



Une pas si brève introduction aux systèmes de détection utilisés en diffraction

Pierre-Emmanuel Petit
IMN Nantes



Introduction

Différents modes d'utilisation des détecteurs RX

1) Accumulation

Cliché / Plaque Image / CCD

$V \rightarrow \text{ADC} \rightarrow \text{Signal échantillonné}$

2) Mesure de $I \rightarrow$ mesure d'un flux de photons

Mode courant : diode, chambre à ionisation...

$I \rightarrow \text{ADC}$

3) Mode de comptage ("pulse mode", "counting mode")

Scintillateurs + PM / Compteur proportionnel / Détecteur semiconducteur

Photons comptés un par un. Parfois (mais pas toujours) associé à l'estimation de l'énergie et/ou de la position des photons.



Introduction (2)

Saturation 1) temps d'exposition
 2) et 3) flux de photons

Même type de “capteur” → utilisation très différente (ex : diode)

Inversement : détecteurs très différents → utilisation similaire
(ex : chambre à ionisation et diodes en mode courant)

Rôle de l'électronique de détection crucial pour la performance
du détecteur (+ aspects financiers) → système de détection

Arrière-plan statistique → quelques rappels



Sommaire

- Détecteurs et leurs caractéristiques
- Probabilités et statistiques des systèmes de détection
- Chaine de comptage : analyse basée sur la hauteur de l'impulsion
- Résolution en énergie
- Détecteurs à scintillation
- Détecteurs à gaz
- Détecteurs semi-conducteurs
- Plaques images
- Conclusions



Détecteurs et leurs caractéristiques

Table 4-2. Properties of common x-ray detectors;
 ΔE is measured as FWHM.

Detector	Energy range (keV)	$\Delta E/E$ at 5.9 keV (%)	Dead time/event (μs)	Maximum count rate (s^{-1})
Gas ionization (current mode)	0.2–50	n/a	n/a	10^{11a}
Gas proportional	0.2–50	15	0.2	10^6
Multiwire and microstrip proportional	3–50	20	0.2	$10^6/\text{mm}^2$
Scintillation [NaI(Tl)]	3–10,000	40	0.25	2×10^6
Energy-resolving semiconductor	1–10,000	3	0.5–30	2×10^5
Surface-barrier (current mode)	0.1–20	n/a	n/a	10^8
Avalanche photodiode	0.1–50	20	0.001	10^8
CCD	0.1–70	n/a	n/a	n/a
Superconducting	0.1–4	< 0.5	100	5×10^3
Image plate	4–80	n/a	n/a	n/a

^a Maximum count rate is limited by space-charge effects to around 10^{11} photons/s per cm^3 .

Quels détecteurs de rayons X utiles en diffraction ?



Statistiques des systèmes de détection

Espérance, variance, écart-type

Espérance $E(X)$ “moyenne”

Variance $V(X) = E[(X - E(X))^2] = \sigma^2(X)$ (écart-type)

Moment d'ordre n : $E(X^n)$

$V(X) = E(X^2) - E(X)^2$

Facteur de Fano : $F = V(X) / E(X)$



Ugo Fano (1912–2001)



Statistiques des systèmes de détection (2)

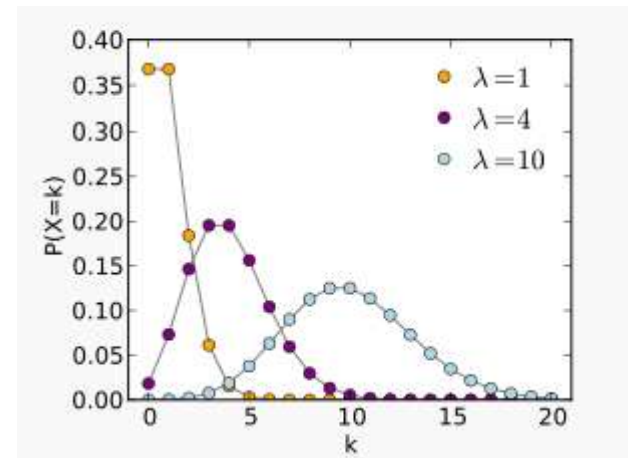
Loi de Poisson de paramètre λ (entier)

$$p(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

$$E(X) = \lambda$$

$$V(X) = \lambda$$

$$F = 1$$



Idee : évènements indépendants les uns des autres (pas de corrélation)



Statistiques des systèmes de détection (3)

Loi normale (Gaussienne)

Densité de probabilité :

