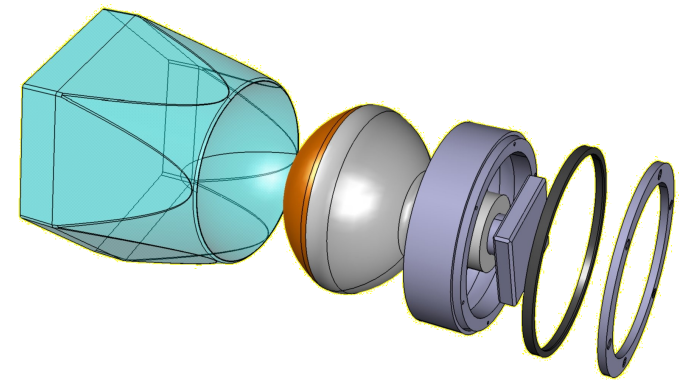
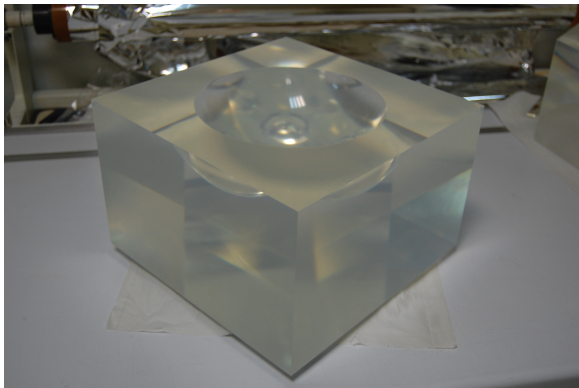


Projet SuperNEMO

Bilan de la R&D Calorimétrie

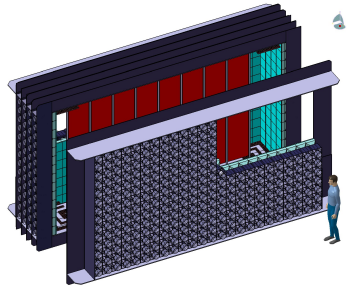


CHAUVEAU Emmanuel
BDI CNRS - Photonis
CEN Bordeaux - Gradignan



JRJC 2009 @ Barbaste

PLAN

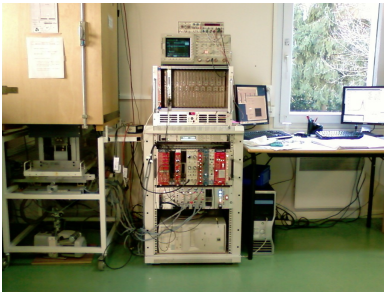


Introduction

Double décroissance bêta

Projet SuperNEMO

Objectif de la R&D Calorimétrie



Bancs de tests aux CENBG

Spectromètre à électrons

Acquisition et méthode d'analyse

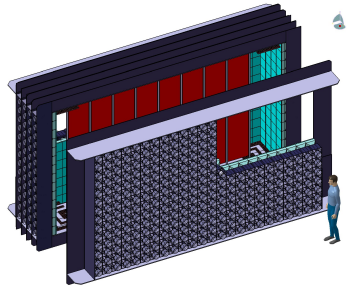


R&D Calorimétrie

R&D Scintillateur

R&D Photomultiplicateur

PLAN

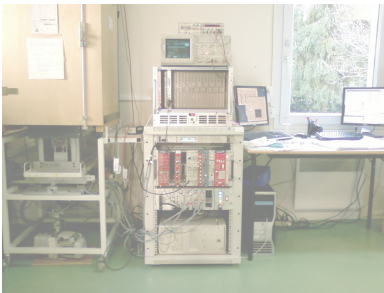


Introduction

Double décroissance bêta

Projet SuperNEMO

Objectif de la R&D Calorimétrie



Bancs de tests aux CENBG

Spectromètre à électrons

Acquisition et méthode d'analyse



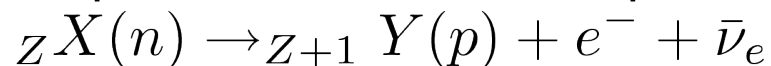
R&D Calorimétrie

R&D Scintillateur

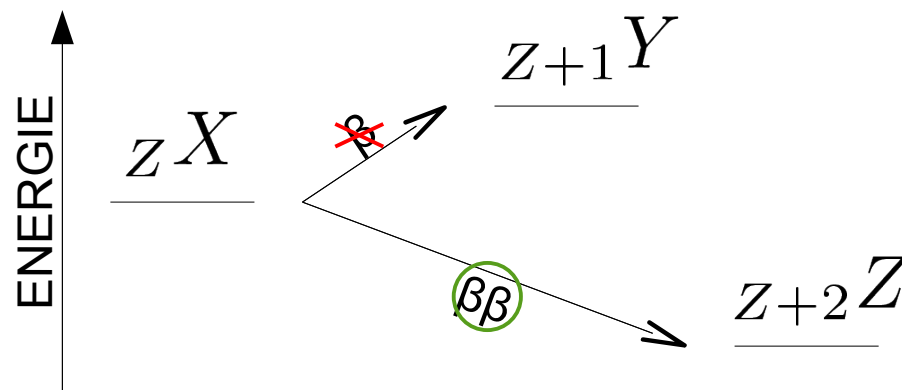
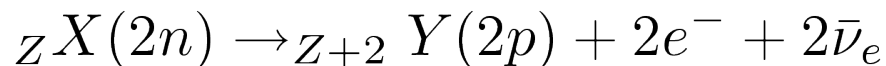
R&D Photomultiplicateur

Double décroissance bêta

simple décroissance bêta β



double décroissance bêta $\beta\beta_{2\nu}$



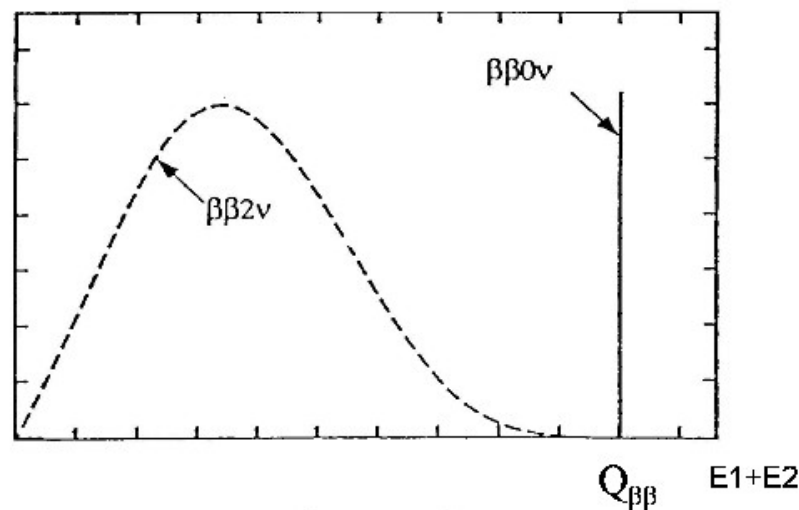
double décroissance bêta sans émission de neutrinos $\beta\beta_{0\nu}$



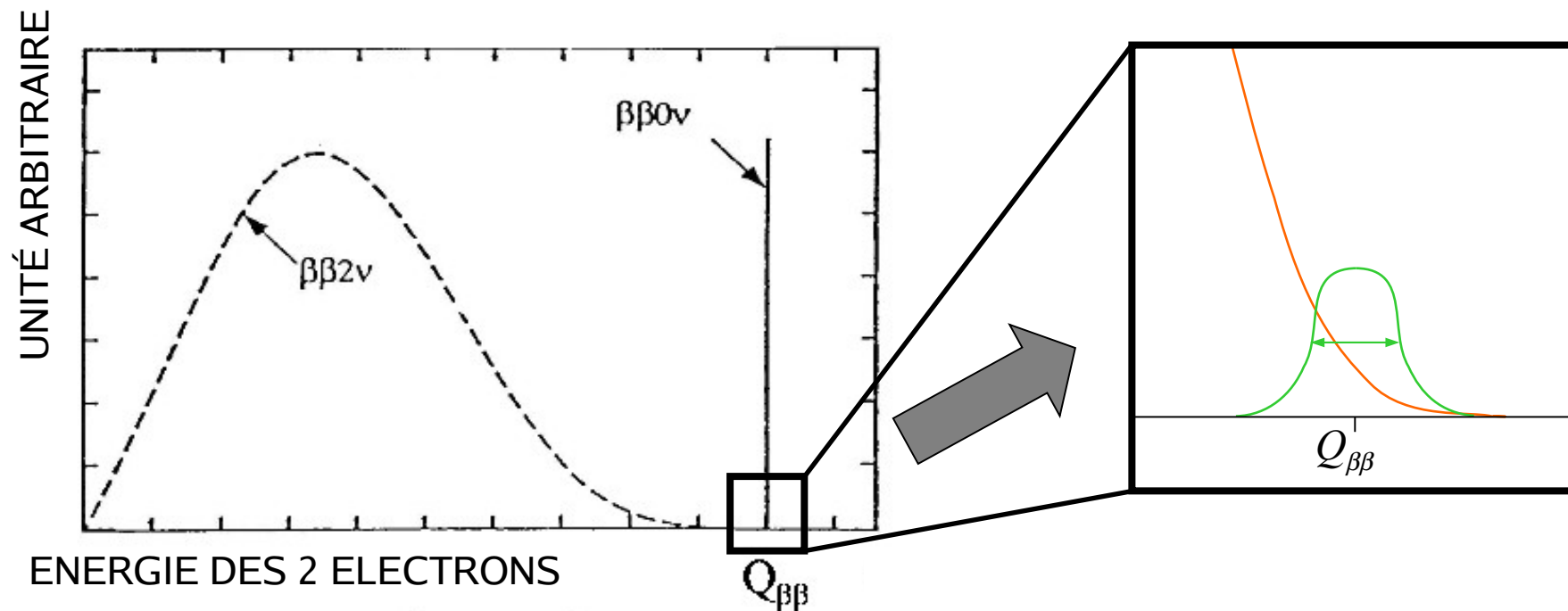
La découverte du processus $\beta\beta_{0\nu}$ impliquerait :

- non conservation L
- neutrino de Majorana $\nu = \bar{\nu}$

$$- \left(T_{1/2}^{\beta\beta_{0\nu}} \right)^{-1} \propto | \langle m_\nu \rangle |^2$$



