

Journées Techniques Détecteurs IN2P3

De la conception à l'intégration

31 mai & 1^{ER} juin 2021

IJCLab - Orsay



PMT, SiPM, MCP-PMT

Introduction sur les principaux photodétecteurs

Véronique PUILL

PMT, SiPM, MCP-PMT

Introduction sur les principaux photodétecteurs

Principes de base

Efficacité de détection

Gain

Bruit

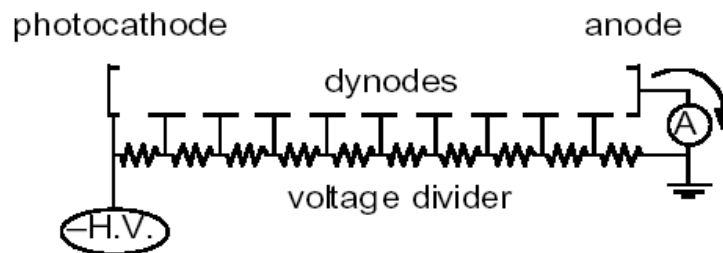
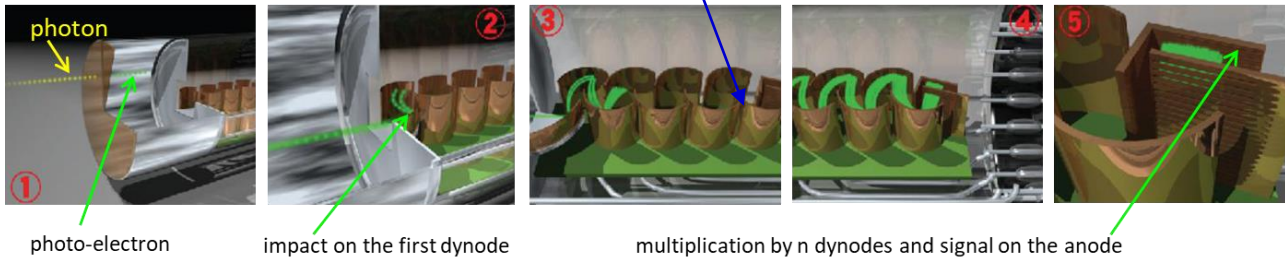
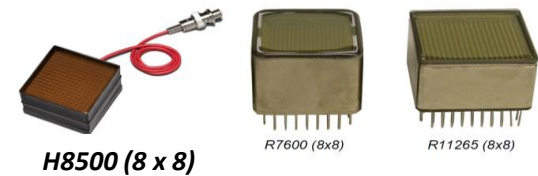
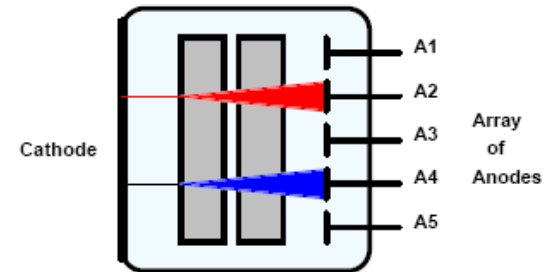
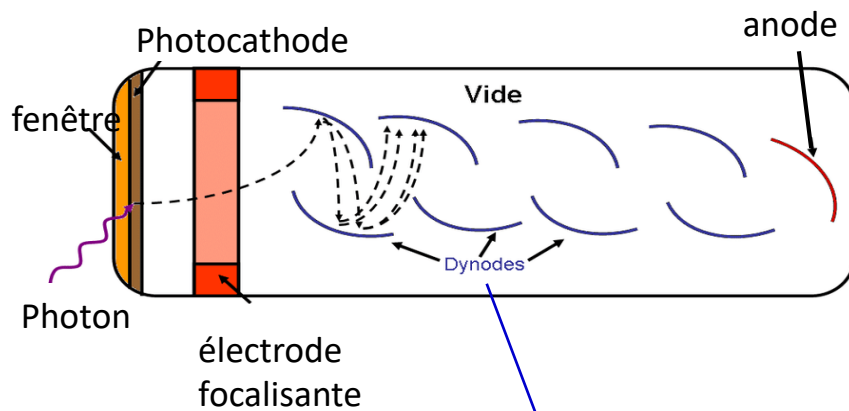
Response temporelle

Linearité

Photomultiplicateurs (PMT)

