

# Détecteurs à émission de lumière

1- Emission de lumière (retour à l'équilibre du milieu)

Scintillateurs

Effet Cerenkov (non traité dans ce cours)

2- Collection de la lumière

3- Photo-détecteur : transformation en signal électrique

Avec des illustrations extraites du cours de  
**Christian Joram** CERN, Summer Student Lectures 2001

# 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

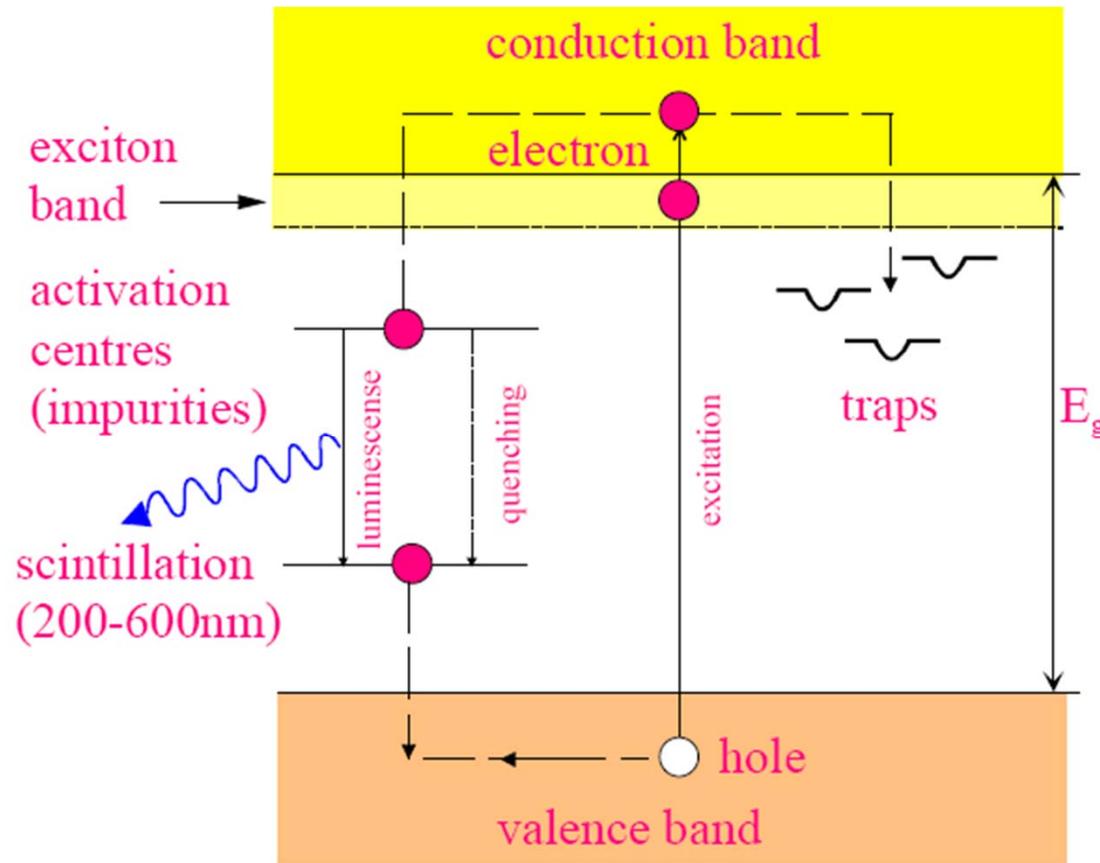
Scintillateurs  
Organiques

Molécules aromatiques

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

# Scintillateurs inorganiques

## Principe



# Scintillateurs inorganiques

Principales propriétés

Composition & densité

Indice & Longueur d'onde

Constantes de temps

Quantité de lumière

scintillator composition	density (g/cm <sup>3</sup> )	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (μs)	scintillation pulse height <sup>1)</sup>	notes	Photons/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190	2)	4 × 10 <sup>4</sup>
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	3)	
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	3)	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	3)	1.1 × 10 <sup>4</sup>
CaI(Na)	4.51	1.84	420	0.63	85	3)	
KI(Tl)	3.13	1.71	410	0.24/2.5	24	3)	
<sup>6</sup> LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	3)	1.4 × 10 <sup>4</sup>
CaF <sub>2</sub> (Eu)	3.19	1.44	435	0.9	50		
BaF <sub>2</sub>	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		6.5 × 10 <sup>3</sup>
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	2.15	480	0.30	10		2 × 10 <sup>3</sup>
CaWO <sub>4</sub>	6.12	1.92	430	0.5/20	50		2.8 × 10 <sup>3</sup>
ZnWO <sub>4</sub>	7.87	2.2	480	5.0	26		
CdWO <sub>4</sub>	7.90	2.3	540	5.0	40		
CsF	4.65	1.48	390	0.005	5	3)	
CeF <sub>3</sub>	6.16	1.68	300 340	0.005 0.020	5		
ZnS(Ag)	4.09	2.35	450	0.2	150	4)	
GSO	6.71	1.9	440	0.060	20		
ZnO(Ga)	5.61	2.02	385	0.0004	40	4)	
YSO	4.45	1.8	420	0.035	50		
YAP	5.50	1.9	370	0.030	40		

<sup>1)</sup> relative to NaI(Tl) <sup>2)</sup> at 80 K <sup>3)</sup> hygroscopic <sup>4)</sup> polycrystalline

PbWO <sub>4</sub>	8.28	1.82	440, 530	0.01			100
-------------------	------	------	----------	------	--	--	-----

(Table extraite du livre de Knoll, ajout de Joram)

