

# Développements de compteurs à scintillation hautes performances et de très basse radioactivité pour le calorimètre du projet SuperNEMO

CHAUVEAU Emmanuel

BDI CNRS/Photonis  
CENBG

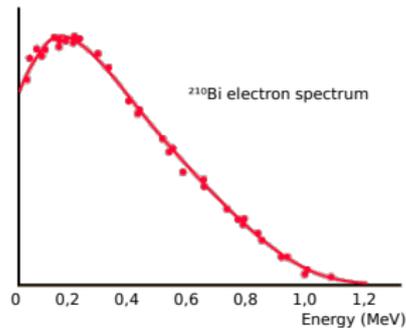
Jedi 18 novembre 2010

- 1 Physique du neutrino
  - Le neutrino : mélange, masse et nature
  - La décroissance double bêta
- 2 De NEMO 3 à SuperNEMO
  - Le détecteur NEMO 3
  - Le projet SuperNEMO
- 3 R&D Calorimétrie pour SuperNEMO
  - Bancs de test et outils d'analyse
  - Outils de simulations optiques
  - R&D scintillateurs
  - R&D photomultiplicateurs

# Le neutrino

## Histoire du neutrino

1930 Wolfgang Pauli "invente" le neutrino



# Le neutrino

## Histoire du neutrino

1930 Wolfgang Pauli “invente” le neutrino

1956 Découverte expérimentale  $\bar{\nu}_e$  (Cowan & Reines)



# Le neutrino

## Histoire du neutrino

- 1930 Wolfgang Pauli “invente” le neutrino
- 1956 Découverte expérimentale  $\bar{\nu}_e$  (Cowan & Reines)
- 1963 Découverte expérimentale du  $\nu_\mu$  (Brookhaven)
- 2000 Découverte expérimentale du  $\nu_\tau$  (DONUT)

## Le neutrino dans le Modèle Standard

- trois neutrinos légers ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) + antineutrinos
- particule élémentaire, neutre et de spin 1/2
- sensible uniquement à l'interaction faible
- absence de  $\nu_R$  et  $\bar{\nu}_L$  dans l'expérience  $\Rightarrow m_\nu = 0$

# Le neutrino

## Histoire du neutrino

- 1930 Wolfgang Pauli "invente" le neutrino
- 1956 Découverte expérimentale  $\bar{\nu}_e$  (Cowan & Reines)
- 1963 Découverte expérimentale du  $\nu_\mu$  (Brookhaven)
- 1998 **Évidence de l'oscillation des neutrinos par Super-Kamiokande**
- 2000 Découverte expérimentale du  $\nu_\tau$  (DONUT)

## Le neutrino dans le Modèle Standard

- trois neutrinos légers ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) + antineutrinos
- particule élémentaire, neutre et de spin 1/2
- sensible uniquement à l'interaction faible
- absence de  $\nu_R$  et  $\bar{\nu}_L$  dans l'expérience  $\Rightarrow m_\nu = 0$

masse de neutrino  
 $m_\nu = ?$

nature du neutrino  
 $\nu \neq \bar{\nu}$  (Dirac) ou  $\nu = \bar{\nu}$  (Majorana) ?

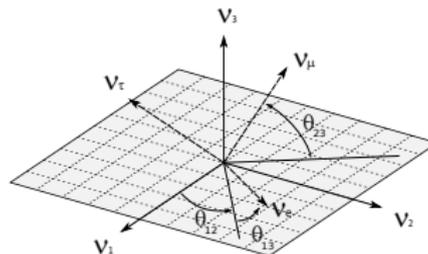
# Oscillation des neutrinos

## Mélange des neutrinos

- Deux représentations distinctes :
  - États propres de masse ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ )
  - États propres de saveur ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- Angle de mélange  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{13}$  et  $\theta_{23}$



## Probabilité d'oscillation

- Mélange entre deux saveurs :  $\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{ij} & \sin \theta_{ij} \\ -\sin \theta_{ij} & \cos \theta_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$   $\alpha, \beta = e, \mu, \tau$   
 $i, j = 1, 2, 3$
- Évolution d'un neutrino  $\nu_\alpha$  d'énergie  $E$  à une distance  $L$  :

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) \approx \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right) \quad \text{avec} \quad \Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

## Résultats des expériences d'oscillation

### Paramètres de mélange (PDG, 2010)

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0,86 \pm 0,03$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0,92 - 1,00$$

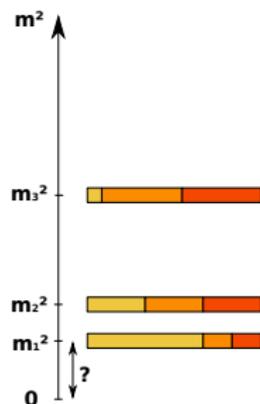
$$\sin^2(2\theta_{13}) < 0,15$$

$$\Delta m_{21}^2 = + (7,6 \pm 0,2) 10^{-5} \text{ eV}^2$$

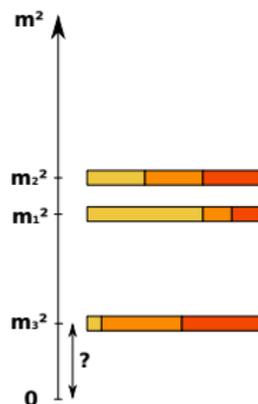
$$\Delta m_{32}^2 = \pm (2,43 \pm 0,13) 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{31}^2 \approx \Delta m_{32}^2$$

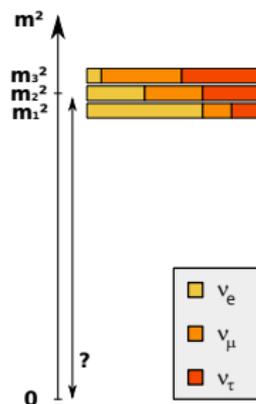
### Hiéarchies de masse des neutrinos



— normale —

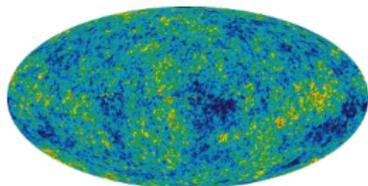


— inverse —



— dégénérée —

## Vers une mesure de la masse absolue



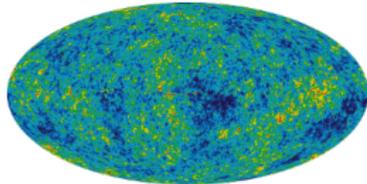
### CMB (WMAP)

#### Types d'expériences

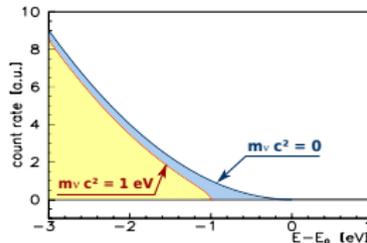
- observations en cosmologie

$$\sum_{i=1}^3 m_i < 0,6 \text{ eV (WMAP + SDSS, DEEP2, LBGs)}$$

## Vers une mesure de la masse absolue



**CMB (WMAP)**



### Types d'expériences

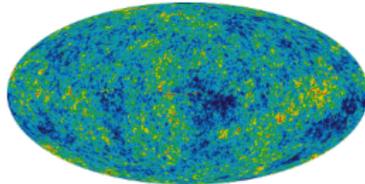
- observations en cosmologie

$$\sum_{i=1}^3 m_i < 0,6 \text{ eV (WMAP + SDSS, DEEP2, LBGs)}$$

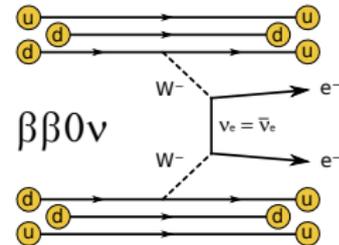
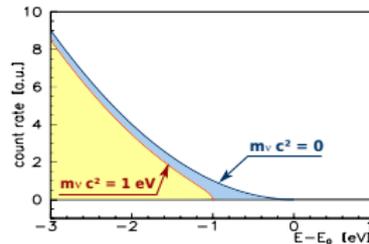
- étude de la décroissance  $\beta$

$$m_{\nu_e} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i^2} < 2,3 \text{ eV (MAINZ, TROITZK)}$$

## Vers une mesure de la masse absolue



**CMB (WMAP)**



### Types d'expériences

- observations en cosmologie

$$\sum_{i=1}^3 m_i < 0,6 \text{ eV (WMAP + SDSS, DEEP2, LBGs)}$$

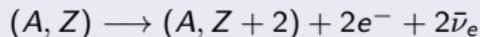
- étude de la décroissance  $\beta$

$$m_{\nu_e} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i^2} < 2,3 \text{ eV (MAINZ, TROITZK)}$$

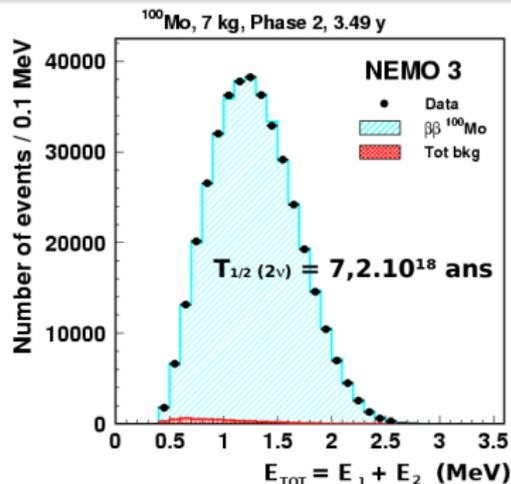
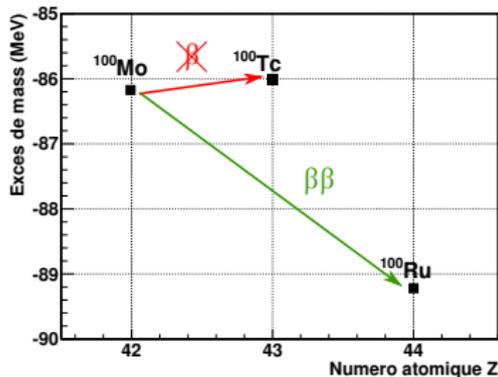
- recherche de la décroissance double bêta sans émission de neutrinos :

$$m_{\beta\beta} = \sqrt{\left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i^2 \right|} \begin{cases} < 0,2 - 1,3 \text{ eV (CUORICINO, IGEX, H-M, NEMO 3)} \\ = 0,32 \pm 0,03 \text{ eV (H-M : Klapdor-Kleingrothaus)} \end{cases}$$

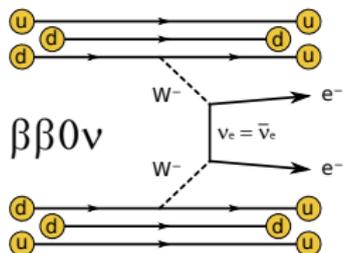
# La décroissance double bêta avec émission de neutrinos ( $\beta\beta 2\nu$ )



- Processus du second ordre de l'interaction faible :  $T_{1/2}^{2\nu} \sim 10^{18} - 10^{21}$  ans
- Décroissance  $\beta$  simple interdite (énergie) ou défavorisée (spin)
- Énergie de transition  $Q_{\beta\beta} \sim$  quelques MeV.



## La décroissance double bêta sans émission de neutrinos ( $\beta\beta 0\nu$ )



- Interdit par le Modèle Standard : **non conservation du nombre leptonique**
- Implique un neutrino de Majorana  $\nu = \bar{\nu}$
- Accès à la **masse effective du neutrino  $m_{\beta\beta}$**  :

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |m_{\beta\beta}|^2$$

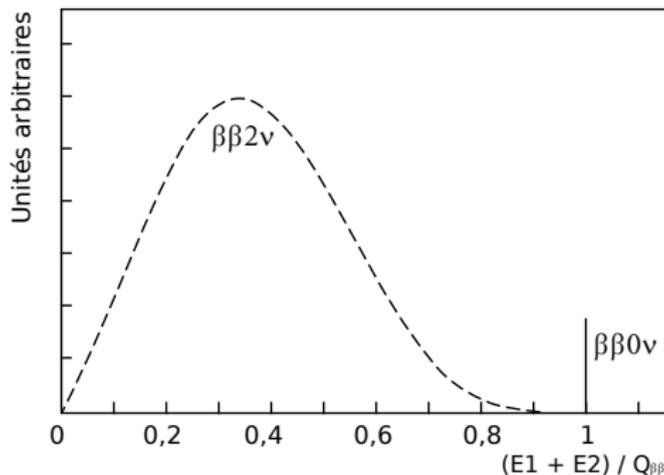
$G^{0\nu}$  Facteur d'espace de phase  $F(Q_{\beta\beta}, Z)$   
 $M^{0\nu}$  Élément de matrice nucléaire

- Limites courantes sur la demi-vie :  $T_{1/2}^{0\nu} \geq 10^{24} - 10^{25}$  ans

