

La nature du neutrino

F. Piquemal

Laboratoire Souterrain de Modane (CNRS and CEA)

et

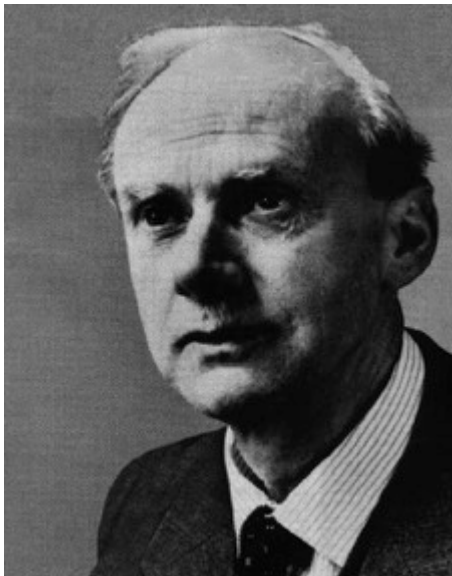
CEN Bordeaux-Gradignan (CNRS et Université de Bordeaux)

Congrès générale de la SFP Août 2015

La nature du neutrino

Neutrino de Dirac

$$\nu \neq \bar{\nu}$$



Neutrino de Majorana

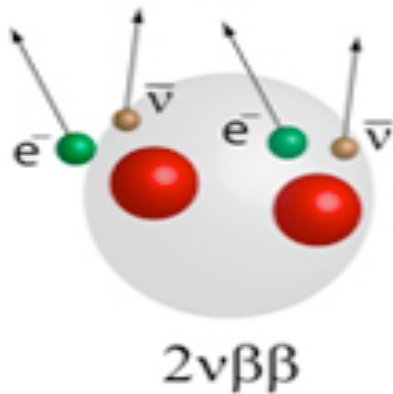
$$\nu = \bar{\nu}$$



- Question de première importance pour la physique des particules et la cosmologie.:
- Le mécanisme appelé see-saw qui pourrait expliquer la faible masse des neutrinos implique des neutrinos de Majorana
 - Le scénario de leptogénèse nécessite l'existence de neutrinos de Majorana

La double décroissance bêta

$\beta\beta(2\nu)$

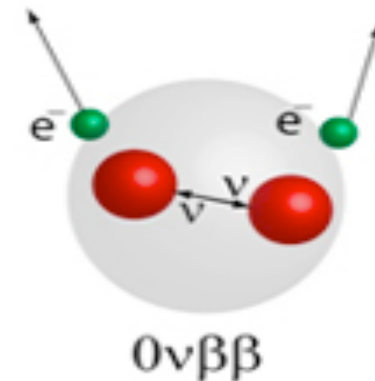


Processus du second ordre de l'interaction faible

Prédit par Goeppert-Mayer en 1935

Première observation direct en 1987

$\beta\beta(0\nu)$

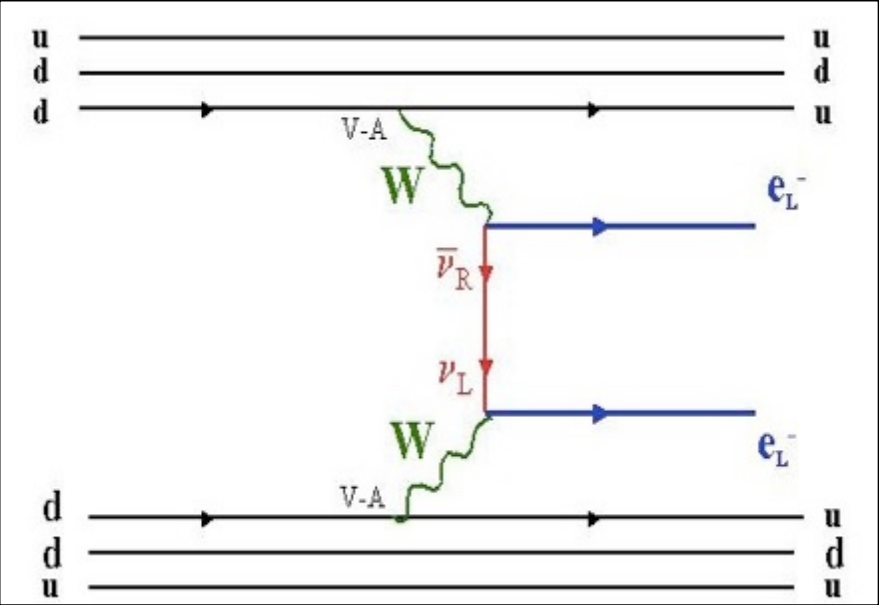


$\Delta L=2$ Interdit par le modèle standard

Prédit par Racah, Furry en 1937, 1938 suite aux travaux de Majorana en 1937

Pas encore observée

Double décroissance bêta et propriétés du neutrino



Facteur d'espace de phase

Éléments de matrice nucléaire

$$T_{1/2}^{-1} = F(Q_{\beta\beta}^5, Z) |M|^2 \langle m_{\nu} \rangle^2$$

Masse effective:

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

$|U_{ei}|$: Élément de matrice de mélange PMNS

α_1 et α_2 : phase de Majorana

D'autres processus $\beta\beta(0\nu)$ sont possibles : courant droit, échange d'un majoron ou de particules supersymétriques,...

Théorème de Schechter-Vallee: quelque soit le mécanisme, l'observation de la double désintégration bêta sans émission de neutrino implique que le neutrino soit de Majorana

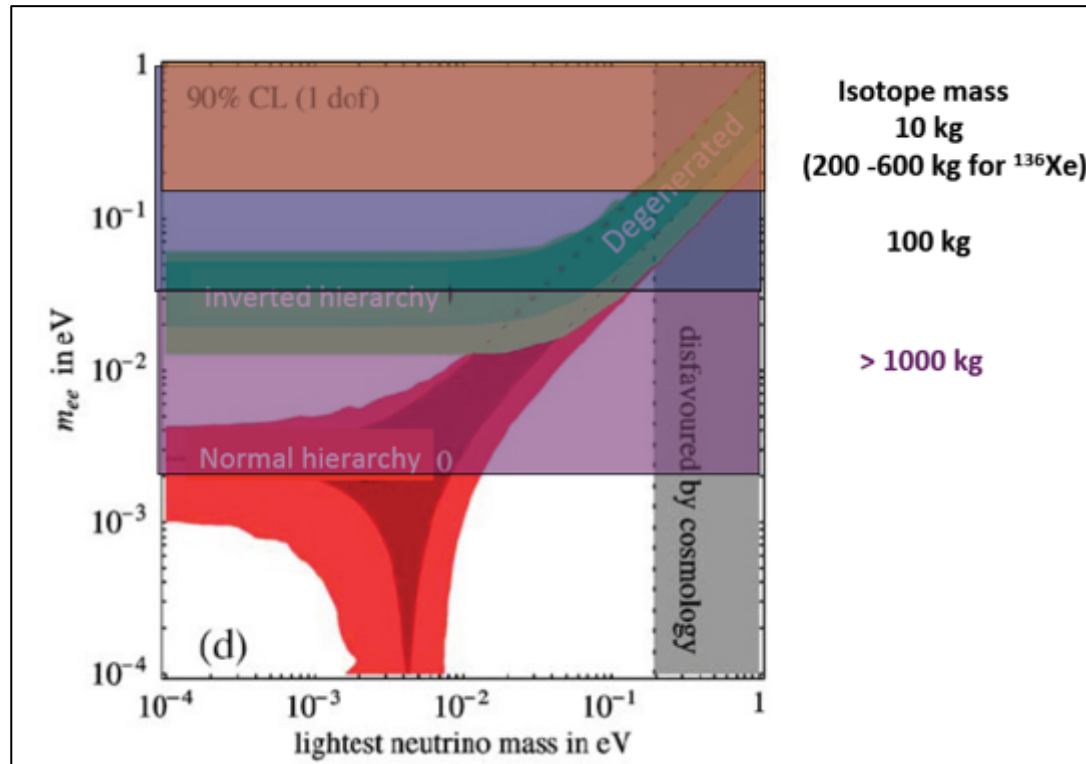
Double désintégration bêta et propriétés du neutrino

Masse absolue du neutrino?

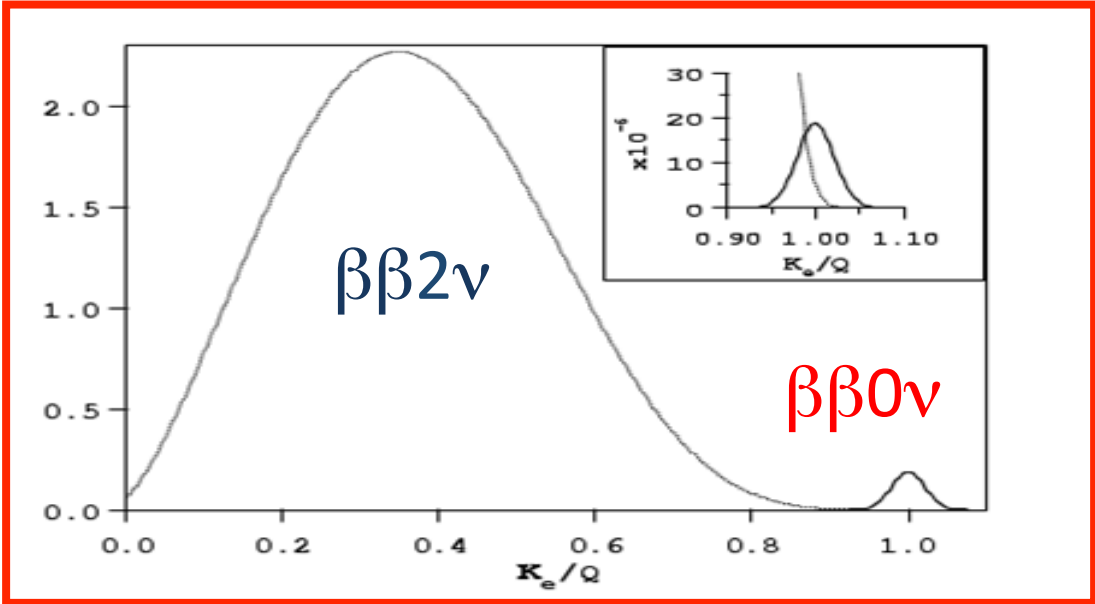
Décroissance β (mesure directe) $m_{\nu_e} < 2.3 \text{ eV}$

Cosmologie (modèle dépendant) $\Sigma m_i < 0.3 \text{ eV}$

$\beta\beta(0\nu)$ (masse effective) $\langle m_{\nu} \rangle < 0.2\text{-}0.5 \text{ eV}$



Les observables de la double décroissance bêta



Somme de l'énergie des 2 électrons/ Energie de transition

Décroissance vers les états excités
 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2 e^- + 1,2 \gamma$

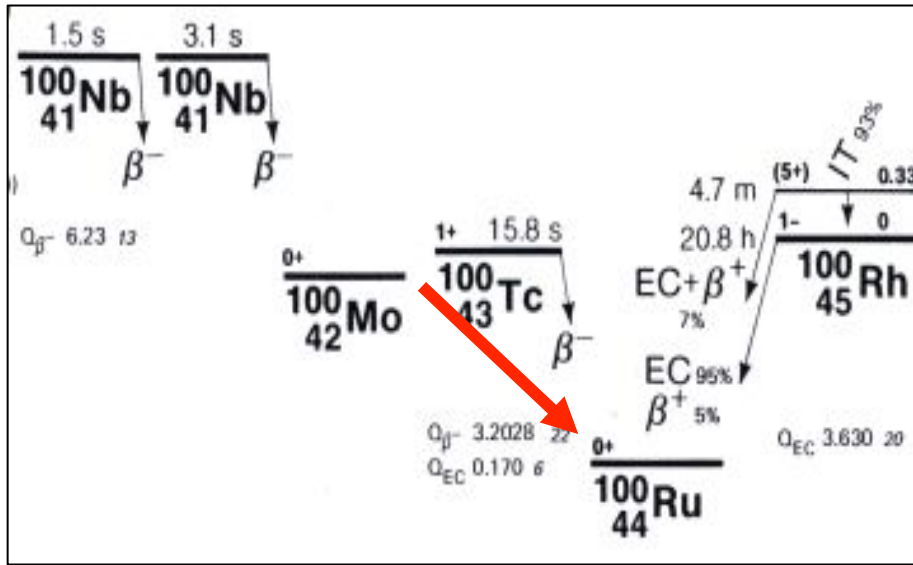
1 ou 2 photons émis en coïncidence

Distribution angulaire

Distribution $E_{e_1} - E_{e_2}$

Echange de neutrino léger (MM) vs vs Courant droit(RHC)