Chaine de multiplication = dynodes

Modèles multi anodes



Beaucoup de modèles, peu de fournisseurs

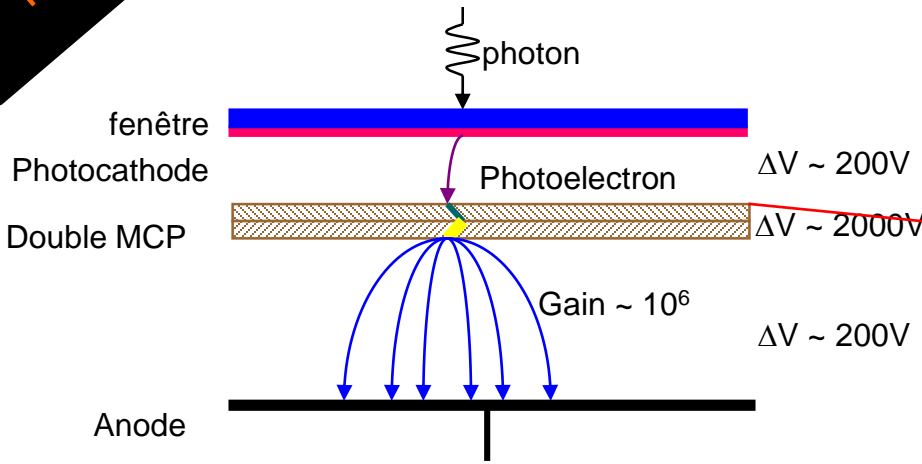


HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

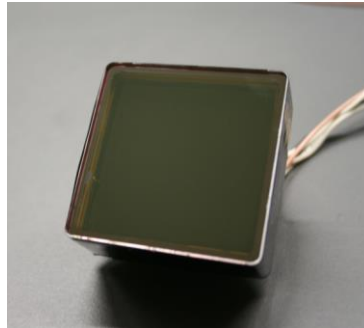
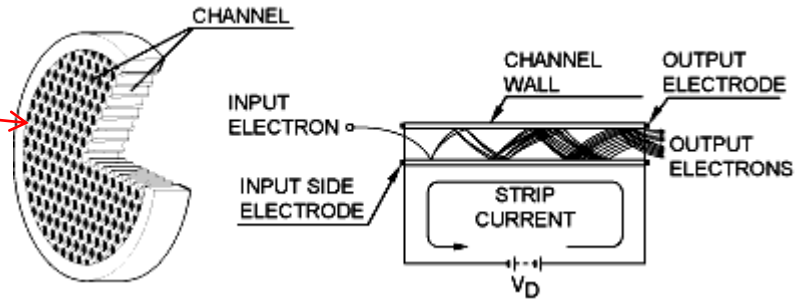
ET Entreprises
electron tubes

Micro Channel Plates PMT: MCP-PMT

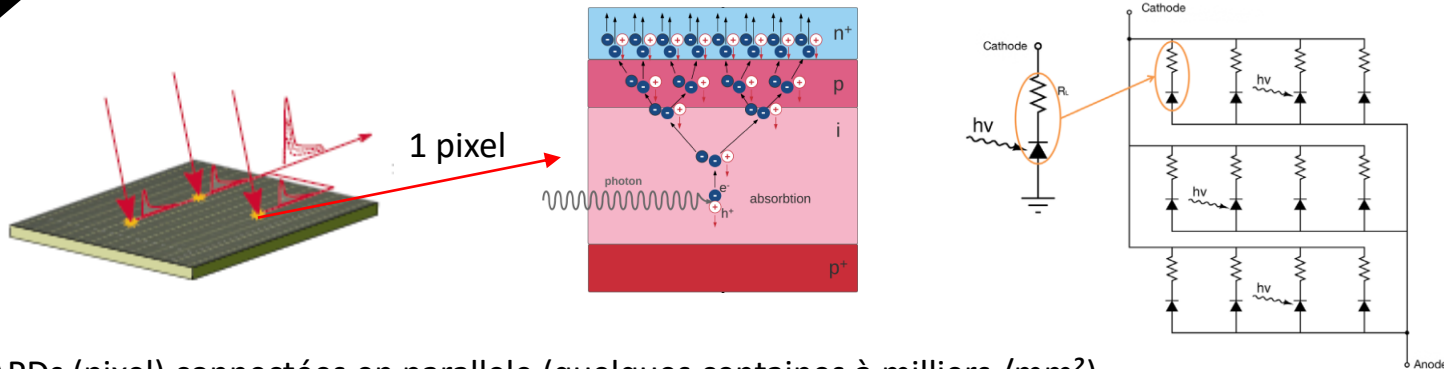
Chaîne de multiplication = Micro Channel Plate



MCP : un reseau de canaux (10-100 μm diameter) appelés pores



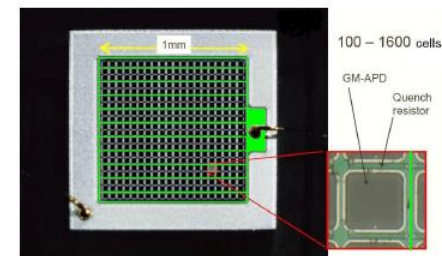
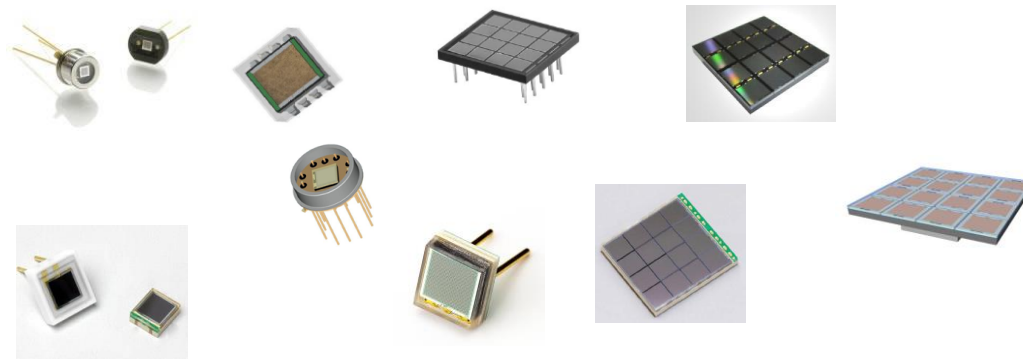
Photomultiplicateur Silicium (SiPM)



- ✓ GM-APDs (pixel) connectées en parallèle (quelques centaines à milliers /mm²)
- ✓ Chaque pixel est alimenté au delà de la tension de claquage ($\Delta V = V_{\text{alim}} - V_{\text{claquage}}$)
- ✓ L'avalanche est "quenchée" par une résistance

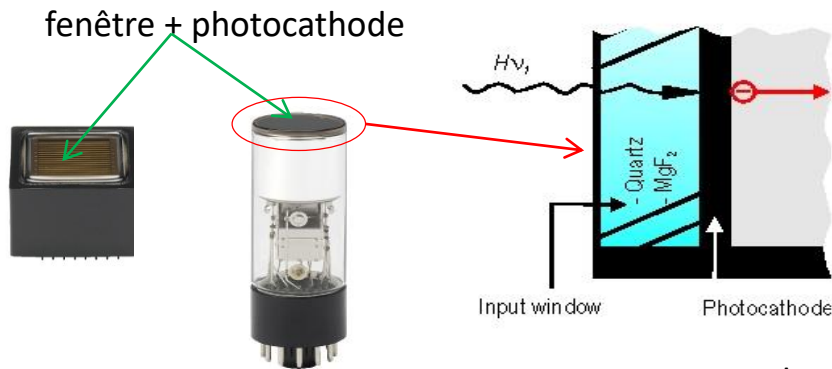
Chaque pixel est indépendant et donne le même signal lorsqu'il est « allumé) par un photon