Contraintes de détection du signal $\beta\beta 0\nu$



la détection correcte des événements $\beta\beta 0\nu$ implique

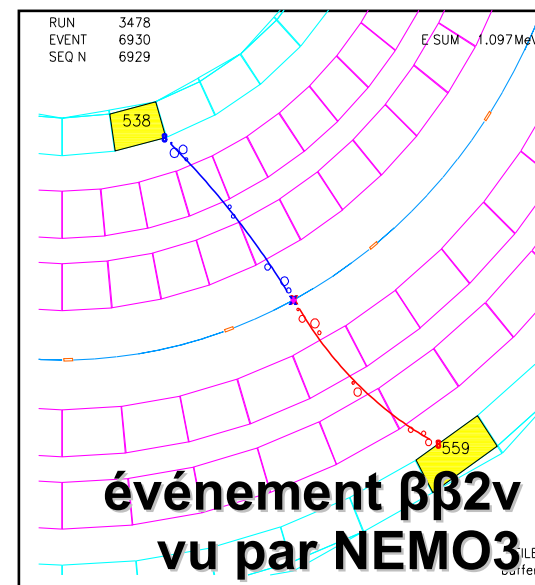
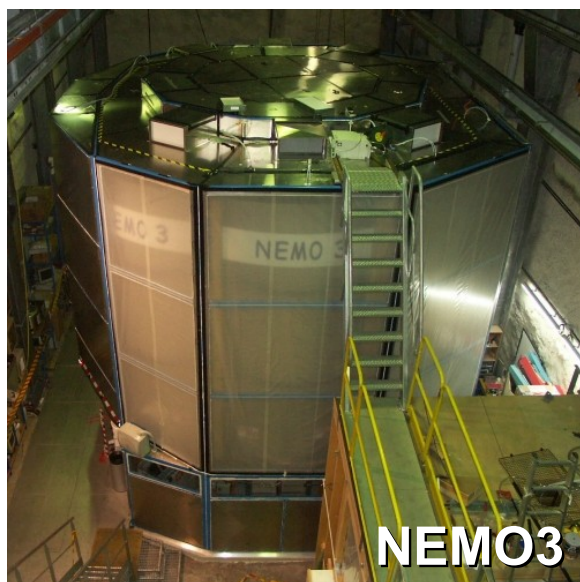
- ▣ un détecteur très bas bruit de fond radioactif
- ▣ un très bonne résolution en énergie du calorimètre

Objectif du projet SuperNEMO

SuperNEMO est le projet successeur de l'expérience NEMO3

OBJECTIF : attendre une sensibilité de ~ 50 meV sur $\langle m_\nu \rangle$
soit une sensibilité $\sim 10^{26}$ ans sur $T_{1/2}^{\beta\beta 0\nu}$

MOYEN : étendre et améliorer la technique de NEMO3 (tracker + calorimètre)
permettant l'identification des électrons provenant de la source $\beta\beta$



De NEMO3 à SuperNEMO

$$T_{1/2} > \frac{\ln 2 N_A \epsilon}{k_{CL} A} \sqrt{\frac{m t}{N_{bdf} R}}$$

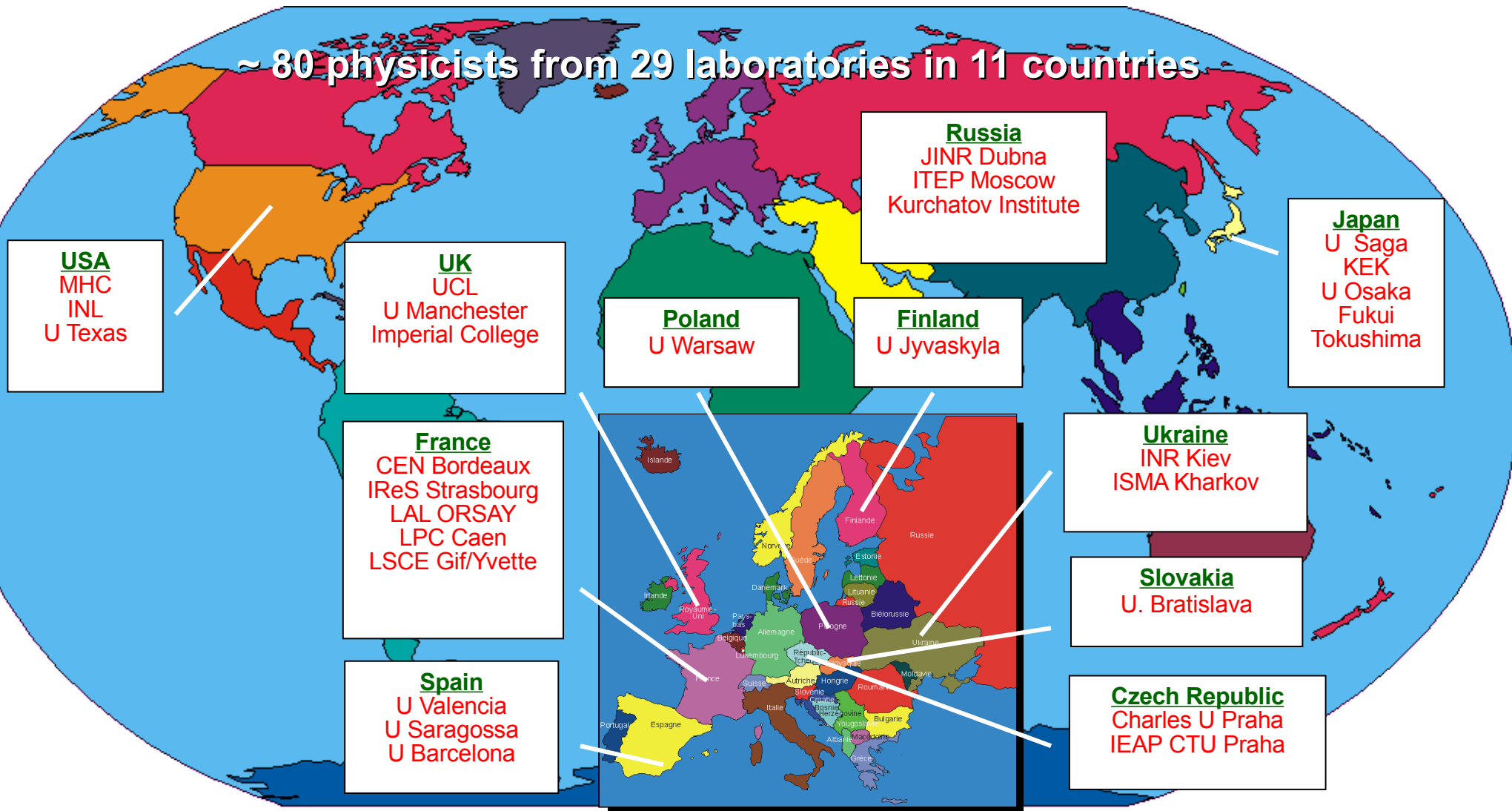
N_A nombre d'Avogadro
 ϵ efficacité de détection
 $m t$ exposition (kg.y)
 k_{CL} facteur indice de confiance
 A masse atomique de l'isotope
 N_{bdf} bruit de fond (keV/kg/y)
 R résolution en énergie (keV)

NEMO3		SuperNEMO
$T_{1/2} > 1.4 \times 10^{24} \text{ y}$ $\langle m \rangle < 390 - 810 \text{ meV}$	sensibilité	$T_{1/2} > 1 - 1.5 \times 10^{26} \text{ y}$ $\langle m \rangle < 43 - 145 \text{ meV}$
7 kg	masse d'isotopes	100 – 200 kg
8 % FWHM @ 3 MeV	résolution du calorimètre	4 % FWHM @ 3 MeV
18 %	efficacité	30 %
$^{208}\text{Tl} < 20 \text{ } \mu\text{Bq} / \text{kg}$ $^{214}\text{Bi} < 300 \text{ } \mu\text{Bq} / \text{kg}$	radiopureté de la source	$^{208}\text{Tl} < 2 \text{ } \mu\text{Bq} / \text{kg}$ $^{214}\text{Bi} < 10 \text{ } \mu\text{Bq} / \text{kg}$

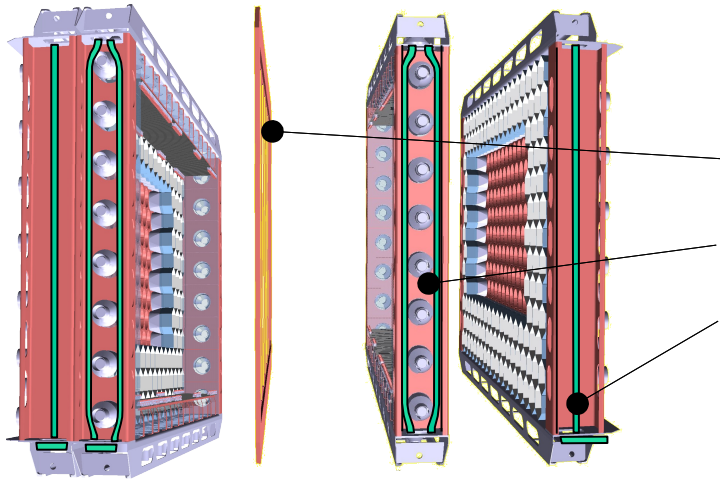
NME : E. Caurier et. al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 052503
 Tübingen Simkovic et al., Phys. Rev. C 77 (2008) 045503
 Jyvaskyla Suhonen et al. Int. J. Mod. Phys. E 17 (2008) 1

The SuperNEMO Collaboration

~ 80 physicists from 29 laboratories in 11 countries



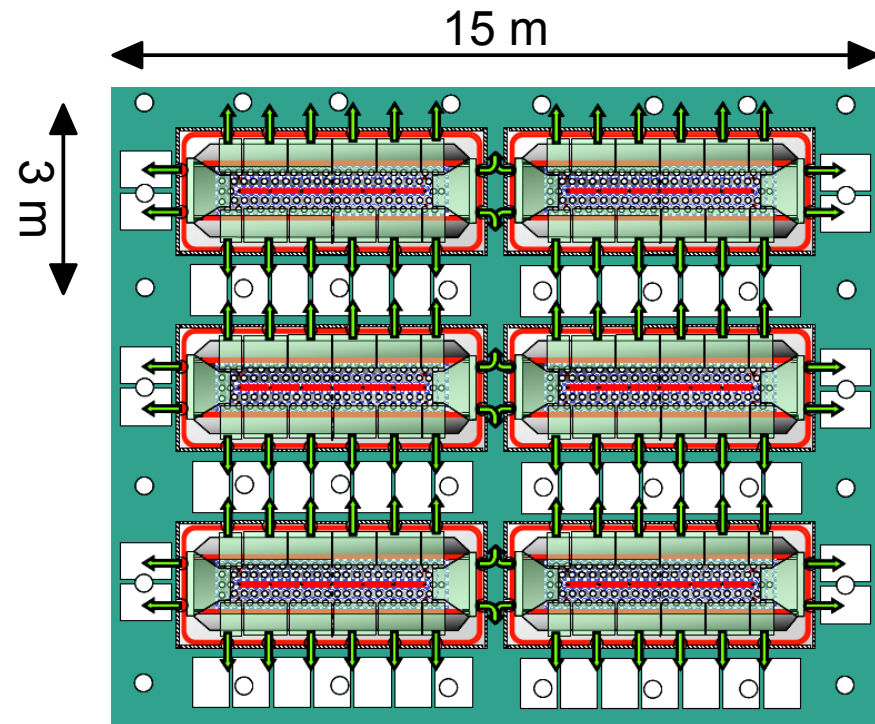
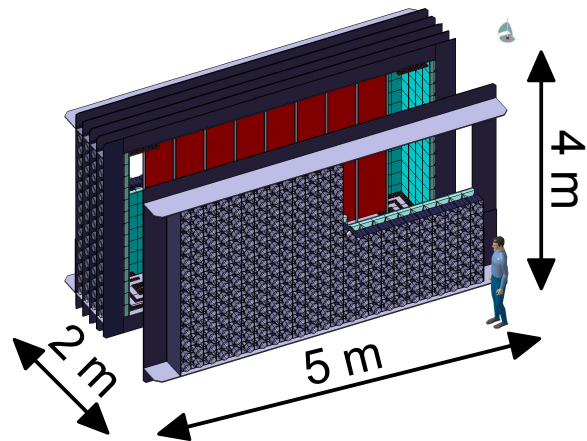
SuperNEMO Preliminary Design



détecteur modulaire à géométrie plane

- feuille source : 4 x 3 m²
- tracker : cellule en mode Geiger
- calorimètre : scintillateurs + photomultiplicateurs