# Scintillateurs inorganiques

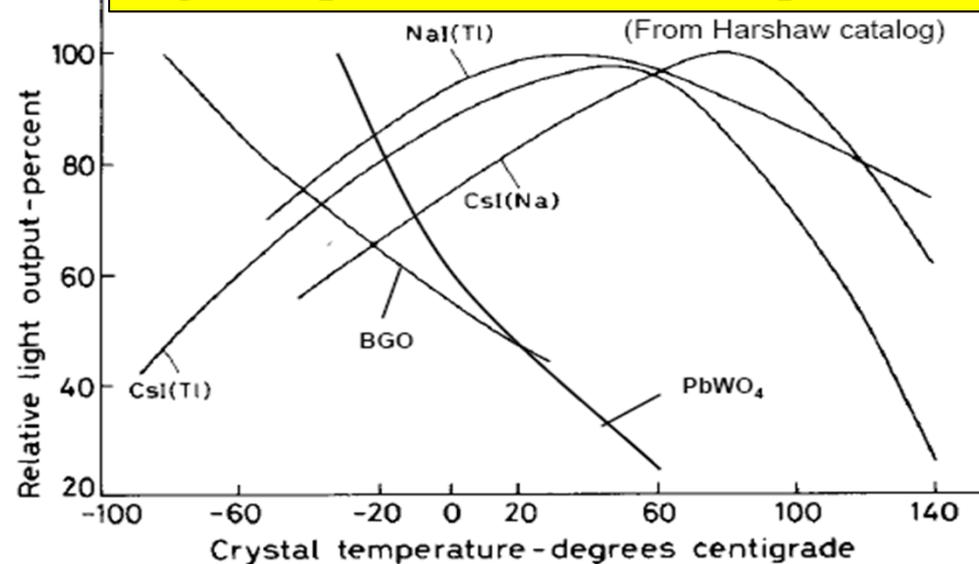
## Principales propriétés

	LaBr <sub>3</sub>	LaCl <sub>3</sub>	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI(Na)	BGO	LYSO	PWO	CsI (pure)*	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	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							
Peak $\lambda$ (nm)	380	350 430	3	4						
Fast Decay (ns)	25	25/213	6	2						
Hygroscopic	yes	yes								
* Cost (per cm <sup>3</sup> )	<del>\$30</del>	<del>\$30</del>								
Radiation length (cm)	N/A	N/A								

\*

Ordres de grandeur, dépendent fo

### Light output variation with temperature



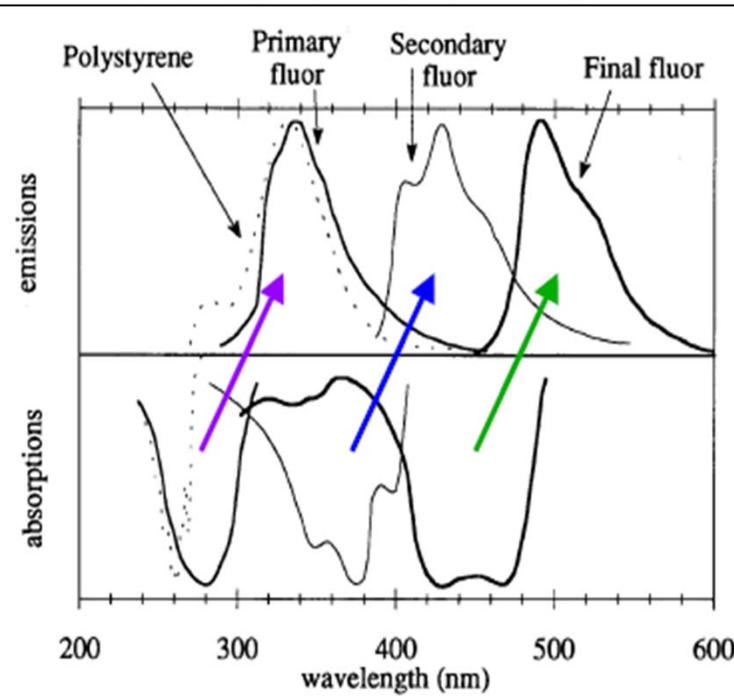
# Scintillateurs organiques

Molécules aromatiques (formées sur le cycle du benzène)  
Etat cristallin, liquide ou plastique

Molecular states

## Some widely used solvents and solutes

	solvent	secondary fluor	tertiary fluor
Liquid scintillators	Benzene	p-terphenyl	POPOP
	Toluene	DPO	BBO
	Xylene	PBD	BPO
Plastic scintillators	Polyvinylbenzene	p-terphenyl	POPOP
	Polyvinyltoluene	DPO	TBP
	Polystyrene	PBD	BBO
			DPS



# Scintillateurs organiques

**Table A6.3 Properties of some organic scintillators**

scintillator	density (g/cm <sup>3</sup> )	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (ns)	scintillation pulse height <sup>1)</sup>	H/C ratio <sup>2)</sup>	yield/ NaI	
<b>Monocrystals</b>								
naphthalene	1.15	1.58	348	11	11	0.800	0.5	
anthracene	1.25	1.59	448	30-32	100	0.714		
trans-stilbene	1.16	1.58	384	3-8	46	0.857		
p-terphenyl	1.23		391	6-12	30	0.778		
<b>Plastics <sup>3)</sup></b>								
NE 102 A	1.032	1.58	425	2.5	65	1.105		
NE 104	1.032	1.58	405	1.8	68	1.100		
NE 110	1.032	1.58	437	3.3	60	1.105		
NE 111	1.032	1.58	370	1.7	55	1.096		
<b>Plastics <sup>4)</sup></b>								
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-412	1.032	1.58	434	3.3	60	1.104		
BC-414	1.032	1.58	392	1.8	68	1.110		
BC-416	1.032	1.58	434	4.0	50	1.110		
BC-418	1.032	1.58	391	1.4	67	1.100		
BC-420	1.032	1.58	391	1.5	64	1.100		
BC-422	1.032	1.58	370	1.6	55	1.102		
BC-422Q	1.032	1.58	370	0.7	11	1.102		
BC-428	1.032	1.58	480	12.5	50	1.103		
BC-430	1.032	1.58	580	16.8	45	1.108		
BC-434	1.049	1.58	425	2.2	60	0.995		

<sup>1)</sup> relative to anthracene

<sup>2)</sup> ratio of hydrogen to carbon atoms

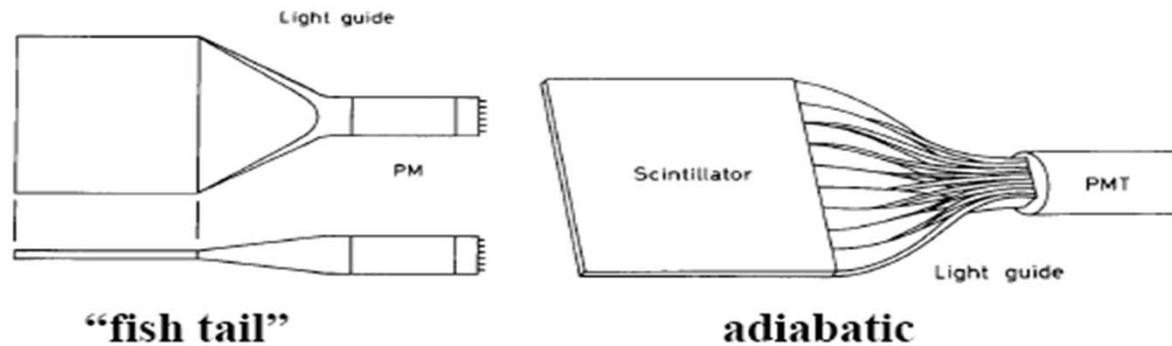
<sup>3)</sup> Nuclear Enterprises Ltd. Sighthill, Edinburgh, U.K.

