

Interface avec la physique du neutrino

F. Piquemal

Laboratoire Souterrain de Modane

et

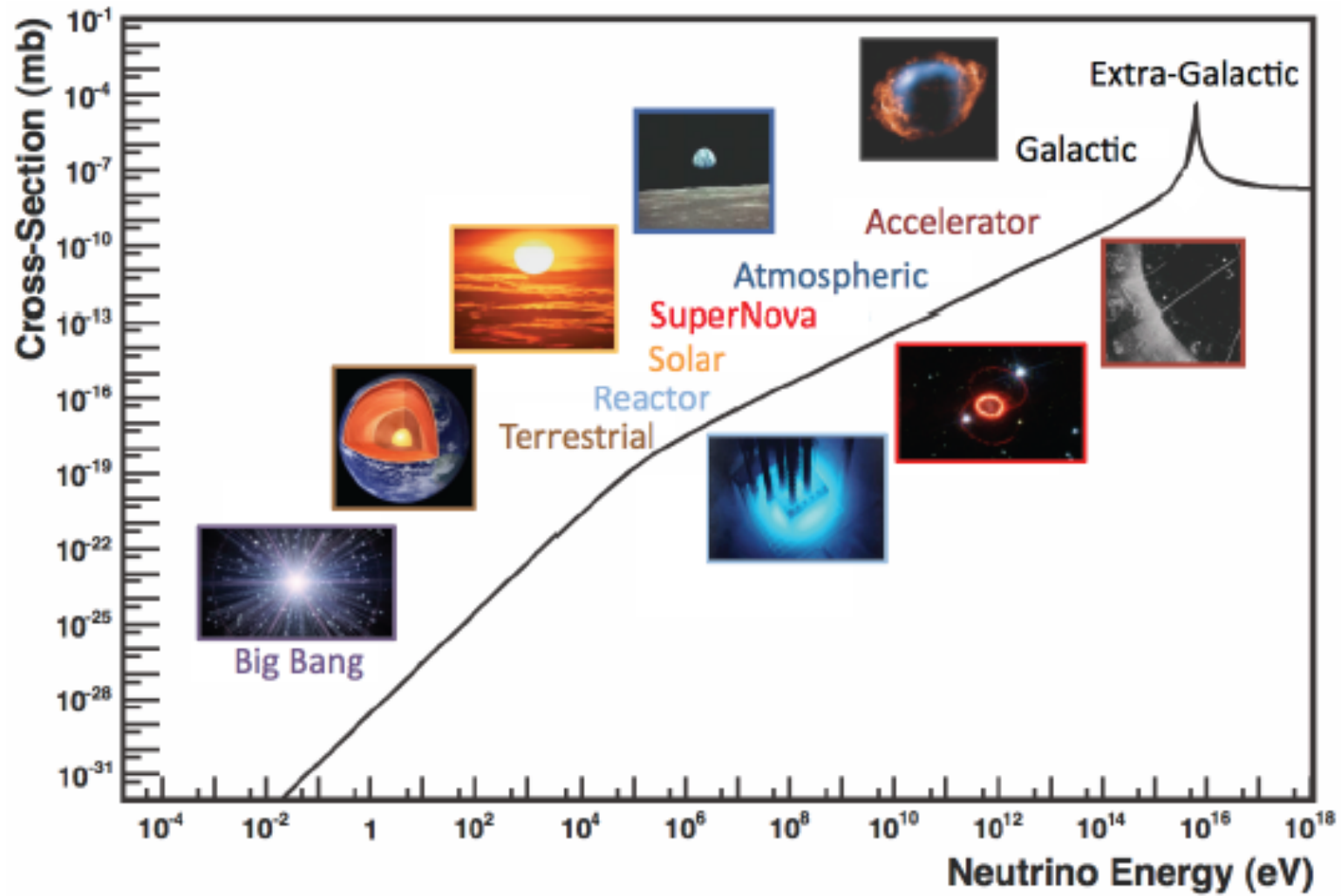
Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan

Journées SFP-BTPN sur « les grandes questions en physique nucléaire fondamentale »

CNRS Campus Gérard Megie

21 juin 2016

Sources de neutrinos



Oscillations de neutrino

Pontecorvo – Maki – Nakagawa - Sakata (PMNS) matrix

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

3 mixing angles + 1 CPV phase

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \sin^2(2\Theta)\sin^2(1.27 \times \Delta m^2 \times L/E_\nu)$$

$$\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2| \text{ [eV}^2\text{]}$$

$$L = \text{Distance to Source [m]}$$

$$E_\nu = \text{Neutrino Energy [MeV]}$$

Oscillations de neutrino et masse du neutrino

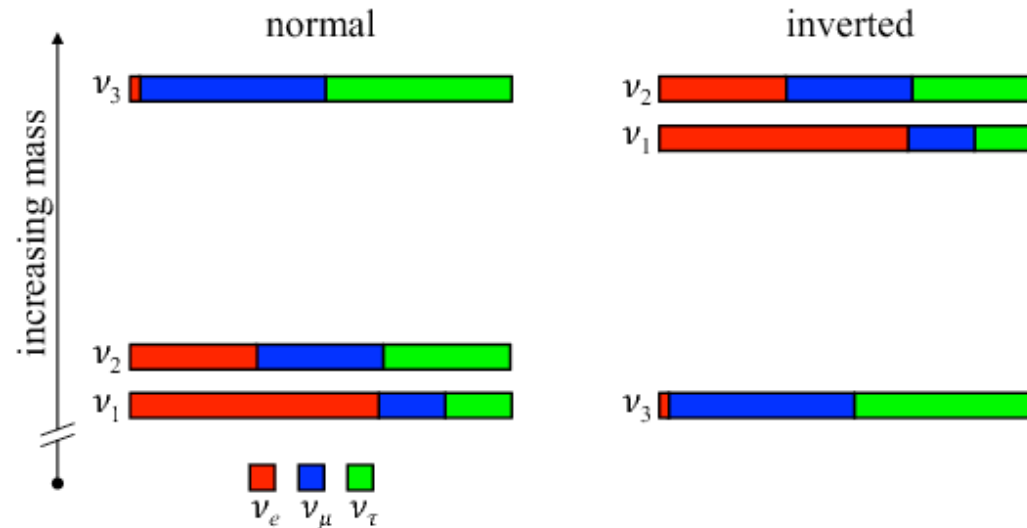
$$\mathbf{U} = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Solar}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & & s_{13} \cdot e^{i\delta} \\ & 1 & \\ -s_{13} \cdot e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{Atmospheric Reactor}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{Atmospheric } \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & & \\ & e^{i\alpha} & \\ & & e^{i\beta} \end{pmatrix}}_{\text{Majorana Phases } 0\nu\beta\beta}$$

$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$

	parameter	best fit $\pm 1\sigma$
Neutrinos solaires et réacteurs	$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	$7.60_{-0.18}^{+0.19}$
Neutrinos atmosphériques et accélérateurs	$ \Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2] \text{ (NH)}$	$2.48_{-0.07}^{+0.05}$
Neutrinos solaires et réacteurs	$\theta_{12}/^\circ$	34.6 ± 1.0
Neutrinos atmosphériques et accélérateurs	$\theta_{23}/^\circ$	$48.9_{-7.4}^{+1.9}$
Neutrinos réacteurs, accélérateurs	$\theta_{13}/^\circ$	8.8 ± 0.4

Masse des neutrinos

Hiérarchie de masse ?



Masse absolue

Décroissance bêta

$$m_{\nu_e} < 2.3 \text{ eV}$$

Double décroissance bêta

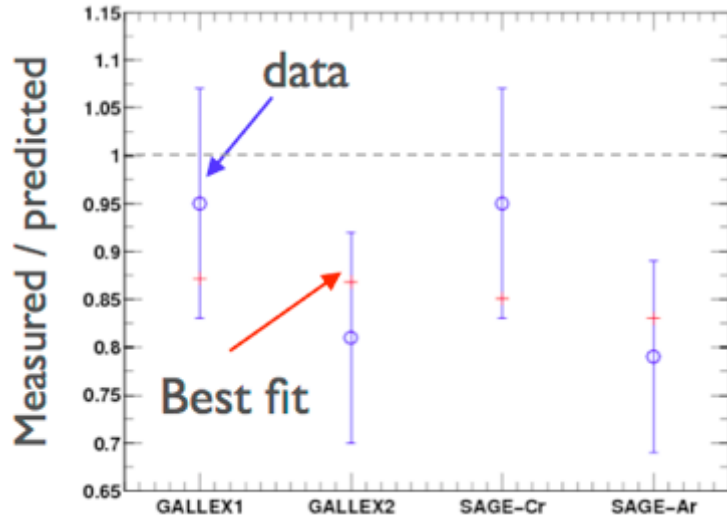
$$\langle m_\nu \rangle < 0.15 - 0.5 \text{ eV}$$

