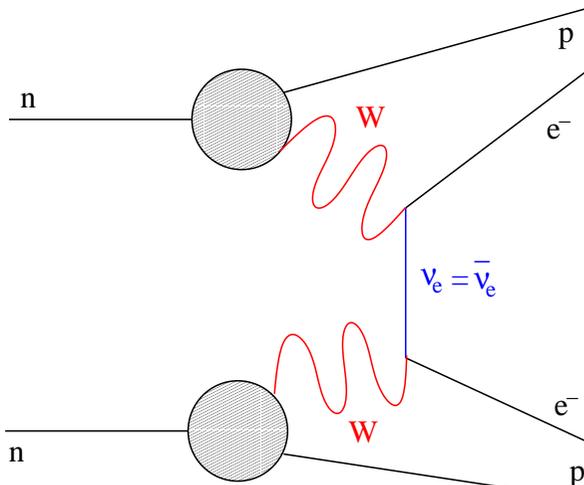
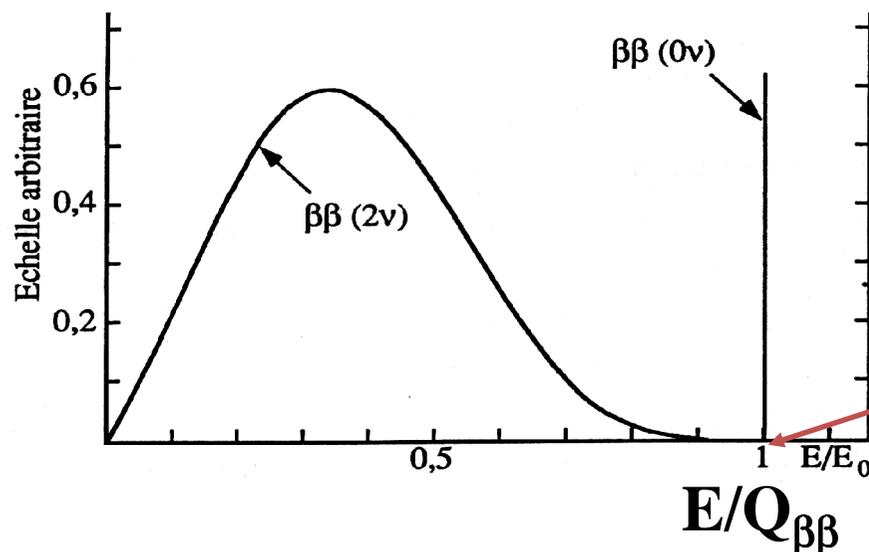


**La désintégration double bêta sans
émission de neutrinos: un test de la
violation du nombre leptonique global**

La désintégration double bêta



Signature expérimentale



en plus de la double bêta permise
par le Model Standard $\beta\beta 2\nu$

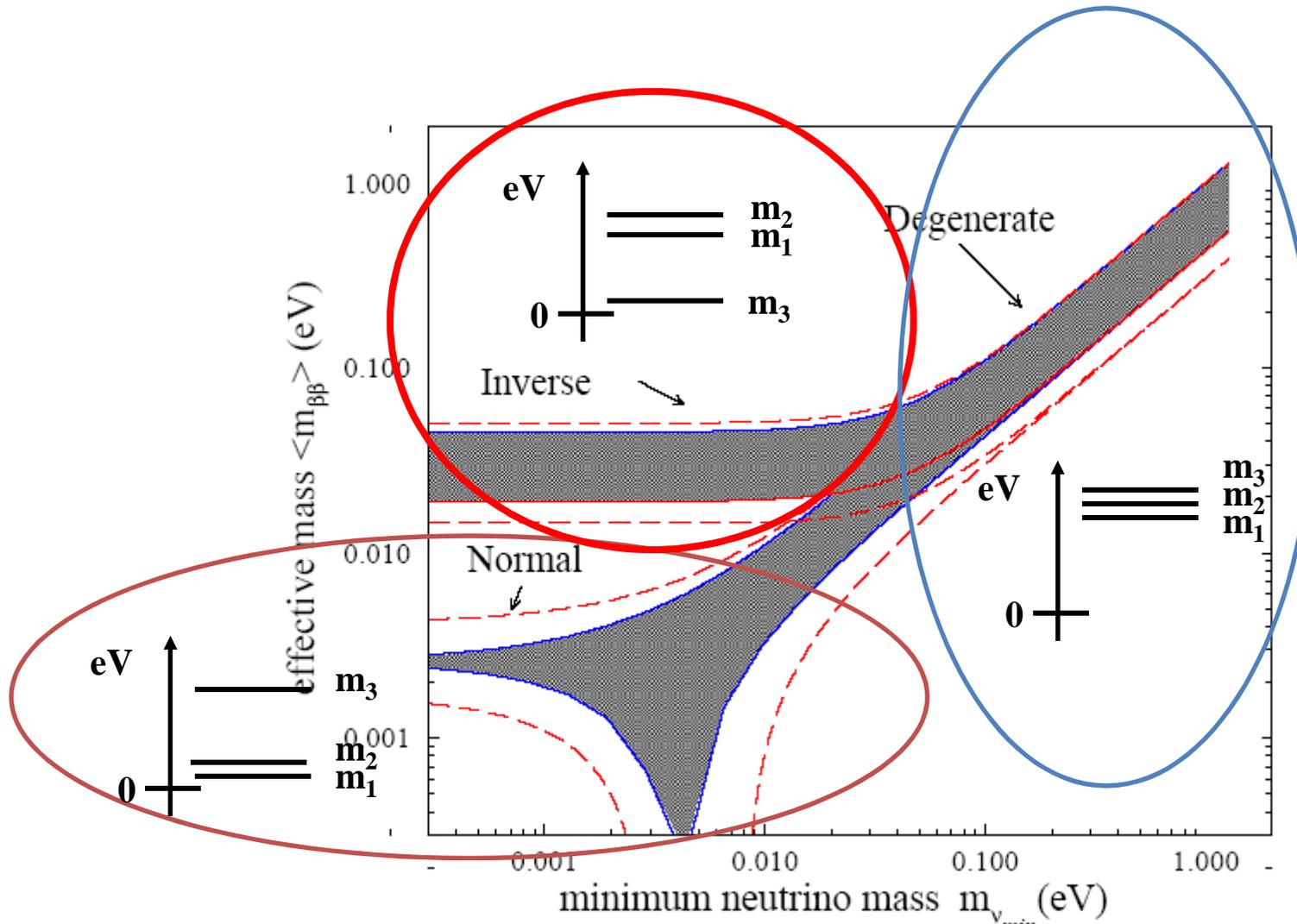
si $\nu = \bar{\nu}$ (neutrino de Majorana)
double bêta interdite $\beta\beta 0\nu$: violation
du nombre leptonique global

D'autres mécanismes peuvent générer la
 $\beta\beta 0\nu$: courants droits, supersymétrie,
Majoron, ...

**Dans tous les cas, si la $\beta\beta 0\nu$ est
observée, le neutrino est de
Majorana**

$Q_{\beta\beta}$: énergie du end-point
de la transition
~ 2 à 4,3 MeV pour les mesures
directes

Cas où le processus dominant est l'échange d'un neutrino de Majorana léger



Giunti

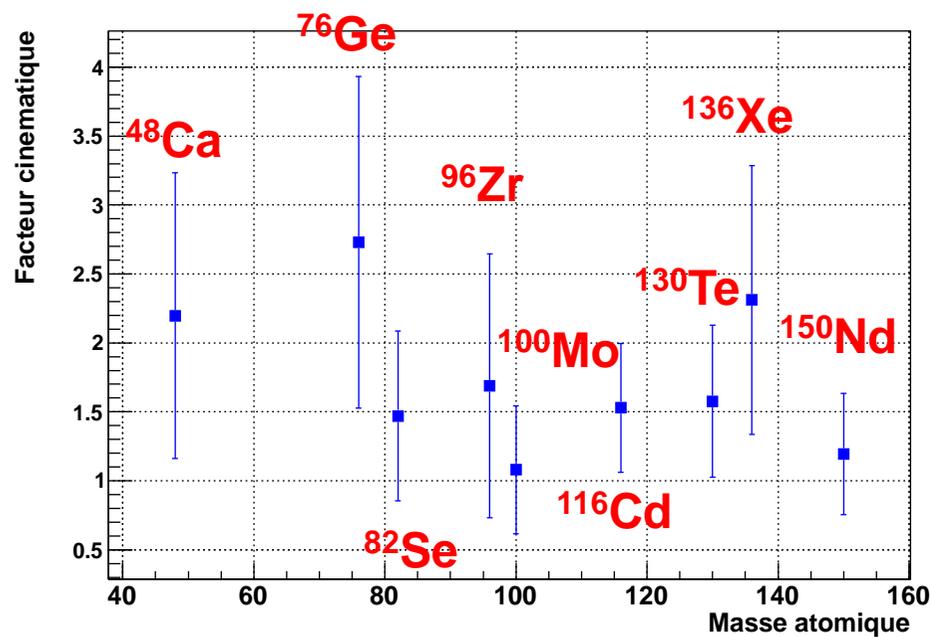
but des futures expériences : tester au moins partiellement le domaine de hierarchie inverse $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20-50$ meV

Choix de l'isotope : cas de l'échange d'un neutrino de Majorana léger

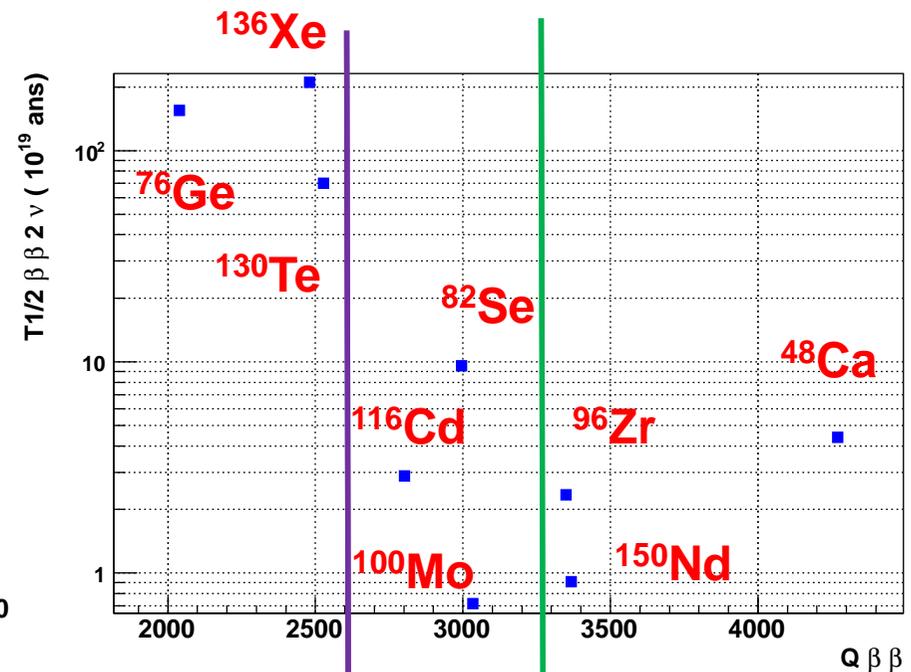
$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = 1 / \sqrt{G_{0\nu} M_{0\nu}^2 T_{1/2}^{0\nu}}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \propto \text{Facteur cinématique} = \sqrt{A / G_{0\nu} M_{0\nu}^2}$$

Point de vue théorique



Point de vue expérimentateur



Elements de matrice : PRD 83, 113010(2011)