<sup>4)</sup> Bicon Corporation, Newbury, Ohio, USA

# « Collection de la lumière »

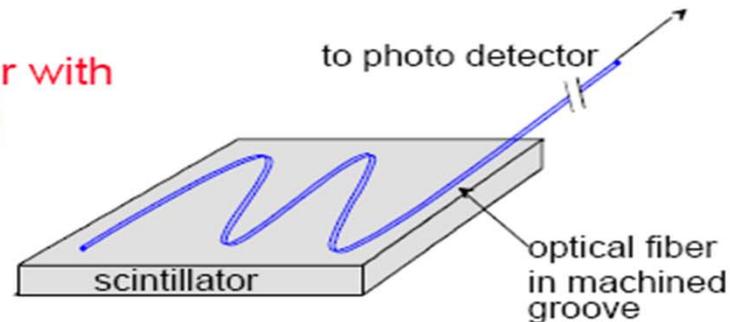
Adaptation à la géométrie et à la sensibilité (longueur d'onde) du photo-détecteur

- ◆ Light guides: transfer by total internal reflection (+outer reflector)



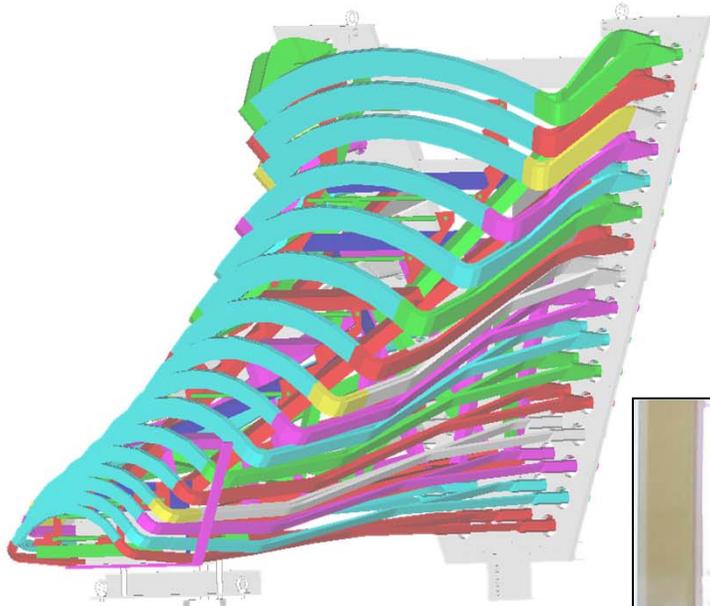
- ◆ wavelength shifter (WLS) bars

readout of a scintillator with a fiber (schematically)



# « Collection de la lumière »

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



Champ magnétique  
(8 secteurs)

16 paires  
Scintillateur  
(BC 408)

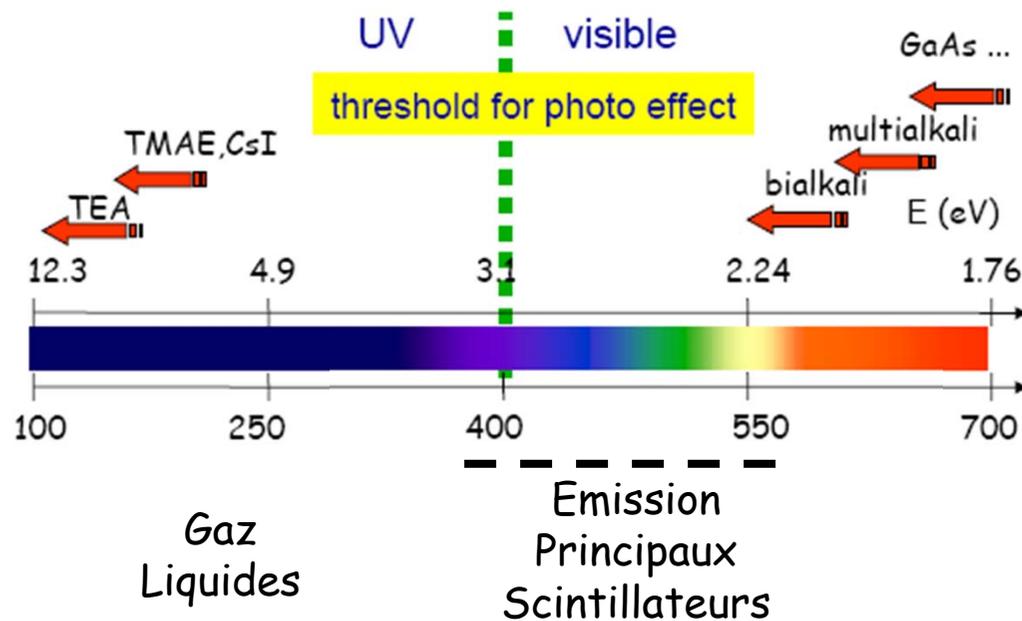


# Photo- détecteurs

Fonction : Convertir la lumière en signal électrique

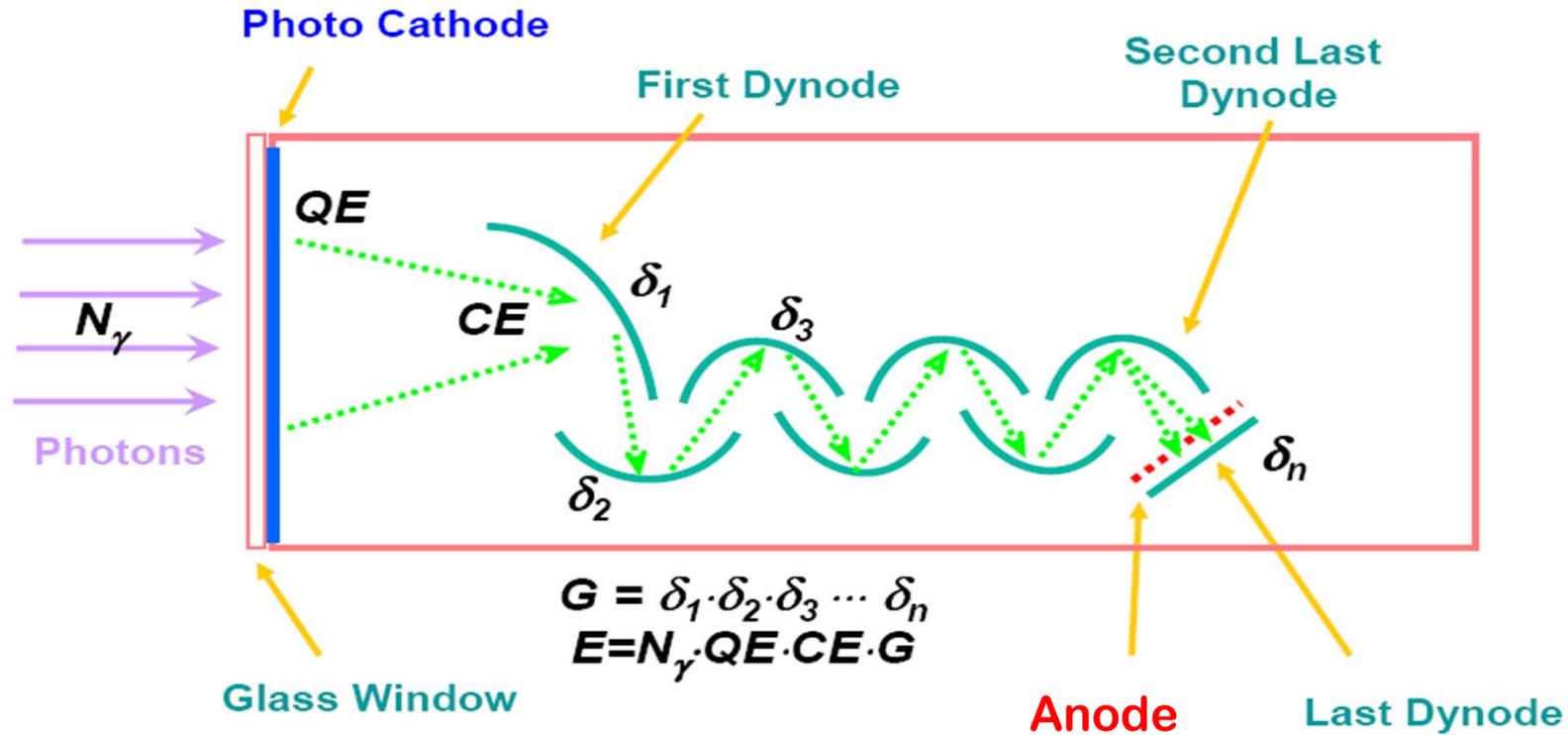
Principaux types utilisés en physique nucléaire