Cosmologie

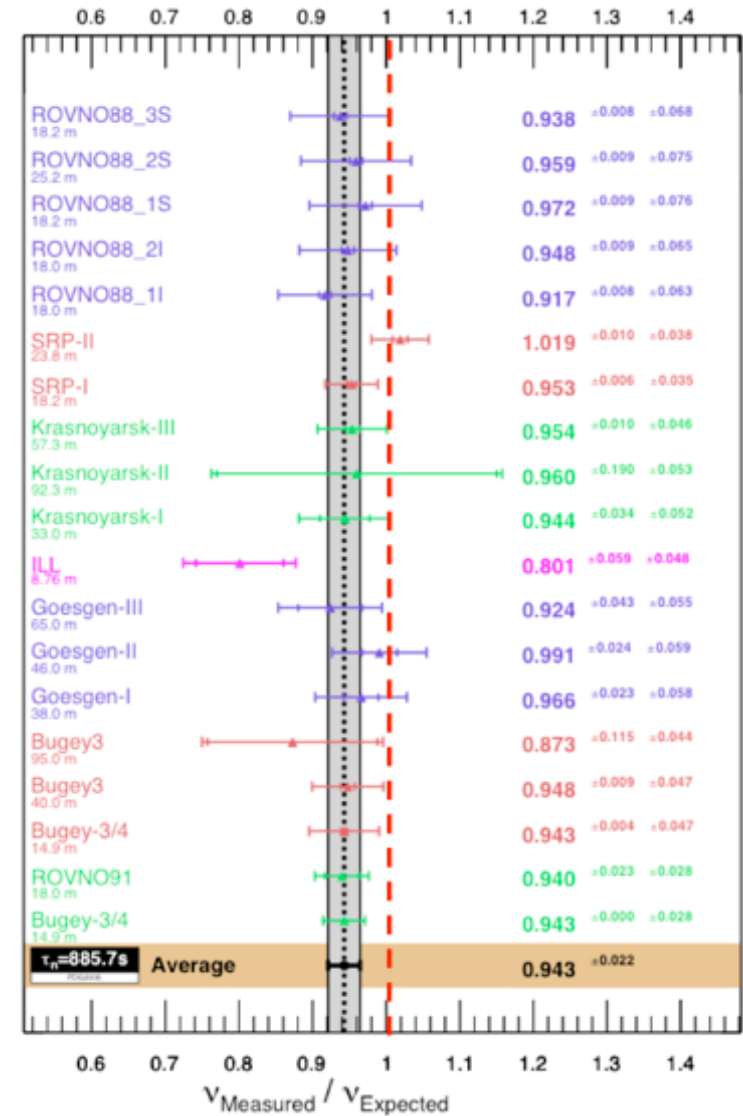
$$\Sigma m_i < 0.23 \text{ eV (Planck)}$$

Des anomalies expérimentales

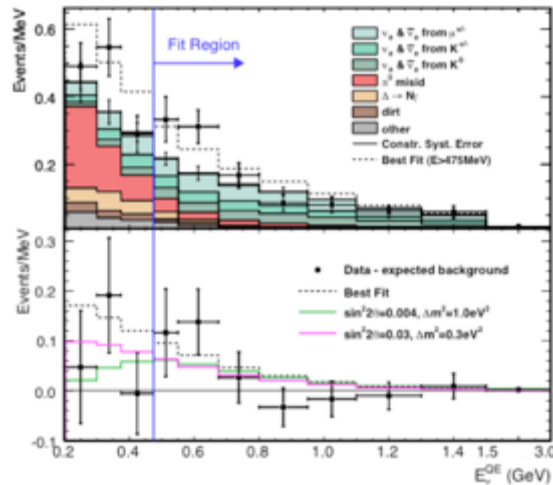
Mesure avec source de neutrinos de basse énergie



Mesure neutrinos de réacteurs



Neutrinos accélérateurs LSND/MiniBoone



MiniBoone

Les questions actuelles en physique du neutrino

- Nature du neutrino. Neutrino= anti-neutrino ?
- Masse absolue du neutrino ?
- Echelle de masse ?
- Violation de CP dans le secteur leptonique ?
- Existence de neutrino stériles ?
- Moment magnétique ?
- Neutrino de supernovae
-

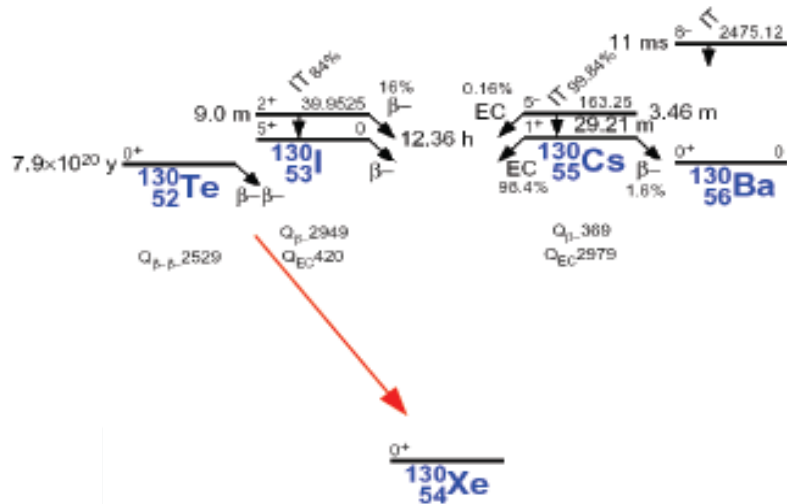
Les questions actuelles en physique du neutrino

- Nature du neutrino. Neutrino= anti-neutrino ? $\beta\beta(0\nu)$
- Masse absolue du neutrino ? $\beta\beta(0\nu)$, Décroissance β , Cosmologie
- Echelle de masse ? $\beta\beta(0\nu)$, accélérateurs, atmosphériques, réacteurs
- Violation de CP dans le secteur leptonique ? accélérateurs, atmosphériques
- Existence de neutrino stériles ? Réacteurs, accélérateurs
- Moment magnétique ? Réacteurs
- Neutrino de supernovae
-

Flux de réacteurs, décroissances nucléaires, Interaction neutrino avec la matière,.....

→ Besoin de la physique nucléaire

Nature du neutrino: Double désintégration bêta

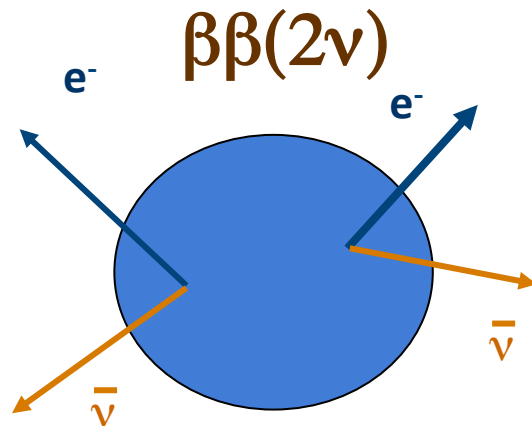


Bêta simple interdite énergétiquement

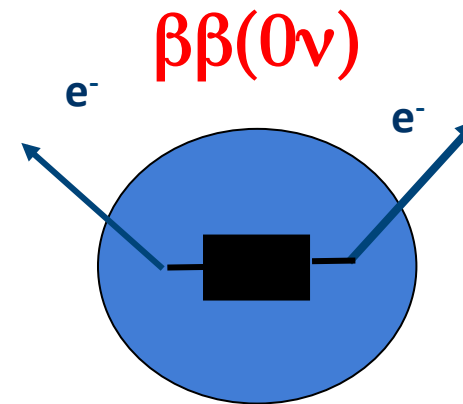
Ou

fortement supprimée à cause du moment angulaire

Décroissance sur état fondamental ou excité



Processus du 2nd ordre de l'interaction électro-faible
Déjà mesuré sur une dizaine de noyaux



$$\Delta L = 2$$

$\beta\beta(0\nu) \rightarrow$ Majorana neutrino ($\nu = \bar{\nu}$)

Double désintégration bêta



Discovery implies $\Delta L=2$ and Majorana neutrino

Process:

Light neutrino exchange

(V+A) current

Majoron emission

SUSY

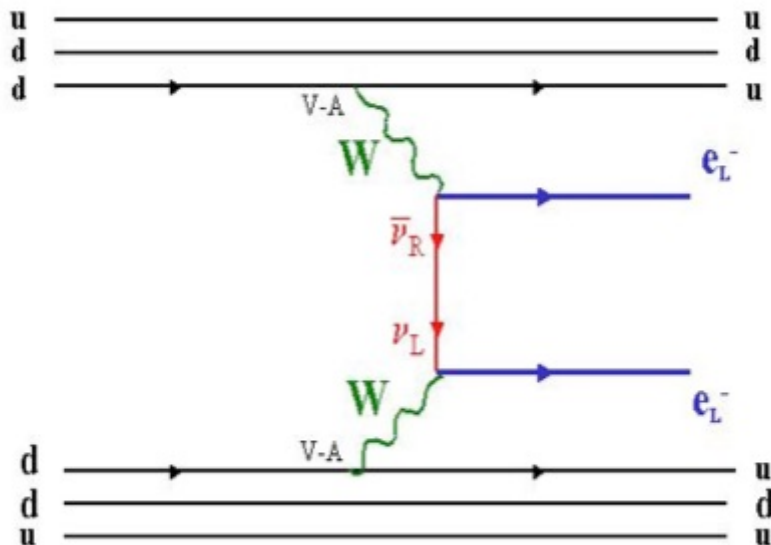
parameters

$\langle m_\nu \rangle$

$\langle m_\nu \rangle, \langle \lambda \rangle, \langle \eta \rangle$

$\langle g_M \rangle$

$\lambda'_{111}, \lambda'_{113}, \lambda'_{131}, \dots$



Phase space factor

Nuclear matrix element

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

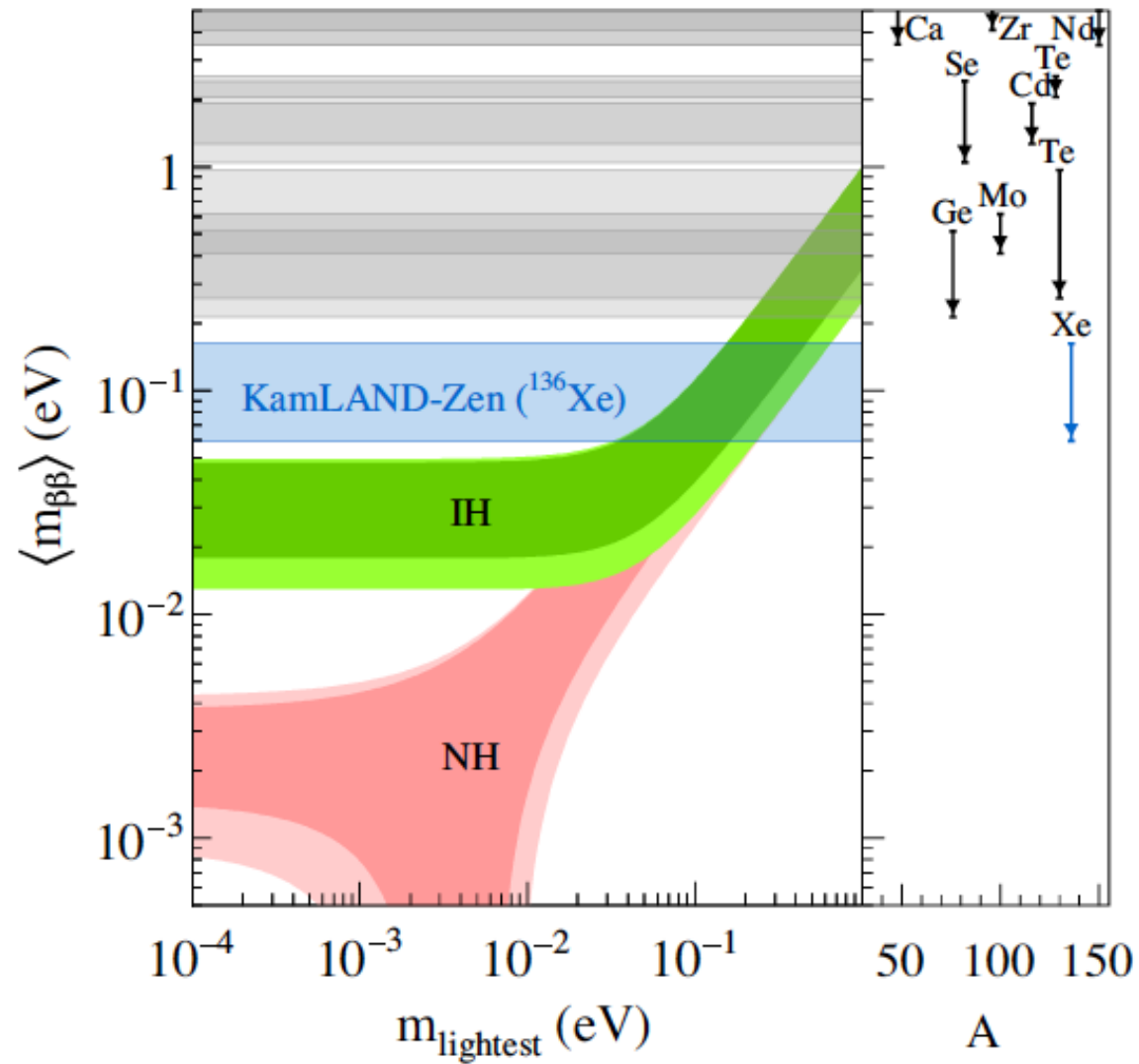
Effective mass:

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

$|U_{ei}|$: mixing matrix element

α_1 et α_2 : Majorana phase

Sensibilité sur la masse effective



L'espace de phase

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \left(\frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e}\right)^2$$

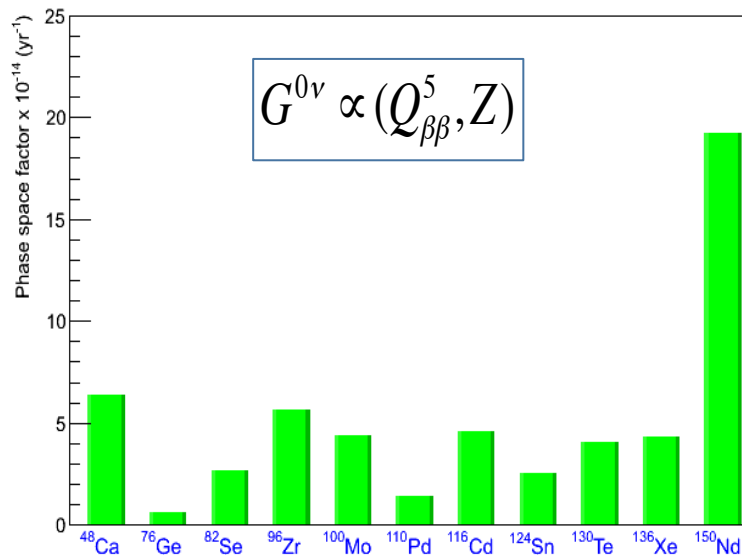


Table 1: PSF for $\beta\text{-}\beta\text{-}$ decays to final g.s.

Nucleus	$Q_{g.s.}^{\beta\text{-}\beta\text{-}}$ (MeV)	$G_{2\nu}^{\beta\text{-}\beta\text{-}}$ (g.s.) (10^{-21} yr^{-1})				$G_{0\nu}^{\beta\text{-}\beta\text{-}}$ (g.s.) (10^{-15} yr^{-1})			
		This work	[27]	[23, 24]	[26]	This work	[27]	[23, 24]	[26]
⁴⁸ Ca	4.267	15536	15550	16200	16200	24.65	24.81	26.1	26.0
⁷⁶ Ge	2.039	46.47	48.17	53.8	52.6	2.372	2.363	2.62	2.55
⁸² Se	2.996	1573	1596	1830	1740	10.14	10.16	11.4	11.1
⁹⁶ Zr	3.349	6744	6816		7280	20.48	20.58		23.1
¹⁰⁰ Mo	3.034	3231	3308	3860	3600	15.84	15.92	18.7	45.6
¹¹⁰ Pd	2.017	132.5	137.7			4.915	4.815		
¹¹⁶ Cd	2.813	2688	2764		2990	16.62	16.70		18.9
¹²⁸ Te	0.8665	0.2149	0.2688	0.35	0.344	0.5783	0.5878	0.748	0.671
¹³⁰ Te	2.528	1442	1529	1970	1940	14.24	14.22	19.4	16.7
¹³⁶ Xe	2.458	1332	1433	2030	1980	14.54	14.58	19.4	17.7
¹⁵⁰ Nd	3.371	35397	36430	48700	48500	61.94	63.03	85.9	78.4
²³⁸ U	1.144	98.51	14.57			32.53	33.61		

[23] M. Doi, T. Kotani and E. Takasugi, Prog. Theor. Phys. Suppl. **83**, 1 (1985).

[24] M. Doi and T. Kotani, Prog. Theor. Phys. **87**, 1207 (1992); *ibidem* **89**, 139 (1993).

[26] J. Suhonen and O. Civitarese, Phys. Rep. **300**, 123 (1998).

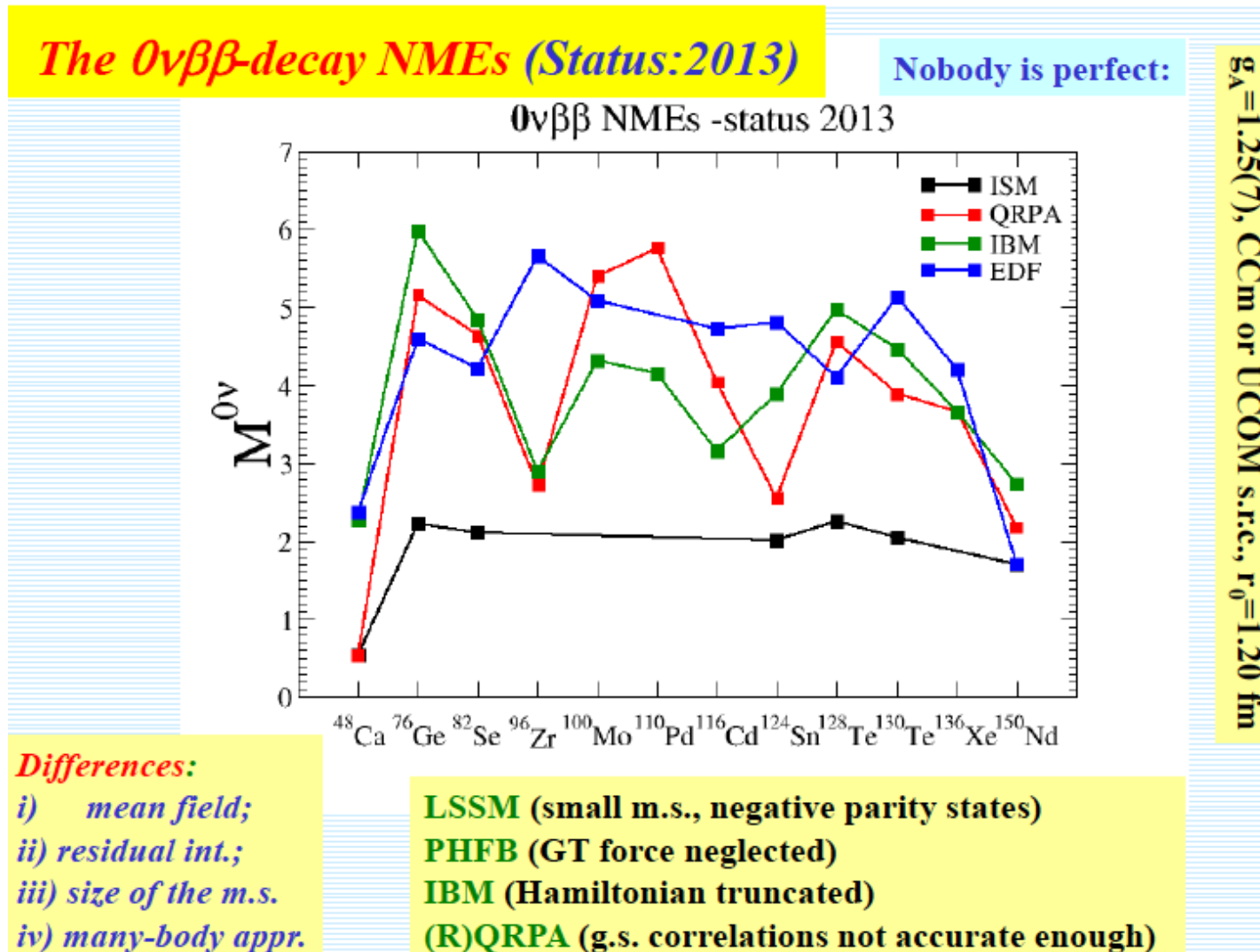
[27] J. Kotila and F. Iachello, Phys. Rev. C **85**, 034316 (2012).

