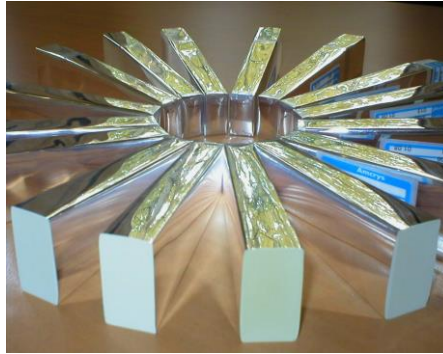


Scintillateurs & détecteurs de lumière



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>



Jean.Peyre@csnsm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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 – Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur



Jean Peyré

P.2

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

I - Introduction

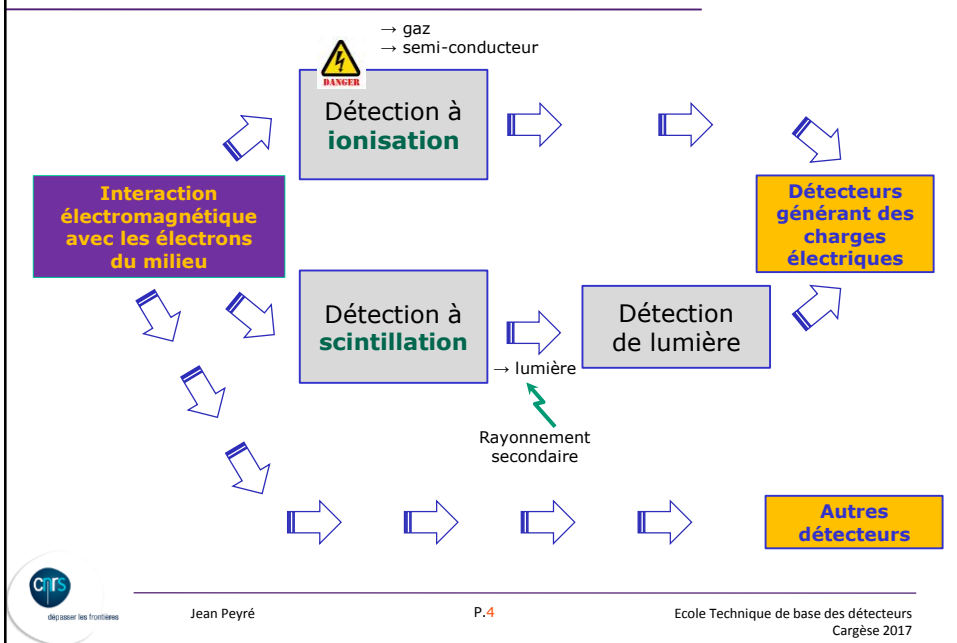


Jean Peyré

P.3

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Ionisation & scintillation



Jean Peyré

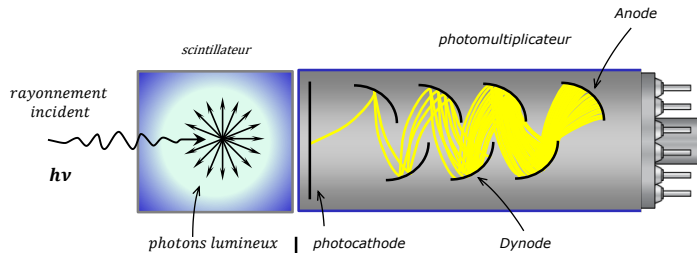
P.4

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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



Jean Peyré

P.5

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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



Jean Peyré

P.6

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

II - Les scintillateurs inorganiques



Jean Peyré

P.7

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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.



Jean Peyré

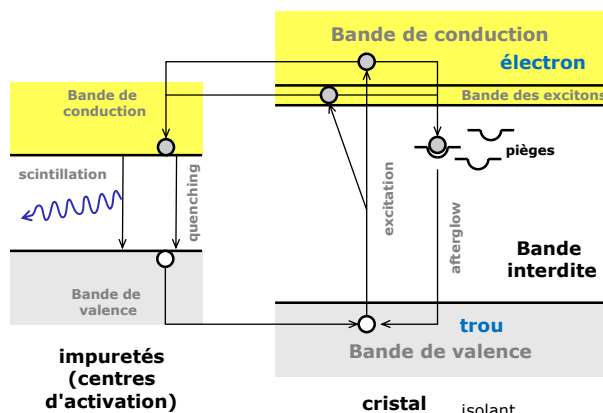
P.8

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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

Jean Peyré

P.9

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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).



Jean Peyré

P.10

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

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

Mécanisme de scintillation

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

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ (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)



Jean Peyré

P.11

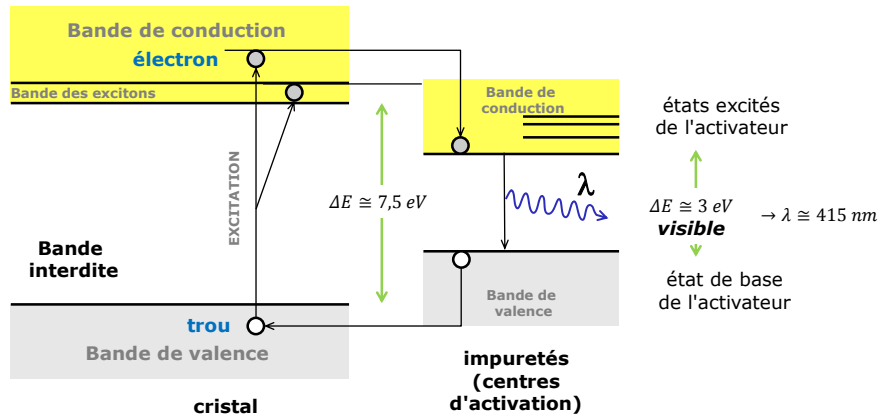
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Mécanisme de scintillation

Exemple du NaI(Tl)

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



Jean Peyré

P.12

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Propriétés principales

Material	Composition & densité	Indice & Longueur d'onde	Constantes de temps	Quantité de lumière	Relative γ -Ray Pulse Height with Bi-alkali PM Tube			
	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission (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
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: NE 102A						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%

With PMT & RC >>



Jean Peyré

P.13

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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) @ 662 keV	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 fast 415	550	420	480	420	420	315	
Fast Decay (ns)	25	25/213	620 fast 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



Jean Peyré

P.14

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Réponses spectrales

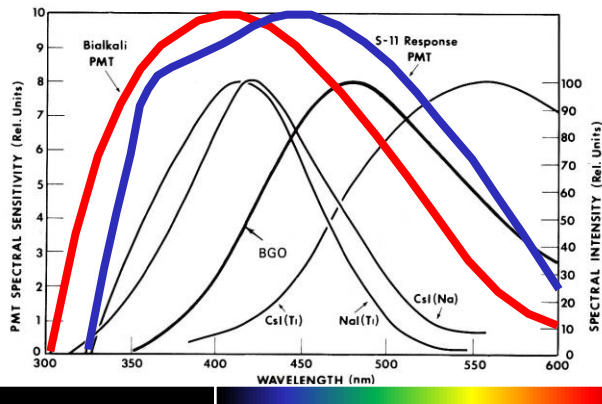


Figure 8-7 The emission spectra of several common inorganic scintillators. Also shown are the response curves for two widely used photocathodes. (Primarily from *Scintillation Phosphor Catalog*, The Harshaw Chemical Company. The emission spectrum for BGO is from Ref. 55.)