- 5 - 7 kg d'isotopes $\beta\beta$ par module
- 20 - 22 modules dans une cavité
(100 – 150 kg d'isotope au total)



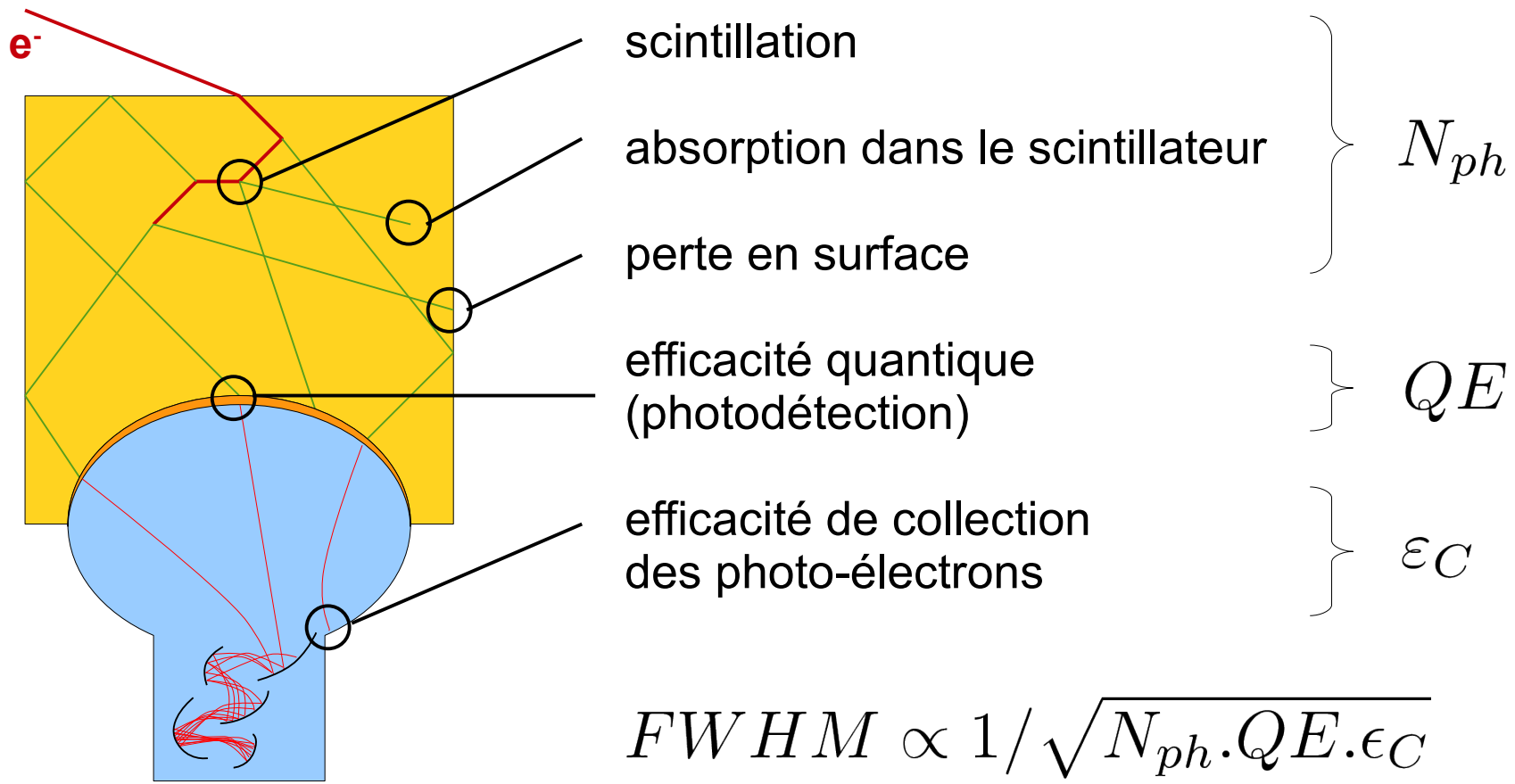
Compteur à scintillation

scintillateur

émission de lumière suite à un dépôt d'énergie

photomultiplicateur

conversion du signal lumière en signal électrique



$$FWHM \propto 1 / \sqrt{N_{ph} \cdot \underbrace{QE \cdot \epsilon_C}_{\text{R\&D PM}}}$$

R&D Scintillateur

R&D PM

Objectif de la R&D Calorimètre

Atteindre une résolution en énergie de **4 % FWHM à 3 MeV ↔ 7 % FWHM à 1 MeV**

Scintillateur

« **Ligth output** » maximal

Materiel **peu dense** pour éviter retrodiffusion des électrons

Grand volume pour garder une bonne efficacité de detection de gamma

Photomultiplicateur 8 "

Amélioration des performances de détection

Résolution temporelle **250 ps à 1 MeV**

Réponse linéaire meilleure que **1 % de 0 à 3 MeV**

Radiopureté (verre)

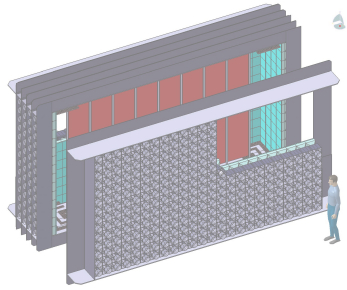
A (⁴⁰K) < 100 mBq / kg

A (²¹⁴Bi) < 40 mBq / kg

A (²⁰⁸Tl) < 3 mBq / kg

Protocole de suivi des gains des PMs et calibrations (absolus / relatifs)

PLAN

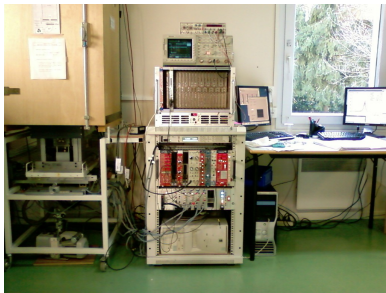


Introduction

Double décroissance bêta

Projet SuperNEMO

Objectif de la R&D Calorimétrie



Bancs de tests aux CENBG

Spectromètre à électrons

Acquisition et méthode d'analyse

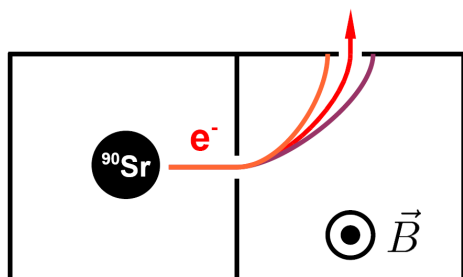


R&D Calorimétrie

R&D Scintillateur

R&D Photomultiplicateur

Spectromètre à électrons



Source bêta : ^{90}Sr (0,55 MeV) ^{90}Y (2,28 MeV) d'activité 470 MBq

Sélection en énergie par champ magnétique variable

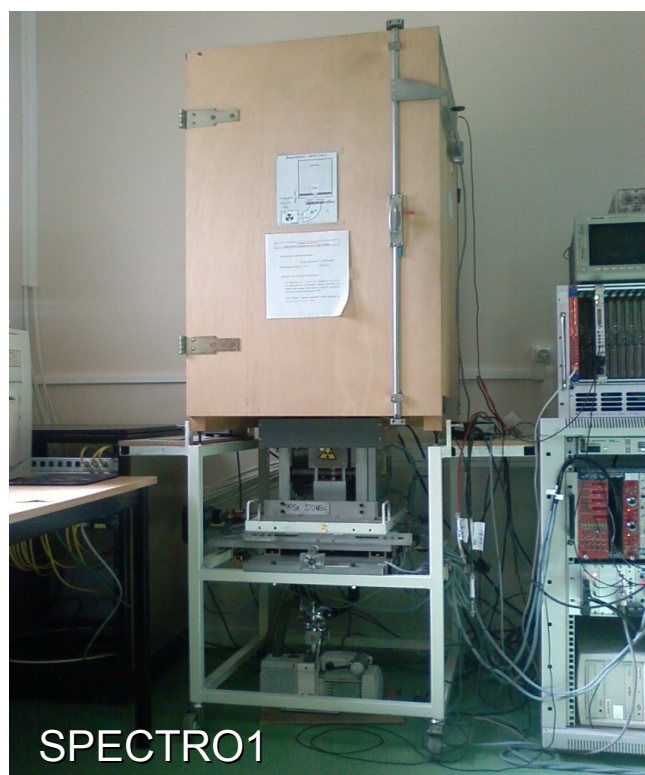
Faisceau de ~ 27 Hz mono-énergétique ajustable de 0,4 à 2,0 MeV

résolu à $< 1\%$ FWHM

Mobilité des spectromètres :

SPECTRO 1 15 cm x 15 cm

SPECTRO 2 200 cm x 60 cm

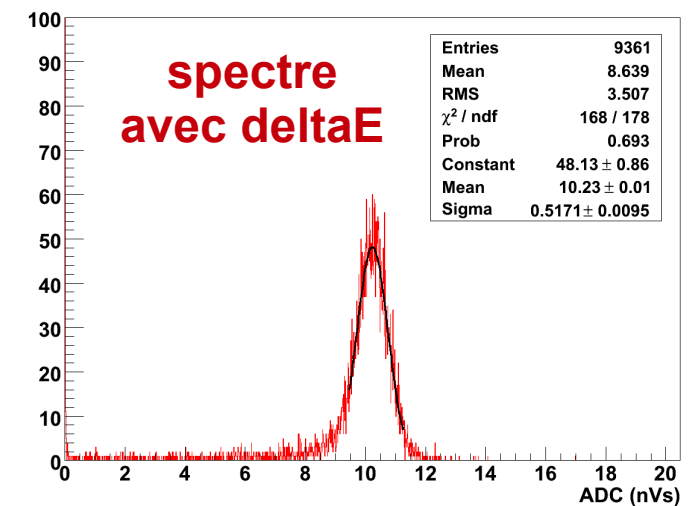
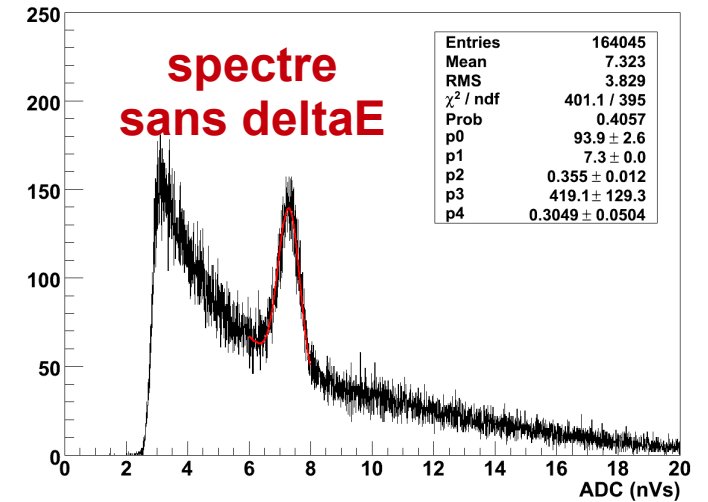
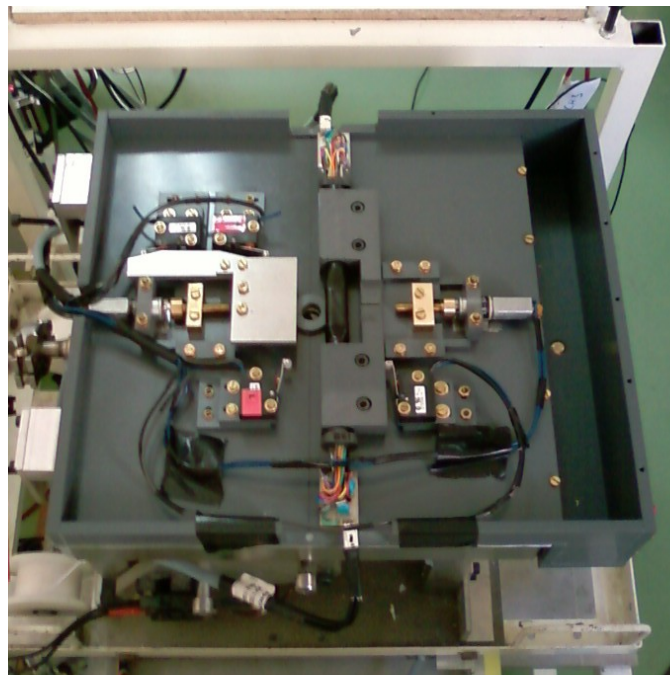
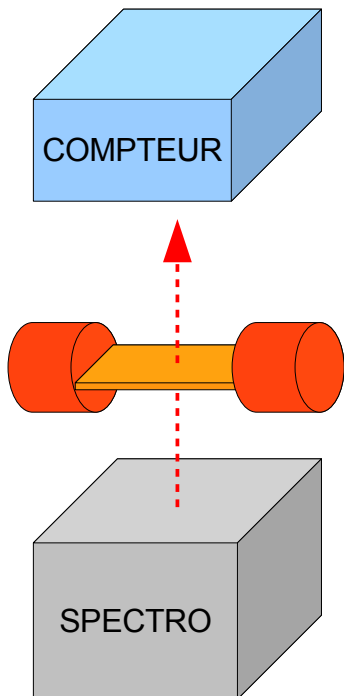