E_γ ²⁰⁸Tl

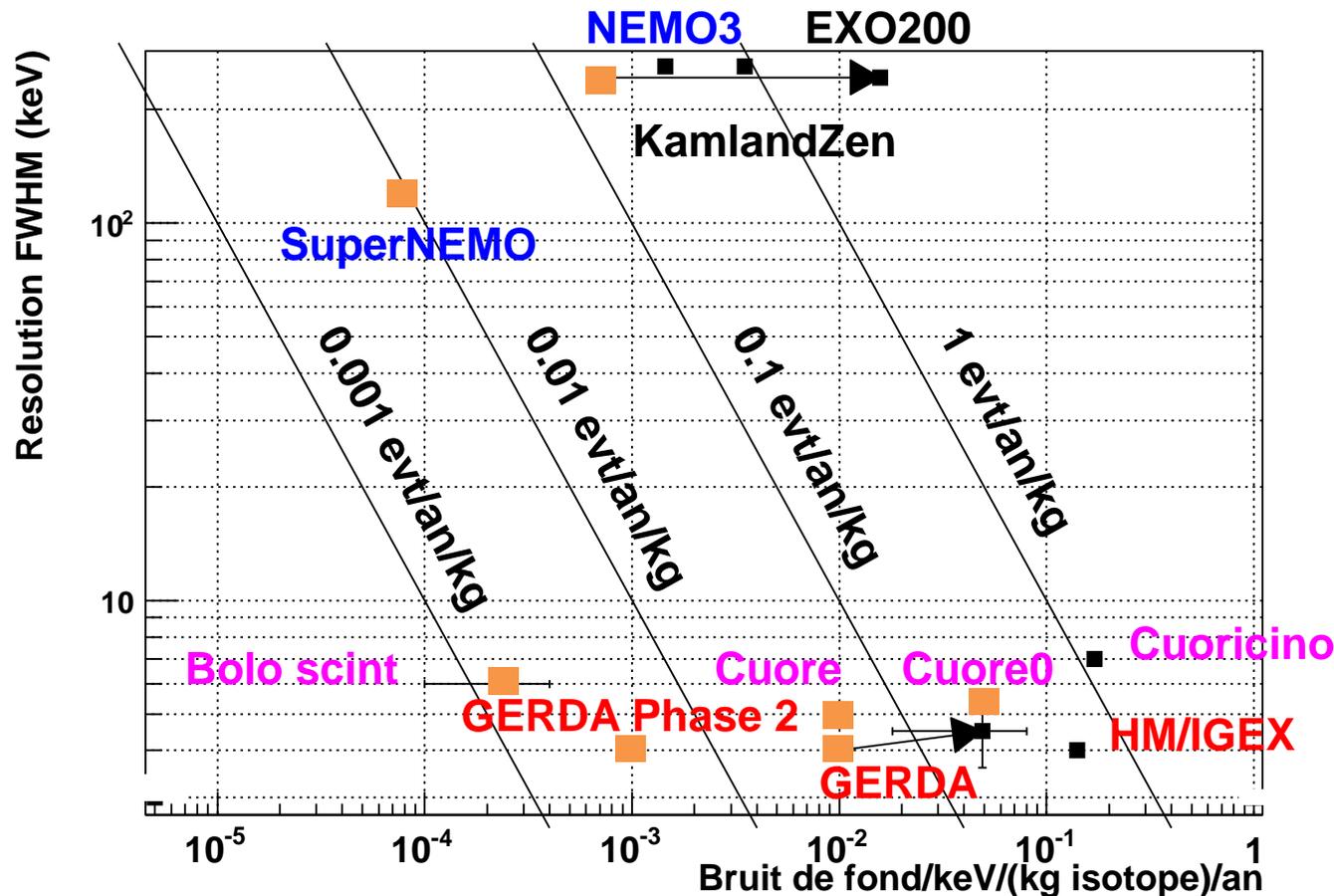
Q_β ²¹⁴Bi

Panorama des expériences passées/projets

Semi-conducteurs : très bonne résolution en énergie, choix d'isotope limité, capacité de réjection du bruit de fond limitée (malgré pulse shape, segmentation)

Bolomètres : très bonne résolution en énergie, plusieurs isotopes possibles, rejection du bruit de fond limitée (peut être améliorée par la scintillation)

Tracko-calorimètres : multi-isotopes, excellente rejection du bruit de fond, contrôle du bruit de fond avec d'autres canaux d'analyse, résolution en énergie limitée



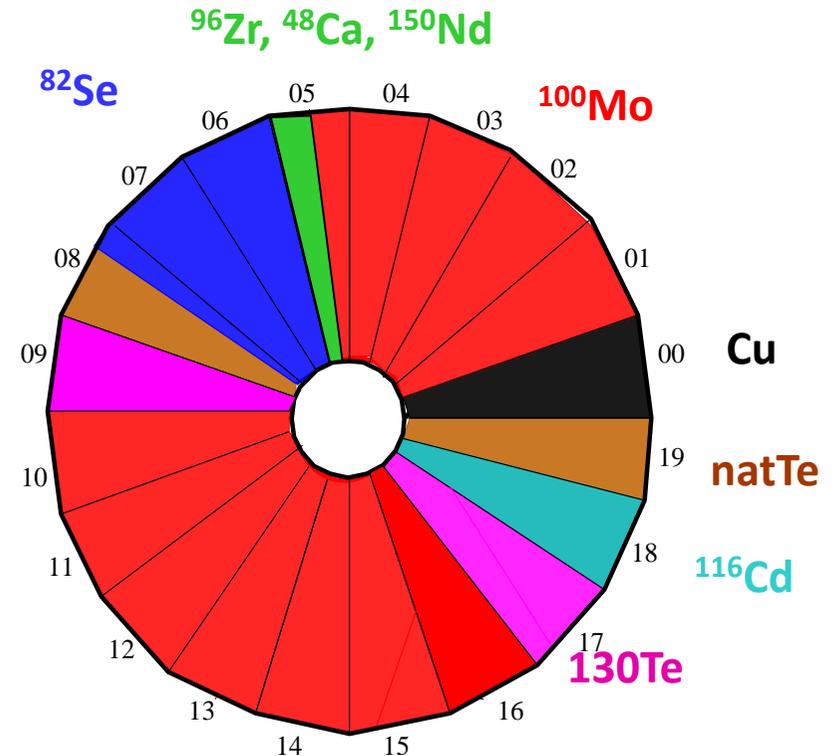
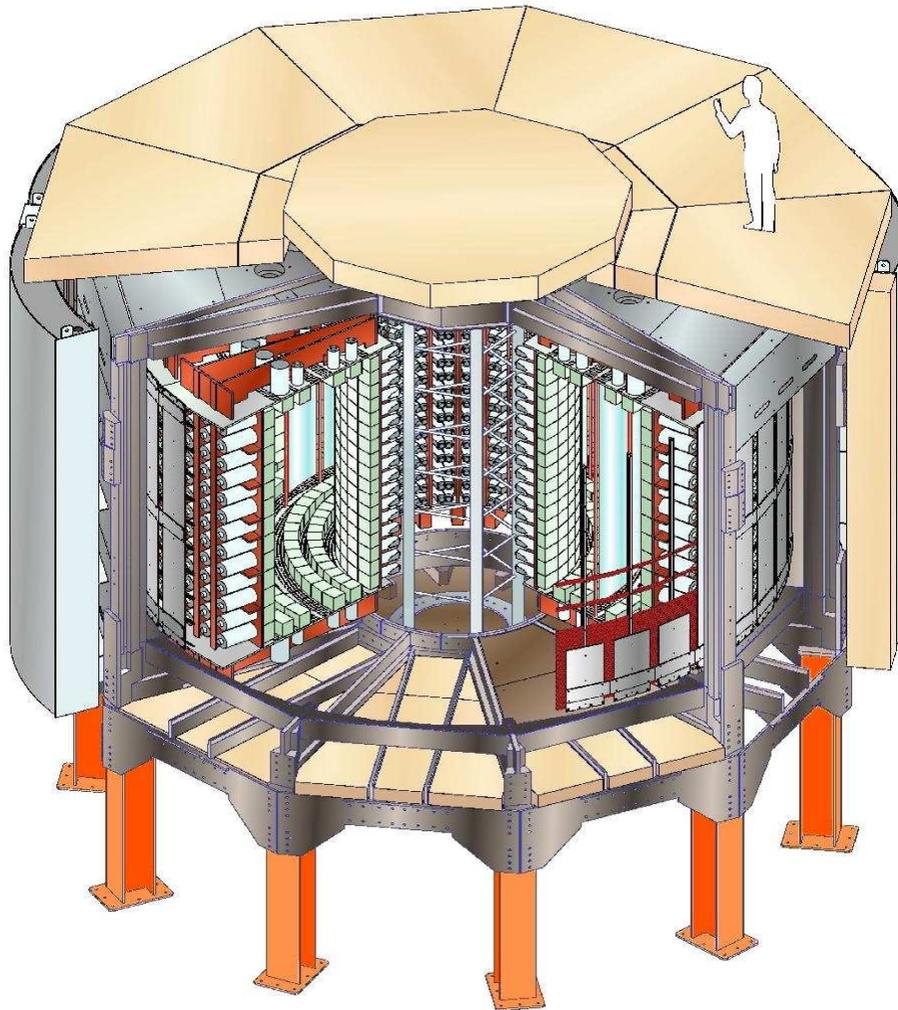
Autres expériences :
 Grande masse (100 à 200 kg)
 mais résolution en énergie et discrimination de bruit de fond limitées

■ expérience
 ■ projet

Activités en France

- **Tracko-calorimétrie** : grande expertise avec NEMO-3, projet SuperNEMO
- **Bolomètres scintillants** : grande expertise d'EDELWEISS, projet ZnMoO₄

NEMO-3, un détecteur tracko-calo situé au LSM (4800 m.eq.eau) Prise de données entre 2003 et 2011



10 kg de sources $\beta\beta$ (principalement ^{100}Mo et ^{82}Se mais aussi ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{96}Zr , ^{48}Ca , ^{150}Nd)

**Chambre à fils en mode Geiger +
Scintillateurs plastique couplés à des
PMs basse radioactivité**

Champ magnétique

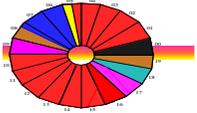
Blindage gamma+neutron



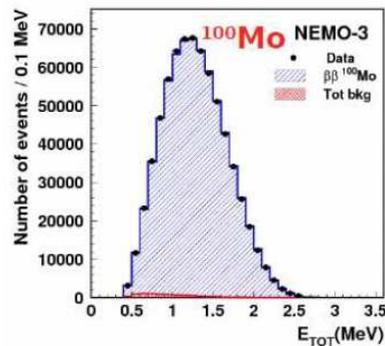
Identification de particules:

5 S

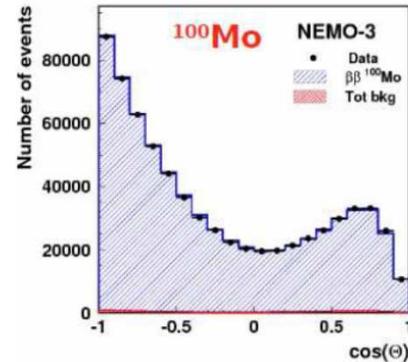
e^- , e^+ , γ and α



NEMO 3: mesure de $\beta\beta_{2\nu}$ et recherche de $\beta\beta_{0\nu}$



Somme des énergies



Distribution angulaire

Mesure de la $\beta\beta_{2\nu}$ du :

- ^{100}Mo (état fondamental) publi phase 1 : Phys Rev Lett95(2005)182302

- ^{100}Mo (états excités) publi phase 1 : Nucl Phys A 781(2007)209-226

- ^{82}Se publi phase 1 : Phys Rev Lett95(2005)182302

- ^{116}Cd

- ^{96}Zr Nucl Phys A 847 (2010)168

- ^{48}Ca

- ^{150}Nd Phys Rev C 80(2009) 032501

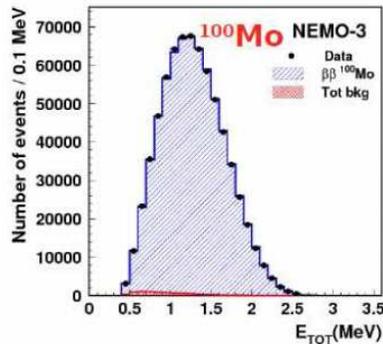
- ^{130}Te Phys Rev Lett 107(2011) 062504

Contraint les calculs théoriques d'éléments de matrice pour
la $\beta\beta_{0\nu}$

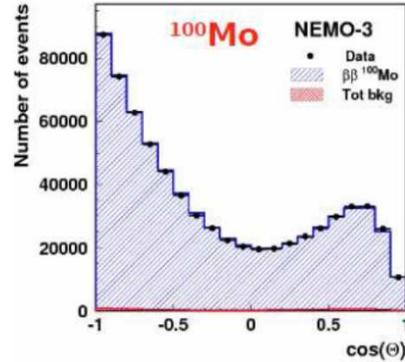


NEMO 3: mesure de $\beta\beta 2\nu$ et recherche de $\beta\beta 0\nu$

$\beta\beta 2\nu$

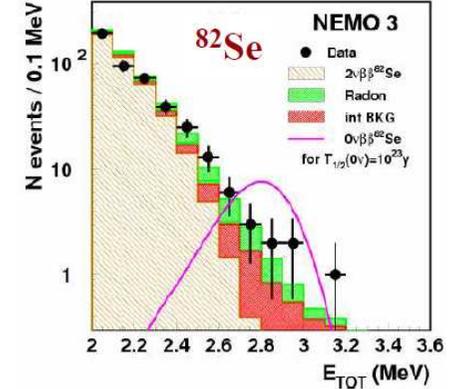
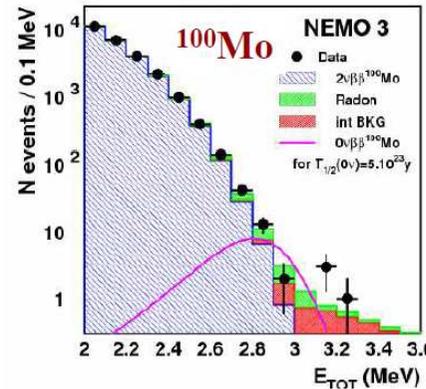


Somme des énergies



Distribution angulaire

$\beta\beta 0\nu$



Mesure de la $\beta\beta 2\nu$ du :

- ^{100}Mo (état fondamental) publi phase 1 : Phys Rev Lett 95(2005)182302

- ^{100}Mo (états excités) publi phase 1 : Nucl Phys A 781(2007)209-226

- ^{82}Se publi phase 1 : Phys Rev Lett 95(2005)182302

- ^{116}Cd

- ^{96}Zr Nucl Phys A 847 (2010)168

- ^{48}Ca

- ^{150}Nd Phys Rev C 80(2009) 032501

- ^{130}Te Phys Rev Lett 107(2011) 062504

Contraint les calculs théoriques d'éléments de matrice pour la $\beta\beta 0\nu$

Exclusion du Majoron publi phase 1 : Nucl Phys A 765(2006)483-494

Limites sur la $\beta\beta 0\nu$ du :