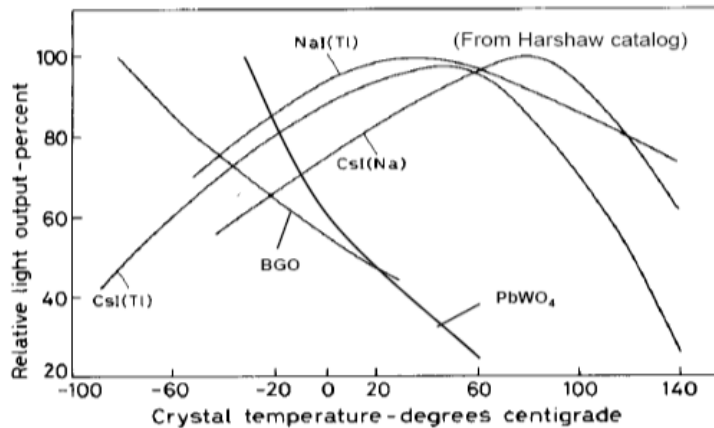
Jean Peyré

P.15

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Variations par rapport à la température



Jean Peyré

P.16

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

III - Les scintillateurs organiques



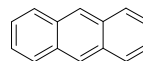
Jean Peyré

P.17

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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 "**orbites 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)

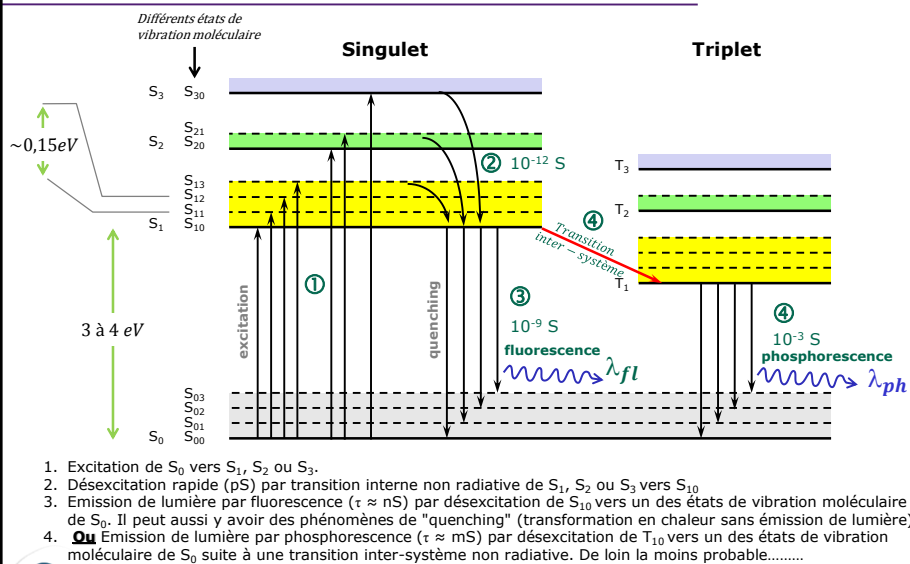


Jean Peyré

P.18

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les scintillateurs organiques



Jean Peyré

P.19

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les scintillateurs organiques

Absorption & émission

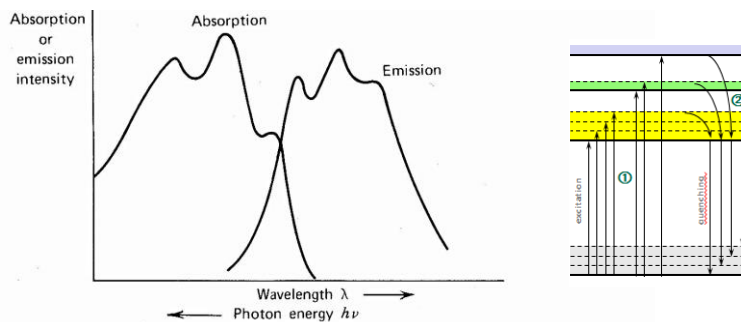


Figure 8-2 The optical absorption and emission spectra for a typical organic scintillator with the level structure shown in Fig. 8-1.



Jean Peyré

P.20

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Propriétés principales

Material	Composition & densité	Indice & Longueur d'onde	Constantes de temps		Quantité de lumière			
	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 Bialkali 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
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator: NE 102A	1.03	423	1.58	0.002	With PMT & RC >>	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%



Jean Peyré

P.21

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs organiques

Propriétés principales - exemples

scintillator	Composition & densité	Indice & Longueur d'onde	Constantes de temps		Quantité de lumière	
	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⁾ Bicron Corporation, Newbury, Ohio, USA



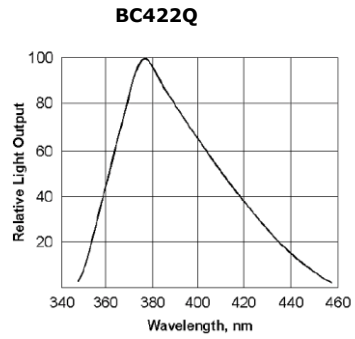
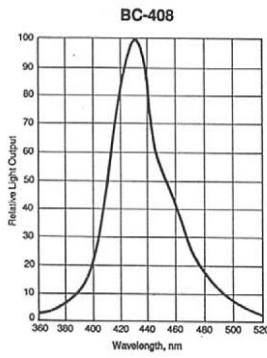
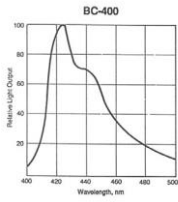
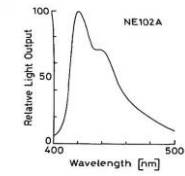
Jean Peyré

P.22

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Réponses spectrales



Jean Peyré

P.23

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

V - Collection de lumière



Jean Peyré

P.24

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Collection de lumière

couplage optique

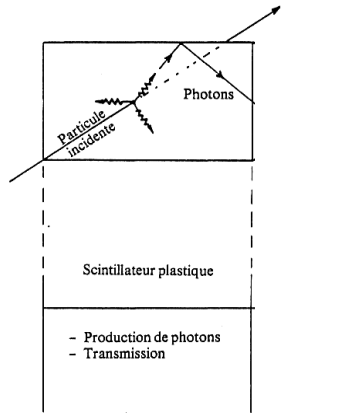


Schéma de fonctionnement d'un compteur à scintillation
D'après technologie des compteurs à scintillation L. Thornhill CERN



Jean Peyré

P.25

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Collection de lumière

couplage optique

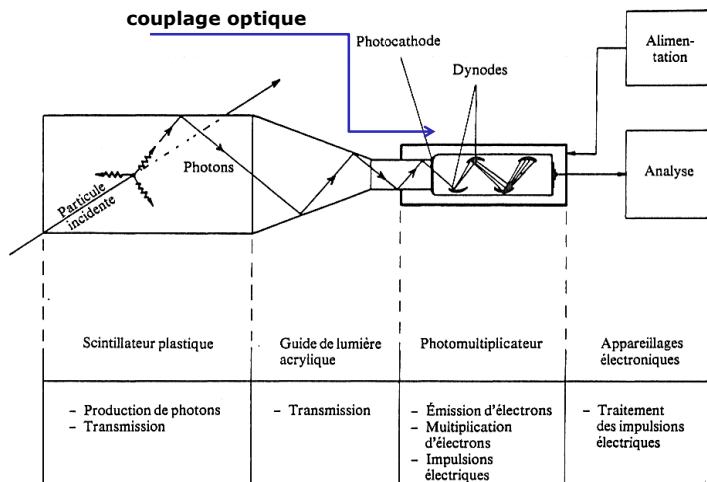


Schéma de fonctionnement d'un compteur à scintillation
D'après technologie des compteurs à scintillation L. Thornhill CERN