Trigger deltaE

scintillateur de grande taille = bruit de fond important

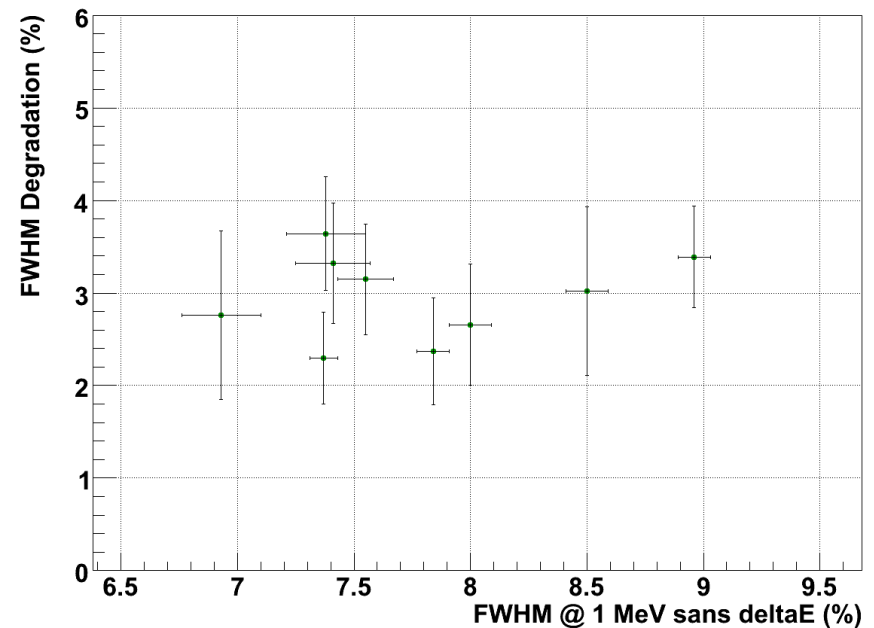
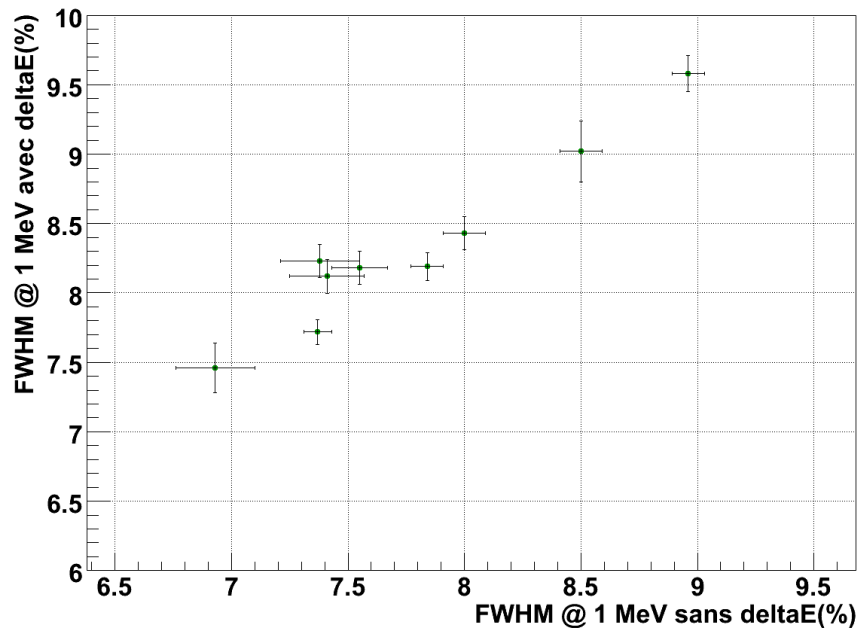
mise en place d'un trigger deltaE :

- 110 μm de scintillateur BC404
- habillage polycarbonate 2 x 14,5 μm
- couplage optique vers 2 PMs 0.5" (XP1322)



Effet du deltaE

perte en énergie : de **26,6 keV @ 2 MeV** à **31,4 keV @ 0.4 MeV** effet sur la résolution ?
mesures comparatives avec/sans deltaE pour divers compteurs à scintillation



extrapolation quadratique de la dégradation en résolution à 1 MeV :

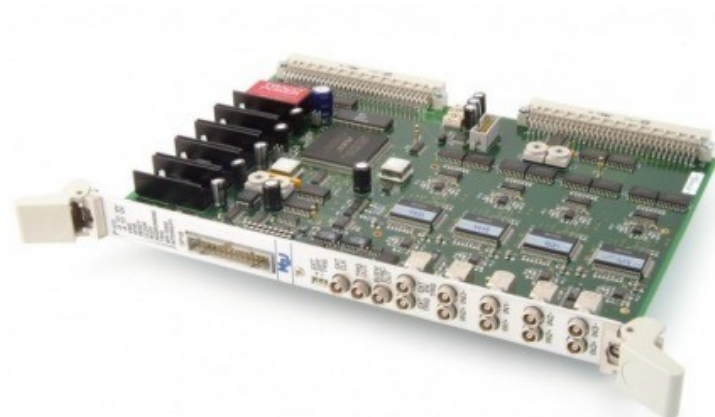
$$D = \sqrt{R_{dE}^2 - R^2} = 3,13\%$$

Carte d'acquisition MATAcq32

Carte développée par CEA/DAPNIA et IN2P3/LAL

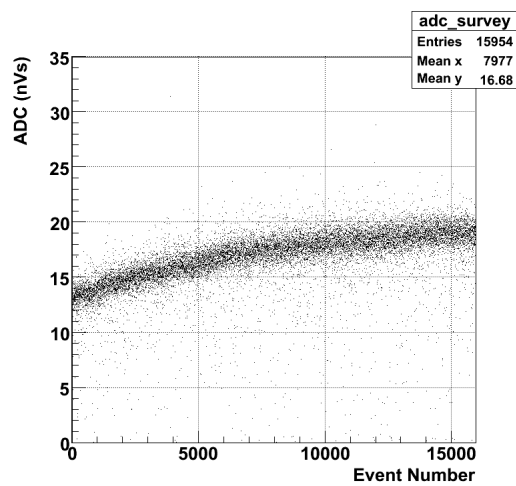
Echantillonnage à 2 GHz sur 1,250 μ s (2520 points)

LSB en amplitude de 250 μ V

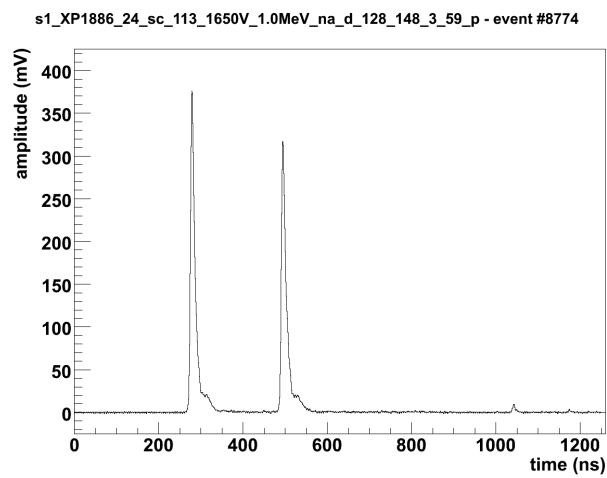


Analyse poussée des pulses **après** acquisition :

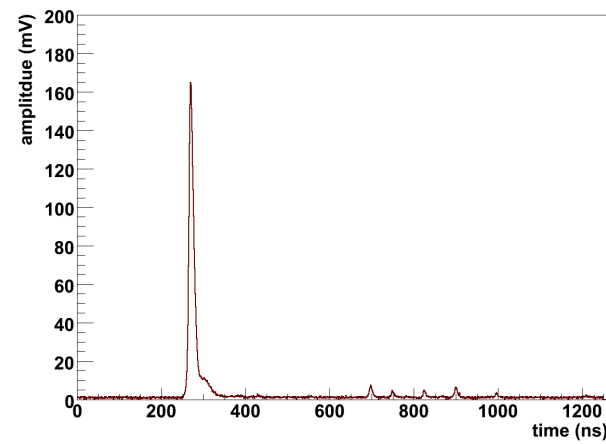
amplitude, propriétés temporelles, intégration charge, pré/after-pulses



stabilité du PM



mise en évidence
d'évènements étranges



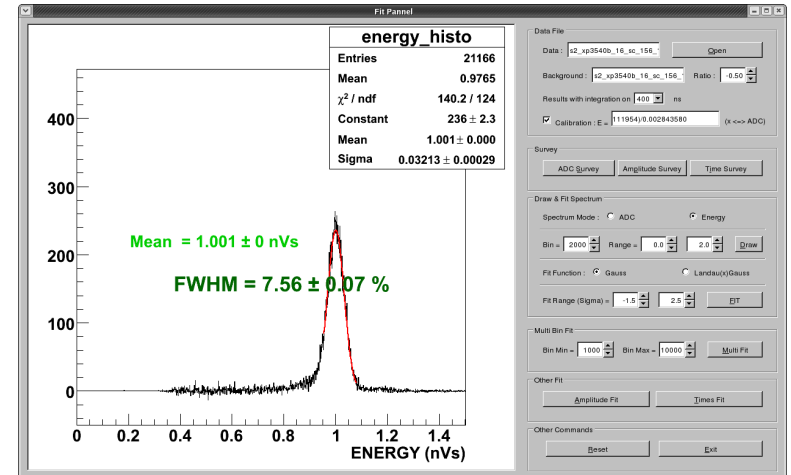
afterpulses

Analyse des données

analyse ROOT via 2 interfaces :