Emetteurs double bêta



Simple décroissance bêta interdite ou fortement supprimée

Périodes $\beta\beta(2\nu) \sim 10^{18} - 10^{21}$ ans

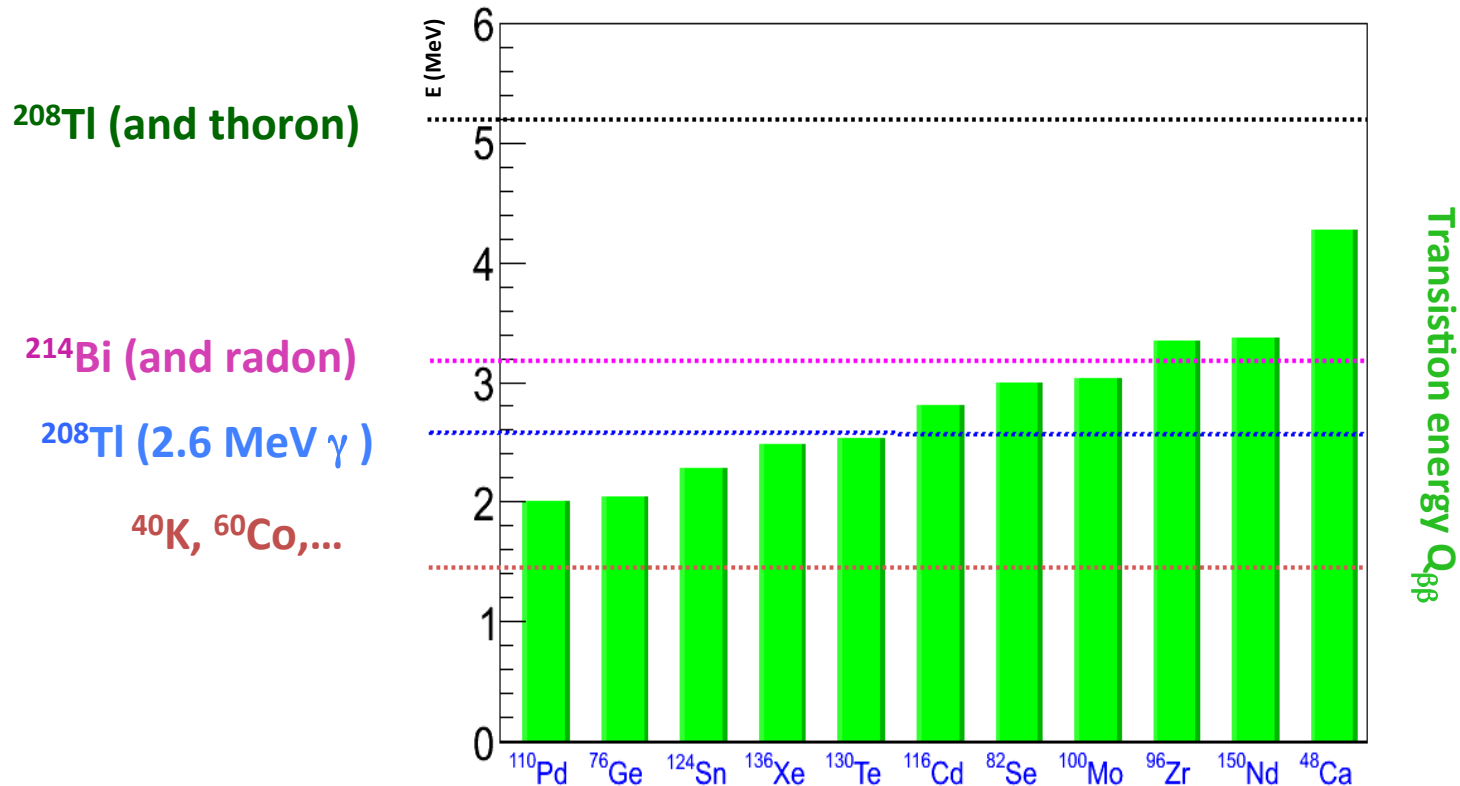
Périodes $\beta\beta(0\nu)$ attendues $> 10^{24} - 10^{25}$ ans

Ne peuvent être étudiés que les noyaux pouvant être enrichis isotopiquement

Transition	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	Abondance (%)
$^{146}\text{Nd} \rightarrow ^{146}\text{Sm}$	56 ± 5	17
$^{98}\text{Mo} \rightarrow ^{98}\text{Ru}$	112 ± 7	24
$^{80}\text{Se} \rightarrow ^{80}\text{Kr}$	130 ± 9	50
$^{122}\text{Sn} \rightarrow ^{122}\text{Te}$	364 ± 4	4.6
$^{204}\text{Hg} \rightarrow ^{204}\text{Pb}$	416 ± 2	7
$^{192}\text{Os} \rightarrow ^{192}\text{Pt}$	417 ± 4	41
$^{186}\text{W} \rightarrow ^{186}\text{Os}$	490 ± 2	29
$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Sn}$	534 ± 4	29
$^{170}\text{Er} \rightarrow ^{170}\text{Yd}$	654 ± 2	15
$^{134}\text{Xe} \rightarrow ^{134}\text{Ba}$	847 ± 10	10
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{232}\text{U}$	858 ± 6	100
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	868 ± 4	32
$^{46}\text{Ca} \rightarrow ^{46}\text{Ti}$	987 ± 4	-
$^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{70}\text{Ge}$	1001 ± 3	0.6
$^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{198}\text{Hg}$	1048 ± 4	7
$^{176}\text{Yb} \rightarrow ^{176}\text{Hf}$	1079 ± 3	13
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{238}\text{Pu}$	1145 ± 2	99
$^{94}\text{Zr} \rightarrow ^{94}\text{Mo}$	1145 ± 2	17
$^{154}\text{Sm} \rightarrow ^{154}\text{Gd}$	1252 ± 2	23
$^{86}\text{Kr} \rightarrow ^{86}\text{Sr}$	1256 ± 5	17
$^{104}\text{Ru} \rightarrow ^{104}\text{Pd}$	1299 ± 4	19
$^{142}\text{Ce} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$	1418 ± 3	11
$^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{160}\text{Dy}$	1729 ± 1	22
$^{148}\text{Nd} \rightarrow ^{148}\text{Sm}$	1928 ± 2	6
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2013 ± 19	12
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2040 ± 1	8
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2288 ± 2	6
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2479 ± 8	9
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2533 ± 4	34
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2802 ± 4	7
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2995 ± 6	9
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3034 ± 6	10
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3350 ± 3	3
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3667 ± 2	6
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4271 ± 4	0.2

35 émetteurs $\beta\beta$ possibles

Source de bruit de fond : la radioactivité naturelle



Détecteurs installés dans des laboratoires souterrains très profonds

Sélection des matériaux

Blindage contre les rayonnements gamma et les neutrons venant de la roche

Suppression du radon

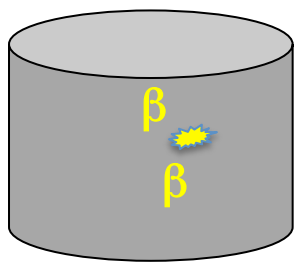
Techniques de réjection du bruit de fond

Technique de détection de la double désintégration bêta

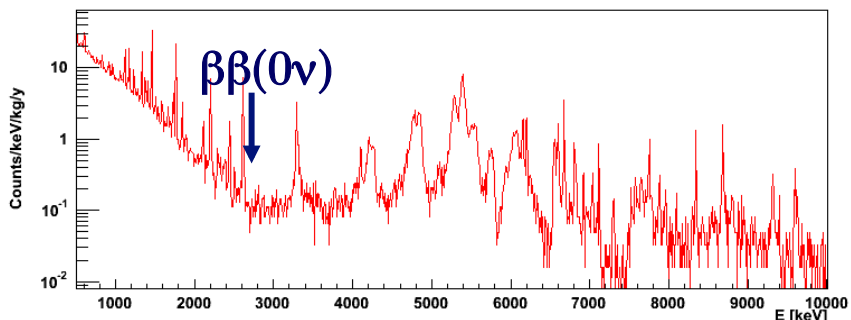
Expérimentalement

$$T_{1/2}^{0\nu}(\text{y}) \propto \frac{\epsilon}{A} \sqrt{\frac{M \cdot t}{N_{\text{Bckg}} \cdot \Delta E}}$$

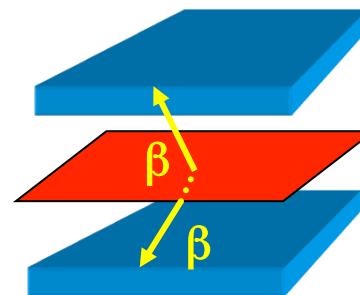
ϵ : efficacité
 M: Masse
 t: Temps
 N_{bckg} : Nombre de bdf
 ΔE : Résolution en énergie



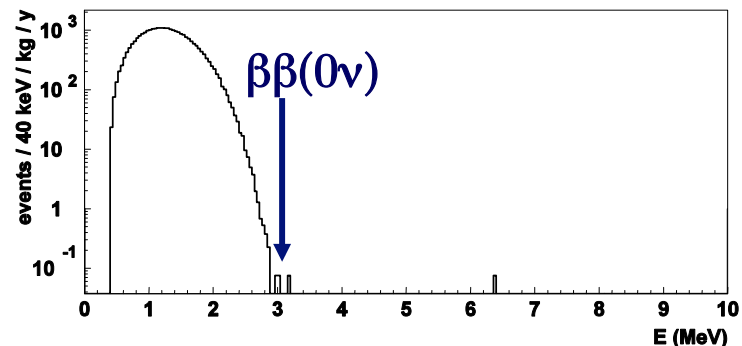
Mesure calorimétrique



Très bonne résolution en énergie
Modeste réjection du bruit de fond

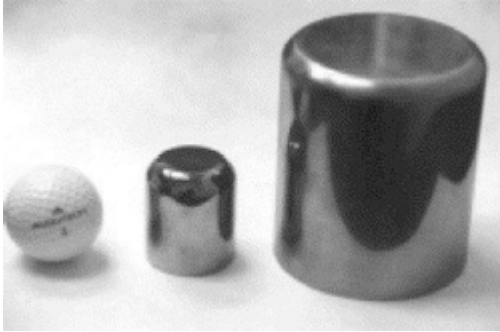


Identification des électrons



Très bonne réjection du bruit de fond
Modeste résolution en énergie

Expérience GERDA: cristaux de ^{76}Ge



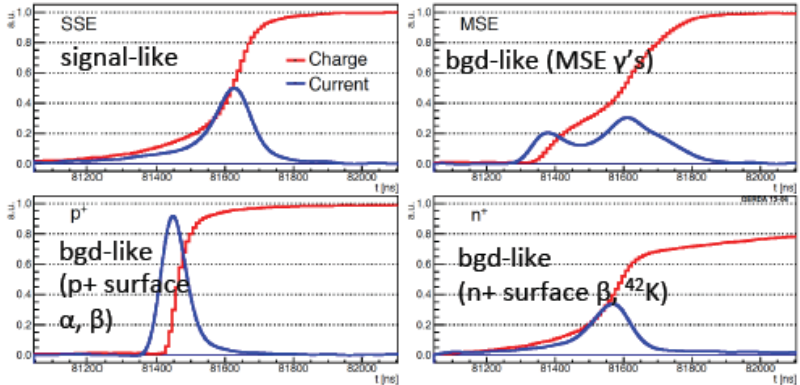
Très bonne résolution en énergie
2 keV à 2 MeV



Installée au laboratoire souterrain du Gran Sasso Italy

Analyse de l'impulsion pour rejeter le bruit de fond.

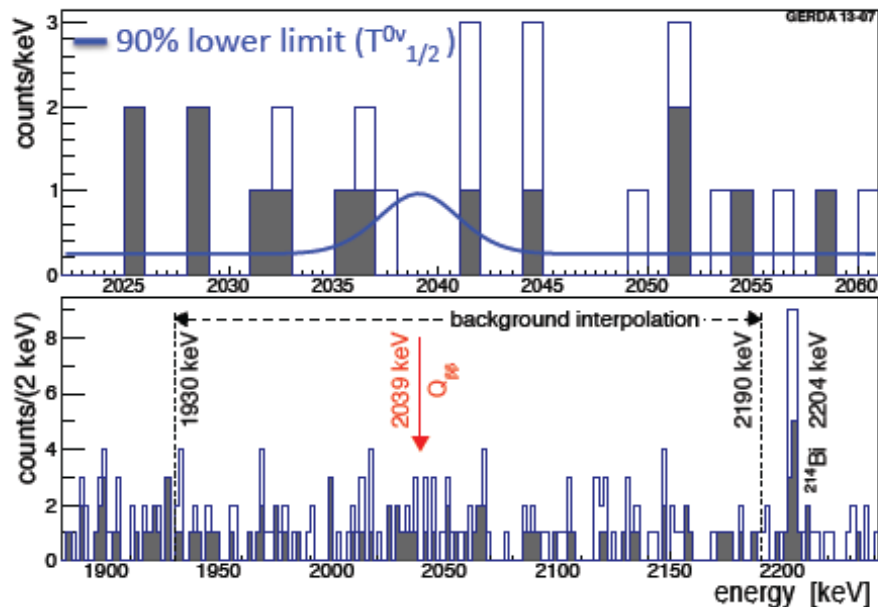
Dans le futur, réjection des événements de surface



Expérience GERDA: cristaux de ^{76}Ge

Phase I : 20 kg de ^{76}Ge

21,6 kg.an de données



GERDA:

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.1 \times 10^{25} \text{ yr (90\% C.L.)}$$

GERDA+IGEX+HdM:

$$T_{1/2}^{0\nu} > 3.0 \times 10^{25} \text{ yr (90\% C.L.) } (\langle m_{ee} \rangle < 0.2\text{-}0.4 \text{ eV})$$