Observations

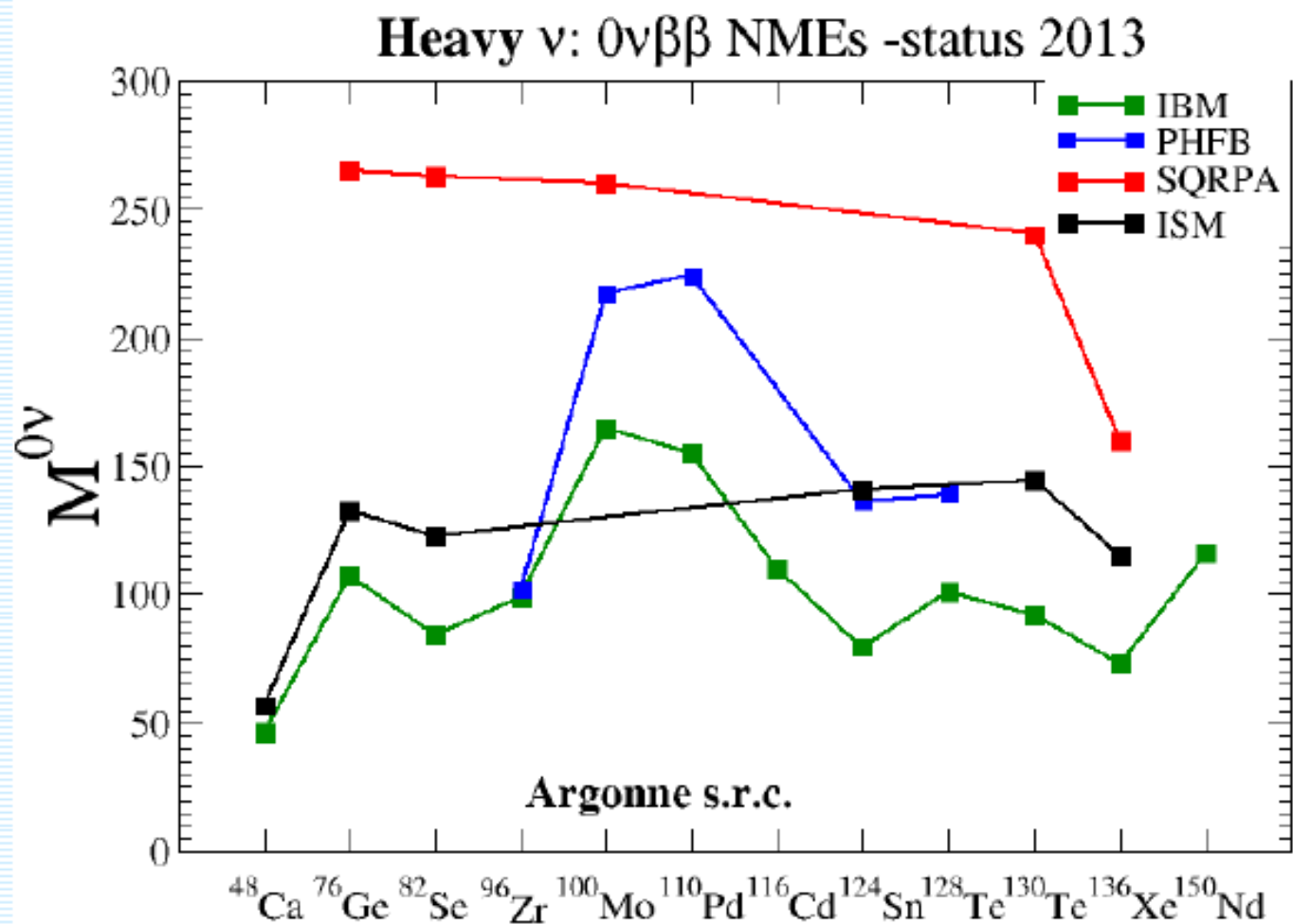
- very good agreement with [27] both for $G_{2\nu}$ and $G_{0\nu}$ for the majority of nuclei
- exceptions: ¹²⁸Te (~20%) and ²³⁸U (factor of 7)
- in comparison with older calculations there are several notable differences

Elements de matrice nucléaire: échange de neutrinos légers

Eléments de matrice pour chaque processus, état fondamental et états excités



Elements de matrice nucléaire: échange de neutrinos lourds



PHFB: K. Rath et al., PRC 85 (2012) 014308

IBM: Barea, Kotila, Iachello, PRC (2013) 014315

Fedor Siml

SQRPA: Vergados, Ejiri, F. Š., RPP 75 (2012) 106301

ISM: Menendez, private communications

Listes des raisons de désaccords entre modèles QRPA

List of reasons, why RPA-like $0\nu\beta\beta$ -decay NME might be different

Quasiparticle mean field:
pp,nn pairing (pn pairing)

Two-nucleon s.r.c. (~50%):
Jastrow function

Many-body approximations:
QRPA, RQRPA, SRQRPA

Finite size of the nucleon:
form-factors, 10% effect

NN-force
schematic, realistic (Bonn, ...)

Higher order terms of n.c.:
induced PS, weak magnetism

The size of the model space

The closure approximation

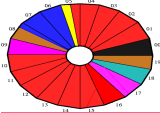
p-h interaction ($g_{ph}\sim 1$):
fixed to GT resonance

The overlap factor:
(BCS overlap?)

p-p interaction (g_{pp}):
 $g_{pp}=1$, fixed to β -decay,
fixed to $\beta\beta$ -decay

The axial-vector coupling:
 $g_A=1.0$ or $g_A=1.25$

Nuclear shape:
spherical, not deformed yet



NEMO3



Tracking detector: drift chambers (6180 Geiger cells)
 $\sigma_t = 5 \text{ mm}$, $\sigma_z = 1 \text{ cm}$ (vertex)

Calorimeter (1940 plastic scintillators and PMTs)
Energy Resolution FWHM=8 % (3 MeV)

Identification e^- , e^+ , γ , α
Very high efficiency for background rejection

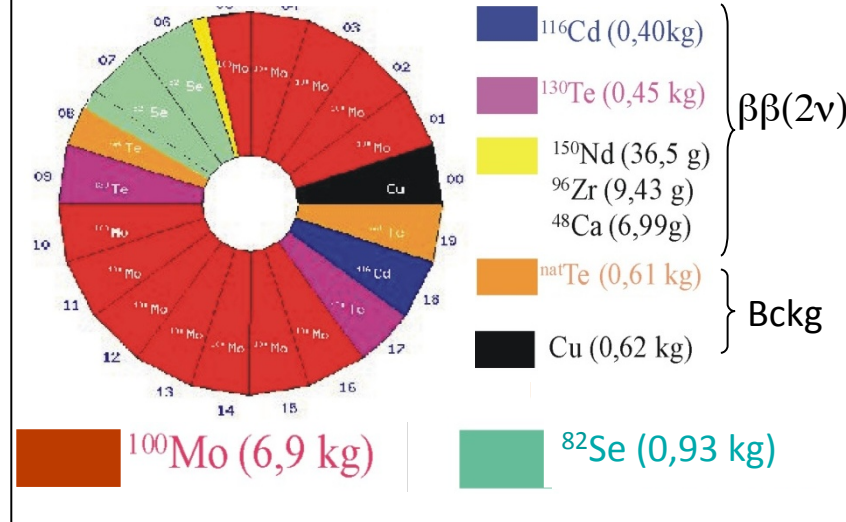
Background level @ $Q_{\beta\beta}$ [2.8 – 3.2 MeV] : $1.2 \cdot 10^{-3}$ cts/keV/y

Running at Modane underground laboratory (2003 - 2011)



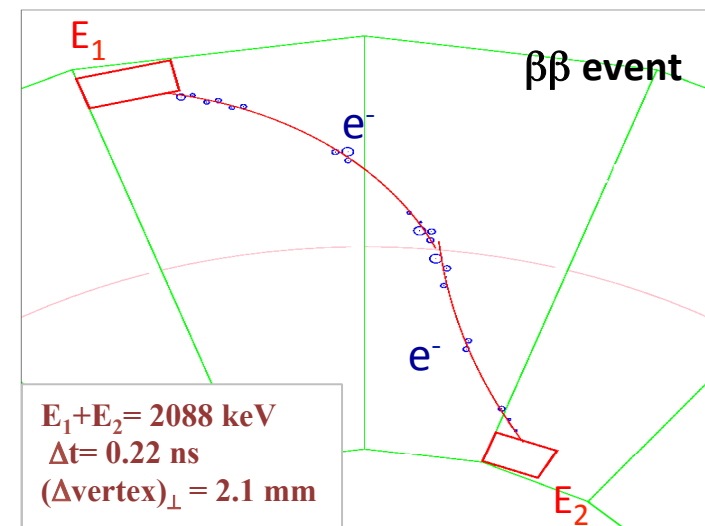
Multi-source detector

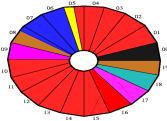
$\beta\beta$ sources (thickness $\sim 60 \text{ mg/cm}^2$)



