenêtre de la photocathode. On parle généralement d'efficacité quantique d'un PM:

$$EQ = \text{Nombre de photo-électrons émis} / \text{Nombre de photons incidents}$$

- Les électrons ainsi créés sont accélérés dans les champs électriques croissant sur les différents dynodes.
- L'amplification de charge est en général directement proportionnelle au nombre initial de photo-électrons. Le facteur multiplication d'une dynode est:

$$\delta = \text{Nombre d'électrons secondaires émis} / \text{Nombre d'électrons incidents}$$

- Le gain total d'un PM est: $\text{Gain}_{\text{total}} = \alpha \delta^N$ (typiquement : 10^6 - 10^9). α est la fraction de photo-électrons collectés par la structure de multiplication.

Table récapitulative de certaines caractéristiques physiques des principaux scintillateurs inorganiques et organique

Scintillateur	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Constante de décroissance (ns)	Longueur d'onde d'émission maximale (nm)	Indice de réfraction (à λ_{\max})	Luminosité relative au NaI(Tl) (%)
NaI(Tl)	3,67	230	415	1,85	100
CsI(Tl)	4,51	1000	565	1,80	45
CsI(Na)	4,51	630	420	1,84	85
CsI(pur)	4,51	10	565	1,80	5 à 7
LiI(Eu)	4,08	1400	485	1,96	35
Bi ₄ GeO ₁₂	7,13	300	480	2,15	10 à 12
BaF ₂	4,89	600 0,8	310 220	1,49	15 2 à 3
ZnS(Ag)	4,09	200	450	2,36	
CaF ₂ (Eu)	3,18	940	435	1,44	50
CsF	4,64	4	390	1,48	3 à 5
Anthracène	1,25	30	447	1,62	45
Stilbène	1,16	4,5	410	1,626	20
Plastiques	≈ 1,03	1,3 à 3	420 - 430	1,58	15 à 30
Liquides	≈ 0,9	3 à 4	420 - 430	1,4 à 1,5	20 à 35