## Détection de la décroissance double bêta

### Observables disponibles

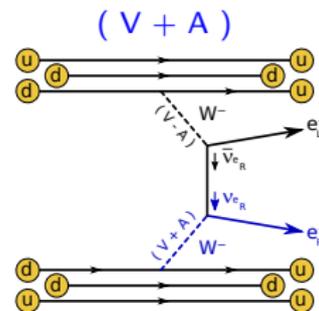
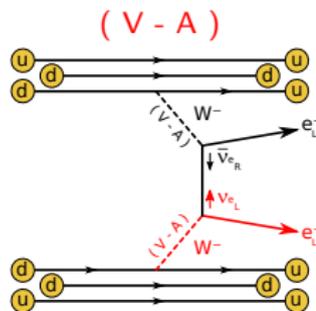
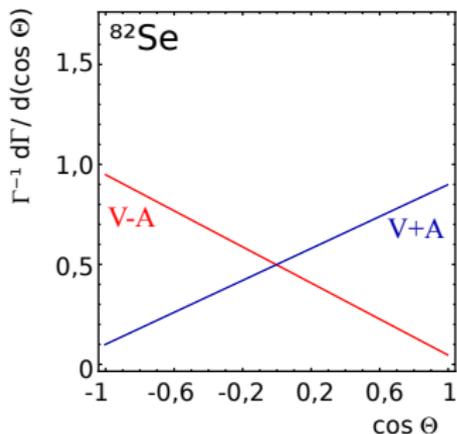
- Énergie totale des électrons  $E_1 + E_2$  :  $\beta\beta 2\nu$  vs.  $\beta\beta 0\nu$
  - Énergies individuelles  $E_1, E_2$
  - Distribution angulaire  $\cos \theta$
- } Discrimination du mécanisme  $\beta\beta 0\nu$



## Détection de la décroissance double bêta

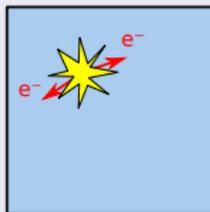
### Observables disponibles

- Énergie totale des électrons  $E_1 + E_2$  :  $\beta\beta 2\nu$  vs.  $\beta\beta 0\nu$
  - Énergies individuelles  $E_1, E_2$
  - Distribution angulaire  $\cos \theta$
- } Discrimination du mécanisme  $\beta\beta 0\nu$



## Catégories d'expériences double bêta

### Expériences purement calorimétriques

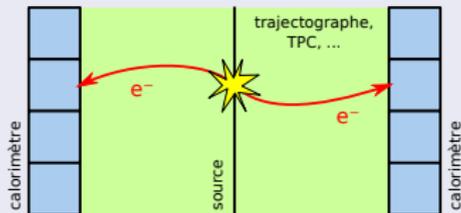


source = détecteur

- bolomètre
- scintillateur
- semi-conducteur

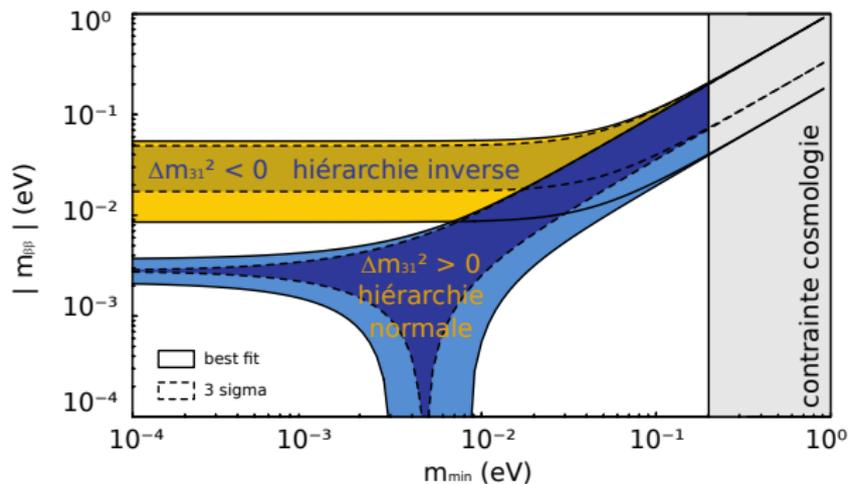
- grande efficacité de détection
- bonne résolution en énergie
- pas d'identification des électrons
- bruit de fond élevé

### Expériences "tracko-calor"



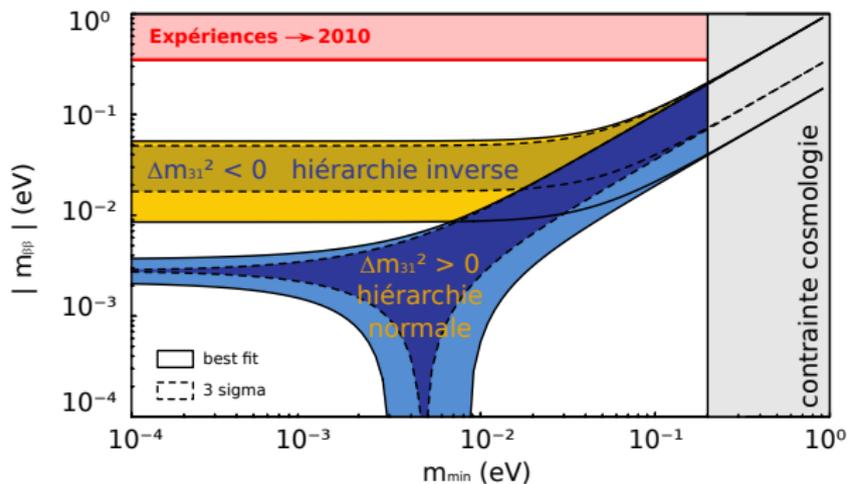
- identification des électrons :  
cinématique des décroissances  $\beta\beta$
- mesure + rejection du bruit de fond
- faible efficacité
- résolution en énergie modeste

## Statut expérimental



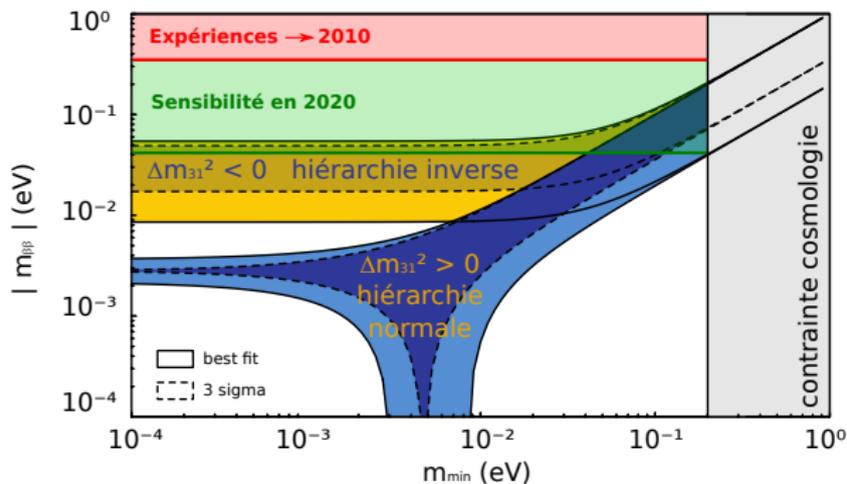
- Résultat des expériences passées à  $\sim 10$  kg d'isotopes  $\beta\beta$  :  $m_{\beta\beta} \leq 0,2 - 1,3$  eV
- Projet de nouveaux détecteurs (100 kg) sensibles à  $m_{\beta\beta} \approx 50$  meV

## Statut expérimental



- Résultat des expériences passées à  $\sim 10$  kg d'isotopes  $\beta\beta$  :  $m_{\beta\beta} \leq 0,2 - 1,3$  eV
- Projet de nouveaux détecteurs (100 kg) sensibles à  $m_{\beta\beta} \approx 50$  meV

## Statut expérimental

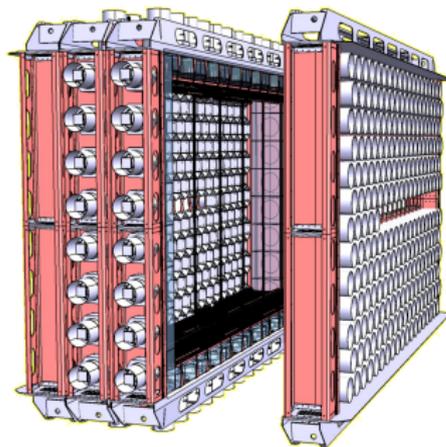


- Résultat des expériences passées à  $\sim 10$  kg d'isotopes  $\beta\beta$  :  $m_{\beta\beta} \leq 0,2 - 1,3$  eV
- Projet de nouveaux détecteurs (100 kg) sensibles à  $m_{\beta\beta} \approx 50$  meV

## De NEMO 3 à SuperNEMO

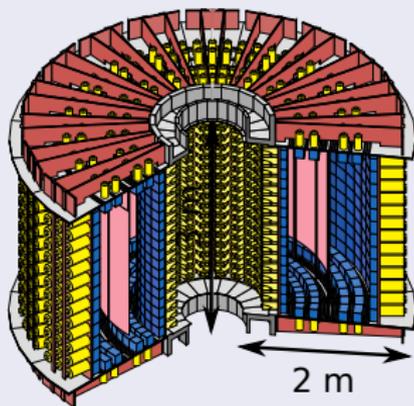


Détecteur NEMO 3



Module SuperNEMO

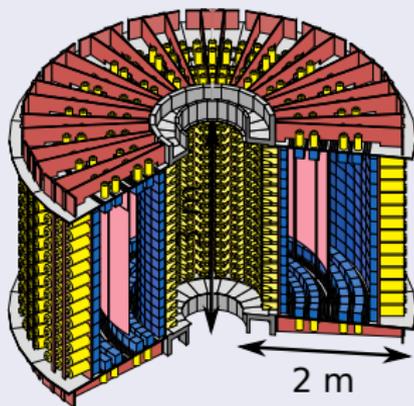
## L'expérience NEMO 3



- 10 kg d'émetteur  $\beta\beta$
- 6180 cellules à dérive +  $\vec{B}$  (25 G)
- 1940 compteurs à scintillation
- blindages  $n$  et  $\gamma$
- installé au LSM depuis 2003



## L'expérience NEMO 3

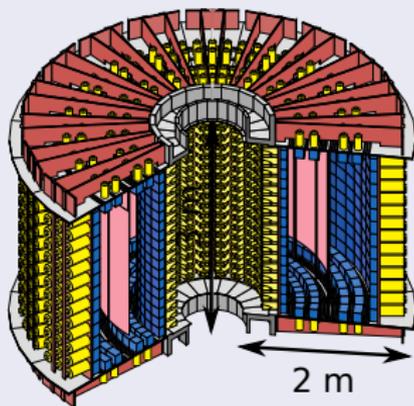


- 10 kg d'émetteur  $\beta\beta$
- 6180 cellules à dérive +  $\vec{B}$  (25 G)
- 1940 compteurs à scintillation
- blindages  $n$  et  $\gamma$
- installé au LSM depuis 2003

### Caractéristiques uniques

- ✓ Choix de l'émetteur :  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ , ...
  - ✓ Identification des particules  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$
  - ✓ Cinématique  $\beta\beta$  :  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\cos \theta$ ,  $\Delta t$
- ⇒ Étude  $\beta\beta 0\nu$ ,  $\beta\beta 2\nu$ ,  $\beta\beta$  états excités  
⇒ Mesure + rejet bruit de fond :  
topologies  $e^-$ ,  $e^- \alpha$ ,  $e^- \gamma$ ,  $e^- \gamma\gamma$ , ...

# L'expérience NEMO 3



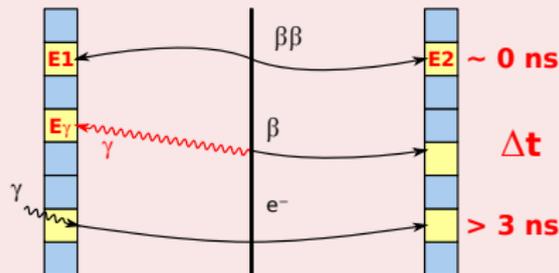
- 10 kg d'émetteur  $\beta\beta$
- 6180 cellules à dérive +  $\vec{B}$  (25 G)
- 1940 compteurs à scintillation
- blindages  $n$  et  $\gamma$
- installé au LSM depuis 2003

## Caractéristiques uniques

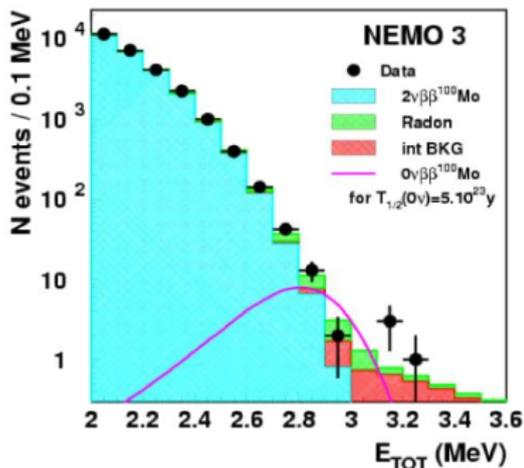
- ✓ Choix de l'émetteur :  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ , ...
- ✓ Identification des particules  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$
- ✓ Cinématique  $\beta\beta$  :  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\cos \theta$ ,  $\Delta t$

⇒ Étude  $\beta\beta 0\nu$ ,  $\beta\beta 2\nu$ ,  $\beta\beta$  états excités  
 ⇒ Mesure + rejet bruit de fond :  
 topologies  $e^-$ ,  $e^-\alpha$ ,  $e^-\gamma$ ,  $e^-\gamma\gamma$