Jean Peyré

P.26

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Collection de lumière

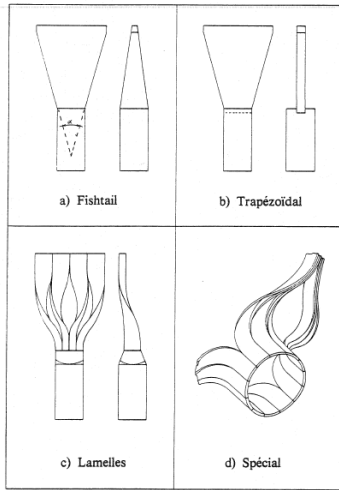


Fig. 6 Principaux types de guides de lumière

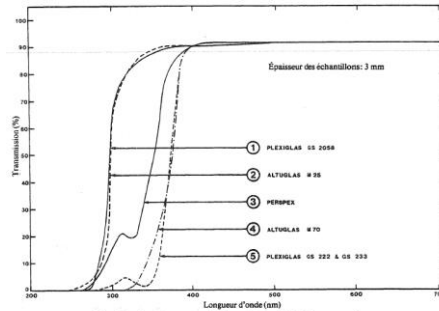


Fig. 3 Courbes spectrales de quelques PMMA commerciaux

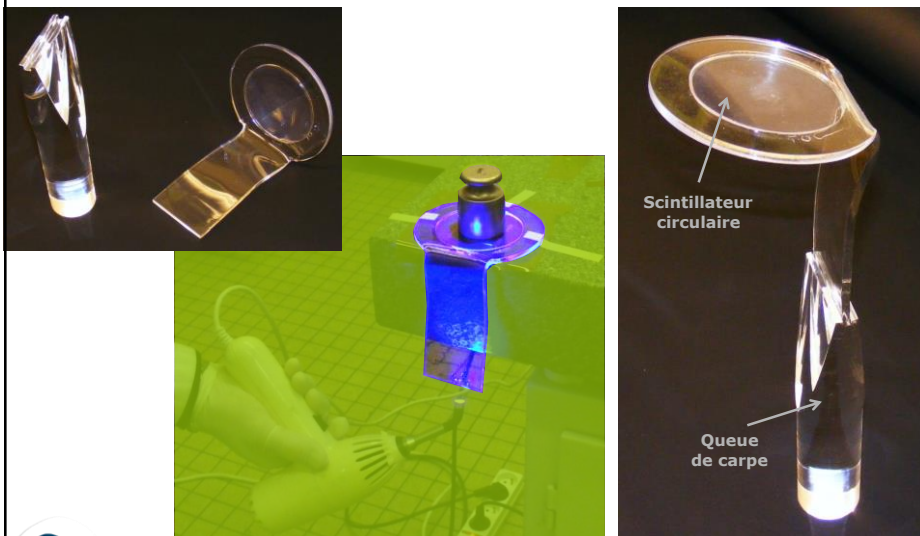


Jean Peyré

P.27

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateur plastique & son guide



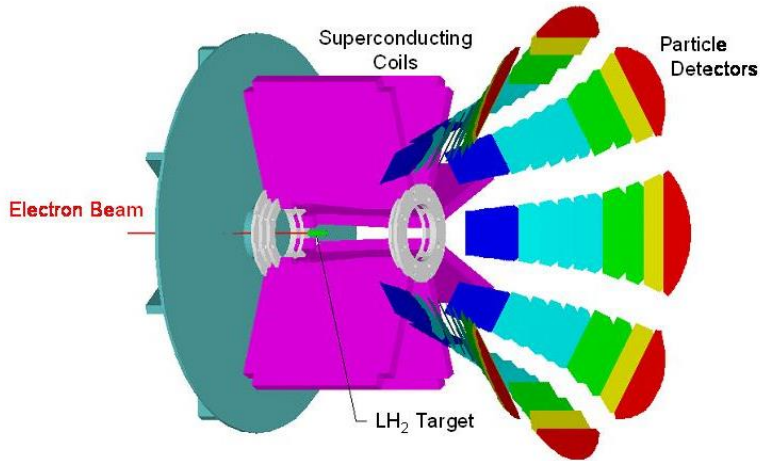
Jean Peyré

P.28

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Collection de lumière

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



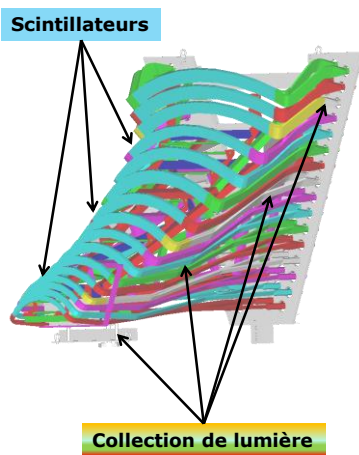
Jean Peyré

P.29

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Collection de lumière

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



**Champ magnétique
(8 secteurs)**

**16 paires
Scintillateur
(BC 408)**



Jean Peyré

P.30

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

VI - Conversion de lumière



Jean Peyré

P.31

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

VI_a - Lecture par Photomultiplicateurs



Jean Peyré

P.32

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photo-détecteurs: Photomultiplicateurs



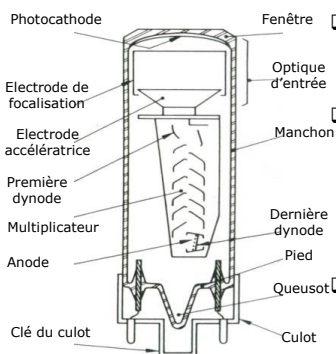
Jean Peyré

P.33

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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.

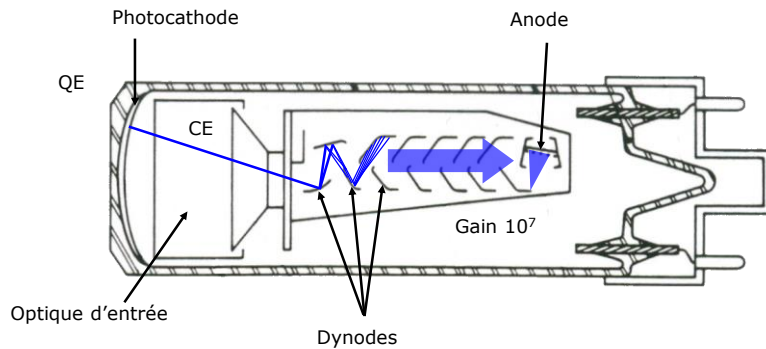


Jean Peyré

P.34

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photomultiplicateur



Jean Peyré

P.35

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photomultiplicateur

- **G** Gain: M dynodes, $g_1 \sim 10$, $g_2 \cdot g_M \sim 2$ 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