La charge en sortie du SiPM est proportionnelle au nombre de photons incidents



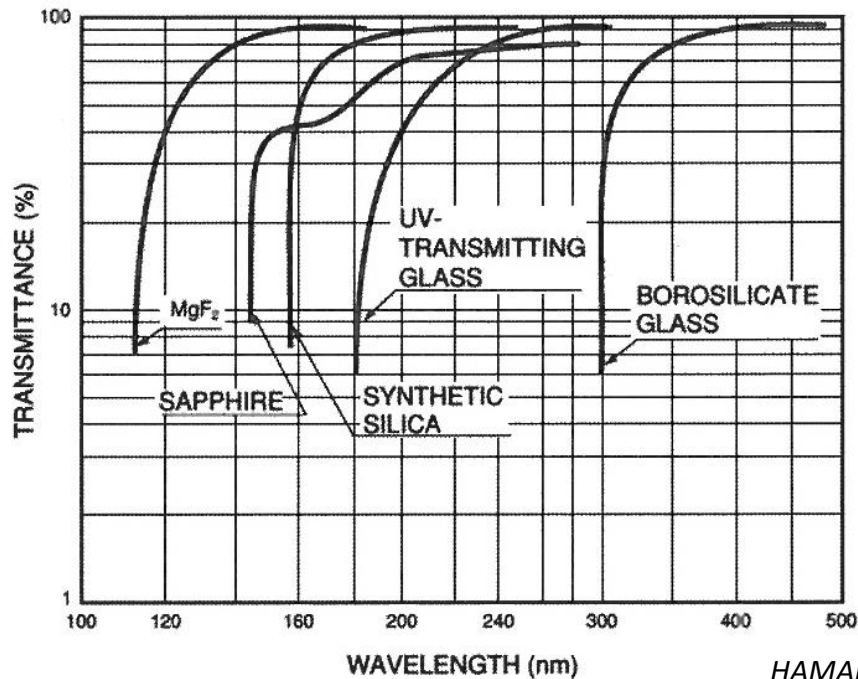
Choix important de fournisseurs : HAMAMATSU (attention : SiPM = MPPC) , FBK, KETEK, AdvanSID, ...

PMT, MCP-PMT : il faut d'abord passer la fenêtre

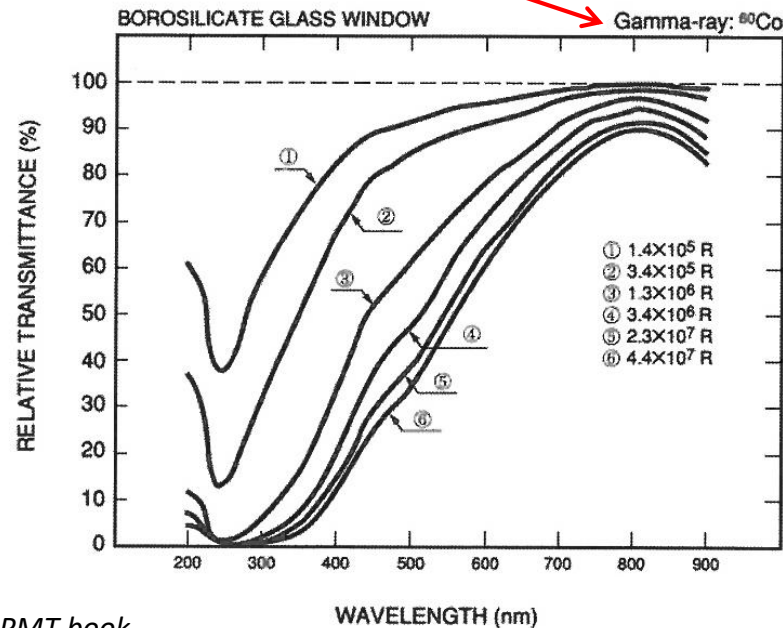


Transmittance de différents types de fenêtre

Le choix de la fenêtre dépend de la longueur d'onde de la lumière et de l'environnement radioactif du détecteur