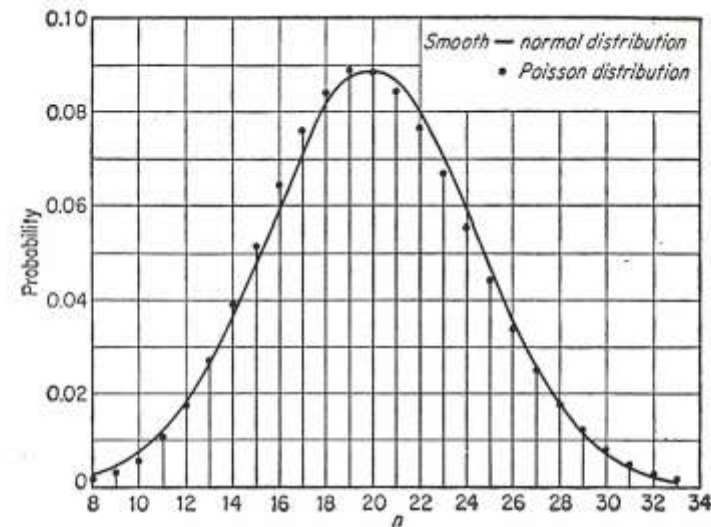
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

$$E(X) = \mu$$

$$V(x) = \sigma^2$$

$$FWHM = \sqrt{8 \ln(2)} \sigma \approx 2.35 \sigma$$

$$F = \frac{\sigma^2}{\mu}$$





Analyse basée sur la hauteur de l'impulsion

Idée : particule \rightarrow ionise gaz dans un champ électrique

1 particule d'énergie E : un nombre moyen \bar{N} de paires ion-électrons

$$E = \bar{N} \varepsilon$$

ε énergie moyenne pour créer une paire ion-électron (supérieure à l'énergie d'ionisation du gaz)

Distribution de N : statistique de Fano

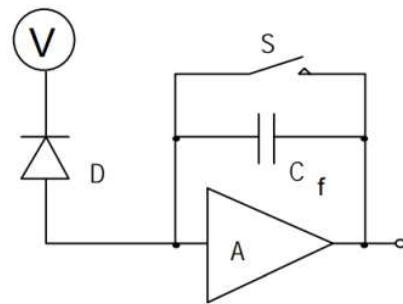
$$V(N) = F \frac{\bar{N}}{E} = F \frac{E}{\varepsilon} \quad \text{avec} \quad F \approx 0.25 \quad \Delta E(FWHM) = 2.35 \sqrt{F.E.\varepsilon}$$

Semi-conducteurs : $F \approx 0.1$

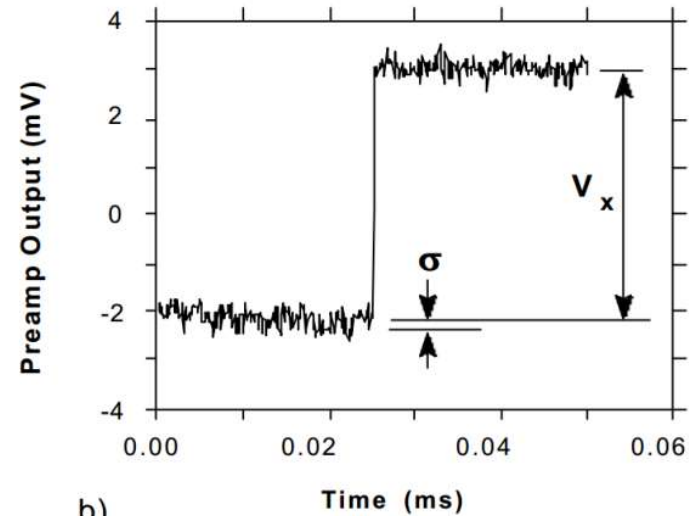
Meilleur qu'une loi de Poisson !



Analyse basée sur la hauteur de l'impulsion (2)



a)



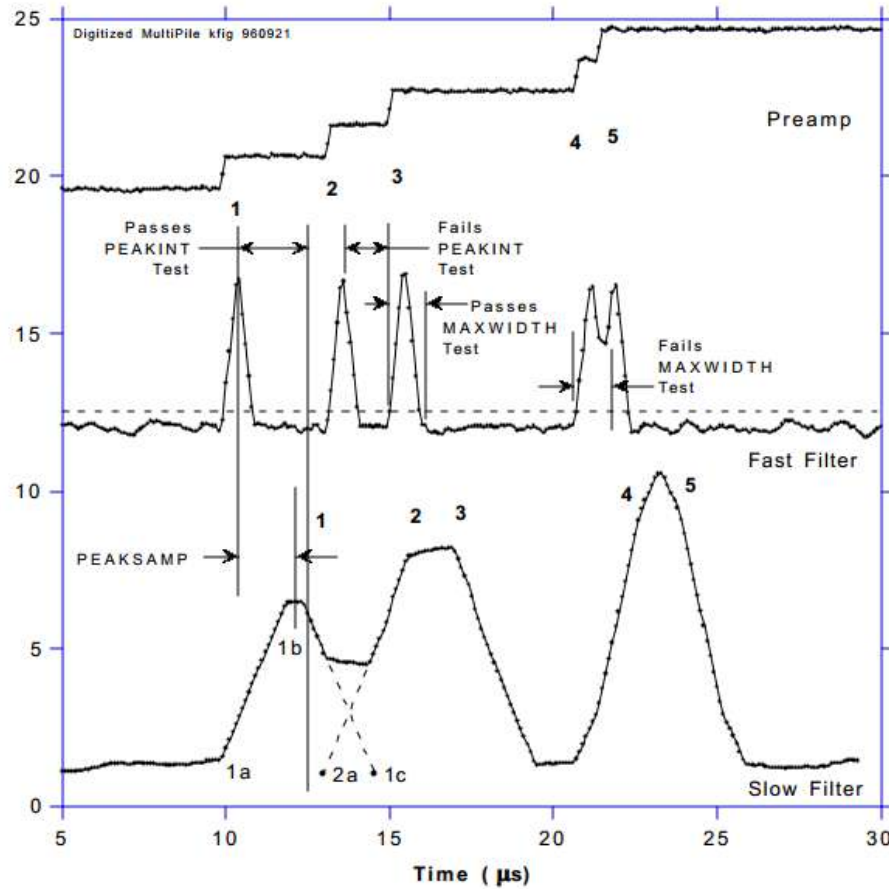
b)