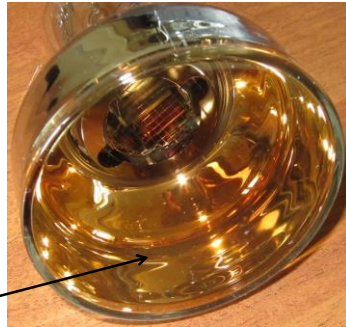


Jean Peyré

P.36

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photomultiplicateur



Fenêtre d'entrée



Jean Peyré

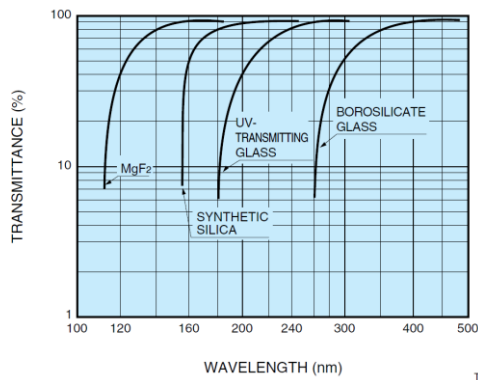
P.37

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photomultiplicateur

Transmission de la fenêtre d'entrée

Documentation Hamamatsu



TPMCB0076EB

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



Jean Peyré

P.38

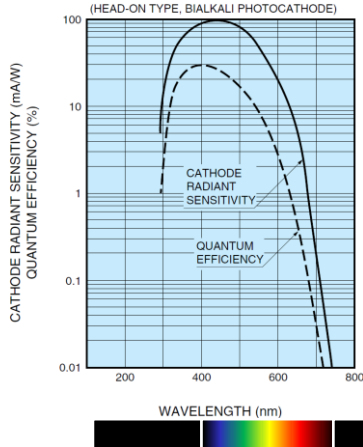
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photomultiplicateur

Réponse spectrale photocathode

Figure 4: Typical Spectral Response of Bialkali Photocathode

Documentation Hamamatsu



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

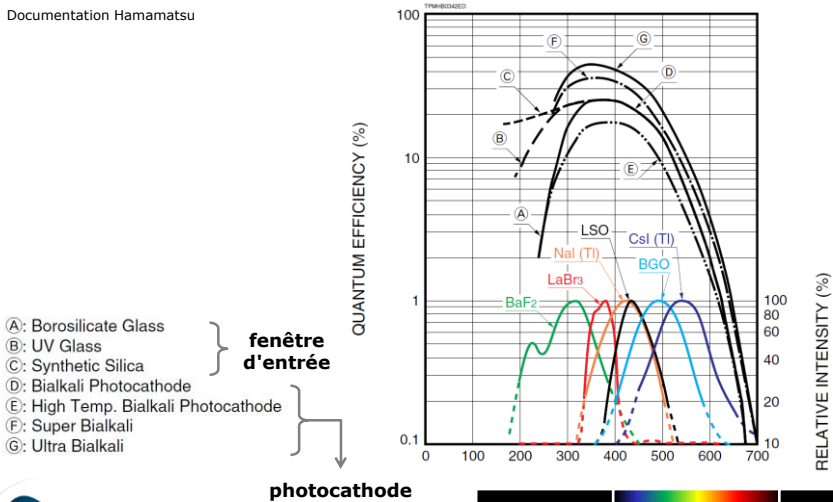
QE: Efficacité Quantique en %
S: sensibilité de la photocathode en **mA/W**
λ: Longueur d'onde en **nm**
N_{photons}: Nombre de photons qui arrivent sur la photocathode
N_{p.e.}: Nombre d'électrons extraits de la photocathode

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

VI_b - Lecture par Photodiodes



Jean Peyré

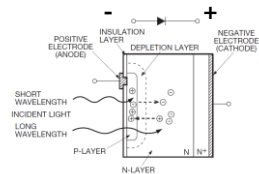
P.41

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

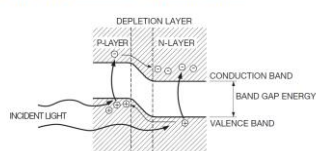
Photodiode

- 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



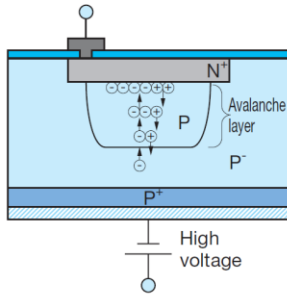
Jean Peyré

P.42

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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

Documentation Hamamatsu

L'APD a du gain



Jean Peyré

P.43

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

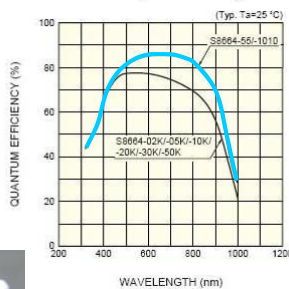
Photodiode à avalanche (APD)

Caractéristiques spectrales type Hamamatsu S8664-1010 APD

APD:

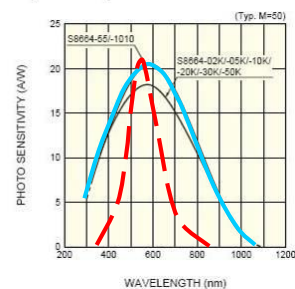
Surface active 100mm²

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)



Jean Peyré

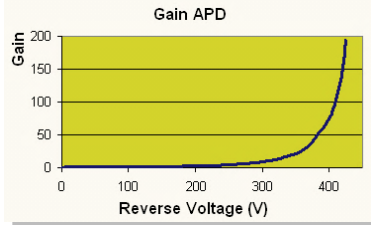
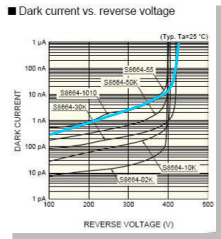
P.44

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photodiode à avalanche (APD)

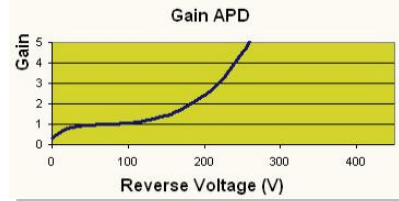
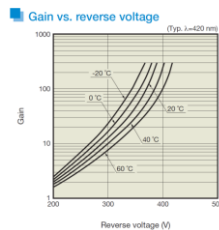
Autres caractéristiques
Hamamatsu S8664-1010 APD

APD: Capacité typique APD ~270pF



T° = 20°C
gain
M = 50 à 380V
M = 74 à 400V

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



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



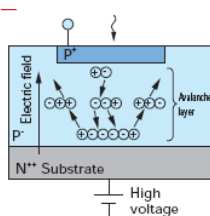
Jean Peyré

P.45

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

SiPM – APD Multipixels en mode Geiger

Autres noms : MPPC...