- ^{100}Mo $T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 1,0 \cdot 10^{24}$ ans (90% C.L.) $\langle m_\nu \rangle < 0,31 - 0,96$ eV

- ^{82}Se $T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 3,2 \cdot 10^{23}$ ans (90% C.L.) $\langle m_\nu \rangle < 0,94 - 2,6$ eV

Phys Rev Lett 95(2005)182302

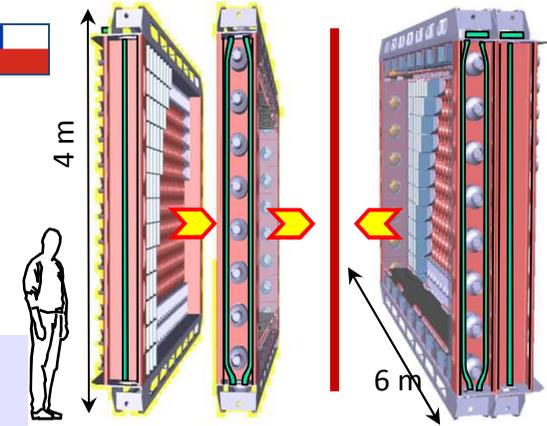
NEMO-3 a atteint les performances escomptées au départ

NEMO-3 → SuperNEMO



collaboration internationale avec
des fortes contributions anglaises
et américaines

$$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > \ln 2 \times \frac{\mathcal{N}_A}{A} \times \frac{M \times \epsilon \times T_{\text{obs}}}{N_{90}}$$



NEMO-3

^{100}Mo

7 kg

^{208}Tl : < 20 $\mu\text{Bq/kg}$
 ^{214}Bi : < 300 $\mu\text{Bq/kg}$
 ^{222}Rn ~ 4 mBq/m^3

8% @ 3MeV **Résolution en énergie du calorimètre (FWHM)**

$T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 10^{24}$ ans
 $\langle m_\nu \rangle < 0.3 - 0.9$ eV

SuperNEMO

^{82}Se – option principale
 (^{150}Nd ou ^{48}Ca s'ils peuvent être enrichi)

100-200 kg

**Contaminations internes ^{208}Tl et ^{214}Bi
 dans la feuille source $\beta\beta$**

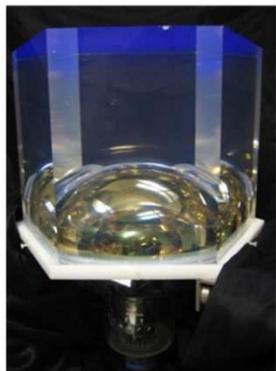
$^{208}\text{Tl} \leq 2$ $\mu\text{Bq/kg}$
 si ^{82}Se : $^{214}\text{Bi} \leq 10$ $\mu\text{Bq/kg}$
 $^{222}\text{Rn} < 0,1$ mBq/m^3

4% @ 3 MeV

$T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 10^{26}$ ans
 $\langle m_\nu \rangle < 0.04 - 0.11$ eV

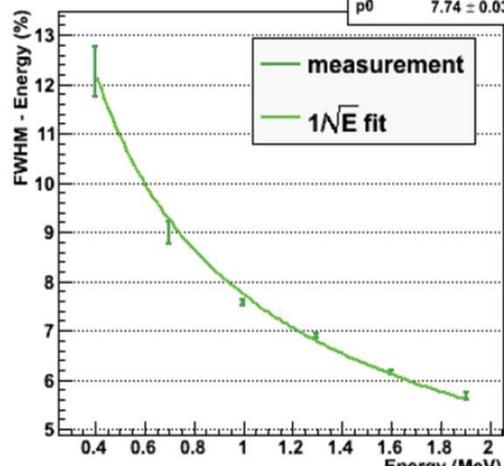
Résultats de la R&D sur SuperNEMO

Calorimètre



FWHM (400 ns integration)

χ^2 / ndf 13.57 / 5
p0 7.74 ± 0.03302

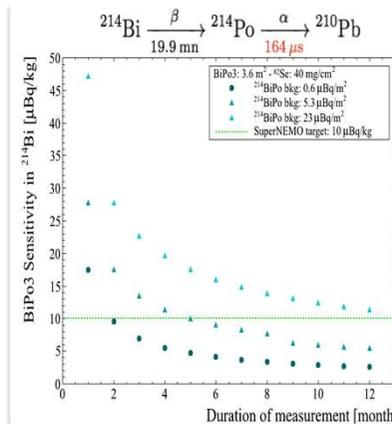
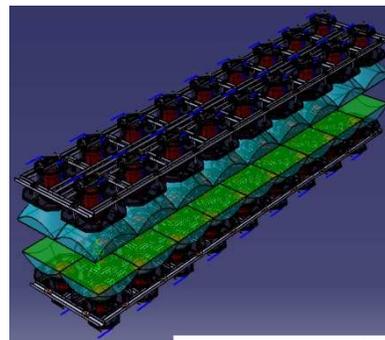


FWHM ~ 7.2% (FWHM) à 1 MeV
equiv. à 4% @ $Q_{\beta\beta} = 3$ MeV

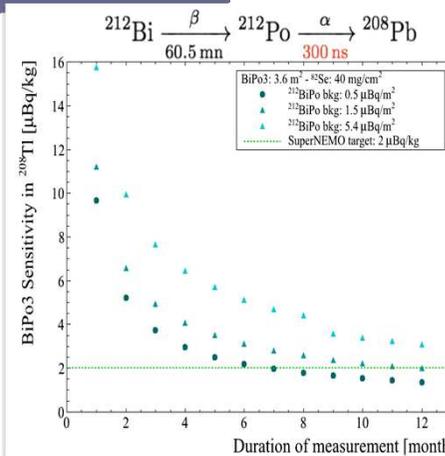
La résolution requise a été atteinte.

BiPo

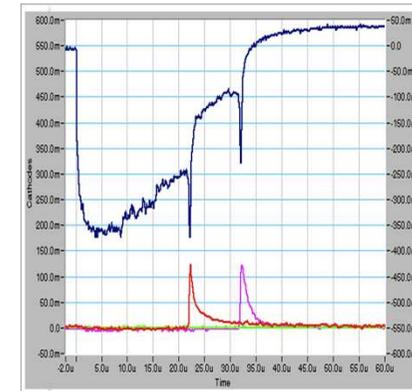
détecteur dédié à la mesure de la radiopureté des feuilles sources en ^{208}Tl et ^{214}Bi



Possible de mesurer la radiopureté des sources avec la sensibilité requise en 6 mois de mesure -> détecteur BiPo-3 installé à Canfranc en juillet 2012

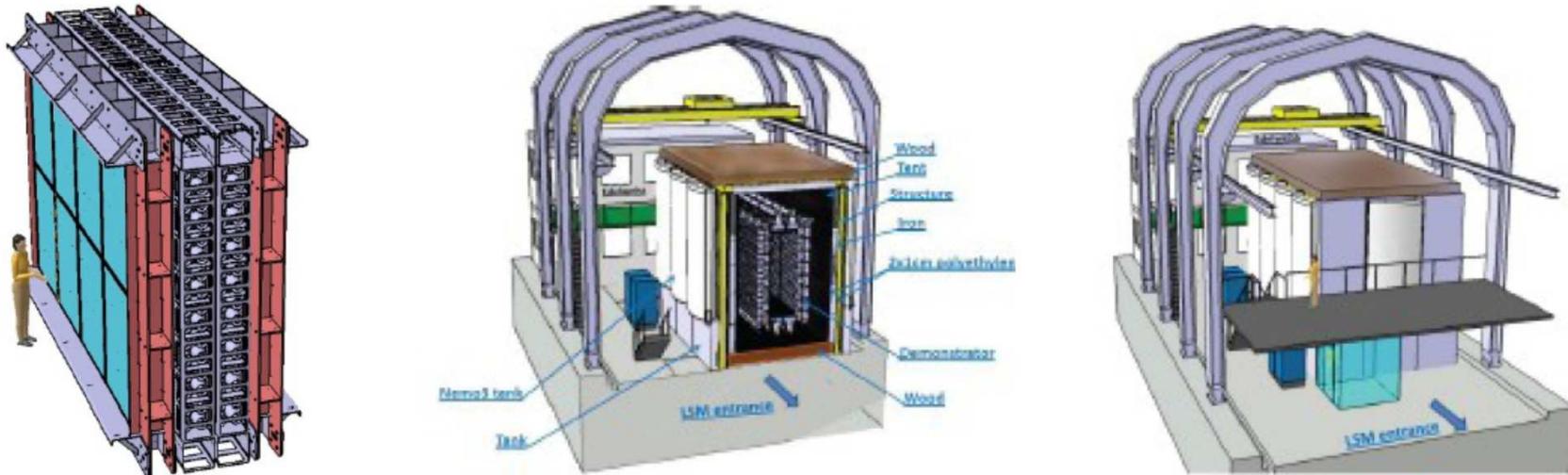


Détecteur de traces (Royaume-Uni)



Efficacité de cellule > 98%
Résolution: 0.7mm transverse,
1cm longitudinal
en accord avec les spécifications
Robot pour automatiser le tissage

SuperNEMO demonstrator module



Principaux buts du démonstrateur (7 kg de ^{82}Se , installé au LSM actuel) :

Montrer la capacité d'un module de SuperNEMO à atteindre les spécifications sur les bruits de fond $\sim 10^{-4}$ coups/(keV.kg.an) :

0,1 mBq/m³ en Radon

2 $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{208}Tl

10 $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{214}Bi

FWHM = 4% à 3 MeV pour le calorimètre contre la $\beta\beta 2\nu$

0.3 bruit de fond en 3 ans

Avoir la sensibilité au signal (controversé) observé par une partie de l'expérience

Heidelberg-Moscou $T_{1/2} \sim 6,6 \cdot 10^{24}$ ans (90% CL) $\langle m_\nu \rangle \sim 200\text{-}400$ meV

Début de la prise de données : 2014

Calorimétrie : les bolomètres scintillants

Technique bolométrique
(**CUORE, EDELWEISS**)

+

Détection simultanée de la chaleur
et de la lumière (**CRESST,
ROSEBUD, R&D BOLUX+ILIAS**)

Choix du candidat avec
 $Q_{\beta\beta} > 2615$ keV

Bruit de fond **gamma**
fortement réduit

Discrimination totale entre
alpha et bêta/gamma

bruit de fond alpha nul

Au CSNSM l'activité se focalise sur l'**isotope ^{100}Mo** ($Q=3035$ keV, abondance isotopique=9.7%)

dans des cristaux de ZnMoO_4 (autre cristal étudié par des italiens : ZnSe pour le ^{82}Se , financé par une ERC)

Objectif : bruit de fond dans la région d'intérêt : **10^{-4} coups/keV kg an**

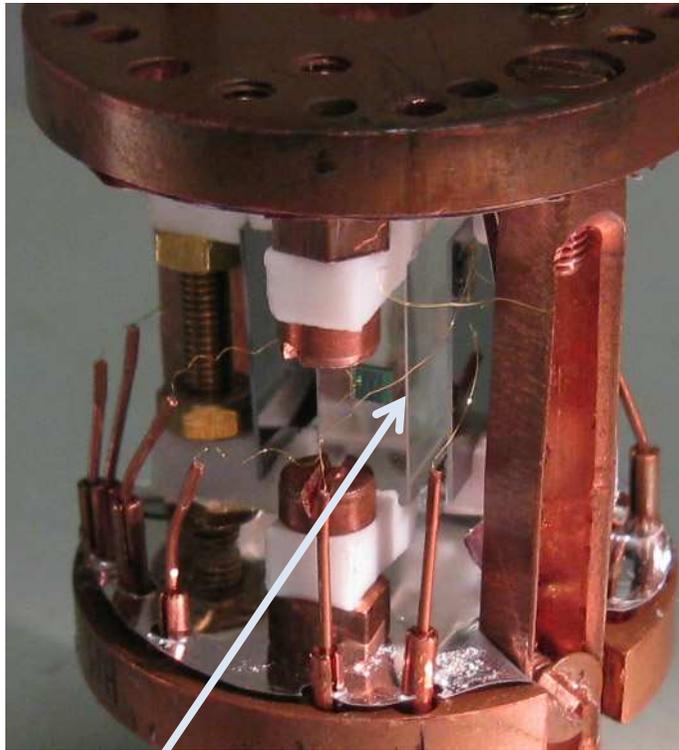
activité internationale : Ukraine, Russie, Italie

A.Alessandrello et al., Phys. Lett. B420, 109 (1998)