$$V_x \propto Q_x \propto N \quad N \approx \frac{E}{\varepsilon} \quad \text{donc} \quad V_x \propto E$$

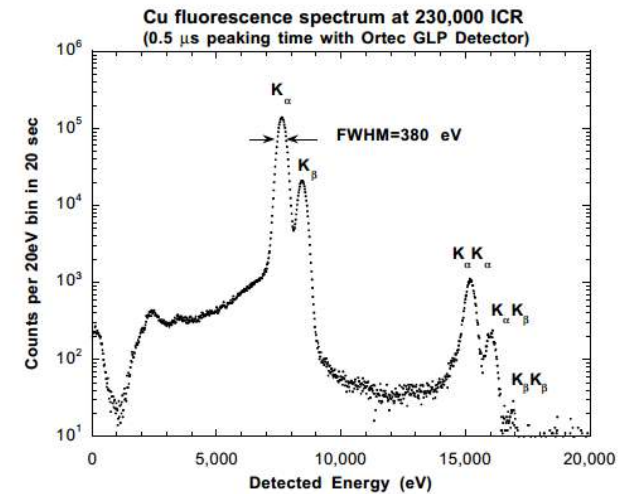
Hauteur de l'impulsion directement proportionnelle à l'énergie du photon



Analyse basée sur la hauteur de l'impulsion (3)



→ Spectre = histogramme
 → SCA/MCA suivant le type d'application (SCA pour la DRX)





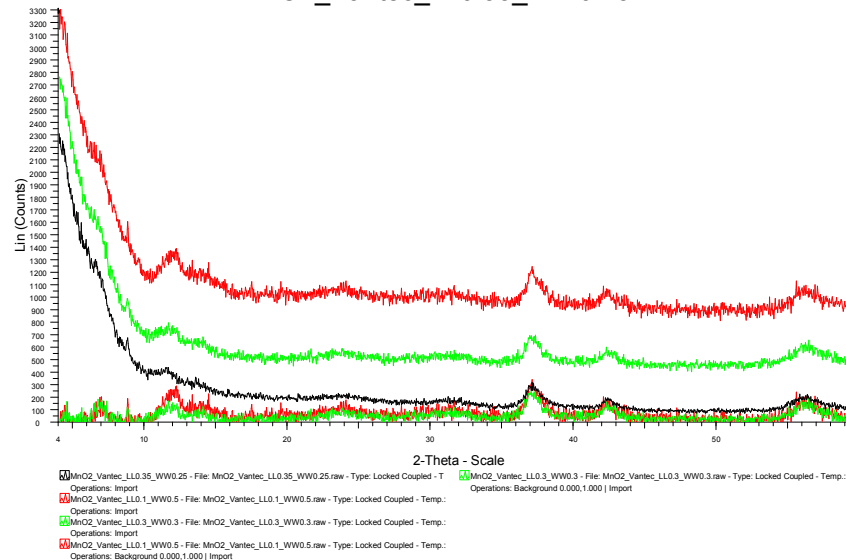
Résolution en énergie

En quoi est-ce important ?

$$\left(\frac{S}{N}\right)^2 = \frac{N^G \Delta t}{1 + \left(\frac{N^B}{N^G}\right)} \quad \text{avec} \quad N^T = N^G + N^B$$

Un fond continu important dégrade rapidement le rapport signal/bruit
Fond continu : diffusion élastique + Compton + fluorescence
Discrimination en énergie → éliminer la fluorescence.

MnO₂_Vantec_LL0.35_WW0.25





Détecteurs à scintillation

Principe : utilisation d'un scintillateur ("phosphore") → photons UV ou visible → amplification et détection de ces photons (PM, diodes, APD, SiPM, CCD...)