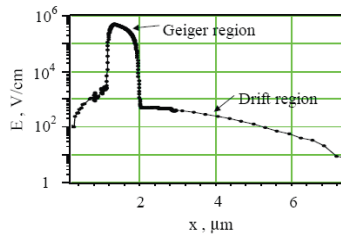
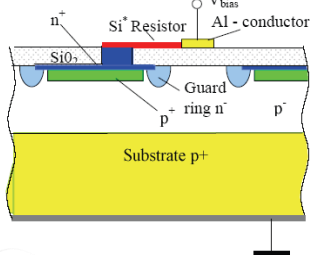
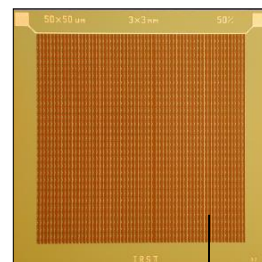


Generated carriers produce new electron-hole pairs while being accelerated by high electric field. [Ionization]

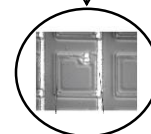
Newly generated carriers are also accelerated to produce further electron-hole pairs, and this process repeats itself. [Avalanche multiplication]

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

3x3 mm²



3600 cellules



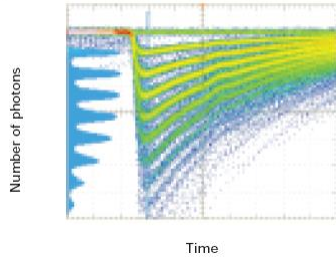
Jean Peyré

P.46

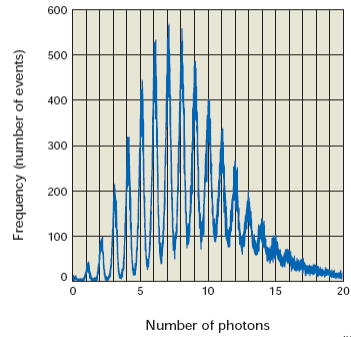
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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, $M=2.75 \times 10^5$)



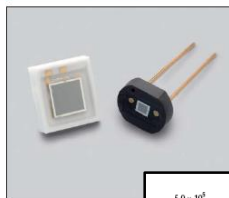
Jean Peyré

P.47

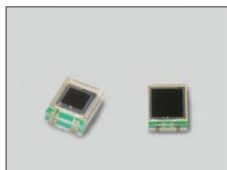
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

SiPM – APD Multipixels en mode Geiger

Ceramic



Surface mount type

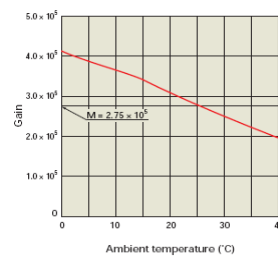
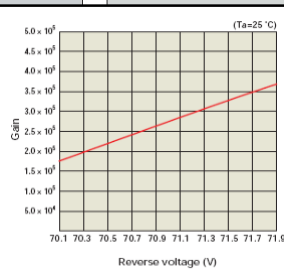
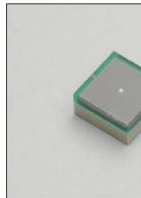


Metal (TE-cooled)



HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

4-side buttabl



Bruit de fond : plusieurs centaines de KHz par mm²



Jean Peyré

P.48

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Photodiode & APD

Photodiode & APD

- **QE**: efficacité quantique (~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: $Q_{tot} = N_{\text{photons}} \cdot QE \cdot G \cdot q_e$

SiPM

- **PDE**: Photon detection efficiency (~35% à 75% @ 450nm)
= **QE** x **Fill_factor** x **Avalanche probability**

Charge en sortie de SiPM: $Q_{tot} = N_{\text{photons}} \cdot PDE \cdot G \cdot q_e$



- 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:

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



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



Hybrid Photo Diode (HPD)

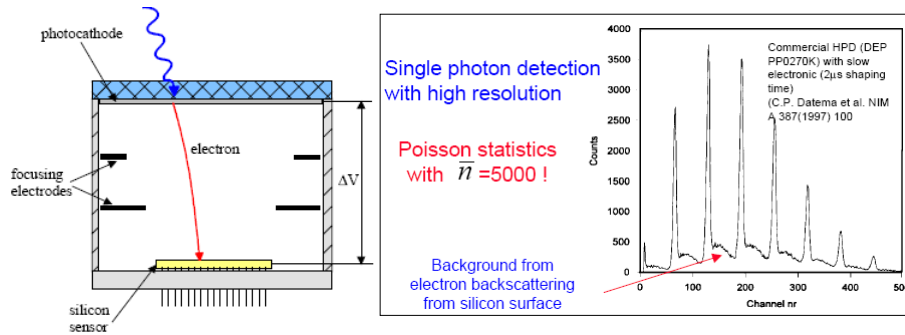


Photo cathode like in PMT, ΔV 10-20 kV

$$G = \frac{e\Delta V}{W_{Si}} = \frac{20 \text{ keV}}{3.6 \text{ eV}} \approx 5 \cdot 10^3 \quad (\text{for } \Delta V = 20 \text{ kV})$$



Jean Peyré

P.51

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

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

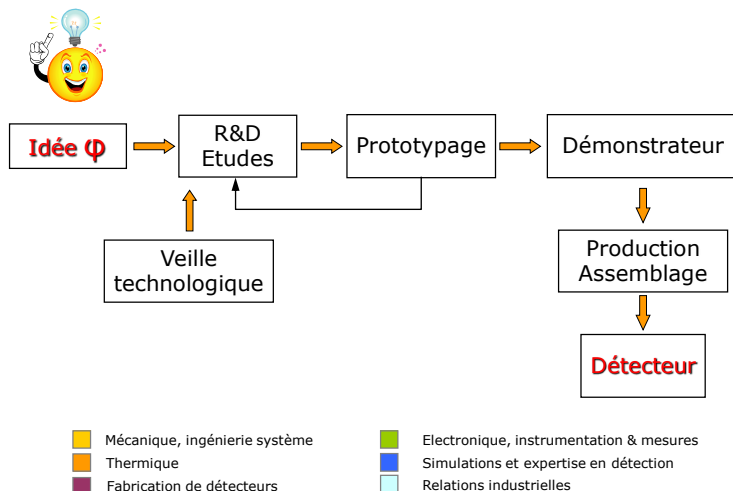


Jean Peyré

P.52

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur



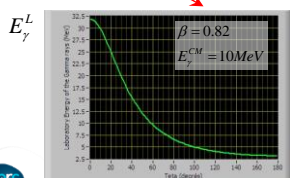
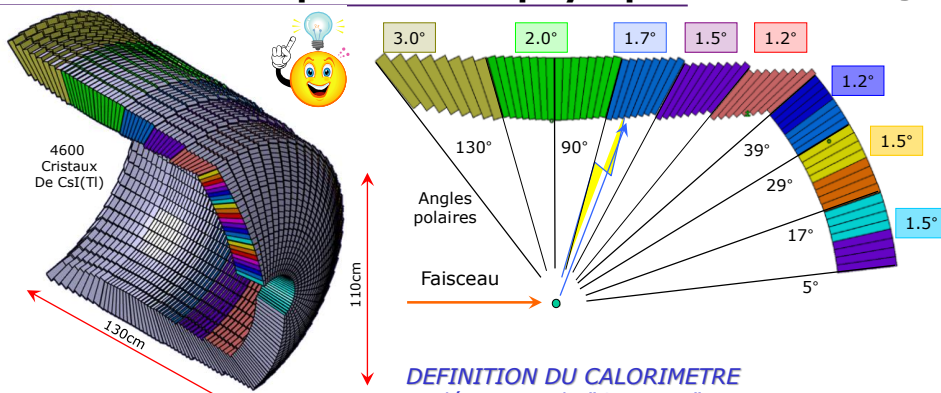
Jean Peyré