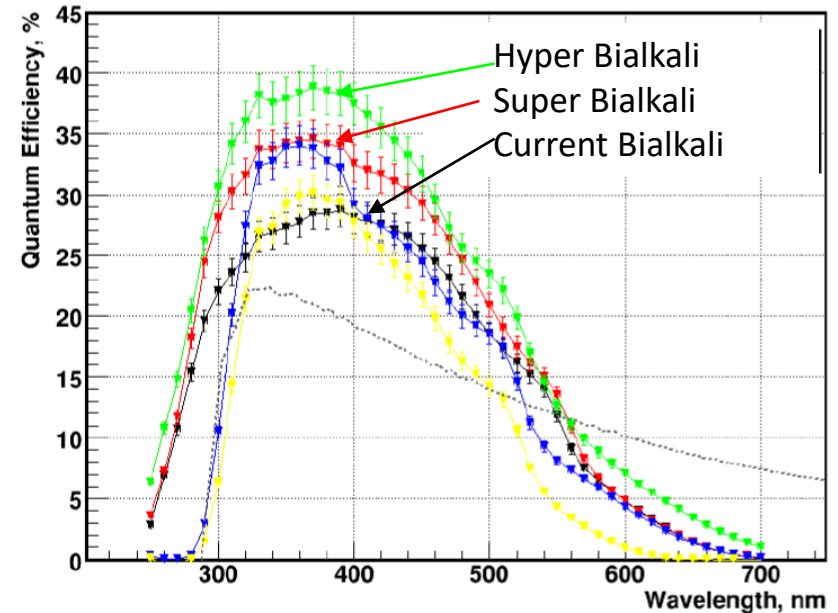
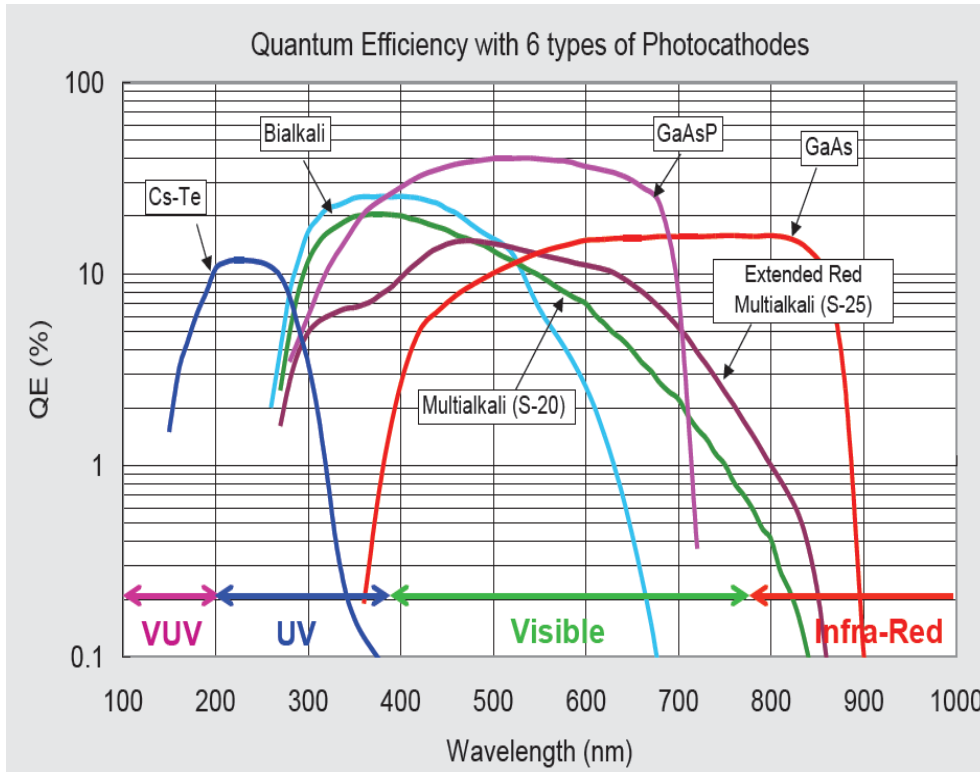
HAMAMATSU PMT book



Efficacité quantique du PMT: depend de la photocathode

Matériaux constituant la photocathode :

- métaux alcalins : Sb, K, Rb, Cs
- composés semiconducteurs : GaAsP, GaAs, InGaAs

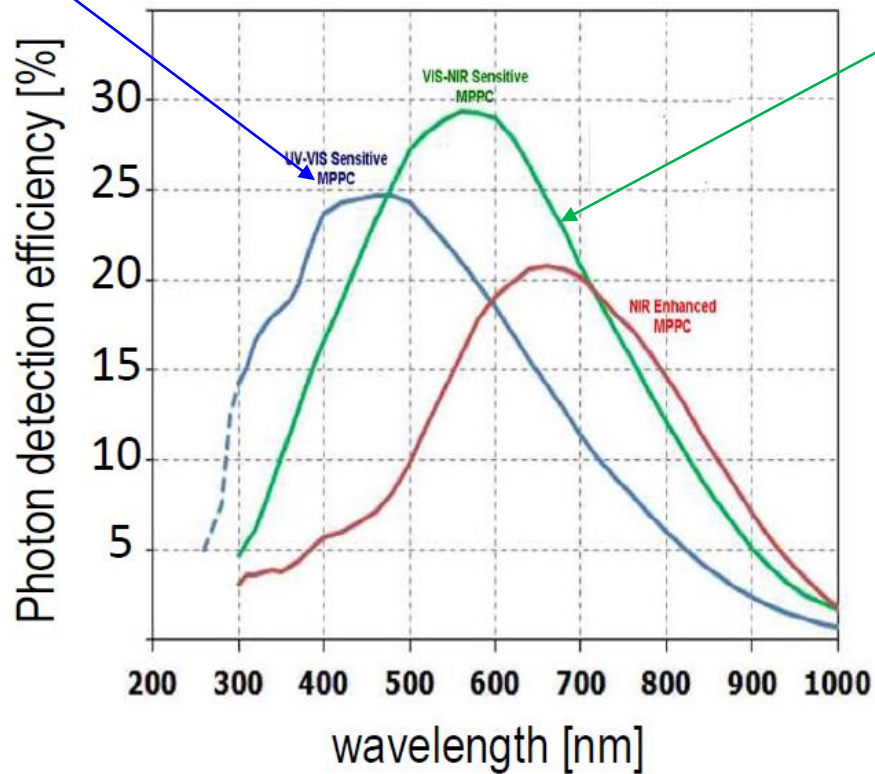
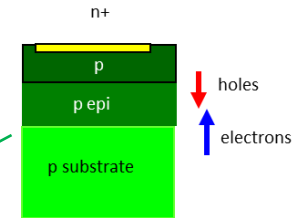
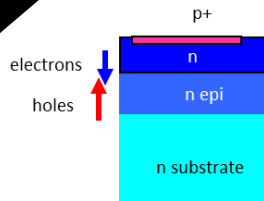


K. Arisaka, IEEE NSS 2012

Efficacité de Photo détection (PDE) du SiPM

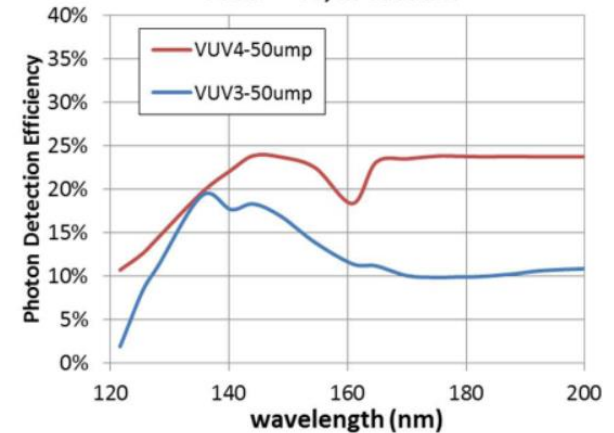
$$PDE = Q_{\epsilon} \cdot P_{\text{trig}} \cdot \epsilon_{\text{geom}}$$