Avec PM : utilisé exclusivement en mode de comptage (PHA)

Avantages :

- grande robustesse si bien utilisé, entretien quasi nul
- bonne efficacité à haute énergie
- résolution temporelle de moyenne à bonne (600 ps dans certains cas, mais 250 ns pour NaI(Tl))
- assez bonne gamme dynamique (taux de comptage max 10^5 – 10^6)

Inconvénients:

- mauvaise résolution en énergie
- moins efficace que d'autres détecteurs à basse énergie
- fragile si mal utilisé (dégâts d'irradiation dans le scintillateur)



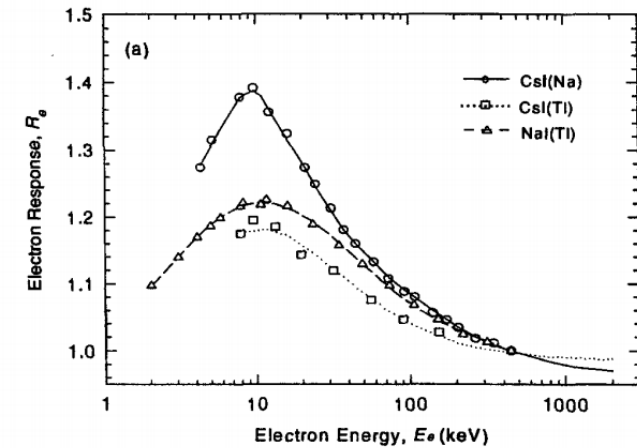
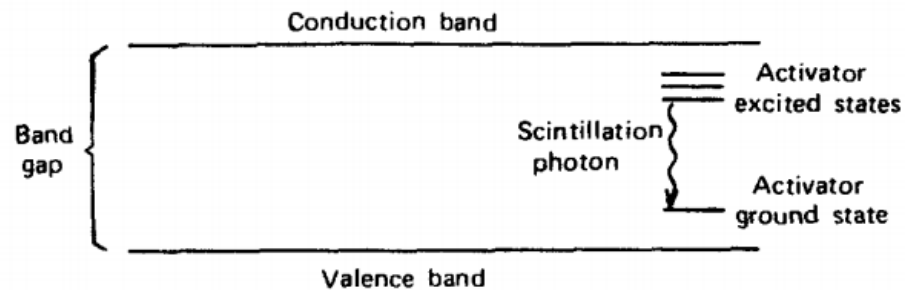
Détecteurs à scintillation (2)

Scintillateurs utilisés en diffraction : scintillateurs solides dopés

Sels dopés : NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na)...

GdO₂S (Tb)

Scintillateurs rapides dopés au Ce : Gd₂SiO₅, YAP, YAG...

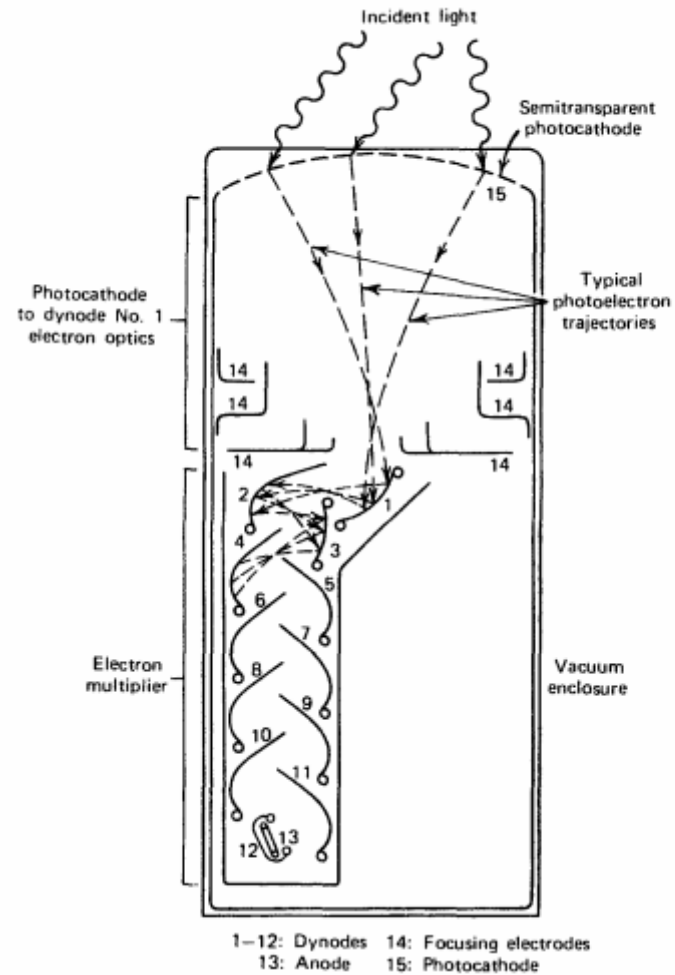




Détecteurs à scintillation (3)

Tube photomultiplicateur:

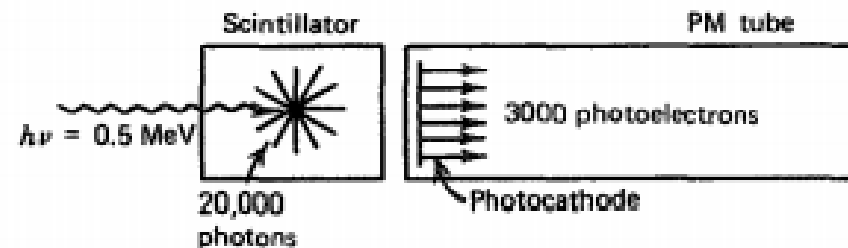
Nbre electrons produits
proportionnel au nombre de
photons détectés





Détecteurs à scintillation (4)

Résolution en énergie



$$\varepsilon \approx \frac{E}{N} \approx 170 \text{ eV}$$

On suppose $F=1$ (loi de Poisson)

$$\text{À } 8 \text{ keV} \quad \frac{\Delta E}{E} = 2.35 \sqrt{\frac{F \cdot \varepsilon}{E}} \approx 34\%$$

Ce type de détecteur a intrinsèquement une mauvaise résolution en énergie



Détecteurs à gaz

Principe :

- gaz ionisé dans un champ électrique → collecte des paires ions/électrons
- détection en mode courant ou mode de comptage suivant les cas

Configurations courantes : parallélépipède (électrodes forment deux plaques //) ou bien en tube.

Fenêtres adaptées à la gamme énergétique (Be, polymères etc... pour les plus basses énergies)

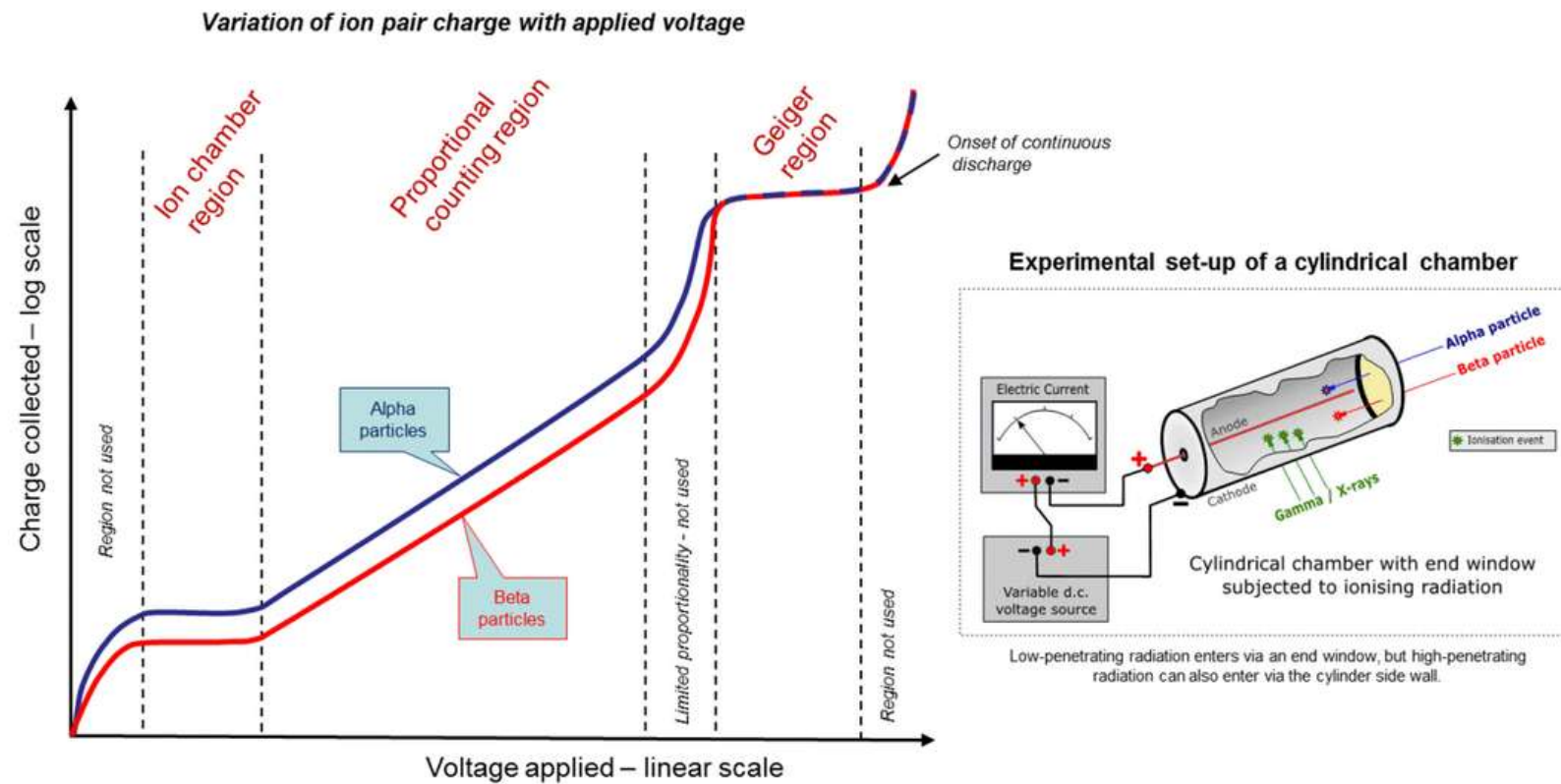
Amplification +/- grande suivant gradient de potentiel :