P.53

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

1 - Les simulations de la future expérience de physique

R3B
FAIR au GSI
Allemagne



θ Effet Doppler

DEFINITION DU CALORIMETRE

- 1- détections de "Gammas"
- 2- Les angles des cristaux sont définis par l'effet Doppler
- 3- La longueur et le matériau sont définis par l'énergie à absorber (100keV à 20 MeV)
- 4- La résolution en énergie (5%@1MeV)

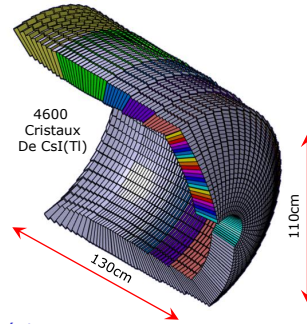
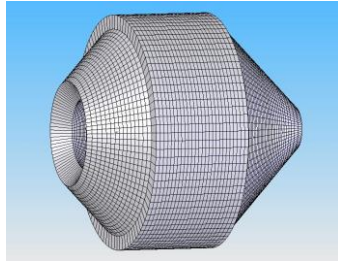


Jean Peyré

P.54

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

1 – Les simulations de la future expérience de physique



Modèle idéal

Nombre de modèles de Cristaux > 50
 > Cela implique un prix élevé
 Couverture géométrique totale de la surface de détection

Modèle réel

Nombre de modèles de Cristaux: 11
 > Couverture géométrique 88%
 Nombre de modèles de Cristaux: 25
 > Couverture géométrique 96%

Les discussions portent sur le prix des cristaux (**2M€ pour un coût total de 3,3M€**):

1. Nombre de modèles différents (influe sur le coût de l'usinage de ceux-ci)
 2. Le volume total de cristaux (influe sur le coût global de la matière première)
- > Les simulations sous GEANT4 permettent de voir l'influence de la couverture géométrique et du volume total de cristaux

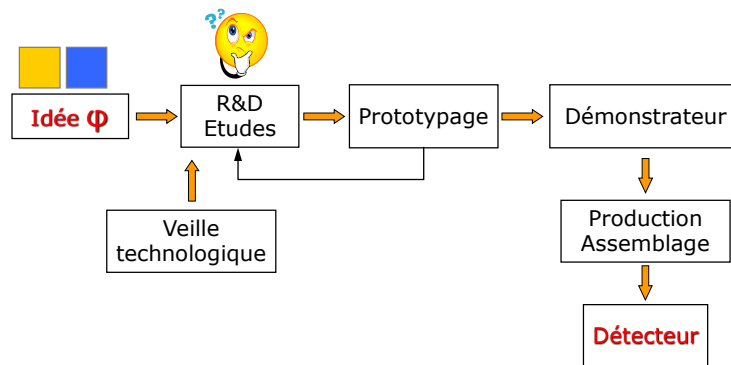


Jean Peyré

P.55

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur



- Mécanique, ingénierie système
- Thermique
- Fabrication de détecteurs

- Electronique, instrumentation & mesures
- Simulations et expertise en détection
- Relations industrielles



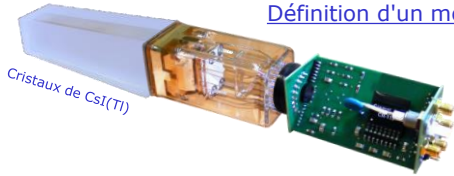
Jean Peyré

P.56

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

2 – Les simulations du détecteur

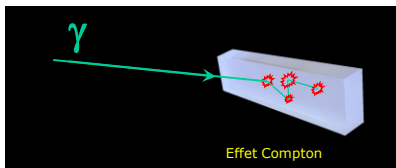
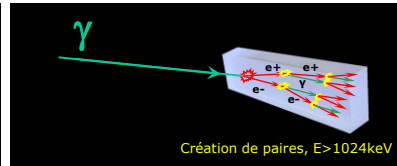
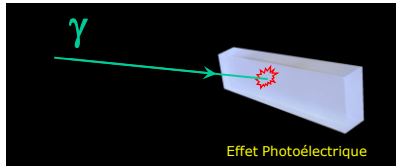
Définition d'un module de détection



Chaque module de détection est constitué de **2 cristaux**, d'un **photomultiplicateur 2 voies**, d'une **embase** et de **2 préamplificateurs de charge**



Les interactions en jeu



En fonction de l'énergie du photon incident, on peut avoir un des 3 effets présentés ou une combinaison des 3:

- > Il s'agit de phénomènes dont on connaît bien les lois de probabilité en fonction de l'énergie
- > Il en découle la nécessité d'utiliser un **logiciel de simulation physique** (type Geant4) pour modéliser la réponse du cristal



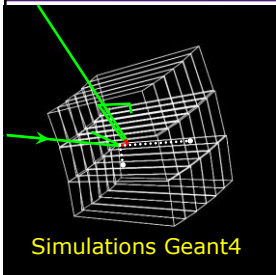
Jean Peyré

P.57

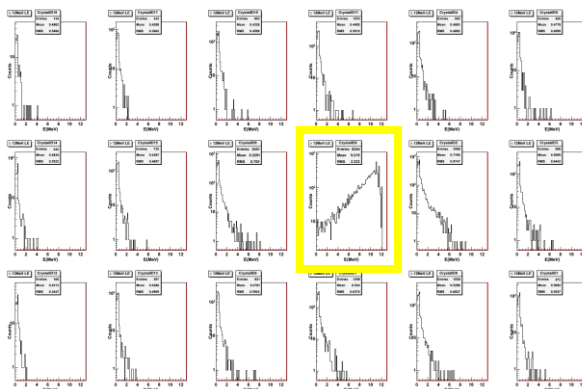
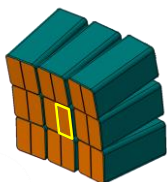
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

2 – Les simulations du détecteur

Résultats d'une simulation Géant4



- **Le cristal du centre est touché**
- **25000 tirages** pour tracer ces histogrammes Energie/Nb-coups
- Donne pour chaque événement l'énergie déposée dans chaque cristal



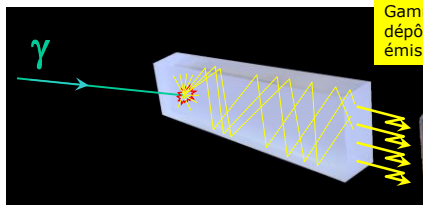
Jean Peyré

P.58

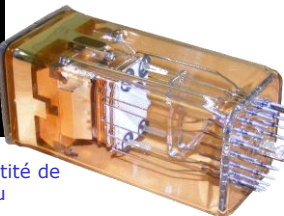
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

2 – Les simulations du détecteur

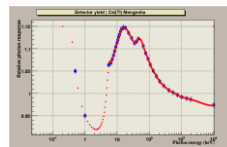
Collection de la lumière à partir de l'énergie déposée



Gamma -> dépôt d'énergie
dépôt d'énergie-> émission de lumière
émission de lumière-> collection lumière



- Individuellement pour chaque cristal, on calcule la quantité de lumière qui va arriver sur la fenêtre d'entrée (LITRANI ou GEANT4)
- On tient compte de la **non linéarité de conversion**, de la **transmission optique** ainsi que des **états de surface** du cristal (poli, dépoli, réflexion par adjonction d'un réflecteur). Dans un second temps, on y ajoute le **rendement quantique du photodétecteur** ainsi que la **correspondance en longueur d'onde** entre lumière émise et conversion photon-électron.