## Rôle du calorimètre



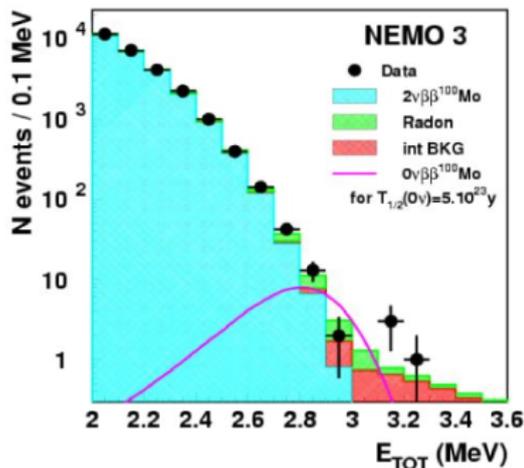
## Résultats et enseignements de NEMO 3



### Résultat $^{100}\text{Mo}$

- Exposition de  $6,9 \times 4,5$  kg.ans
- Fenêtres [ 2,8 – 3,2 ] MeV :
  - données = 18 evts
  - Monte-Carlo =  $16,4 \pm 1,4$  evts
- $T_{1/2}^{0\nu} > 1.10^{24}$  ans
- $m_{\beta\beta} < 0,5 - 1,0$  eV

## Résultats et enseignements de NEMO 3



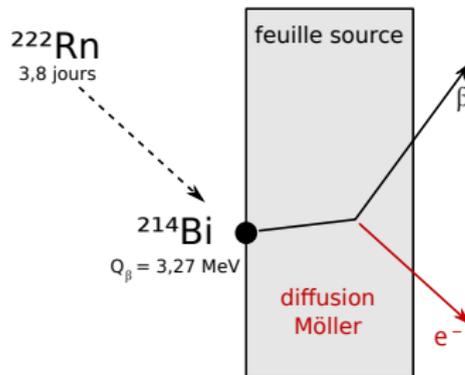
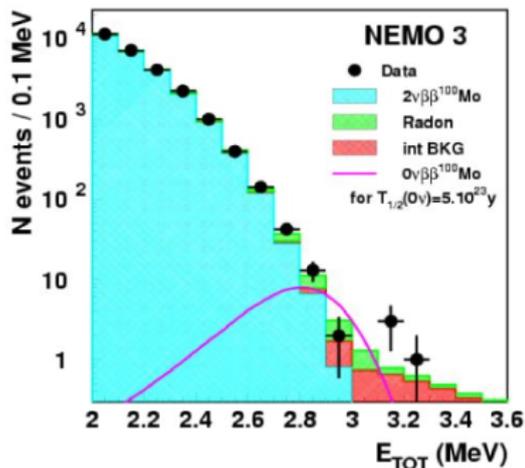
### Résultat $^{100}\text{Mo}$

- Exposition de  $6,9 \times 4,5$  kg.ans
- Fenêtres [ 2,8 – 3,2 ] MeV :
  - données = 18 evts
  - Monte-Carlo =  $16,4 \pm 1,4$  evts
- $T_{1/2}^{0\nu} > 1.10^{24}$  ans
- $m_{\beta\beta} < 0,5 - 1,0$  eV

### Bruit de fond ( $^{100}\text{Mo}$ )

- décroissance  $\beta\beta 2\nu$  + résolution en énergie du calorimètre
- contaminations des feuilles sources ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ )
- radon ← émanation du calorimètre ( $^{226}\text{Ra}$ )

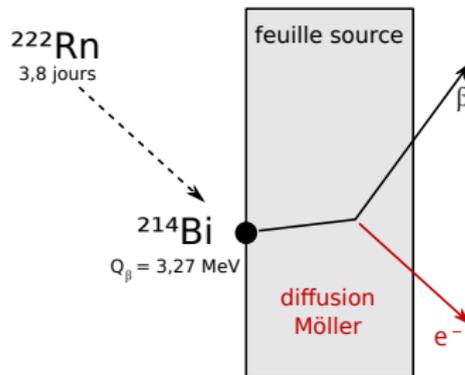
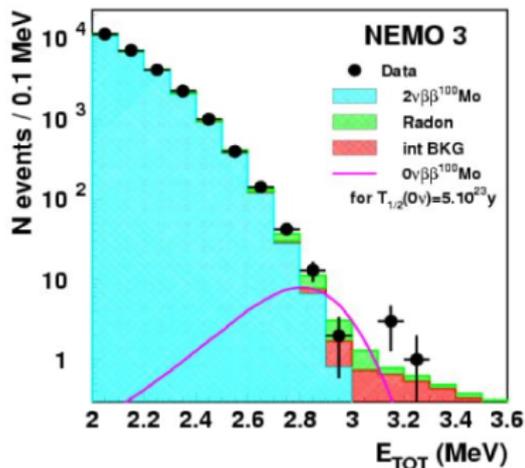
## Résultats et enseignements de NEMO 3



### Bruit de fond ( $^{100}\text{Mo}$ )

- décroissance  $\beta\beta 2\nu$  + résolution en énergie du calorimètre
- contaminations des feuilles sources ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ )
- radon ← émanation du calorimètre ( $^{226}\text{Ra}$ )

## Résultats et enseignements de NEMO 3



### Bruit de fond (<sup>100</sup>Mo)

- décroissance  $\beta\beta 2\nu$  + résolution en énergie du calorimètre
- contaminations des feuilles sources ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ )
- radon ← émanation du calorimètre ( $^{226}\text{Ra}$ )

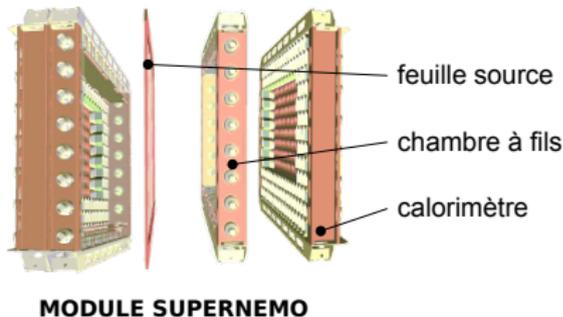
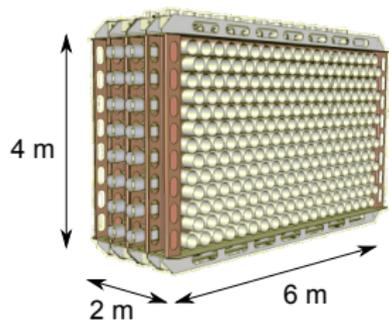
## Le projet SuperNEMO

Collaboration internationale SuperNEMO : 9 pays,  $\sim 100$  physiciens

Objectif du projet :  $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{26}$  ans  $\iff m_{\beta\beta} < 40 - 110$  meV ( $^{82}\text{Se}$ )

# Le projet SuperNEMO

Collaboration internationale SuperNEMO : 9 pays,  $\sim 100$  physiciens  
Objectif du projet :  $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{26}$  ans  $\iff m_{\beta\beta} < 40 - 110$  meV ( $^{82}\text{Se}$ )



## Approche modulaire

- Source :  $^{82}\text{Se}$  en feuilles de  $40 \text{ mg/cm}^2 \rightarrow 5 \text{ kg}$
- Trajectographe :  $\sim 2000$  cellules à dérive en régime Geiger
- Calorimètre :  $\sim 500$  compteurs à scintillation

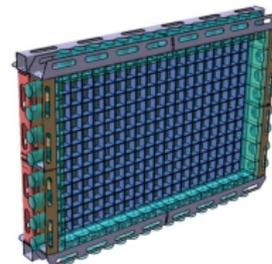
22  $\times$  modules pour une masse  $\sim 100$  kg

# Le calorimètre de SuperNEMO

## Sous-module calorimètre de SuperNEMO

~ 250 compteurs à scintillation par mur :

- scintillateur plastique de volume 8 – 12 L
- photomultiplicateur hémisphérique 8"



## Scintillateur plastique (organique)

- densité et  $Z$  faible (rétrodiffusion  $e^-$ )
- rapidité de la réponse ( $\sim$  ns)
- transparence
- radiopureté excellente
- disponible en grand volume

## Photomultiplicateur (PM)

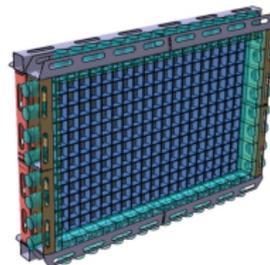
- rapidité de la réponse ( $\sim$  ns)
- grande surface de détection
- gain élevé ( $10^5 - 10^7$ )
- bruit faible

## Le calorimètre de SuperNEMO

### Sous-module calorimètre de SuperNEMO

~ 250 compteurs à scintillation par mur :

- scintillateur plastique de volume 8 – 12 L
- photomultiplicateur hémisphérique 8"

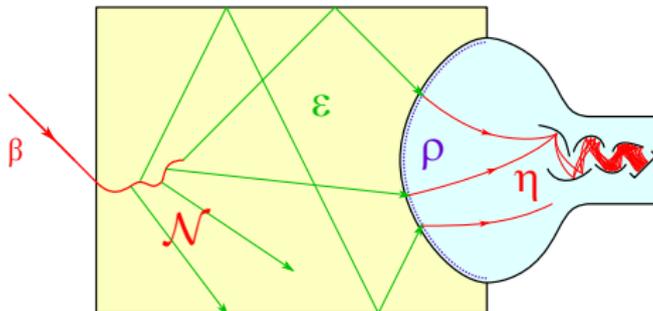


### Cahier des charges du calorimètre

- Résolution en énergie :  $< 8 \%$  FWHM @ 1 MeV (15 % FWHM dans NEMO 3)
- Résolution temporelle 250 ps ( $\sigma$ ) @ 1 MeV
- Linéarité meilleure que 1 % jusqu'à 3 MeV
- "tagging"  $\gamma > 50 \%$  @ 1 MeV (épaisseur du scintillateur  $> 10$  cm)
- Radiopureté  $\rightarrow$  ampoule en verre ( $\sim 85 \%$  masse du PM) :

$$A(^{40}\text{K}) < 100 \text{ mBq/kg} \quad A(^{214}\text{Bi}) < 40 \text{ mBq/kg} \quad A(^{208}\text{Tl}) < 3 \text{ mBq/kg}$$

## Résolution en énergie des compteurs à scintillation



Paramètres intervenant dans la résolution en énergie  $R = \frac{2,35}{\sqrt{\mathcal{N} \epsilon \rho \eta}}$  (FWHM)

- rendement lumineux  $\mathcal{N}$  (photons/MeV)

- efficacité de collection des photons vers le PM  $\epsilon$

} R&D scintillateurs

- efficacité quantique de la photocathode  $\rho$

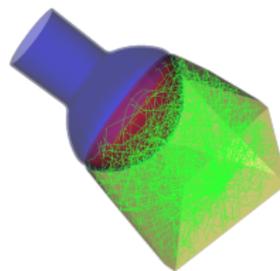
- efficacité de collection des photoélectrons  $\eta$

} R&D photomultiplicateurs

# R&D Calorimétrie pour SuperNEMO



BANCS DE TEST



SIMULATIONS OPTIQUES



R&D SCINTILLATEURS



R&D PHOTOMULTIPLICATEURS

## Bancs de test : Spectromètres à électrons



### Spectromètres à électrons au CENBG

- source de  $^{90}\text{Sr}$  collimatée d'activité 470 MBq ( $Q_{\beta} = 2,28 \text{ MeV}$ )
- sélection en énergie : 0,4 – 2,0 MeV (FWHM < 1,5 % @ 1 MeV)
- faisceau : profil gaussien (FWHM = 0,85 cm) et intensité  $\sim 30 \text{ e}^{-}/\text{sec.}$  @ 1 MeV
- mobilité des spectromètres : 150×150 mm ( $\pm 0,5 \text{ mm}$ ) et 0,6×2 m ( $\pm 1 \text{ mm}$ )

## Bancs de test : Contrôle et acquisition

### Automatisation (services du laboratoire CENGB)

Contrôle du banc de test par ordinateur :

- réglage du faisceau (position, énergie, ...)
- système de déplacement motorisé
- planification de séries de mesures
- synchronisation avec une base de données