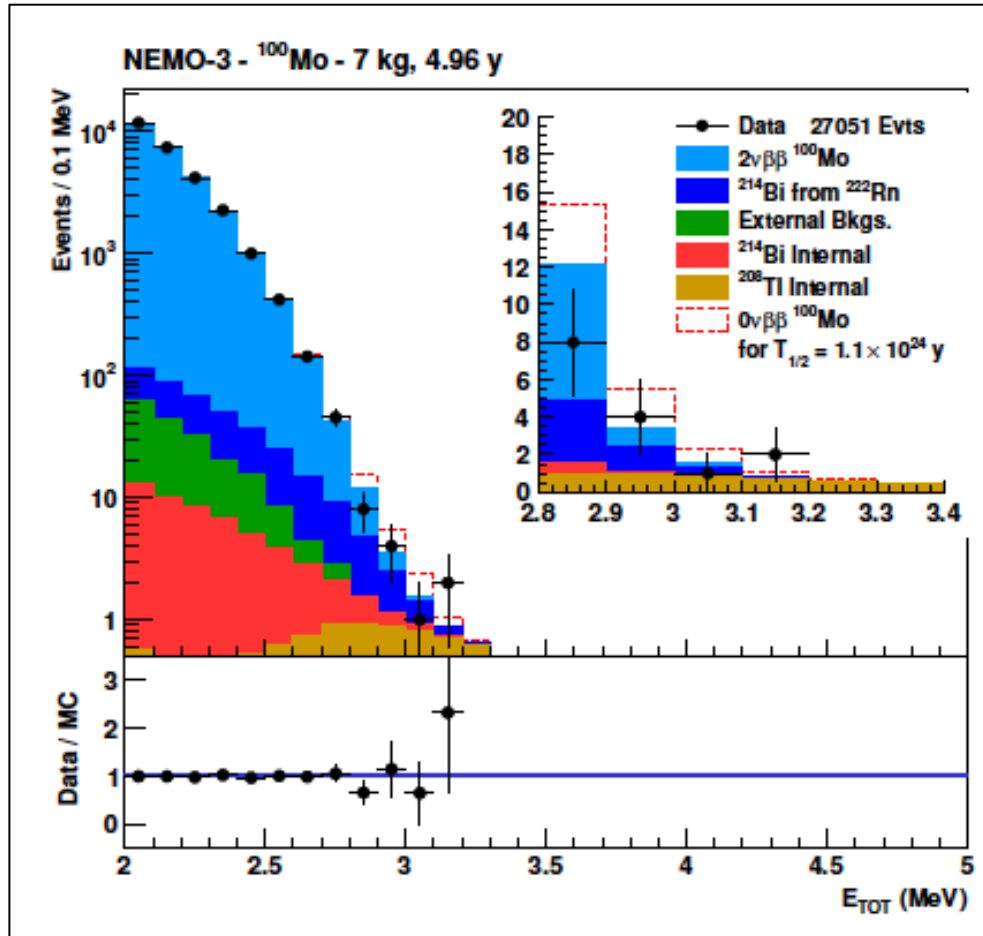
Unique feature

Measurement of all kinematic parameters:
 individual energies and angular distribution





NEMO3 Results



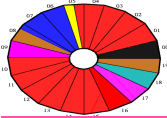
Background contributions

Data sets	Phase 1	Phase 2	Combined
External background	< 0.04	< 0.16	< 0.2
^{214}Bi from ^{222}Rn	2.8 ± 0.3	2.5 ± 0.2	5.2 ± 0.5
^{214}Bi internal	0.20 ± 0.02	0.80 ± 0.08	1.0 ± 0.1
^{208}Tl internal	0.65 ± 0.05	2.7 ± 0.2	3.3 ± 0.3
$2\nu\beta\beta$	1.28 ± 0.02	7.16 ± 0.05	8.45 ± 0.05
Total expected	4.9 ± 0.3	13.1 ± 0.3	18.0 ± 0.6
Data	3	12	15

Background : $3 \cdot 10^{-2}$ evt/y/mole/FWHM

No background beyond 3.2 MeV

Main background components : $\beta\beta(2\nu)$ and radon



NEMO3 Results

7 Isotopes measured at the same time
 $\beta\beta(2\nu)$ periods measured with high accuracy
and limits on $\beta\beta(0\nu)$ half-life decay

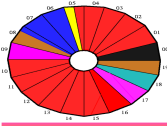
The NEMO 3 $\beta\beta$ factory: a tool for precision tests

Isotope	$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta}$ (y)
^{100}Mo	$[7.11 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.54(\text{syst})] \times 10^{18}$ * (SSD favored)
$^{100}\text{Mo}(0_1^+)$	$[5.7_{-0.9}^{+1.3}(\text{stat}) \pm 0.8(\text{syst})] \times 10^{20}$ **
^{82}Se	$[9.6 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 1.0(\text{syst})] \times 10^{19}$ *
^{116}Cd	$[2.8 \pm 0.1(\text{stat}) \pm 0.3(\text{syst})] \times 10^{19}$ **
^{130}Te	$[6.9 \pm 0.9(\text{stat}) \pm 1.0(\text{syst})] \times 10^{20}$ ***
^{150}Nd	$[9.20_{-0.22}^{+0.25}(\text{stat}) \pm 0.73(\text{syst})] \times 10^{18}$ ***
^{96}Zr	$[2.35 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.19(\text{syst})] \times 10^{19}$ ***
^{48}Ca	$[4.4_{-0.4}^{+0.5}(\text{stat}) \pm 0.4(\text{syst})] \times 10^{19}$ ***

* Phase 1 (high radon data), Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 182302
(additional statistics are being analysed, to be published soon)

** Phase 1 data

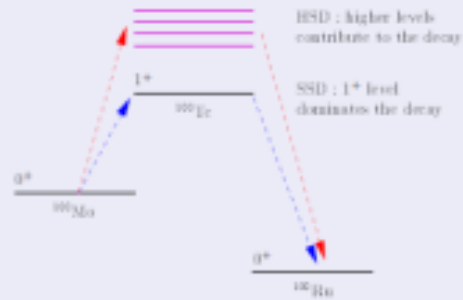
*** Phases 1 and 2, preliminary



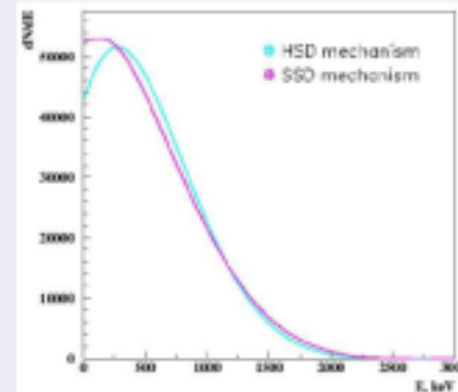
NEMO3 : HSD vs SSD

$2\nu\beta\beta$ electron energy distribution: a probe for HSD versus SSD

HSD : Higher States Dominance
SSD : Single State Dominance



Abad et al., Ann. Fis. A 80, 9 (1984)

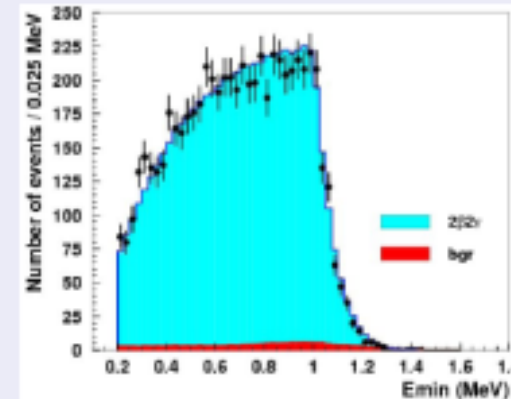
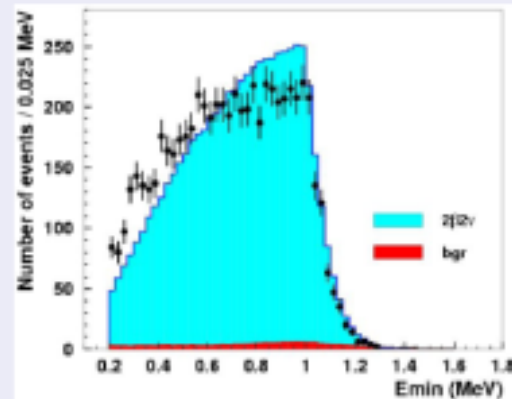


Simkovic, J. Phys. G 27, 2233 (2001)

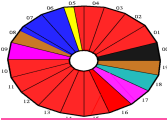
^{100}Mo $2\nu\beta\beta$ energy distribution in favor of SSD versus HSD

HSD : $\chi^2/\text{ndf} = 254/42$

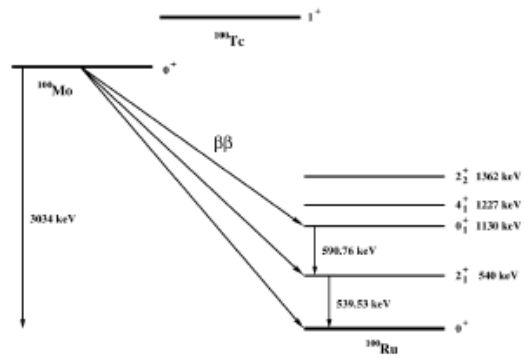
SSD : $\chi^2/\text{ndf} = 42.3/42$



• data (5.01 kg.y, $E_1 + E_2 > 2$ MeV), ■ background MC, ■ $2\nu\beta\beta$ MC



NEMO3 : ^{100}Mo decay to excited states



$2\nu 2\beta$ to excited states of ^{100}Mo :