S. Pirro et al, Phys.Atom.Nucl. 69, 2109 (2006)

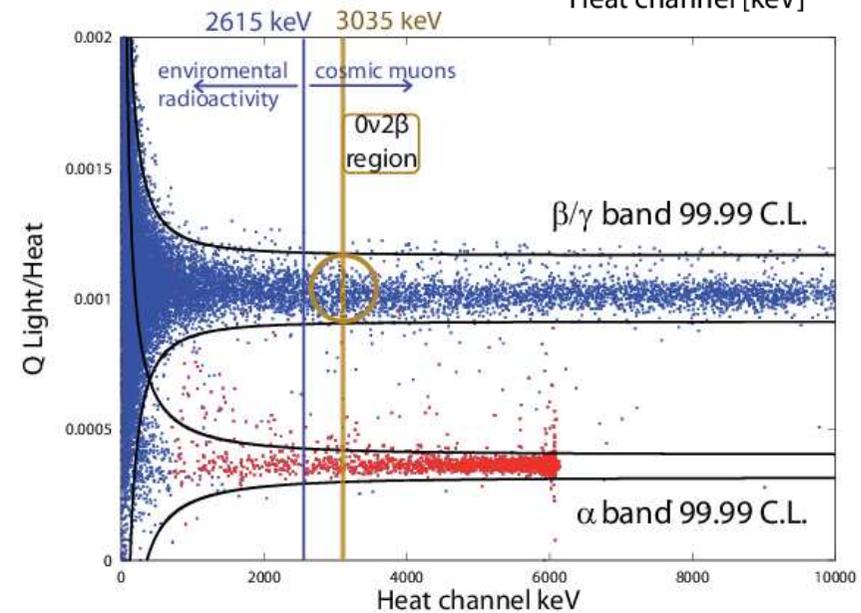
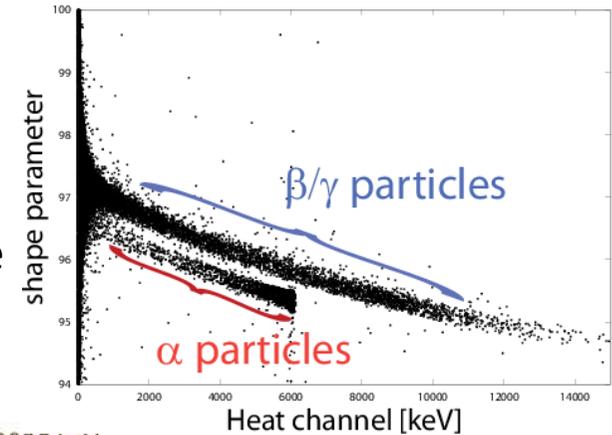
ZnMoO₄ - détecteur test de 5.07 g

Prise de données à Insubria (Como) et CSNSM dans les derniers mois



Cristal ZnMoO₄

Discrimination Alpha/beta avec la forme du pulse de chaleur et la mesure de la lumière



Bolomètre de 26 g (CSNSM) : résultats très similaires

Cristal de 300 g : sera testé dans les prochaines semaines

Approche par phase et sensibilité

En supposant un bruit de fond de 4×10^{-4} coups / (keV kg an), $T=5$ y, $\Delta E = 6$ keV

	Number of ≈ 400 g crystals	Total isotope mass [kg]	Half-life sensitivity [10^{25} y]	$m_{\beta\beta}$ sensitivity [meV]
Expérience pilote	4	0.676 disponible	0.53	167 – 476
Option 1	40	6.76	4.95	55 – 156
Option 2	2000 (nat.)	33.1	15.3	31 – 89
Option 3	2000	338	92.5	13 – 36

Physics Letters B 710, 318 (2012), 318–323

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312002602>

Conclusion : double bêta

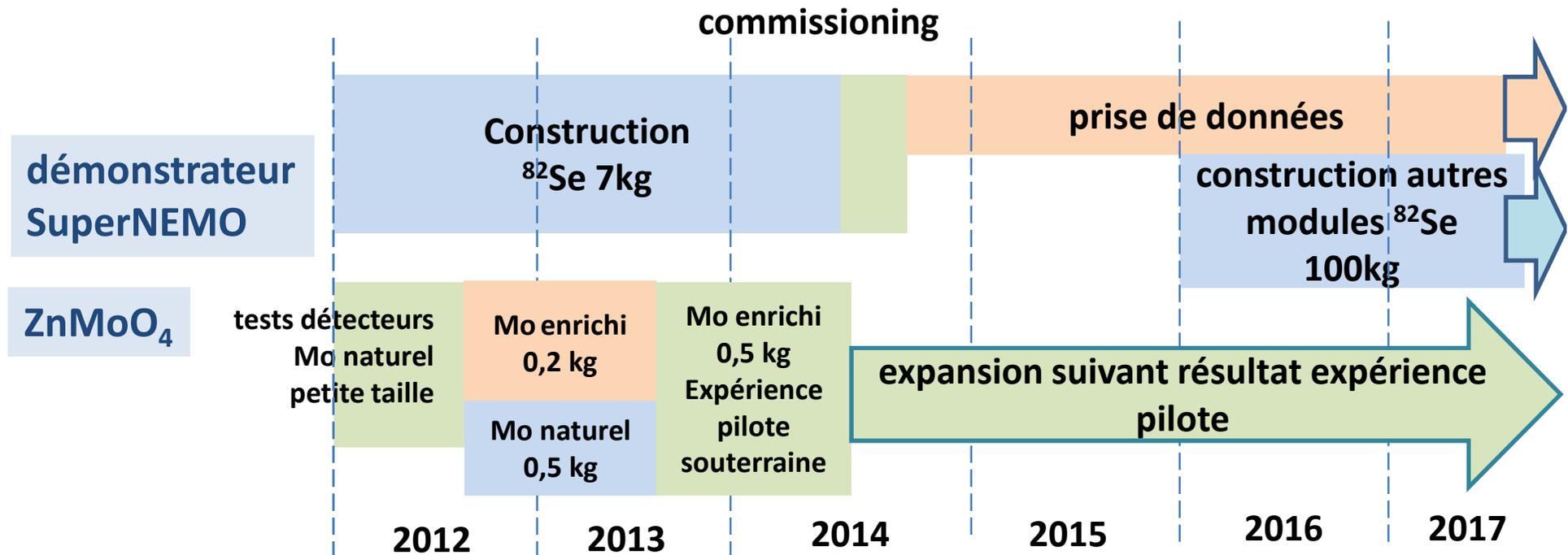
- Jusque-là chaque nouvelle expérience a dû faire face à un nouveau bruit de fond :
 - NEMO-3 : Radon au début de la prise de données
 - CUORICINO : bruit de fond des alphas de surface
 - GERDA : ^{42}K descendant de l' ^{42}Ar , dégazage en Radon du cryostat
 - KamLandZen : $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{88}Y , (^{208}Bi ?)
 - EXO : bruit de fond à comprendre

prématuré de parler d'une expérience au niveau de la tonne

- Challenge : avoir un démonstrateur avec 10 kg d'isotopes 0 fond pour une prise de données de plus d'un an, ce qu'aucune expérience n'a réussi à faire jusque-là en vue d'une expérience avec 100 kg

Conclusion : double bêta à l'IN2P3/IRFU

- Démonstrateur SuperNEMO (LAL, CENBG, LPC Caen, CPPM, LAPP (labex ENIGMASS), LSM) : approuvé par le CS IN2P3 en mai 2011, puis par la revue de projet en décembre 2011
- R&D sur les bolomètres scintillants (CSNSM, CEA-IRFU/SEDI, ICMB-Bordeaux et IAS-Orsay) : demande d'ANR en 2012



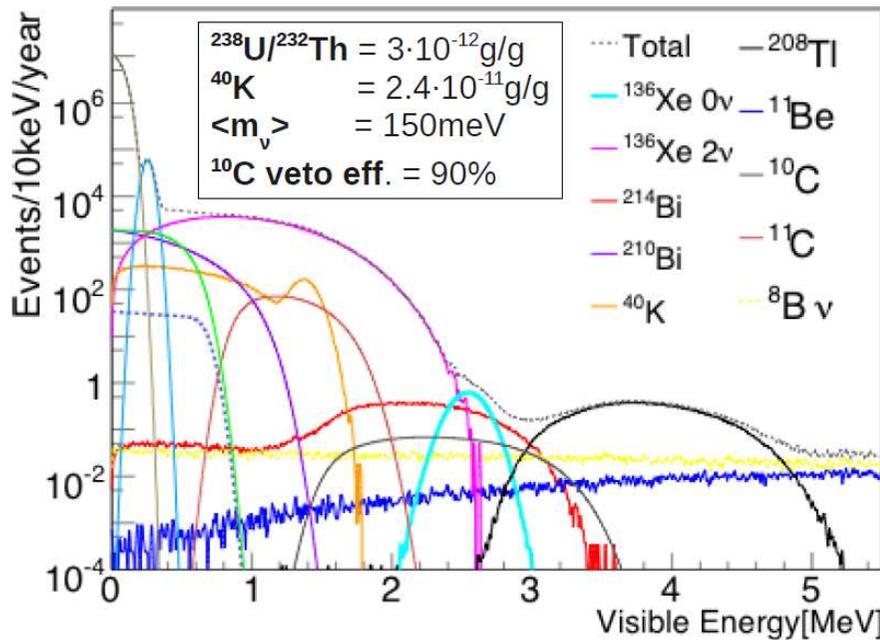
BACKUP

Bruit de fond pour KamLandZen

Attendu

Avant la mesure d'EXO

$T_{(1/2)}(\beta\beta 2\nu) > 10^{22}$ années



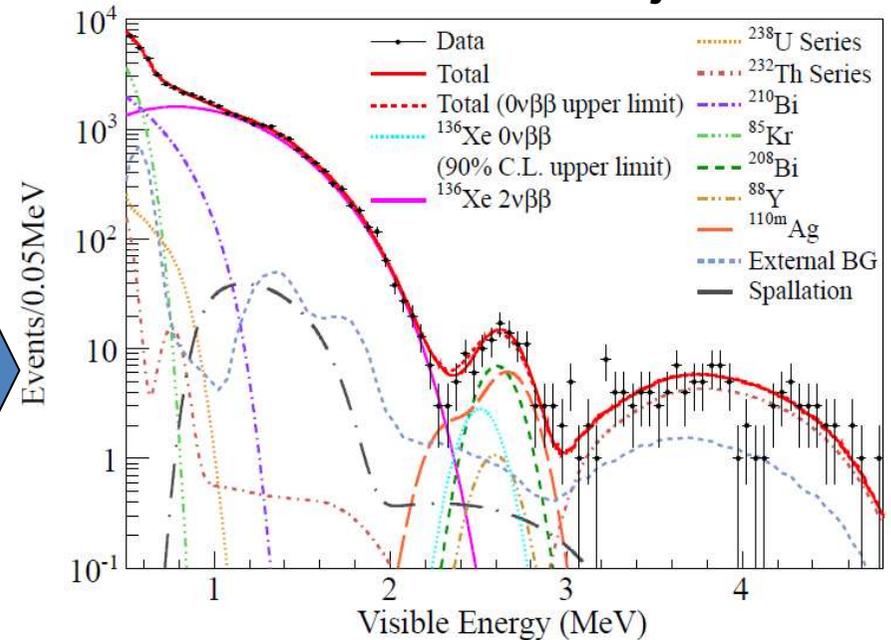
^{136}Xe 2 ν	^{208}Tl	^{214}Bi	^{10}C	^{11}Be	^8B	Total	^{136}Xe 0 ν
8.55 ± 0.67	6.97×10^{-3} $\pm 0.93 \times 10^{-3}$	8.55 ± 0.06	1.85 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.93 ± 0.02	19.53 ± 0.67	14.59 ± 0.02

Summary: expected signal and background (events/year)

Observé

$T_{(1/2)}(\beta\beta 2\nu) \sim 2 \cdot 10^{21}$ années

Observé en 78 jours



0,22 evt/(ton jour) x 78 jours x 129 kg/300 kg x 13 tonnes = 96 evts

^{208}Bi (?), $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{88}Y : pas prévu

Au moins 20 fois plus de bruit de fond qu'attendu

Bruit de fond pour EXO

Attendu

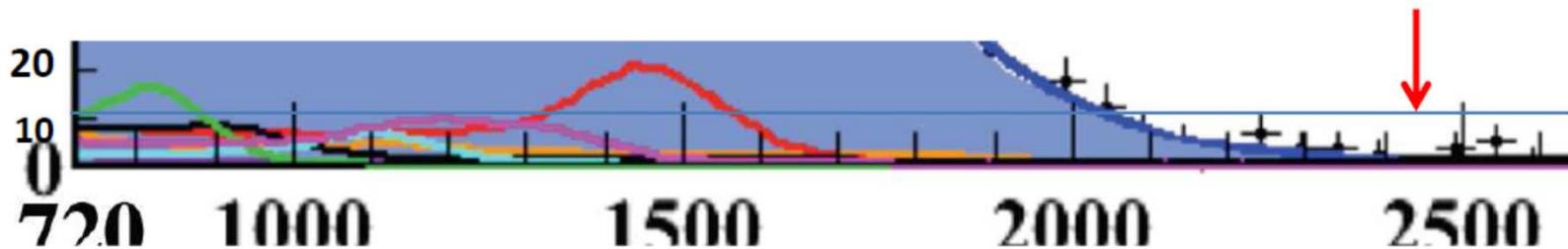
Avant la mesure d'EXO

$T_{(1/2)}(\beta\beta 2\nu) > 10^{22}$ années

Observé

$T_{(1/2)}(\beta\beta 2\nu) \sim 2 \cdot 10^{21}$ années

Après 31,4 jours : ~ 3 evt/200 kg/40 keV/0,0859 an = $5,5 \cdot 10^{-3}$ evt/keV/kg/an
FWHM $\sim 10.6\%$ à 2458 keV soit 260 keV $\sim 1,4$ evt/kg/an
228 evts/an