▣ analyse rapide

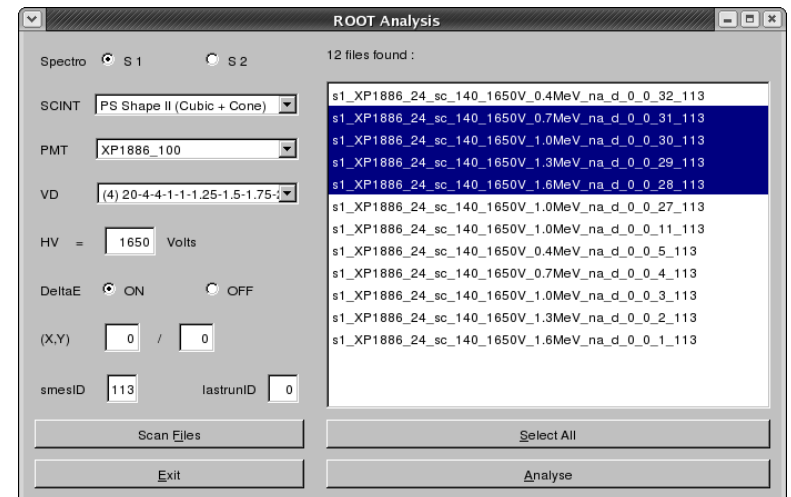
prévisualisation et analyse rapide de spectre
analyse en amplitude, propriétés temporelles



▣ analyse complete

sélection des acquisitions dans la base de données
propriétés des pulses (amplitude, temps de montée,
largeur à mi hauteur et temps de descente)
linéarité et calibration en énergie

→ fiche résultat



Fiche résultat

SCINTILLATOR
PS 8" H=10cm I (sc_113)

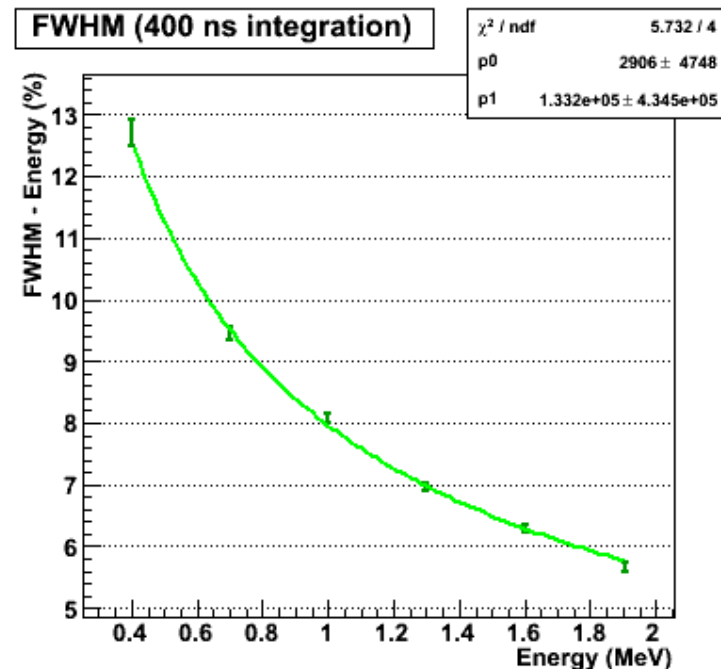
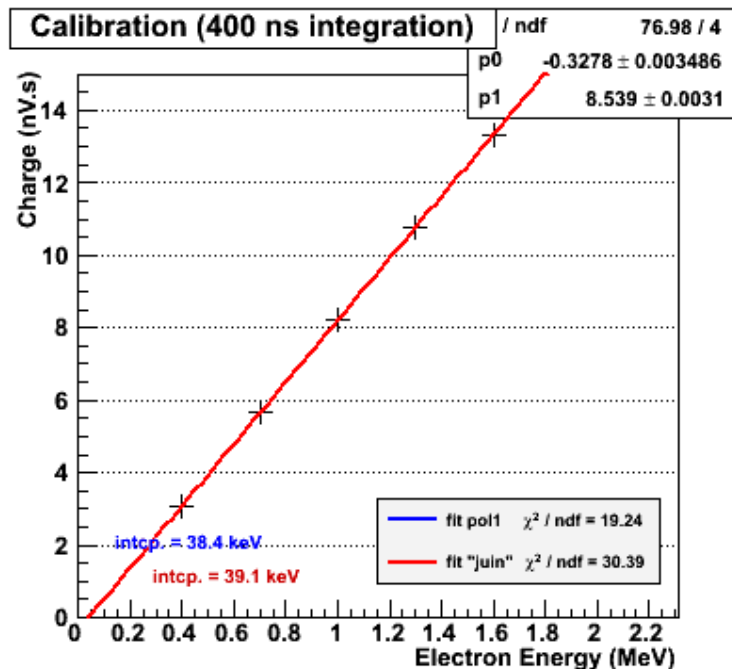
Wrapping

- front : _____
- sides : _____
- back : _____

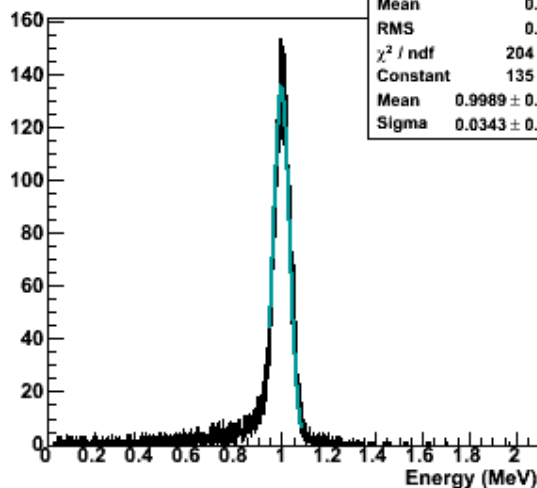
PMT
XP1886_160

High Voltage = 1750 V

Voltage Divider #4

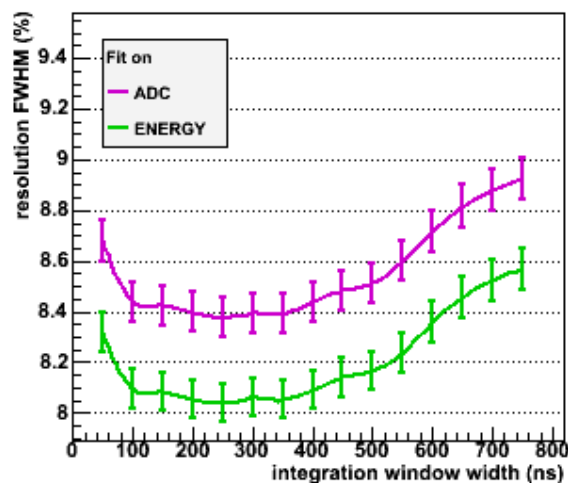


1.0 MeV spectrum



Entries	22537
Mean	0.9546
RMS	0.1533
χ^2 / ndf	204 / 214
Constant	135 ± 1.3
Mean	0.9989 ± 0.0003
Sigma	0.0343 ± 0.0003

FWHM @ 1.0 MeV vs Integration Window



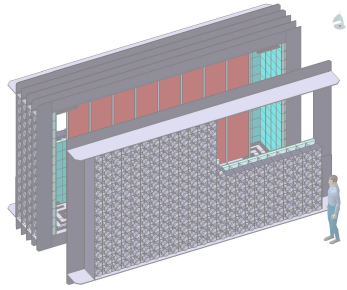
***** 1 MeV RESULT (400 ns integration) *****

Pedestal = 0.3020 ± 0.0195 mV [$\chi^2=3.89$]
 Amplitude = 366.5 ± 16.3 mV
 Gain @ 1 MeV = 8.539 nV.s / MeV

$T_{\text{RISE}} = 7.7 \pm 0.3$ ns
 $T_{\text{FWHM}} = 15.9 \pm 0.5$ ns
 $T_{\text{FALL}} = 35.3 \pm 1.2$ ns

ADC = 8.203 ± 0.003 nV.s
FWHM - ADC = 8.44 ± 0.08 %
 Energy = 0.9990 ± 0.0003 MeV
FWHM - Energy = 8.09 ± 0.08 %

PLAN

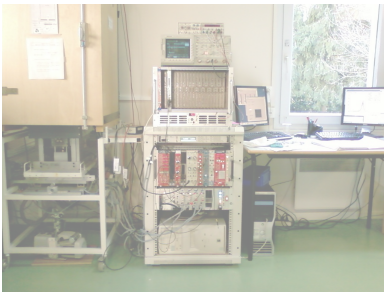


Introduction

Double décroissance bêta

Projet SuperNEMO

Objectif de la R&D Calorimétrie



Bancs de tests aux CENBG

Spectromètre à électrons

Acquisition et méthode d'analyse



R&D Calorimétrie

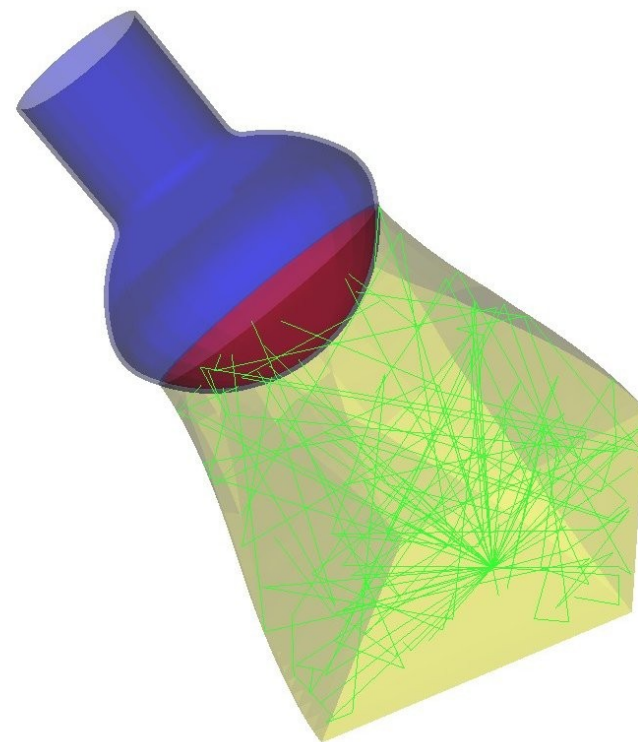
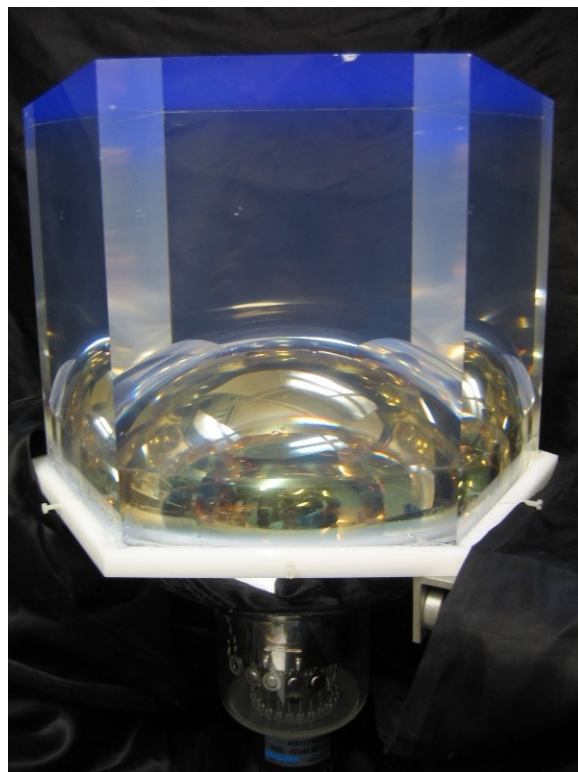
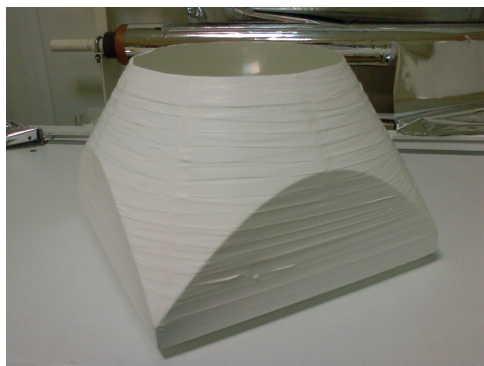
R&D Scintillateur