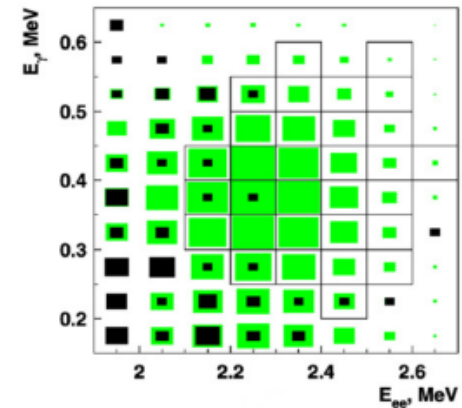
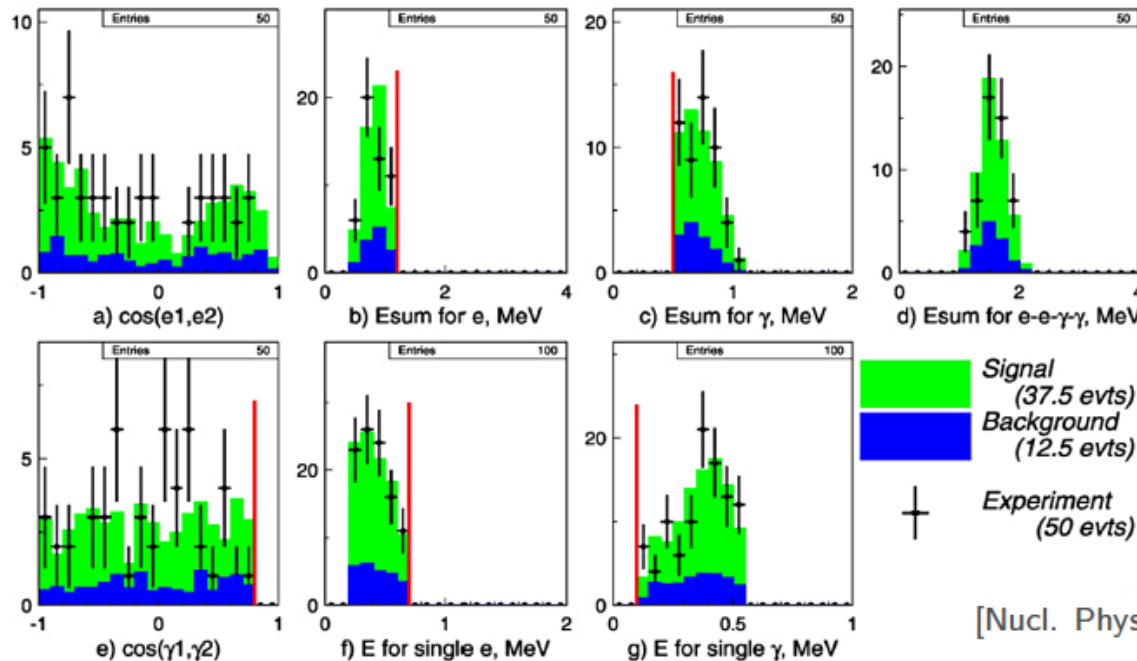
$$\mathcal{T}_{1/2}^{2\nu}(0^+ \rightarrow 0_1^+) = 5.7^{+1.3}_{-0.9} \text{ (stat)} \pm 0.8 \text{ (stat)} 10^{20} \text{ y}$$

$$\mathcal{T}_{1/2}^{2\nu}(0^+ \rightarrow 2_1^+) > 1.1 10^{21} \text{ y @ 90 \% CL}$$

$0\nu 2\beta$ to excited states of ^{100}Mo :

$$\mathcal{T}_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 0_1^+) > 8.9 10^{22} \text{ y @ 90 \% CL}$$

$$\mathcal{T}_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 2_1^+) > 1.6 10^{23} \text{ y @ 90 \% CL}$$



[Nucl. Phys. A 781 (2007) 209-226]

► Other results coming soon on ^{150}Nd and ^{96}Zr

Importance la théorie pour la $\beta\beta(0\nu)$

Choix du meilleur noyaux impossible aujourd'hui à partir des prédictions théoriques

Un grand enjeu pour le $\beta\beta(0\nu)$.

Enrichissement de centaines de kg d'isotopes voir de tonnes dans le futur.

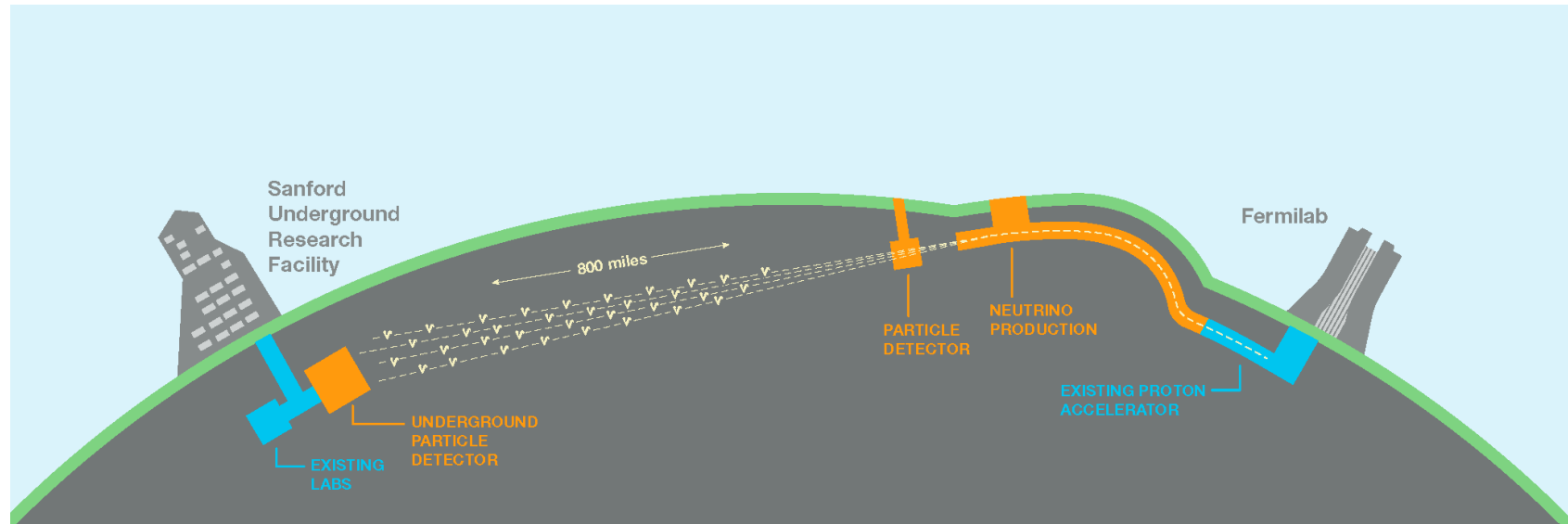
Bruit de fond lié à l'isotope et à la technique de détection

Elements de matrice pour les différents processus ?

Espace de phase ?

Lien entre durée de vie $\beta\beta(2\nu)$ et $\beta\beta(0\nu)$?

Hiérarchie de masse et la violation de CP auprès d'accélérateurs



Mesure de $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ et $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

Effet de matière sur 1300 km permet de déterminer la Hiérarchie de Masse et une éventuelle violation de CP

Principe de la mesure:

- Un détecteur proche pour caractériser le plus précisément le faisceau de neutrinos
- Un détecteur lointain pour mesurer l'oscillation

Hiérarchie de masse et la violation de CP auprès d'accélérateurs

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq & \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 \\ & + \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31} \frac{\sin(aL)}{(aL)} \Delta_{21} \cos(\Delta_{31} + \delta_{\text{CP}}) \\ & + \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \Delta_{21}^2, \end{aligned}$$

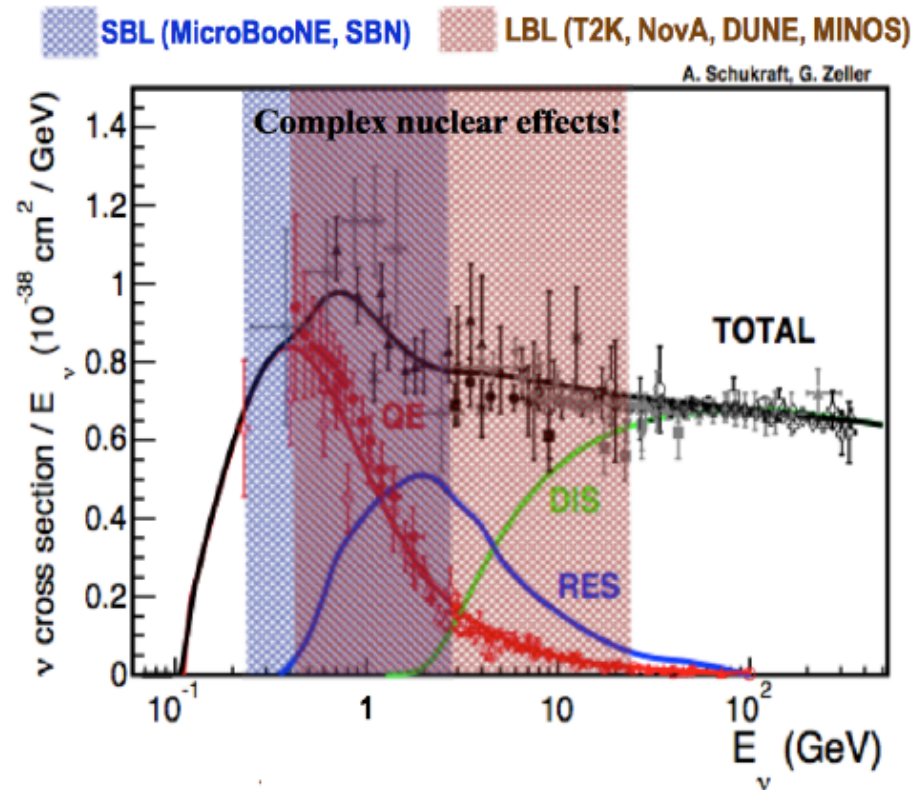
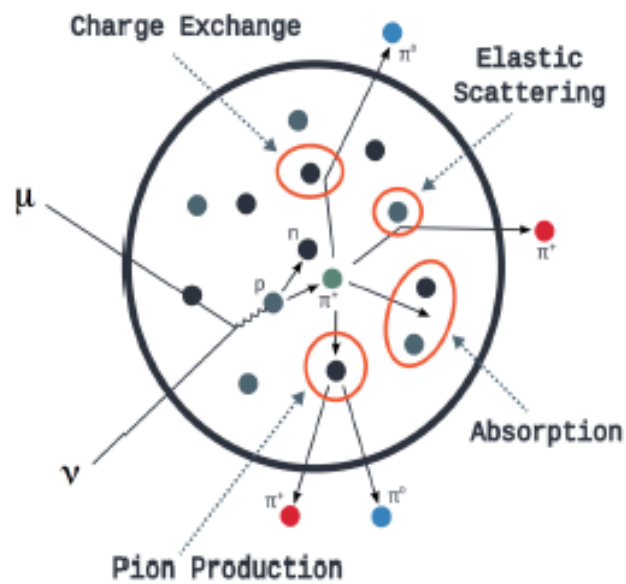
a : effet de matière

