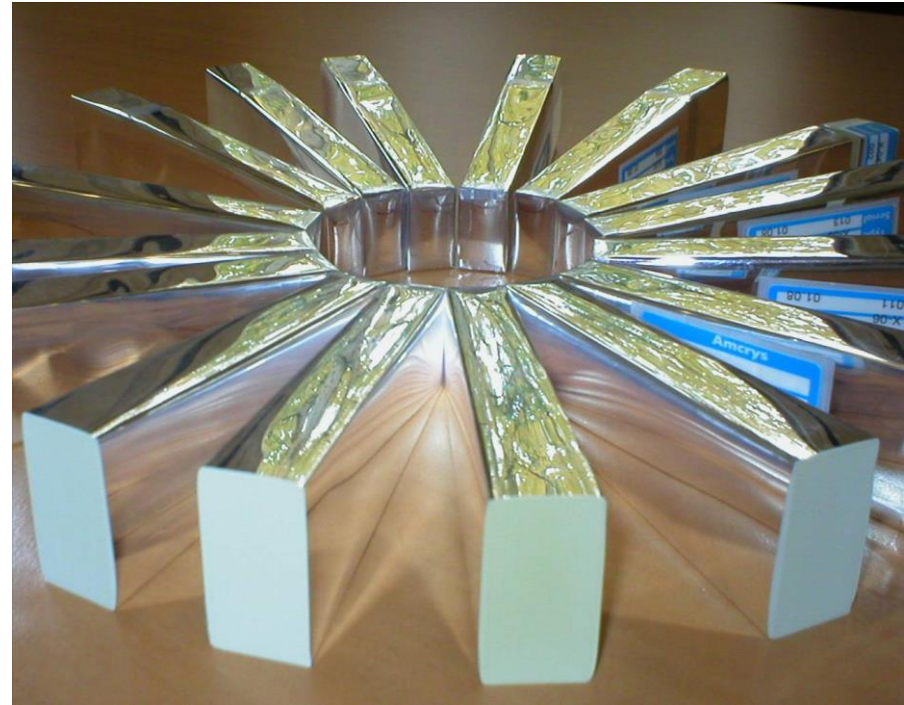


Scintillateurs & détecteurs de lumière



Jean Peyré

*CSNSM (Centre de Sciences Nucléaires et
de Sciences de la Matière)
CNRS-IN2P3-Université Paris Sud (Paris-Saclay)*

91405 Orsay, France
Tél. : +33 1 69 15 52 43
Fax : +33 1 69 15 50 08
<http://www.csnsm.in2p3.fr>



Scintillateurs & détecteurs de lumière

Sommaire

I – Introduction

II - Les scintillateurs inorganiques

III - Les scintillateurs organiques

V - Collection de lumière

VI- Conversion de lumière

VI_a - Lecture par Photomultiplicateurs

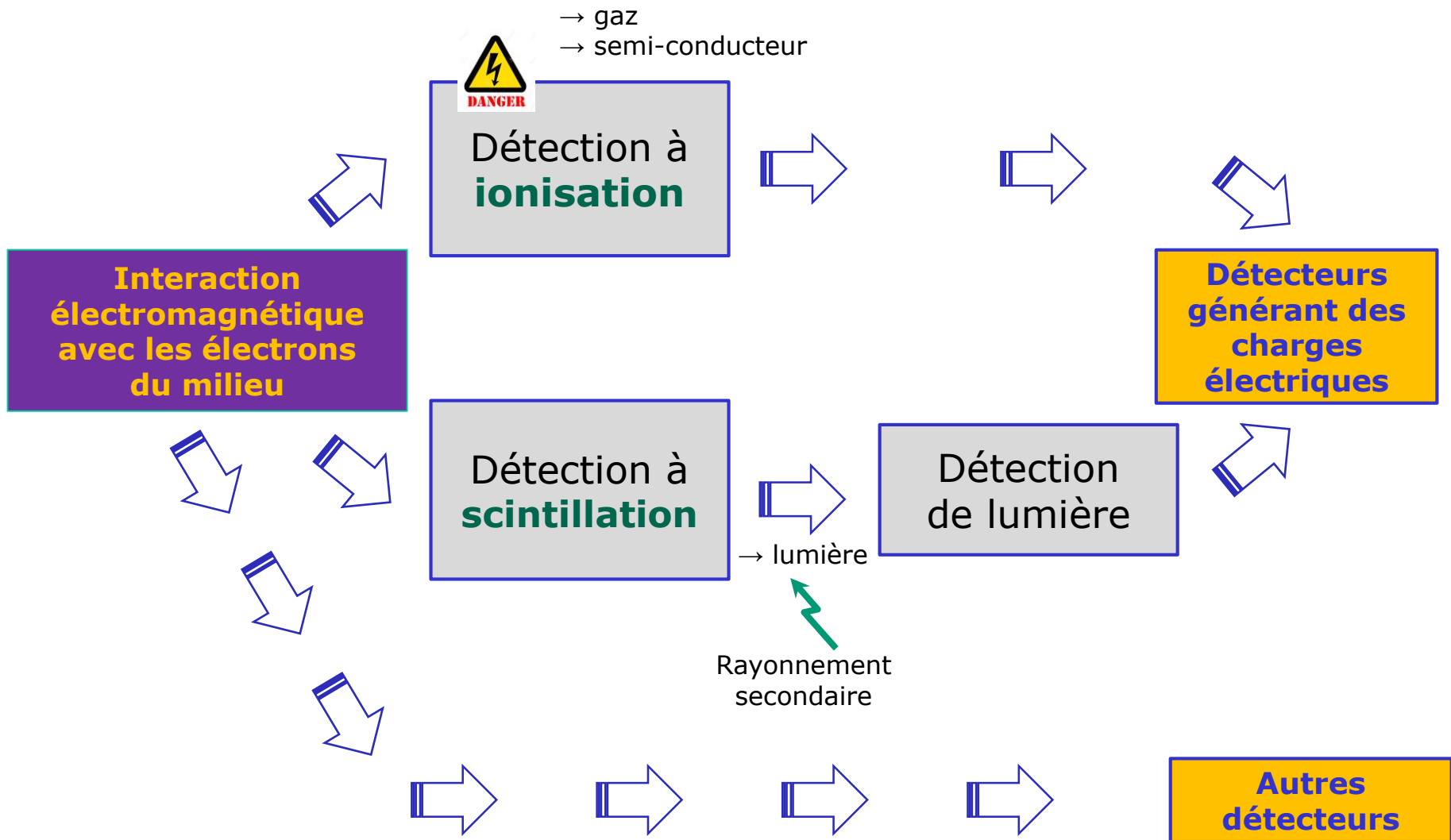
VI_b - Lecture par Photodiodes

VII – Réponse d'un détecteur en fonction de sa taille

VIII – Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur

I - Introduction

Ionisation & scintillation

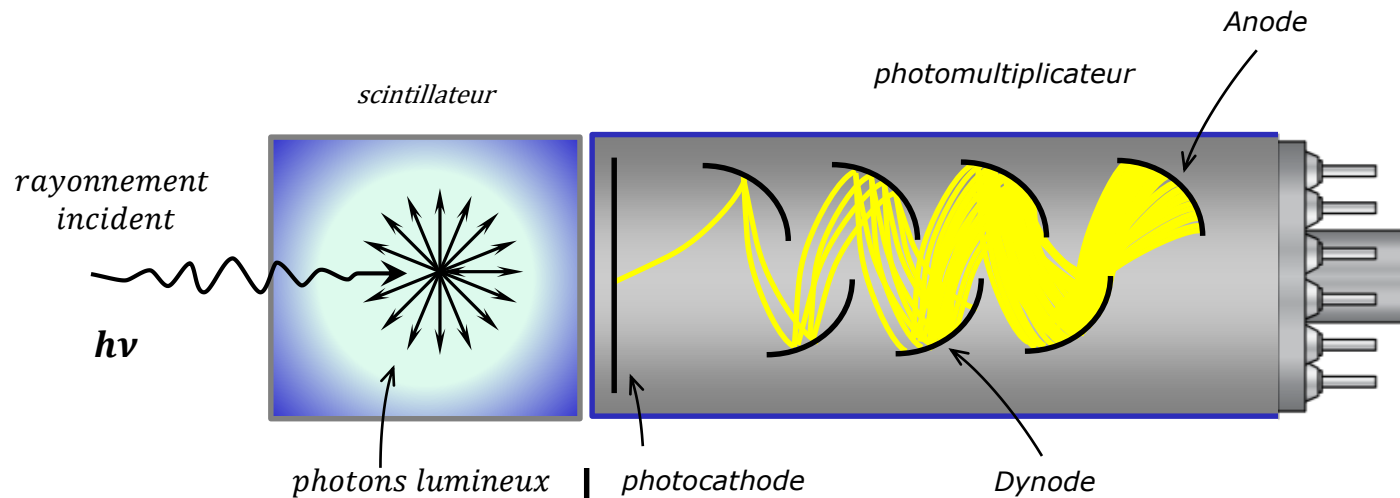


Caractéristiques Générales

Ensembles toujours composés d'au moins:

1/ Scintillateur

2/ détecteur de lumière ou "photo-détecteur"



Scintillateur

Conversion rayonnement ionisant en lumière

Photo-détecteur

Conversion lumière en signal électrique

Scintillateurs

Deux grandes familles

Scintillateurs Inorganiques

➤ Cristaux

Généralement

- Z et densité élevés
- Beaucoup de lumière
- Faible rapidité

➤ Gaz nobles (Ar, Kr, Xe) utilisés à l'état liquide

Scintillateurs Organiques

➤ Molécules aromatiques

- Z moyen faible
- Densité voisine de 1
- Moins de lumière
- Mais plus rapide

II - Les scintillateurs inorganiques

Scintillateurs inorganiques

Pour les scintillateurs inorganiques, la luminescence est essentiellement une **propriété cristalline**. Il y a deux groupes de scintillateurs inorganiques : **les scintillateurs activés** et **les scintillateurs intrinsèques**

les scintillateurs activés - NaI(Tl), CsI(Na), LaBr₃(Ce), ...

La luminescence est produite par de **faibles quantités d'impuretés** introduites dans le réseau cristallin. Malheureusement, il n'est pas possible de prédire théoriquement les propriétés de luminescence d'un tel cristal. Par contre, il existe quelques ions qui produisent de la luminescence dans de nombreuses liaisons.

Le Thallium, le Cerium, le Sodium sont des impuretés couramment introduites. Les propriétés de luminescence de ces impuretés dépendront également de la nature du cristal dans lequel elles ont été introduites.

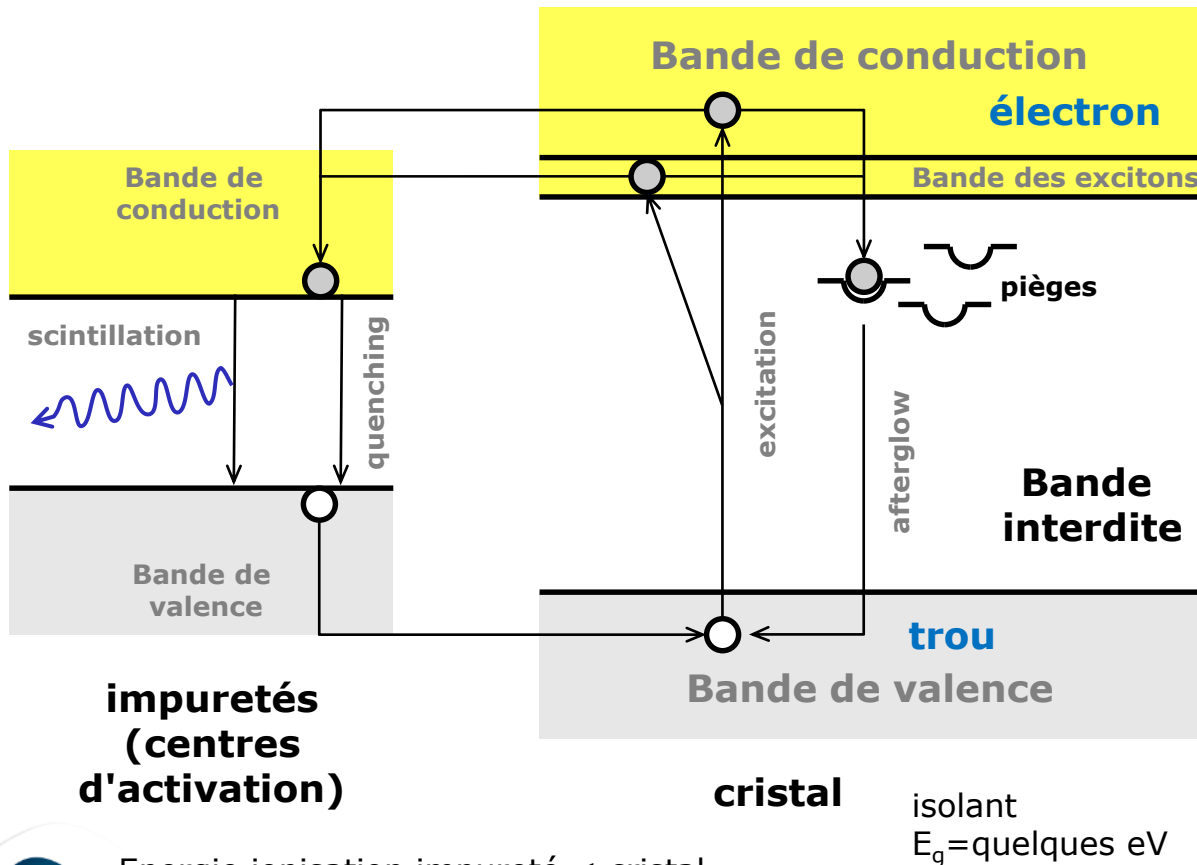
les scintillateurs intrinsèques - BGO, CsI, BaF₂, ...

Pour certains matériaux, il n'est **pas** nécessaire d'introduire des **impuretés** pour produire de la luminescence. Par contre, pour les cristaux purs, la luminescence peut être soit une propriété du réseau cristallin idéal, soit produite par des défauts du réseau qui jouent alors le rôle d'activateurs.

Scintillateurs inorganiques

Mécanisme de scintillation

Pour les scintillateurs inorganiques, le mécanisme de scintillation est déterminé par la structure électronique en bande du réseau cristallin



- 1/ Excitation créée par une particule ionisante permet de faire passer un e^- dans la bande de conduction,
- 2/ Outre la formation de paires é-trous libres, des paires faiblement liées appelées excitons sont également créées.
- 3/ Les paires é-trous libres et les excitons peuvent migrer librement dans le cristal et être capturés par des impuretés (ionisation d'un atome d'impureté)
- 4/ Recombinaison: émission de lumière ou transformation en chaleur
- 5/ Piégeage possible ("afterglow")

Energie ionisation impureté < cristal



Scintillateurs inorganiques

1. fluorescence

⇒ durée de vie courte -> scintillation

2. phosphorescence

⇒ durée de vie plus longue -> "afterglow"

Défauts : lacunes, ions en position interstitielle, ...
création d'états métastables : pièges

3. Transition non radiative : transformation en chaleur dans le réseau (« quenching »)

Exemple : **pour le NaI(Tl), 11% de l'énergie absorbée** dans le scintillateur est convertie en photons par désactivation d'un état excité de l'activateur (rendement énergétique de conversion).

Scintillateurs inorganiques

Mécanisme de scintillation

$$E = h\nu; \quad \lambda\nu = c$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ (vitesse lumière dans le vide)

$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ (cste Planck)

$E = \text{énergie en J}$

$\lambda = \text{longueur d'onde en m}$

$\nu = \text{fréquence en Hz}$

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

Exemple du NaI

$$\text{Gap: } E_g = 7,5 \text{ eV} \quad \rightarrow \quad \lambda \cong 165 \text{ nm}$$

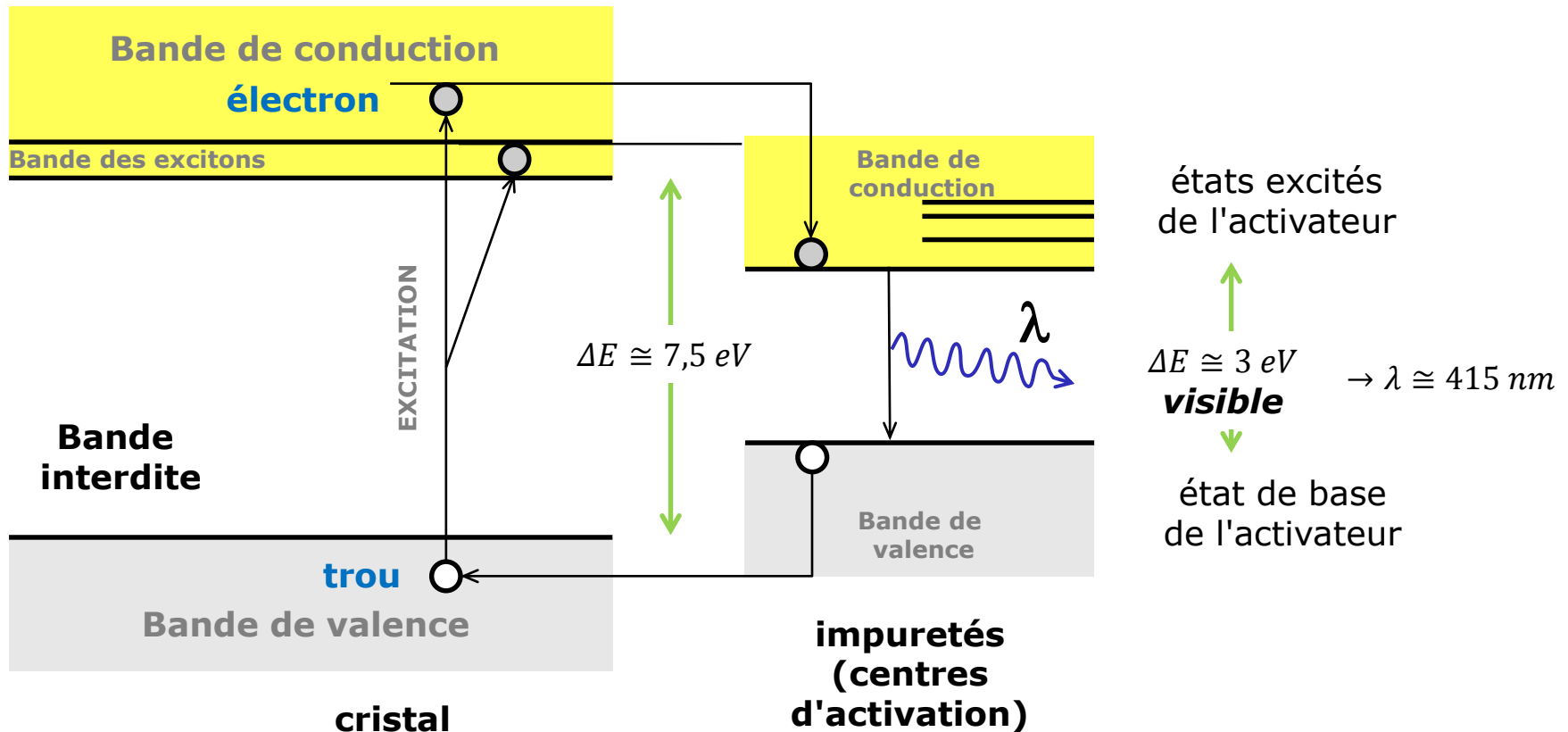
- Détection de ces photons **pas** facile
- **Absorption** de cette longueur d'onde par l'iodure de sodium

UV			Visible				IR	
200	300	400	500	600	700	800	Longueur d'onde (nm)	
12	5	4	3	2	Energie photon (eV)			

Scintillateurs inorganiques

Mécanisme de scintillation Exemple du NaI(Tl)

- Activateur : par exemple 10^{-3} mole de thallium



Scintillateurs inorganiques

Propriétés principales

Composition
& densité

Indice &
Longueur d'onde

Constantes
de temps

Quantité
de lumière

Material	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission (nm) λ_{\max}	Index of Refraction at λ_{\max}	Principal Decay Constant (μs)	Pulse 10–90% Rise Time (μs)	Total Light Yield in Photons/MeV	Absolute Scintillation Efficiency for Fast Electrons	Relative γ -Ray Pulse Height with Bi-alkali PM Tube	
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.3%	1.00	
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.0	4	52000	11.9	0.49	
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39000	11.4	1.11	
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	—	11000	2.8	0.23	
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8200	2.1	0.13	
BaF ₂ slow component	4.89	310	1.49	0.62	3	10000	4.5	0.13	
BaF ₂ fast component	4.89	220	—	0.0006	—	—	—	0.03 ^a	
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2	—	—	—	1.30 ^b	
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7	0.78	
CsF	4.11	390	1.48	0.004	—	—	—	0.05	
Li glass ^c	2.5	395	1.55	0.075	—	—	1.5	0.10	
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator:					With PMT & RC >>				
NE 102A	1.03	423	1.58	0.002		10000	3.0	0.25	

^aUsing UV-sensitive PM tube.

^bFor alpha particles.

^cProperties vary with exact formulation. Also see Table 15-1.

Source: Data derived primarily from Refs. 56–58.