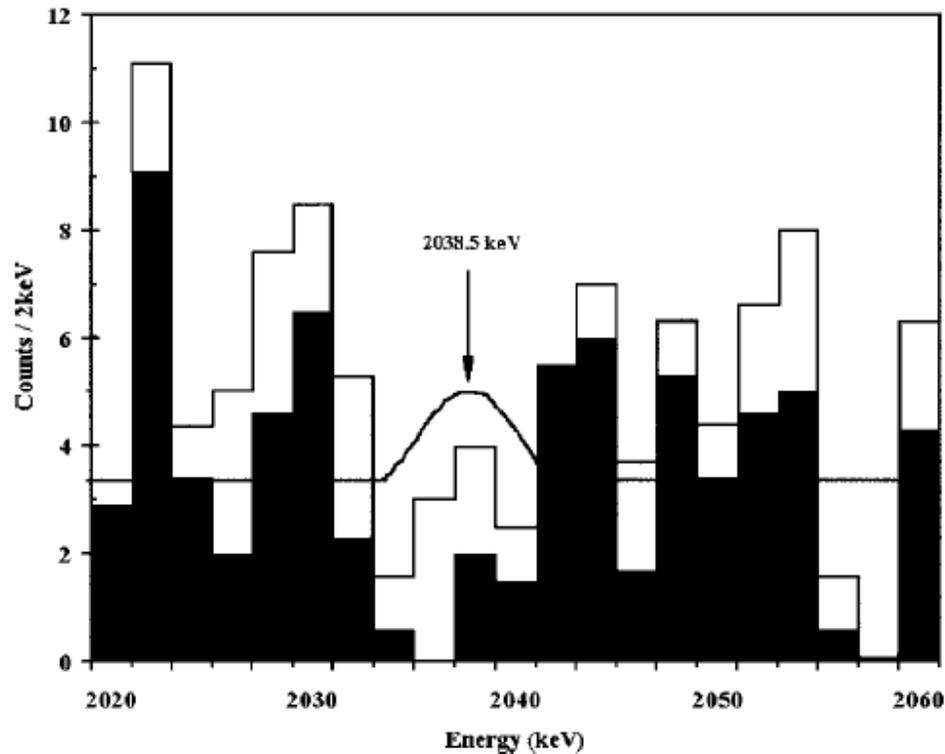
Au moins 10 fois plus de bruit de fond qu'attendu

Bruit de fond pour les Germanium

IGEX – Heidelberg Moscou

$\Delta E \sim 4 \text{ keV}$

Bdf $\sim 0,14 \text{ coups/kg/keV/an}$



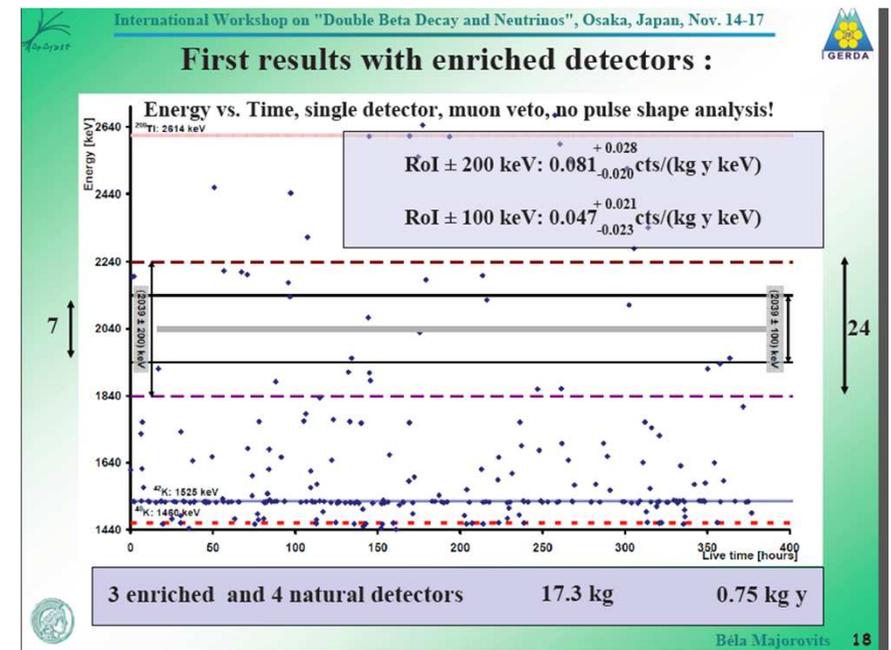
Bdf $\sim 0,56 \text{ coups/kg/an}$

Gain d'un facteur 1,3 à 9 sur le bruit de fond actuellement

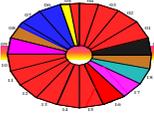
GERDA

$\Delta E \sim 3,6-5,4 \text{ keV}$

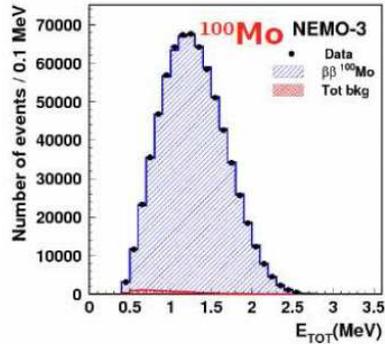
Bdf $\sim 0,017-0,081 \text{ coups/kg/keV/an}$



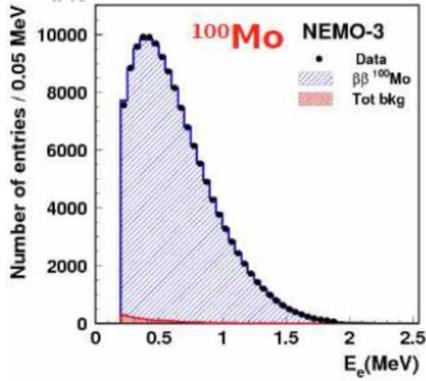
Bdf $\sim 0,06-0,44 \text{ coups/kg/an}$



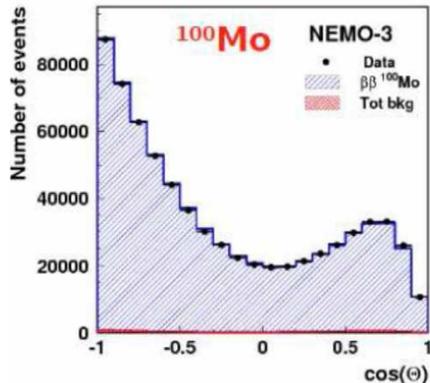
NEMO-3: mesure du processus $\beta\beta 2\nu$



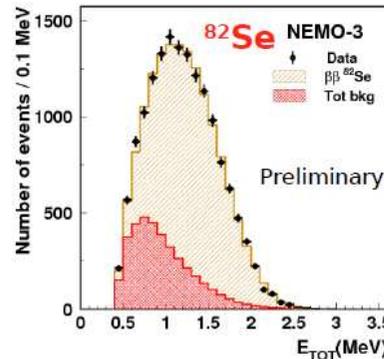
Energy sum of the 2 electrons events



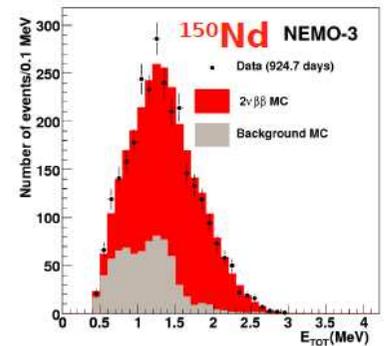
Single electron energy



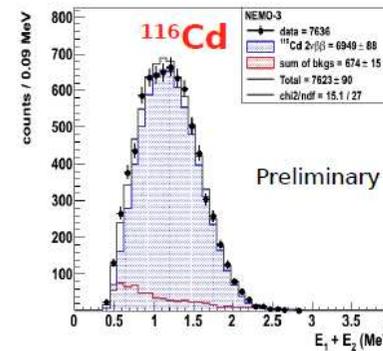
Angular distribution between the 2 electrons



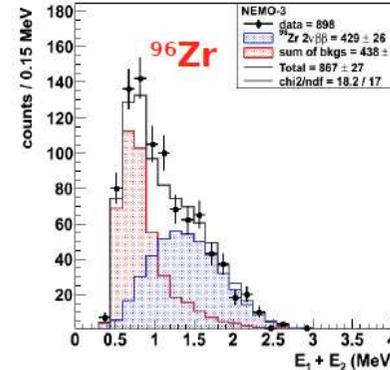
$[9.6 \pm 0.1(\text{stat}) \pm 1.0(\text{sys})] \times 10^{19} \text{ y}$



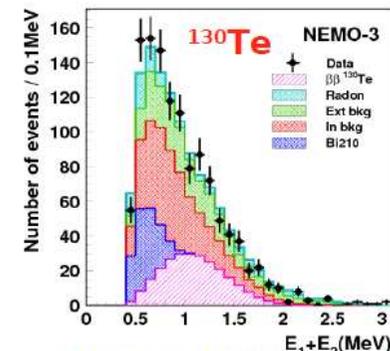
$[9.11 \pm 0.25 - 0.22(\text{stat}) \pm 0.63(\text{sys})] \times 10^{18} \text{ y}$
Phys. Rev. C 80, 032501 (2009)



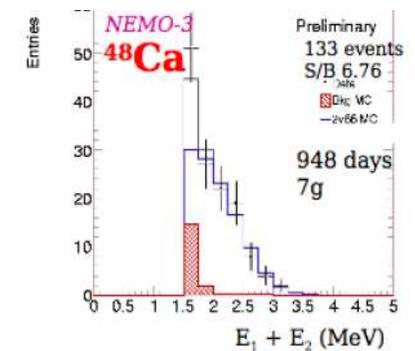
$[2.88 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.16(\text{sys})] \times 10^{19} \text{ y}$



$[2.35 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.16(\text{sys})] \times 10^{19} \text{ y}$
Nucl. Phys. A 847(2010)168



$[7.0 \pm 0.9(\text{stat}) + 1.1(\text{sys})] \times 10^{18} \text{ y}$
Phys. Rev. Lett. 107, 062504(2011)



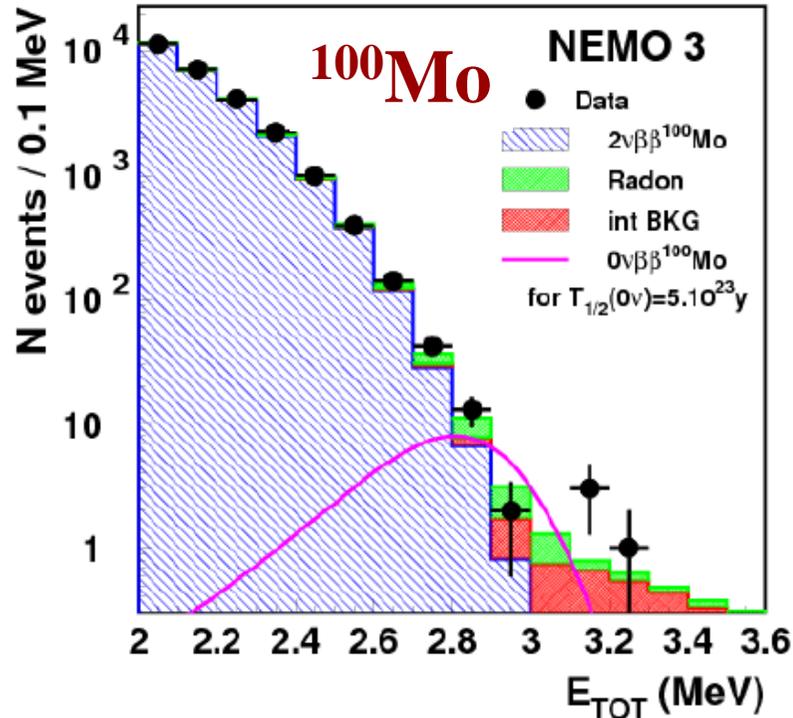
$[4.4 \pm 0.5 - 0.4(\text{stat}) \pm 0.4(\text{sys})] \times 10^{19} \text{ y}$

$T_{1/2}(\beta\beta 2\nu \text{ }^{100}\text{Mo}) = (7.16 \pm 0.01) 10^{18} \text{ y}$ (préliminaire)
(published phase 1 $T_{1/2} = [7.11 \pm 0.02(\text{stat}) 0.54(\text{stat})] 10^{18} \text{ y}$)

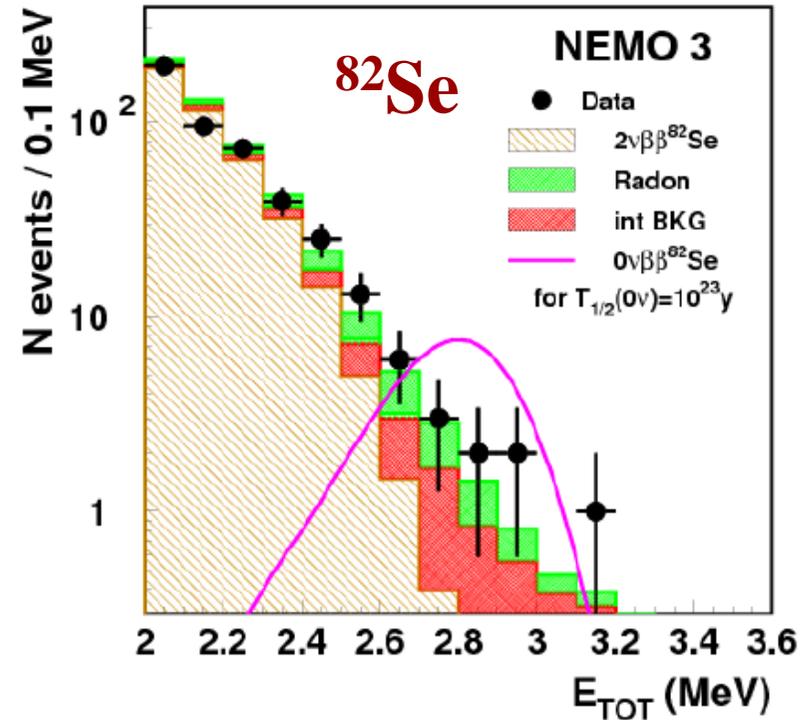
Constraint les calculs théoriques d'éléments de matrice pour la $\beta\beta 0\nu$



NEMO 3: $\beta\beta(0\nu)$ search results (4.5 y of data)



[2.8 – 3.2] MeV 18 evts observés, 16.4 ± 1.3 attendus



[2.6 – 3.2] MeV 14 evts observés, 11.3 ± 1.3 attendus

^{100}Mo $T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 1.0 \cdot 10^{24}$ ans (90% C.L.)