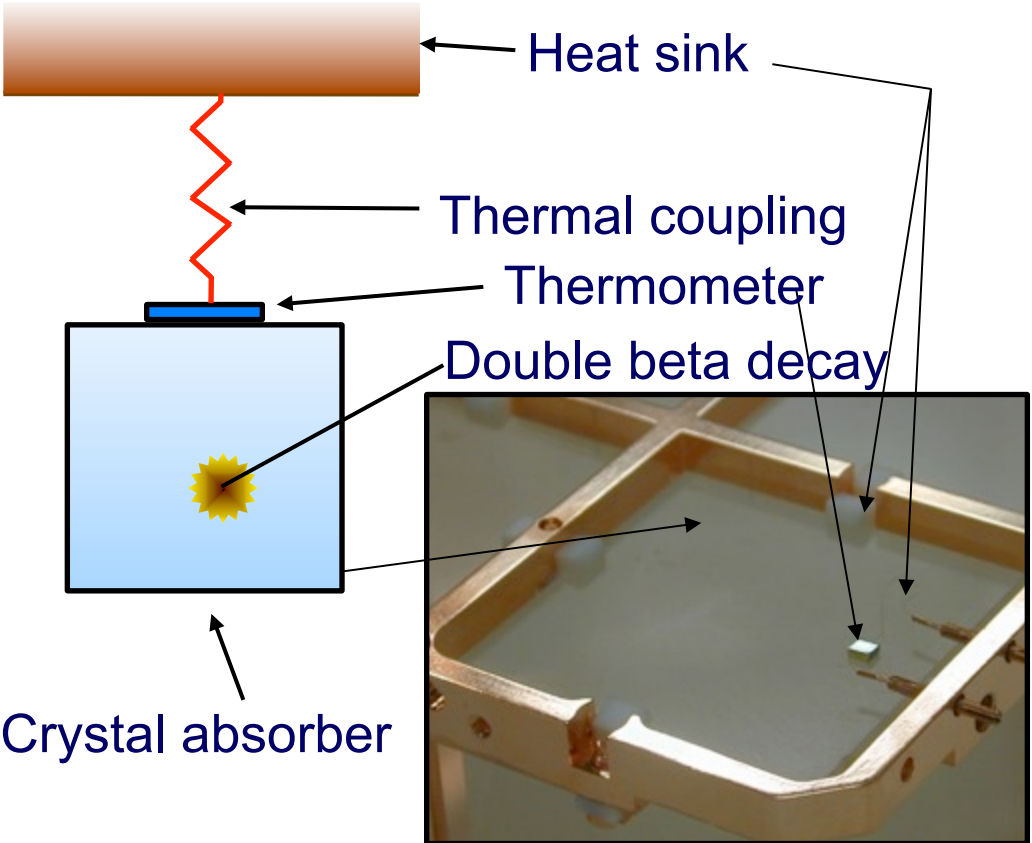
Phase II en cours : 40 kg de ^{76}Ge

Amélioration de l'électronique pour l'études des impulsions

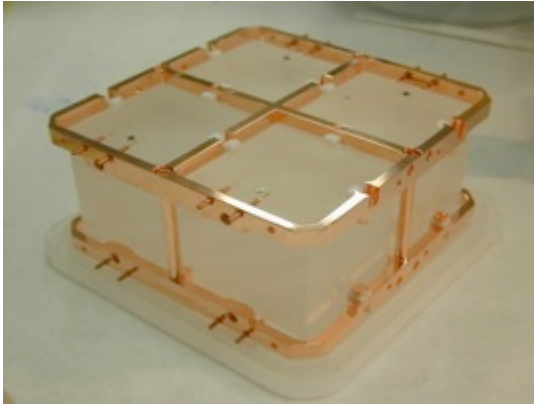
Utilisation du veto d'argon liquide

Sensibilité attendue de l'ordre de 10^{26} y

Expérience CUORE



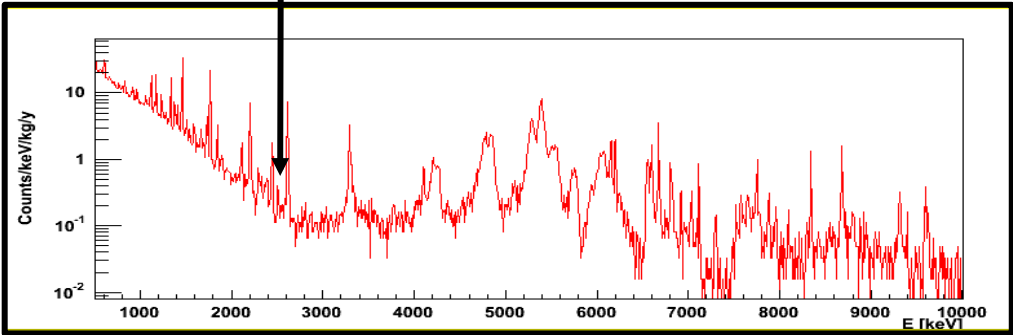
Installée au laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italy)



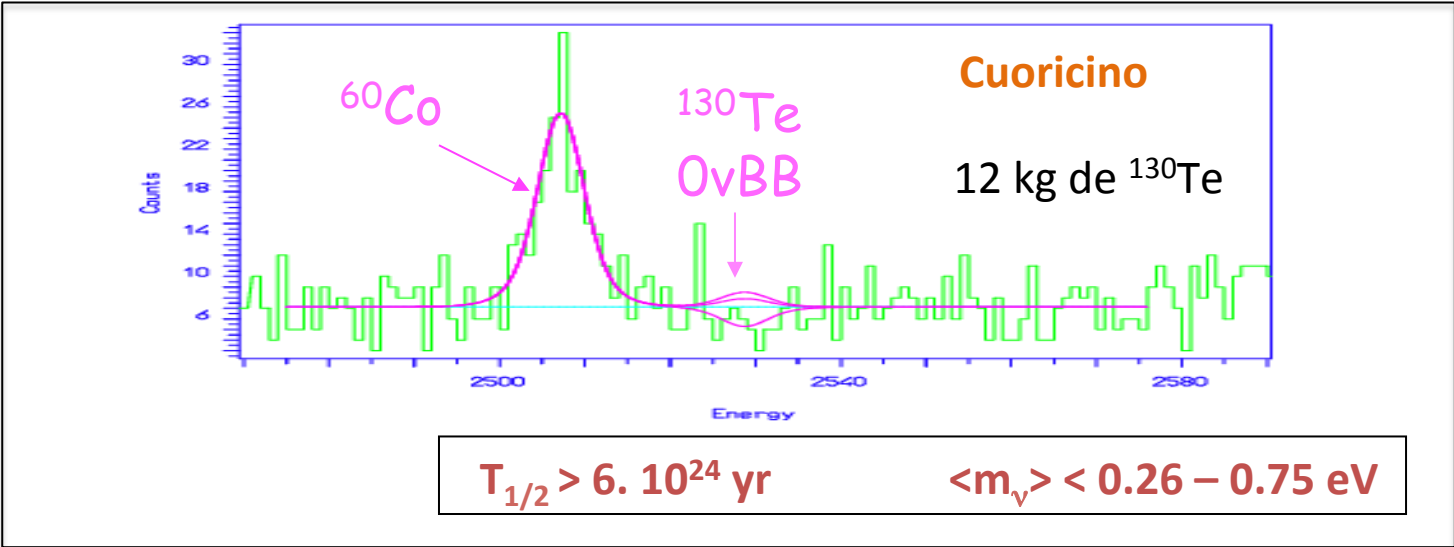
Très bonne résolution en énergie
5 keV à 2,6 MeV



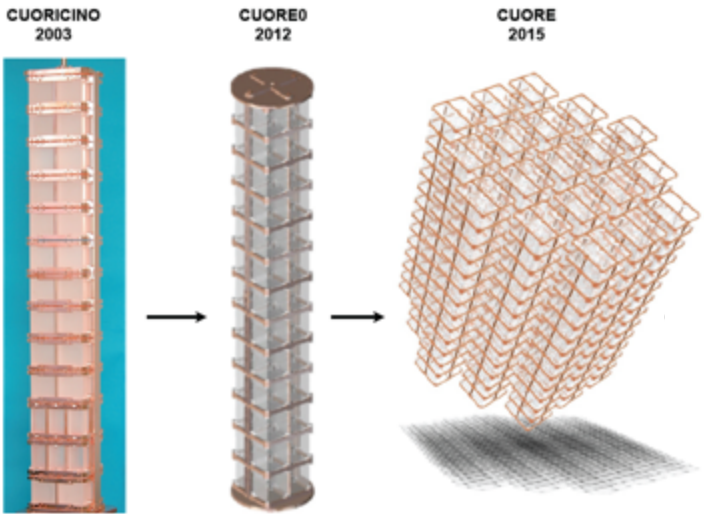
0 ν DBD



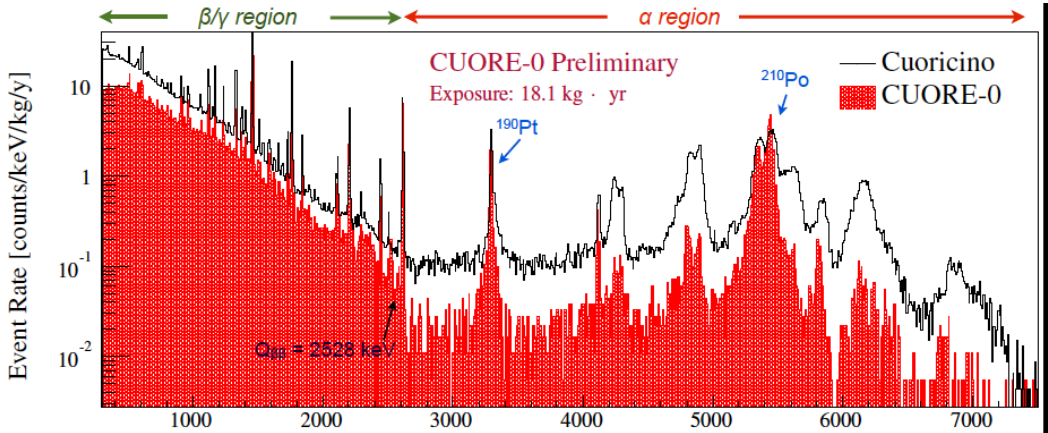
Résultats de Cuoricino et projet CUORE



CUORE : 200 kg de ^{130}Te

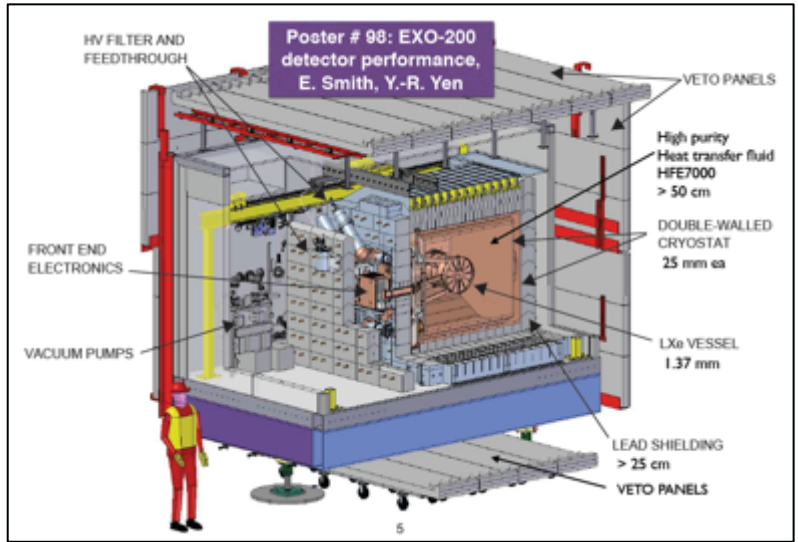
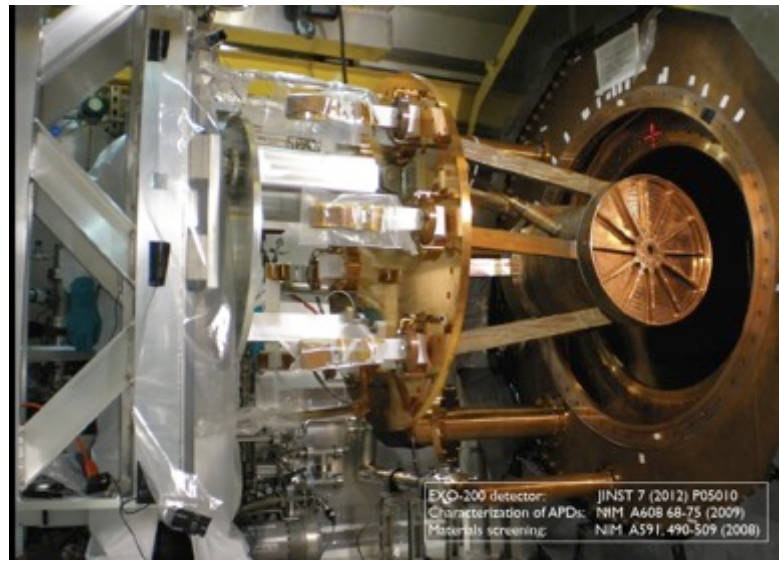
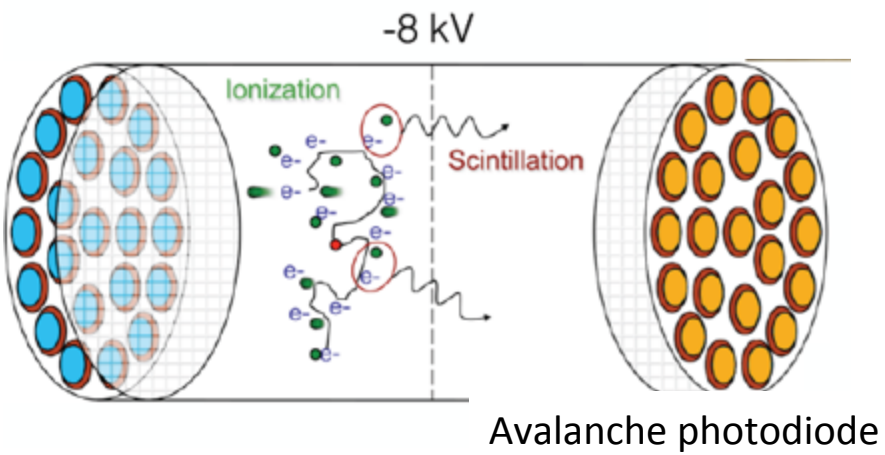