Photomultiplicateurs  
Semi-conducteurs



# Photo- détecteurs

## Photomultiplicateurs



**Photocathode**

QE

**Collection**

CE

**Dynodes**

dynode gain  $g=3-50$  ( $f(E)$ )

total gain  $M = \prod_{i=1}^N g_i$

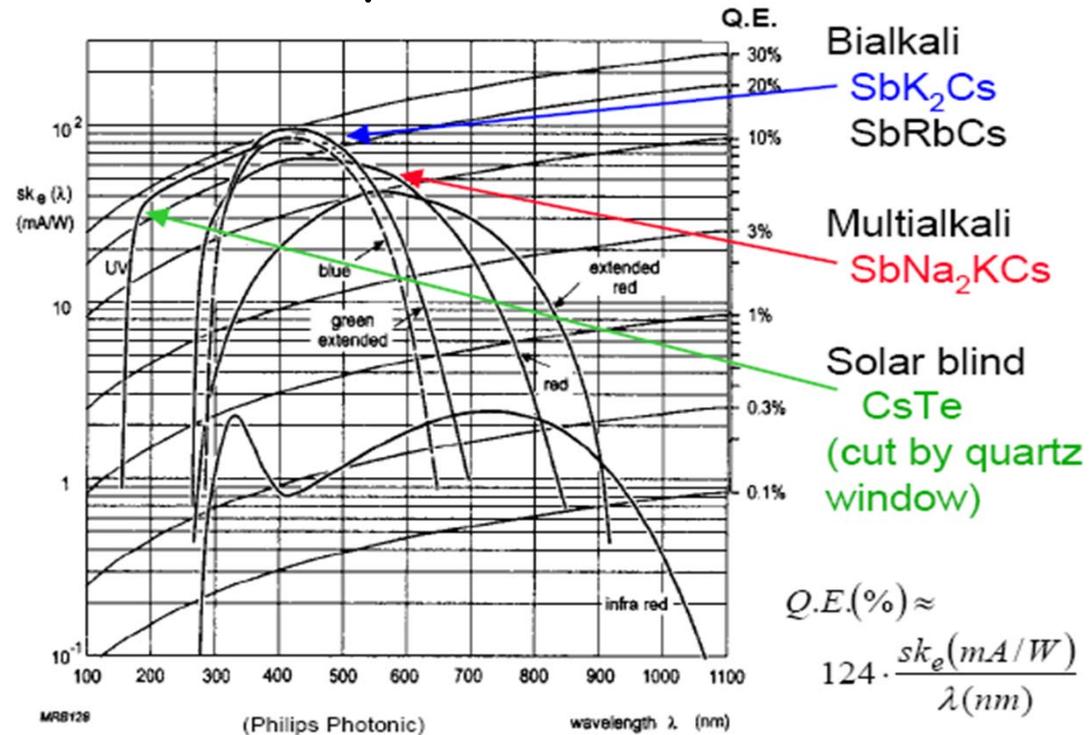
10 dynodes with  $g=4$

$M = 4^{10} \approx 10^6$

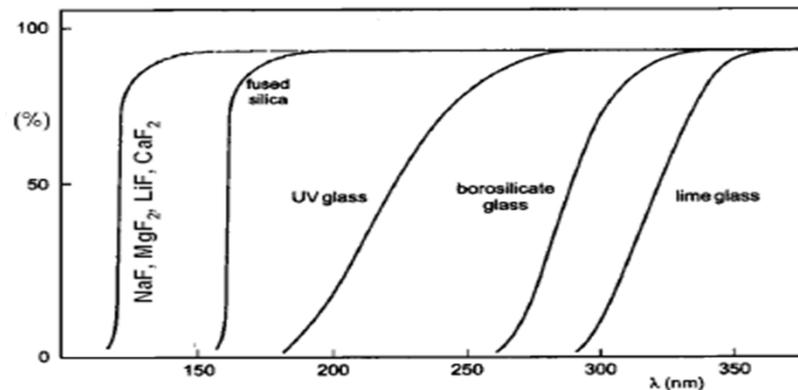
# Photo- détecteurs

## Photomultiplicateurs

Efficacité quantique (Q E)



Fenêtre d'entrée (transmission de la lumière)