### Acquisition MATAcq32

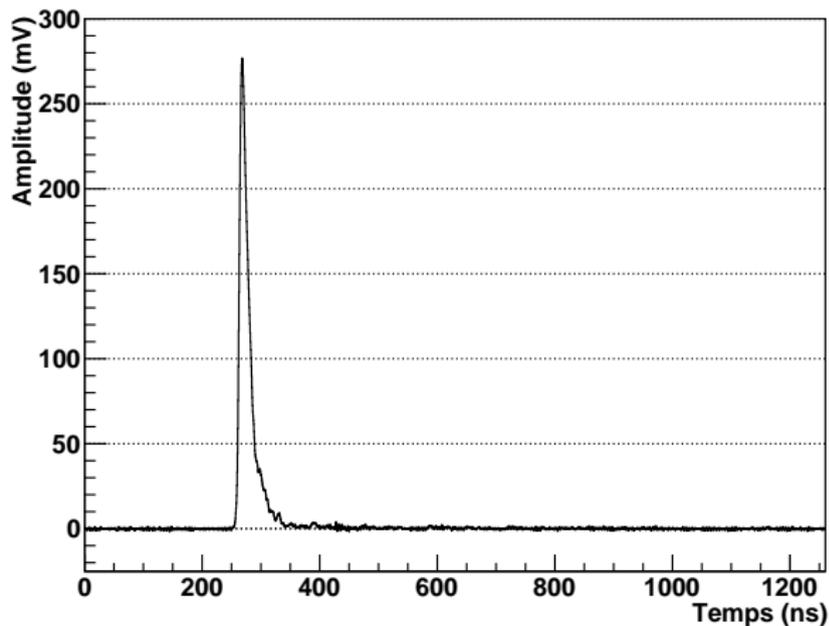
carte CEA/DAPNIA+IN2P3/LAL

- échantillonnage des signaux @ 2 GHz
- fenêtre de 1,25  $\mu$ s (2520 points)
- précision en amplitude de 250  $\mu$ V

contrôle logiciel LPC-CAEN

## Bancs de test → Signal

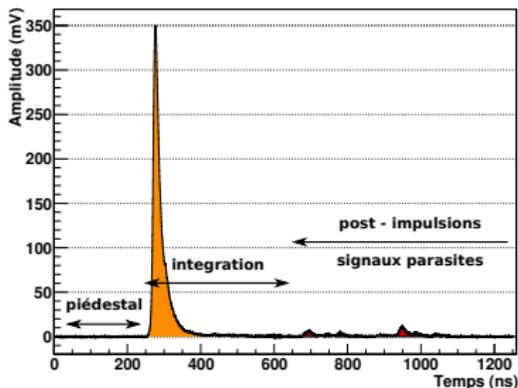
PVT Eljen 2 cm + PM Photonis XP1886 (SN100)



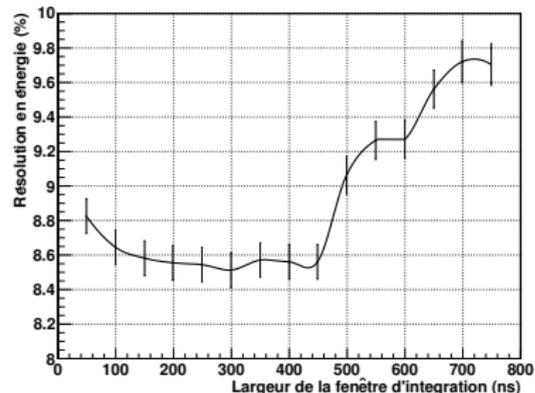
## Bancs de test : Analyse des signaux

- intégration de la charge, influence de la plage d'integration sur la résolution

PVT Eljen 2 cm + PM Photonis XP1886 (SN124)



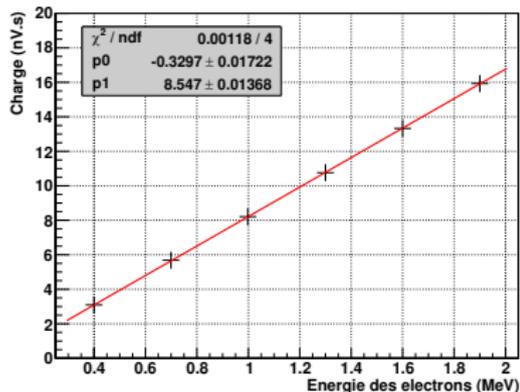
PVT Eljen 2 cm + PM Photonis XP1886 (SN109)



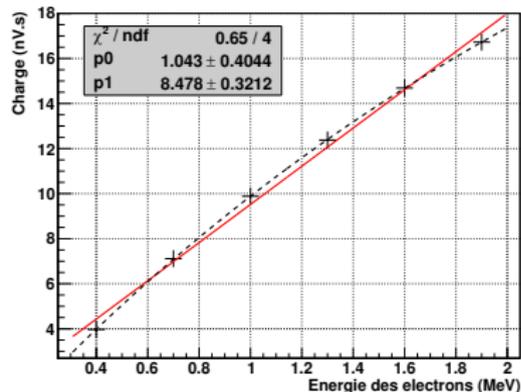
## Bancs de test : Analyse des signaux

- intégration de la charge, influence de la plage d'intégration sur la résolution
- **contrôle de la linéarité des compteurs à scintillation**

PS Eijen 2 cm + PM Photonis XP1886 (SN100) VD3



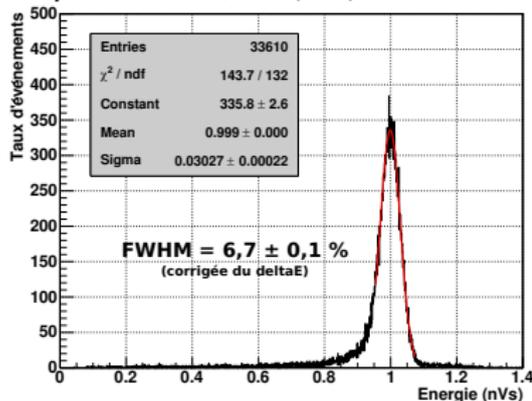
PS Dubna 2 cm + PM Photonis XP1886 (SN100) VD1



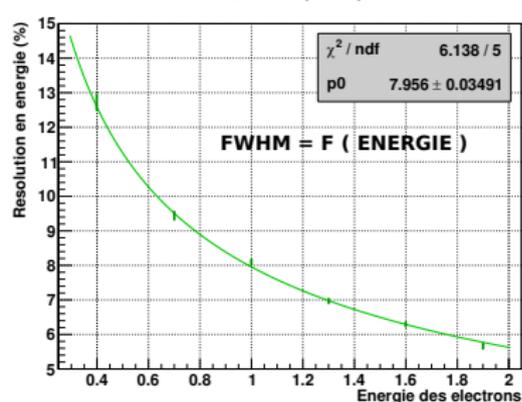
## Bancs de test : Analyse des signaux

- intégration de la charge, influence de la plage d'intégration sur la résolution
- contrôle de la linéarité des compteurs à scintillation
- mesure précise de la résolution en énergie (erreurs stat. + syst. de 2 %)

PVT Eljen 2 cm + PM Photonis XP1886 (SN160)



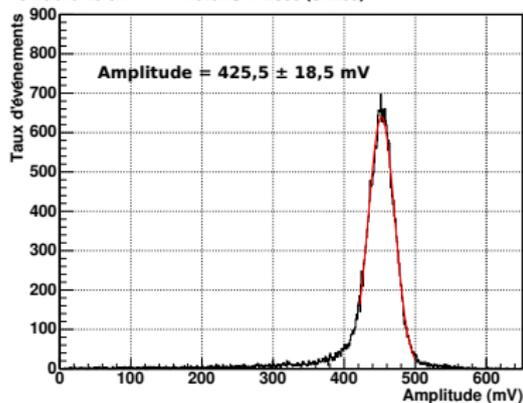
PS Dubna 10 cm + PM Photonis XP1886 (SN160)



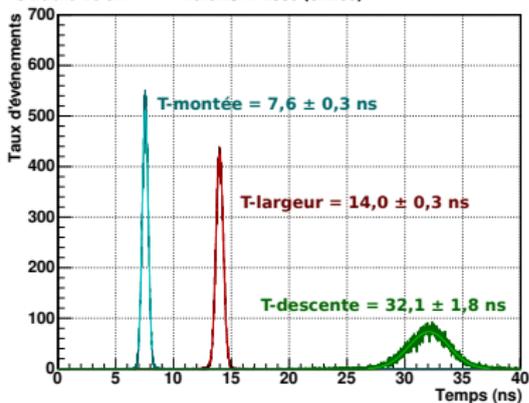
## Bancs de test : Analyse des signaux

- intégration de la charge, influence de la plage d'intégration sur la résolution
- contrôle de la linéarité des compteurs à scintillation
- mesure précise de la résolution en énergie (erreurs stat. + syst. de 2 %)
- autres propriétés : amplitude, caractéristiques temporelles, gain, ...

PS Dubna 10 cm + PM Photonis XP1886 (SN160)



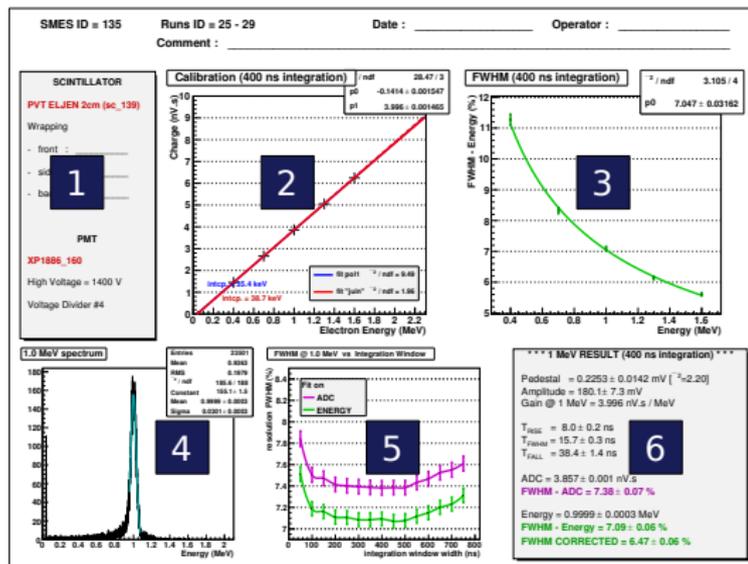
PS Dubna 10 cm + PM Photonis XP1886 (SN160)



## Bancs de test : Analyse des signaux

- intégration de la charge, influence de la plage d'intégration sur la résolution
- contrôle de la linéarité des compteurs à scintillation
- mesure précise de la résolution en énergie (erreurs stat. + syst. de 2 %)
- autres propriétés : amplitude, caractéristiques temporelles, gain, ...
- **définition d'un protocole d'analyse pour tests en série**

# Fiche résultat du test d'un compteur



## CARACTERISTIQUES GENERALES

- 1 - Configuration de la mesure (scintillateur, PM, HV, ...)
- 2 - Courbe d'étalonnage
- 3 - Résolution FWHM en fonction de l'énergie

## CARACTERISTIQUES @ 1 MEV

- 4 - Spectre en énergie
- 5 - Résolution en fonction de la plage d'intégration
- 6 - charge, résolution, propriétés des signaux, ...

- Caractérisation standard et de référence des scintillateurs et photomultiplicateurs
- Qualification en série des compteurs à scintillation pour SuperNEMO

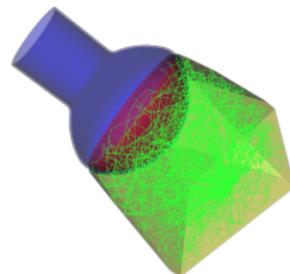
## Outils de simulations optiques

### Objectif

Simulation du transport des photons pour :

- modéliser la réponse des compteurs de NEMO 3
- guider les développements pour SuperNEMO

Travail réalisé avec Benton PAHLKA (U. Texas, Austin)



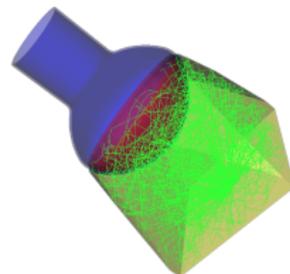
## Outils de simulations optiques

### Objectif

Simulation du transport des photons pour :

- modéliser la réponse des compteurs de NEMO 3
- guider les développements pour SuperNEMO

Travail réalisé avec Benton PAHLKA (U. Texas, Austin)



### Fonctionnement

Simulations Monte-Carlo GEANT4 :

- simulation de l'aspect corpusculaire du photon
- lois de l'optique parfaitement connues (Snell-Descartes, Beer-Lambert, ...)
- mais pour la plupart paramétrisées (indices optiques, longueur d'atténuation, ...)

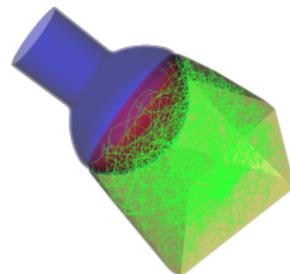
# Outils de simulations optiques

## Objectif

Simulation du transport des photons pour :

- modéliser la réponse des compteurs de NEMO 3
- guider les développements pour SuperNEMO

Travail réalisé avec Benton PAHLKA (U. Texas, Austin)



## Fonctionnement

Simulations Monte-Carlo GEANT4 :

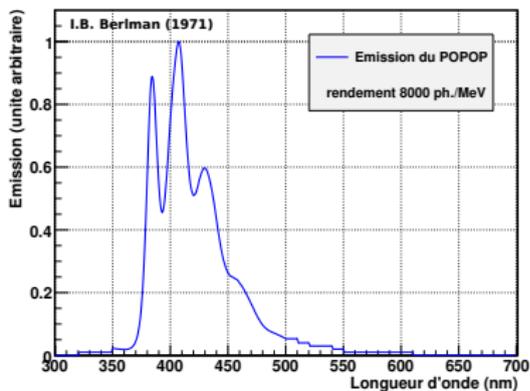
- simulation de l'aspect corpusculaire du photon
- lois de l'optique parfaitement connues (Snell-Descartes, Beer-Lambert, ...)
- mais pour la plupart paramétrisées (indices optiques, longueur d'atténuation, ...)