CUORE – 0 : Amélioration du bruit de fond

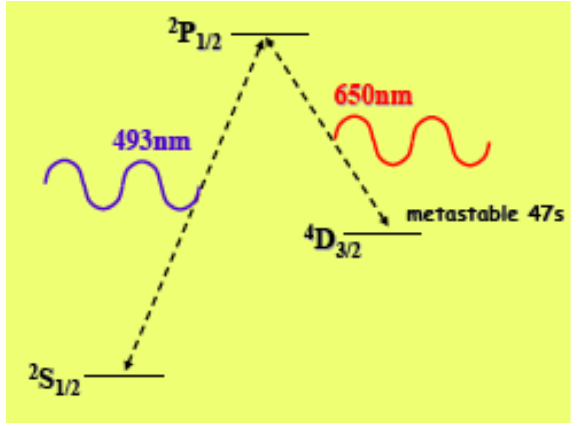


Xenon liquide : EXO-200

Installé à WIPPL (USA)

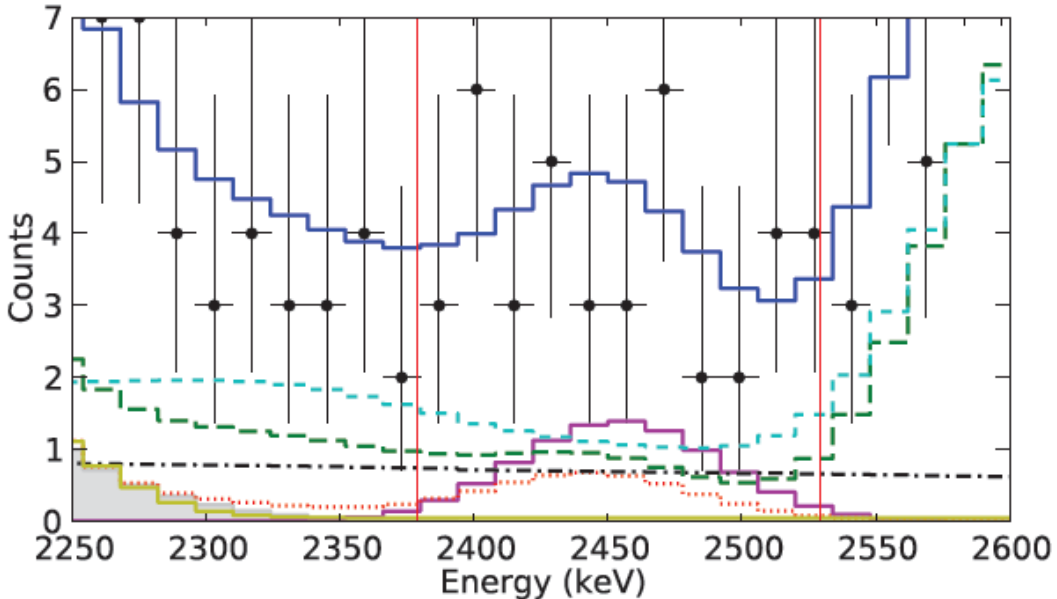
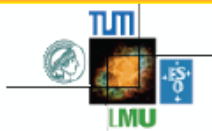


Grande masse : 200 kg de ^{136}Xe enrichi à 80%



Possibilité de tagger le noyau fils de Baryum ?
R&D en cours

Looking for $0\nu\beta\beta$



Backgrounds in $\pm 2\sigma$ ROI

Th-228 chain	16.0
U-232 chain	8.1
Xe-137	7.0
Total	31.1 ± 3.8

- \bullet Data
- Best Fit
- ⋯ Rn
- · - LXe bkgd
- n -capture
- · - ^{232}Th (far)
- Vessel
- $0\nu\beta\beta$
- $2\nu\beta\beta$

From profile likelihood:

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.1 \cdot 10^{25}$ yr

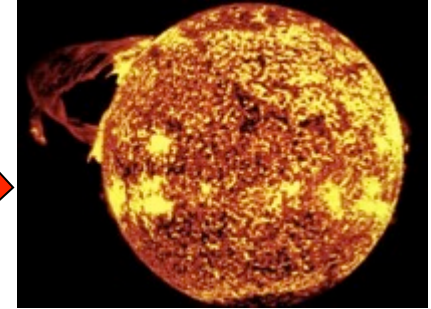
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 190 - 450$ meV (90% C.L.)

Nature (2014)
doi:10.1038/nature13432

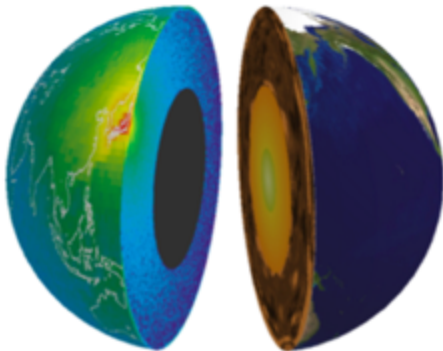
Expérience KamLAND-ZEN



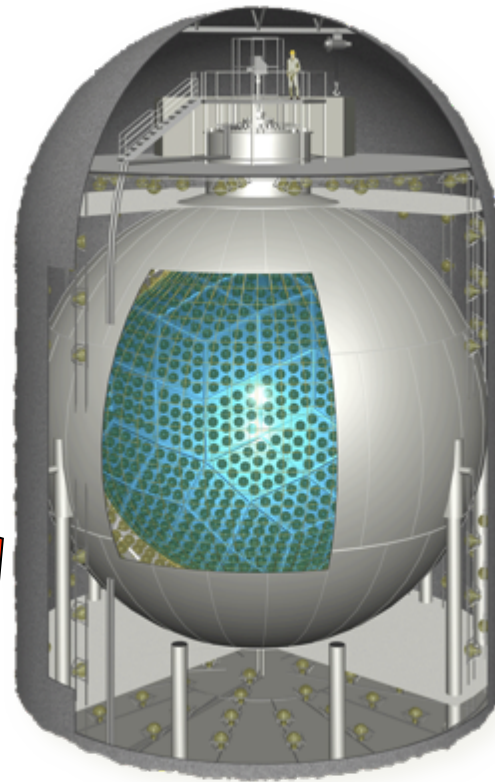
Neutrinos de réacteurs



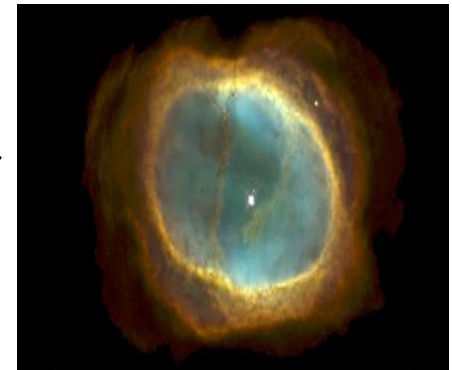
Neutrinos solaires



Geoneutrinos



Détecteur KamLAND



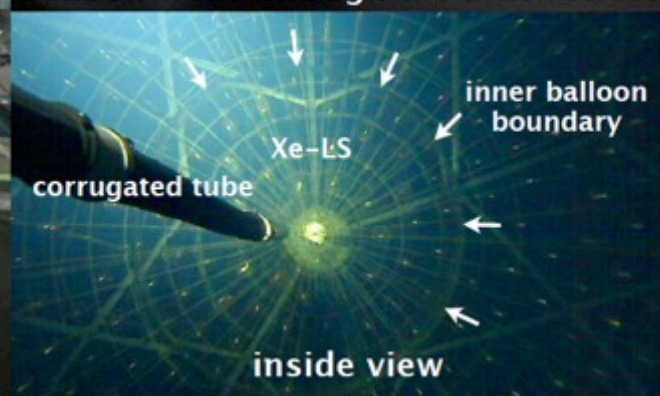
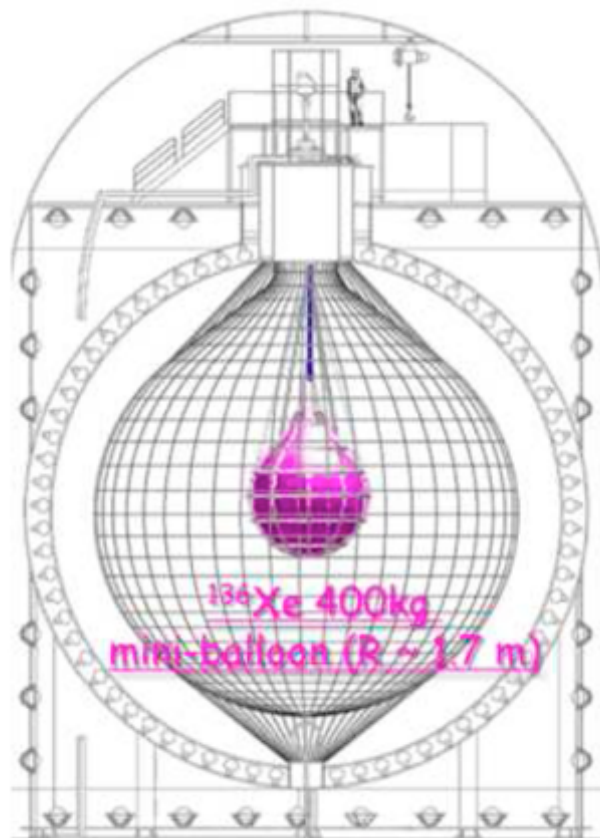
Neutrinos de Supernovae

Expérience KamLAND-ZEN

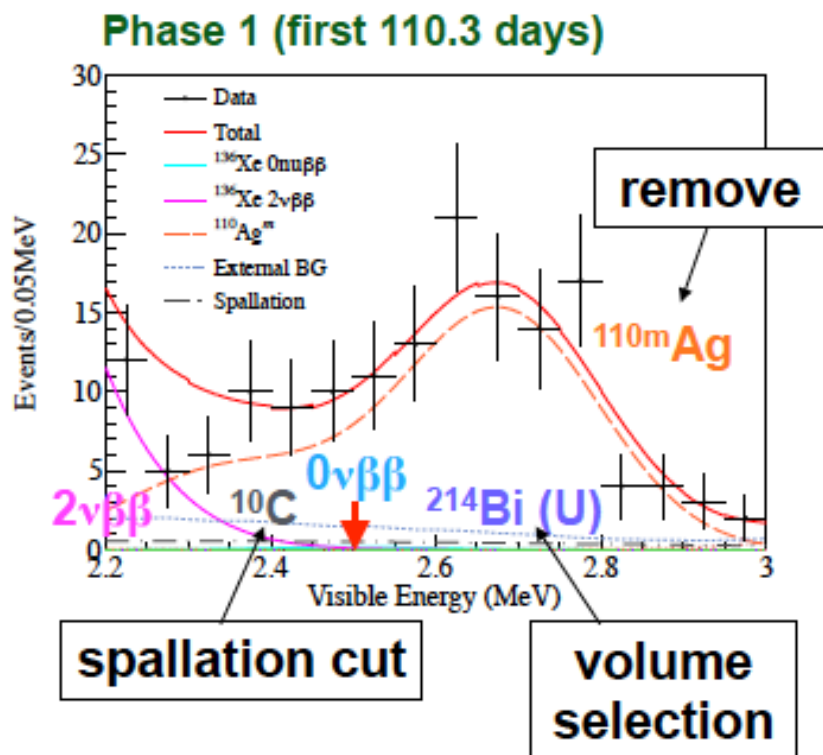
Dissolution de 400 kg de ^{136}Xe dans un ballon rempli de scintillateur liquide