# Photo- détecteurs

## Photomultiplicateurs

### Photocatode

Bialkali

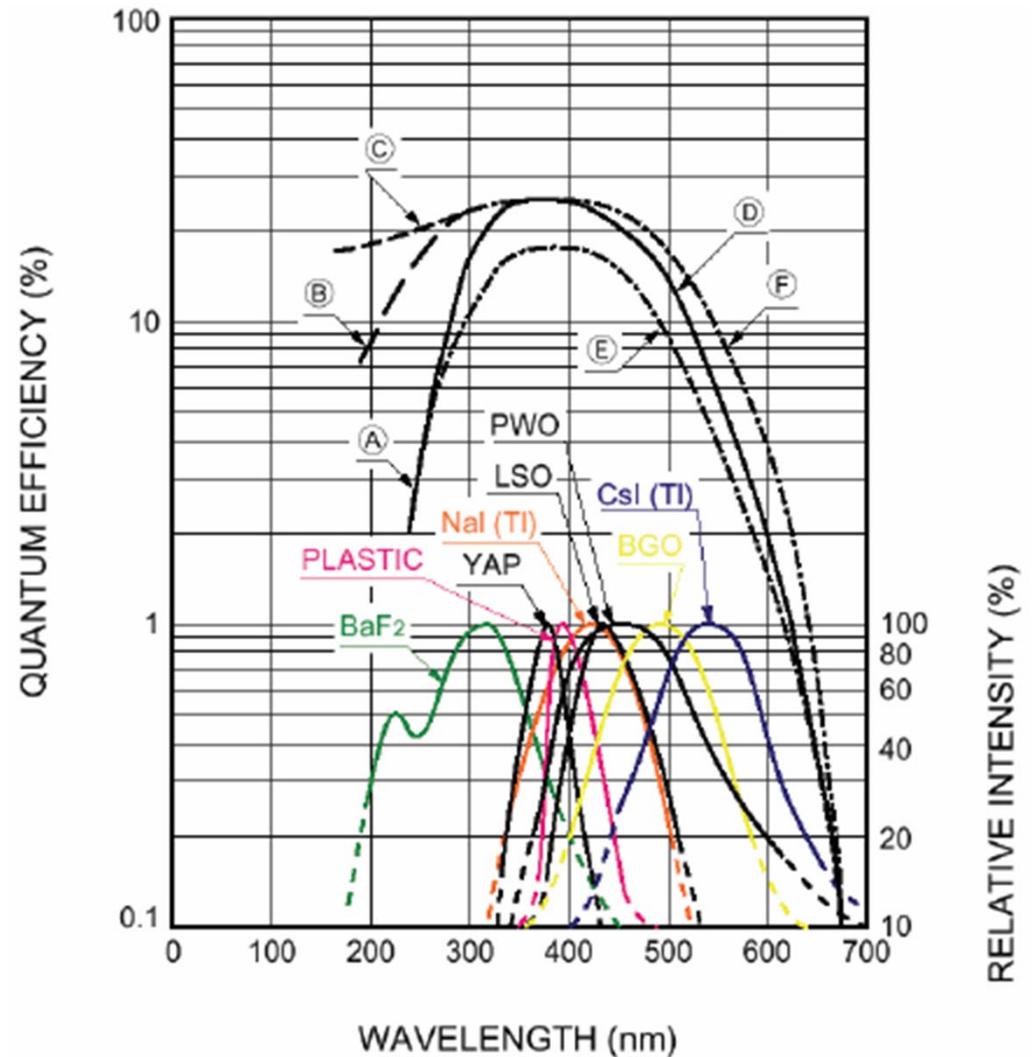
Sb- Rb- Cs

Sb- K- Cs

+ Verre

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

+ Scintillateur



# Photo- détecteurs

## Photomultiplicateurs Energy Resolution ( $\sigma/E$ )

➤ In ideal case:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\sqrt{N_\gamma}}{N_\gamma} = \sqrt{\frac{1}{N_\gamma}}$$

➤ In reality:

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{ENF}{N_\gamma \cdot QE \cdot CE} + \left( \frac{ENC}{N_\gamma \cdot QE \cdot CE \cdot G_P} \right)^2}$$

- QE  
-  $C_{ol}$   
- ENF  
- ENC

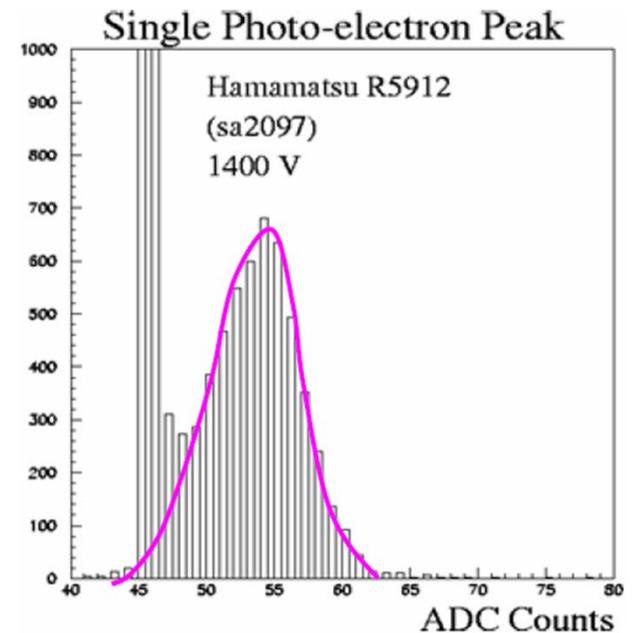
Quantum Efficiency  
Collection Efficiency:  
Excess Noise Factor (from Dynodes)  
Equivalent Noise Charge (Readout Noise)

➤ Definition:

$$ENF \equiv \frac{\sigma_{Output}^2}{\sigma_{Input}^2}$$

➤ In case of PMT:

$$ENF = 1 + \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_1 \cdot \delta_2} + \dots + \frac{1}{\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n}$$



(Cours de Katsushi Arisaka)