⇒ **coordination d'un jeu de paramètre avec dépendance en longueur d'onde**

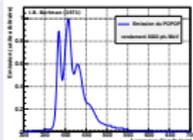
## Simulations optiques : Modèle

Lois optiques paramétrisées par

- **spectre de scintillation**  
PS + 1,5 % pTP + 0,01 % POPOP



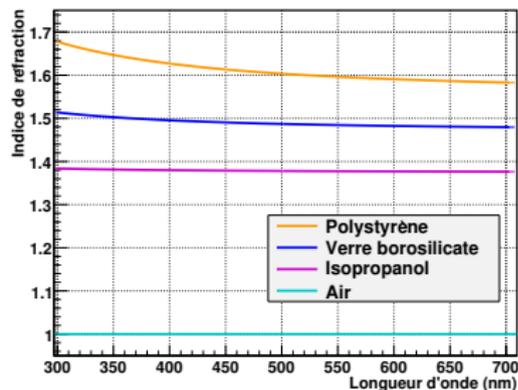
### Emission



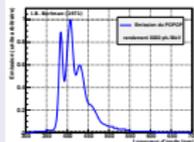
## Simulations optiques : Modèle

Lois optiques paramétrisées par

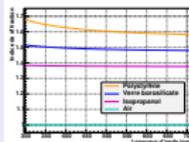
- spectre de scintillation  
PS + 1,5 % pTP + 0,01 % POPOP
- indices de réfraction



### Emission



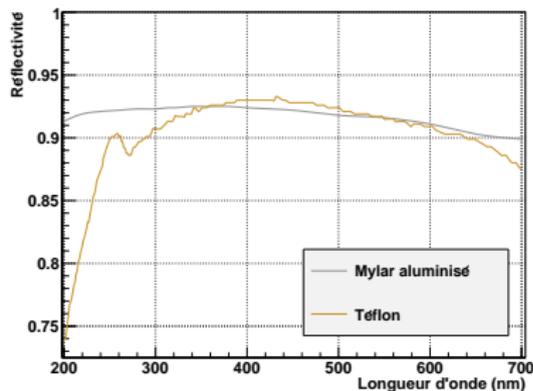
### Indices



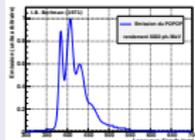
## Simulations optiques : Modèle

Lois optiques paramétrisées par

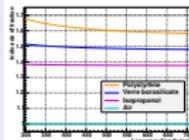
- spectre de scintillation  
PS + 1,5 % pTP + 0,01 % POPOP
- indices de réfraction
- réflectivité des surfaces



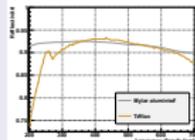
### Emission



### Indices



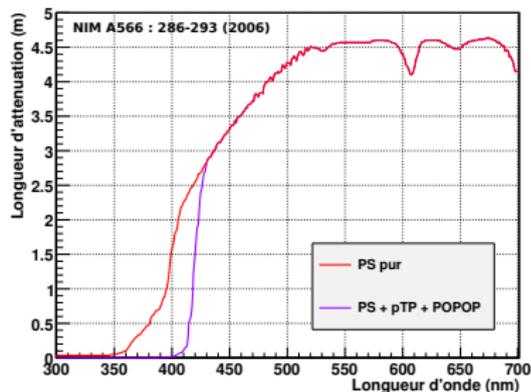
### Réflectivité



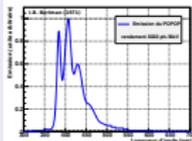
## Simulations optiques : Modèle

### Lois optiques paramétrisées par

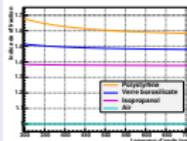
- spectre de scintillation  
PS + 1,5 % pTP + 0,01 % POPOP
- indices de réfraction
- réflectivité des surfaces
- atténuation des photons :
  - sans réémission (perte)
  - avec réémission (WLS)



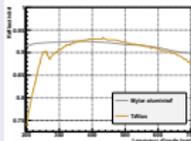
### Emission



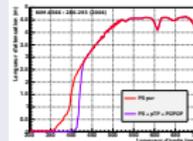
### Indices



### Réflectivité



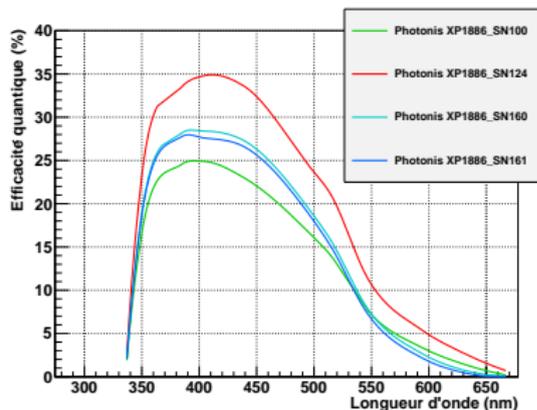
### Atténuation



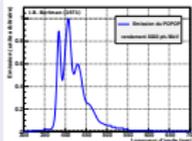
## Simulations optiques : Modèle

Lois optiques paramétrisées par

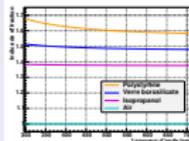
- spectre de scintillation  
PS + 1,5 % pTP + 0,01 % POPOP
- indices de réfraction
- réflectivité des surfaces
- atténuation des photons :
  - sans réémission (perte)
  - avec réémission (WLS)
- efficacité quantique du PM



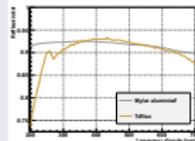
### Emission



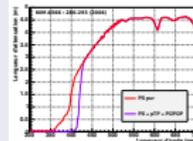
### Indices



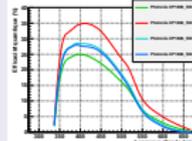
### Réflectivité



### Atténuation



### Photodétection

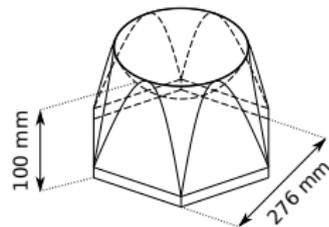


## Simulations optiques : Cas des surfaces (1/2)

### Importance des surfaces

Géométrie SuperNEMO  $\rightarrow \sim 5$  réflexions/photons

- modification direction/longueur des trajectoires
- absorption en surface ( $R \approx 93\%$ )  
 $\Rightarrow$  probabilité de survie  $0,93^5 = 0,64$

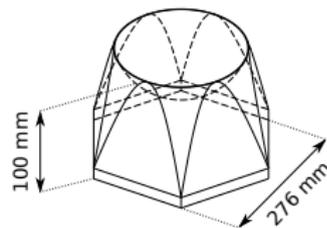


## Simulations optiques : Cas des surfaces (1/2)

### Importance des surfaces

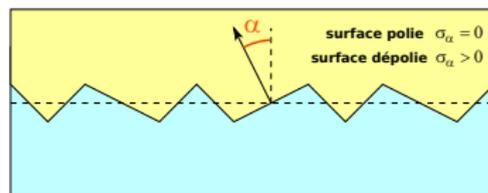
Géométrie SuperNEMO  $\rightarrow \sim 5$  réflexions/photons

- modification direction/longueur des trajectoires
- absorption en surface ( $R \approx 93\%$ )  
 $\Rightarrow$  probabilité de survie  $0,93^5 = 0,64$



### Nature des surfaces

- **interface :**
  - deux milieux optiques
  - état de surface (poli/dépoli)

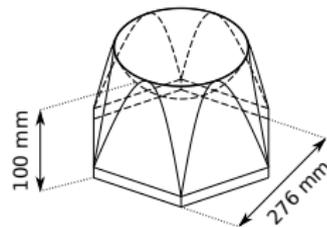


## Simulations optiques : Cas des surfaces (1/2)

### Importance des surfaces

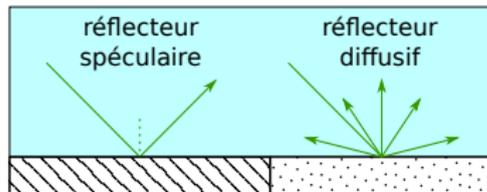
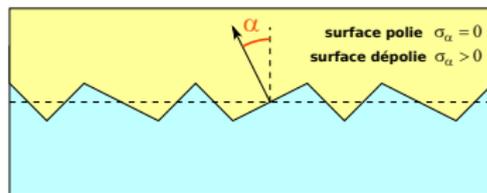
Géométrie SuperNEMO  $\rightarrow \sim 5$  réflexions/photons

- modification direction/longueur des trajectoires
- absorption en surface ( $R \approx 93\%$ )  
 $\Rightarrow$  probabilité du survie  $0,93^5 = 0,64$



### Nature des surfaces

- interface :
  - deux milieux optiques
  - état de surface (poli/dépoli)
- réflecteur :
  - spéculaire (Mylar aluminisé)
  - diffusif (Téflon)

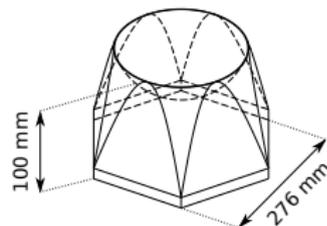


## Simulations optiques : Cas des surfaces (1/2)

### Importance des surfaces

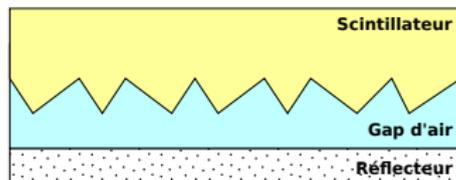
Géométrie SuperNEMO  $\rightarrow \sim 5$  réflexions/photons

- modification direction/longueur des trajectoires
- absorption en surface ( $R \approx 93\%$ )  
 $\Rightarrow$  probabilité de survie  $0,93^5 = 0,64$



### Nature des surfaces

- interface :
  - deux milieux optiques
  - état de surface (poli/dépoli)
- réflecteur :
  - spéculaire (Mylar aluminisé)
  - diffusif (Téflon)
- **habillage : interface + réflecteur**

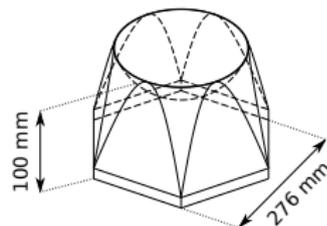


## Simulations optiques : Cas des surfaces (1/2)

### Importance des surfaces

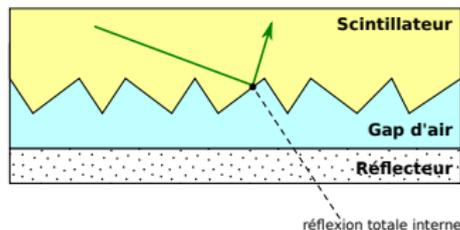
Géométrie SuperNEMO  $\rightarrow \sim 5$  réflexions/photons

- modification direction/longueur des trajectoires
- absorption en surface ( $R \approx 93\%$ )  
 $\Rightarrow$  probabilité de survie  $0,93^5 = 0,64$



### Nature des surfaces

- interface :
  - deux milieux optiques
  - état de surface (poli/dépoli)
- réflecteur :
  - spéculaire (Mylar aluminisé)
  - diffusif (Téflon)
- habillage : interface + réflecteur  
 $\Rightarrow$  réflexion totale interne possible sur l'interface scintillateur/air

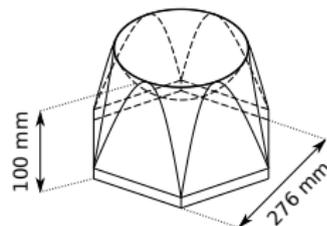


## Simulations optiques : Cas des surfaces (1/2)

### Importance des surfaces

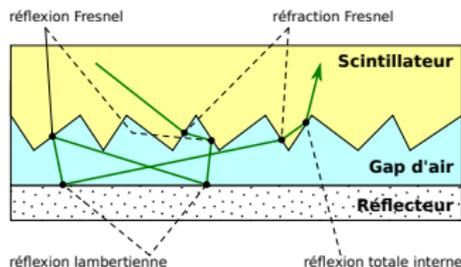
Géométrie SuperNEMO  $\rightarrow \sim 5$  réflexions/photons

- modification direction/longueur des trajectoires
- absorption en surface ( $R \approx 93\%$ )  
 $\Rightarrow$  probabilité de survie  $0,93^5 = 0,64$



### Nature des surfaces

- interface :
  - deux milieux optiques
  - état de surface (poli/dépoli)
- réflecteur :
  - spéculaire (Mylar aluminisé)
  - diffusif (Téflon)
- habillage : interface + réflecteur  
 $\Rightarrow$  réflexion totale interne possible sur l'interface scintillateur/air  
 $\Rightarrow$  réflexions multiples/complexes



## Simulations optiques : Cas des surfaces (2/2)

### Test comparatif entre mesures et simulations

- scintillateur à base de polystyrène dans un état poli
- habillage progressif du scintillateur



## Simulations optiques : Cas des surfaces (2/2)



### Test comparatif entre mesures et simulations

- scintillateur à base de polystyrène dans un état poli
- habillage progressif du scintillateur