NaI(Tl) 1.000.000/38.000=26 eV/photon
415 nm → ≈ 3eV rendement 11,5%

NE102 1.000.000/10.000=100 eV/photon
423 nm → ≈ 3eV rendement 3%



Scintillateurs inorganiques

Propriétés principales

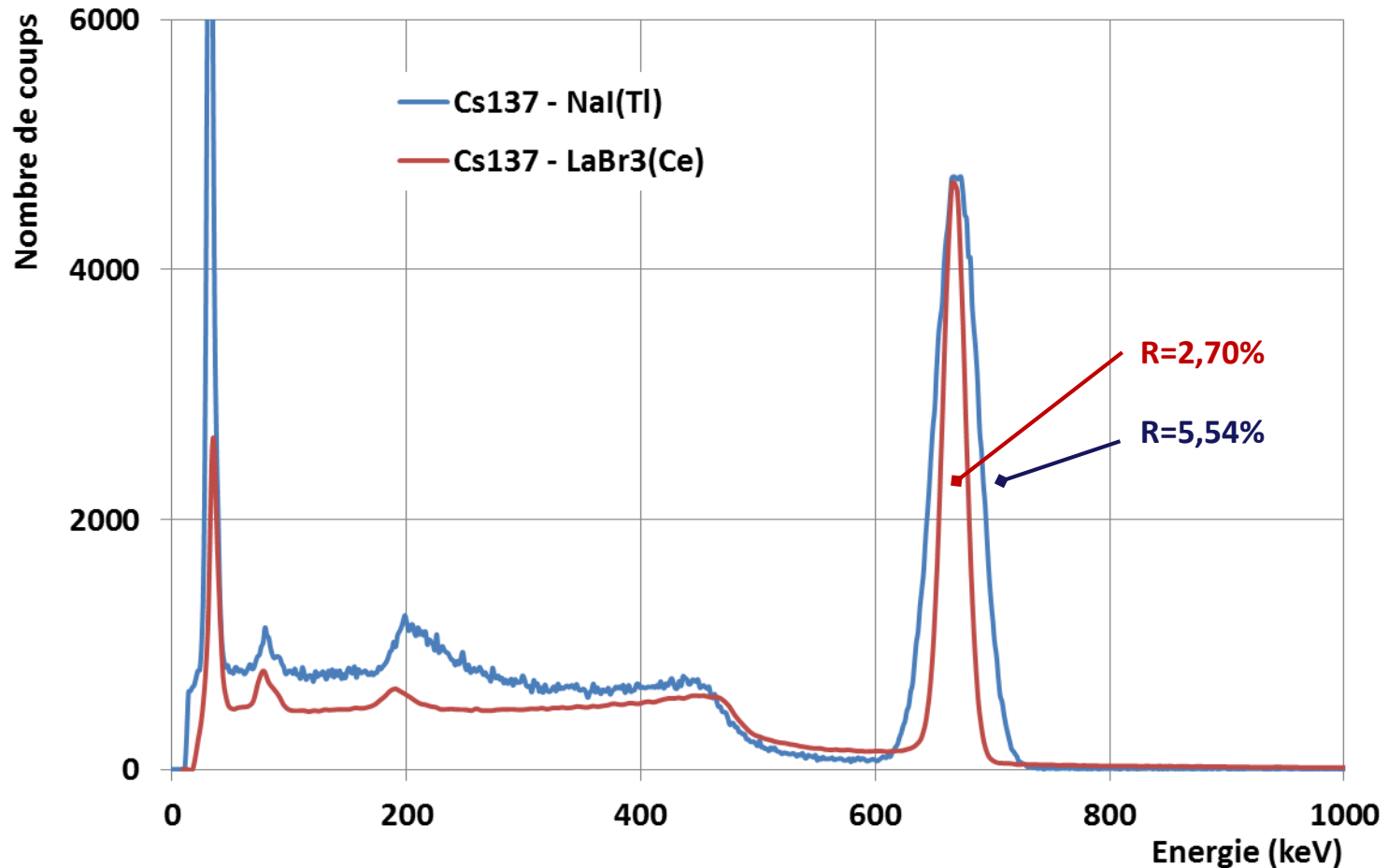
	LaBr ₃	LaCl ₃	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI(Na)	BGO	LYSO	PWO	CsI(pure)*	
Density (g/cm ³)	5.29	3.86	3.67	4.51	4.51	7.13	7.10	8.29	4.51	
Light Output (ph/MeV)	63,000	49,000	39,000	52,000	45,000	9000	32,000	100	16,800	
$\Delta E/E$ (FWHM) @662keV	PMT	<3%	3.5%	7%	6%	7.5%	10%	7.1%	>10%	7.5%
	APD	N/A	N/A	3.8%	4.9%	N/A	8.3%	N/A	N/A	4.3%
Peak λ (nm)	380	350 430	310 <i>fast</i> 415	550	420	480	420	420	315	
Fast Decay (ns)	25	25/213	620 <i>fast</i> 230	1000	630	300	41	6	35/6	
Hygroscopic	yes	yes	yes	slightly	yes	no	no	no	slightly	
Cost (per cm ³)	\$30	\$30	\$2	\$4.50	\$4.50	\$9	\$25	\$2	\$4.50	
Radiation length (cm)	N/A	N/A	2.9	1.86	1.86	1.1	1.2	0.85	1.86	

*

Ordres de grandeur, dépendent fortement du volume total, des quantités et formes des cristaux

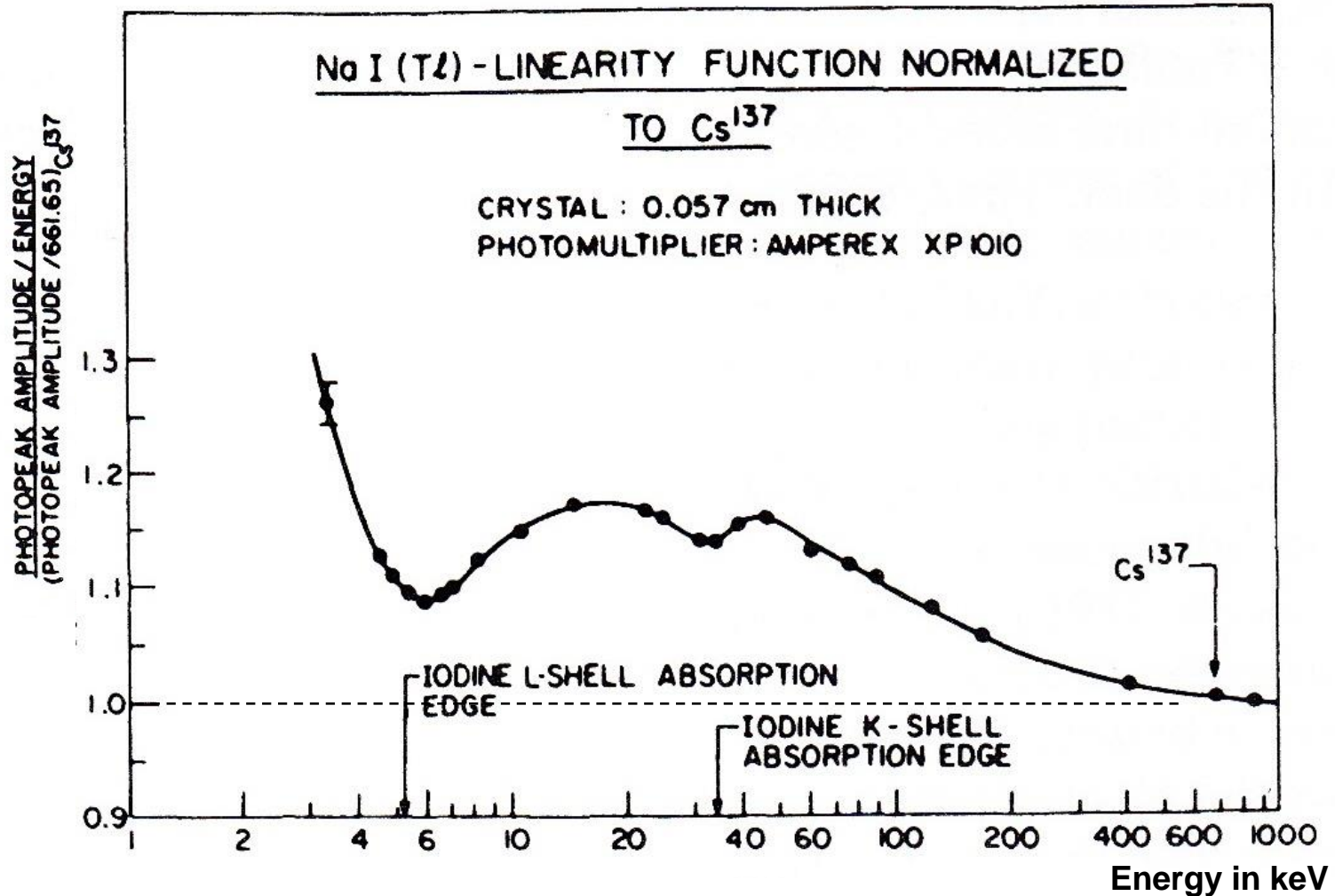
Pic du ^{137}Cs à 662 keV

Cristaux $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ & $\text{NaI}(\text{Tl})$



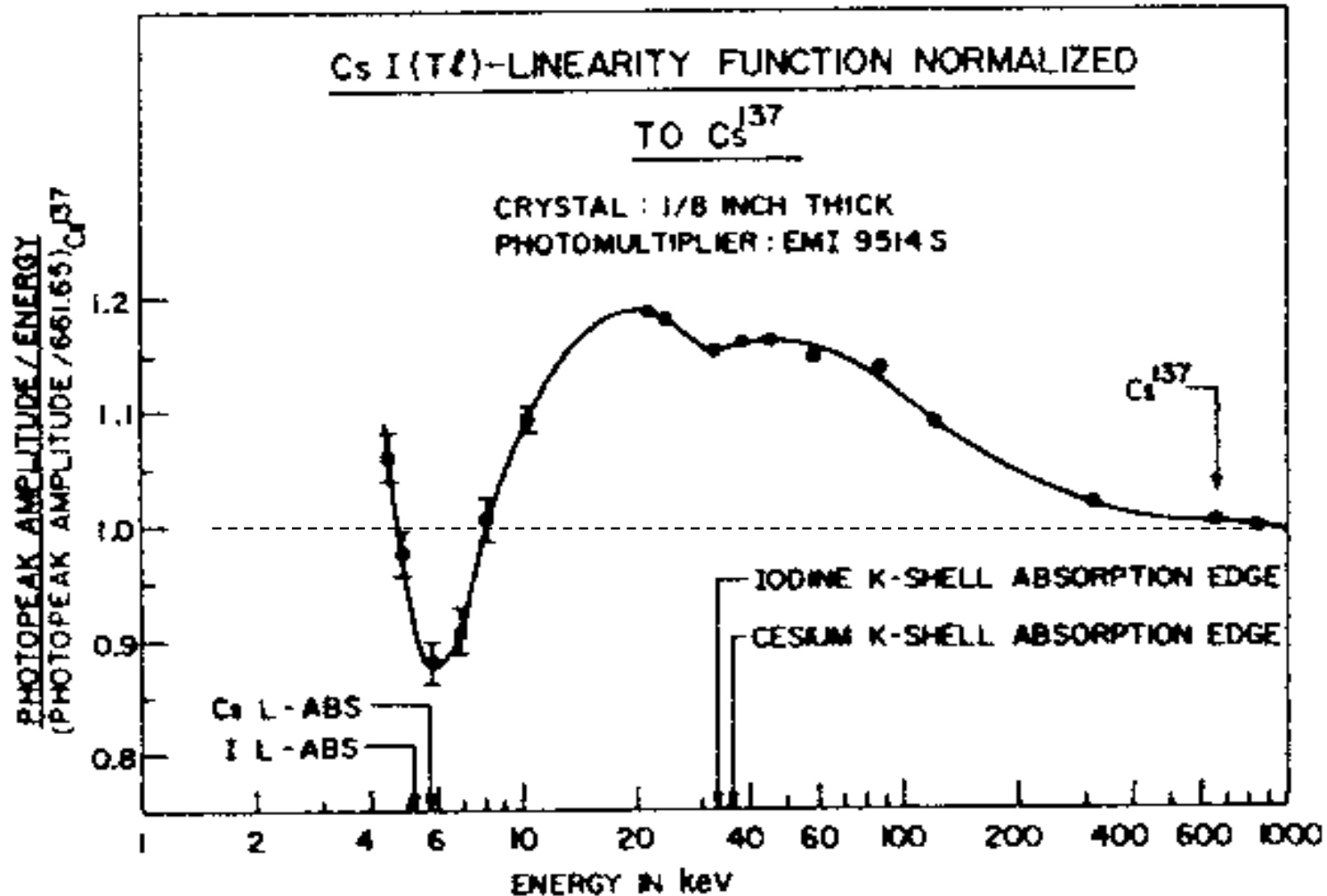
Scintillateurs inorganiques

réponse en énergie



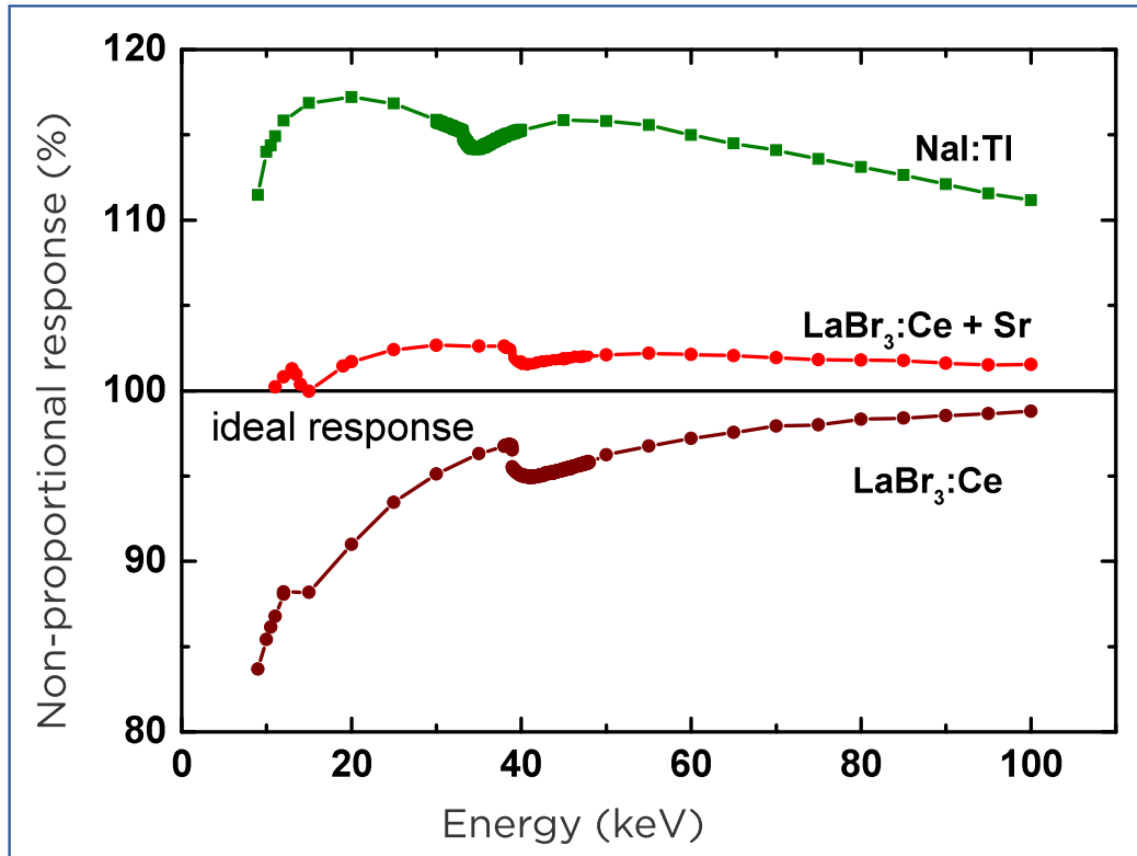
Scintillateurs inorganiques

réponse en énergie



Scintillateurs inorganiques

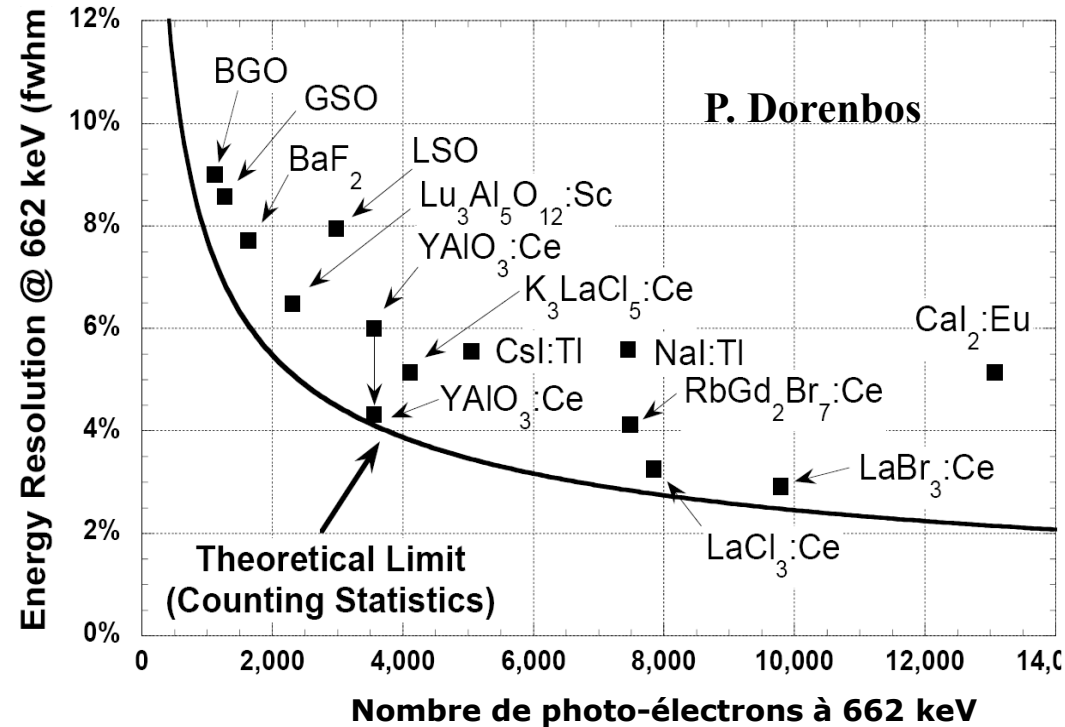
réponse en énergie



Non-proportionnalité du LaBr₃ comparé au NaI(Tl) (Doc. Saint-Gobain)

Résolution en énergie

- ❑ Pour avoir des détecteurs de bonne résolution en énergie, il est important d'avoir un cristal à haut rendement lumineux, une bonne Efficacité Quantique du PM, et une Collection de lumière optimisé.
- ❑ Quoi qu'il en soit le facteur limitant reste la résolution en énergie intrinsèque. (Un exemple typique est la comparaison entre LSO et BGO: ils fournissent la même résolution en énergie à 662keV même si le LSO a 4 fois plus de lumière que le BGO).
- ❑ Cela signifie que le cristal doit fournir non seulement le rendement lumineux élevé, mais aussi un bon niveau de proportionnalité.



Scintillateurs inorganiques

Réponses spectrales

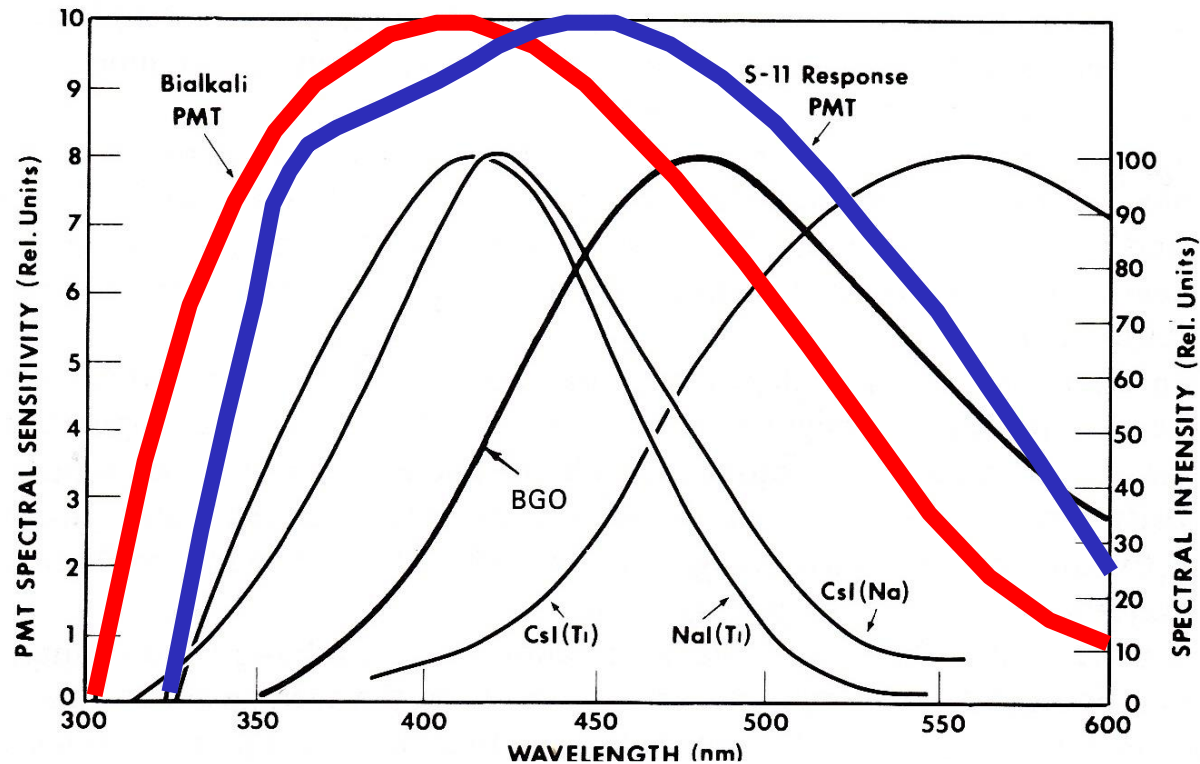
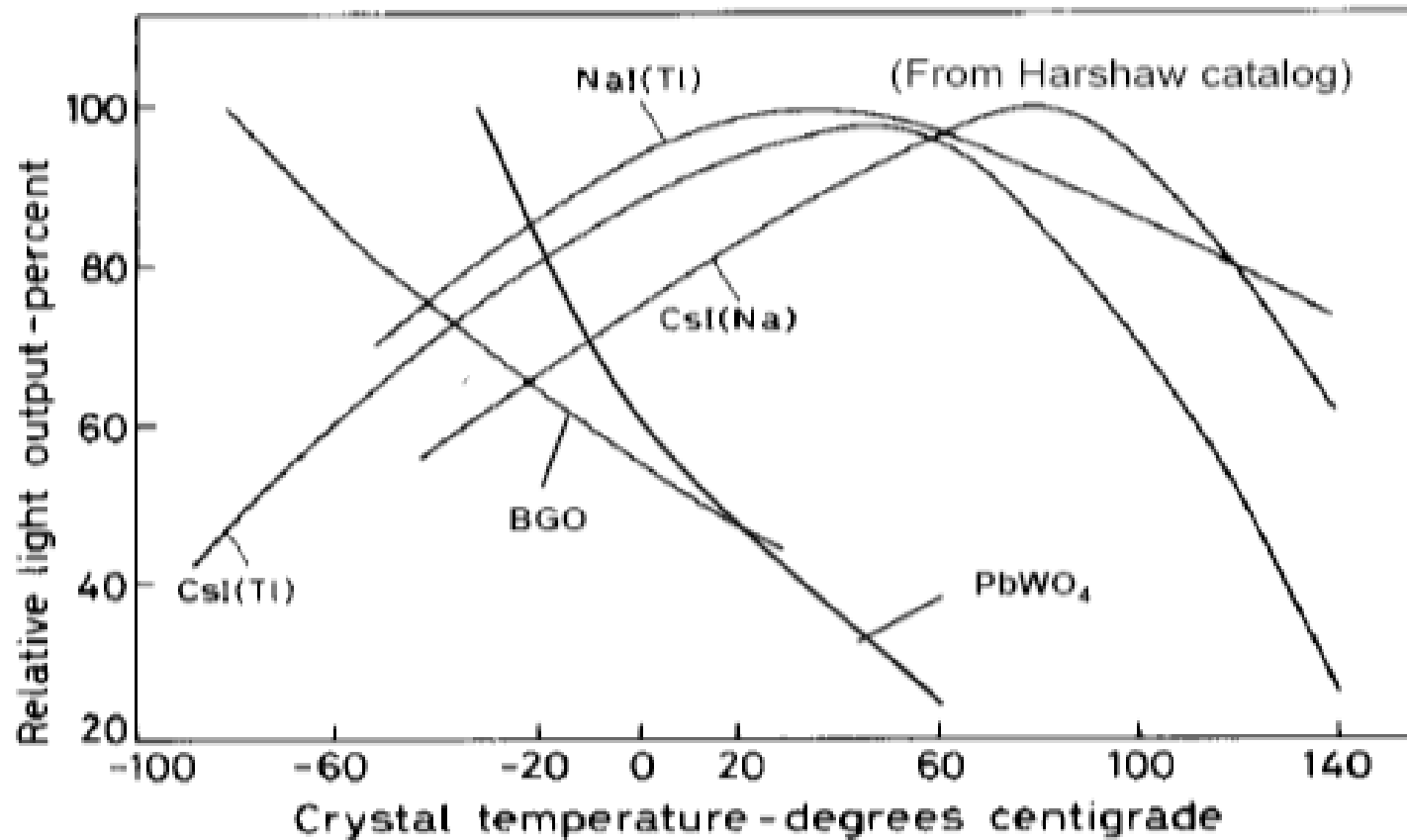


Figure 8-7 The emission spectra of several common inorganic scintillators. Also shown are the response curves for two widely used photocathodes. (Primarily from *Scintillation Phosphor Catalog*, The Harshaw Chemical Company. The emission spectrum for BGO is from Ref. 55.)