Dépend de la structure interne du détecteur et du facteur géométrique (zones mortes)



VUV MPPC

PDE measurement data
Vover = 4V, in vacuum



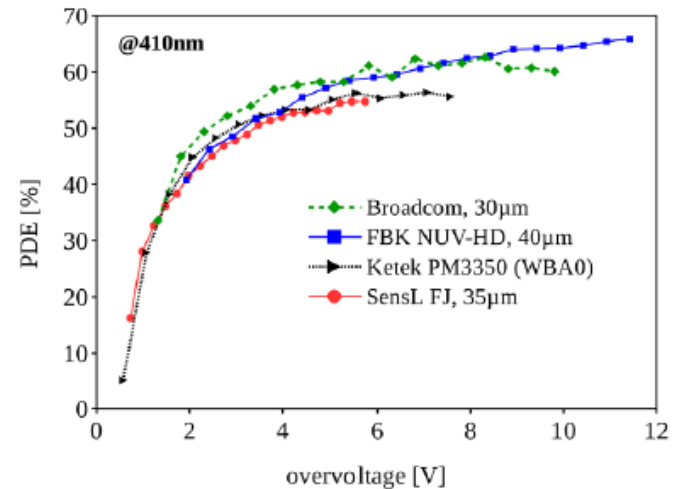
Efficacité de photo détection

PMT

- un grand choix de gamme spectrales de l'UV à l'IR
- dépend de la nature de la fenêtre et de la photocathode
- ne varie pas avec la tension
- la sensibilité peut être ajustée aux besoin selon la photocathode choisie

SiPM

- peu de SiPM sont sensibles dans l'UV et dans le proche IR du fait de leur structure
- PDE varie avec la tension



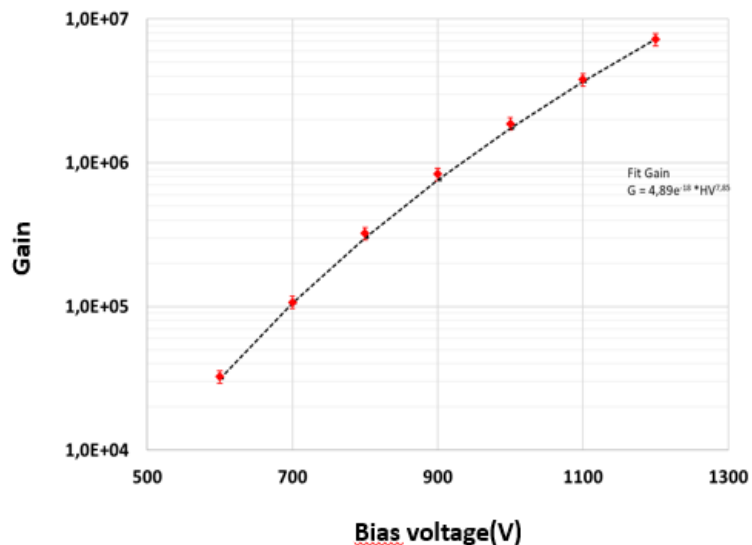
S. Gundacker, Phys. Med. Biol.
65 17TR01

- la sensibilité du détecteur est limitée par le Silicium qui le compose

PMT

- $10^5 < \text{gain} < 10^7$
- le gain dépend du nombre de dynodes et de la tension
- pour un même PMT, le gain peut varier d'un facteur 1000 en fonction de la tension d'alimentation

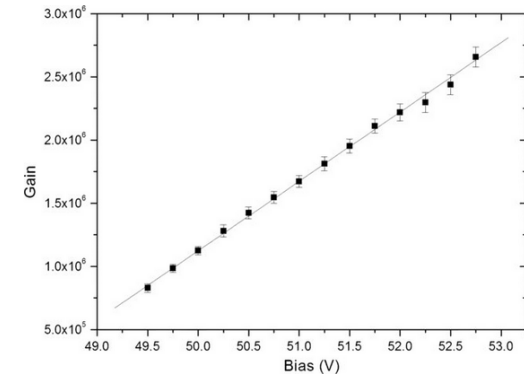
PMT HAMAMATSU R760



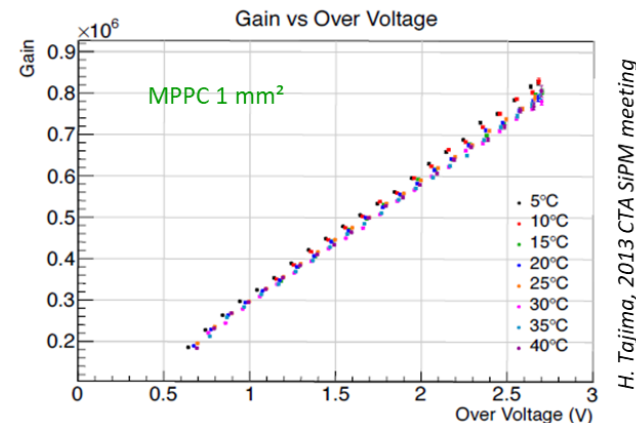
V. Chaumat, private com.