# Photo- détecteurs

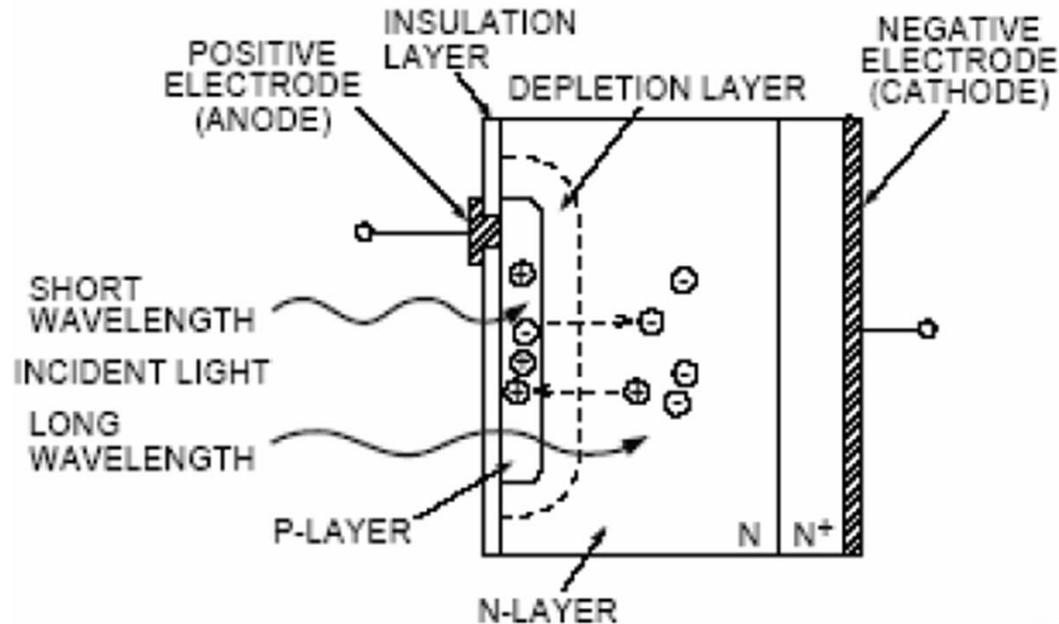
## Photomultiplicateurs



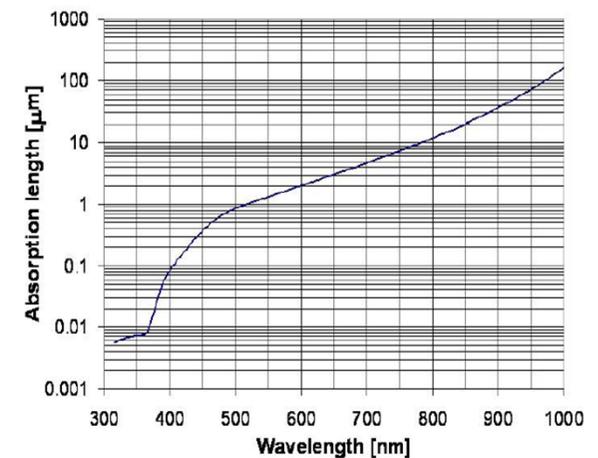
# Photo-détecteurs

## Semi-conducteurs

### Photodiode



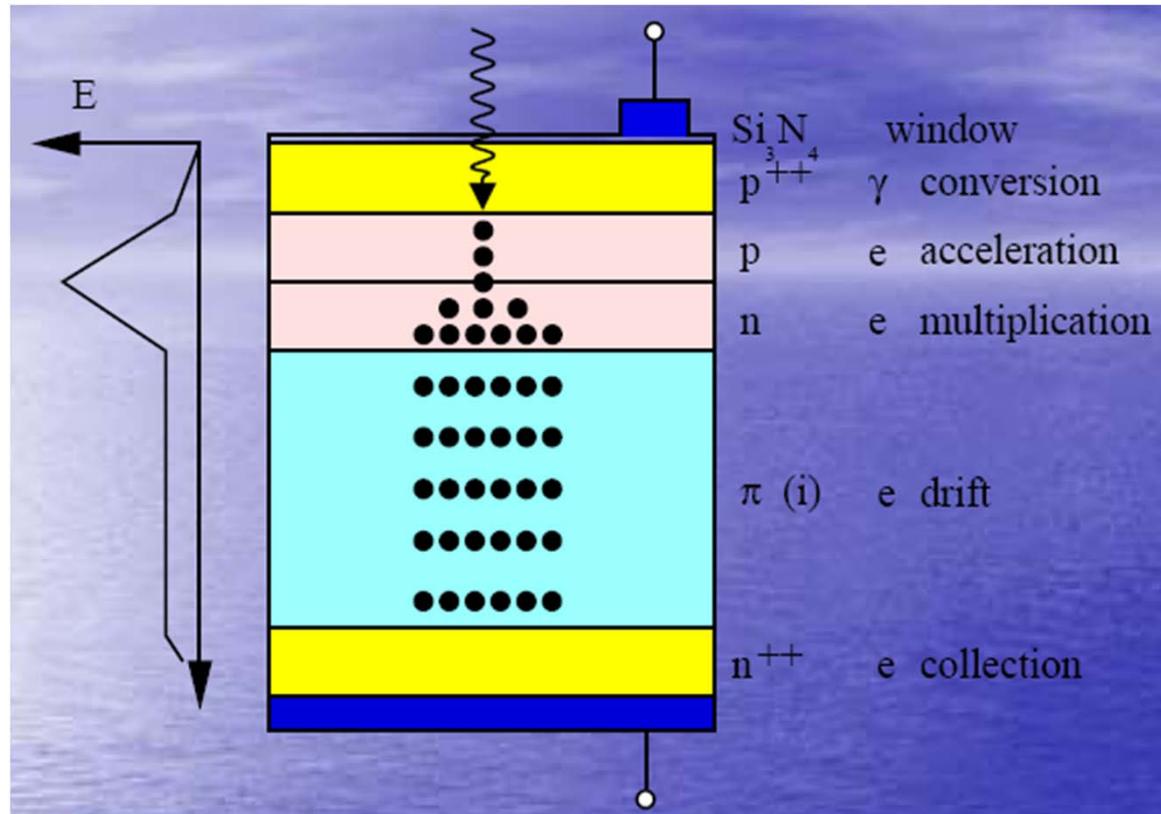
Avantage : bonne efficacité quantique (QE)  
Inconvénient : gain de 1



# Photo- détecteurs

## Semi-conducteurs

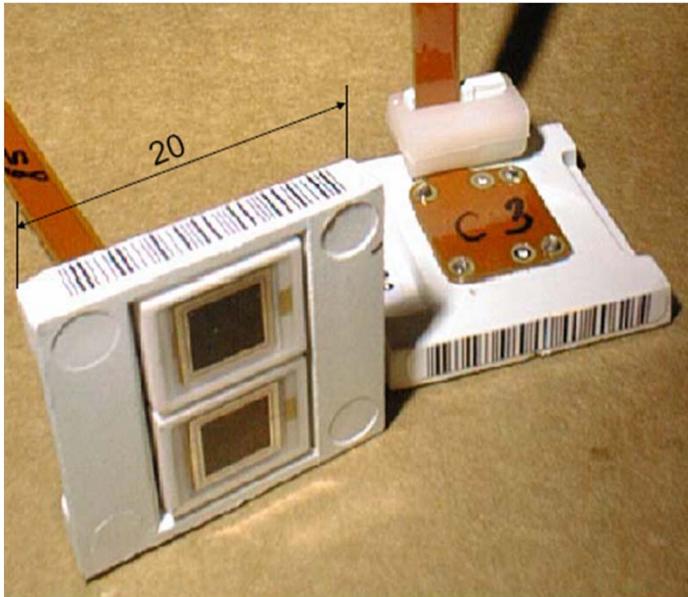
### Avalanche Photo Diode (APD)



# Photo- détecteurs

## Semi-conducteurs

### Avalanche Photo Diode (APD)



APD du calorimètre CMS  
(5x5 mm<sup>2</sup>)

Inconvénient

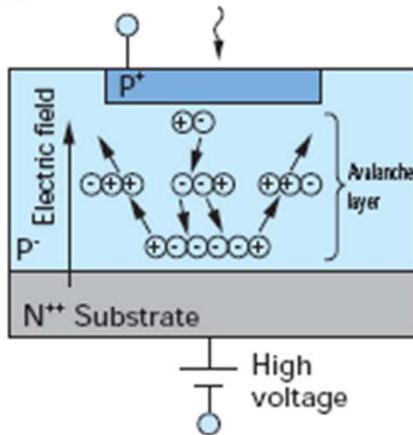
Operating Voltage @ M=50	~380 V
Capacitance @ M=50	80 pF
Serial Resistance	3 Ω
Dark Current @ M=50	< 10 nA
Excess Noise Factor @ M=50	~2
Quantum Efficiency @ 470 nm	80 %
dM/dV x 1/M @ M=50	3.0 %/V
dM/dT x 1/M @ M=50	-2.4 %/K

# Photo-détecteurs

## Semi-conducteurs

### SiPM - APD Multipixels en mode Geiger

Autres noms : MPM, MPPC...