Possibilité de dissoudre de très grande masse

Installée dans la mine de Kamioka au Japon



Expérience KamLAND-ZEN



Phase 1 $T^{0\nu}_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$ yr

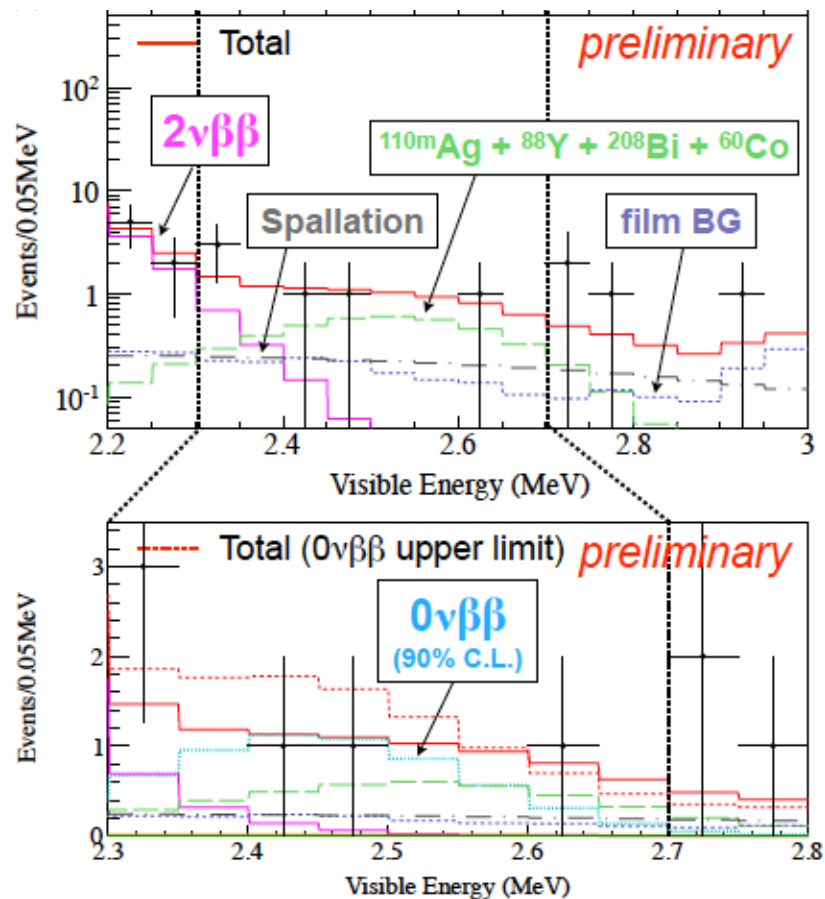
Phase 2 $T^{0\nu}_{1/2} > 1.3 \times 10^{25}$ yr

Combined $T^{0\nu}_{1/2} > 2.6 \times 10^{25}$ yr

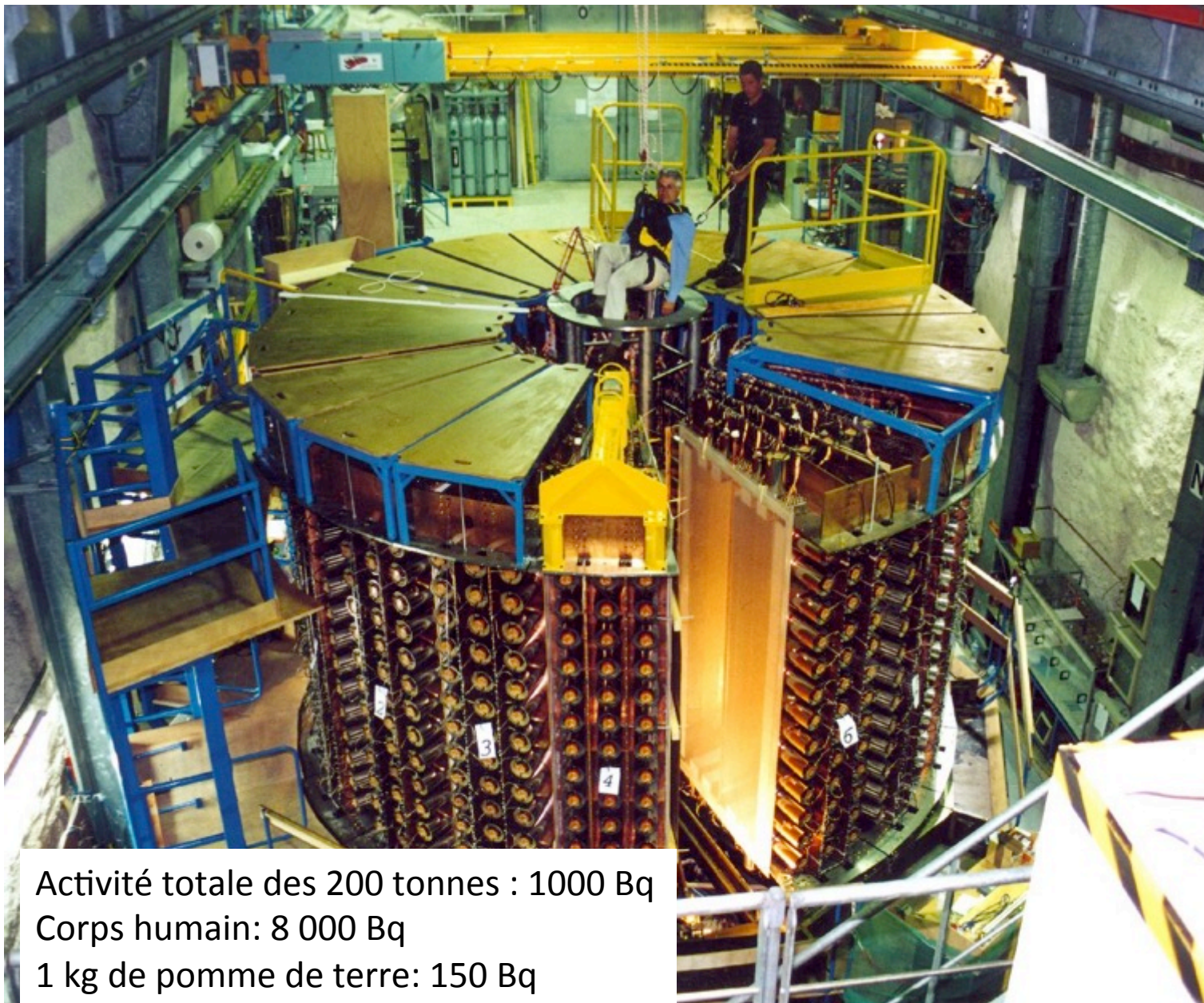
QRPA NME model
J. Phys. G 39 124006 (2012)

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.14\text{-}0.28$ eV

Phase 2



Le détecteur NEMO3



Le détecteur NEMO3



Chambre à fils

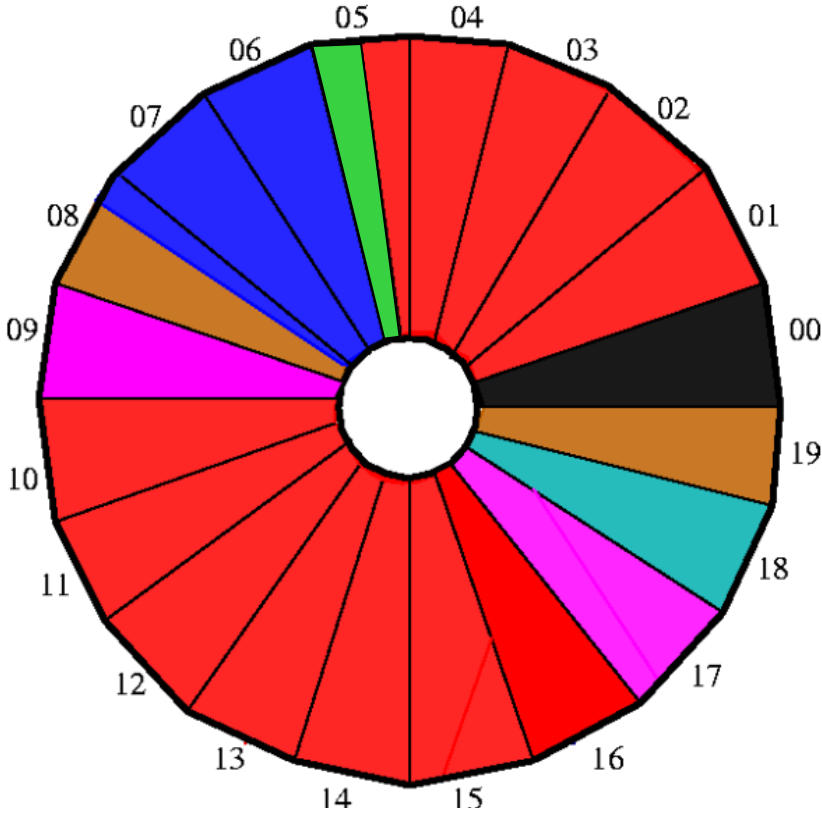
Tube de calibration

Photomultiplicateurs

scintillateurs

Feuilles $\beta\beta$

Le détecteur NEMO3



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

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

$\beta\beta 0\nu$ search

$\beta\beta 2\nu$ 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
 $Q_{\beta\beta} = 2529 \text{ keV}$

$^{\text{nat}}\text{Te}$ 491 g

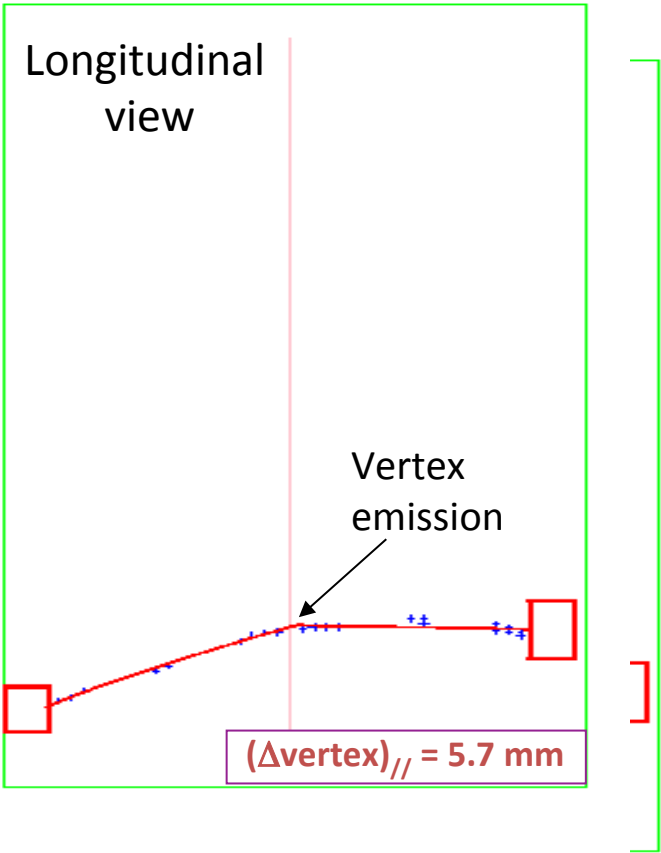
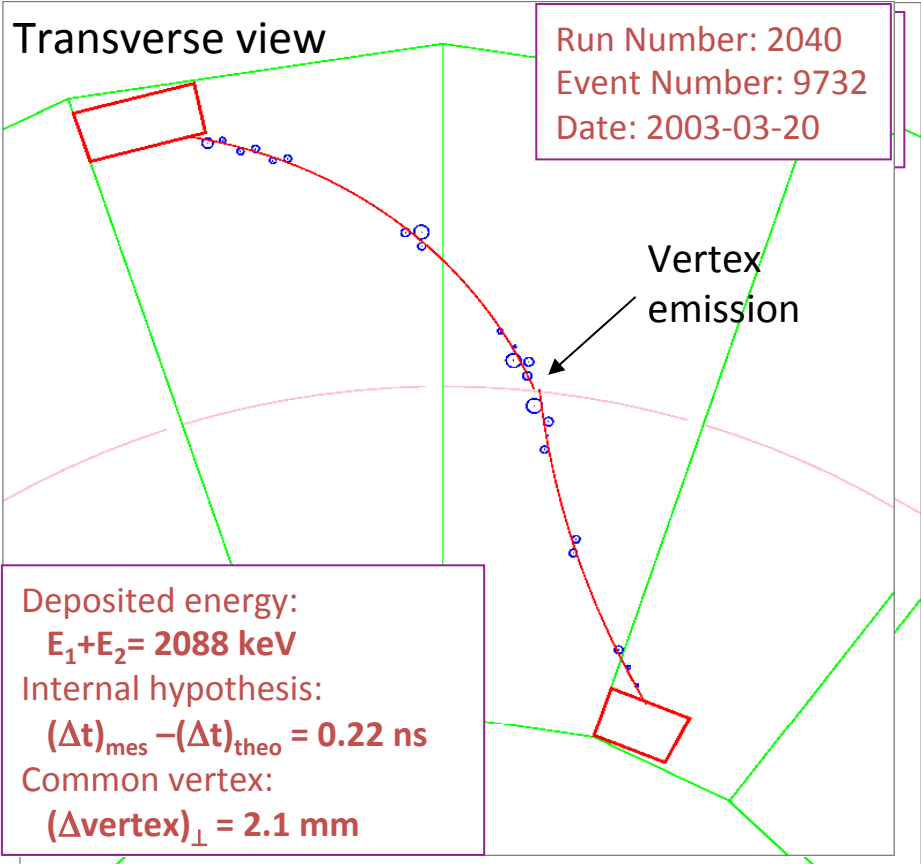
Cu 621 g