SiPM

- $10^5 < \text{gain} < 10^7$
- le gain dépend de la taille du pixel et de ΔV



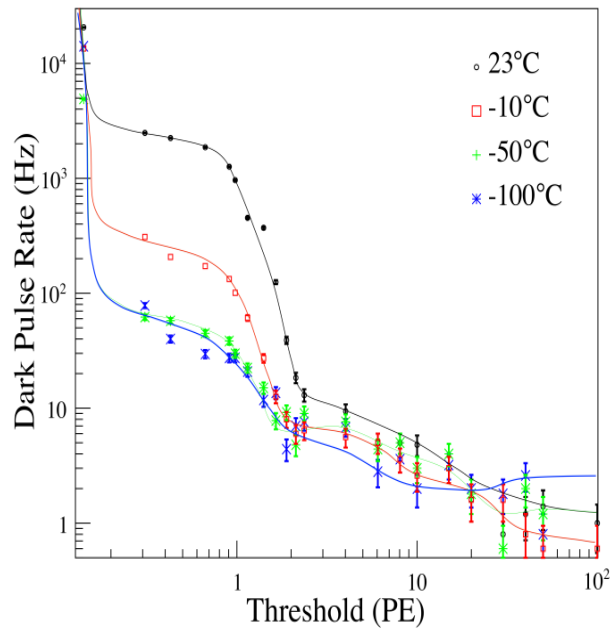
- pour un même SiPM, le gain peut varier d'un facteur 2 à 4 en fonction de ΔV
- le gain ne varie pas avec la température à ΔV fixe



H. Tajima, 2013 CTA SiPM meeting

PMT

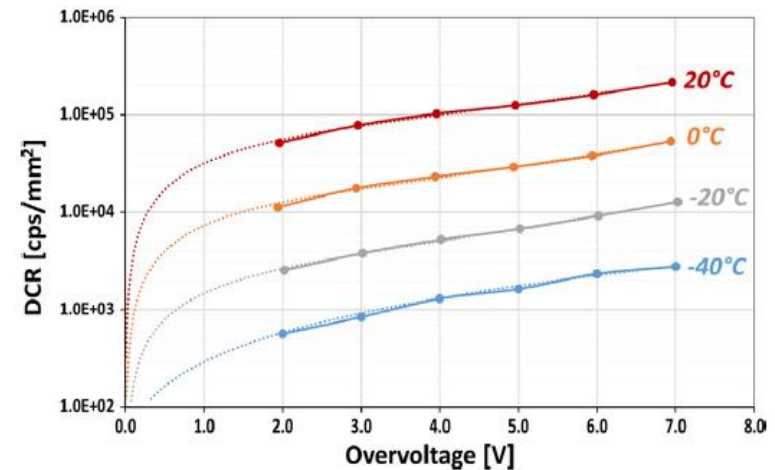
- bruit d'obscurité faible (100 coups/mm²/s)
- le bruit d'obscurité ne dépend que de la température



K. Lung, arXiv:1202.2628v2 [physics.ins-det], 2012

SiPM

- bruit d'obscurité élevé (de 10 à 100 kcoups/mm²/s)
- le bruit d'obscurité varie en fonction de la température et de ΔV



F. Acerbi, NIM A 926 (2019)

Résolution temporelle

TTS (transit time spread)

SPTR : résolution temporelle au photon unique

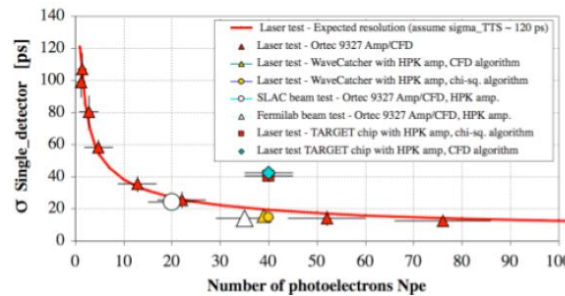
PMT

MCP-PMT

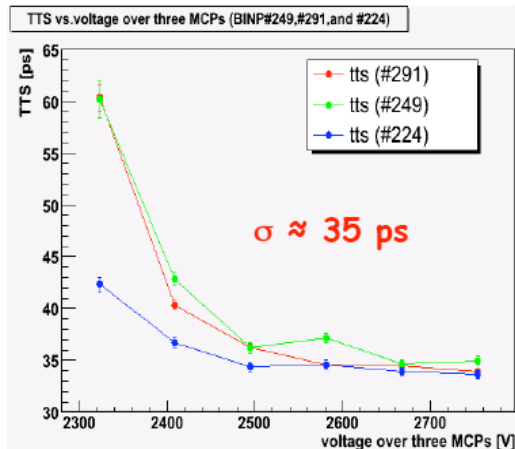
SiPM

- ✓ la résolution s'améliore avec l'augmentation de la tension d'alimentation
- ✓ elle diminue avec le nombre de photons incidents

- TTS dépend de la taille du PMT et de la structure de la chaîne de dynode

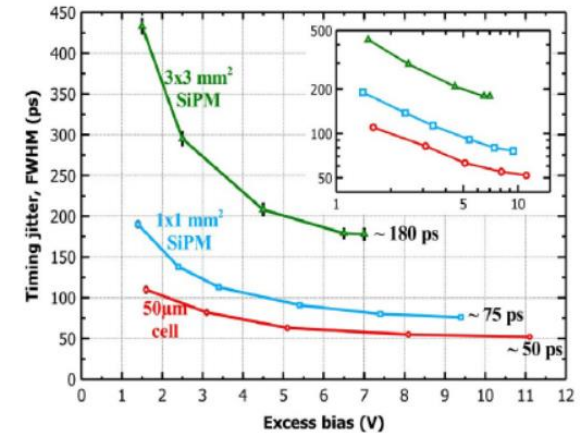


➤ Champion toute catégorie de la SPTR (σ) : moins de 50 ps



A. Yu. Barnyakov, NIMA 598

- la résolution temporelle dépend de la taille du pixel
- elle dépend de la surface du SiPM