Scintillateurs inorganiques

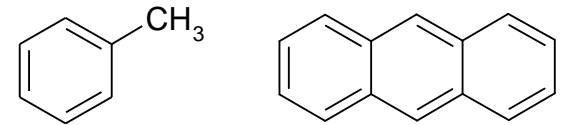
Variations par rapport à la température



III - Les scintillateurs organiques

Les scintillateurs organiques

- Moins chers que les inorganiques
- Composés de C et de H (faible n° atomique moyen, bas Z)
- La scintillation a pour origine la **désexcitation des électrons libres de valence de ces molécules organiques**. Ces électrons ne sont associés à aucun atome particulier et occupent les "**orbitales moléculaires dites π** ".
- **A contrario, les scintillateurs inorganiques se désexcitent et donnent de la lumière en particulier grâce à la présence du réseau cristallin.**



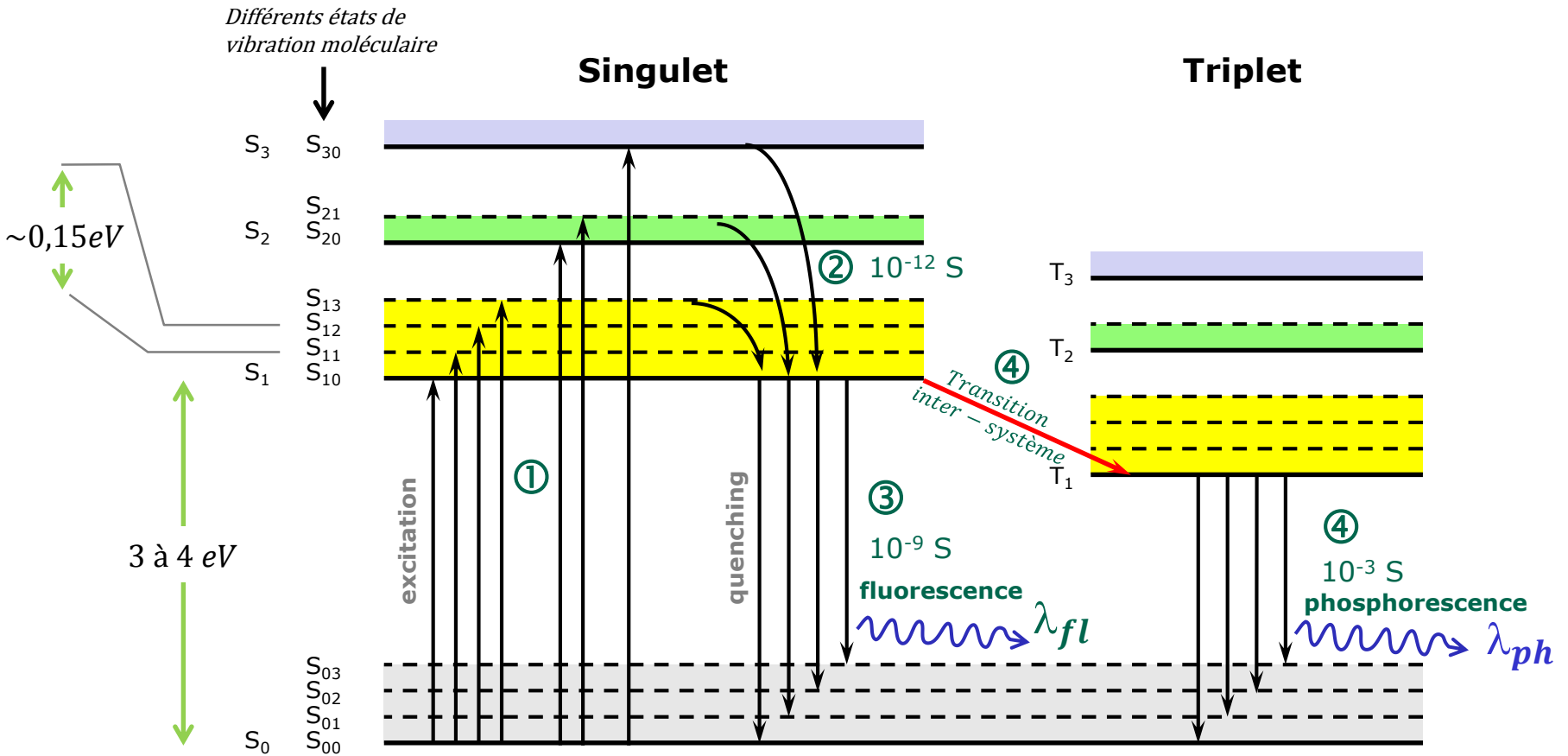
~~1. Spectrométrie γ~~

2. Comptage **X et γ (effet Compton)** -> détecteurs de grande surface

3. Spectrométrie β

4. haute efficacité pour la détection de **neutrons** par réaction (n,p)

Les scintillateurs organiques



1. Excitation de S_0 vers S_1 , S_2 ou S_3 .
2. Désexcitation rapide (pS) par transition interne non radiative de S_1 , S_2 ou S_3 vers S_{10}
3. Emission de lumière par fluorescence ($\tau \approx$ nS) par désexcitation de S_{10} vers un des états de vibration moléculaire de S_0 . Il peut aussi y avoir des phénomènes de "quenching" (transformation en chaleur sans émission de lumière)
4. **Ou** Emission de lumière par phosphorescence ($\tau \approx$ mS) par désexcitation de T_{10} vers un des états de vibration moléculaire de S_0 suite à une transition inter-système non radiative. De loin la moins probable.....

Scintillateurs inorganiques

Propriétés principales

Composition
& densité

Indice &
Longueur d'onde

Constantes
de temps

Quantité
de lumière

Material	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission (nm) λ_{\max}	Index of Refraction at λ_{\max}	Principal Decay Constant (μs)	Pulse 10–90% Rise Time (μs)	Total Light Yield in Photons/MeV	Absolute Scintillation Efficiency for Fast Electrons	Relative γ -Ray Pulse Height with Bi-alkali PM Tube	
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.3%	1.00	
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.0	4	52000	11.9	0.49	
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39000	11.4	1.11	
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	—	11000	2.8	0.23	
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8200	2.1	0.13	
BaF ₂ slow component	4.89	310	1.49	0.62	3	10000	4.5	0.13	
BaF ₂ fast component	4.89	220	—	0.0006	—	—	—	0.03 ^a	
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2	—	—	—	1.30 ^b	
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7	0.78	
CsF	4.11	390	1.48	0.004	—	—	—	0.05	
Li glass ^c	2.5	395	1.55	0.075	—	—	1.5	0.10	
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator:					With PMT & RC >>				
NE 102A	1.03	423	1.58	0.002		10000	3.0	0.25	

^aUsing UV-sensitive PM tube.

^bFor alpha particles.

^cProperties vary with exact formulation. Also see Table 15-1.

Source: Data derived primarily from Refs. 56–58.

NaI(Tl) 1.000.000/38.000=26 eV/photon
415 nm → ≈ 3eV rendement 11,5%

NE102 1.000.000/10.000=100 eV/photon
423 nm → ≈ 3eV rendement 3%



Scintillateurs organiques

Propriétés principales - exemples



scintillator	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (ns)	scintillation pulse height ¹⁾	H/C ratio ²⁾
Monocrystals						
naphthalene	1.15	1.58	348	11	11	0.800
anthracene	1.25	1.59	448	30-32	100	0.714
Plastics ³⁾						
NE 102 A	1.032	1.58	425	2.5	65	1.105
Plastics ⁴⁾						
BC-400	1.032	1.581	423	2.4	65	1.103
BC-404	1.032	1.58	408	1.8	68	1.107
BC-408	1.032	1.58	425	2.1	64	1.104
BC-422	1.032	1.58	370	1.6	55	1.102
BC-422Q	1.032	1.58	370	0.7	11	1.102

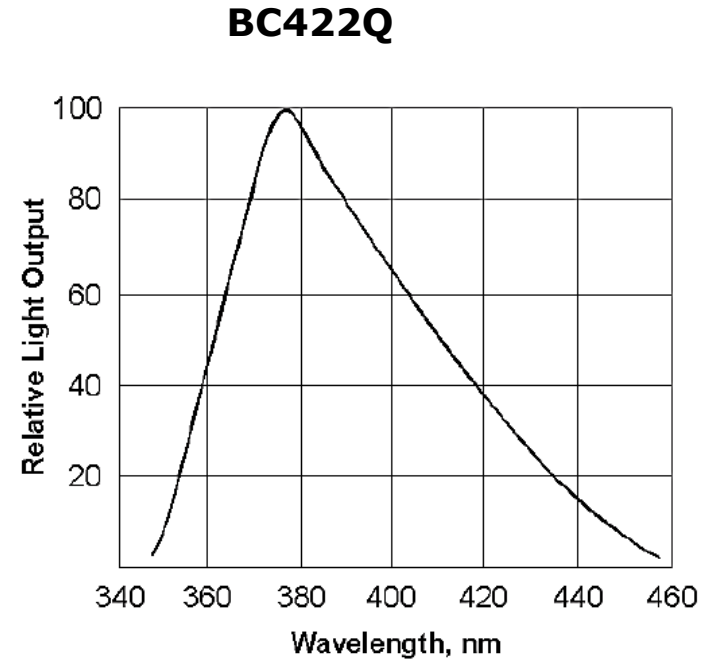
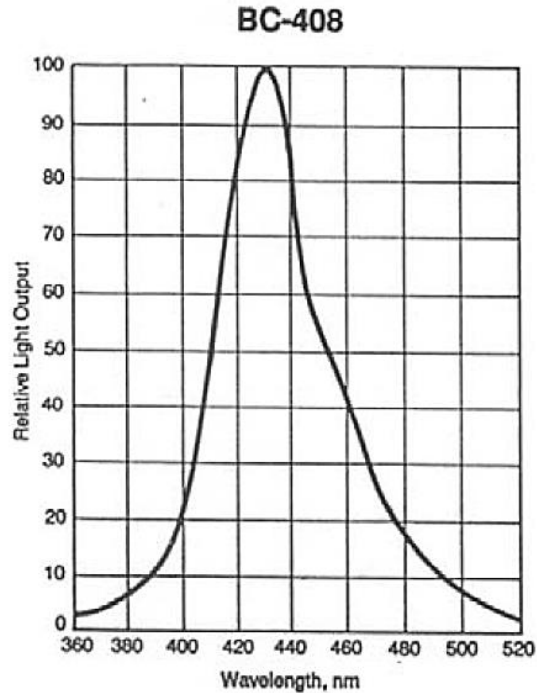
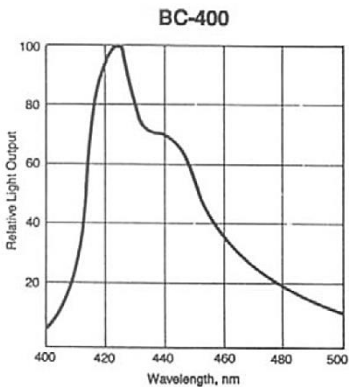
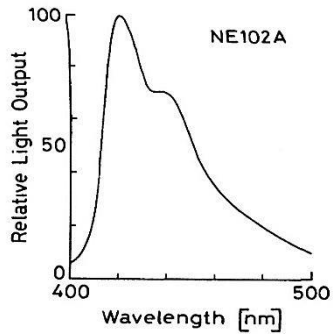
Total Light Yield
≈ 10 000
photons/MeV

- ¹⁾ relative to anthracene
- ²⁾ ratio of hydrogen to carbon atoms
- ³⁾ Nuclear Enterprises Ltd. Sighthill, Edinburgh, U.K.
- ⁴⁾ Bicon Corporation, Newbury, Ohio, USA



Scintillateurs inorganiques

Réponses spectrales



V - Collection de lumière

Collection de lumière

couplage optique

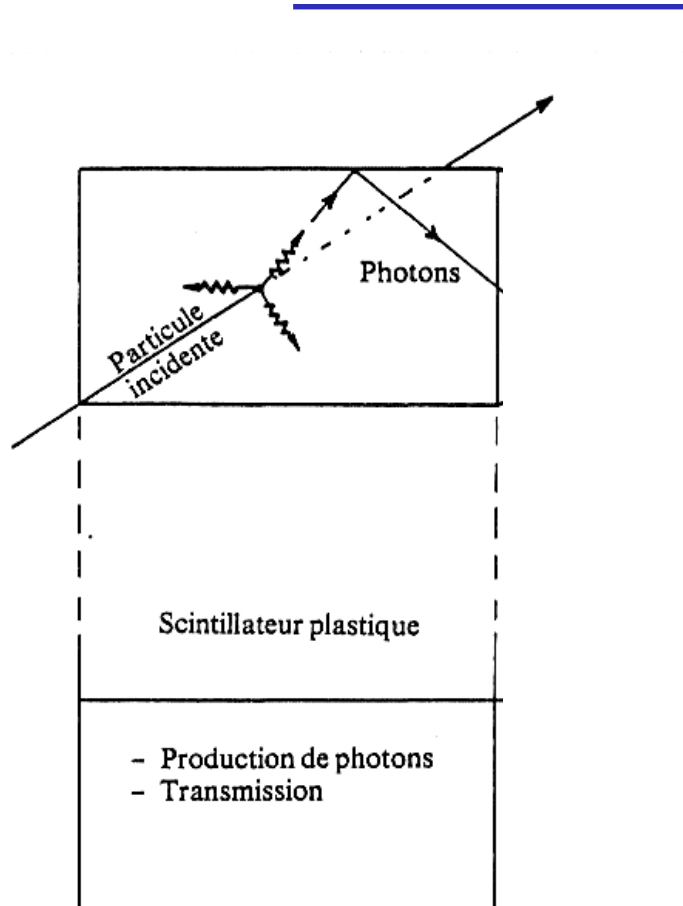


Schéma de fonctionnement d'un compteur à scintillation

D'après technologie des compteurs à scintillation L. Thornill CERN

Collection de lumière

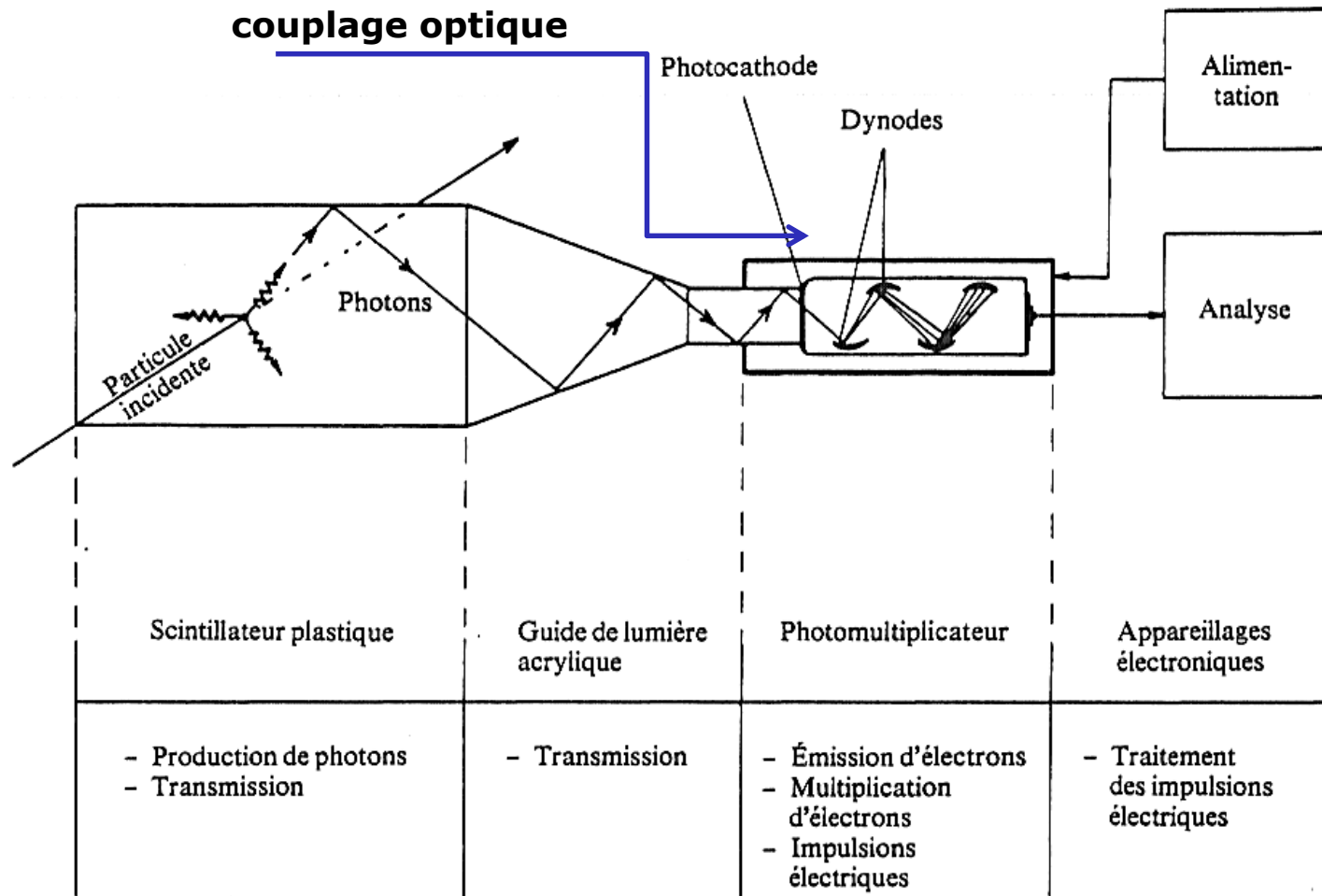


Schéma de fonctionnement d'un compteur à scintillation

D'après technologie des compteurs à scintillation L. Thornill CERN

Collection de lumière

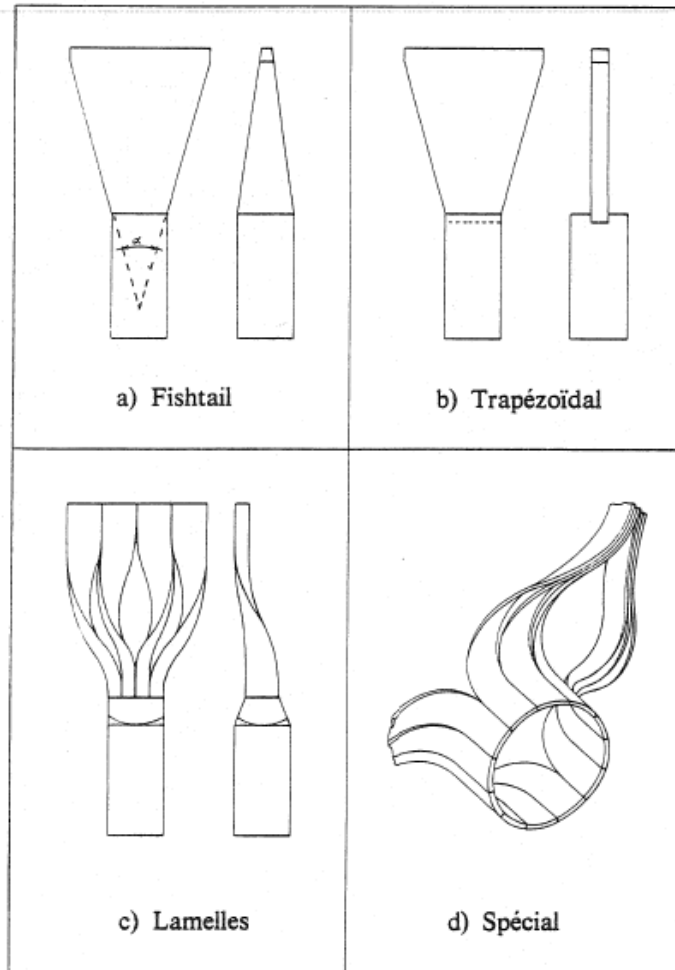


Fig. 6 Principaux types de guides de lumière

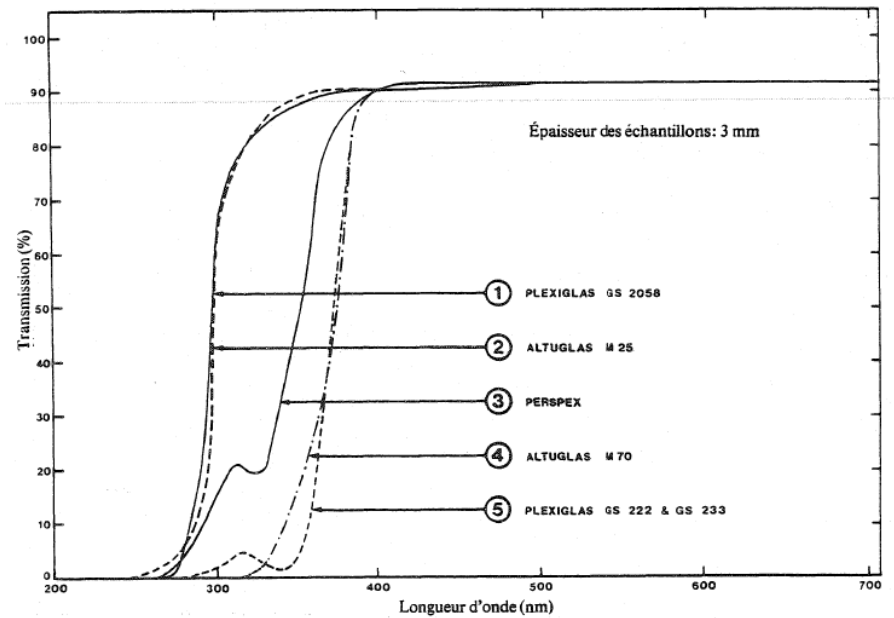
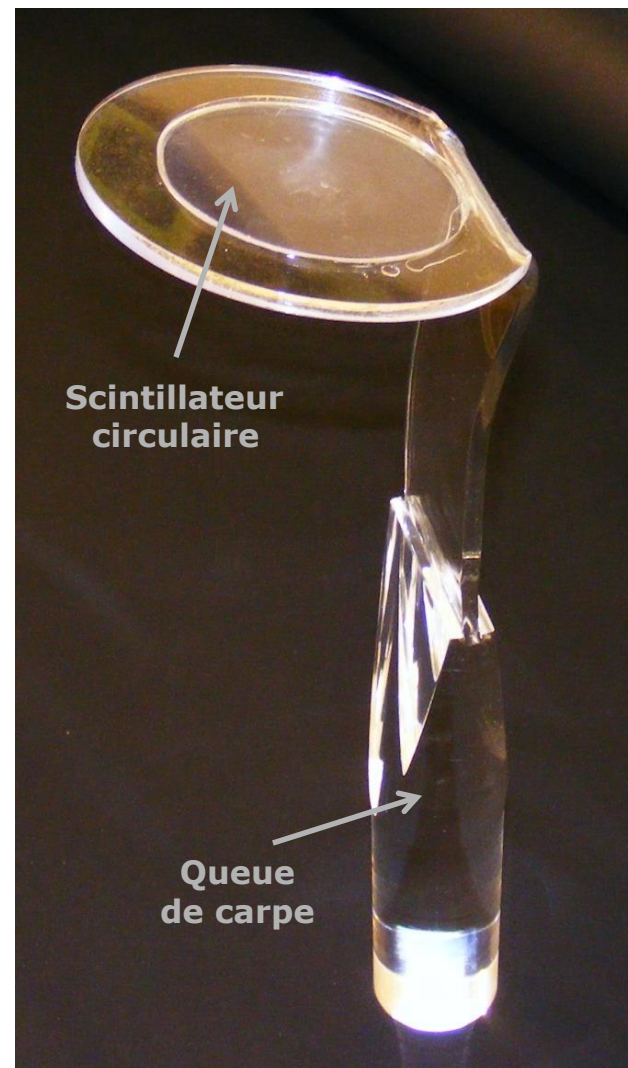
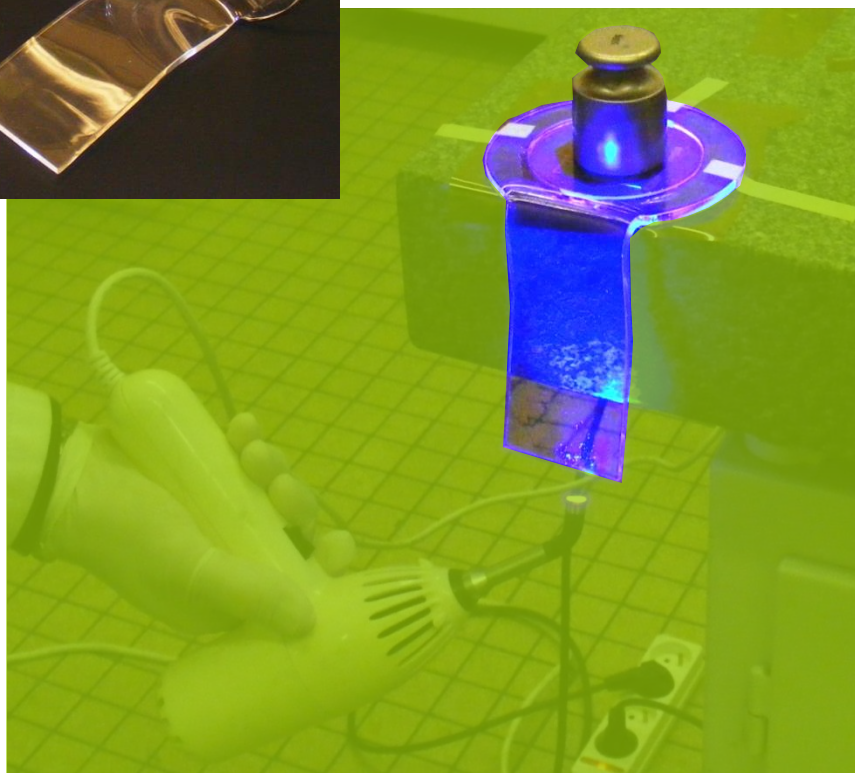
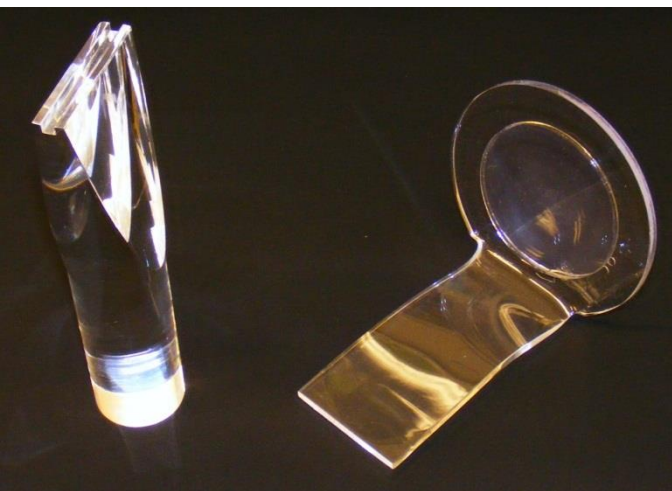