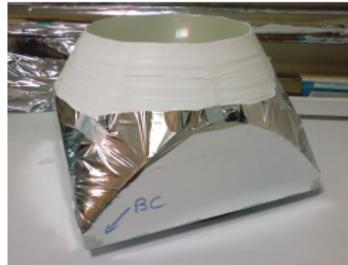
	Résolution FWHM @ 1 MeV		
	Mesure (err. rel. 2 %)	Simulation GEANT4 (err. rel. 5 %)	
	Spectromètre	SANS gap d'air	AVEC gap d'air
Habillage 1	16,4 %	38,7 %	17,6 %
Habillage 2	14,4 %	28,4 %	15,6 %
Habillage 3	11,5 %	21,3 %	11,9 %
Habillage 4	10,7 %	12,3 %	10,7 %

Excellent accord entre mesures et simulations **avec gap d'air**  
⇒ validation de la modélisation de l'habillage

## R&D scintillateurs plastiques



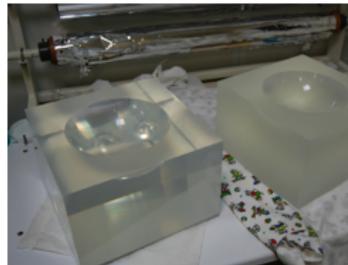
— Géométrie —



— Habillage —



— Polissage —



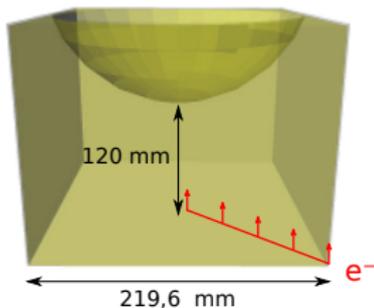
— Matériau —

## R&D scintillateurs plastiques : Géométrie

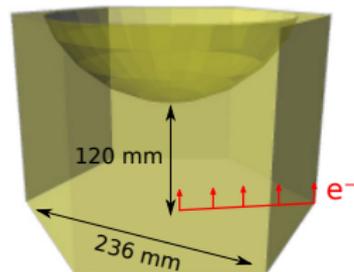
### Choix de la géométrie de base

- Comparaison des formes carrés et hexagonales à surface d'entrée identique
- Simulation pour un scintillateur à base de PS
- Réponse en fonction du point d'impact d'électrons de 1 MeV

Forme de base carrée



Forme de base hexagonale

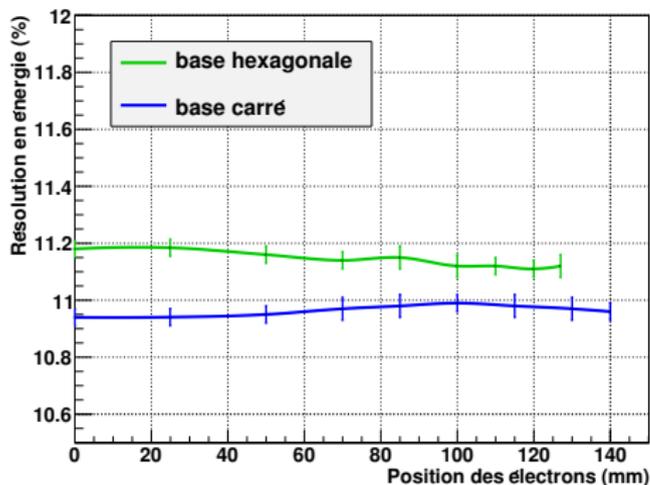


## R&D scintillateurs plastiques : Géométrie

### Choix de la géométrie de base

- Comparaison des formes carrés et hexagonales à surface d'entrée identique
- Simulation pour un scintillateur à base de PS
- Réponse en fonction du point d'impact d'électrons de 1 MeV

Simulation scintillateur NEMO3 + XP1886 SN100

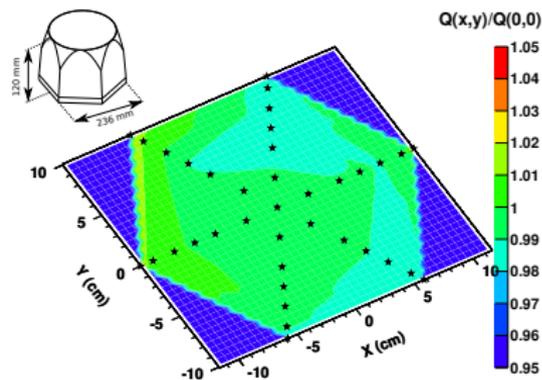
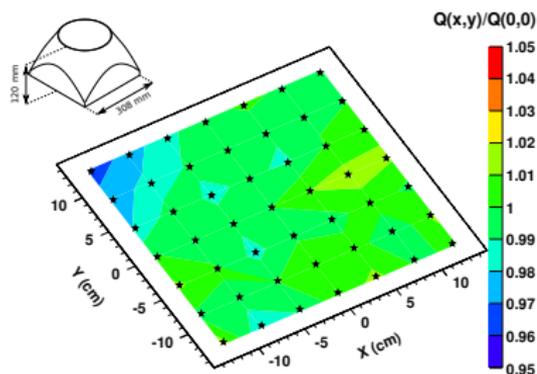


- carré préférable
- excellente homogénéité

## R&D scintillateurs plastiques : Géométrie

### Vérification expérimentale

#### balayage de la surface de scintillateurs



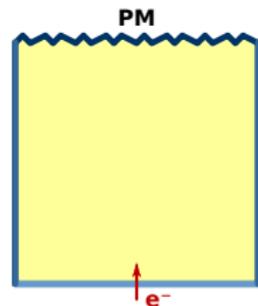
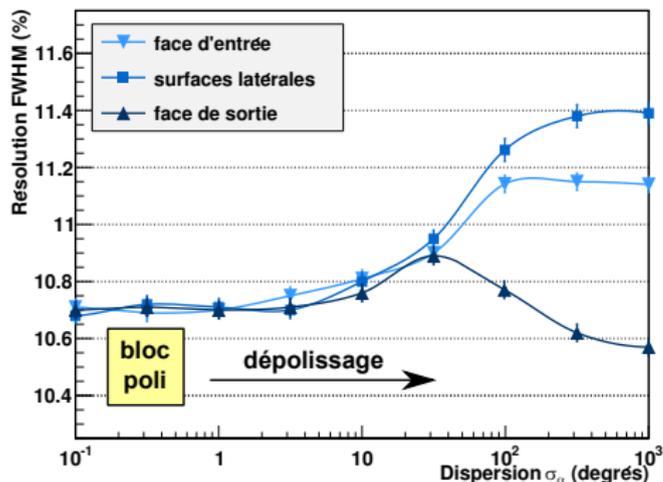
Inhomogénéités de la réponse mesurées  $< 2\%$

## R&D scintillateurs plastiques : Polissage

### Choix de l'état de polissage

Trois surfaces différentes à considérer : face d'entrée, parois latérales, face de sortie

PS hex. 219 x 100 mm + PM Photonis XP1886 (SN100)



### Configuration idéale

- face de sortie dépolie
- surfaces d'entrée et latérales polies

## R&D scintillateurs plastiques : Polissage

### Vérification expérimentale

#### Polissage/dépolissage d'un scintillateur étape par étape

Scintillateur PS hex. 219 mm × 100 mm + PM Photonis XP1886 (SN100)

État des surfaces			Résolution @ 1 MeV	
Entrée	Cotés	Sortie	Mesure ( $\pm 0,2 \%$ )	GEANT4 ( $\pm 0,6 \%$ )
dépoli	dépoli	poli	11,1 %	11,7 %
poli	dépoli	poli	11,3 %	11,4 %
poli	poli	poli	10,7 %	10,7 %
poli	poli	dépoli	10,5 %	10,6 %

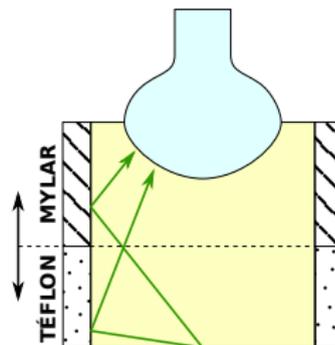
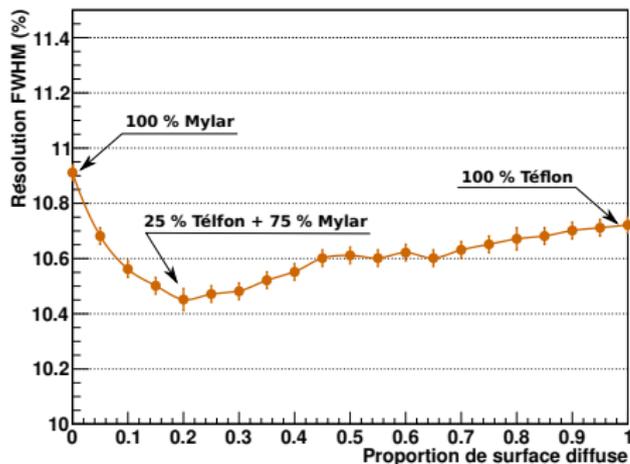
- dépolissage de la sortie = meilleure transparence de la surface
- polissage des autres faces = reflexion totale interne > reflexion sur l'habillage

## R&D scintillateurs plastiques : Habillage

### Choix de l'habillage

- face d'entrée aux électrons : habillage fin à Z faible  $\Rightarrow$  Mylar aluminisé ( $6 \mu\text{m}$ )
- surfaces latérales : spéculaire (Mylar) vs. diffusif (Téflon)

Scintillateur PS hex. 219 mm x 100 mm



### Configuration optimale

75 % Mylar + 25 % Téflon

## R&D scintillateurs plastiques : Habillage

Scintillateur PS hex. 219 mm × 100 mm + PM Photonis XP1886 (SN100)

Réflecteur latéral	Résolution FWHM	
	Mesure ( $\pm 0,2$ %)	Simulation ( $\pm 0,5$ %)
100 % Mylar	11,0 %	10,9 %
100 % Téflon	10,7 %	10,7 %
25 % Téflon + 75 % Mylar	10,7 %	10,5 %

### Test expérimental

Amélioration trop faible pour être mesurée

⇒ à contrôler avec la géométrie définitive

## Bilan R&D scintillateurs plastiques

### R&D scintillateurs polystyrène (PS)

- Choix de la géométrie cubique : meilleure FWHM + homogénéité
- Polissage des surfaces d'entrée et latérales, dépolissage de la face de sortie
- Habillage 100 % Téflon ou mixte

## Bilan R&D scintillateurs plastiques

### R&D scintillateurs polystyrène (PS)

- Choix de la géométrie cubique : meilleure FWHM + homogénéité
- Polissage des surfaces d'entrée et latérales, dépolissage de la face de sortie
- Habillage 100 % Téflon ou mixte

### Comparaison PS/PVT (polyvinyl toluène)

Matériau	PS NEMO 3	PVT EJ-200	PVT EJ-204
Rendement lumineux	8000 ph./MeV	10000 ph./MeV	10400 ph./MeV
Émission maximale à	415 nm	425 nm	408 nm
Longueur d'atténuation	~ 3 m	3,8 m	1,6 m

## Bilan R&D scintillateurs plastiques

### R&D scintillateurs polystyrène (PS)

- Choix de la géométrie cubique : meilleure FWHM + homogénéité
- Polissage des surfaces d'entrée et latérales, dépolissage de la face de sortie
- Habillage 100 % Téflon ou mixte

### Comparaison PS/PVT (polyvinyl toluène)

Matériau	PS NEMO 3	PVT EJ-200	PVT EJ-204
Rendement lumineux	8000 ph./MeV	10000 ph./MeV	10400 ph./MeV
Émission maximale à	415 nm	425 nm	408 nm
Longueur d'atténuation	~ 3 m	3,8 m	1,6 m

Test comparatif de cubes  $308 \times 120$  mm + PM Photonis XP1886 (SN160)

FWHM @ 1 MeV	$8,9 \pm 0,1$ %	$8,3 \pm 0,1$ %	$7,8 \pm 0,1$ %
--------------	-----------------	-----------------	-----------------

Choix du scintillateur PVT EJ-204 pour SuperNEMO

## R&D photomultiplicateurs (PMs)



Photonis SAS, Brives



Photonis XP1886

### Collaboration CENBG/Photonis

Groupement d'Intérêt Scientifique Photonis/IN2P3

- Développement d'un **PM 8"** dédié à SuperNEMO, le XP1886 :
  - **linéaire** : adapté au régime scintillation (détection de  $\sim 10^3$  photons)
  - amélioration des **efficacités quantique et de collection** des photoélectrons
  - **radiopurété** (verre + composants)
- $\sim 50$  PMs de dimensions variées reçus et testés au CENBG (1"  $\rightarrow$  9")

## R&D photomultiplicateurs : Linéarité

### Mise au point de la linéarité

XP1886 = clone du XP1806 (11 étages, gain  $10^8$ )

- passage à 8 étages pour un gain à  $10^6$
- multiplicateur linéaire focalisant conservé
- répartition des tensions entre les dynodes adaptée

