

Le neutrino : histoire et perspectives, science et défis technologiques (1)



Andrea Giuliani
CSNSM, CNRS/IN2P3
Orsay



France

Plan

- Les neutrinos aujourd'hui
- Détecteurs a basse températures pour les neutrinos
 - Mesures directes de la masse
 - La diffusion cohérente neutrino-noyau
 - La double décroissance bêta
- Conclusions

Claudia Nones

Plan

- Les neutrinos aujourd'hui
- Détecteurs a basse températures pour les neutrinos
 - Mesures directes de la masse
 - La diffusion cohérente neutrino-noyau
 - La double décroissance bêta
- Conclusions

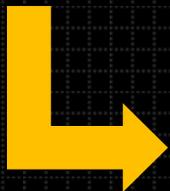
Les neutrinos parmi nous

On imagine les neutrinos comme des particules phantasme...
Mais les neutrinos sont **très communs** autour de nous et dans l'Univers

Quelque exemples :

- Notre pouce est traversé par **100 milliards de neutrinos** chaque second
- Les neutrinos sont beaucoup **plus nombreux que les atomes** dans l'Univers
- **99% de l'énergie émise par une supernova** est emportée par des neutrinos
- ...and notre même corps émet **8×10^3 neutrinos** chaque second!

Cependant, il y a quelque ans on ne connaissait presque rien sur les neutrinos, et beaucoup de propriétés de cette particule sont encore mystérieuses au jour d'aujourd'hui.



Interaction très faible

Longueur d'atténuation dans l'eau pour un neutrino de 1 MeV :
100 années-lumière

La conception...

Pauli propose l'existence du neutrino pour garantir la conservation de l'énergie dans la décroissance beta (1930).



Original - Photocopy of 002 0393
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
anzuhören bitte, Ihnen das näherem auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselstich" (1) der Statistik und dem Energiegesetz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten **elektrisch neutrale**
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche der **Spin 1/2** haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
sich mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
musste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls **nicht grösser als 0,01 Protonenmasse**. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit der Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Spin 1/2

Electriquement neutre

Masse pas plus grand que
0.01 x masse du proton

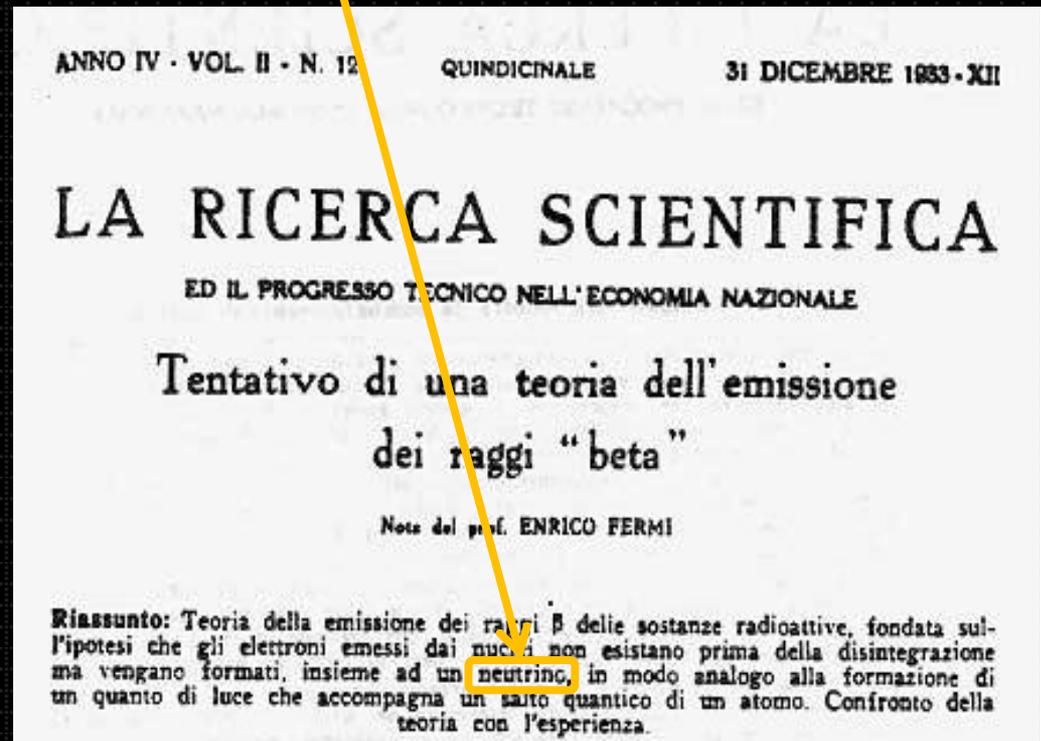


Première contrainte
sur la masse: ~ 10 MeV

...et le baptême

Fermi développe une théorie des champs similaire à l'électrodynamique qui permet des prévisions quantitatives sur la décroissance bêta et sur les interactions des neutrinos avec la matière (1933).

Il nomme la particule prévue par Pauli « **neutrino** » (le petit neutron).



Les événements cruciaux dans l'histoire du neutrino

1937 - Majorana propose des fermions totalement neutres

1958 - Goldhaber en mesure l'hélicité

1959 - Cowan et Reines le détectent!