- Chambre à ionisation
- Compteur proportionnel
- Détecteur de Geiger-Müller



Détecteurs à gaz (2)

3 types de détecteurs en fonction du gradient de potentiel électrique



DS



Chambre à ionisation

- Charges collectées mais non amplifiées
- Utilisée en mode courant
- Importance historique (le détecteur du spectromètre de Bragg)
- Utile pour mesurer un flux de photons (rayonnement synchrotron)
- Très utile aussi en radioprotection pour mesurer une dose absorbée car le courant mesuré est directement proportionnel à celle-ci

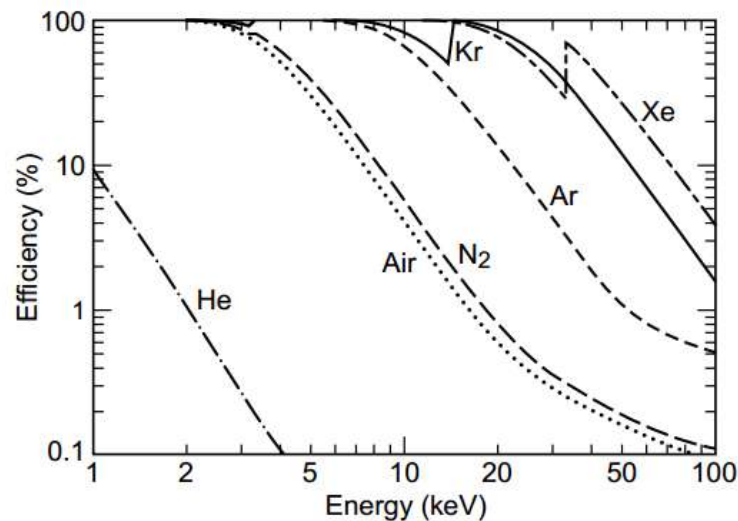


Fig. 4-10. Efficiency of a 10-cm-long gas ionization chamber as a function of energy, for different gases at normal pressure.

Table 4-3. Average energy required to produce an electron-ion pair in several gases

Element	Energy (eV)
Helium	41
Nitrogen	36
Air	34.4
Neon	36.3
Argon	26
Krypton	24
Xenon	22



Chambre à ionisation (2)

Utilisée en mode courant :

- Avantages :

- taux de comptage limité uniquement par les effets espace-charge et peut être très important : 10^{11} photons.s⁻¹.cm⁻³
- peut fonctionner à des énergies élevées

- Inconvénients :

- mesure relativement délicate (courant mesuré très faible), surtout si le flux de photons est faible
- attention également aux effets de recombinaison (H₂O....)
- détecteur assez volumineux, peu adapté à un appareil de laboratoire
- pas de résolution en énergie



Compteur proportionnel

Souvent de forme cylindrique pour avoir un gradient de champ électrique suffisamment important : les avalanches se produisent essentiellement à proximité de l'anode

Gaz utilisé : le plus souvent un gaz rare + 10-20% d'un "quench gas"
Ex : Xe + 10% CO₂ Ar + 15% C₂H₆

Toujours utilisé avec une chaîne de comptage (PHA)



Compteur proportionnel (2)

Resolution en énergie :

Un facteur additionnel b dû à la fluctuation de la multiplication des charges

$$\frac{\Delta E}{E} = 2.35 \sqrt{\frac{(F + b)\varepsilon}{E}} \approx 11\% \quad \text{pour Ar à 8 keV}$$

Table 6.2 Resolution-Related Constants for Proportional Gases

Gas	W (eV/ion pair)	Fano Factor F		Multiplication Variance b	Energy Resolution at 5.9 keV	
		Calculated ^a	Measured		Calculated ^b	Measured
Ne	36.2	0.17		0.45	14.5%	
Ar	26.2	0.17		0.50	12.8%	
Xe	21.5		≤ 0.17			
Ne + 0.5% Ar	25.3	0.05		0.38	10.1%	11.6%
Ar + 0.5% C ₂ H ₂	20.3	0.075	≤ 0.09	0.43	9.8%	12.2%
Ar + 0.8% CH ₄	26.0	0.17	≤ 0.19			
Ar + 10% CH ₄	26 ^c			0.50	12.8%	13.2%

^aFrom Alkhazov et al.²⁰

^bGiven by $2.35[W(F + b)/5900 \text{ eV}]^{1/2}$ [see Eq. (6.22)].