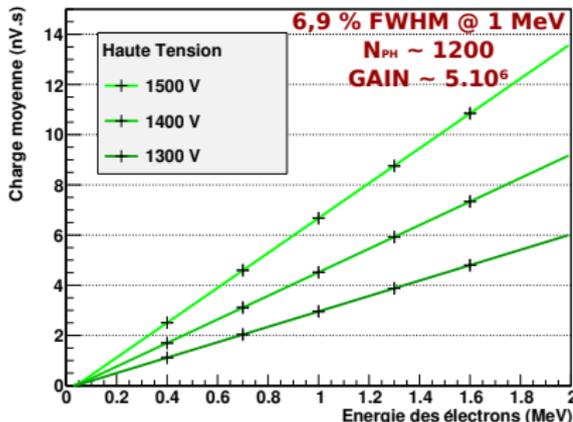
## R&D photomultiplicateurs : Linéarité

### Mise au point de la linéarité

XP1886 = clone du XP1806 (11 étages, gain  $10^8$ )

- passage à 8 étages pour un gain à  $10^6$
- multiplicateur linéaire focalisant conservé
- répartition des tensions entre les dynodes adaptée

PVT Eljen 2 cm + XP1886\_SN100 (VD3)



7 prototypes XP1886 reçus :

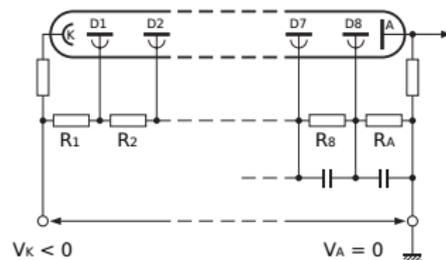
linéarité meilleure que 0,3 %  
jusqu'à 2,0 MeV

## R&D photomultiplicateurs : Répartition des tensions entre les dynodes

### Optimisation de l'alimentation du PM

Influence de la répartition des tensions :

- dans les premiers étages :
  - collection des photoélectrons
  - rapidité des signaux
- aux derniers étages : gain, linéarité

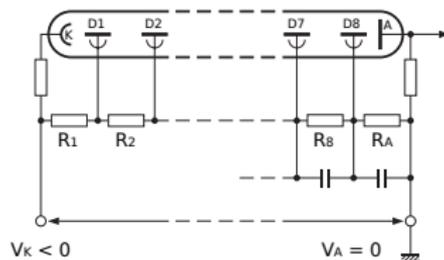


## R&D photomultiplicateurs : Répartition des tensions entre les dynodes

### Optimisation de l'alimentation du PM

Influence de la répartition des tensions :

- dans les premiers étages :
  - collection des photoélectrons
  - rapidité des signaux
- aux derniers étages : gain, linéarité



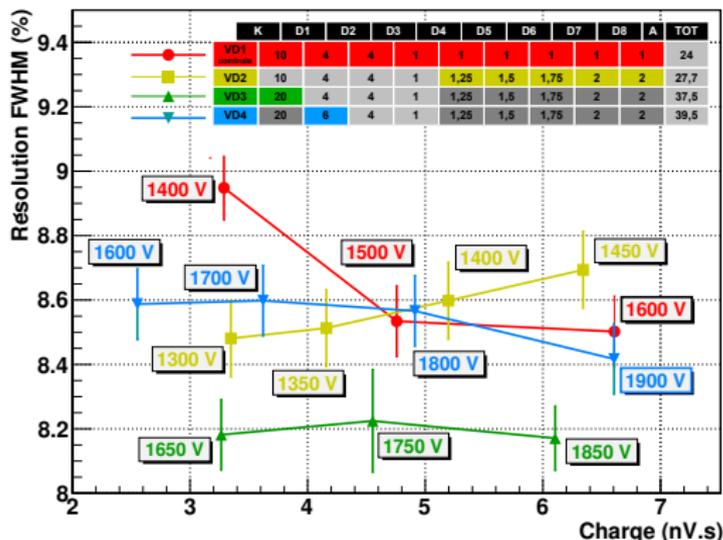
### Répartitions testées

	K	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	A	TOT
VD1 nominale	10	4	4	1	1	1	1	1	1	1	24
VD2	10	4	4	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2	27,7
VD3	20	4	4	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2	37,5
VD4	20	6	4	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2	39,5

- VD1 → VD2 : repartition progressive en fin de multiplication
- VD2, VD3, VD4 : différentes configurations des tensions entre K-D1 et D1-D2

# R&D photomultiplicateurs : Répartition des tensions entre les dynodes

Scintillateur PS cylindrique 8" x 100 mm + XP1886\_SN100



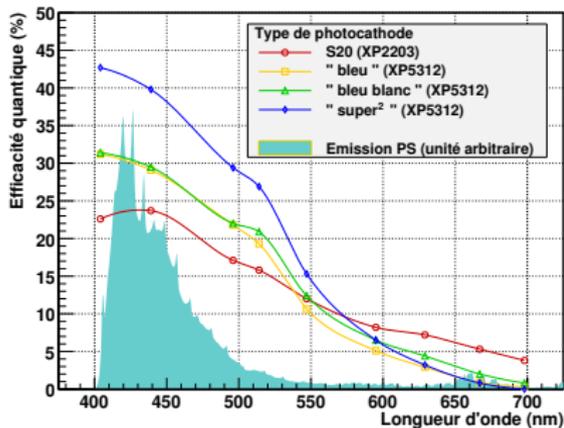
Répartition VD3 retenue : amélioration de la résolution de 0,4 %

# R&D photomultiplicateurs : Efficacité de photodétection

## Amélioration de l'efficacité quantique de la photocathode

Progrès récents avec les photocathodes bialkali ( $\rho$  : 20 %  $\rightarrow$  40 % et +)

- Travaux préliminaires sur PM 3"



PS 3"  $\times$  50 mm + PM Photonis XP5312 (3")

Photocathode	$\langle \rho \rangle$	FWHM @ 1 MeV
"bleu-blanc"	28 %	$7,9 \pm 0,2$ %
"super²"	37,3 %	$7,5 \pm 0,2$ %

FWHM attendue  $\approx$  6,8 %

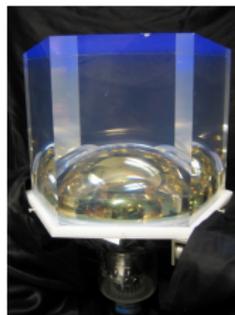
Identification d'une dégradation du vide lors du "process" par Photonis

## R&D photomultiplicateurs : Efficacité de photodétection

### Amélioration de l'efficacité quantique de la photocathode

Progrès récents avec les photocathodes bialkali ( $\rho$  : 20 %  $\rightarrow$  40 % et +)

- Travaux préliminaires sur PM 3"
- **Extrapolation des développements aux PMs 8" (XP1886)**



PVT EJ-200 Hex. 219×100 mm + Photonis XP1886

Photocathode	$\rho$ @ 420 nm	FWHM @ 1 MeV
standard	24 %	$7,3 \pm 0,1$ %
super <sup>2</sup>	35 %	$7,1 \pm 0,1$ %
super <sup>2</sup> "process" amélioré	28 %	$6,7 \pm 0,1$ %

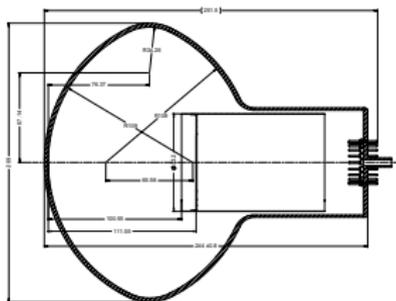
XP1886 + nouvelle photocathode  $\Rightarrow$  résolution en énergie **< 7,0 %**  
Améliorations encore possibles mais développements stoppés en mars 2009.

## R&D photomultiplicateurs : Géométrie de l'ampoule

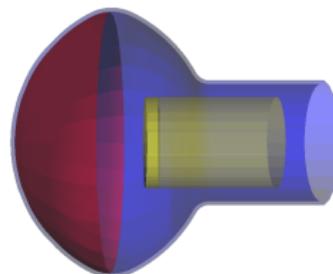
Simulation optique du PM (avec Cyril Moussant, PHOTONIS)

Étude des photons traversant la photocathode sans interagir

## R&D photomultiplicateurs : Géométrie de l'ampoule



GEANT4  
→

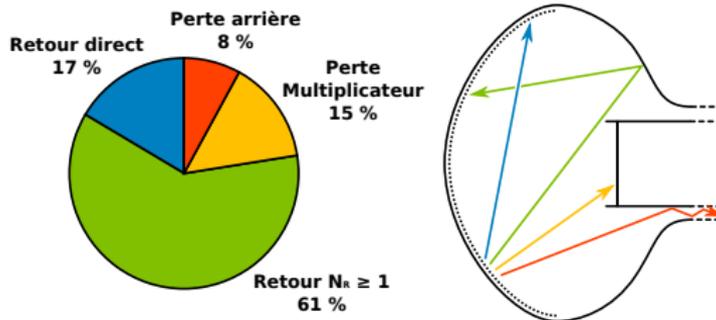


Simulation optique du PM (avec Cyril Moussant, PHOTONIS)

Étude des photons traversant la photocathode sans interagir

- Géométrie de l'ampoule suivant un plan fourni par PHOTONIS

## R&D photomultiplicateurs : Géométrie de l'ampoule

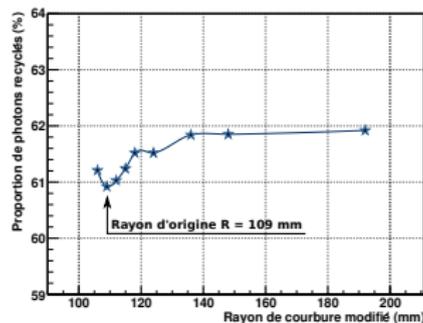
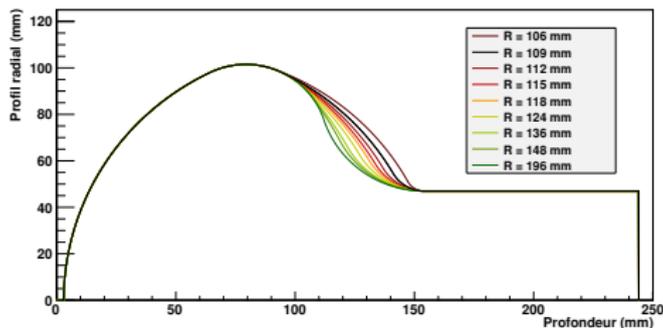


### Simulation optique du PM (avec Cyril Moussant, PHOTONIS)

Étude des photons traversant la photocathode sans interagir

- Géométrie de l'ampoule suivant un plan fourni par PHOTONIS
- **Devenir des photons non détectés lors de la traversée de la photocathode**

## R&D photomultiplicateurs : Géométrie de l'ampoule

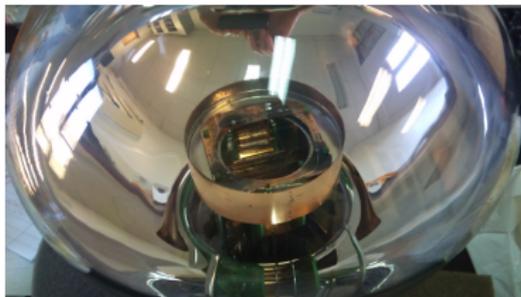


### Simulation optique du PM (avec Cyril Moussant, PHOTONIS)

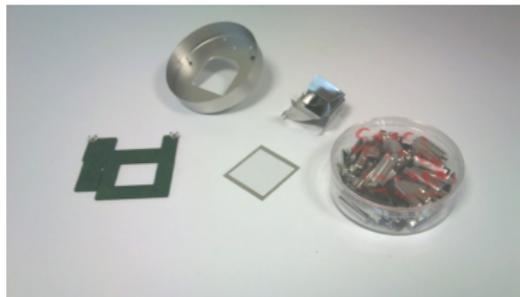
Étude des photons traversant la photocathode sans interagir

- Géométrie de l'ampoule suivant un plan fourni par PHOTONIS
- Devenir des photons non détectés lors de la traversée de la photocathode
- **Géométrie de l'ampoule optimale :  $R > 140$  mm**
  - ⇒ meilleur recyclage des photons
  - ⇒ meilleure collection des photoélectrons (simulation PHOTONIS)

## R&D photomultiplicateurs : Radiopureté



Ampoule du PM Photonis XP1886



Éléments internes aux PMs

### Voie de R&D

- Diminution du nombre de voie (PM 5"  $\rightarrow$  8")
- Développer un nouveau verre de très basse radioactivité
- Contrôle et sélection des autres matériaux par spectrométrie  $\gamma$

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (1/2)

### Origine de la radioactivité du verre

- base : oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (1/2)

### Origine de la radioactivité du verre

- base : oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$
- + fondant :  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , ... (point de fusion  $1730^\circ\text{C} \rightarrow 1400^\circ\text{C}$ )

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (1/2)

### Origine de la radioactivité du verre

- base : oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$
- + fondant :  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , ... (point de fusion  $1730^\circ\text{C} \rightarrow 1400^\circ\text{C}$ )
- + stabilisant :  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{BaCO}_3$ , ... (résistance chimique)

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (1/2)

### Origine de la radioactivité du verre

- base : oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$
- + fondant :  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , ... (point de fusion  $1730^\circ\text{C} \rightarrow 1400^\circ\text{C}$ )
- + stabilisant :  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{BaCO}_3$ , ... (résistance chimique)
- + autres composants suivant applications  
pour les PMs : transparence, rigidité, tenue photocathode

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (1/2)