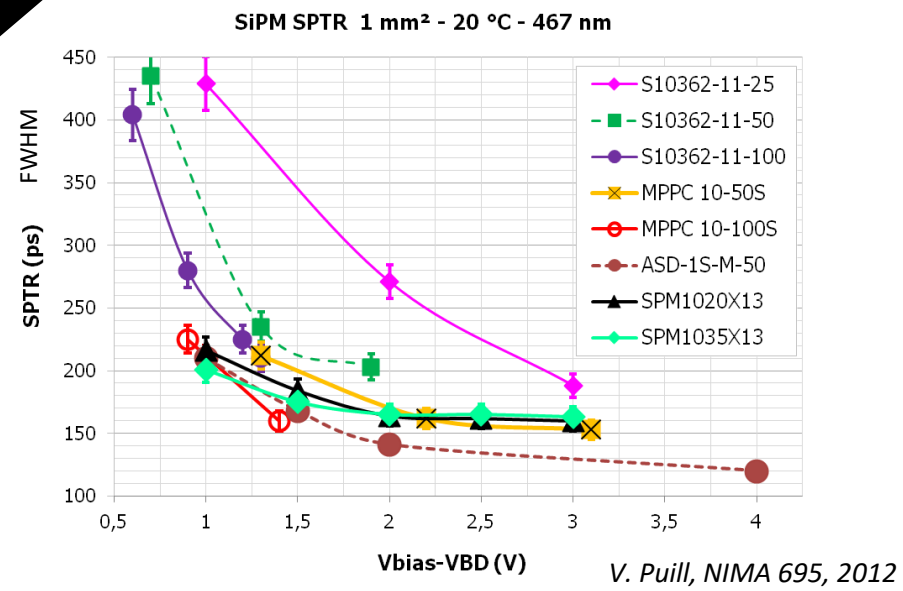


- la SPTR (σ) peut être inférieure à 100 ps

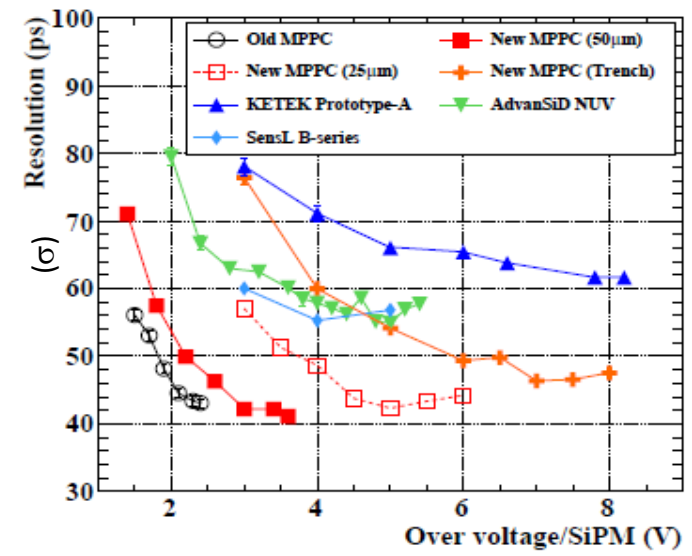
F. Acerbi, IEEE TNS 2014

Résolution temporelle des SiPMs

Single Photoelectron Timing resolution

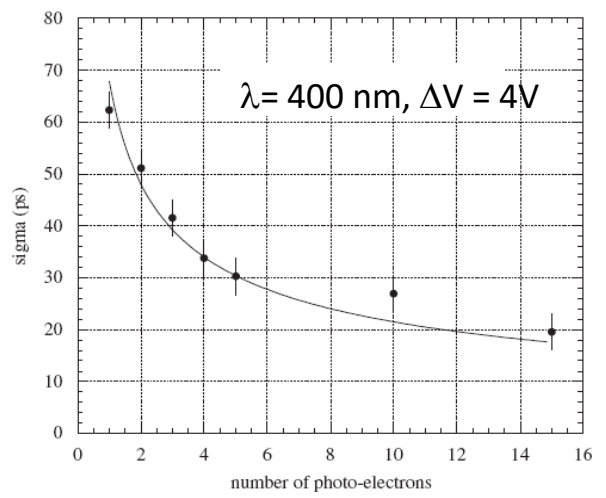


1 mm²

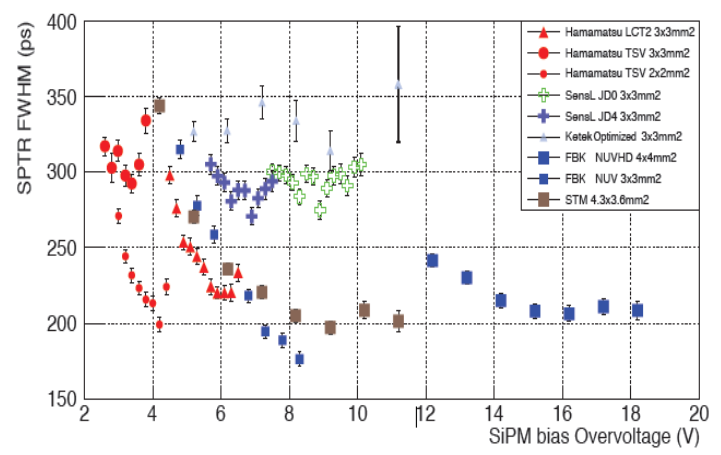


P.W Cattaneo, arXiv:1402.1404v1

Timing resolution as a function of the incident number of photons



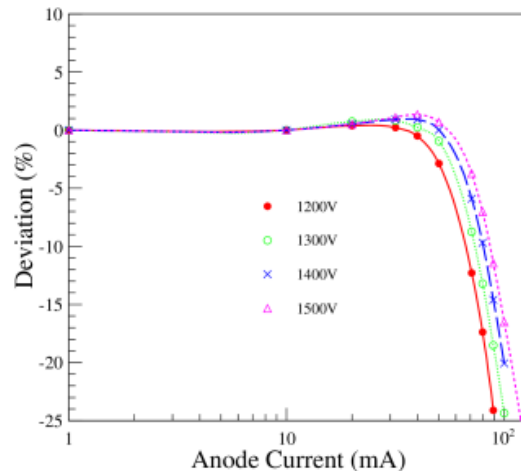
4 to 16 mm²



M.V. Nemallapudi, JINST 11 P10016

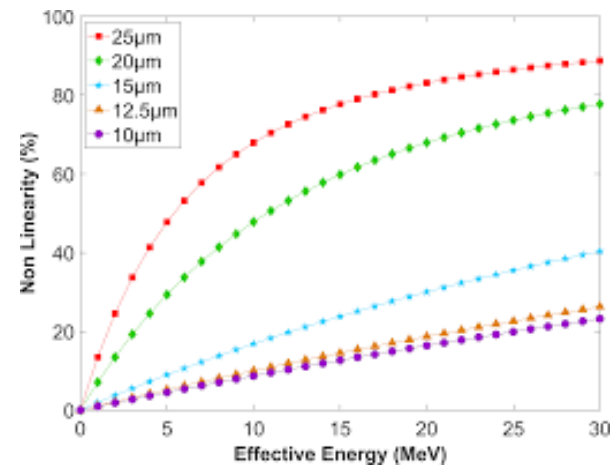
PMT

- dépend du diviseur de tension utilisé (diviseur « boosté » permet de gagner un ordre de grandeur)
- Varie en fonction de la tension d'alimentation