δ_{CP} : violation de CP

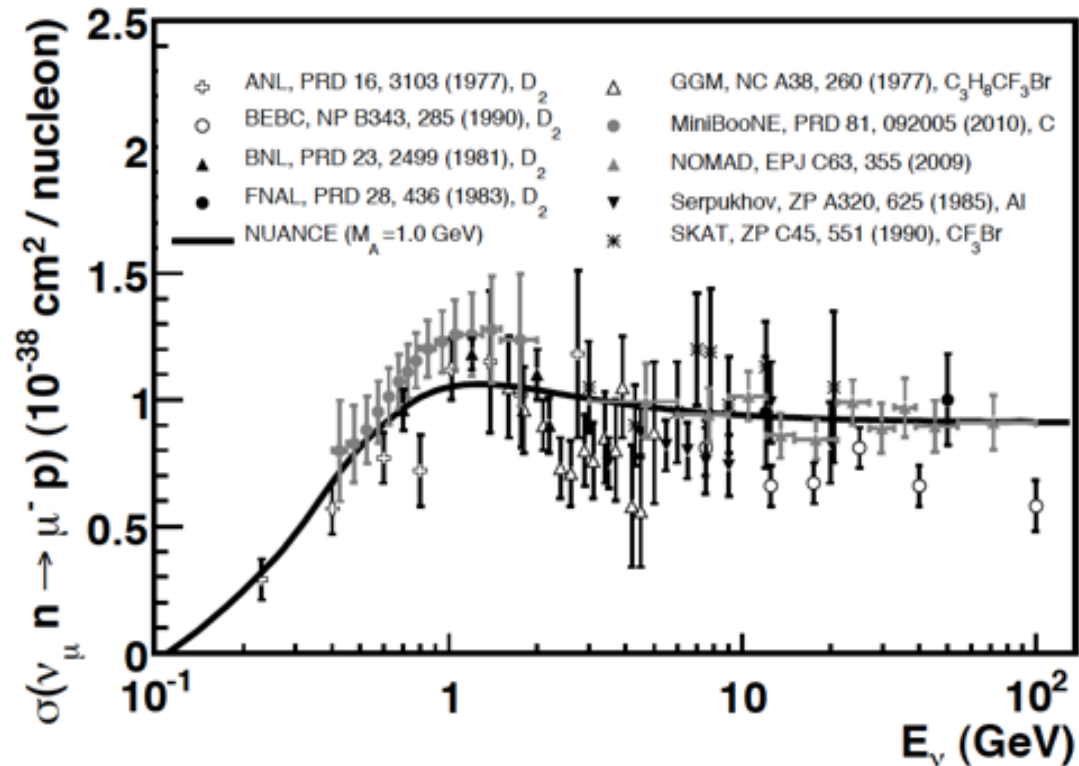
Changement de signe de a et δ_{CP} lors du changement ν en $\bar{\nu}$

Neutrino interactions 0.5 GeV – 20 GeV

Effets nucléaires: interaction des neutrinos avec des nucléons liés
Propagation des hadrons dans la matière nucléaire



Neutrino interactions 0.5 GeV – 20 GeV



Section efficace de diffusion quasi-élastique ($\nu_\mu n \rightarrow \mu^+ p$) à différentes énergies

Programmes expérimentaux en cours auprès d'accélérateurs

Différentes cibles étudiées notamment Ar pour le futur

Granularité des détecteurs pour mesurer la topologie final (CC-0 π , CC-1 π ,...)

Effets des incertitudes sur les sections efficaces

Les erreurs systématiques sont dominées par la connaissance des sections efficaces

T2K : étude de $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

Faisceau produit à Tokay au Japon
Neutrino détectés à 280 km
dans SuperKamiokande à Kamioka

uncertainties	ν_μ disap.	ν_e app
ν flux+xsec (before) after ND constraint	(21.7%) $\pm 2.7\%$	(26.0%) $\pm 3.2\%$
ν unconstrained xsec	$\pm 5.0\%$	$\pm 4.7\%$
Far detector	$\pm 4.0\%$	$\pm 2.7\%$
Total	(23.5%) $\pm 7.7\%$	(26.8%) $\pm 6.8\%$

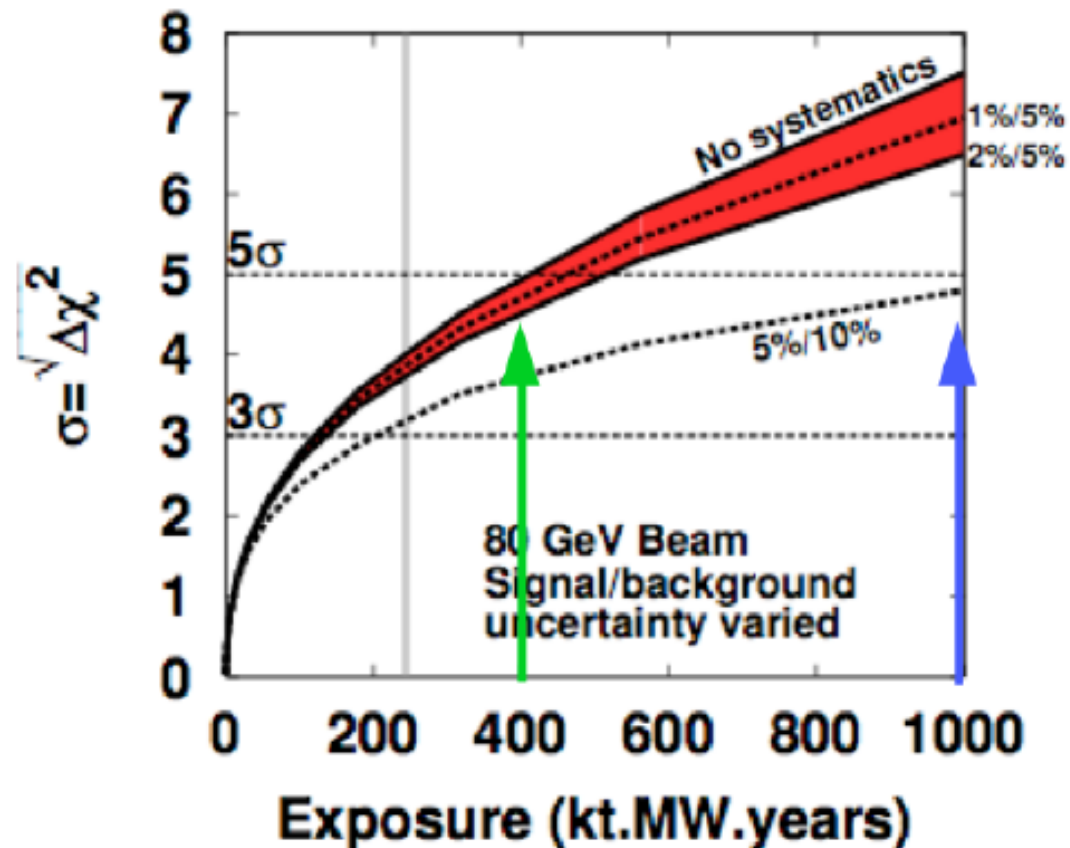
Même avec un détecteur proche, certaines sources d'incertitude subsistent :

- Utilisation de différentes technologies pour le détecteur et différents noyaux cibles
- Imprécision sur le flux
- Imprécision sur l'énergie

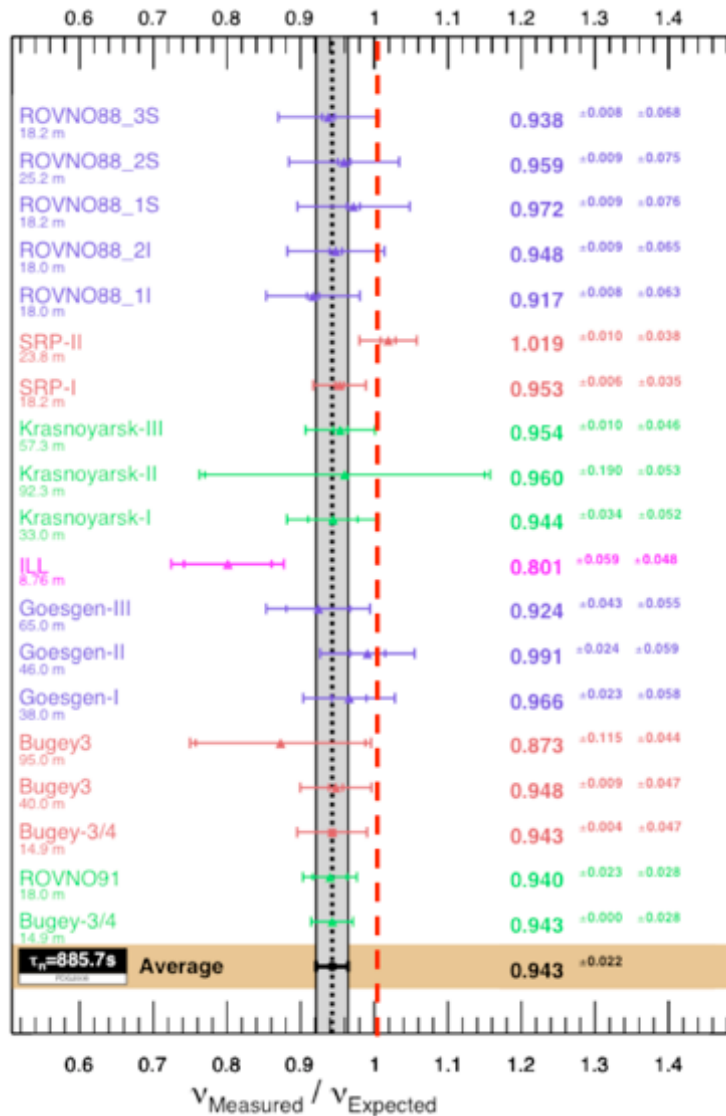
Effets des incertitudes sur les sections efficaces

Aujourd'hui erreurs systématiques sur les section efficaces 5 – 7%
Dans le futur, il faudra atteindre 2 %

DUNE: sensibilité à 5σ pour la moitié des valeurs de δ_{CP} pour un faisceau de 1.2 MW et un détecteur de 40 kt pour 10 ans et 25 ans.