$\langle m_\nu \rangle < 0.31 - 0.96$ eV NEM Ref [1-5]

^{82}Se $T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 3.2 \cdot 10^{23}$ ans (90% C.L.)

$\langle m_\nu \rangle < 0.94 - 2.6$ eV NEM Ref [1-4 and 6]

Limite posée par la méthode Frequentiste Modifiée (CLs) utilisant toute la forme de la distribution

[1] QRPA M.Kortelainen and J.Suhonen, Phys.Rev. C 75 (2007) 051303(R)
 [2] QRPA M.Kortelainen and J.Suhonen, Phys.Rev. C 76 (2007) 024315

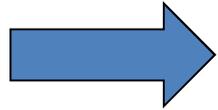
[3] QRPA F.Simkovic, et al. Phys.Rev. C 77 (2008) 045503
 [4] IBM2 J.Barrea and F.Iachello Phys.Rev.C 79(2009)044301

PHFB [5] P.K. Rath et al., Phys. Rev. C 82 (2010) 064310
 SM [6] E.Caurrier et al. Phys.Rev.Lett 100 (2008) 052503

Processus de double bêta $\beta\beta 0\nu$



Échange d'un neutrino de Majorana léger :
masse effective $\langle m_{\beta\beta} \rangle$



courants droits

- $\langle \lambda \rangle \approx M_{WL}/M_{WR}$
- $\langle \eta \rangle = -\tan \xi$ avec ξ angle de mélange entre W_L et W_R



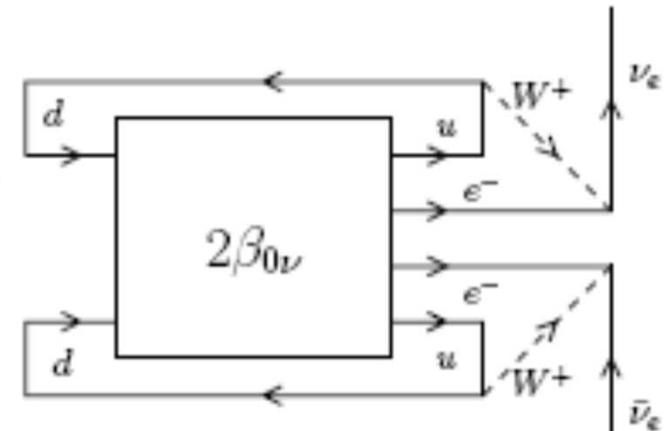
supersymétrie en R parité violée
(MSSM):

- échange d'un gluino massif λ'_{111}
- échange d'un neutrino léger $\lambda'_{113} \lambda'_{131}$



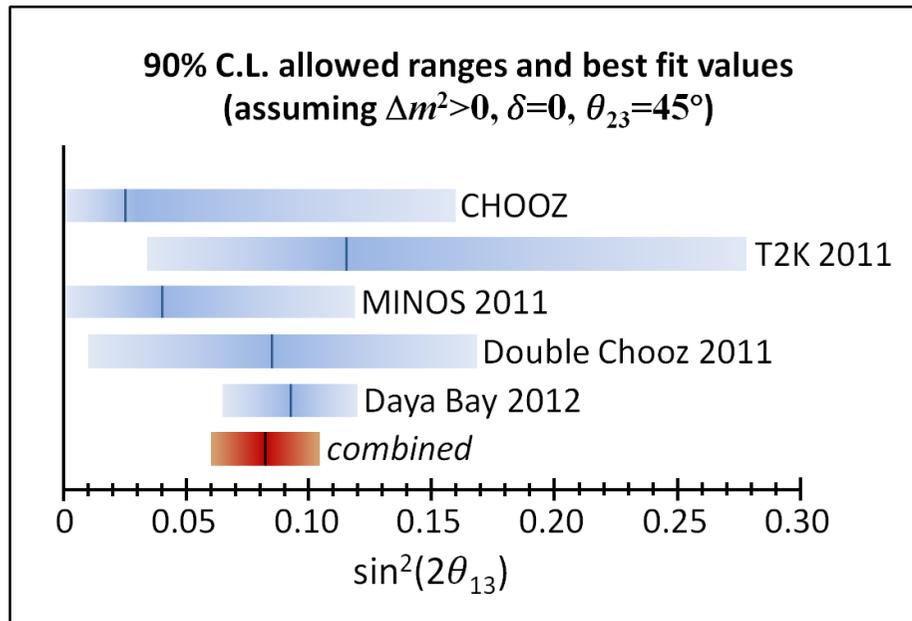
Échange d'un majoron $\langle g_{ee} \rangle$

Dans tous les cas, si la $\beta\beta 0\nu$ est observée,
le neutrino est de Majorana ($\nu = \bar{\nu}$) :
théorème de Schlechter-Valle

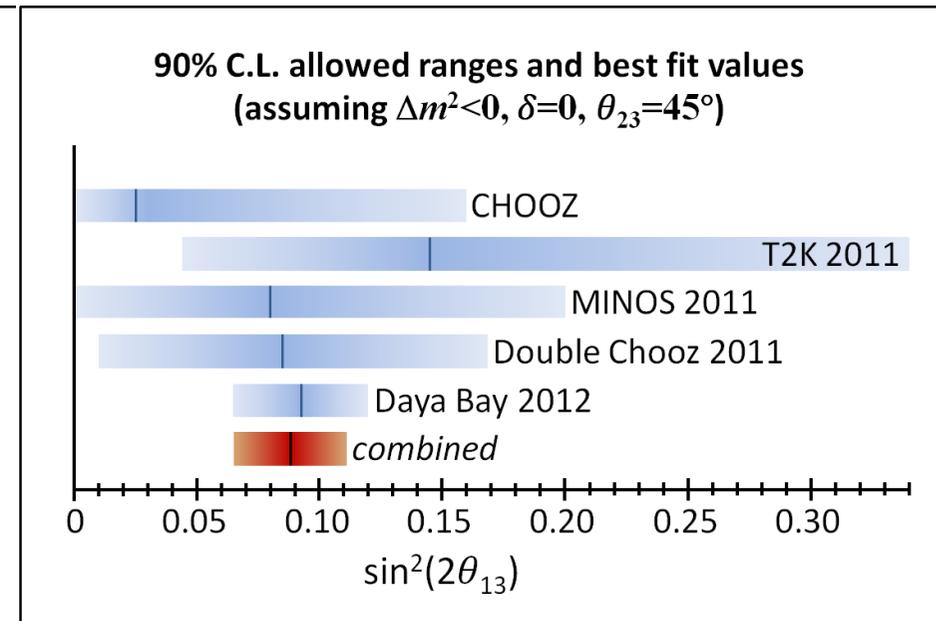


Hierarchie normale ou inverse?

hiérarchie normale

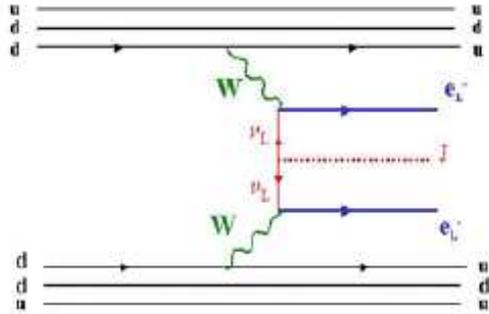


hiérarchie inverse



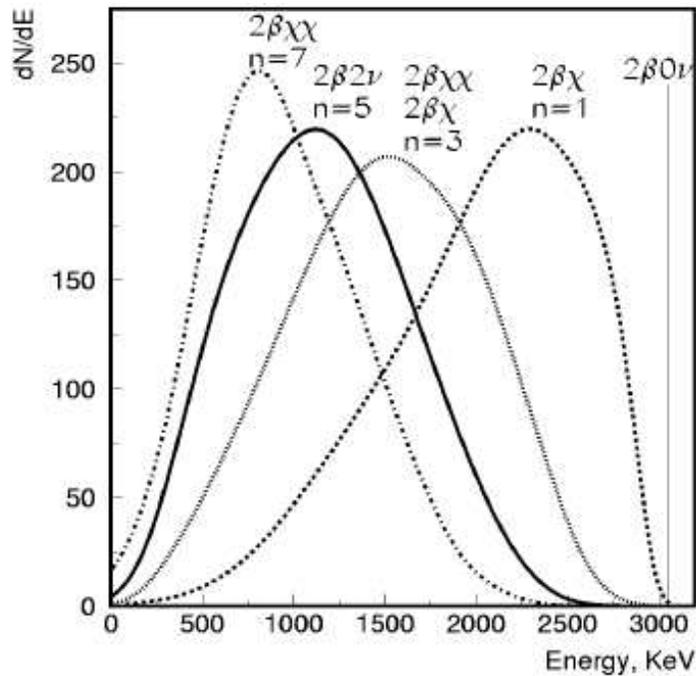
La valeur “longue baseline” mesurée par MINOS serait plus compatible avec celle de DayaBay dans la hiérarchie inverse, mais ce n’est qu’une indication.

Majorons and V+A currents



Majoron emission would distort the shape of the energy sum spectrum

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + \chi^0(\chi^0)$$



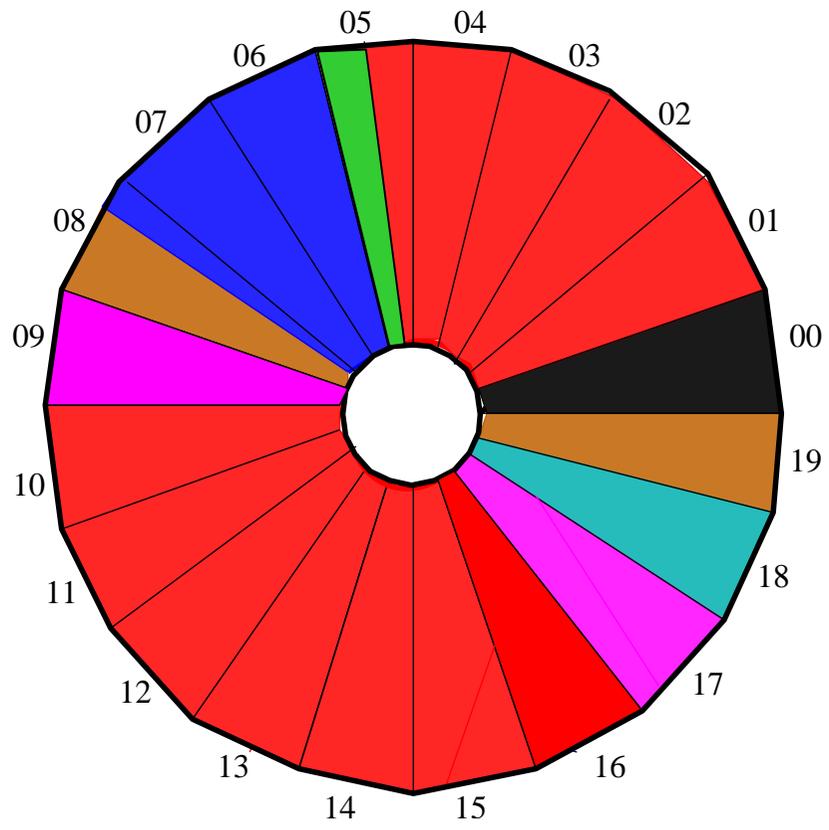
	V+A *	n=1 **	n=2 **	n=3 **	n=7 **
Mo	$>5.7 \cdot 10^{23}$ $\lambda < 1.4 \cdot 10^{-6}$	$>2.7 \cdot 10^{22}$ $G_{ee} < (0.4 - 1.8) \cdot 10^{-4}$	$>1.7 \cdot 10^{22}$	$>1.0 \cdot 10^{22}$	$>7 \cdot 10^{19}$
Se	$>2.4 \cdot 10^{23}$ $\lambda < 2.0 \cdot 10^{-6}$	$>1.5 \cdot 10^{22}$ $G_{ee} < (0.7 - 1.9) \cdot 10^{-4}$	$>6 \cdot 10^{21}$	$>3.1 \cdot 10^{21}$	$>5 \cdot 10^{20}$