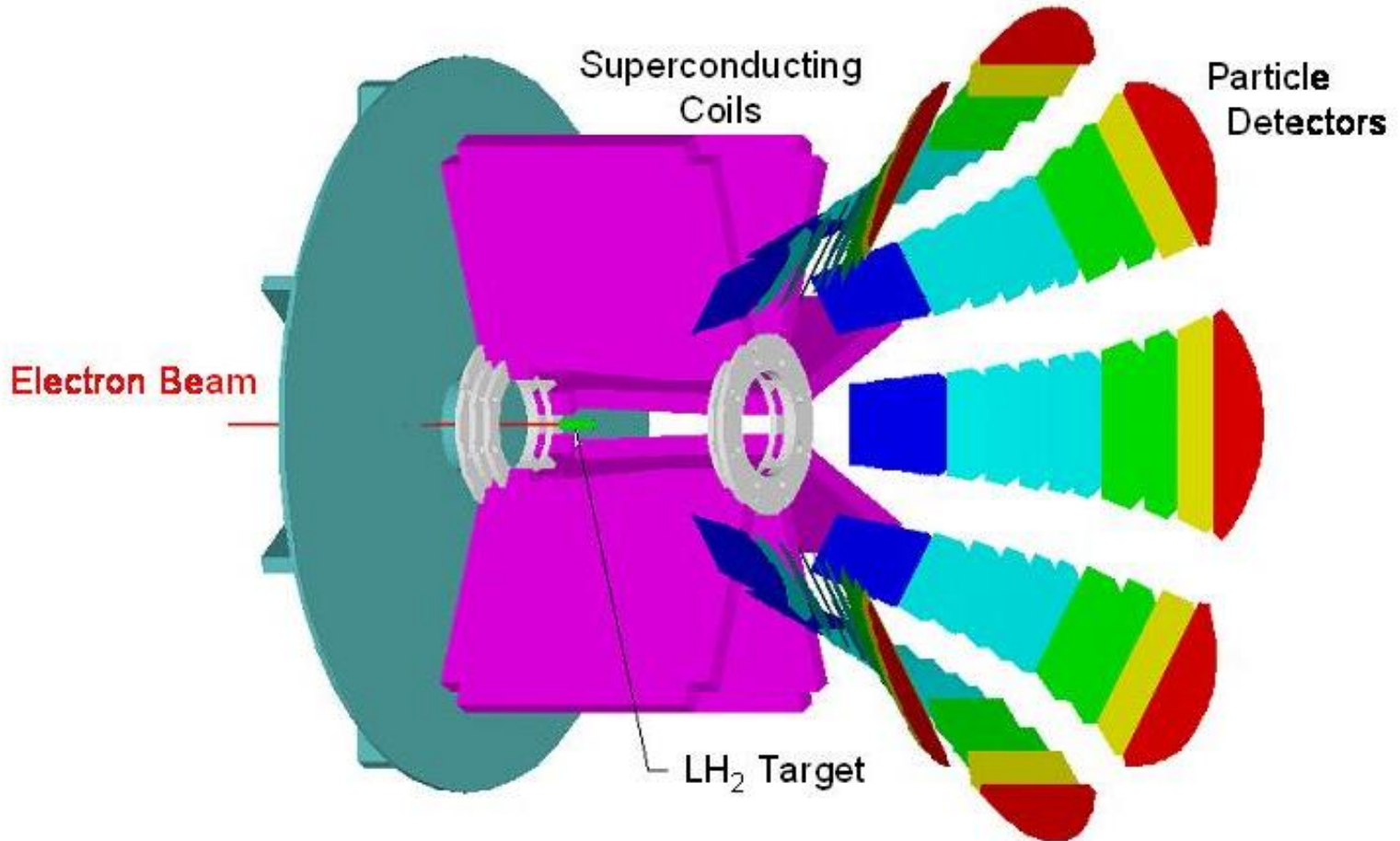
Fig. 3 Courbes spectrales de quelques PMMA commerciaux

Scintillateur plastique & son guide



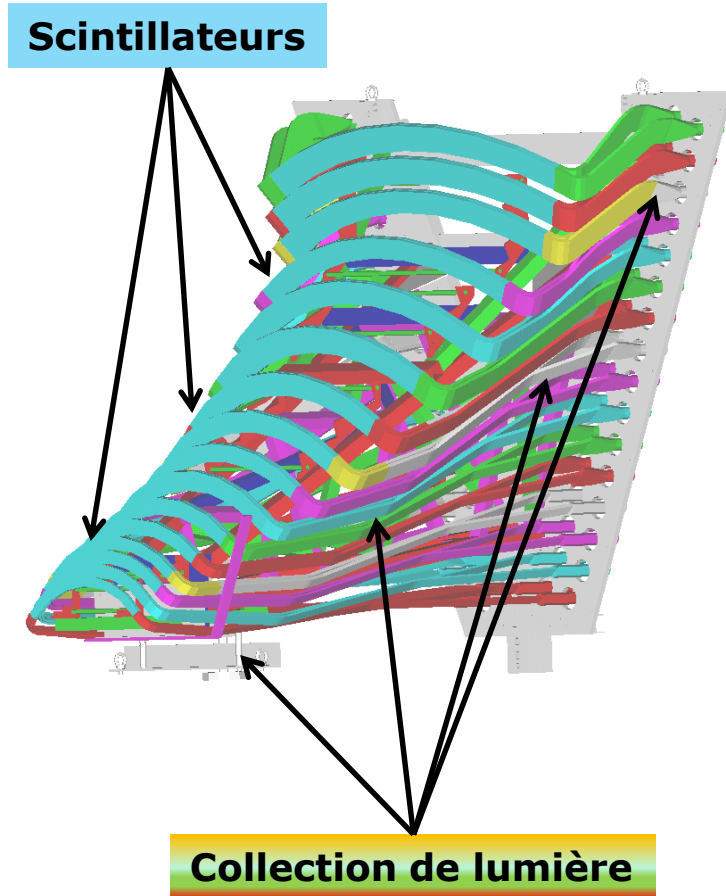
Collection de lumière

Exemple: 8 "Octants" de l'Expérience G0 au Jefferson Laboratory (USA)



Collection de lumière

Exemple: 8 "Octants" de l'Expérience G0 au Jefferson Laboratory (USA)



Champ magnétique
(8 secteurs)

16 paires
Scintillateur
(BC 408)



VI - Conversion de lumière

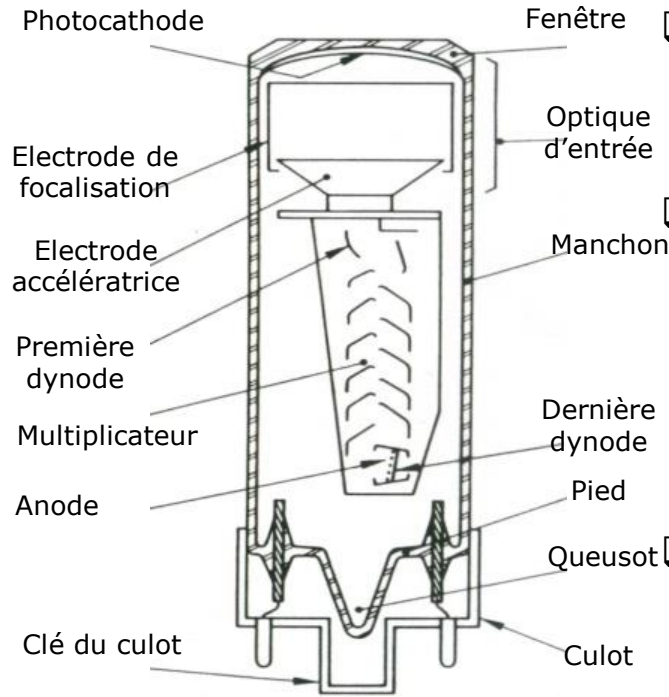
VI_a - Lecture par Photomultiplicateurs

Photo-détecteurs: Photomultiplicateurs



Photomultiplicateur

Le Photomultiplicateur (PM) est composé de:



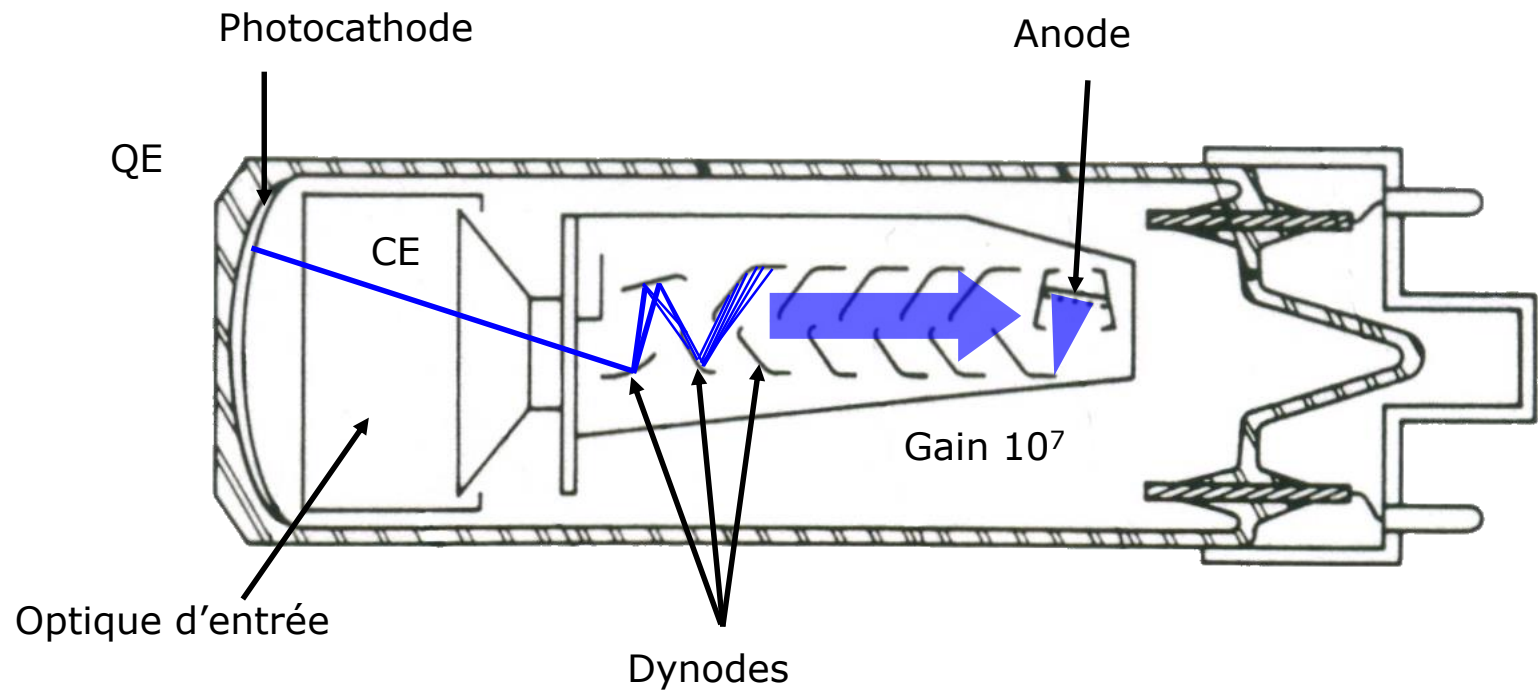
❑ d'une photocathode qui effectue la **conversion du flux de photons incidents en un flux d'électrons** par effet photoélectrique.

❑ d'une optique d'entrée constituée d'une ou de plusieurs électrodes de focalisation et d'une électrode accélératrice. L'optique d'entrée est destinée à **concentrer tous les électrons issus de la photocathode sur la première électrode** du photomultiplicateur.

❑ d'un **multiplicateur d'électrons** formé d'une succession d'électrodes appelées dynodes, lesquelles multiplient en cascade le nombre des électrons pénétrant dans le photomultiplicateur.

❑ enfin, d'une **anode chargée de recueillir le flux d'électrons** issu de la dernière dynode du photomultiplicateur et sur laquelle est prélevé le signal de sortie.

Photomultiplicateur



Photomultiplicateur

- **G** Gain: M dynodes, $g_1 \sim 10$, $g_2 \dots g_M \sim 2$ à 3 Gain $\uparrow 10^7$
- **QE**: efficacité quantique (20 à 40% @ 400nm)
- **CE**: efficacité de collection 1ere dynode > 80%
- **N_{photons}** : nb de photons arrivant sur la photocathode
- **q_e** : $1,6 \times 10^{-19}$ C

$$G = \prod_{i=1}^M g_i$$

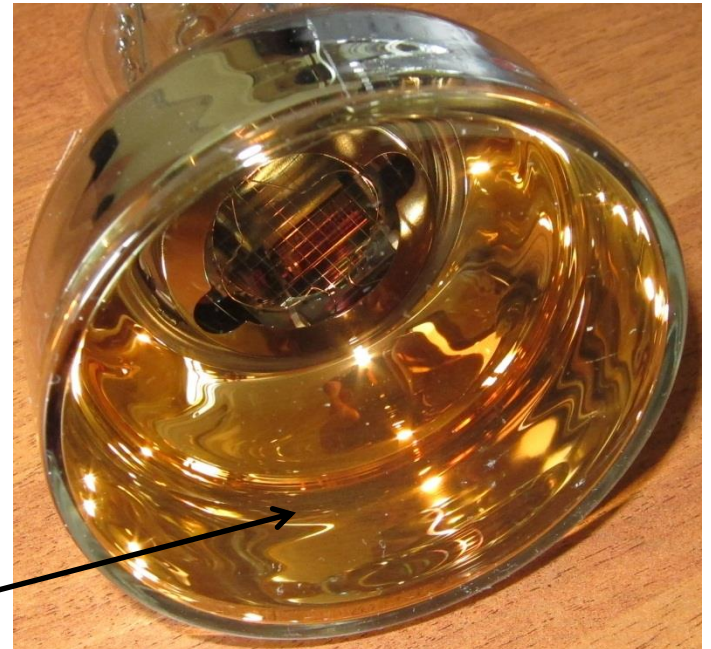
Charge en sortie de photomultiplicateur:

$$Q_{tot} = N_{photons} \cdot QE \cdot CE \cdot G \cdot q_e$$



- Les photomultiplicateurs sont sensibles au champ magnétique, **même au champ magnétique terrestre** (qqes Gauss) -> blindage

Photomultiplicateur

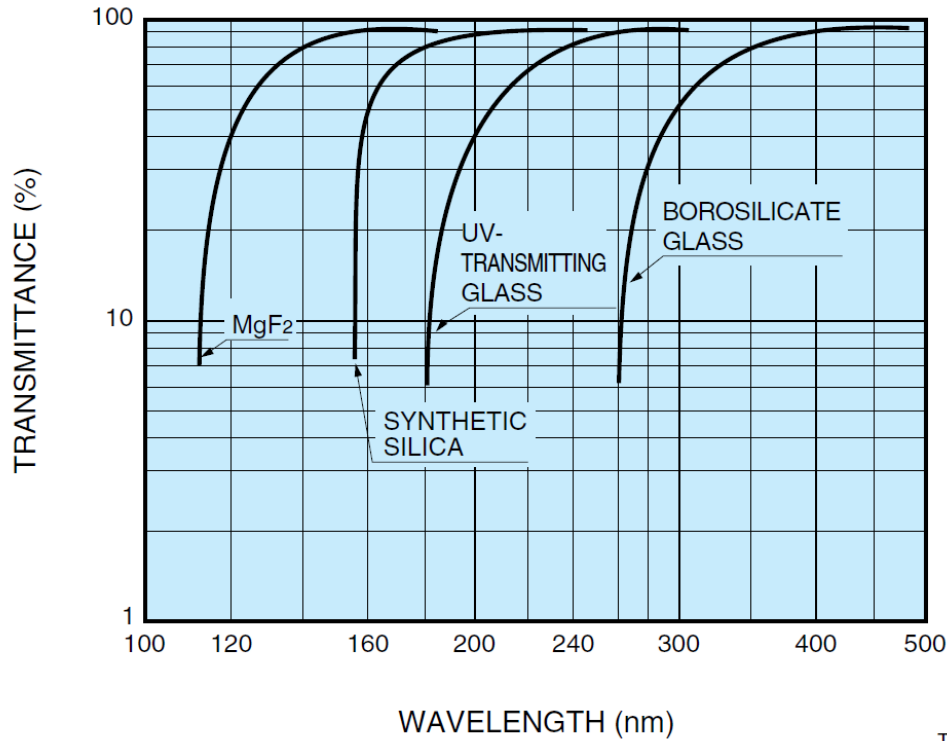


Fenêtre d'entrée

Photomultiplicateur

Transmission de la fenêtre d'entrée

Documentation Hamamatsu



TPMOB0076EB

UV			Visible				IR	
200	300	400	500	600	700	800	Longueur d'onde (nm)	
12	5	4	3	2		Energie photon (eV)		

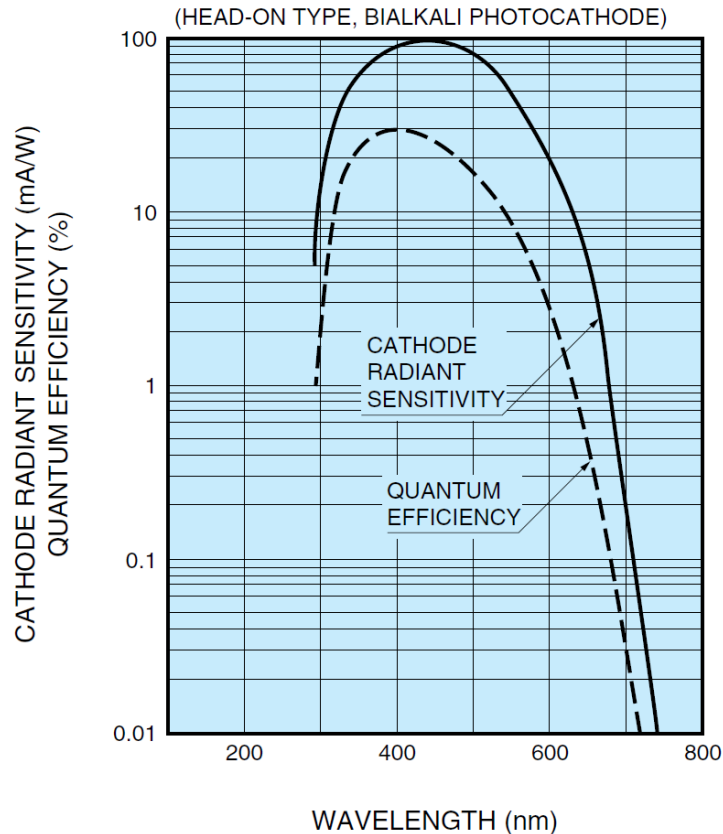


Photomultiplicateur

Réponse spectrale photocathode

Figure 4: Typical Spectral Response of Bialkali Photocathode

Documentation Hamamatsu



$$QE = \frac{N_{p.e.}}{N_{photons}} = \frac{S \times 124}{\lambda}$$

QE: Efficacité Quantique en %

S: sensibilité de la photocathode en **mA/W**

λ: Longueur d'onde en **nm**

$N_{photons}$: Nombre de photons qui arrivent sur la photocathode

N_{pe} : Nombre d'électrons extraits de la photocathode

les photocathodes sont souvent des composés de césium et d'antimoine. La surface des dynodes peut être recouverte soit de composés d'argent et de magnésium, soit de césium et d'antimoine.



Photomultiplicateur

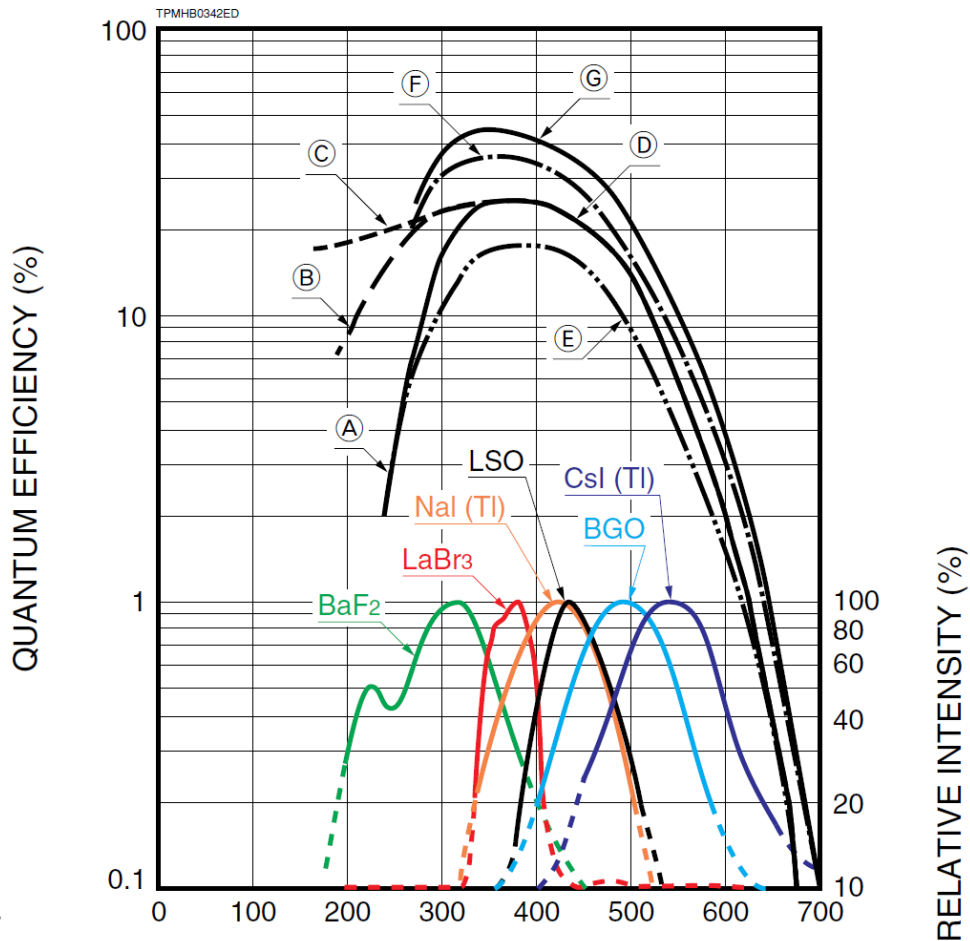
Réponse spectrale photocathodes versus scintillateurs

Documentation Hamamatsu

- (A): Borosilicate Glass
- (B): UV Glass
- (C): Synthetic Silica
- (D): Bialkali Photocathode
- (E): High Temp. Bialkali Photocathode
- (F): Super Bialkali
- (G): Ultra Bialkali

fenêtre
d'entrée

photocathode

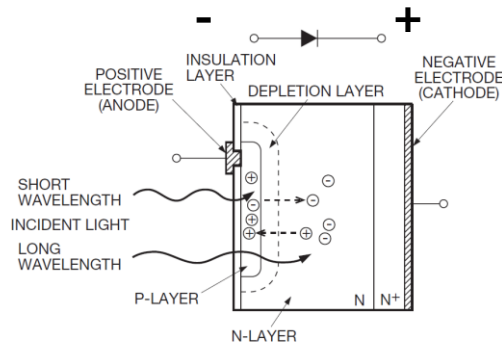


VI_b - Lecture par Photodiodes

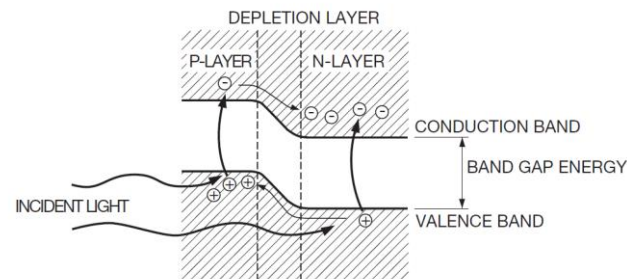
Photodiode

- Même principe qu'un détecteur à semi-conducteur
- Sensible des UV au proche IR (photomultiplicateur très limité au delà de 500 nm)
- Insensible au champ magnétique (contrairement au photomultiplicateur)
- Signal de sortie plus faible que les photomultiplicateurs (donc moins performant pour les faibles énergies)

[Figure 1] Si photodiode cross section



[Figure 2] Si photodiode P-N junction state



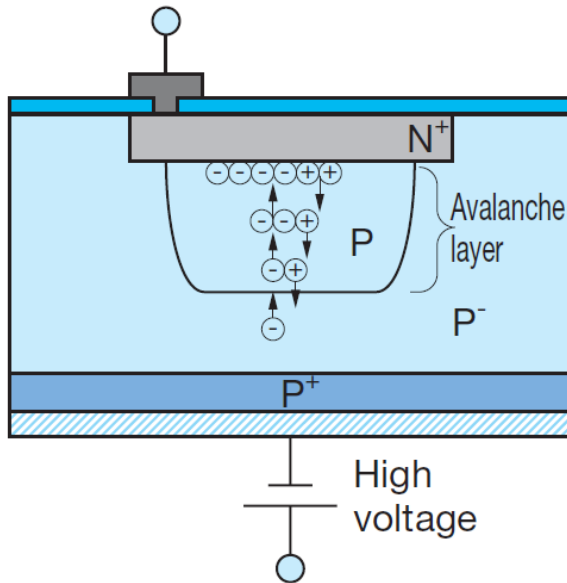
Documentation Hamamatsu

Avantage : bonne efficacité quantique (QE)

Inconvénient : gain de 1

Photodiode à avalanche (APD)

Operating principle of APD



Generated carriers produce new electron-hole pairs while being accelerated by high electric field. **Ionization**



Newly generated carriers are also accelerated to produce further electron-hole pairs, and this process repeats itself. **Avalanche multiplication**

Gain proportional to the applied reverse bias voltage can be obtained.