Anomalies des réacteurs : Flux d'antineutrino émis



Effet des neutrinos stériles?

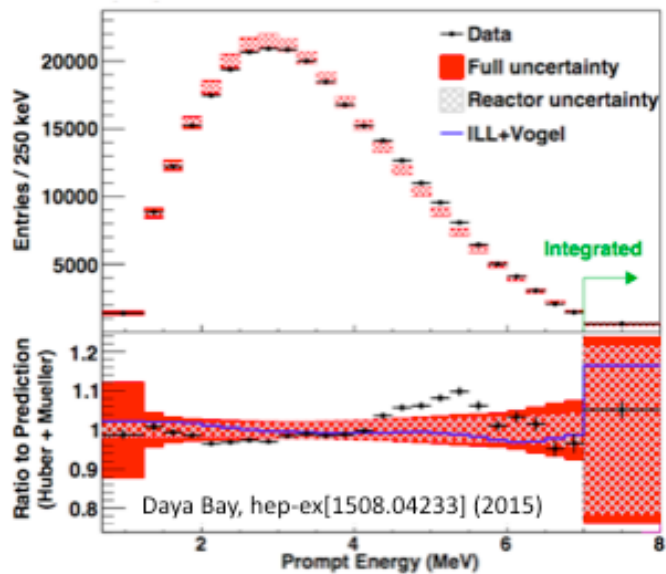
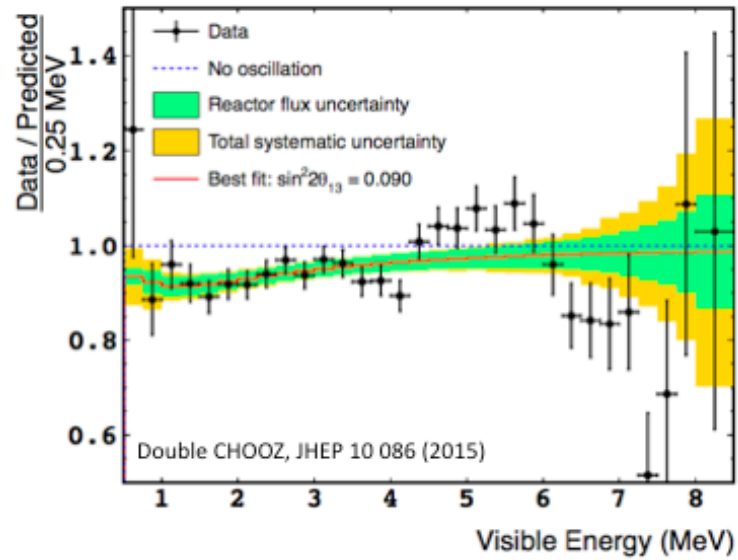
ou

Incertitudes dans les calculs nucléaires, base de données, évaluations,...

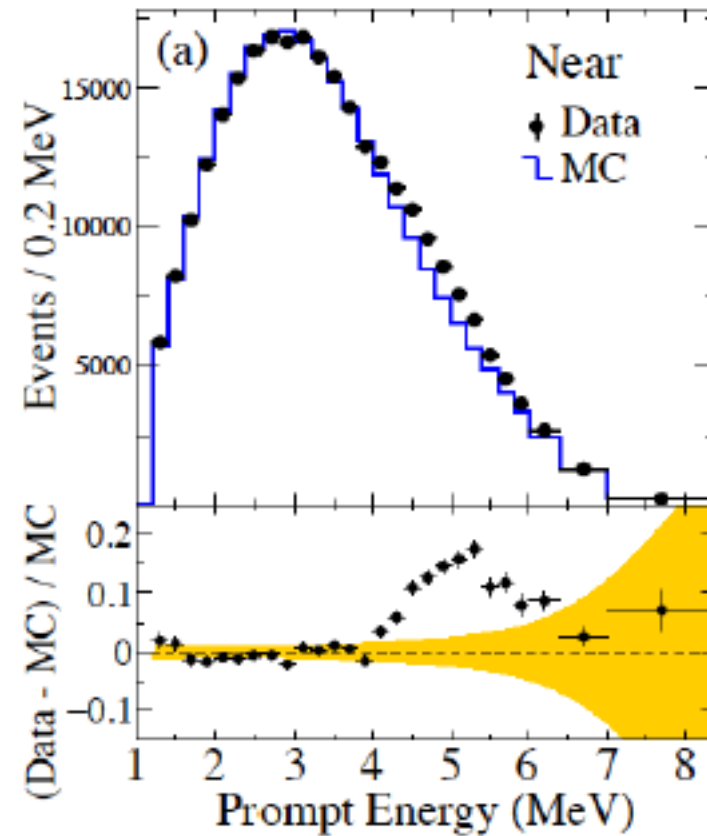
Table 3 The estimated uncertainties for the ingredients that make up the aggregate antineutrino spectra when the summation method is used. These estimates are subjective and are based on the educated guess of the authors. They do not represent statistical variances.

Quantity	type	ΔJ^π	uncertainty
Unknown branching and J^π	allowed and forbidden	all	50%
Finite size corr.	allowed	1+	50%
Finite size corr.	forbidden	0 ⁻ , 1 ⁻ , 2 ⁻	100%
Weak magnetism	allowed	1+	20%
Weak magnetism	forbidden	0 ⁻	0
Weak magnetism	forbidden	2 ⁻	20%
Weak magnetism	forbidden	1 ⁻	25%
Shape factor	allowed	1+	0
Shape factor	forbidden	2 ⁻	0
Shape factor	forbidden	0 ⁻ , 1 ⁻	30%
Fission yields	allowed and forbidden	all	10%
Missing spectra	allowed and forbidden	all	50%

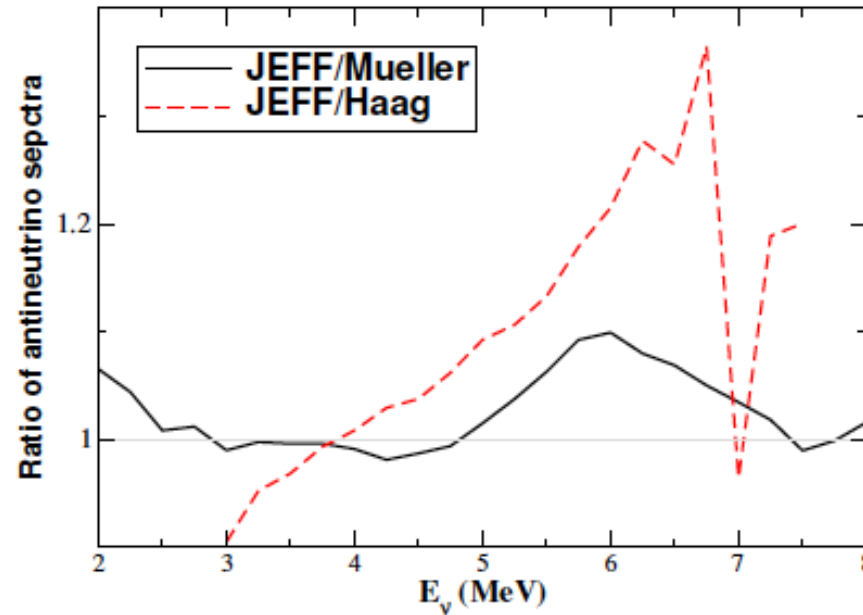
Anomalies des réacteurs : Bump à 5 MeV



RENO



Anomalies des réacteurs : Flux d'antineutrino émis



Spectre en anti-neutrino du ^{238}U

Haag N. et al. *Phys. Rev. Lett* 112:122501 (2014)

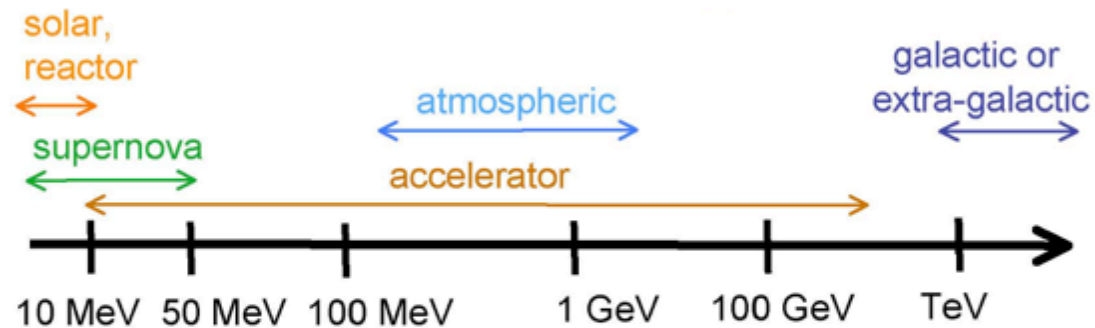
Mueller T. A. et al. *Phys. Rev. C* 83:054615 (2011)

Effet du spectre en énergie des neutrons, plus dur dans les centrales qu'à l'ILL
Neutrons épithermiques versus section efficace de fission

Conclusion

Quelque soit le domaine d'énergie la physique du neutrino a besoin de données de la physique nucléaire :

Different neutrino sources determine the range of energies
Description of the nuclear and hadronic effects is also energy dependent



• also, treatment of **nuclear effects** is energy dependent ...

shell model,> impulse> quark parton
RPA, EFT approximation model
(Fermi Gas, spectral functions, etc.)

P. Vogel

La physique nucléaire a un rôle crucial pour le futur de la physique du neutrino