n: spectral index, limits on half-life in years

* Phase I+Phase II data

** Phase I data, *R.Arnold et al. Nucl. Phys. A765 (2006) 483*

ββ decay isotopes in NEMO-3 detector



^{100}Mo 6.914 kg
 $Q_{\beta\beta} = 3034 \text{ keV}$

^{82}Se 0.932 kg
 $Q_{\beta\beta} = 2995 \text{ keV}$

ββ0ν search

ββ2ν measurement

^{116}Cd 405 g
 $Q_{\beta\beta} = 2805 \text{ keV}$

^{96}Zr 9.4 g
 $Q_{\beta\beta} = 3350 \text{ keV}$

^{150}Nd 37.0 g
 $Q_{\beta\beta} = 3367 \text{ keV}$

^{48}Ca 7.0 g
 $Q_{\beta\beta} = 4272 \text{ keV}$

^{130}Te 454 g
 $Q_{\beta\beta} = 2529 \text{ keV}$

natTe 491 g

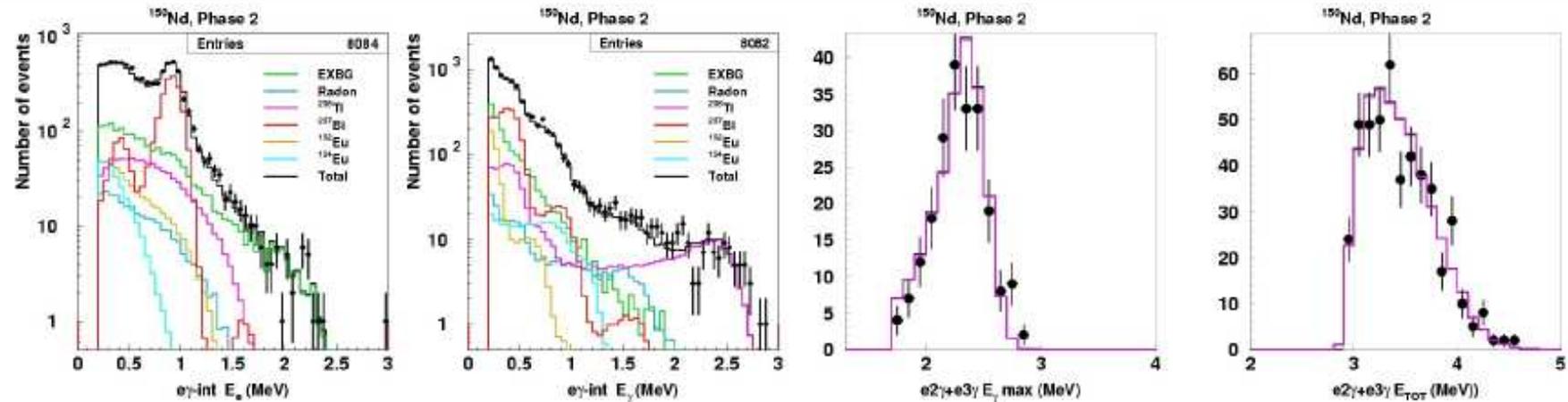
Cu 621 g

External bkg measurement

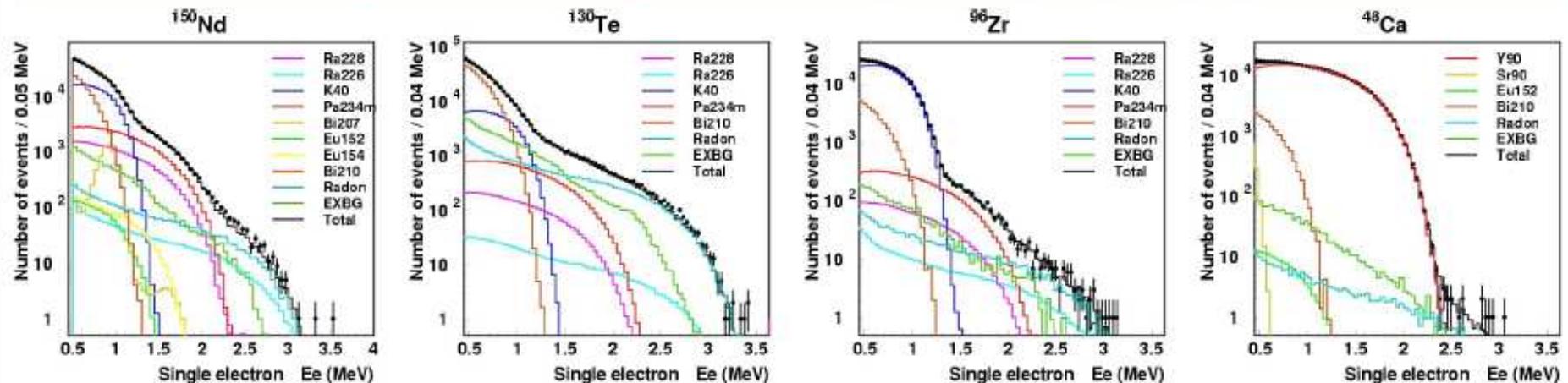
(Enriched isotopes produced by centrifugation in Russia)

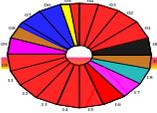
NEMO 3 measures each component of its background

Internal background from γ -emitters (^{208}Tl , ^{207}Bi , ...): ($e\gamma$, $e\gamma\gamma$, $e\gamma\gamma\gamma$)-events



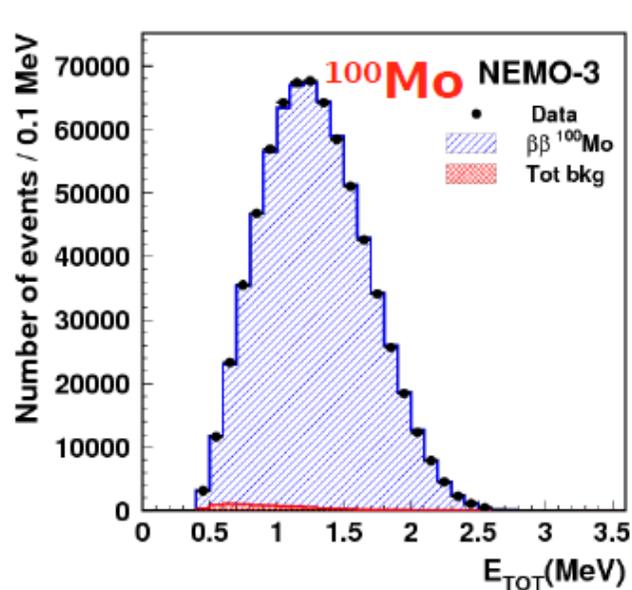
Internal background from β -emitters ($^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{40}K , ^{90}Y , ...): 1e-events



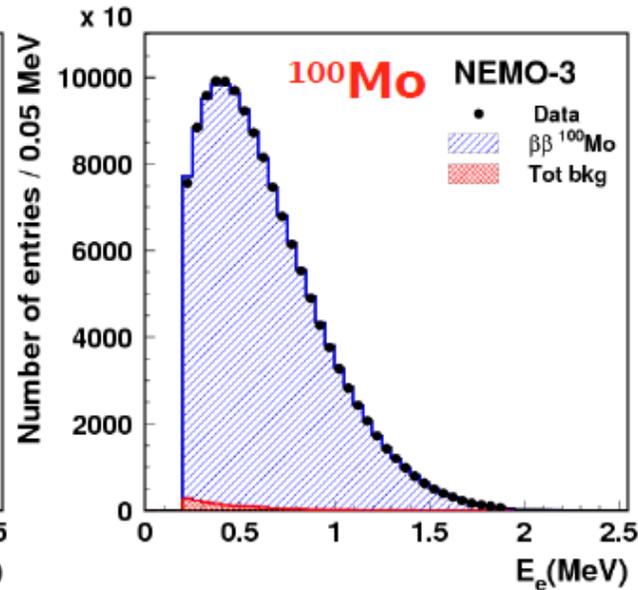


NEMO 3: $\beta\beta 2\nu$ results for ^{100}Mo source

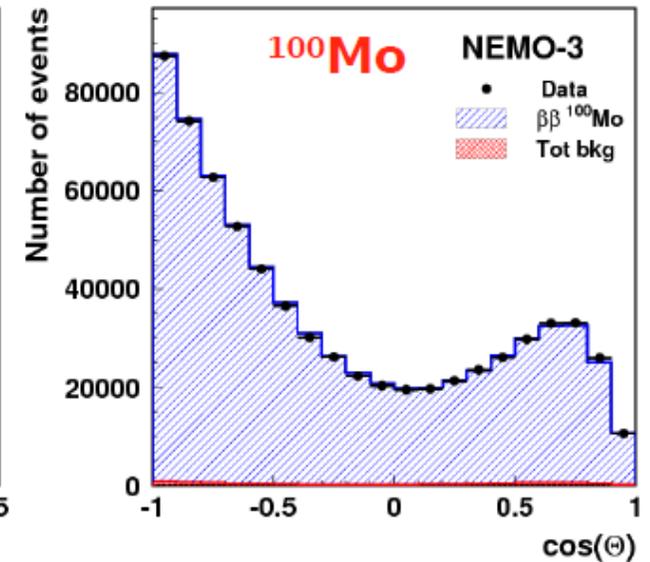
Phase 2 : 4 years of data



Energy sum of the 2 electrons events



Single electron energy



Angular distribution between the 2 electrons

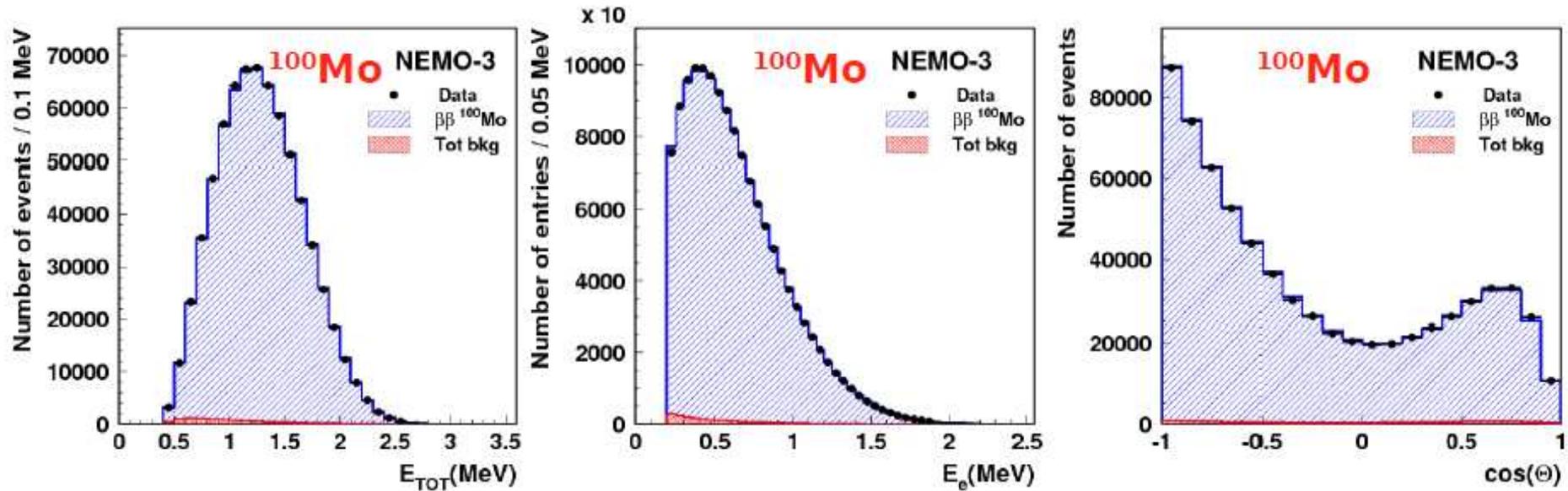
700 000 two-electron events from ^{100}Mo source foils

Ratio Signal/Background : 76

$$T_{1/2} (\beta\beta 2\nu) = (7.16 \pm 0.01) 10^{18} \text{ y (preliminary)}$$

(published phase 1 $T_{1/2} = [7.11 \pm 0.02 \text{ (stat)} 0.54 \text{ (stat)}] 10^{18} \text{ y}$)