^cFrom Wolff.⁵⁰

Source: Adapted from Sipila.⁵⁷



Compteur proportionnel (3)

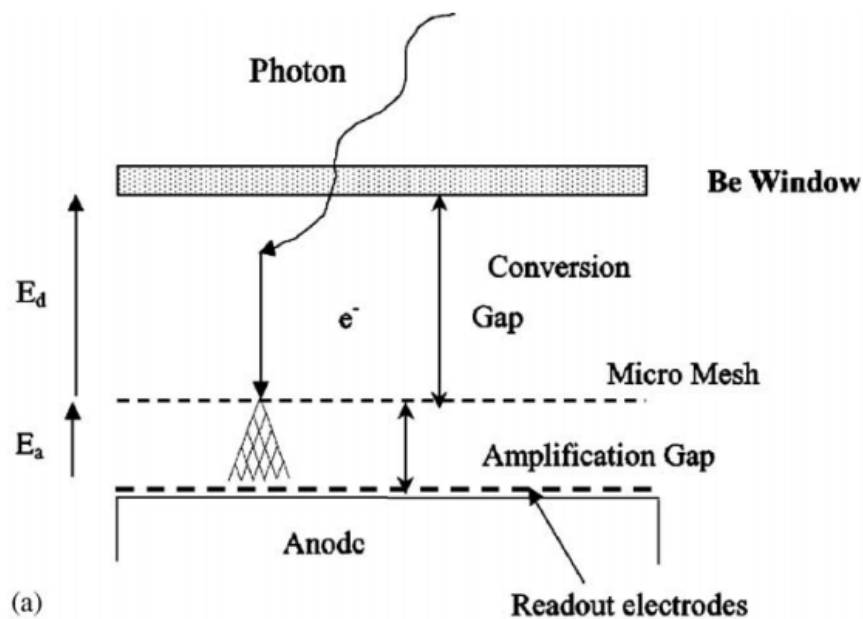
- Avantages :
 - bonne gamme dynamique, comparable à celle d'un scintillateur
 - résolution en énergie intéressante, mais pas exceptionnelle

- Inconvénients :
 - détecteur scellé : il faut le remplir à nouveau
 - rendement diminue assez rapidement à haute énergie (pour un détecteur d'une taille raisonnable)



Chambres proportionnelles à fils ou à bandes

- Compteurs proportionnel 1D ou 2D
- Formes variées (linéaire, “banane”, plat, incurvé...)
- Localisation grâce à mesure du décalage temporel des impulsion
- Possibilité de résolution en énergie en mesurant la hauteur des impulsions, avec des résultats comparables aux compteurs proportionnels

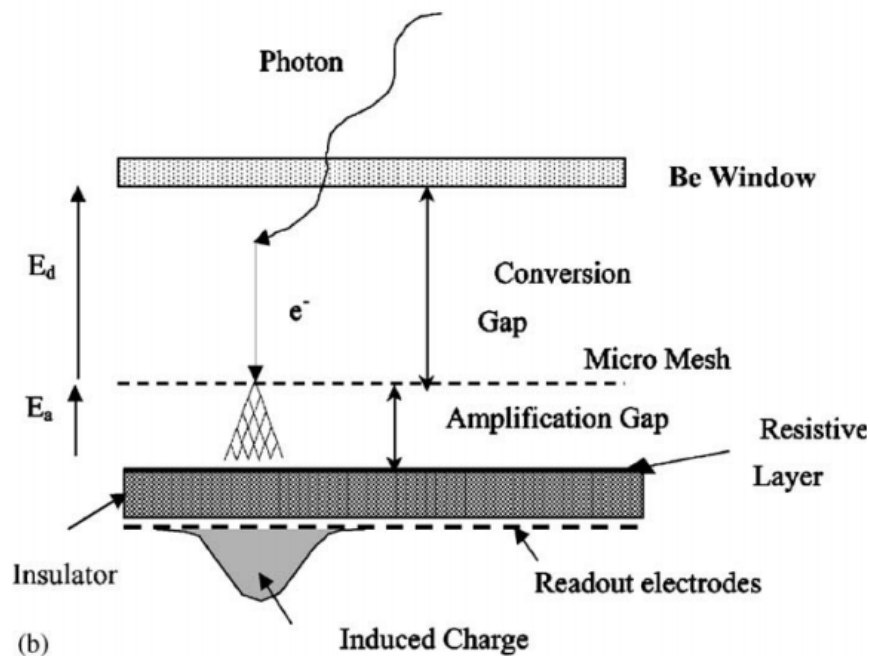




Chambres proportionnelles à fils ou à bandes (2)

Résolution spatiale

- bonne à 8 keV
- se dégrade assez rapidement pour $E > 17$ keV
 - effet de parallaxe : profondeur de pénétration plus élevée
 - diffusion Compton





Chambres proportionnelles à fils ou à bandes (3)

- Avantages :
 - bonne gamme dynamique
 - bonne résolution spatiale à 8 keV
 - résolution en énergie intéressante (Vantec 20 % à 8 keV)
 - possibilité de construire des détecteurs de grande taille

- Inconvénients :
 - détecteur scellé : il faut le remplir à nouveau (Vantec : 10 ans sans avoir à le faire)
 - rendement et résolution diminuent assez rapidement à haute énergie
 - prix assez élevé