Non linéarité du cristal de CsI(Tl)

1. Validation de la définition de l'ensemble Cristal-photodétecteur-électronique
2. Réalisation d'un prototype

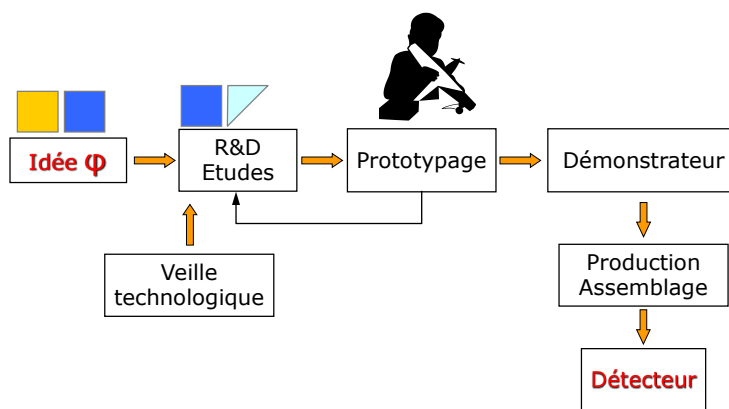


Jean Peyré

P.59

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur



- Mécanique, ingénierie système
- Thermique
- Fabrication de détecteurs

- Electronique, instrumentation & mesures
- Simulations et expertise en détection
- Relations industrielles

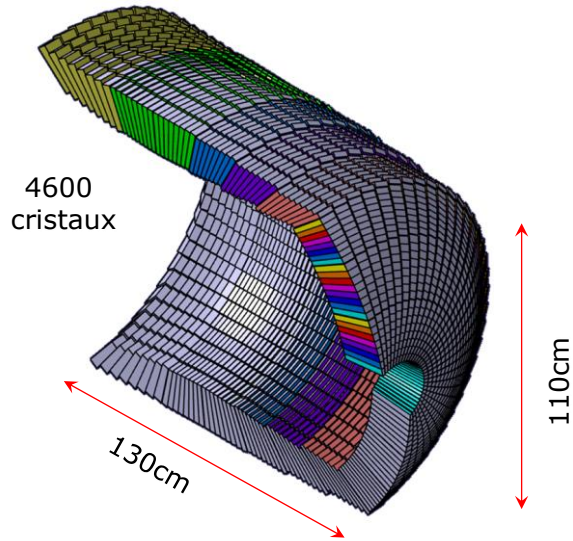


Jean Peyré

P.60

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

3 – Réalisation d'un prototype

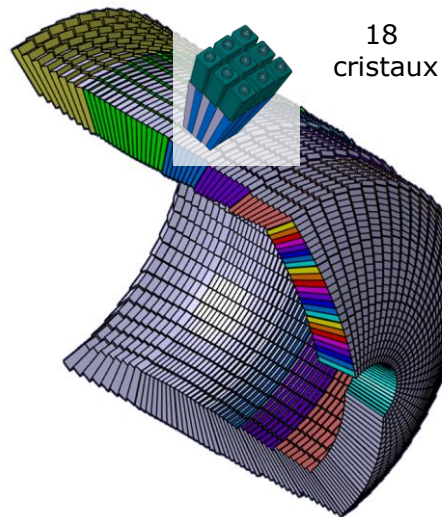


Jean Peyré

P.61

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

3 – Réalisation d'un prototype



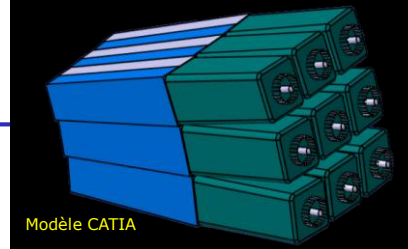
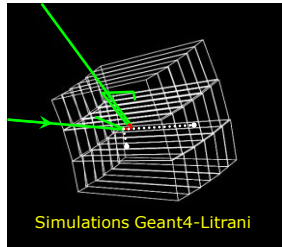
Jean Peyré

P.62

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

3 – Réalisation d'un prototype

cristaux
CsI(Tl)



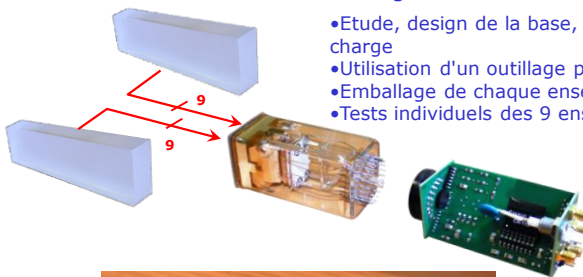
Jean Peyré

P.63

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

3 – Réalisation d'un prototype

Assemblage des différents éléments



- Etude, design de la base, intégration de préamplificateurs de charge
- Utilisation d'un outillage pour le collage (étude du montage)
- Emballage de chaque ensemble (ESR)
- Tests individuels des 9 ensembles (mécanique+électronique)