R&D Photomultiplicateur

R&D Scintillateur

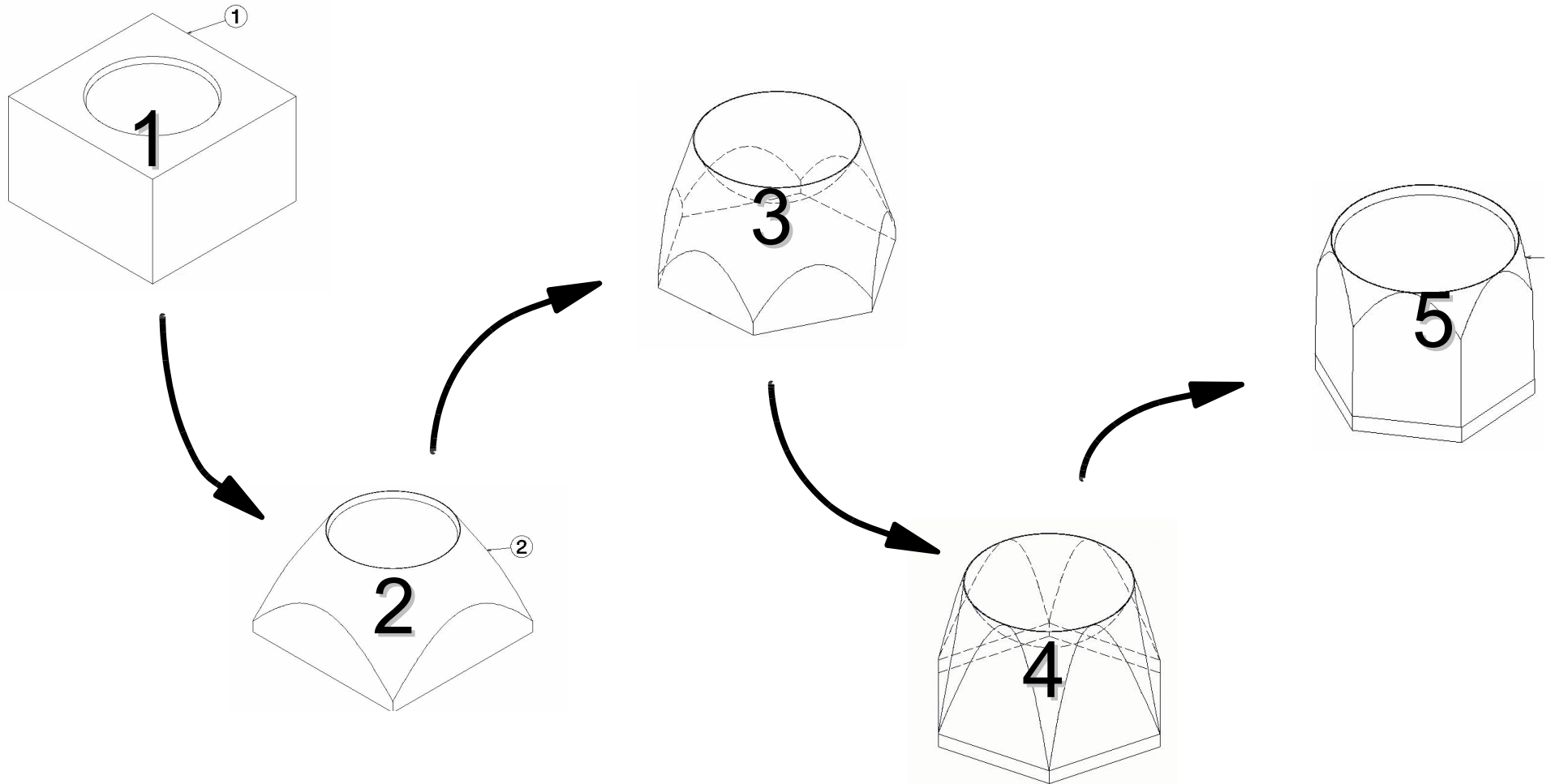
Activités de recherche

- ▢ type de scintillateur (liquide, plastique), matériaux et composition
- ▢ amélioration des propriétés optiques : géométrie, polissage, réflecteur surface, ...
- ▢ développement d'un code de simulation optique avec GEANT4



R&D Scintillateur : Géométrie

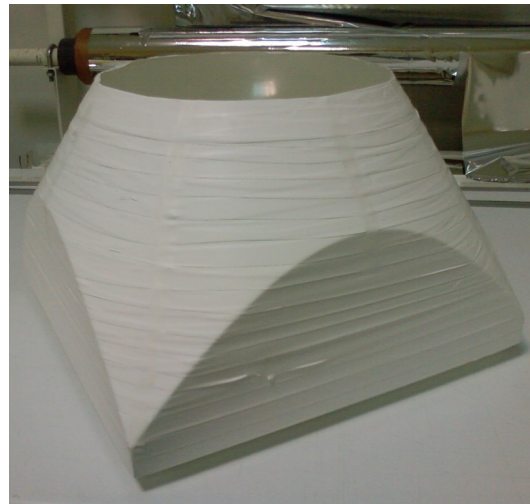
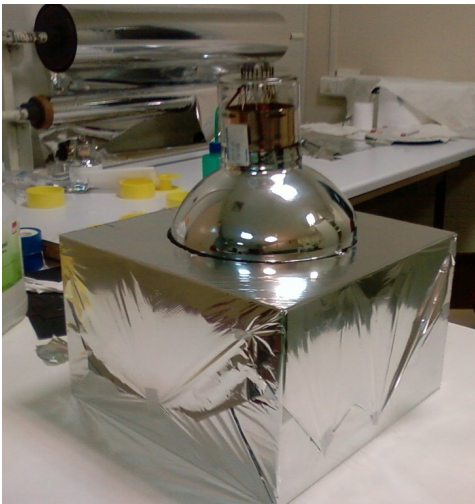
Objectif : étudier l'effet de la géométrie des scintillateurs sur la résolution avec 1 unique gros scintillateur (polystyrène) par coupe successive



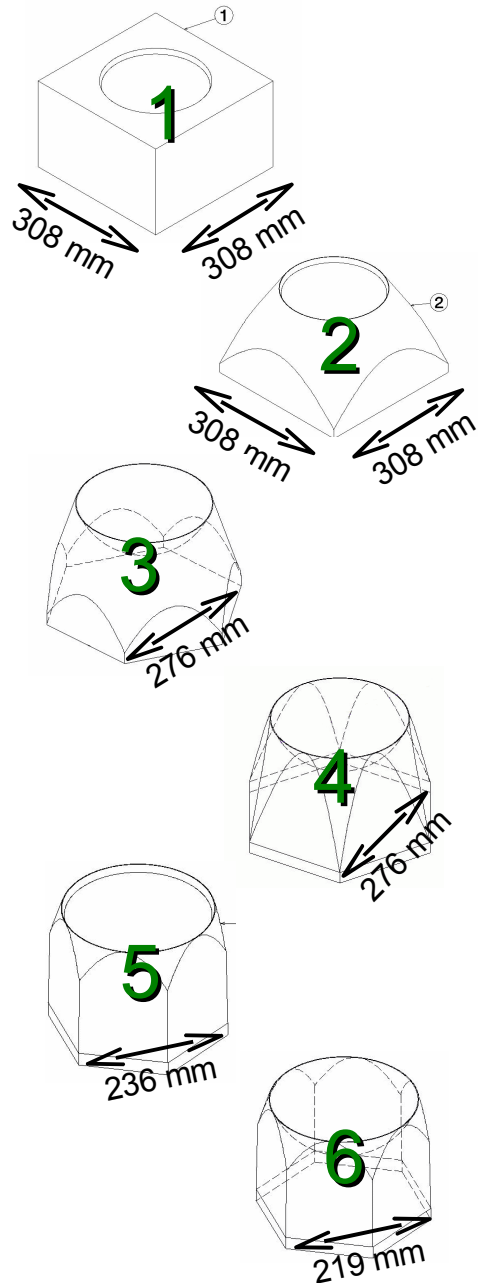
R&D Scintillateur : Géométrie

Toutes les mesures sont réalisés dans les mêmes conditions :

- ▣ wrapping en téflon sur les côtés + mylar aluminisé en face d'entrée
- ▣ couplé avec le même PM Photonis (XP1886 SN100), même pont et HV (= 1650V)
- ▣ contact optique = isopropanol
- ▣ FWHM pour des électrons de 1 MeV (du spectro 1) centrés vers la face d'entrée du bloc