$2\nu\beta\beta$ ^{100}Mo Phase 2 data, 4 years

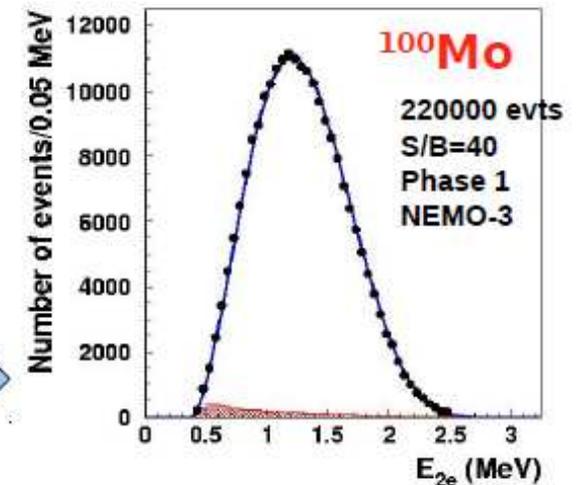


- 700000 two-electron events from ^{100}Mo foils
- $S/B = 76$
- $\epsilon(2\nu2\beta) = 0.043$
- $T_{1/2}(2\nu2\beta) = (7.16 \pm 0.01) 10^{18} \text{ y}$ PRELIMINARY

To be compared with the published NEMO-3 result obtained with Phase 1 data

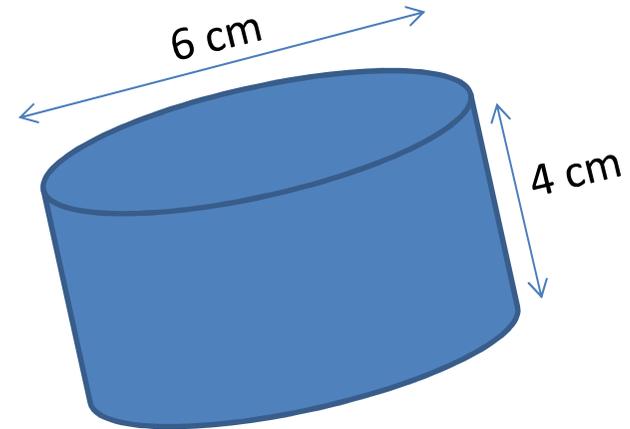
$$T_{1/2} = [7.11 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.54(\text{syst})] 10^{18} \text{ y}$$

Phys.Rev.Lett. 95(2005)483



ZnMoO₄ - preliminary background simulation

- Tower structure – 7 towers with 7 planes each
- 49 detectors – 400 g each
- Copper holders and PTFE supports



Source of background	Activity [$\mu\text{Bq/kg}$]
²⁰⁸ Tl in ZMO	10
²¹⁴ Bi in ZMO	10
²²⁸ Th in Cu	20
²²⁶ Ra in Cu	70
²²⁸ Th in PTFE	100
²²⁶ Ra in PTFE	60
⁵⁶ Co in ZMO	0.06
⁵⁶ Co in Cu	0.02
⁸⁸ Y in ZMO	0.3
Total	

Monte Carlo

Achievable background in the region of interest:

1×10^{-4} counts/keV kg y

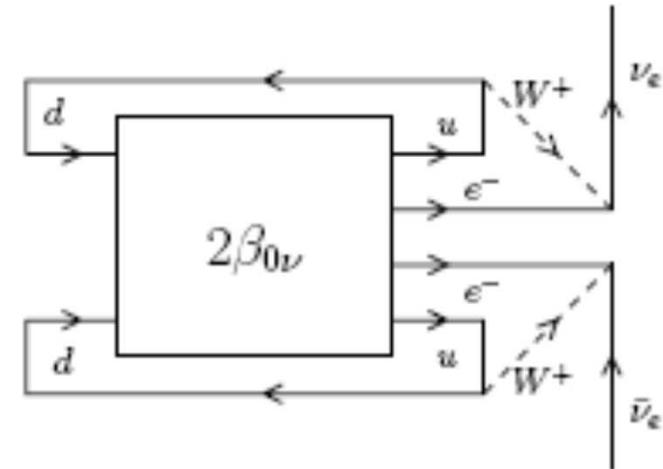
Most dangerous contaminant: ²⁰⁸Tl

No sign of internal contaminations in the 5.07 g detector

Activity [²⁰⁸Tl] < 230 $\mu\text{Bq/kg}$ 90% c.l.

established in only 5 days of measurement

**Dans tous les cas, si la $\beta\beta_{0\nu}$ est observée,
le neutrino est de Majorana ($\nu = \bar{\nu}$) :
théorème de Schlechter-Valle**



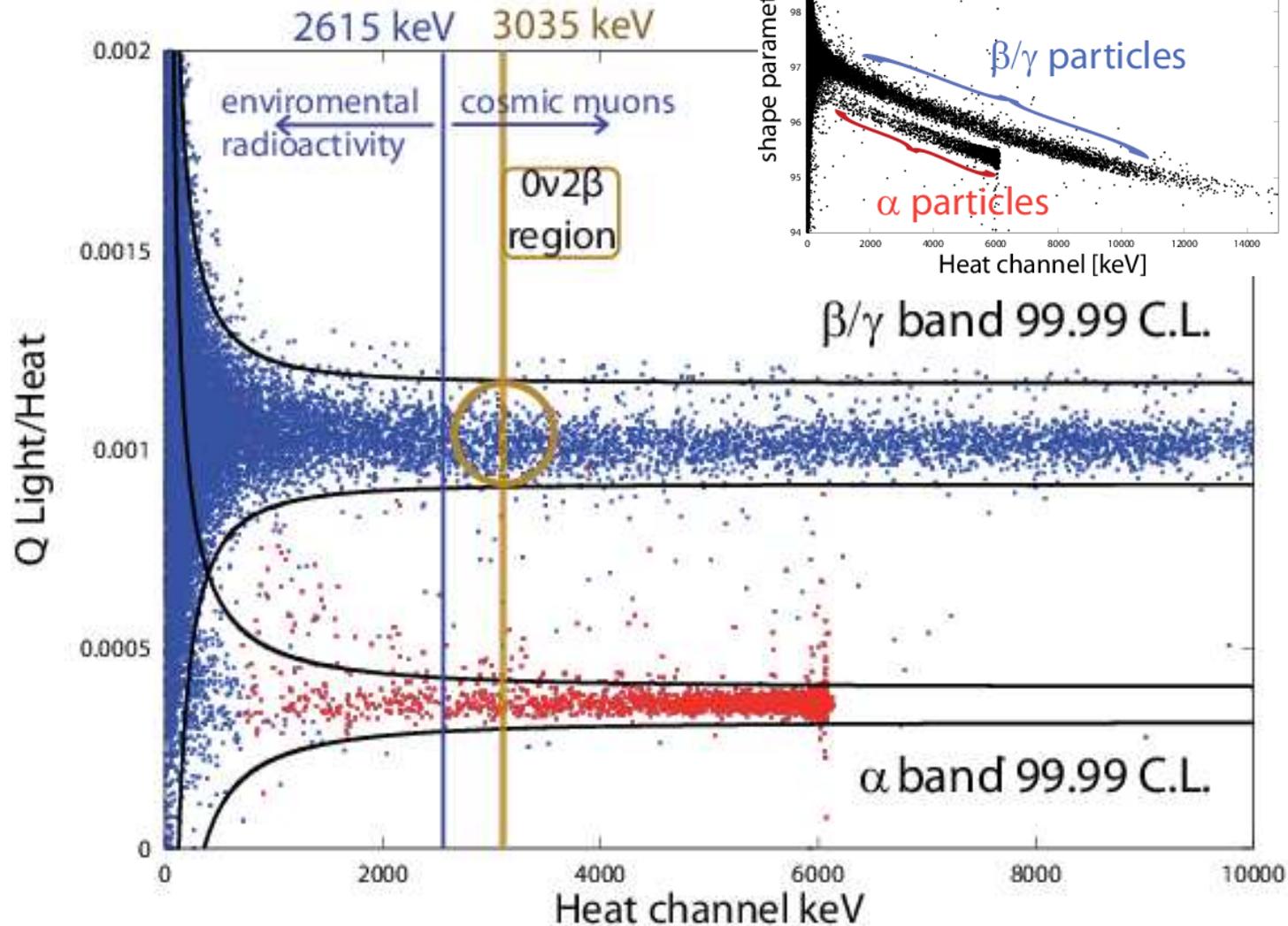
Mais la terme de masse de Majorana de ce diagramme peut être très faible : $< 10^{-23}$ eV.

(Duerr, Lindner, Merle; Rodejohann arXiv 1106.1334)

Les expériences d'oscillation des neutrinos impliquent que la masse d'un état propre de masse soit $> 10^{-2}$ eV : ce terme de masse peut ne pas expliquer la masse des neutrinos

ZnMoO₄ - results from 5.07 g detector

Alpha/beta discrimination with
light yield and pulse shape



éléments de matrice nucléaire (grande incertitude)

Espace de phase

$$\frac{1}{T_{\beta\beta 0\nu}^{1/2}} = M_{\text{nucleaire}}^2 | \langle m_\nu \rangle |^2 G_{0\nu}$$

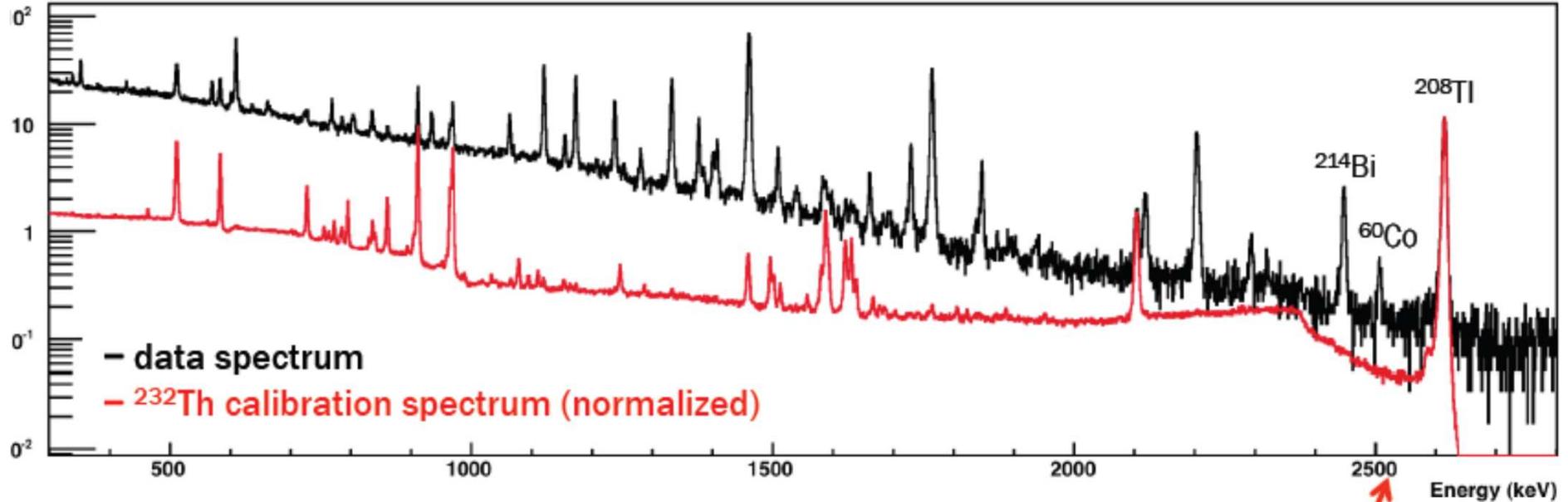
masse effective du neutrino

matrice de mélange

$$\langle m_\nu \rangle = |U_{e1}|^2 m_1 + |U_{e2}|^2 e^{i\alpha_1} m_2 + |U_{e3}|^2 e^{i\alpha_2} m_3$$

m_1, m_2, m_3 : masses des états propres de masse

α_1, α_2 : phases de Majorana



There are three main sources of background in the region around the **Q value**:

- (~35%) Compton events from ²⁰⁸Tl gammas, from ²³²Th contamination in the cryostat (i.e., inside the lead shield)
- (~55%) Degraded alphas from ²³⁸U and ²³²Th on copper surfaces
- (~10%) Degraded alphas from ²³⁸U and ²³²Th on crystal surfaces

The 2505 keV ⁶⁰Co peak is likely due to cosmic ray activation of the copper

Backgrounds in GERDA

Source	B [10^{-3} cts/(keV kg y)]
Ext. γ from ^{208}Tl (^{232}Th)	<1
Ext. neutrons	<0.05
Ext. muons (veto)	<0.2
Int. ^{68}Ge ($t_{1/2} = 270$ d)	12
Int. ^{60}Co ($t_{1/2} = 5.27$ y)	2.5
^{222}Rn in LN/LAr	<0.2
^{208}Tl , ^{238}U in holder	<1
Surface contam.	<0.6

Muon veto

180 days exposure after enrichment + 180 days underground storage

30 days exposure after crystal growing

derived from measurements and MC simulations

Target for phase II: $B \leq 10^{-3}$ cts/(keV kg y)

\Rightarrow additional bgd. reduction techniques

Contributions françaises à SuperNEMO

Software : analyse, visualisation

Calorimètre : construction des modules, intégration, électronique

Radon : détecteur de Radon, chambre d'émanation, purification de gaz

Tracker : électronique

Laboratoire hôte : LSM

Mesures basse radioactivité : sélection des matériaux

Contributions étrangères à SuperNEMO

Royaume-Uni : tracker

Etats-Unis : cadre-source, chimie pour la purification des sources, hautes tensions

République tchèque, Russie : scintillateur (polystyrène) pour l'ensemble du calorimètre

Japon : système d'acquisition