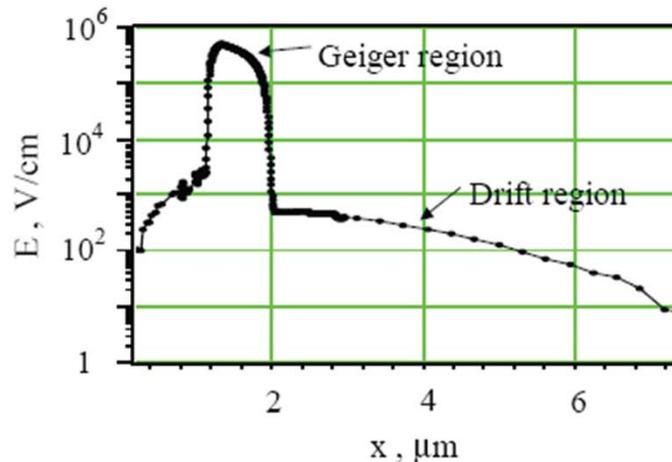
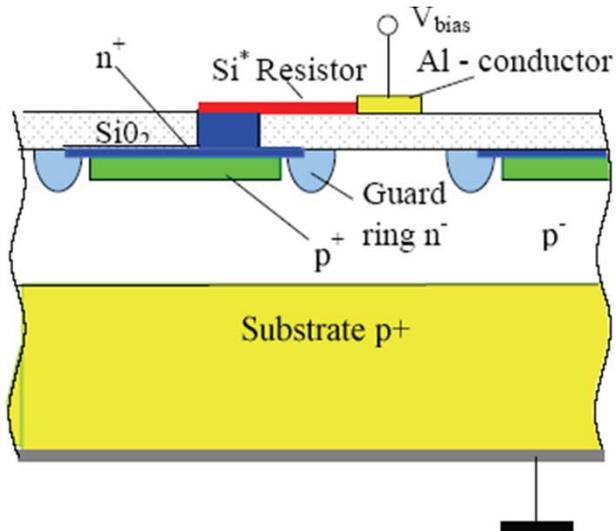


Generated carriers produce new electron-hole pairs while being accelerated by high electric field. **[Ionization]**

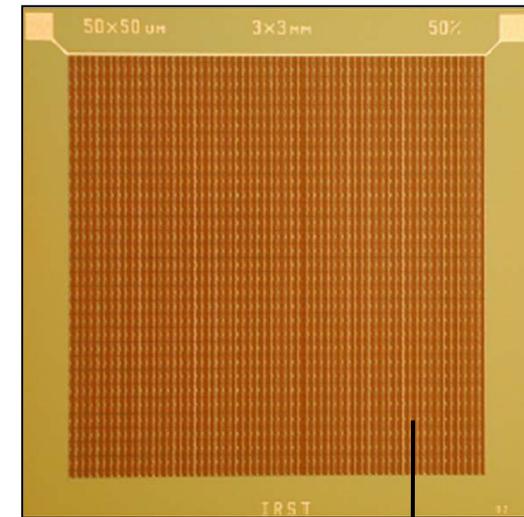


Newly generated carriers are also accelerated to produce further electron-hole pairs, and this process repeats itself. **[Avalanche multiplication]**

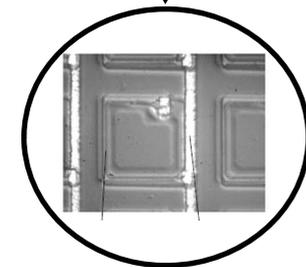
Gain proportional to the applied reverse bias voltage can be obtained.



3x3 mm<sup>2</sup>



3600 cellules

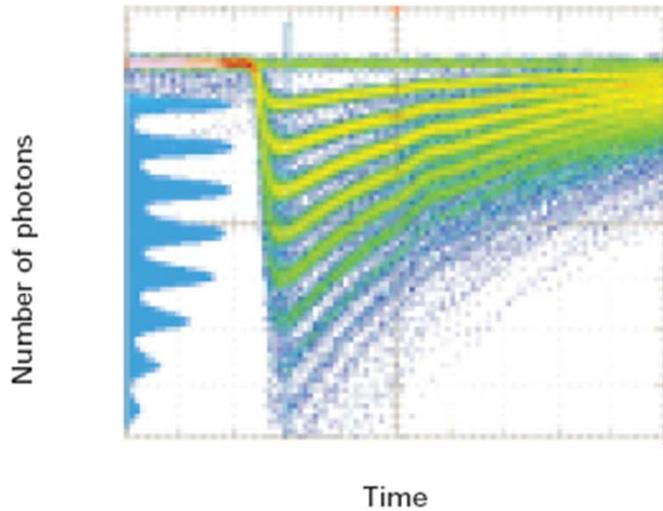


# Photo- détecteurs

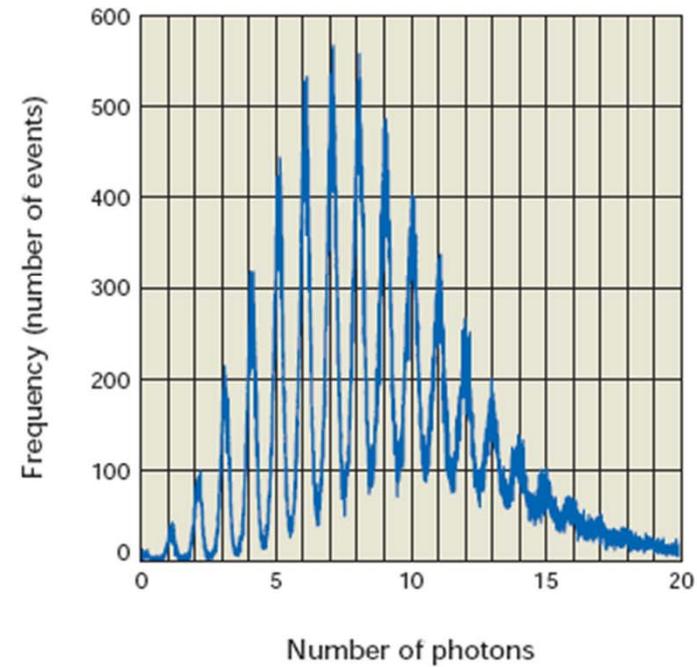
## Semi-conducteurs

### SiPM

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



# Photo- détecteurs

## Semi-conducteurs

SiPM

■ Active area 1 × 1 mm type (Typ. unless otherwise noted, Ta=25 °C)