External bkg measurement

(All enriched isotopes produced in Russia)

Le détecteur NEMO3

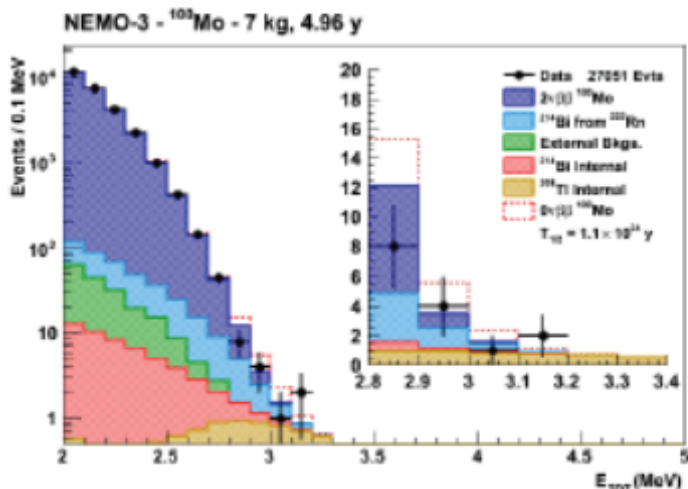
Événement $\beta\beta 2\nu$ dans NEMO3



Résultats de NEMO3

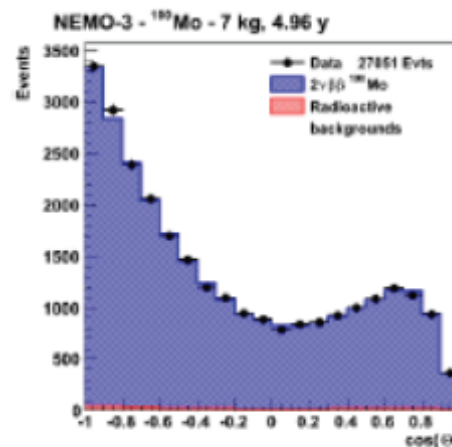
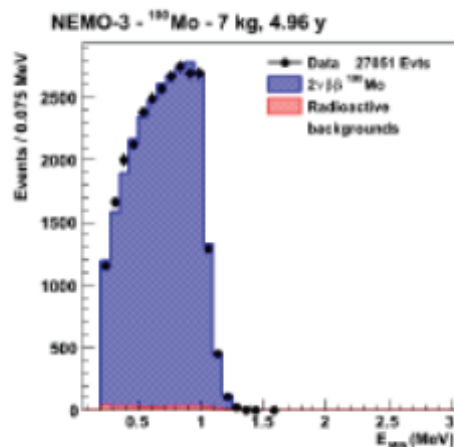
- ▶ Total ^{100}Mo exposure of 34.7 kg·y gave no event excess:
 $\mathcal{T}_{1/2}^{0\nu} > 1.1 \cdot 10^{24}$ y (90 % CL) corresponding to $|m_{\beta\beta}| < 0.3 - 0.8$ eV*

[Submitted to Phys. Rev. Lett. on Sept 2013]



Published in Phys. Rev. Lett.

	$\sqrt{\chi^2}$
Radon	5.2 ± 0.5
^{214}Bi	1.0 ± 0.2
^{208}Tl	3.4 ± 0.3
$2\nu 2\beta$	8.4 ± 0.1
Total	18.0 ± 0.6
Data	15

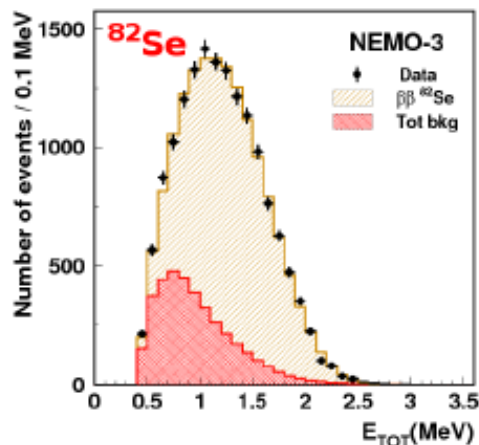


* NME: M. Kortelainen et al., Phys. Rev. C 76 (2007) 024315 - F. Šimković et al., Phys. Rev. C 79 (2009) 055501 - J. Barea et al., Phys. Rev. C 79 (2009) 044301 - P. K. Rath et al., Phys. Rev. C 82 (2010) 064310 - E. Caurier et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 052503

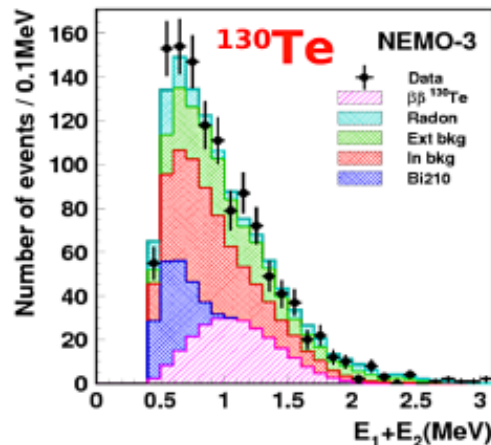
Mathieu BONGRAND - LAL - TAUP 2013

$$\mathcal{T}_{1/2}^{2\nu} = 7.16 \pm 0.01 \text{ (stat)} \pm 0.54 \text{ (syst)} \cdot 10^{18} \text{ y}$$

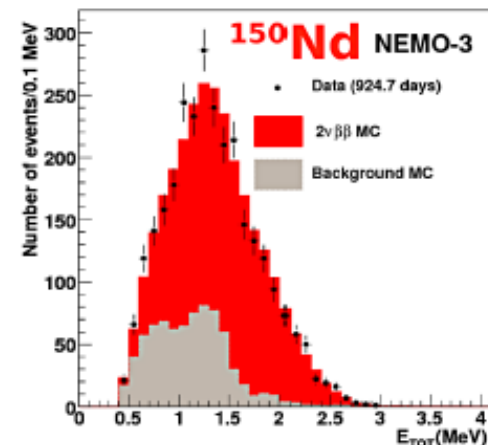
Résultats de NEMO3



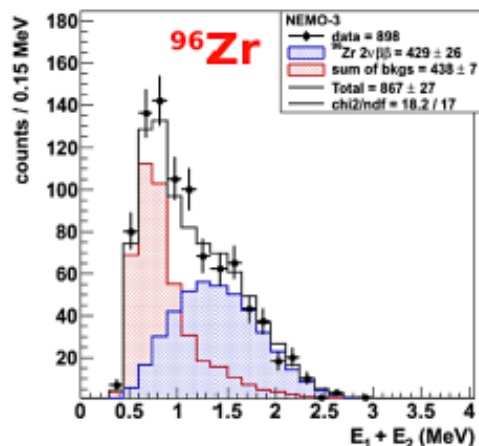
$T_{1/2} = 9.6 \pm 1.0 \cdot 10^{19} \text{ y}$
PRL 95, 182302 (2005)



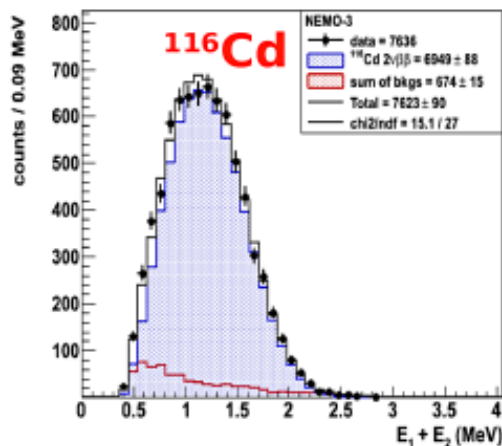
$T_{1/2} = 7.0 \pm 1.4 \cdot 10^{20} \text{ y}$
PRL 107, 062504 (2011)



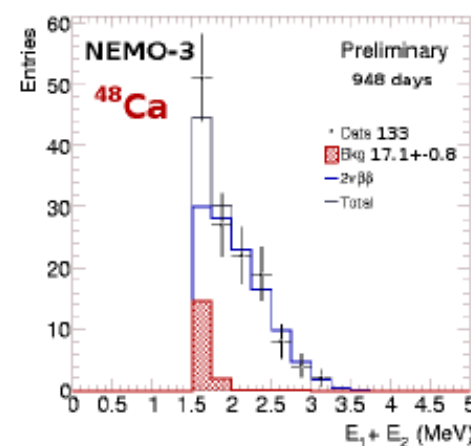
$T_{1/2} = 9.1 \pm 0.7 \cdot 10^{18} \text{ y}$
Phys. Rev. C 80, 032501 (2009)



$T_{1/2} = 2.35 \pm 0.21 \cdot 10^{19} \text{ y}$
Nucl. Phys. A 847, 168 (2010)



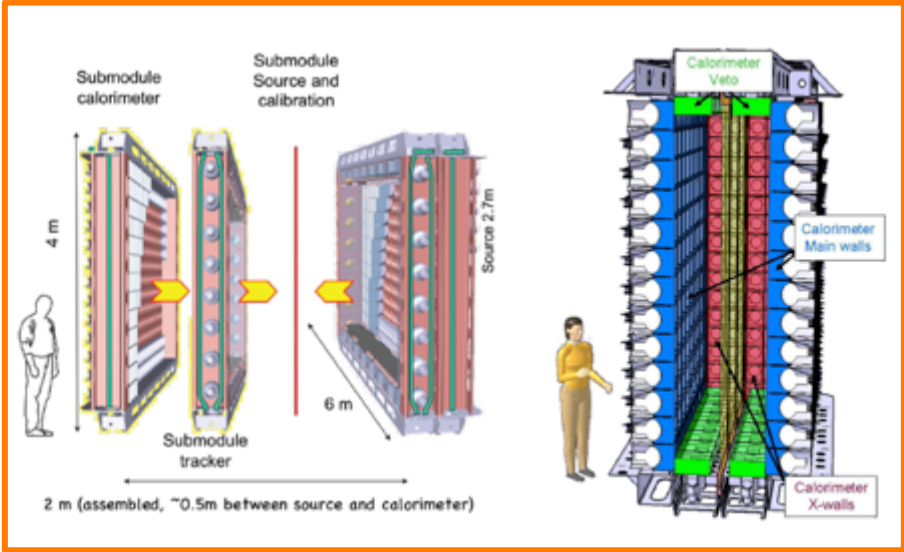
$T_{1/2} = 2.9 \pm 0.3 \cdot 10^{19} \text{ y}$
To be published



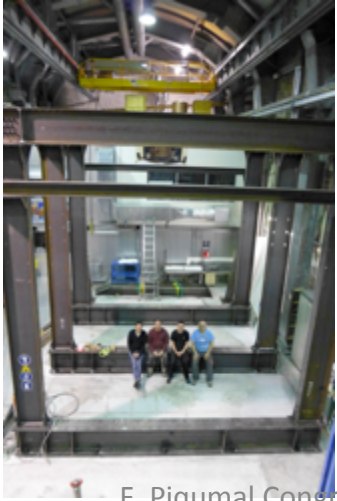
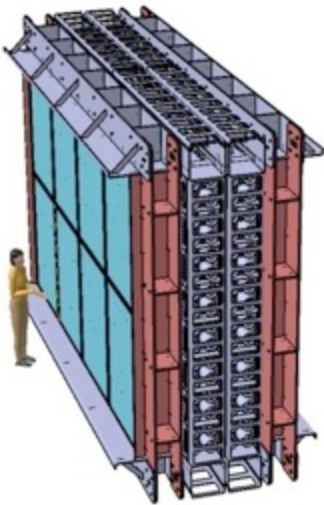
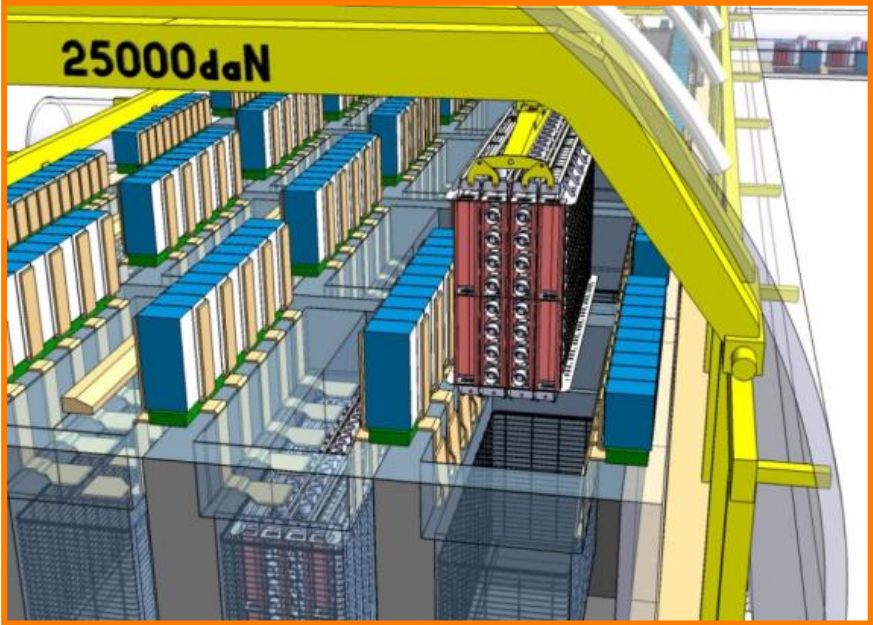
$T_{1/2} = 4.4 \pm 0.6 \cdot 10^{19} \text{ y}$
Systematics under study