KAPDC0006EC

L'APD a du gain

Documentation Hamamatsu

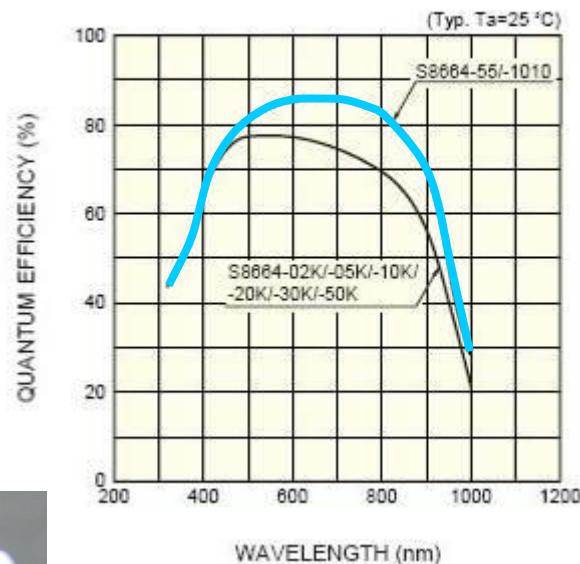
Photodiode à avalanche (APD)

Caractéristiques spectrales type Hamamatsu S8664-1010 APD

APD:

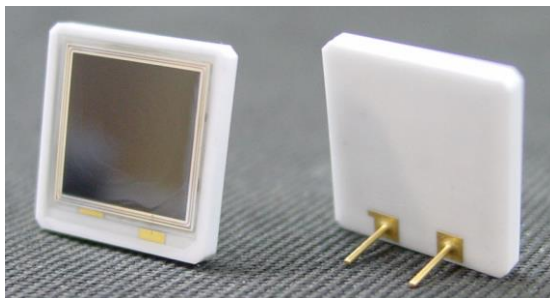
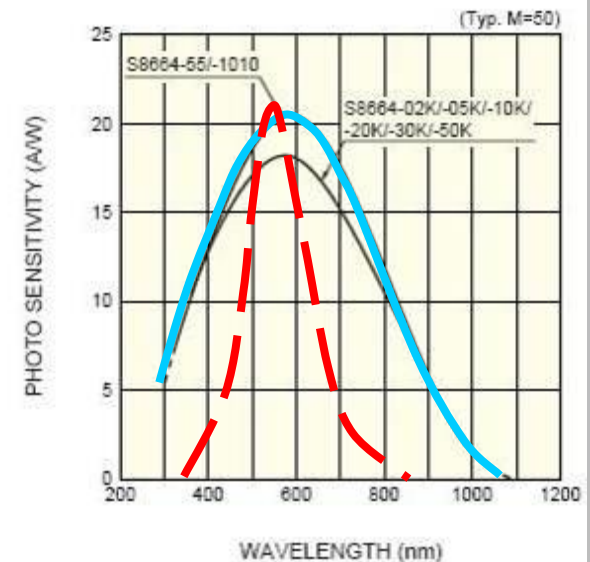
Surface active 100mm²

■ Quantum efficiency vs. wavelength



Efficacité Quantique
70% à 420nm,
85% à 550nm

■ Spectral response



APD S8664-1010

CsI(Tl)

Valeur
verticale
arbitraire pour
CsI(Tl)

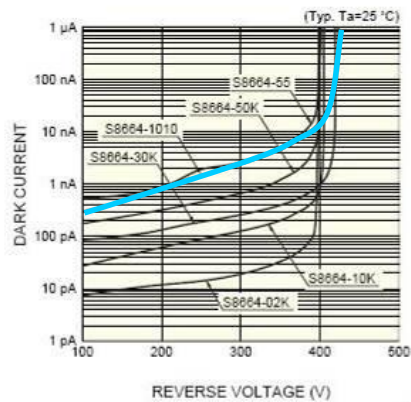


Photodiode à avalanche (APD)

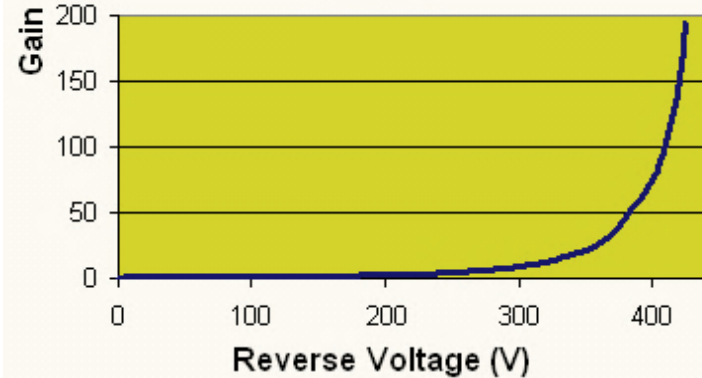
Autres caractéristiques Hamamatsu S8664-1010 APD

APD: Capacité typique APD $\sim 270\text{pF}$

■ Dark current vs. reverse voltage

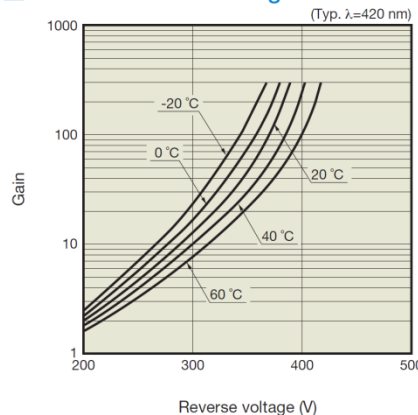


Gain APD



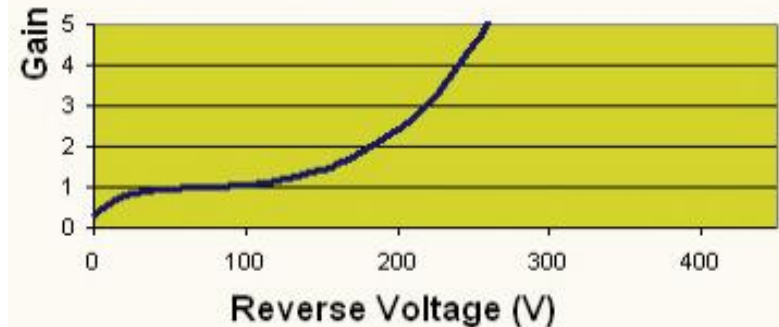
$T^\circ = 20^\circ\text{C}$
gain
 $M = 50$ à
380V
 $M = 74$ à
400V

■ Gain vs. reverse voltage



Le gain varie beaucoup avec la température... et la HT....

Gain APD

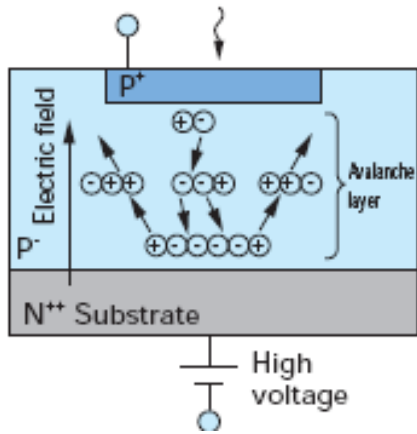


- Nécessité d'une alimentation HT très stable
- Nécessité d'une température régulée

SiPM – APD Multipixels en mode Geiger

Autres noms : MPPC...

3x3 mm²

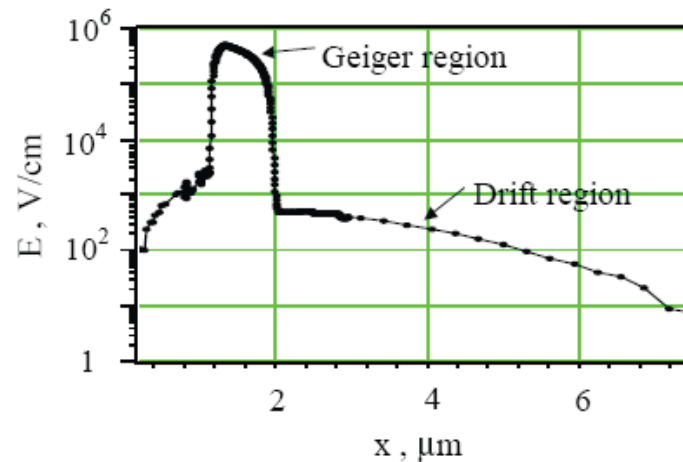
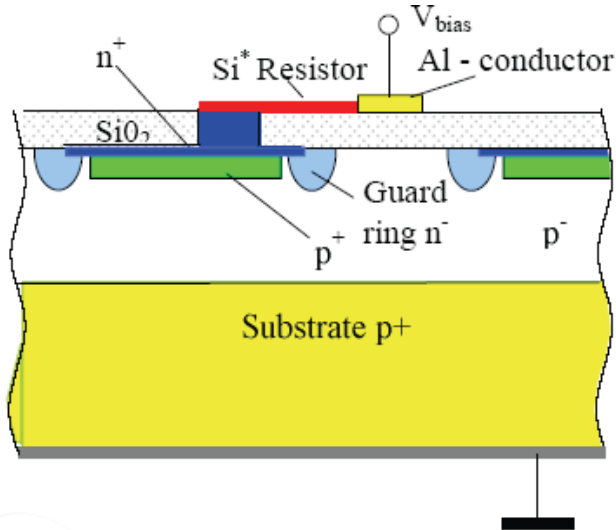
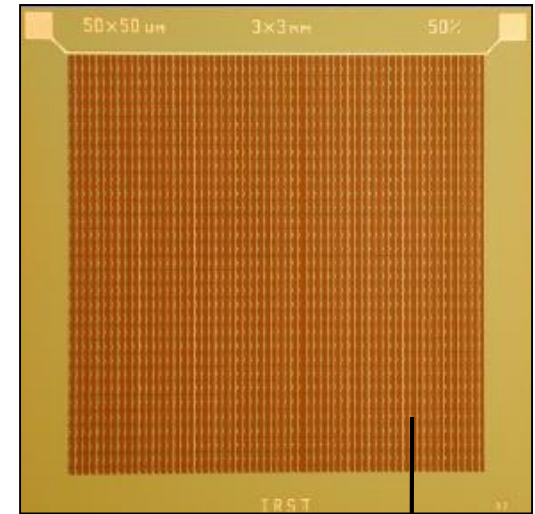


Generated carriers produce new electron-hole pairs while being accelerated by high electric field. **Ionization**

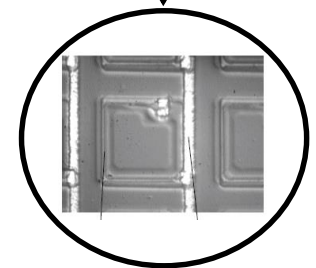


Newly generated carriers are also accelerated to produce further electron-hole pairs, and this process repeats itself. **Avalanche multiplication**

Gain proportional to the applied reverse bias voltage can be obtained.

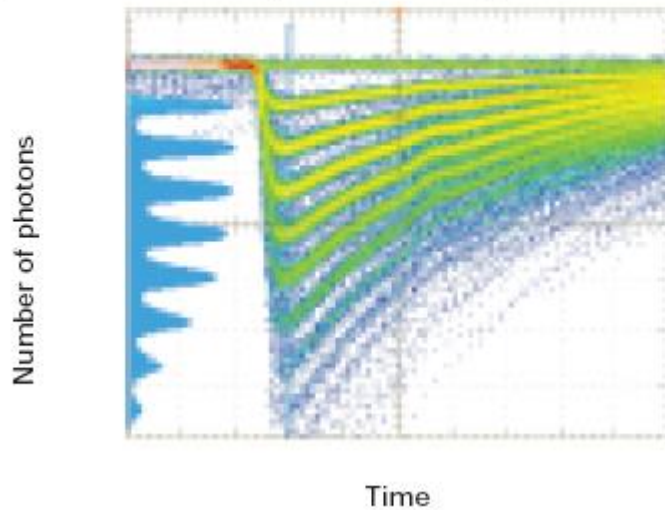


3600 cellules

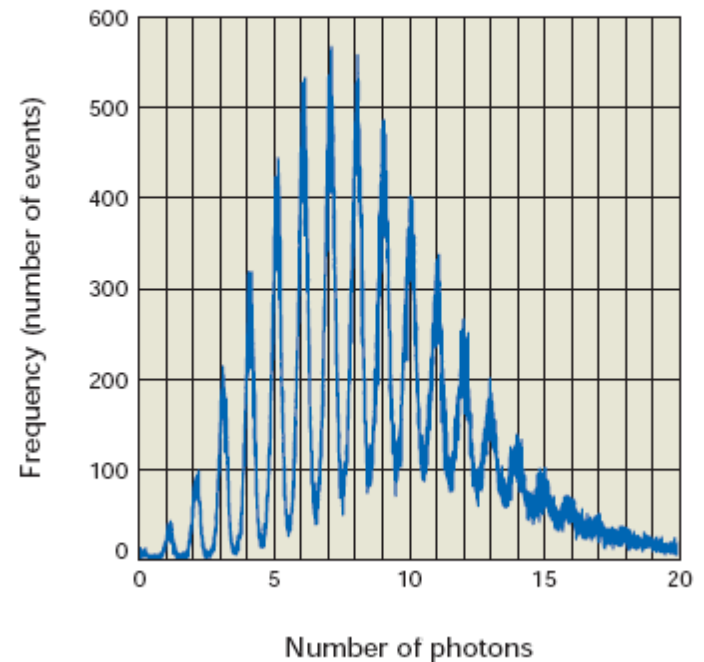


SiPM – APD Multipixels en mode Geiger

- Pulse waveform when using an amplifier (120 times) (S10362-11-050U, $M=7.5 \times 10^5$)



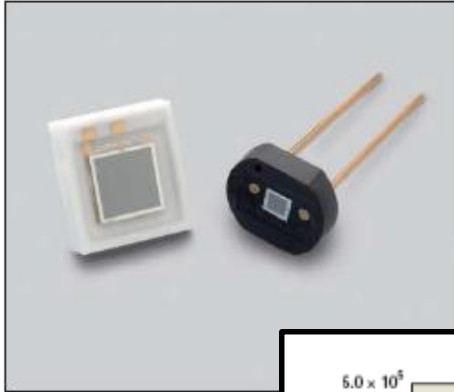
- Pulse height spectrum when using charge amplifier (S10362-11-025U, $M=2.75 \times 10^5$)



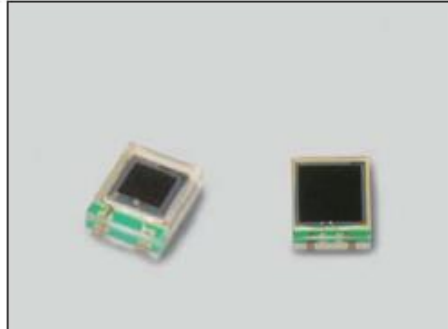
KAPDB0133EA

SiPM – APD Multipixels en mode Geiger

Ceramic



Surface mount type

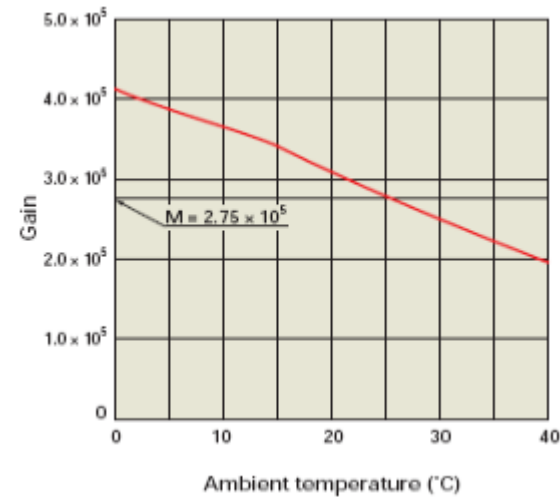
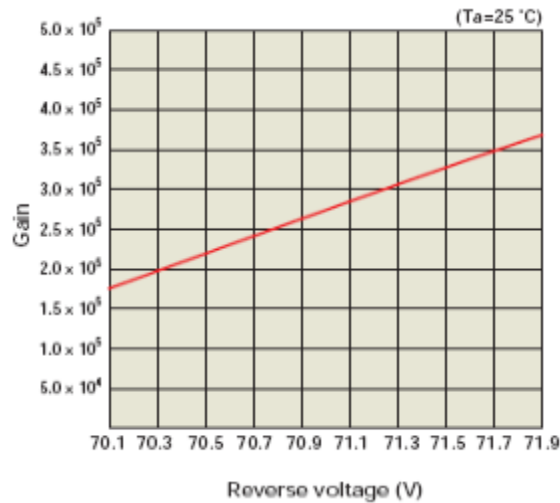
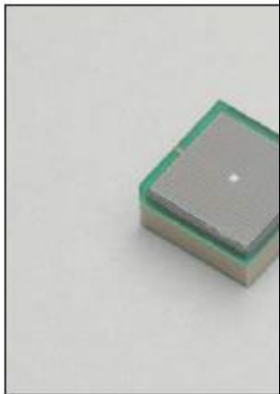


Metal (TE-cooled)



HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

4-side buttabl



Bruit de fond : plusieurs centaines de KHz par mm²

Photodiode & APD

Photodiode & APD

- **QE**: efficacité quantique ($\sim 80\%$ @400nm)
- **N_{photons}** : nb de photons arrivant sur la photodiode
- **G**: Gain de la photodiode (G=1 pour photodiode et G>1 pour APD)
- **q_e** : $1,6 \times 10^{-19}$ C

Charge en sortie de photodiode:

$$Q_{tot} = N_{photons} \cdot QE \cdot G \cdot q_e$$

SiPM

- **PDE**: Photon detection efficiency ($\sim 35\%$ à 75% @ 450nm)
= **QE** \times **Fill_factor** \times **Avalanche probability**

Charge en sortie de SiPM:

$$Q_{tot} = N_{photons} \cdot PDE \cdot G \cdot q_e$$



- Les photodiodes ne sont pas sensibles au champ magnétique

Photomultiplicateur

- **G** Gain: M dynodes, $g_1 \sim 10$, $g_2 \dots g_M \sim 2$ à 3 Gain $\uparrow 10^7$
- **QE**: efficacité quantique (20 à 40% @ 400nm)
- **CE**: efficacité de collection 1ere dynode > 80%
- **N_{photons}** : nb de photons arrivant sur la photocathode
- **q_e**: $1,6 \times 10^{-19}$ C

$$G = \prod_{i=1}^M g_i$$

Charge en sortie de photomultiplicateur:

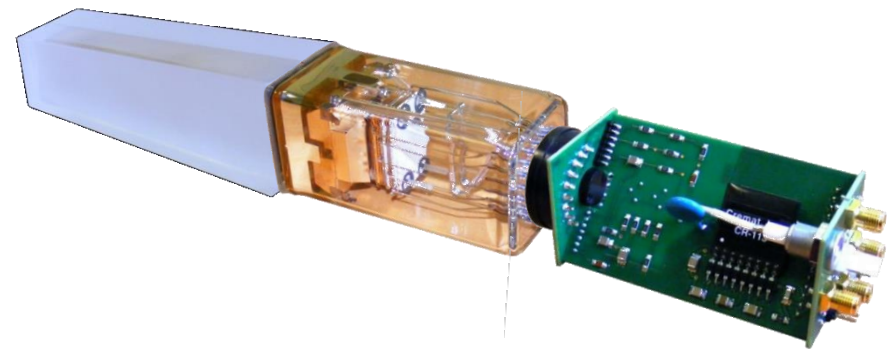
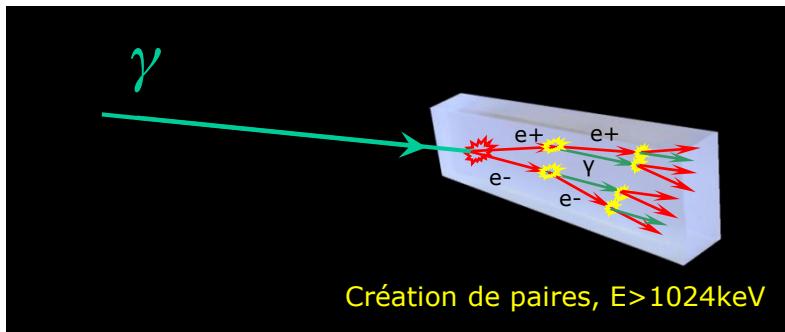
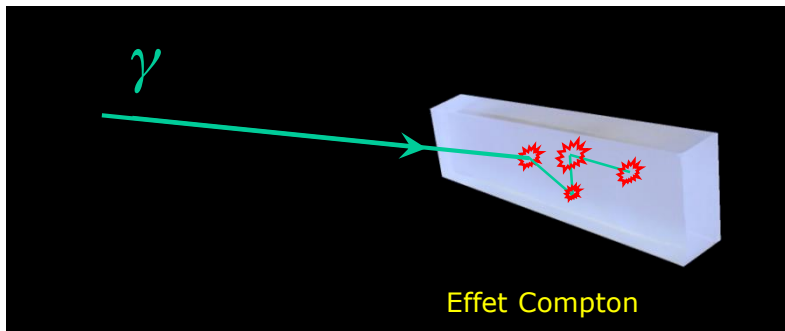
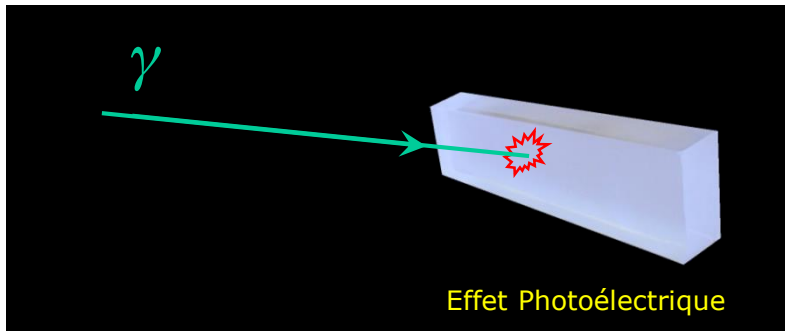
$$Q_{tot} = N_{photons} \cdot QE \cdot CE \cdot G \cdot q_e$$



- Les photomultiplicateurs sont sensibles au champ magnétique, **même au champ magnétique terrestre** (qqes Gauss) -> blindage