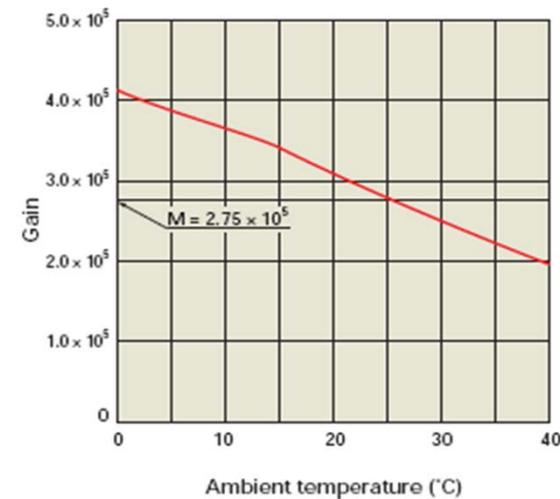
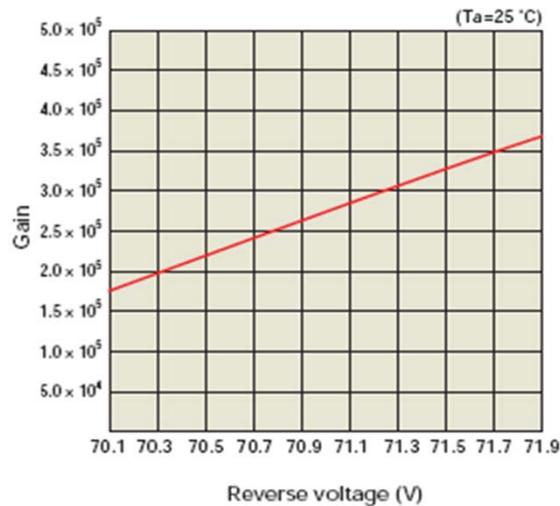


S10362-11-025U  
/-050U/-100U



S10362-11-025C  
/-050C/-100C

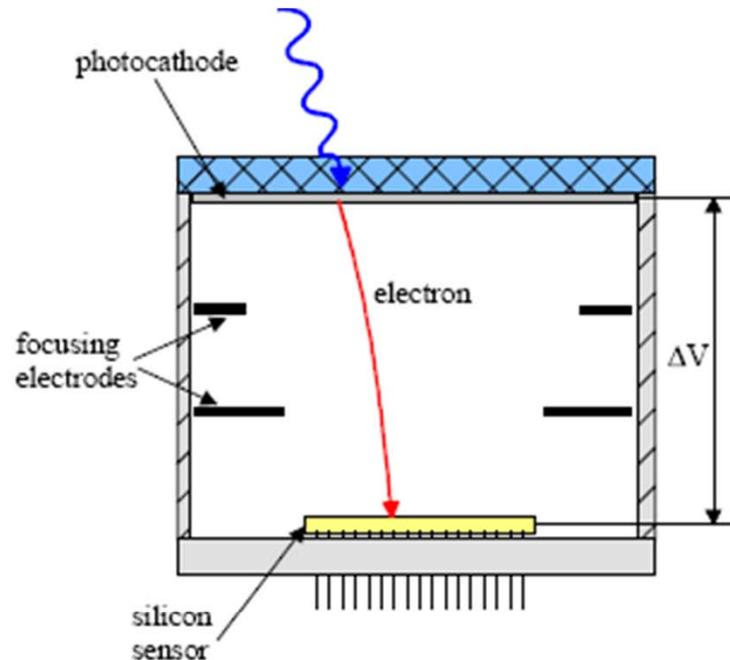
Parameter	Symbol	S10362-11 series			Unit
		-025U, -025C	-050U, -050C	-100U, -100C	
Chip size	-	1.5 × 1.5			mm
Effective active area	-	1 × 1			mm
Number of pixels	-	1600	400	100	-
Pixel size	-	25 × 25	50 × 50	100 × 100	µm
Fill factor *1	-	30.8	61.5	78.5	%
Spectral response range	λ	270 to 900			nm
Peak sensitivity wavelength	λp	400			nm
Quantum efficiency (λ=λp)	QE	70 Min.			%
Photon detection efficiency *2 (λ=λp)	PDE	25	50	65	%
Recommended operating voltage range	-	70 ± 10 *3			V
Dark count	-	300	400	600	kcps
Dark count Max.	-	600	800	1000	kcps
Terminal capacitance	Ct	35			pF
Time resolution (FWHM)	-	200 to 300			ps
Temperature coefficient of reverse voltage	-	50			mV/°C
Gain	M	2.75 × 10 <sup>5</sup>	7.5 × 10 <sup>5</sup>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	-



Bruit de fond : plusieurs centaines de KHz par mm<sup>2</sup>

# Photo- détecteurs

## Hybrid Photo Diode (HPD)



Single photon detection  
with high resolution

Poisson statistics  
with  $\bar{n} = 5000$  !

Background from  
electron backscattering  
from silicon surface

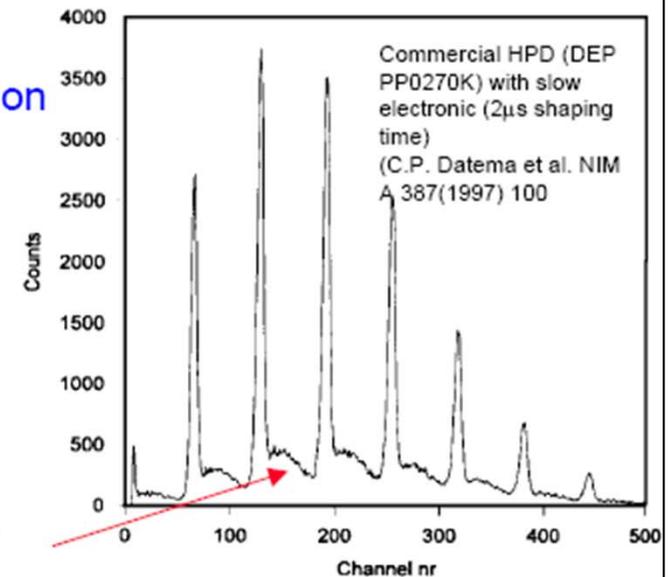


Photo cathode like in PMT,  $\Delta V$  10-20 kV

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

Photo Détecteurs gazeux

RICH

PM avec des GEM ...