Expérience SuperNEMO

A module



20 modules



Intégration au LSM en cours
 Prise de données avec le démonstrateur fin 2016

7 kg de ^{82}Se , 2 ans de données
 Pas de bruit de fond attendu

$\langle m_{\nu} \rangle < 0,2 - 0,4 \text{ eV}$

Derniers résultats

Experiment	isotope	Mass (kg)	Half-life limit in years	Neutrino mass limit in eV
H.M.	^{76}Ge	14	$1.9 \cdot 10^{25}$	0.21 - 0.53
GERDA	^{76}Ge	14	$1.9 \cdot 10^{25}$	0.20 - 0.60
Cuoricino	^{130}Te	12	$2.8 \cdot 10^{24}$	0.26 – 0.75
NEMO3	^{100}Mo	7	$1.0 \cdot 10^{24}$	0.31 – 0.79
EXO-200	^{136}Xe	200	$1.6 \cdot 10^{25}$	0.14 – 0.38
Kamland-Zen	^{136}Xe	400	$2.6 \cdot 10^{25}$	0.14 – 0.26

Futur de la double désintégration bêta

Masse d'isotope

Bruit de fond requis

~ 10 kg 2015
(Xenon 400 kg)

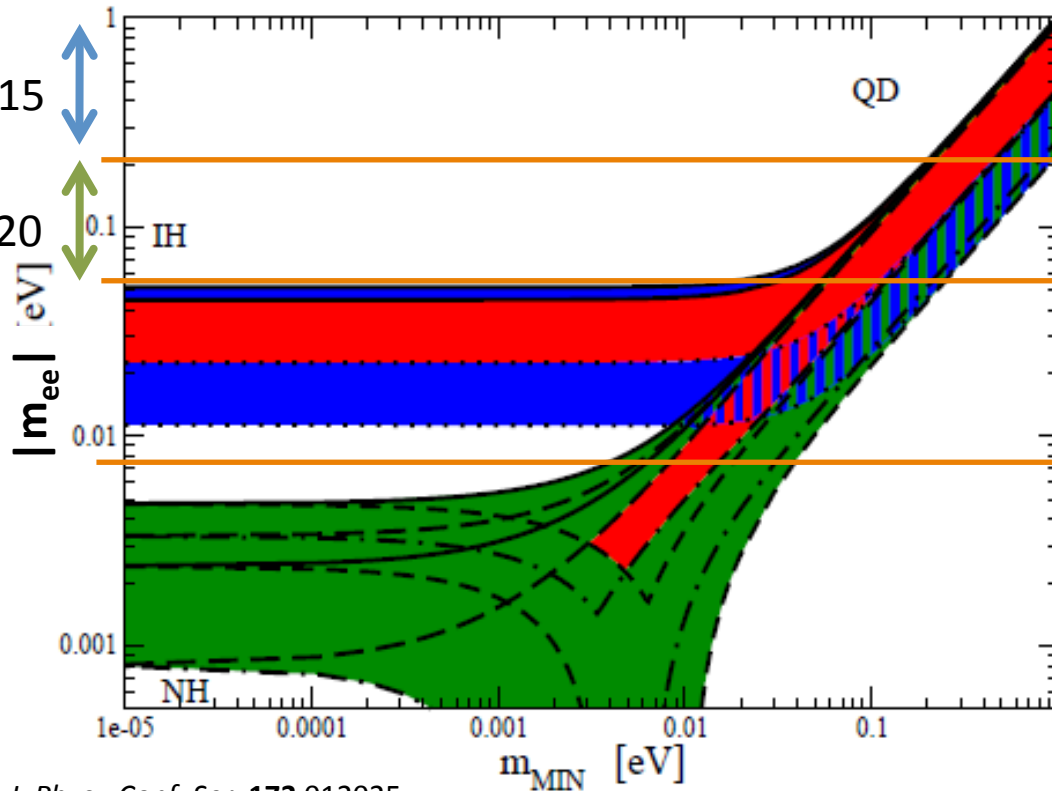
~ 100 kg 2020
(Xenon 1000 kg)

~ 1000 kg

100 – 1000 cts/yr/ton

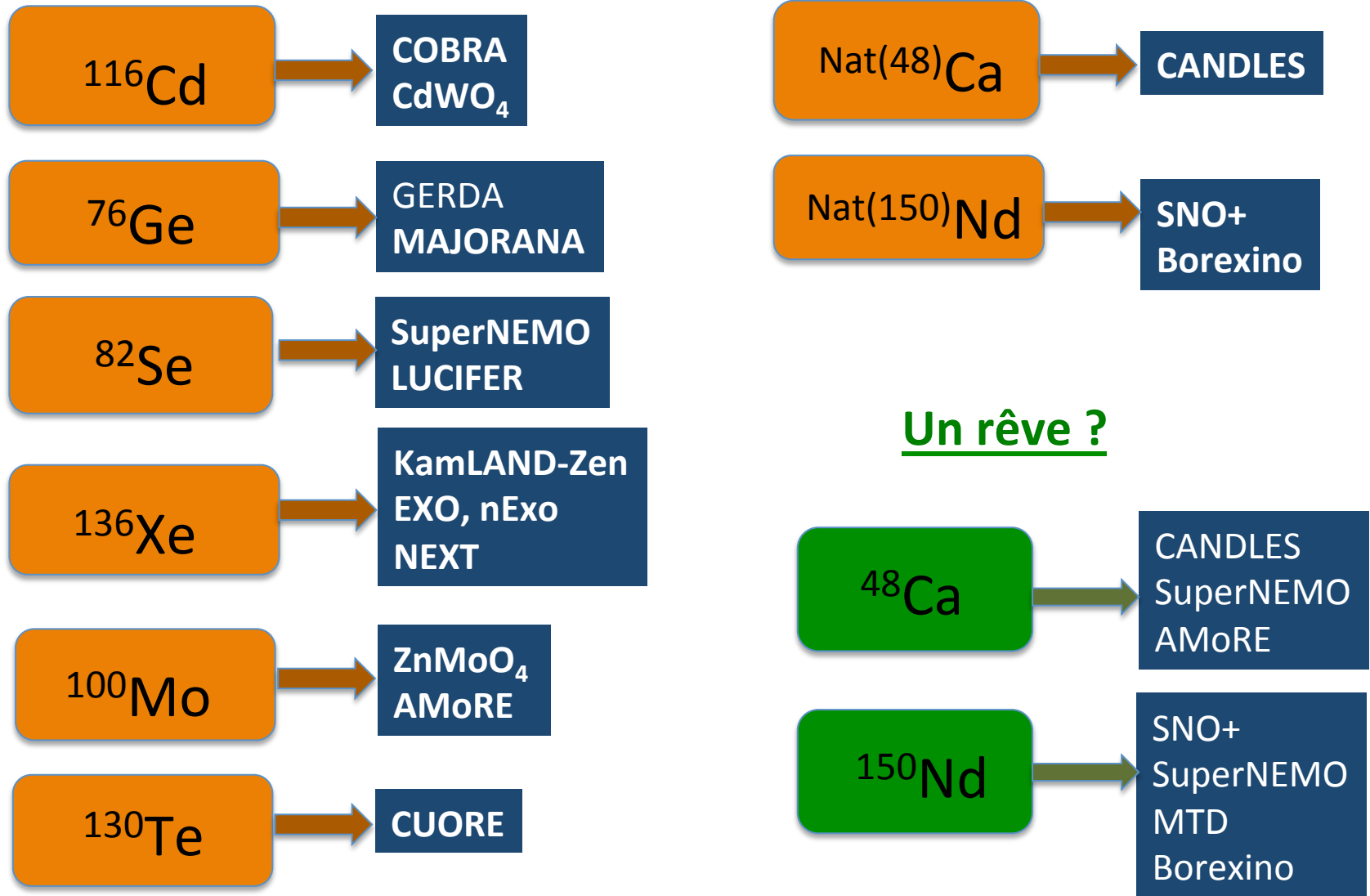
1 – 10 cts/yr/ton

0.1 – 1 cts/yr/ton



S T Petcov 2009 *J. Phys.: Conf. Ser.* **173** 012025

Expériences en cours et projet



Conclusion

La détermination de la nature du neutrino est cruciale pour la physique des particules et la cosmologie

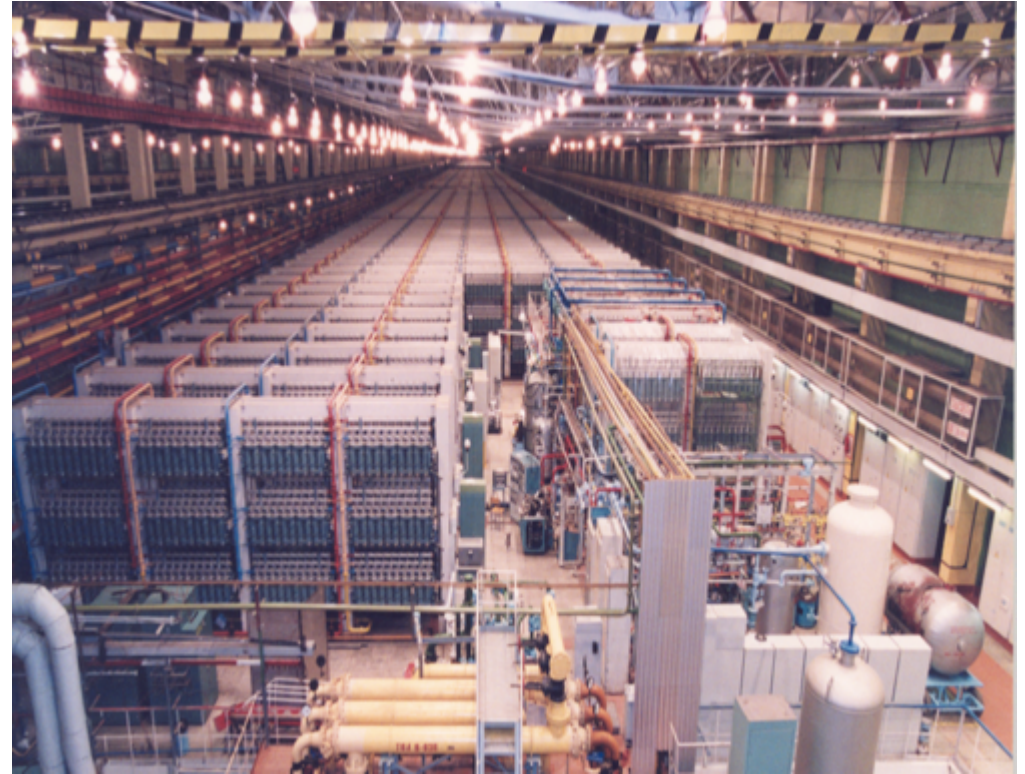
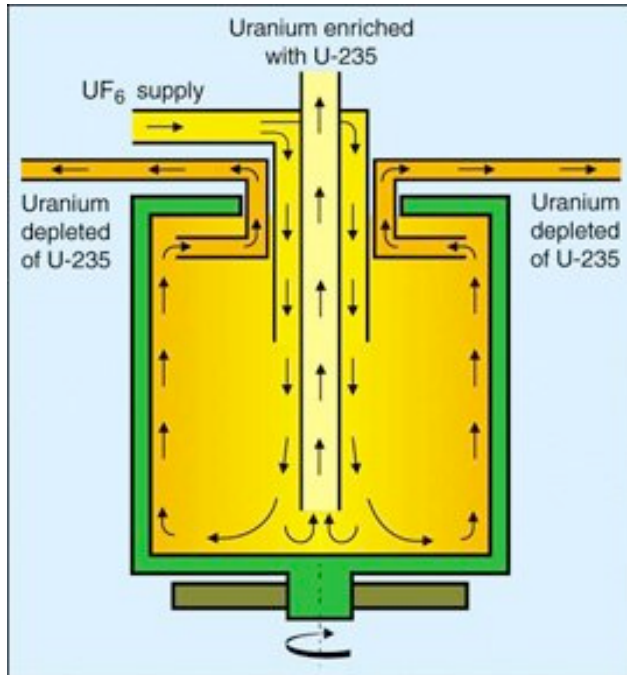
La double désintégration bêta sans émission de neutrino est le mécanisme le plus sensible pour accéder à la nature des neutrinos

Le noyau le plus favorable n'est pas connu. Nécessité d'avoir plusieurs expériences avec différents noyaux pour être capable de valider ou non un signal (17 annonces de découvertes depuis 60 ans) mais aussi pour identifier le processus en cas d'existence de la décroissance $\beta\beta(0\nu)$.

Nombreux développements en cours pour tenter de couvrir la hiérarchie inverse dans les 10 prochaines années.