VII – Réponse d'un détecteur aux photons en fonction de la taille

Les interactions en jeu



Scintillateurs

Coefficients d'atténuation linéaires comparés

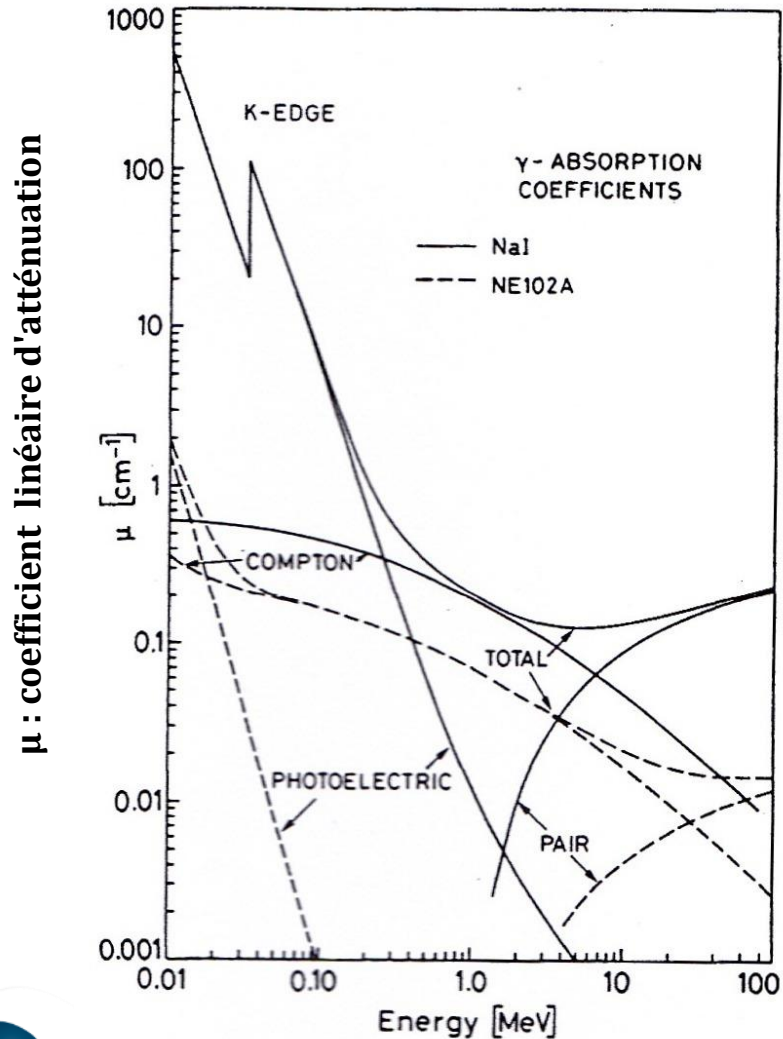
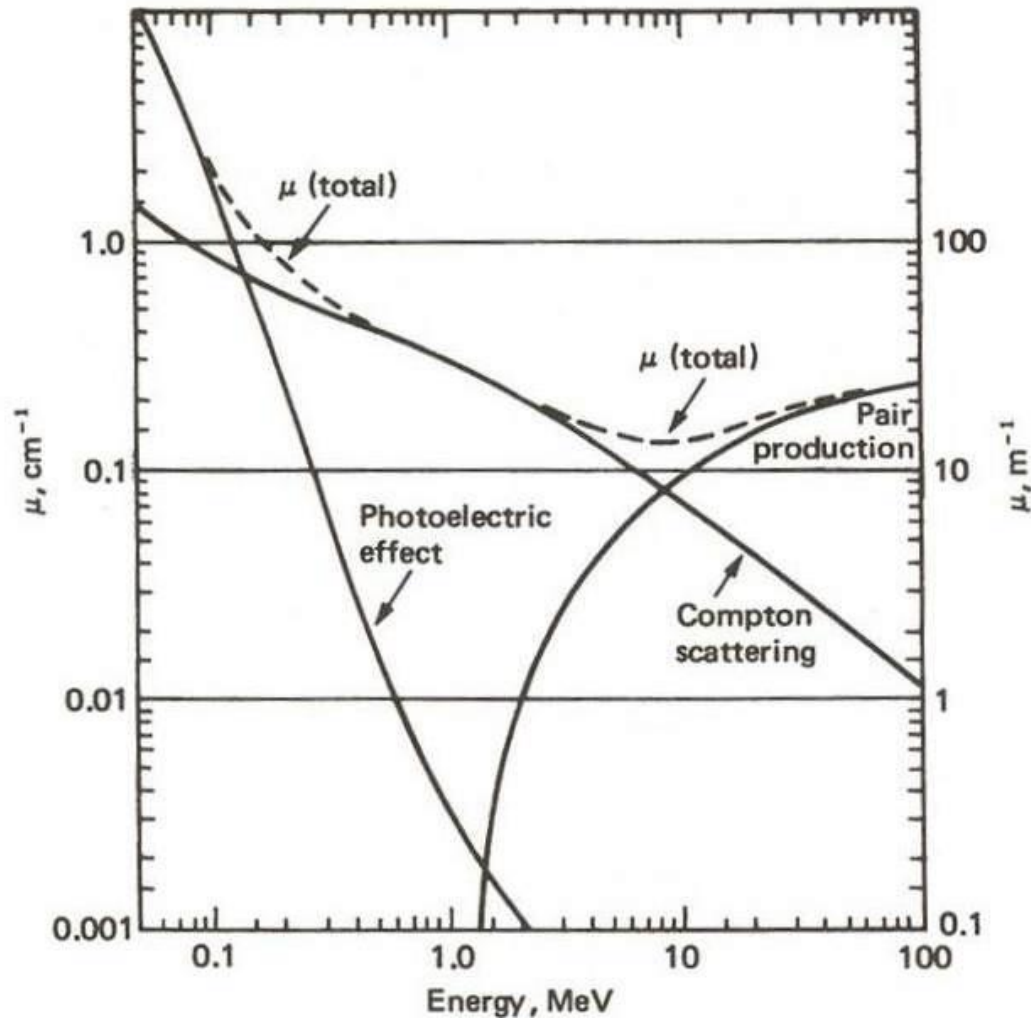


Fig. 7.13. Gamma-ray absorption coefficients for NaI and NE102A plastic scintillator. Note the difference in the relative magnitudes of the photoelectric and Compton cross sections

Détecteurs au Germanium

Détection de photons

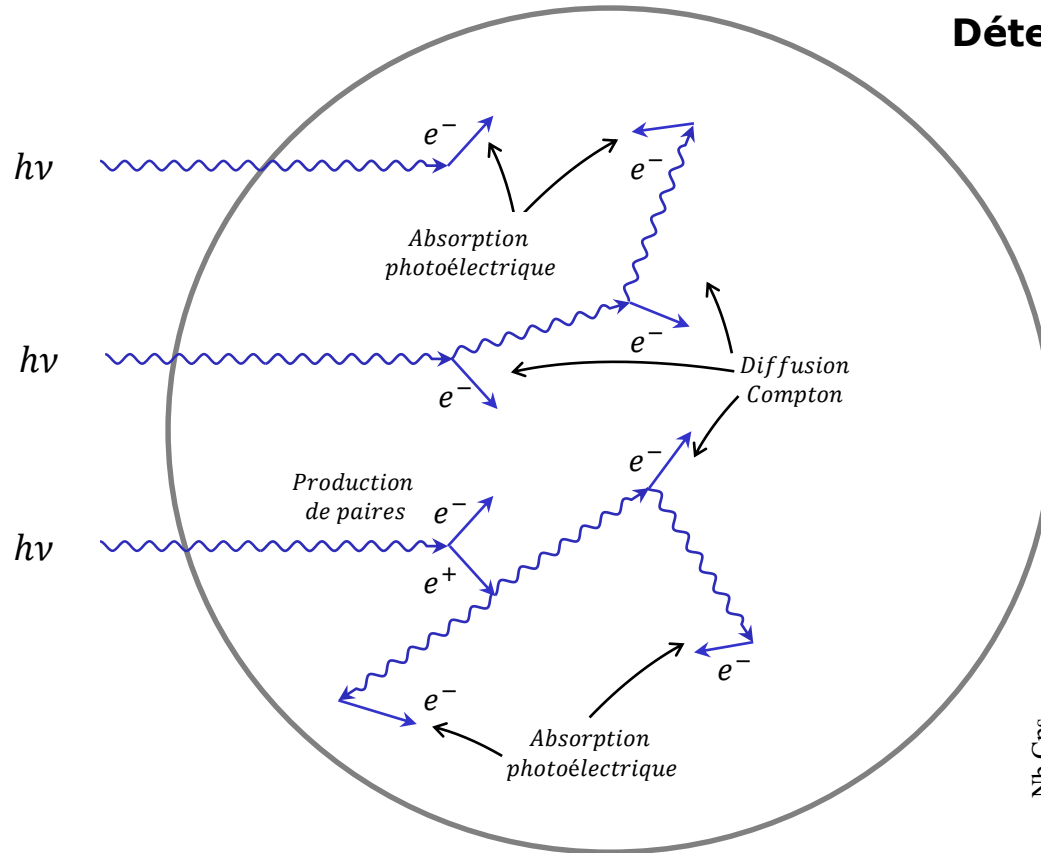
Coefficients d'atténuation dans le Germanium



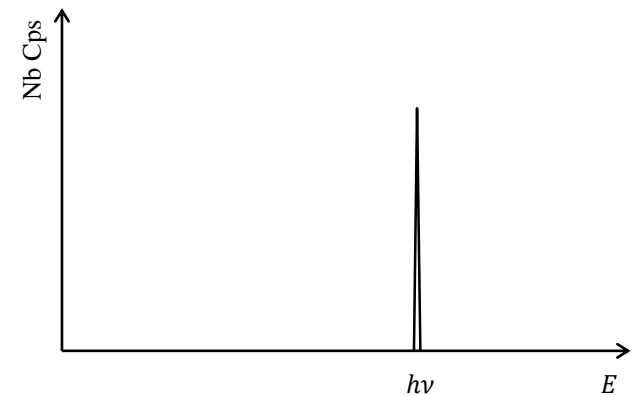
Détecteurs

Détection de photons

Détecteurs de grand volume



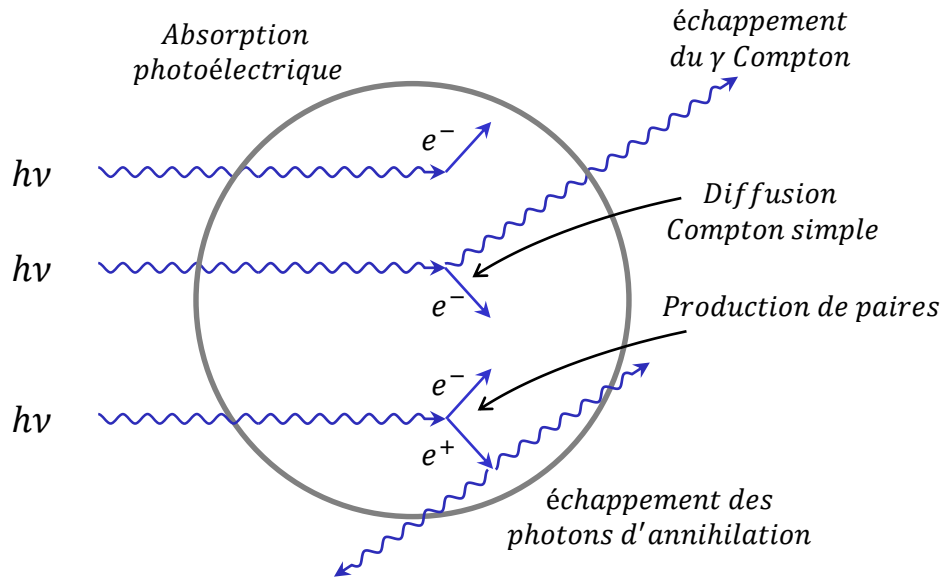
Spectre en énergie



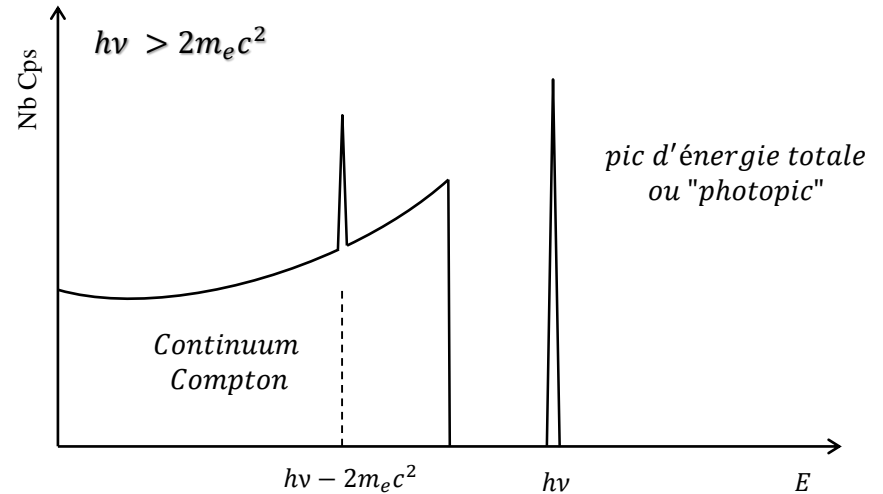
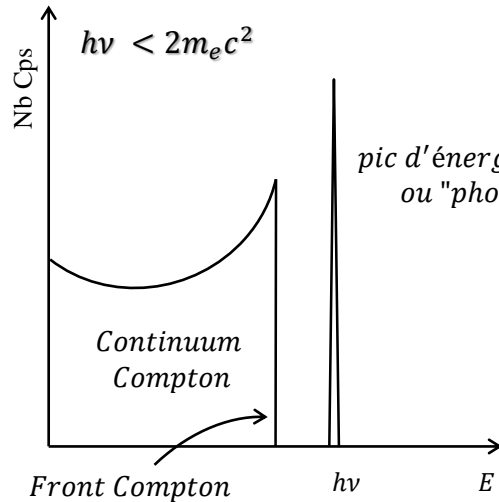
Détecteurs

Détection de photons

Détecteurs de petit volume



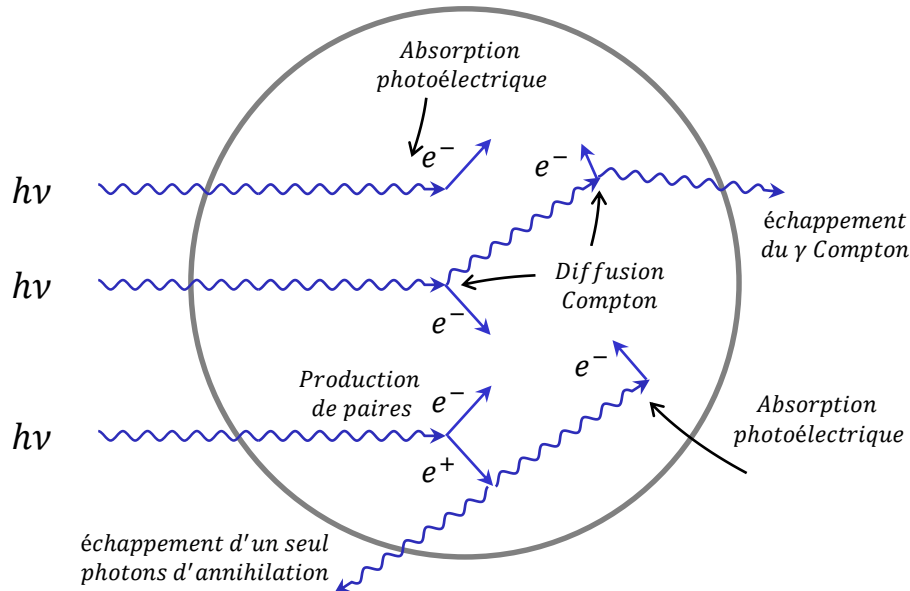
Spectres en énergie



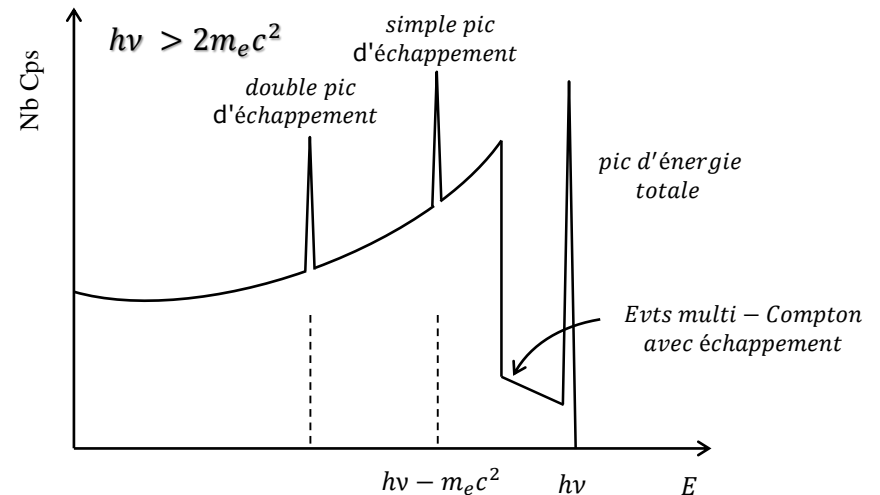
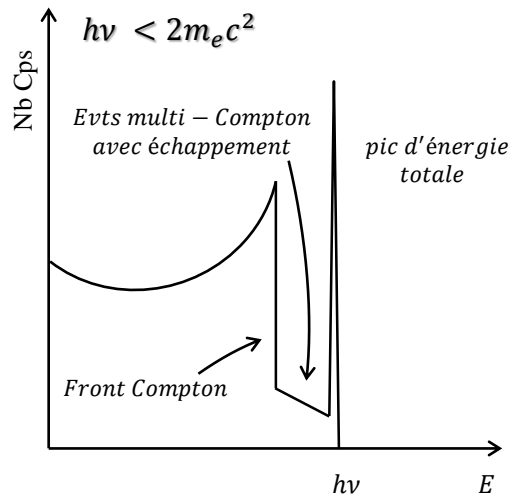
Détecteurs

Détection de photons

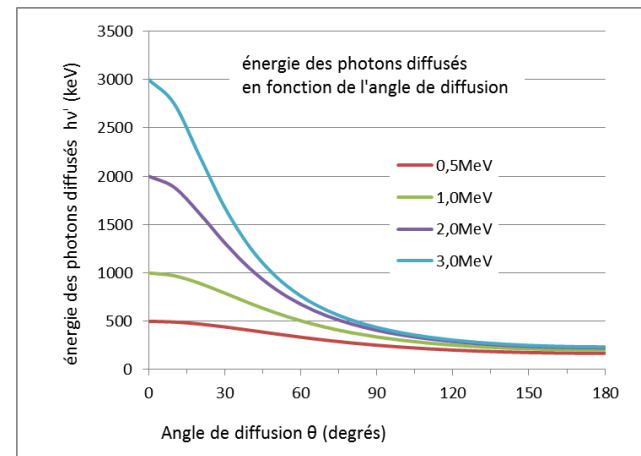
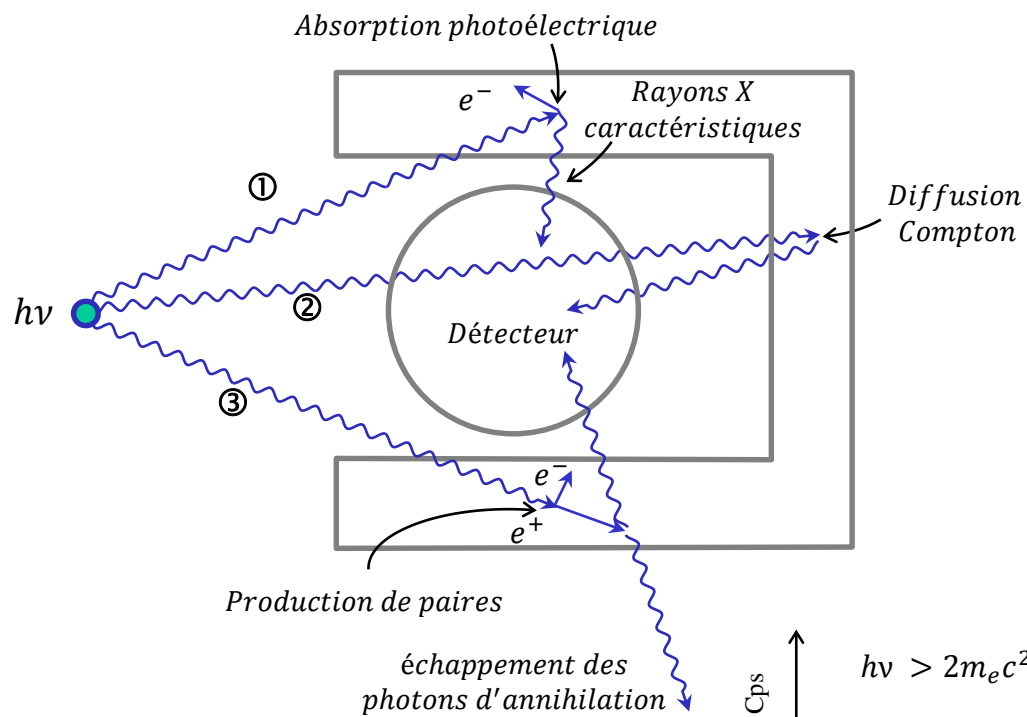
Détecteurs de volume intermédiaire