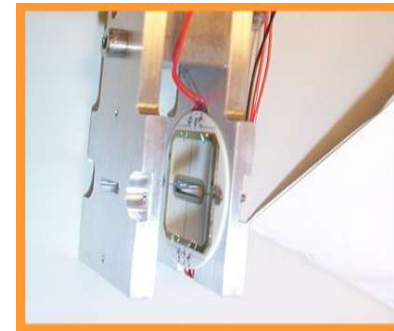


Détecteurs semi-conducteurs

- Une jonction pn
- Une polarisation inverse
- La zone active est à l'interface de cette jonction (zone de déplétion)
- Pour augmenter le volume cette zone active, on utilise une structure possédant une zone non dopée (intrinsèque) entre les deux (diode p-i-n)
- Utilisation en mode courant (analogue à une chambre à ionisation) ou bien en comptage.
- Si on augmente la tension de polarisation, on peut créer des avalanches (APD) ou même atteindre le régime de Geiger-Müller (SiPM)
- Analogie est forte entre les paires ion-électron des gaz et les paires électron-trou des semi-conducteurs, mais pas complète



Diodes Si en mode courant



- Avantages
 - excellente gamme dynamique (10^8)
 - bonne réponse temporelle
- Inconvénients :
 - pas de résolution en énergie
 - faible courant



Détecteur SC en mode de comptage (PHA)

	Gap (eV)	ε (ev)	F	$\Delta E / E @ 8$ keV
Si	1,12	3,65	0,12	1,7 %
Ge	0,67	2,98	0,13	1,6 %
Cd(Zn)Te	1,5	4,5	0,1	1,7 %

résolution intrinsèque $\frac{\Delta E_{\text{int}}}{E} = 2.35 \sqrt{\frac{F \cdot \varepsilon}{E}}$

$$(\Delta E)^2 = (\Delta E_{\text{int}})^2 + (\Delta E_{\text{el}})^2 + (\Delta E_{\text{coll}})^2$$

$(\Delta E_{\text{el}})^2$ limiter la capacité (diode + préampli) + le courant de fuite

$(\Delta E_{\text{coll}})^2$ optimiser la collecte des charges (détecteur multiéléments)



Détecteur SC en mode de comptage (PHA) (2)

- Avantages :
 - bonne résolution en énergie
 - prix parfois très intéressant (mais peut monter très vite)
- Inconvénients :
 - gamme dynamique assez limitée (20 000 cps max avec une diode p-i-n)
 - efficacité détecteurs Si diminue rapidement à haute énergie
 - efficacité Ge excellente à haute énergie mais nécessite refroidissement



Détecteur SC 1D ou 2D en mode de comptage

Appelés détecteurs à bandes (1-D) ou à pixels (2-D)
Fonctionnent souvent à la température ambiante.
La plupart du temps en Si. Quelques modèles Cd(Zn)Te

- Avantages :
 - bonne résolution en énergie (si chaîne d'amplification et de comptage de bonne qualité)
 - très bonne gamme dynamique (grâce à structure "multiéléments")
 - prix parfois intéressant (mais peut monter très vite)
- Inconvénients :
 - taille parfois limitée (zone "morte")
 - prix des détecteurs de grande taille
 - rendement à haute énergie des détecteurs Si chute rapidement
 - Cd(Zn)Te ?



Détecteur CCD et CMOS

- La plupart du temps associés à un scintillateur (“phosphore”), mais l’exposition directe est possible.
 - Souvent associés à un réseau de fibres optiques qui permet de réduire la taille de l’image, mais de moins en moins.
 - Lecture plus rapide sur CMOS que sur CCD
 - Une tension ensuite numérisée dans un ADC, souvent en 16 bits (théoriquement pas une statistique de Poisson).
-
- Avantages :
 - excellent rendement à haute énergie (RS, sources Mo ou Ag)
 - gamme dynamique exploitable, mais pas exceptionnelle
 - Inconvénients :
 - gamme dynamique limitée pour certaines applications
 - pas de résolution en énergie



Plaques images

- développés pour l'imagerie médicale, adaptés à la DRX
- matériau thermoluminescent : BaFBr(Eu²⁺)
- lecture : laser → fibre optique → PM → ADC
- résolution spatiale : 100–200 μm

- avantages :
 - détecteurs de grande taille
 - efficacité proche de 100% (jusqu'à 20 keV)
 - gamme en énergie étendue : 4–80 keV
 - gamme dynamique étendue (10⁵ voire 10⁸)

- inconvénients :
 - pas de résolution en énergie
 - temps de lecture assez long (40–50 s)



Conclusions

- Introduction au monde des détecteurs avec quelques idées directrices
- Pour la diffraction des rayons X, des progrès significatifs ont été faits ces 20 dernières années
- Nous avons maintenant des très bons détecteurs pour travailler à 8keV
- En revanche, une marge de progression importante à plus haute énergie

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

<http://www.cdifx.univ-rennes1.fr/RECIPROCS/>



<http://www.cnrs.fr>



UNIVERSITÉ DE NANTES
<http://www.univ-nantes.fr>