SiPM

- dépend du nombre de pixels (limitation structurelle) et donc de leur taille (pour une même surface couverte)

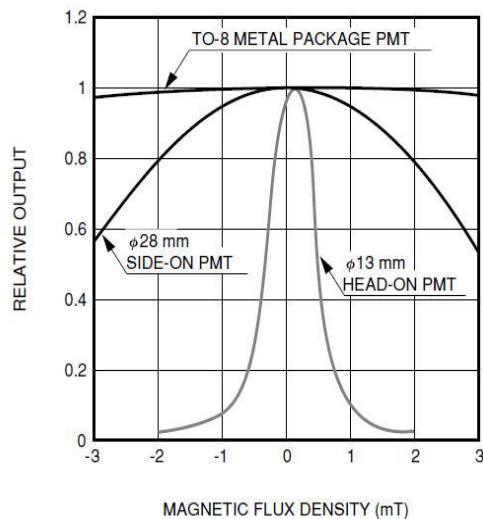


- toute la surface active doit être éclairée pour bénéficier de la plus grande gamme dynamique

Operation des PMT et MCP-PMT dans un champ magnétique

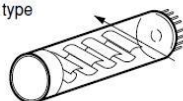
★ earth magnetic field = 30-60 mT

PMT

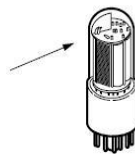


Direction of magnetic field

a) Head-on type



b) Side-on type



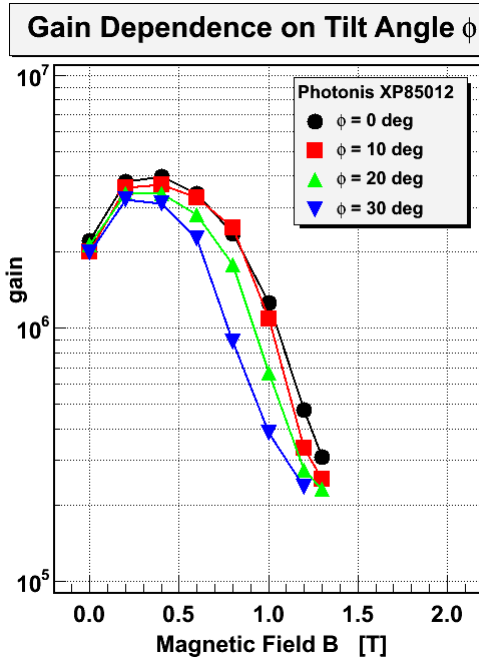
c) TO-8 metal package type



THEV3_1308EA

Figure 13-8: Magnetic characteristics of typical photomultiplier tubes

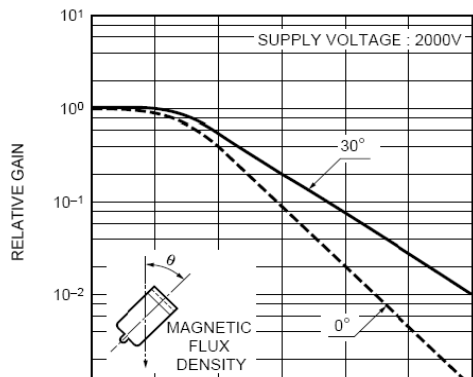
MCP-PMT



Albert Lehmann RICH 2010

PMT très sensible au champ magnétique → blindage nécessaire (μ metal)

HAMAMATSU PMT book



PMT

TPMHB0247EB

Figure 6-25: Gain vs. magnetic flux density

Avantages et inconvénients



PMT

- Gain élevé (10^7), tension entre 1000 et 2000 V
- Bruit d'obscurité faible
- Efficacité quantique élevée
- Bonne résistance aux radiations
- Grandes surfaces ($> 10000 \text{ mm}^2$)
- De nombreuses configurations géométriques
- Coût /unité de surface faible

- Nécessite un temps de chauffe
- Linéarité limitée
- Uniformité de la réponse
- Affecté par le champ magnétique
- Stabilité temporelle
- Gamme dynamique limitée par le diviseur de tension
- Fragile mécaniquement
- Peut être endommagé par l'éclairage ambiant

MCP-PMT

- Gain élevé (10^7)
- Efficacité quantique (20 %)
- Très bonne résolution temporelle (SPTR $< 50 \text{ ps}$)

- Affecté par le champ magnétique
- Fragile
- Très cher (unitaire et par unité de surface)

SiPM

- Gain élevé (10^7), tension $< 100 \text{ V}$
- Détection au photon unique
- Insensible au champs magnétique (jusqu'à 7 T)
- Efficacité quantique élevée (35 % à 410 nm)
- Mécaniquement robuste
- N'est pas endommagé par l'éclairage ambiant
- R&D active et de nombreux fournisseurs
- Prix unitaire faible
- Production de masse à faible coût possible (ex : T2K)

- Bruit d'obscurité élevé à température ambiante pour les grande surface (9 mm^2)
- Dépendance en température du gain
- Résistance aux radiations limités (jusqu'à 10^{12} n/cm^2)
- Gamme dynamique limitée par le nombre de pixels
- Surfaces actives petites
- Peu de configurations géométriques
- Coût /unité de surface élevé