Spectres en énergie



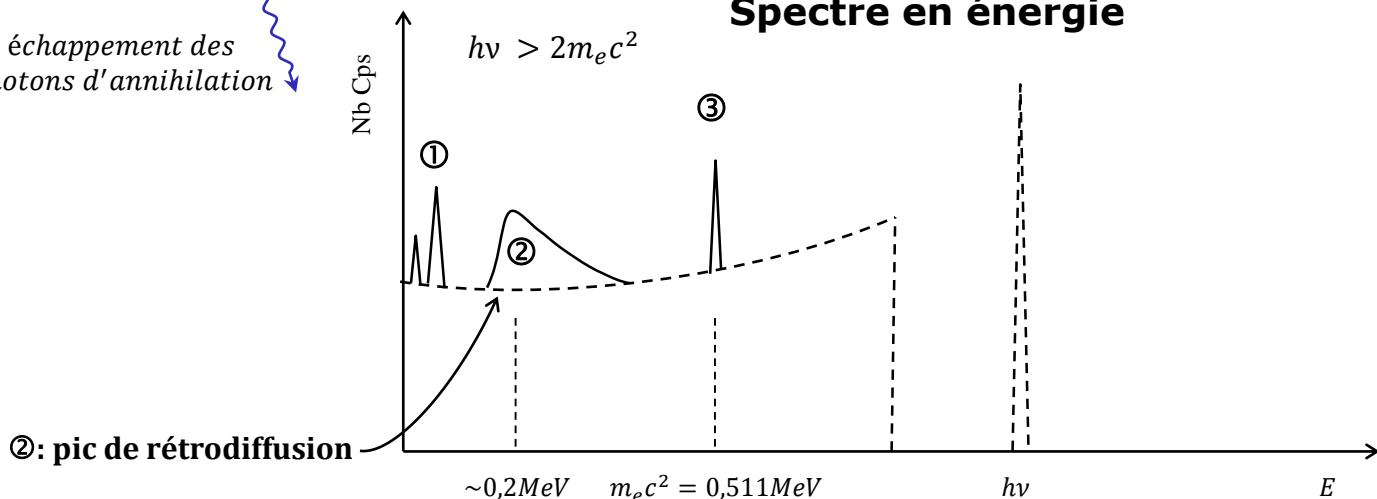
Effet des matériaux environnants



Production de paires

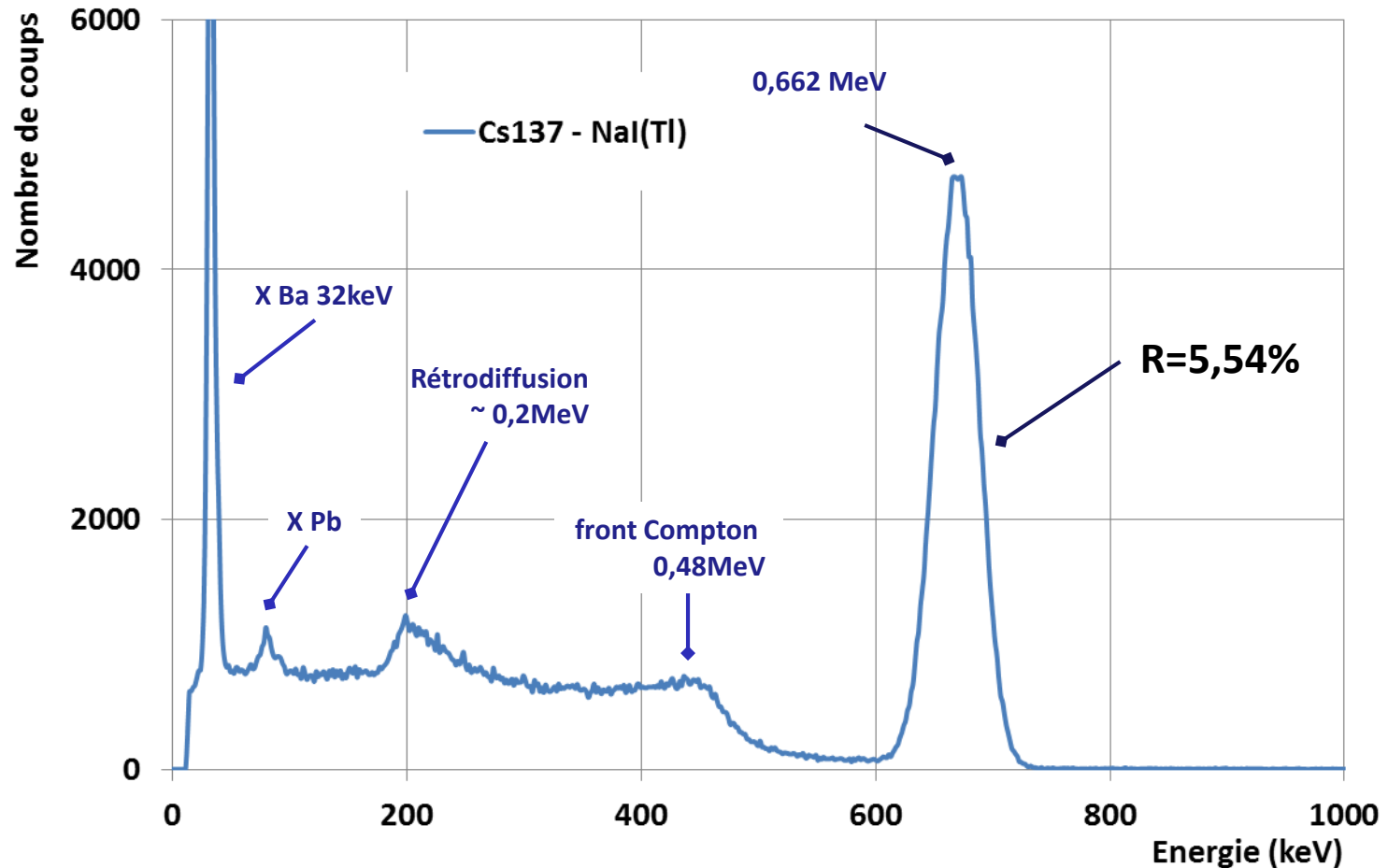
échappement des photons d'annihilation

Spectre en énergie

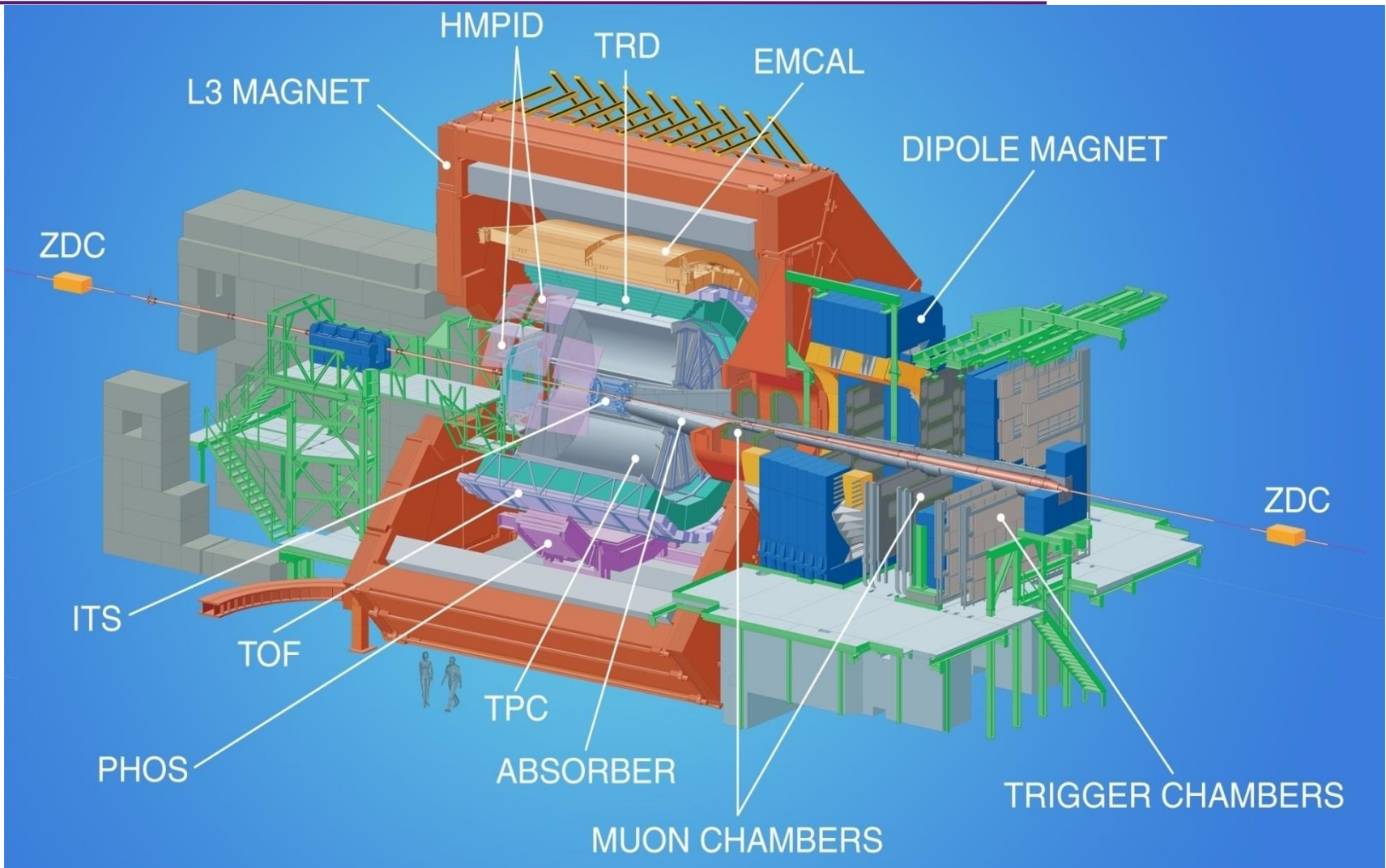


Pic du ^{137}Cs à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



Le détecteur ALICE



16m x 26m ; 10.000 tonnes

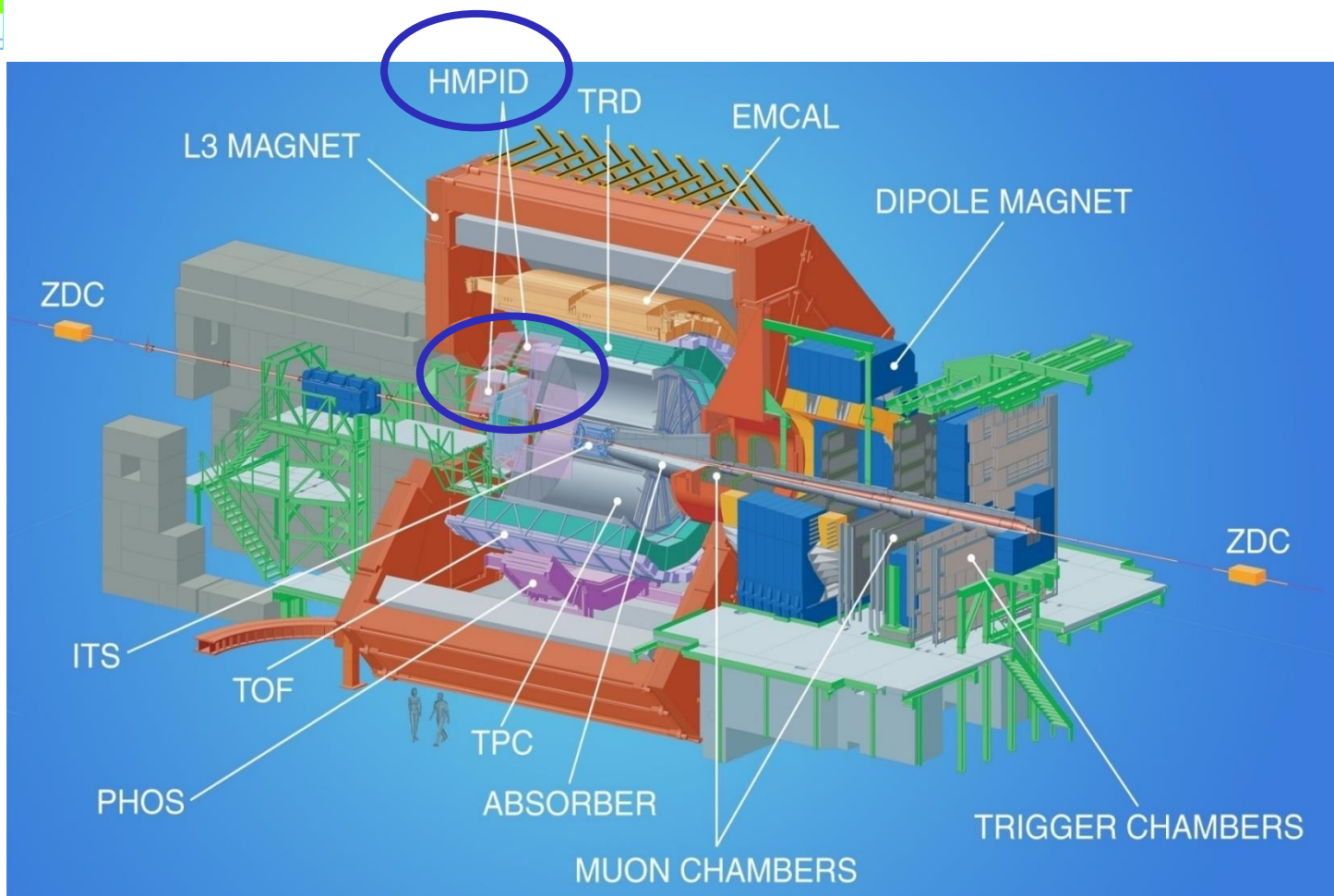


dépasser les frontières

Jean Peyré

P.66

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2019



Le détecteur RICH d'ALICE

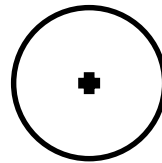
ALICE HMPID

- Le HMPID d'ALICE au LHC (High Momentum Particle Identification) est composé de 7 détecteurs identiques de type RICH (Ring Imaging Cherenkov) de $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$ de surface chacun. Ce sera le plus grand détecteur de ce type utilisant des éléments photosensibles au CsI.
- Un compteur RICH se compose de deux éléments principaux: le "**radiateur**" où une faible lumière, appelée rayonnement Cherenkov, est produite par les particules chargées se déplacent plus vite que la lumière à travers le milieu du radiateur, et la "**détecteur de photons**", où cette lumière est convertie en un signal électrique. Le rayonnement Cherenkov est émis à un angle proportionnel à la vitesse des particules, tout autour de la trajectoire de particules, formant ainsi un "cône" de lumière. Par conséquent, lorsque la particule est perpendiculaire au plan du détecteur de photons, l'image détectée qui en résulte est un cercle.