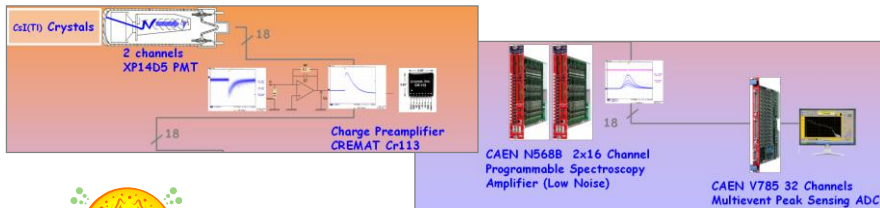
Jean Peyré

P.64

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

4 – Test et Mesure du prototype

Réalisation d'un banc de test de laboratoire



- Mise au point du banc de test
- Calibration des voies en source



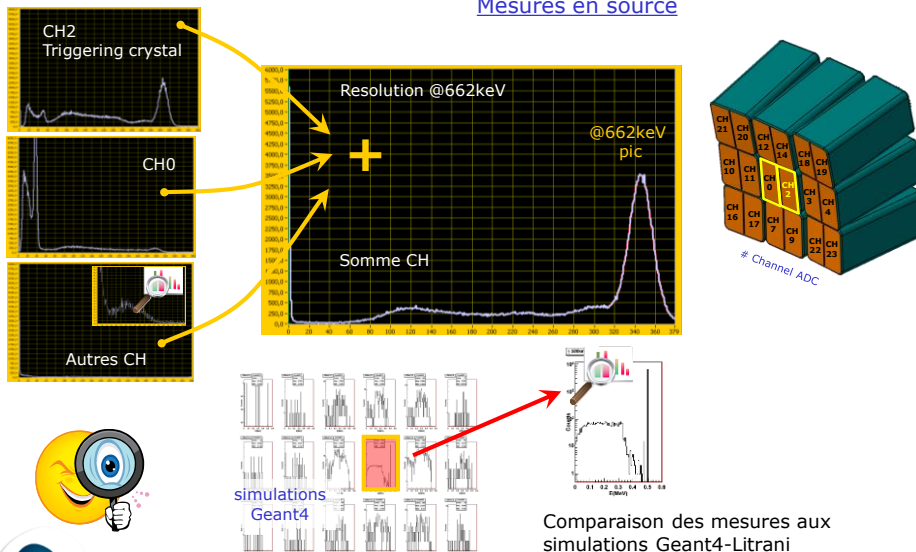
Jean Peyré

P.65

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

4 – Test et Mesure du prototype

Mesures en source

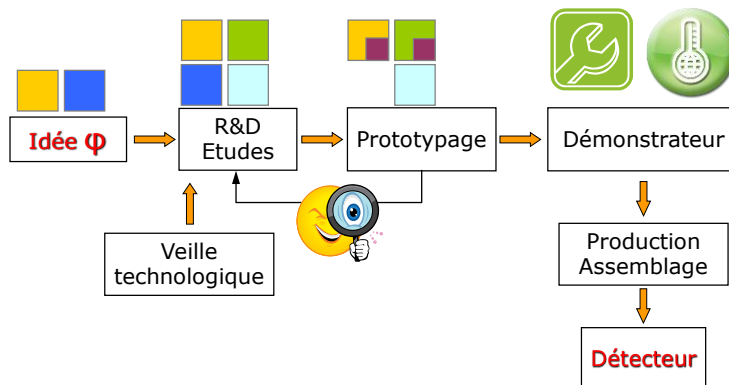


Jean Peyré

P.66

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur



- Mécanique, ingénierie système
- Thermique
- Fabrication de détecteurs
- Electronique, instrumentation & mesures
- Simulations et expertise en détection
- Relations industrielles



Jean Peyré

P.67

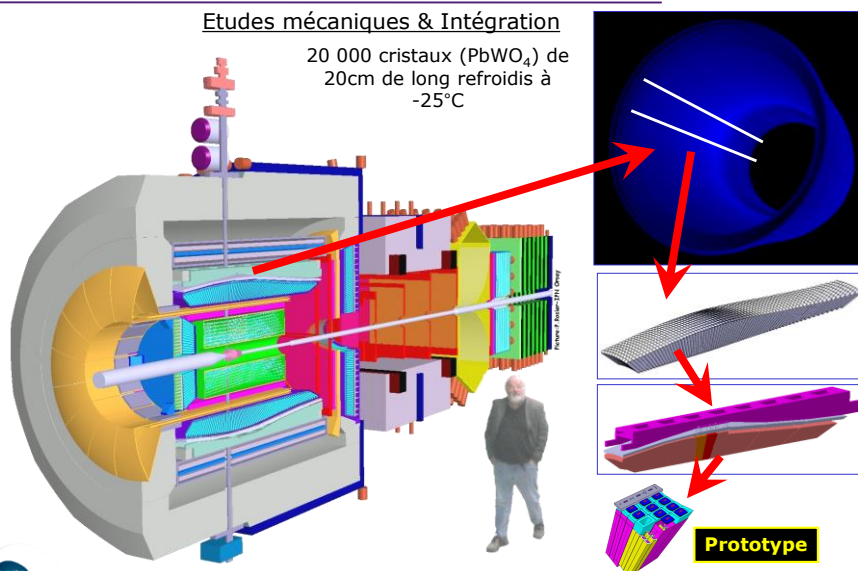
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

5 – Design et Ingénierie

PANDA
FAIR au GSI
Allemagne

Etudes mécaniques & Intégration

20 000 cristaux ($PbWO_4$) de
20cm de long refroidis à
-25°C



Prototype



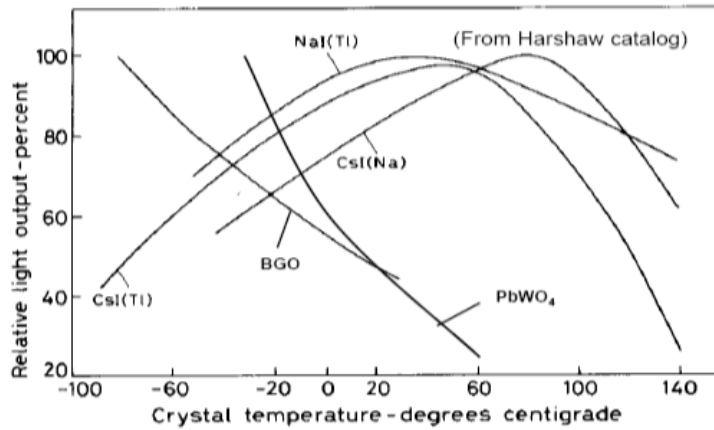
Jean Peyré

P.68

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Scintillateurs inorganiques

Variations par rapport à la température



Jean Peyré

P.69

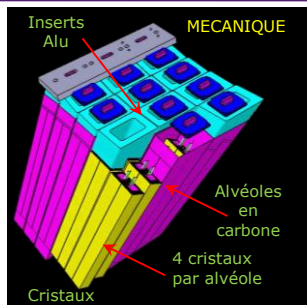
Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

5 – Design et Ingénierie

PANDA
FAIR au GSI
Allemagne

Etudes mécaniques

- Simulations mécanique (SAMCEF), calculs sous charge, ...
- Design sous CATIA
- Prototypage



Prototype



Jean Peyré

P.70

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

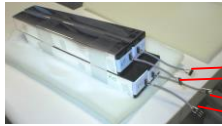
5 – Design et Ingénierie

PANDA
FAIR au GSI
Allemagne



Etudes thermiques

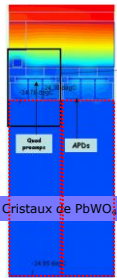
- Simulations thermiques (FLOWTHERM)
- Prototypage + démonstrateur



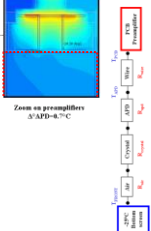
Cristaux de PbWO₄

Simulation

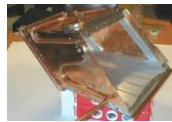
Simulations thermiques



Ensemble de 4 préamplificateurs



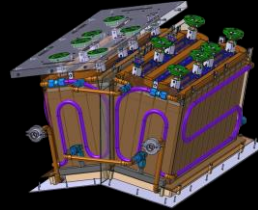
Prototype



Ecran thermique en Cuivre du **prototype** 60 cristaux

Démonstrateur

THERMIQUE+MECANIQUE



Refroidissement et/ou stabilisation en température $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Réalisation **démonstrateur** de 480 Cristaux en 2009

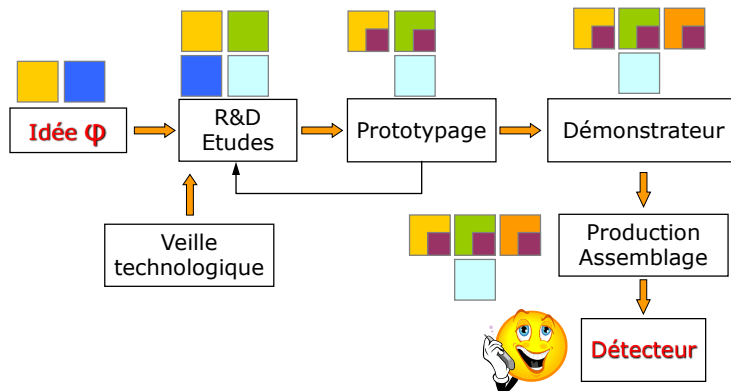


Jean Peyré

P.71

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017

Les Différentes étapes de la conception d'un détecteur



Jean Peyré

P.72

Ecole Technique de base des détecteurs
Cargèse 2017