La réelle possibilité d'enrichir le ^{150}Nd par centrifugation en Russie pourrait permettre une percée expérimentale

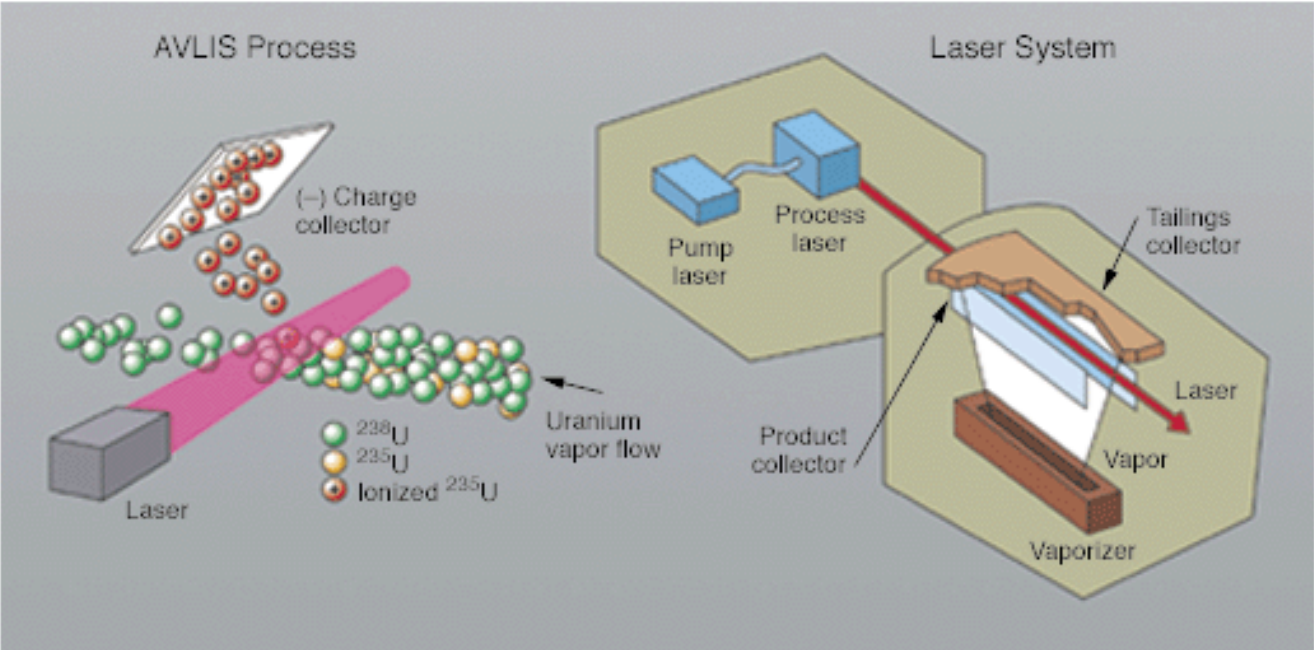
Enrichissement isotopique



**ECP (Electro-Chemical Plant, Svetlana)
Zelenogorsk (Siberia)**

Enrichment mainly made by centrifugation: need gaseous form for the isotope
 ^{136}Xe , ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{76}Ge , ...

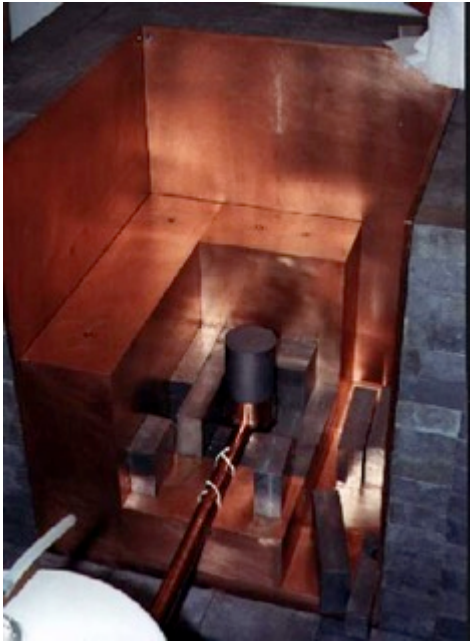
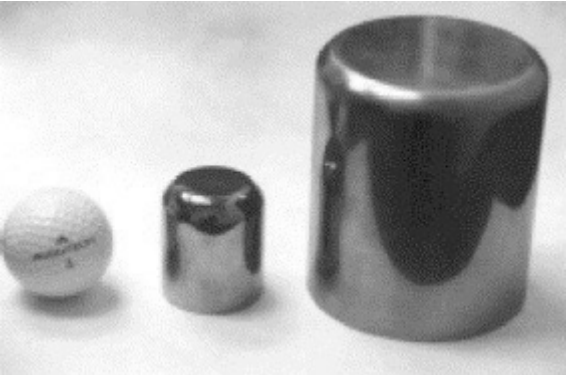
Isotopic enrichment



Enrichment ^{48}Ca , ^{150}Nd , ^{96}Zr possible in principle



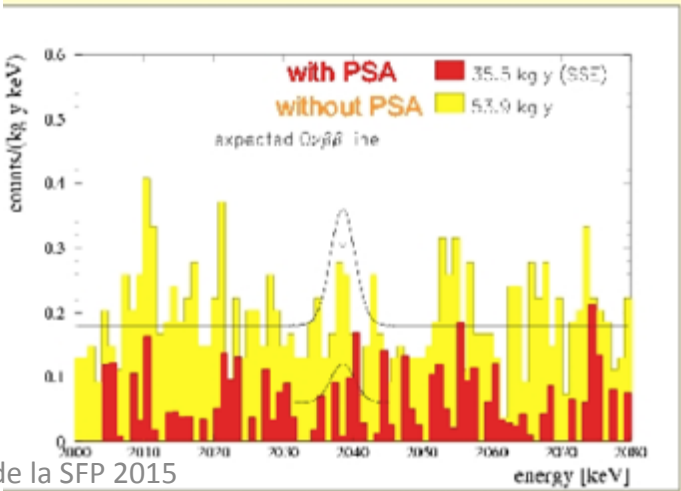
Ge experiment: Heidelberg Moscow



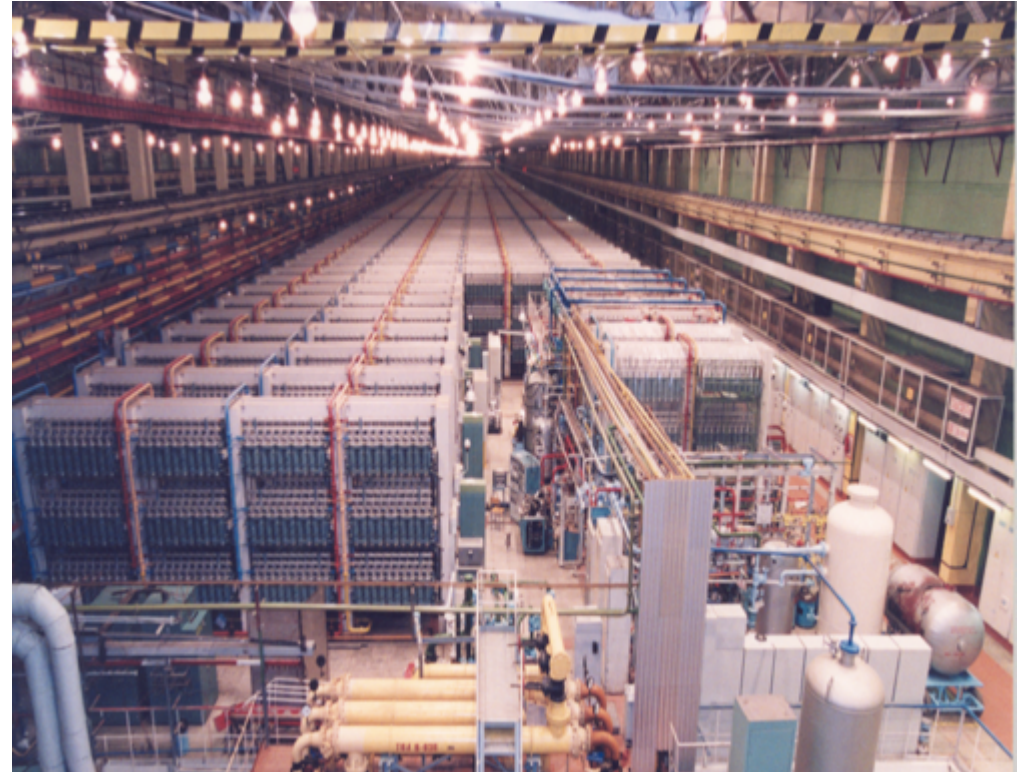
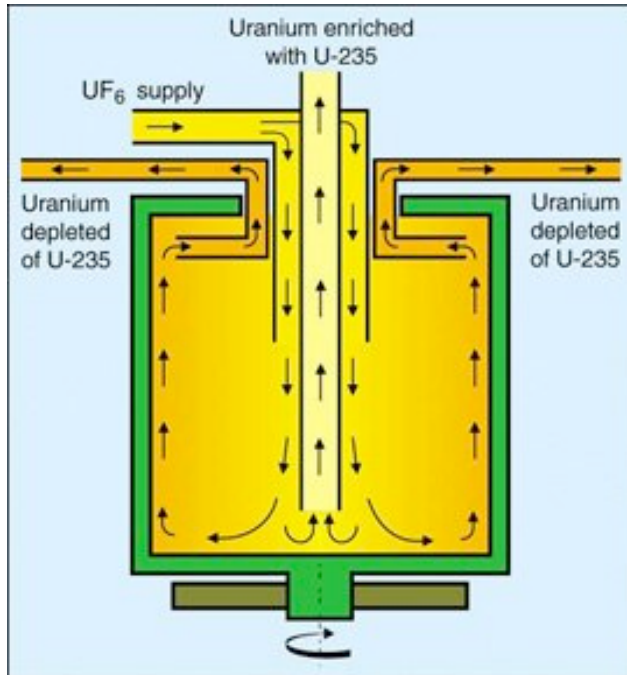
Ge detector works as semi-conductor at the liquid nitrogen temperature (-172°C)

Very good energy resolution

$T_{1/2} > 1.9 \cdot 10^{25} \text{ yr}$ $\langle m_{\nu} \rangle < 0.2 - 0.5 \text{ eV}$



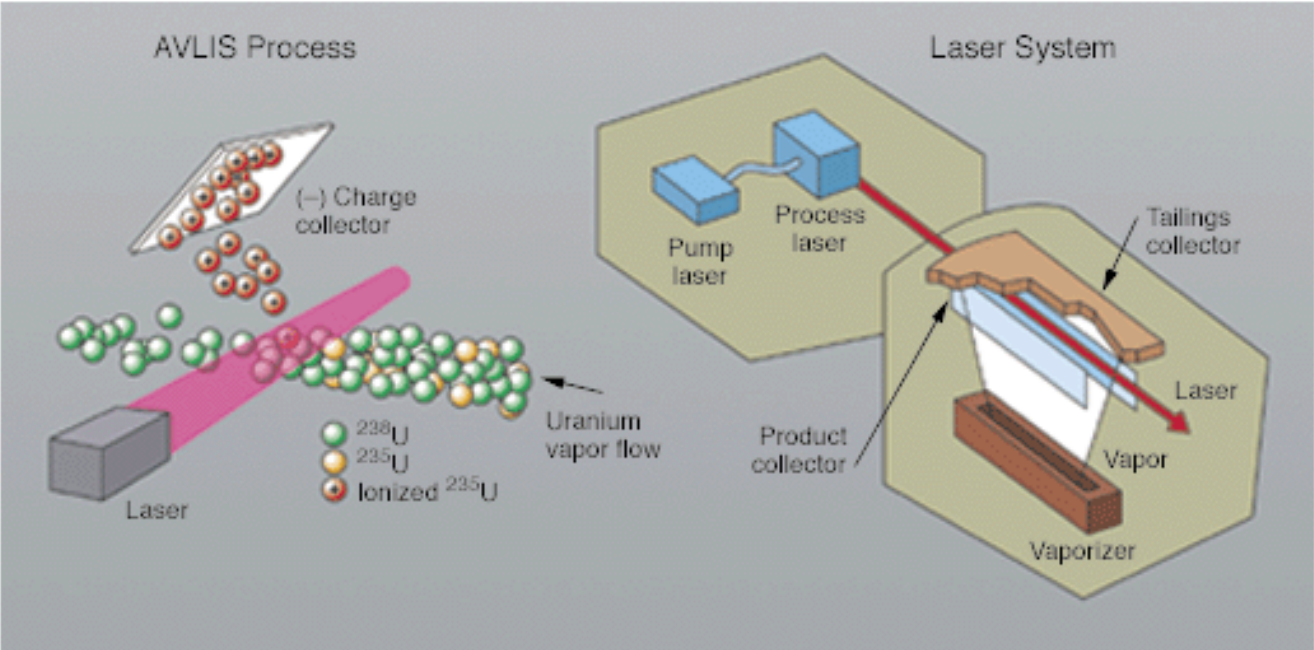
Isotopic enrichment



**ECP (Electro-Chemical Plant, Svetlana)
Zelenogorsk (Siberia)**

Enrichment mainly made by centrifugation: need gaseous form for the isotope
 ^{136}Xe , ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{76}Ge , ...

Isotopic enrichment



Enrichment ^{48}Ca , ^{150}Nd , ^{96}Zr possible in principle