<http://alice-hmpid.web.cern.ch/alice-hmpid/>

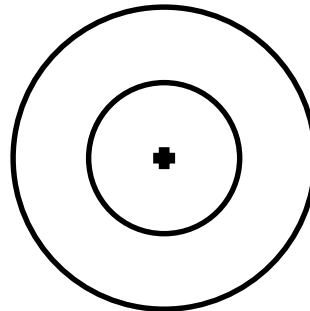
Détecteurs Cherenkov

$$v = 0$$



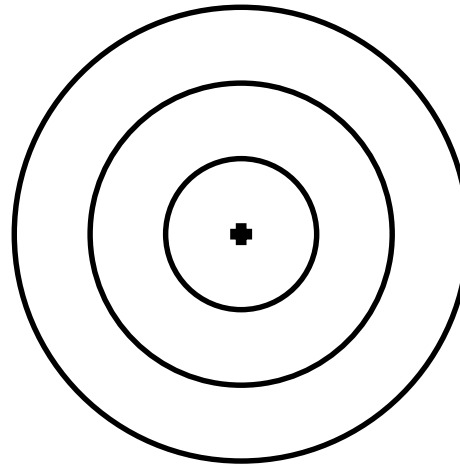
Détecteurs Cherenkov

$$v = 0$$



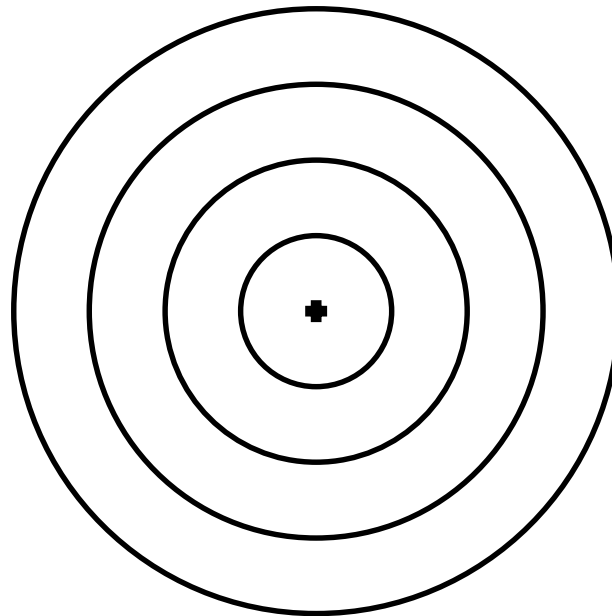
Détecteurs Cherenkov

$$v = 0$$



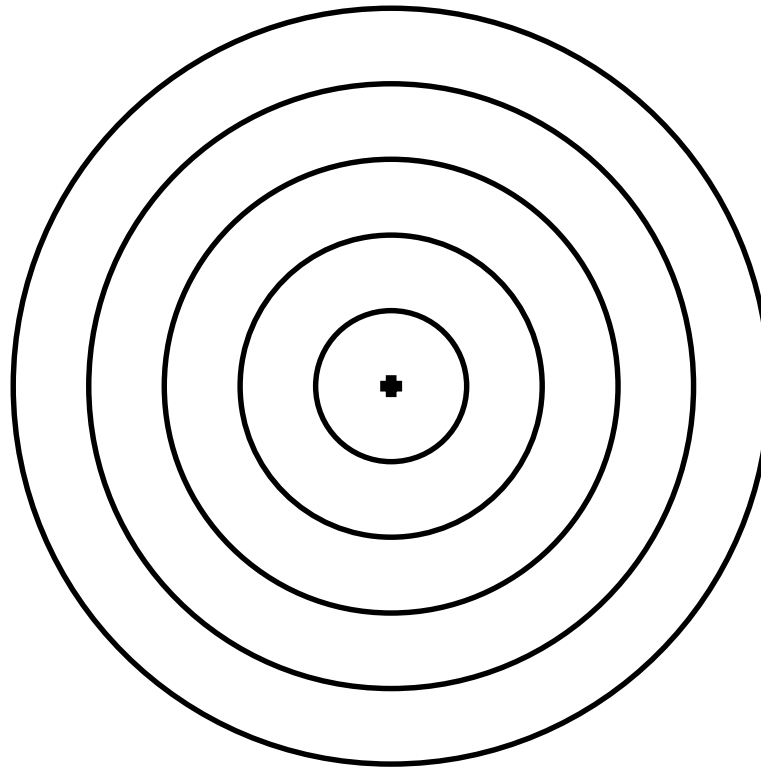
Détecteurs Cherenkov

$$v = 0$$



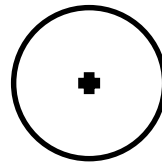
Détecteurs Cherenkov

$$v = 0$$



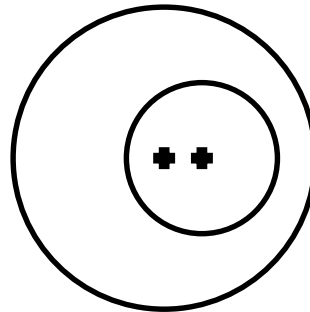
Détecteurs Cherenkov

$$v < \frac{c}{n}$$



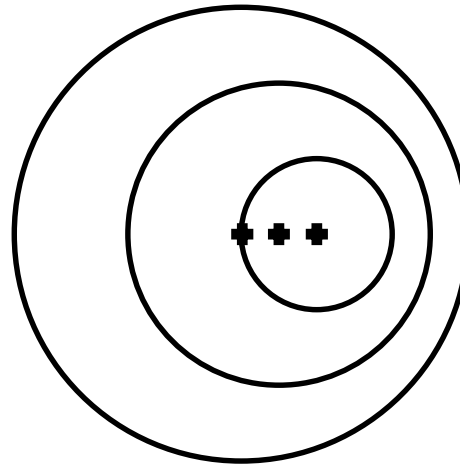
Détecteurs Cherenkov

$$v < \frac{c}{n}$$



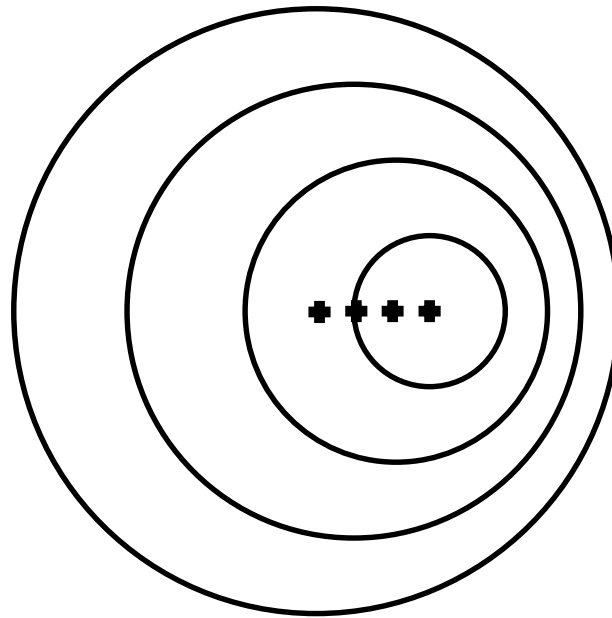
Détecteurs Cherenkov

$$v < \frac{c}{n}$$



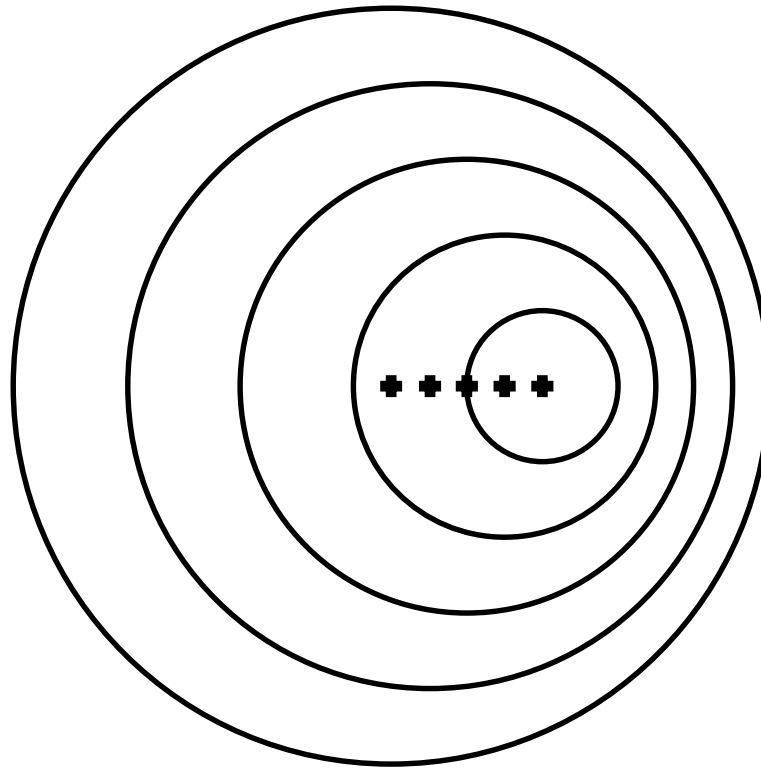
Détecteurs Cherenkov

$$v < \frac{c}{n}$$



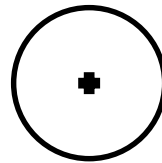
Détecteurs Cherenkov

$$v < \frac{c}{n}$$



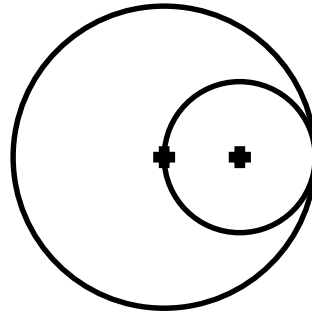
Détecteurs Cherenkov

$$v = \frac{c}{n}$$



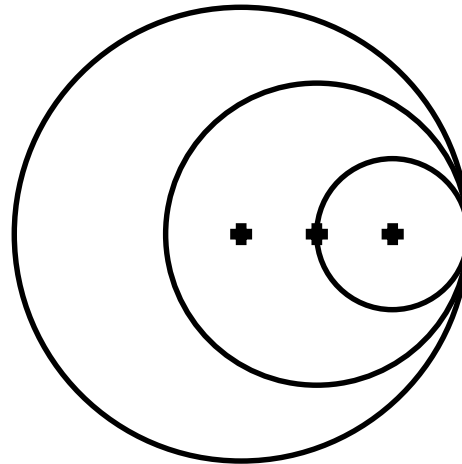
Détecteurs Cherenkov

$$v = \frac{c}{n}$$



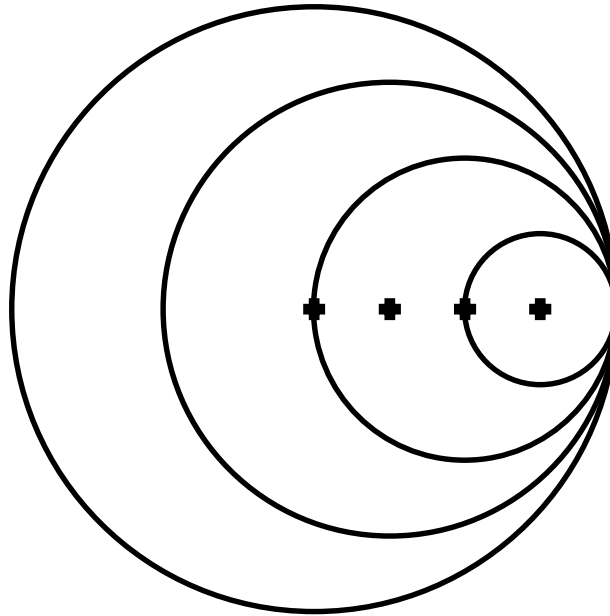
Détecteurs Cherenkov

$$v = \frac{c}{n}$$



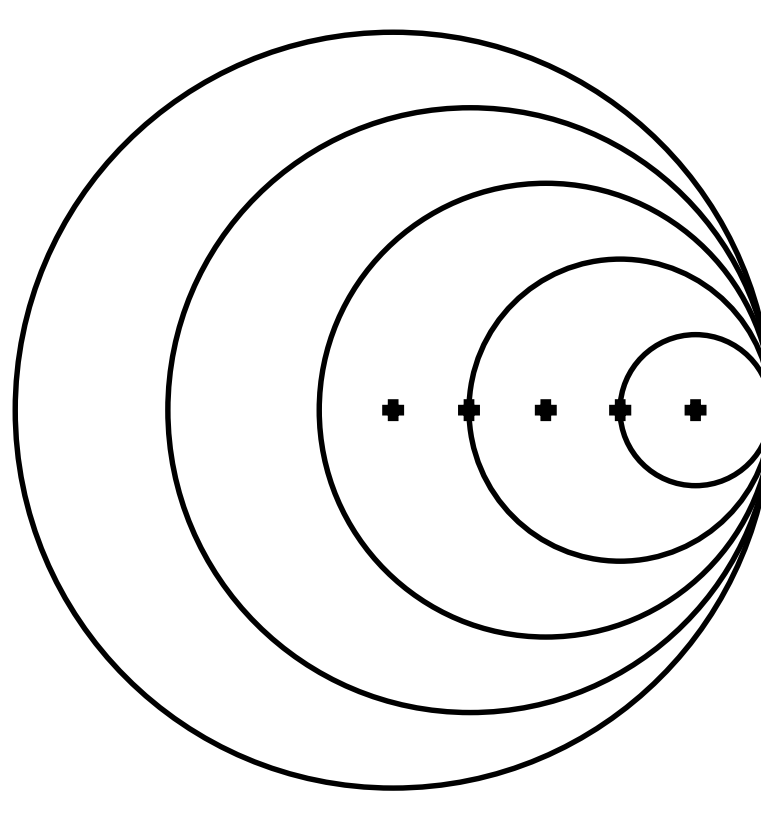
Détecteurs Cherenkov

$$v = \frac{c}{n}$$



Détecteurs Cherenkov

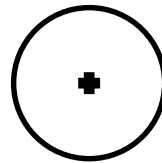
$$v = \frac{c}{n}$$



**Flash de lumière
Comparable au
passage du mur
du son**

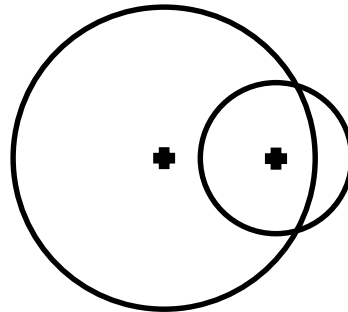
Détecteurs Cherenkov

$$v > \frac{c}{n}$$



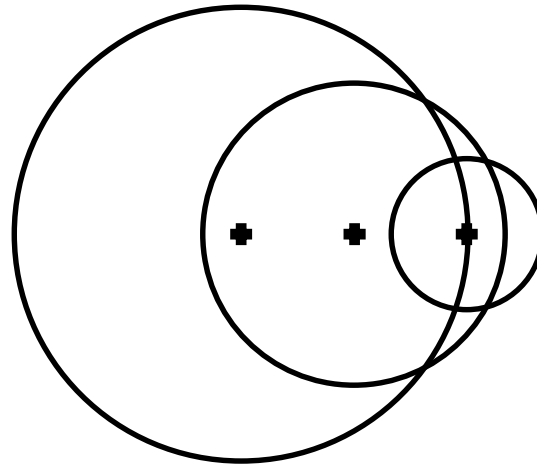
Détecteurs Cherenkov

$$v > \frac{c}{n}$$



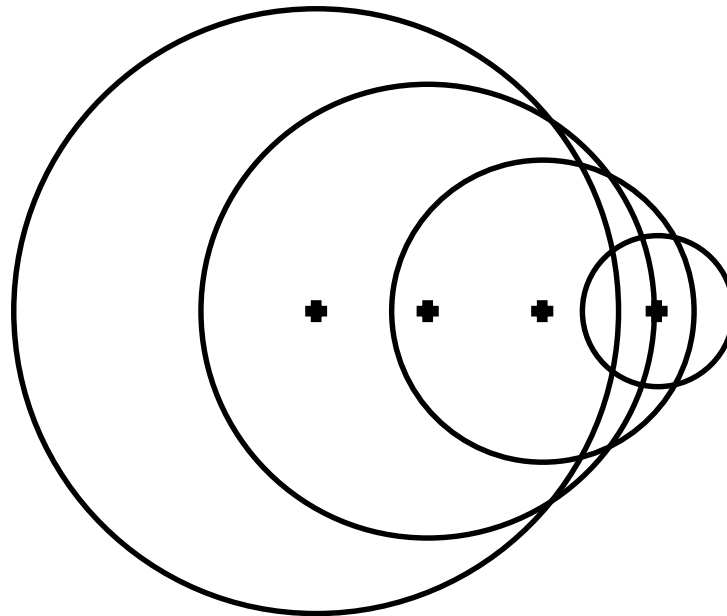
Détecteurs Cherenkov

$$v > \frac{c}{n}$$

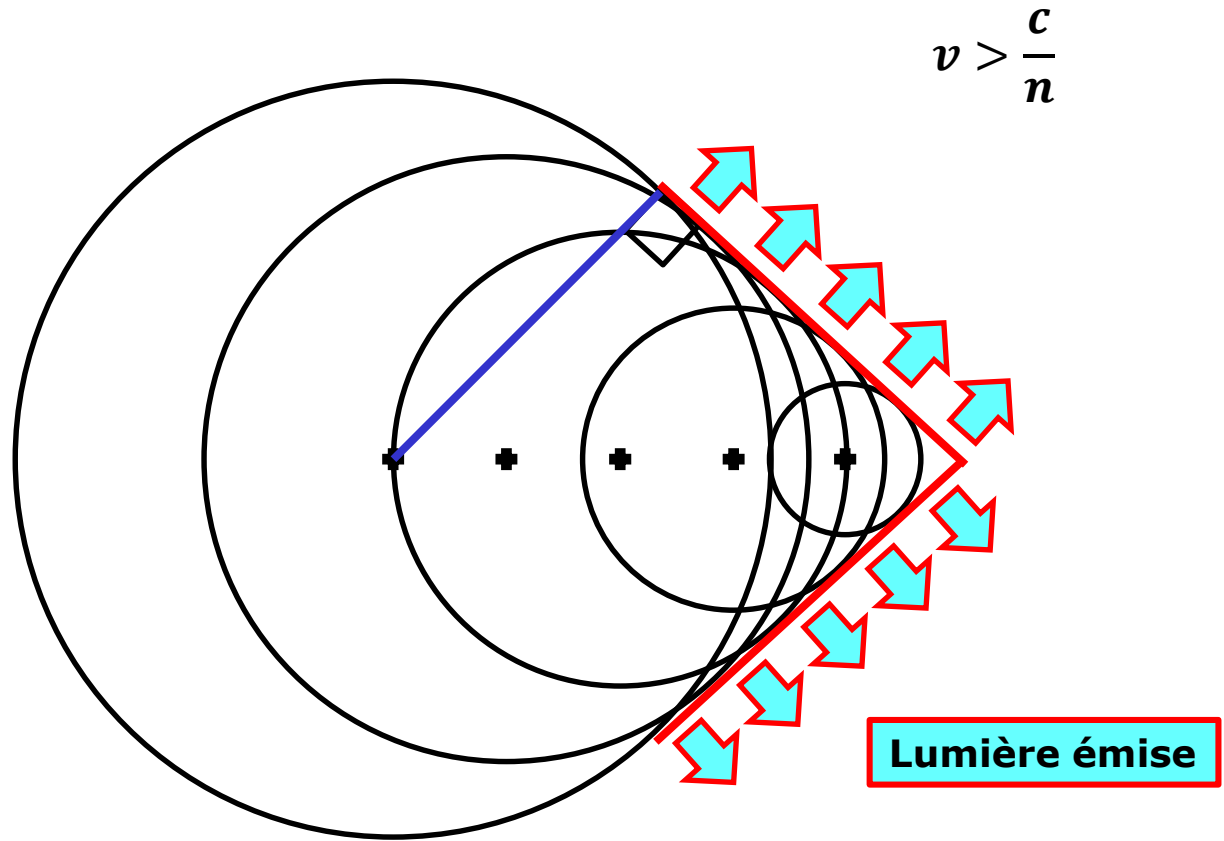


Détecteurs Cherenkov

$$v > \frac{c}{n}$$

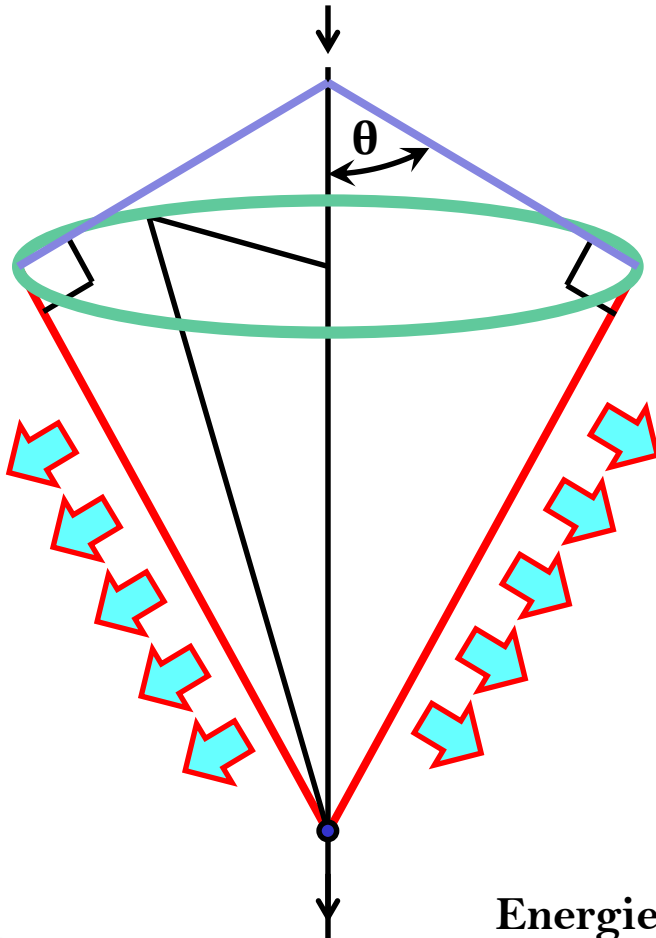


Détecteurs Cherenkov



Détecteurs Cherenkov

Cône de lumière Cherenkov



$$\beta n > 1 \quad \text{soit} \quad v > \frac{c}{n}$$

$\beta = \frac{v}{c}$: rapport de la vitesse de la particule dans le milieu (v) sur celle de la lumière dans le vide (c)
 n : indice de réfraction du milieu

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$$

$$E_c = E_t - E_0 = (\gamma - 1)mc^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right) mc^2$$

$$E_{cMIN} = mc^2 \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right)$$

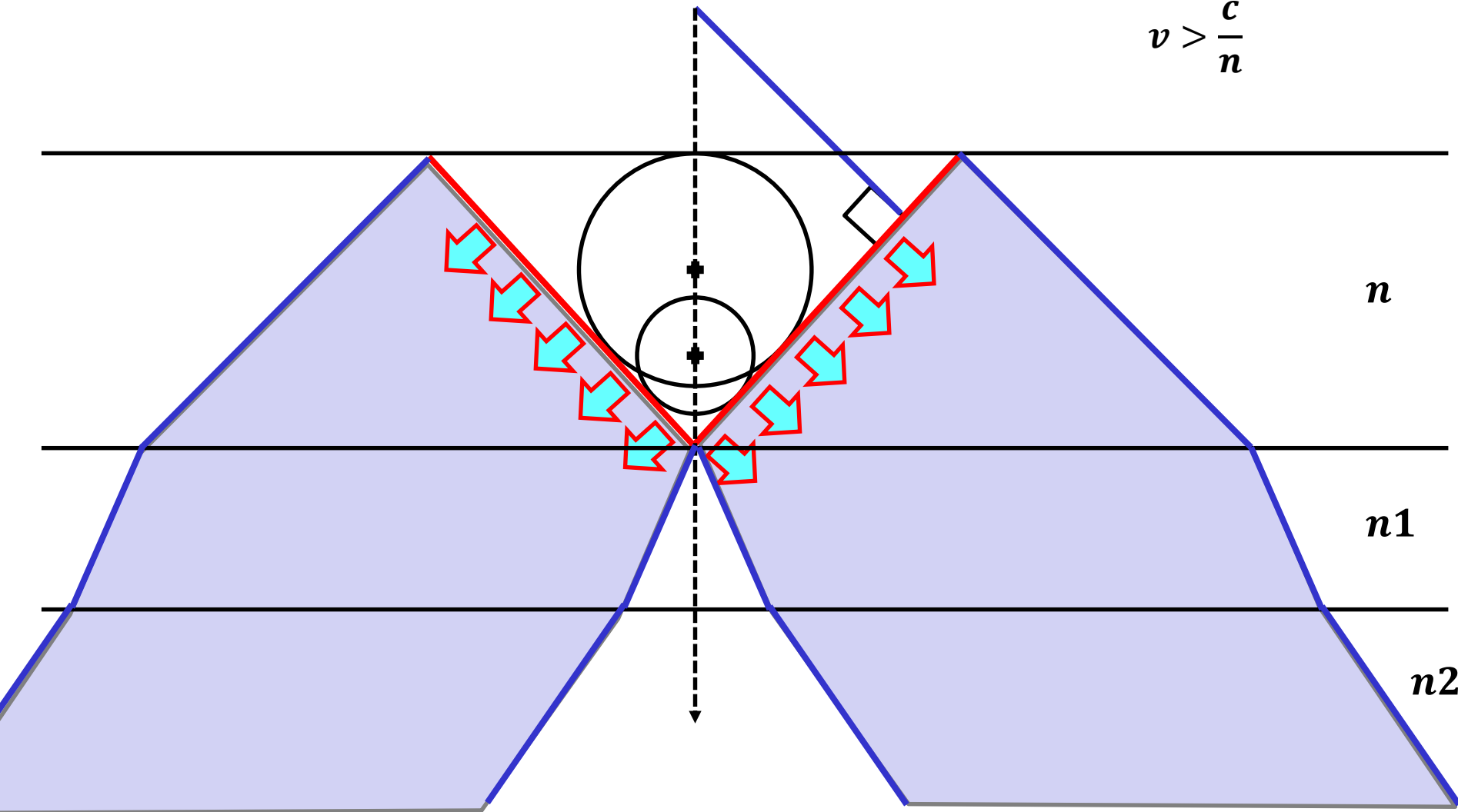
$$m_0c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

$$m_0c^2 = 938 \text{ MeV}$$

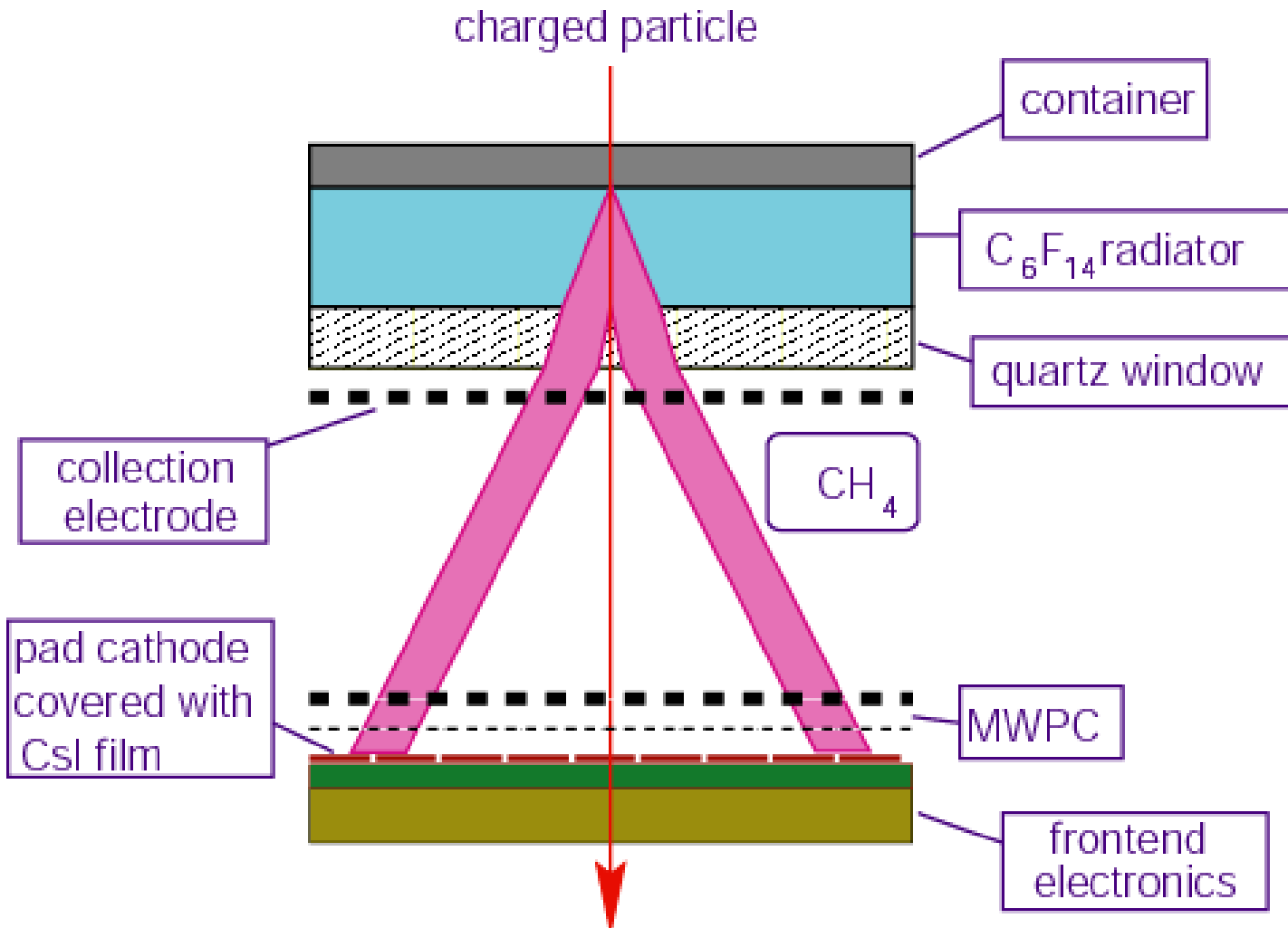
Energie minimale pour un électron dans l'eau $n=1,33$
 $E_{cMIN} = 264 \text{ keV}$ pour un proton $E_{cMIN} = 485 \text{ MeV}$

Détecteurs Cherenkov

$$v > \frac{c}{n}$$



ALICE HMPID

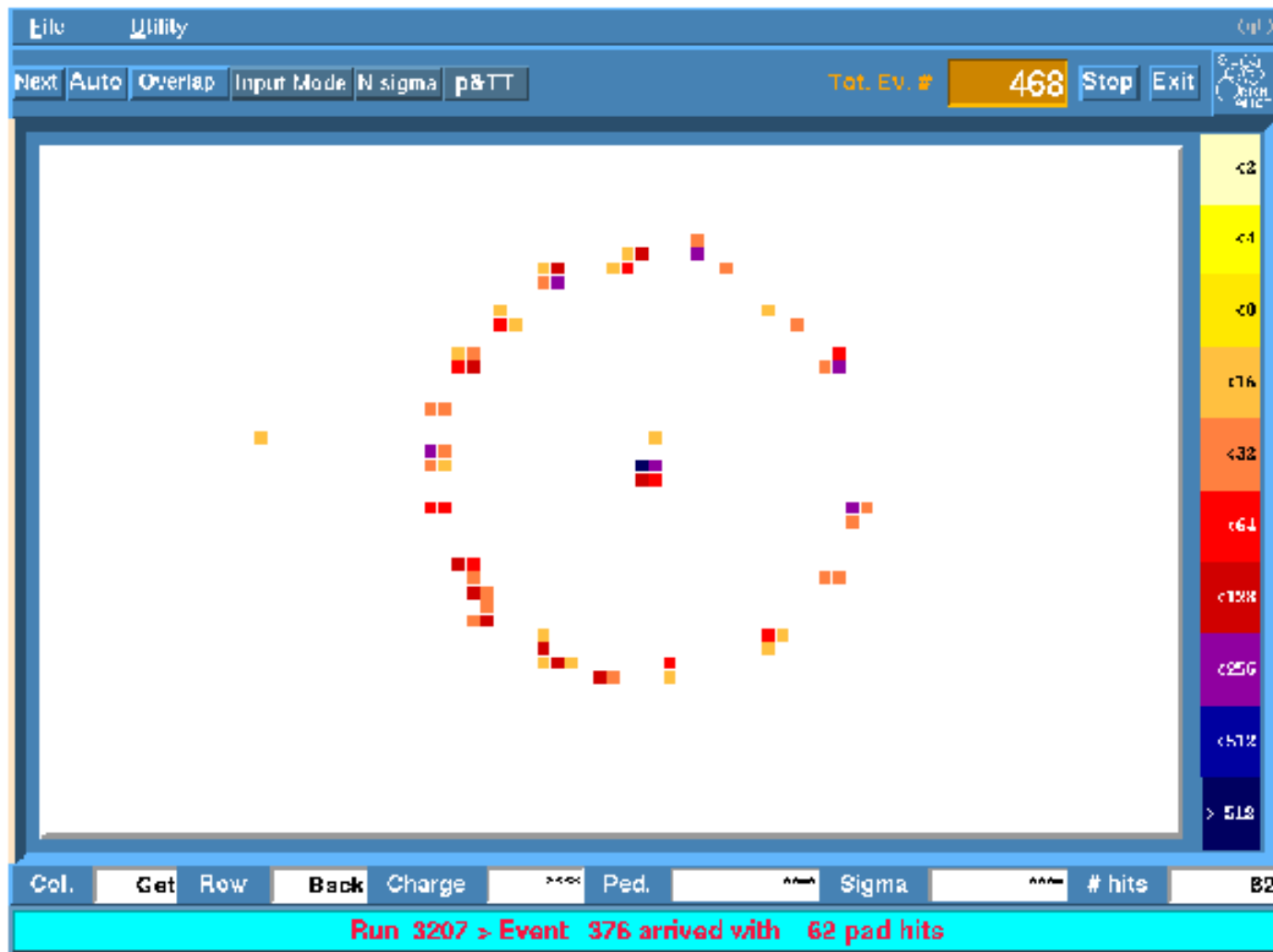


<http://alice-hmpid.web.cern.ch/alice-hmpid/>

ALICE HMPID

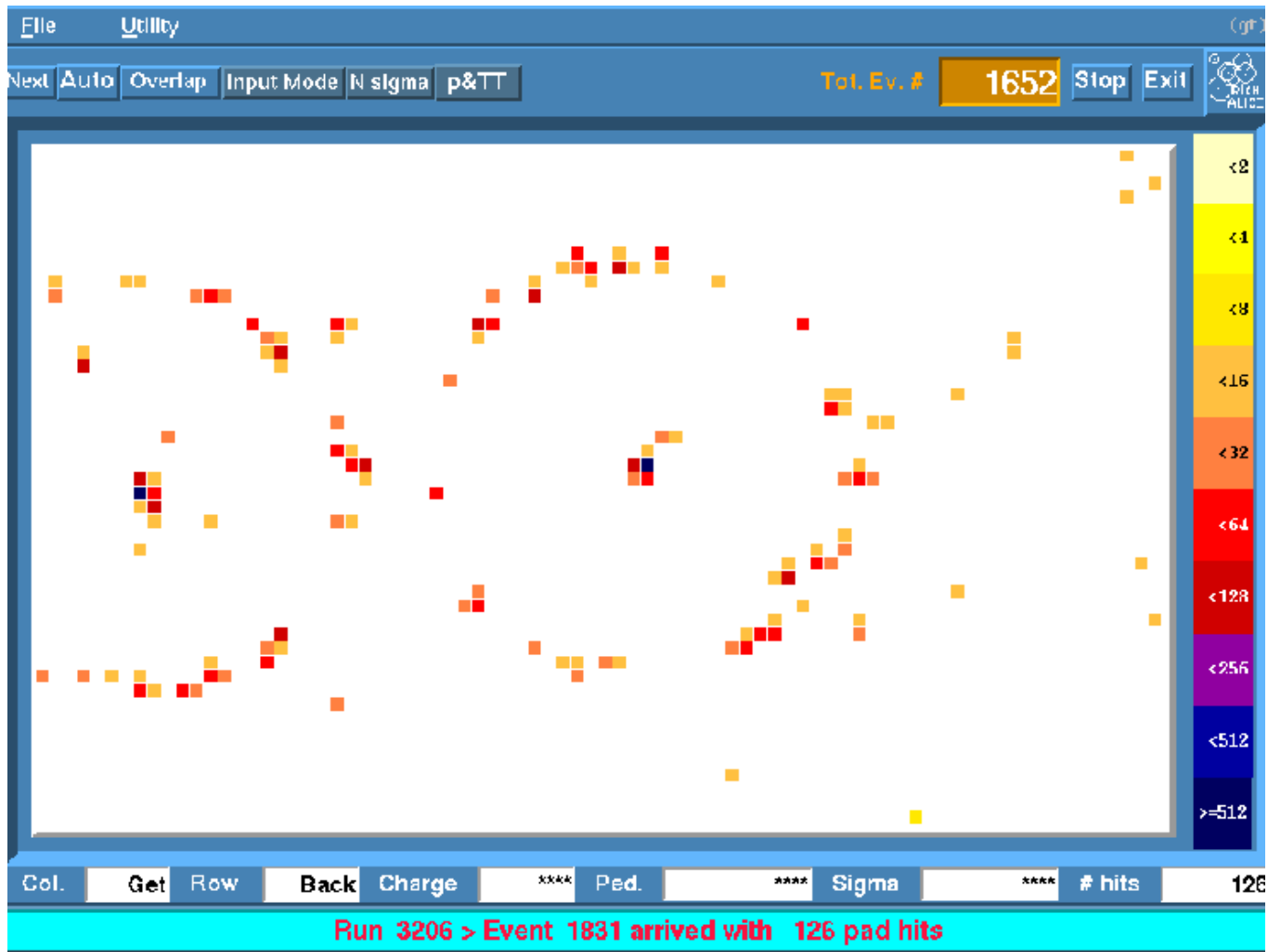
- Les cônes de lumière sont visualisés en convertissant le rayonnement Cherenkov au moyen d'un détecteur gazeux employant des centaines de fils très fins (Chambre multi-fils proportionnelle) et une matière photosensible: un film mince d'iodure de césium (CsI) déposé sur une électrode plane segmenté en plaques.
- Le film de CsI convertit les photons Cherenkov en photoélectrons; à son tour, la chambre à fils détecte ces photoélectrons produisant un signal électrique sur les plaques. La chambre à fils se compose d'un plan de fils de diamètre 20 μm (avec un pas de 4mm) et deux plans de fils de diamètre 100 μm (avec un pas de 2 et 4 mm respectivement).

ALICE HMPID



<http://alice-hmpid.web.cern.ch/alice-hmpid/>

ALICE HMPID



<http://alice-hmpid.web.cern.ch/alice-hmpid/>