### Origine de la radioactivité du verre

- base : **oxyde de silicium**  $\text{SiO}_2$
  - + fondant :  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , ... (point de fusion  $1730^\circ\text{C} \rightarrow 1400^\circ\text{C}$ )
  - + stabilisant :  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{BaCO}_3$ , ... (résistance chimique)
  - + autres composants suivant applications  
pour les PMs : transparence, rigidité, tenue photocathode
- ⇒ forte présence de la plupart des éléments radioactifs présents sur terre  
notamment  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{228}\text{Ra}$  (parents du  $^{214}\text{Bi}$  et  $^{208}\text{Tl}$ )

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (1/2)

### Origine de la radioactivité du verre

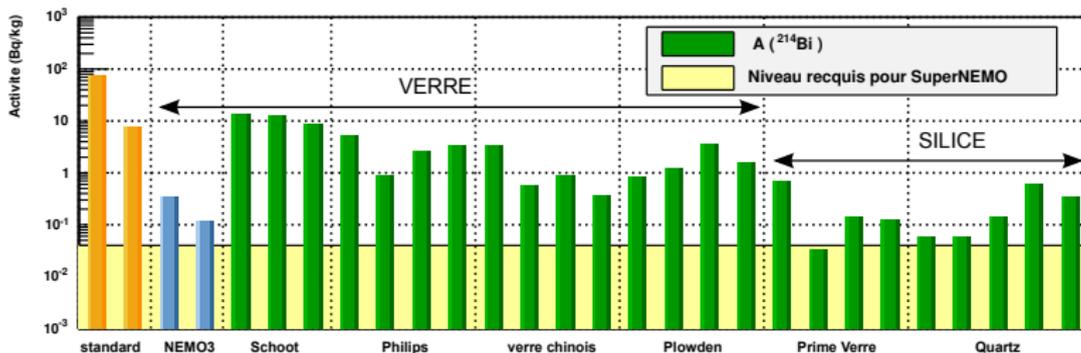
- base : oxyde de silicium  $\text{SiO}_2$
  - + fondant :  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ , ... (point de fusion  $1730^\circ\text{C} \rightarrow 1400^\circ\text{C}$ )
  - + stabilisant :  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{BaCO}_3$ , ... (résistance chimique)
  - + autres composants suivant applications  
pour les PMs : transparence, rigidité, tenue photocathode
- ⇒ forte présence de la plupart des éléments radioactifs présents sur terre notamment  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{228}\text{Ra}$  (parents du  $^{214}\text{Bi}$  et  $^{208}\text{Tl}$ )

Bq/kg	$A(^{40}\text{K})$	$A(^{214}\text{Bi})$	$A(^{208}\text{Tl})$
Verre standard	~ 100	~ 10	~ 1
Verre des PMs de NEMO 3	~ 1	~ 0,5	~ 0,03
Critère SuperNEMO	< 0,1	< 0,04	< 0,003

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (2/2)

### Stratégie

- 1 État des lieux (dizaines d'échantillons mesurés)
- 2 Sélection des ingrédients et formulation du verre avec Prime-Verre puis Philips
- 3 Coulée et mesure HPGe d'échantillons
- 4 Construction d'un PM puis contrôle de la radiopureté



## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (2/2)

### Stratégie

- 1 État des lieux (dizaines d'échantillons mesurés)
- 2 **Sélection des ingrédients et formulation du verre avec Prime-Verre puis Philips**
- 3 Coulée et mesure HPGe d'échantillons
- 4 Construction d'un PM puis contrôle de la radiopureté



Échantillons de composants du verre

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (2/2)

### Stratégie

- ① État des lieux (dizaines d'échantillons mesurés)
- ② Sélection des ingrédients et formulation du verre avec Prime-Verre puis Philips
- ③ **Coulée et mesure HPGe d'échantillons**
- ④ Construction d'un PM puis contrôle de la radiopureté

mBq/kg	$A(^{40}\text{K})$	$A(^{214}\text{Bi})$	$A(^{208}\text{Tl})$
Coulée 1	$150 \pm 50$	$< 5$	$< 1,4$
Coulée 2	$280 \pm 50$	$< 9$	$< 2,5$
Coulée 3	$170 \pm 40$	$< 4$	$< 2,2$
Coulée 4	$80 \pm 20$	$< 4$	$< 0,7$
Critère SuperNEMO	$< 100$	$< 40$	$< 3$

## R&D photomultiplicateurs : Développement d'un nouveau verre (2/2)

### Stratégie

- 1 État des lieux (dizaines d'échantillons mesurés)
- 2 Sélection des ingrédients et formulation du verre avec Prime-Verre puis Philips
- 3 Coulée et mesure HPGe d'échantillons
- 4 **Construction d'un PM puis contrôle de la radiopureté**

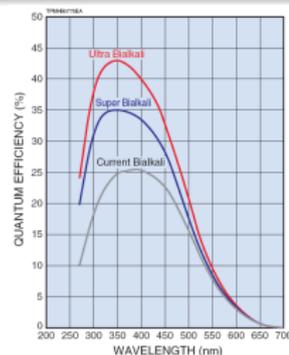
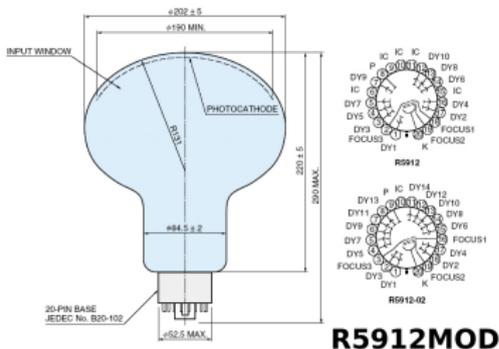
mars 2009 : Arrêt des développements avec la fin des activités PMs de Photonis

# Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Photodétection

## Statut de la R&D photomultiplicateurs

Fin des activités PMs de Photonis → reprise de la R&D avec Hamamatsu

- nouveau PM 8" R5912MOD linéaire + photocathode "super-bialkali"



## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Photodétection

### Statut de la R&D photomultiplicateurs

Fin des activités PMs de Photonis → reprise de la R&D avec Hamamatsu

- nouveau PM 8" R5912MOD linéaire + photocathode "super-bialkali"
- différence des performances entre PMs Photonis/Hamamatsu constatée dès 2008  
⇒ mauvaise efficacité de collection des photoélectrons dans le PM R5912MOD



comparatif Photonis/Hamamatsu  
Matt KAUER (UCL, Londres)

PM	$\rho(400 \text{ nm})$	FWHM @ 1 MeV
Photonis XP1886	28 %	$6,7 \pm 0,1 \%$
Hamamatsu R5912MOD	32 %	$7,7 \pm 0,1 \%$

R5912MOD : meilleure efficacité quantique  
mais résolution en énergie moins bonne !

## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Photodétection

### Statut de la R&D photomultiplicateurs

Fin des activités PMs de Photonis → reprise de la R&D avec Hamamatsu

- nouveau PM 8" R5912MOD linéaire + photocathode "super-bialkali"
- différence des performances entre PMs Photonis/Hamamatsu constatée dès 2008  
⇒ mauvaise efficacité de collection des photoélectrons dans le PM R5912MOD
- **amélioration de la répartition des tensions pour le PM R5912MOD**

PVT EJ-204 cubique 236 mm + PM Hamamatsu R5912MOD

Répartition	FWHM @ 1 MeV
nominale	$8,1 \pm 0,1 \%$
optimisée	$7,5 \pm 0,1 \%$

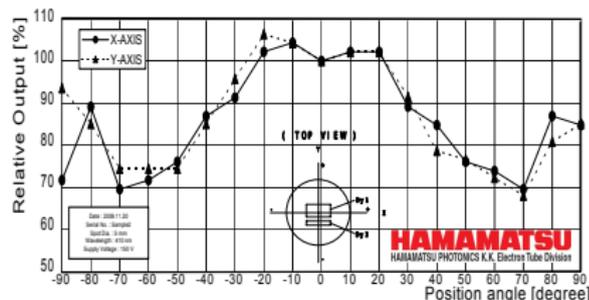
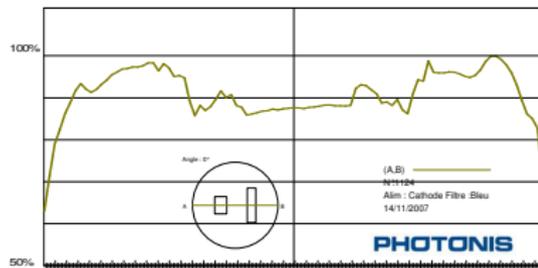
avec PM Photonis :  $7,1 \pm 0,1 \%$

## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Photodétection

### Statut de la R&D photomultiplicateurs

Fin des activités PMs de Photonis → reprise de la R&D avec Hamamatsu

- nouveau PM 8" R5912MOD linéaire + photocathode "super-bialkali"
- différence des performances entres PMs Photonis/Hamamatsu constatée dès 2008  
⇒ mauvaise efficacité de collection des photoélectrons dans le PM R5912MOD
- amélioration de la répartition des tensions pour le PM R5912MOD
- mauvaise homogénéité de la photocathode des PMs R5912MOD :  
⇒ R&D en cours pour améliorer ce défaut



## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Radiopureté

### Radiopureté des PMs R5912MOD de Hamamatsu

Discussions en cours pour un transfert de technologie (Philips → Hamamatsu)

- Verre Hamamatsu actuel : radiopureté meilleure que NEMO 3

## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Radiopureté

### Radiopureté des PMs R5912MOD de Hamamatsu

Discussions en cours pour un transfert de technologie (Philips → Hamamatsu)

- Verre Hamamatsu actuel : radiopureté meilleure que NEMO 3
- **Contrôle HPGe des autres composants**

A(mBq/kg)	A( <sup>40</sup> K)	A( <sup>214</sup> Bi)	A( <sup>208</sup> Tl)	Poids/PM (g)
Verre R5912MOD	300	120	22	800 g
Métaux	< 7000	< 600	250 ± 70	120 g
Céramique	13600 ± 1200	1200 ± 300	120 ± 10	25 g
Isolants	2300 ± 400	700 ± 60	610 ± 40	1 g

## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Radiopureté

### Radiopureté des PMs R5912MOD de Hamamatsu

Discussions en cours pour un transfert de technologie (Philips → Hamamatsu)

- Verre Hamamatsu actuel : radiopureté meilleure que NEMO 3
- Contrôle HPGe des autres composants
- **Activité totale des PMs R5912MOD**

	Poids	A( <sup>40</sup> K)	A( <sup>214</sup> Bi)	A( <sup>208</sup> Tl)
1 × PM 8" R5912MOD	0,96 kg	0,583 Bq	0,127 Bq	0,020 Bq
Module SuperNEMO (482 × PM 8")	470 kg	286 Bq	62 Bq	9,8 Bq
Détecteur NEMO 3 (1940 × PM 3" et 5" )	590 kg	830 Bq	300 Bq	18 Bq

## Reprise de la R&D avec Hamamatsu : Radiopureté

### Radiopureté des PMs R5912MOD de Hamamatsu

Discussions en cours pour un transfert de technologie (Philips → Hamamatsu)

- Verre Hamamatsu actuel : radiopureté meilleure que NEMO 3
- Contrôle HPGe des autres composants
- Activité totale des PMs R5912MOD

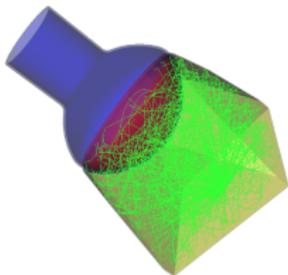
	Poids	A( <sup>40</sup> K)	A( <sup>214</sup> Bi)	A( <sup>208</sup> Tl)
1 × PM 8" R5912MOD	0,96 kg	0,583 Bq	0,127 Bq	0,020 Bq
Module SuperNEMO (482 × PM 8")	470 kg	286 Bq	62 Bq	9,8 Bq
Détecteur NEMO 3 (1940 × PM 3" et 5" )	590 kg	830 Bq	300 Bq	18 Bq

Réduction d'un facteur 5 du taux de <sup>214</sup>Bi entre NEMO 3 et SuperNEMO

## Conclusions (1/2)

### Bancs de test

- Deux spectromètres à électrons automatisés
- Mise en place d'un protocole de caractérisation des compteurs à scintillation
- Bancs de référence pour le projet SuperNEMO



### Simulations optiques

- Construction d'un programme de simulation du transport des photons dans le scintillateur
- Simulation avancée des surfaces et réflecteurs
- Outil prédictif et utile pour guider la configuration finale des scintillateurs de SuperNEMO

## Conclusions (2/2)

### R&D scintillateurs : $\approx - 1,5$ % sur FWHM

- utilisation du PVT EJ-204
- réponse optimale et uniforme avec une géométrie carrée
- identification de plusieurs améliorations : polissage, habillage

### R&D photomultiplicateurs : $\approx - 2,0$ % sur FWHM

- nouvelle photocathode efficacité quantique (30 – 40 %)
- réponse linéaire aux flashes lumineux des scintillateurs SuperNEMO
- amélioration identifiée sur la répartition des tensions
- faisabilité d'un verre de très basse radioactivité

### Résolution en énergie atteinte pour la géométrie de SuperNEMO :

- 7,1 % avec les PMs Photonis XP1886
- 7,5 % avec les PMs Hamamatsu R5912MOD

⇒ Objectif de la R&D accompli