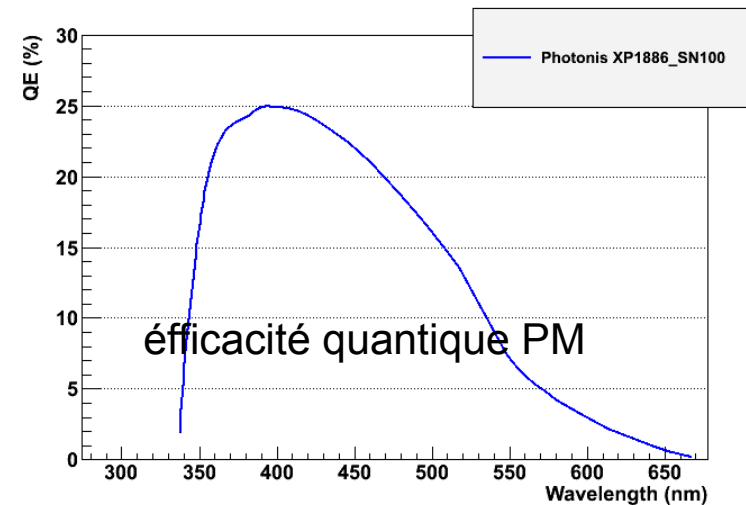
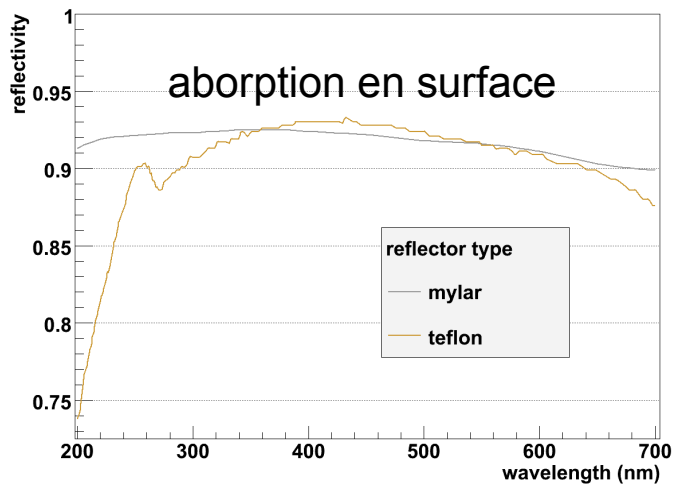
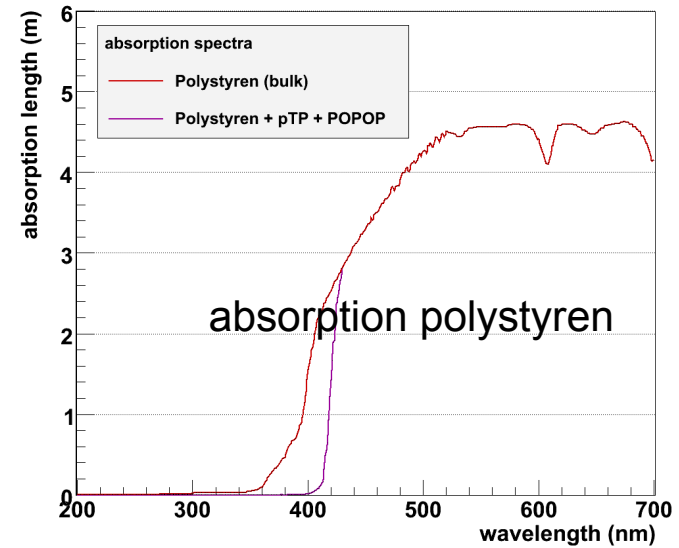
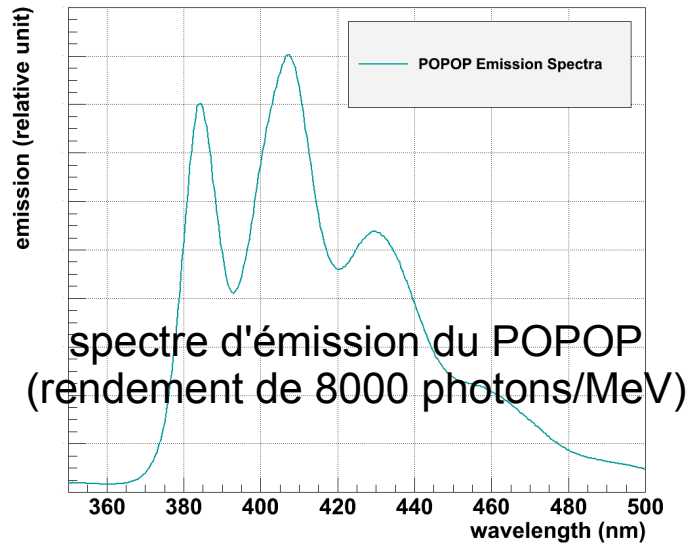


Summary of Results

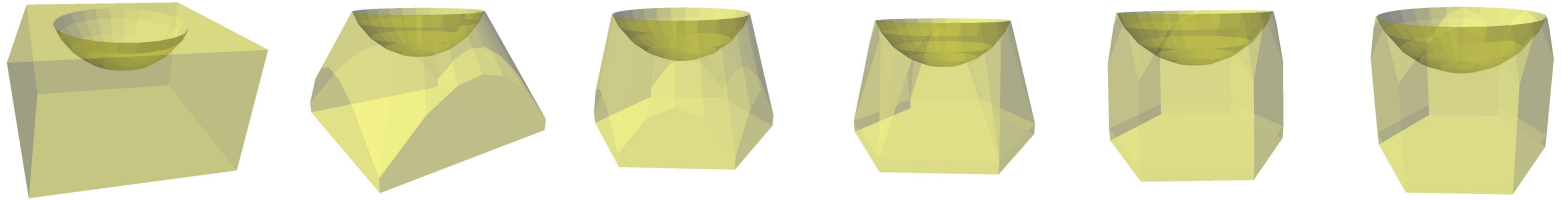


SHAPE	CHARGE	FWHM	TIME RISE – FWHM – FALL
# 1	3.73 nV.s	10.0 %	5.9 – 16.6 – 31.8 ns
# 2	4.06 nV.s	9.6 %	5.5 – 15.1 – 26.2 ns
# 3	4.23 nV.s	9.5 %	5.4 – 13.2 – 21.1 ns
# 4	4.79 nV.s	9.3 %	5.4 – 14.0 – 22.2 ns
# 5	5.39 nV.s	8.8 %	5.3 – 12.5 – 19.0 ns
# 6	5.71 nV.s	8.8 %	5.2 – 12.1 – 18.3 ns

Modèle de simulations optiques (GEANT4)



Simulations optiques GEANT4



SHAPE	1	2	3	4	5	6
EXPERIMENT	10.5 %	10.1 %	10.0 %	9.8 %	9.4 %	9.4 %
SIMULATION	13.8 %	13.4 %	12.6 %	12.2 %	11.3 %	11.0 %
SIMULATION $L_{\text{ABS}} \times 6$	10.4 %	10.5 %	10.0 %	9.9 %	9.4 %	9.4 %

accord des valeurs de façon relative mais pas du tout en valeur absolue

R&D Photomultiplicateur

Collaboration avec Photonis pour élaborer un nouveau PM 8" linéaire, à haute performance et de bas bruit de fond radioactif.



Activités de recherches

- ▣ Amélioration de l'efficacité de détection (efficacité quantique + efficacité de collection)
- ▣ Utilisation optimale du PM (HV, intégration des signaux, ...)
- ▣ Optimisation de la répartition des tensions sur les dynodes.

Plus d'une 30aine de PMs prototype de Photonis – dont 7 XP1886 – ont été reçus et testé au CENBG

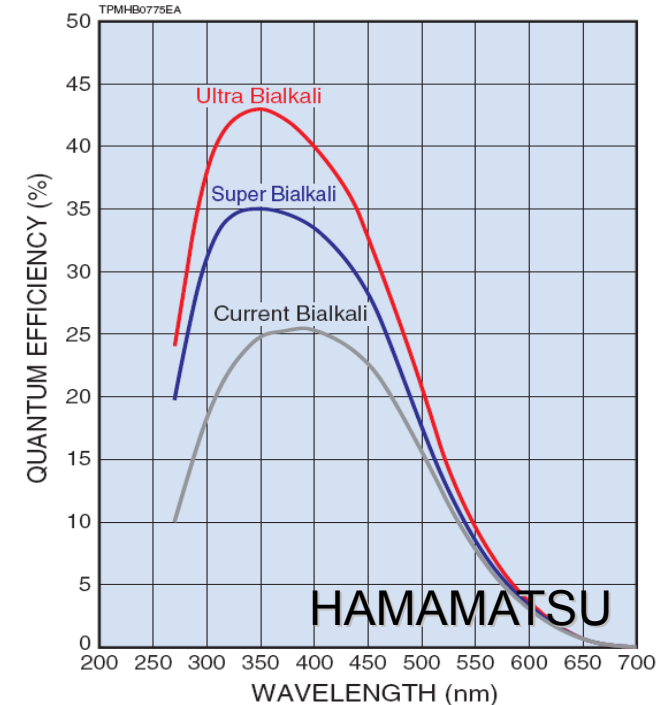
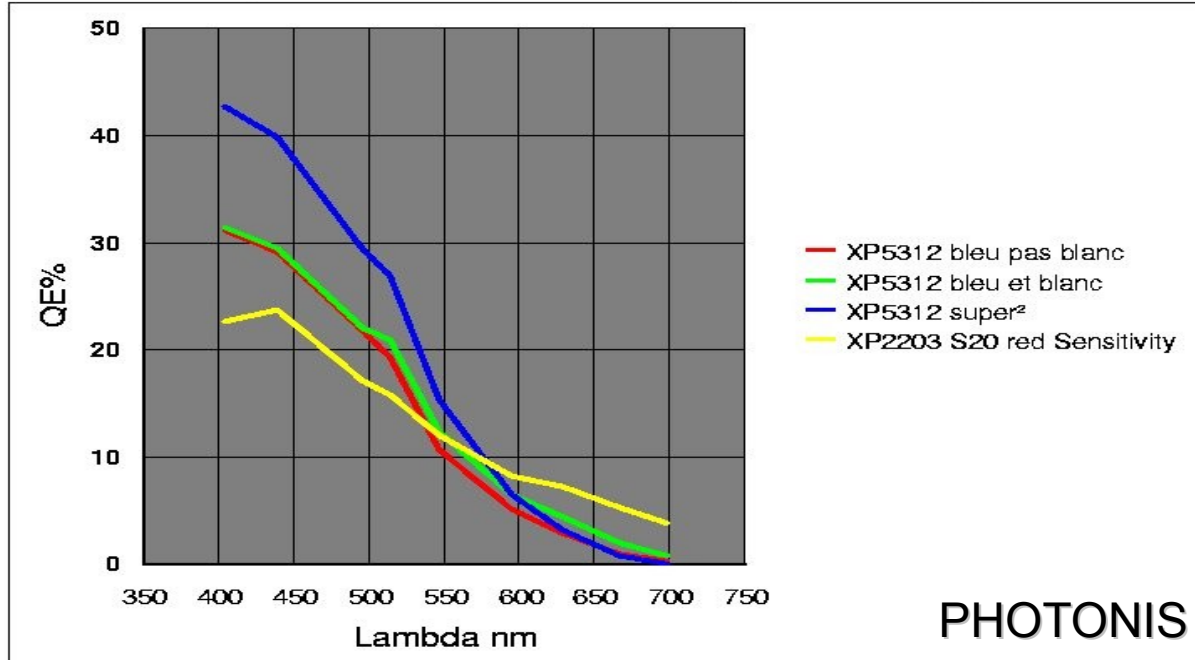
Photocathode

Bialkali photocathode (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)

Photonis : standard bialkali (24 %) → super bialkali (35 %) → super² bialkali (40 – 50 %)

Hamamatsu : standard bialkali (26 %) → super bialkali (33 %) → ultra bialkali (43 %)

Développer un nouvelle photocathode implique d'étudier et d'optimiser tout les étapes du processus : structure et propreté de la face de dépôt, composition et pureté de la photocathode, formation (épaisseurs), état final du vide ...



Comparatif PM 8"

PM couplé a des blocs de 10 cm minimum :

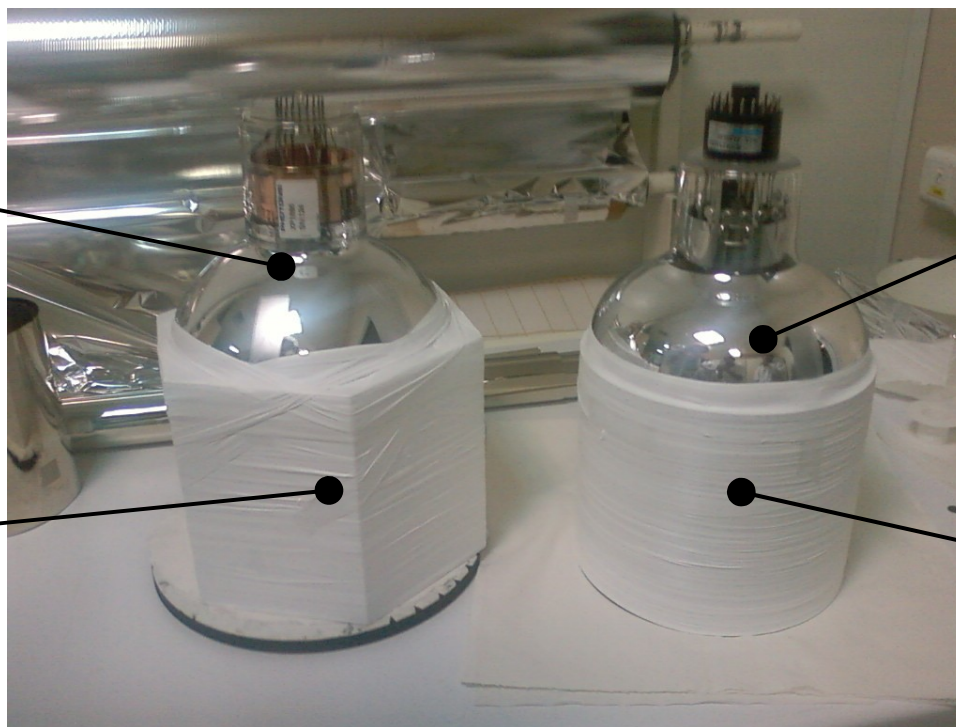
- ▣ bloc polystyrène (PS) cylindrique 8"
- ▣ bloc polyvinyl-toluène (PVT) hexagonal

PM Photonis
XP1886

PM Hamamatsu
R5912MOD

Bloc PVT
Hex. 10 cm min
Eljen (Texas, US)

Bloc PS
Cyl. 10 cm min
Dubna (Russie)



Comparatif PM 8"

FWHM @ 1 MeV à ± 0.1 MeV	Bloc PS	Bloc PVT
PHOTONIS XP1886_SN100 [24 % QE]	8.1 %	7.3 %
PHOTONIS XP1886_SN124 [35 % QE]	7.9 %	7.1 %
PHOTONIS XP1886_SN160 [28 % QE]	7.5 %	6.7 %
HAMAMATSU R5912_ZQ0029 [33 % QE]	8.8 %	7.7 %

amélioration QE
mais FWHM stable

dégradation du vide
dans le PM

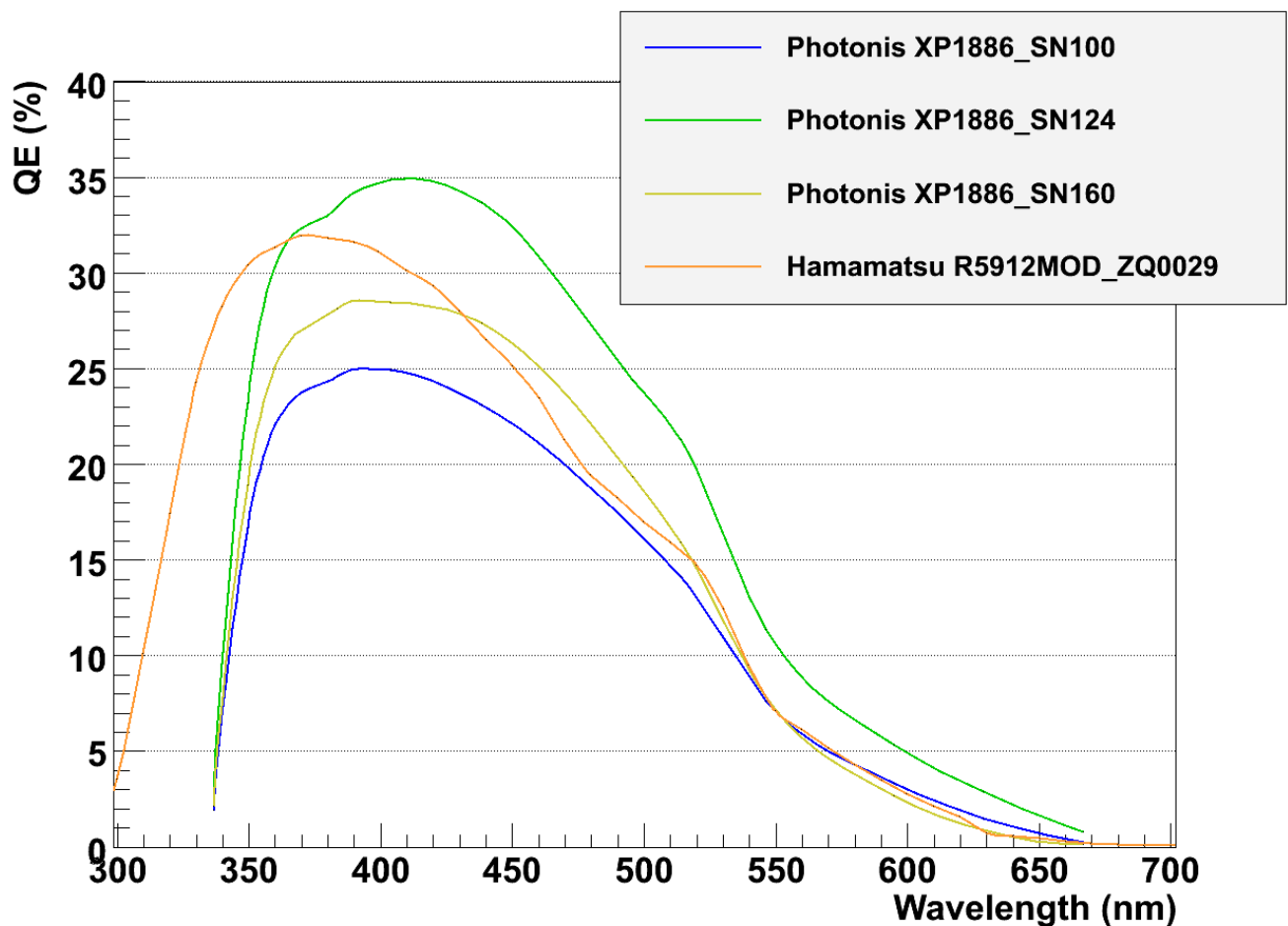
nouveau process

meilleure efficacité
de collection

PM Hamamatsu moins bon

mauvaise correspondance
sensibilité PM et spectre
d'émission du scintillateur ?

Efficacité Quantique des PMs



FWHM @ 1 MeV à ± 0.1 MeV	Block PVT
PHOTONIS XP1886_SN100	7.3 %
PHOTONIS XP1886_SN124	7.1 %
PHOTONIS XP1886_SN160	6.7 %
HAMAMATSU R5912_ZQ0029	7.7 %

décalage de la sensibilité des photocathodes entre PM Hamamatsu et Photonis

comparaison Hamamatsu et Photonis :

→ mauvaise efficacité de collection chez Hamamatsu

R&D Bas bruit de fond radioactif

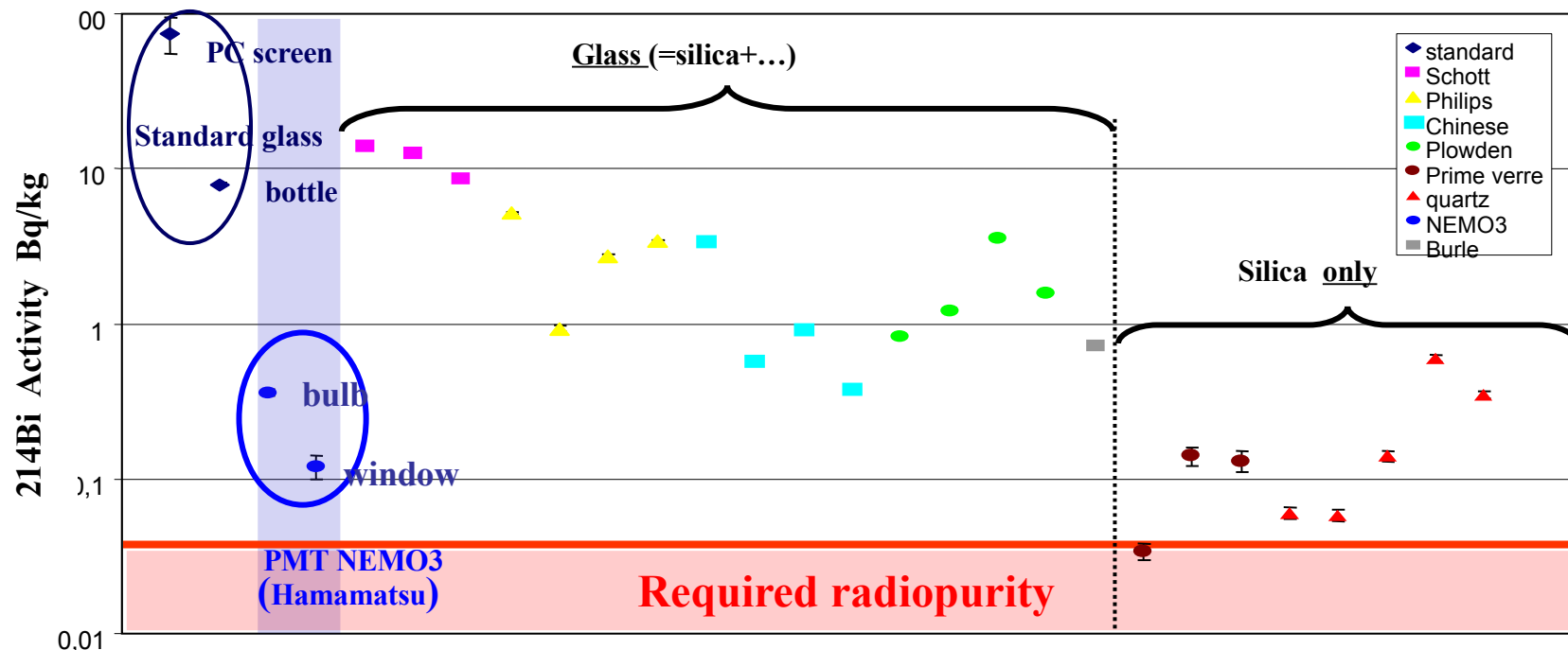
Diminution de la quantité de PM (5" → 8")

Développement d'un verre très bas bruit de fond radioactif.

Contrôle/Sélection des autres composants (dynodes, céramiques, capacités, ...)

	$A(^{40}\text{K})$	$A(^{214}\text{Bi})$	$A(^{208}\text{Tl})$
Verre standard	~ 100 Bq/kg	~ 10 Bq/kg	~ 1 Bq/kg
NEMO3	~ 1 Bq/kg	~ 500 mBq/kg	~ 30 mBq/kg
SuperNEMO	< 0.1 Bq/kg	< 40 mBq/kg	< 3 mBq/kg

Résultat Verre bas bruit



Élaboration d'une première silice de synthèse excellente par **Prime-Verre**
1ere coulée réalisée en 2007 → radiopureté validée par mesure germanium

Cout de production très élevé : planification d'un 2e coulée plus accessible
Pas d'accord juridique et financier avec **Photonis** pour continuer (septembre 2008)

Démarrage immédiat d'une nouvelle collaboration avec **Philips Lightning**,
Formulation d'un nouveau verre en 2009 validée en terme de radiopureté.

Conclusions

Résolution 7 % FWHM @ 1 MeV atteinte
avec un calorimètre à base de scintillateur plastique + PM 8"

Prime Verre puis Philips ont développé des verres de radiopureté excellente.

→ possibilité de faire un PM haute performance et très bas bruit de fond radioactif

Perspectives

Reprise rapide du travail avec Hamamatsu

Septembre 2009 : Transfert des caractéristiques du verre bas bruit
développé par Philips vers Hamamatsu