1959 - Pontecorvo, Lee et Yang en proposent les saveurs

1957 - 1962 - Pontecorvo et Sakata en proposent les oscillations

1962 - Steinberger et al. en distinguent expérimentalement les saveurs

1998 - Superkamiokande découvre les oscillations des neutrinos atmosphériques

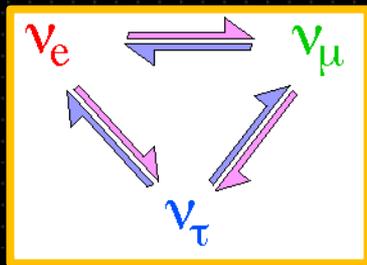
1998-2012 - Plusieurs groupes mesurent les éléments de la matrice de mélange et donnent des indications sur la masse

Oscillations de saveur des neutrinos

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix}$$

Etats de saveur \neq Etats de masse
 Interactions faibles \quad Propagation

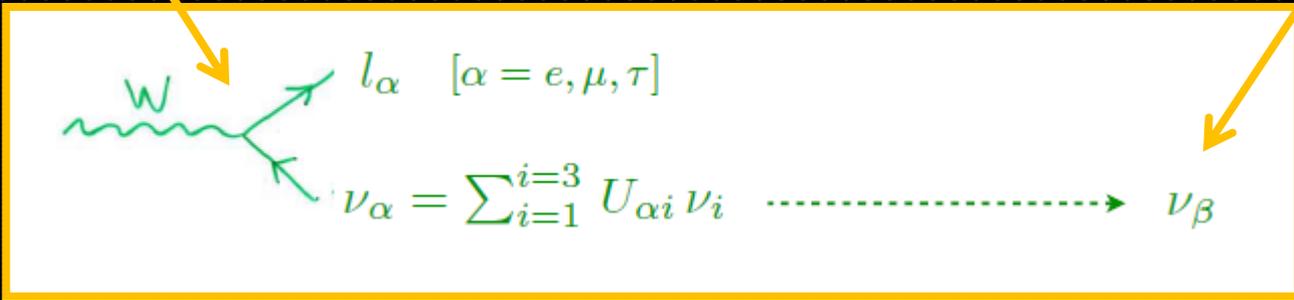
$$\begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$



Soleil
 Atmosphère
 Accélérateur
 Réacteur

Détecteurs

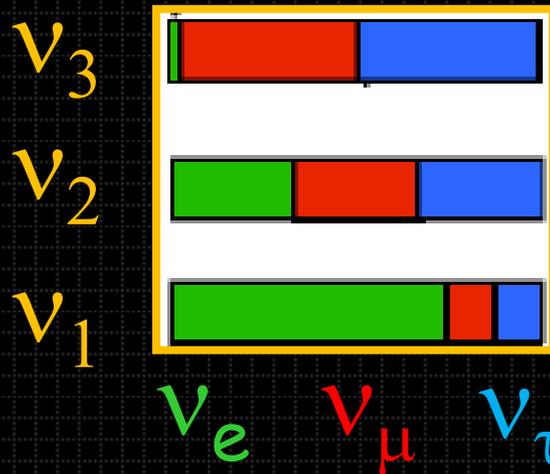
Oscillations de saveur



Ce que nous savons grâce au phénomène d'oscillation (1)

① Les oscillations ont lieux \longrightarrow Les neutrinos sont particules **massives**

② Nous avons maintenant une bonne connaissance de U_{ij} éléments de la matrice de mélange



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

Ce que nous savons grâce au phénomène d'oscillation (2)

- ③ Donnés les trois valeurs propres de masse M_1, M_2, M_3 , nous avons des mesures approximées des deux ΔM_{ij}^2 indépendants

$\Delta M_{12}^2 \sim (9 \text{ meV})^2$ **Solaire** $|\Delta M_{23}^2| \sim (50 \text{ meV})^2$ **Atmosphérique**

$$\Delta M_{ij}^2 \equiv M_i^2 - M_j^2$$

Confirmation des oscillations comme source principale des transitions de saveur observées

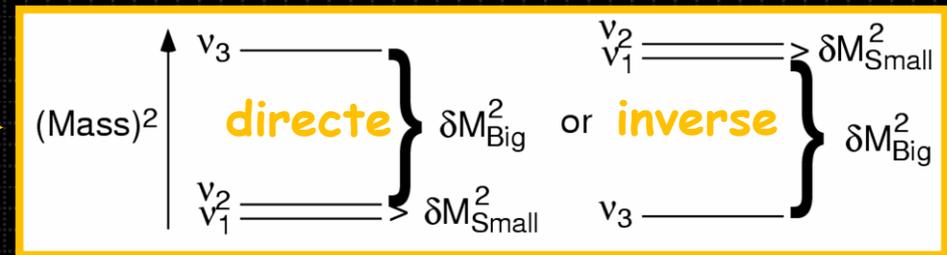
autres effets (neutrinos stériles, interactions non standard, moments magnétiques...) sous-dominants

Ce que les oscillations ne nous disent pas

① Echelle absolue de masse \longrightarrow Dégénération ? ($M_1 \sim M_2 \sim M_3$)

② Hiérarchie de masse \longrightarrow

In principe, cette information peut arriver de l'étude des oscillations dans la matière terrestre (dans les prochaine 5-10 ans)



③ Nature de **DIRAC** ou de **MAJORANA** des neutrinos

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

$$\nu \equiv \bar{\nu}$$

Cosmologie, single et double décroissance bêta

La cosmologie, la single et la double décroissance β mesurent combinaisons différentes des valeurs propres de masse des neutrinos, en en contraignant l'échelle de masse:

M. Piat/L. Rodriguez/P. de Bernardis - 24/5

Dans le scenario standard :

$$\Sigma \equiv \sum_{i=1}^3 m_i$$

cosmologie
Somme simple
Pure effet cinématique

$$\langle M_{\beta} \rangle \equiv \left(\sum_{i=1}^3 m_i^2 |U_{ei}|^2 \right)^{1/2}$$

Décroissance β
Somme incohérente
Neutrino réel

$$\langle M_{\beta\beta} \rangle \equiv \left| \sum_{i=1}^3 m_i |U_{ei}|^2 e^{i\alpha_i} \right|$$

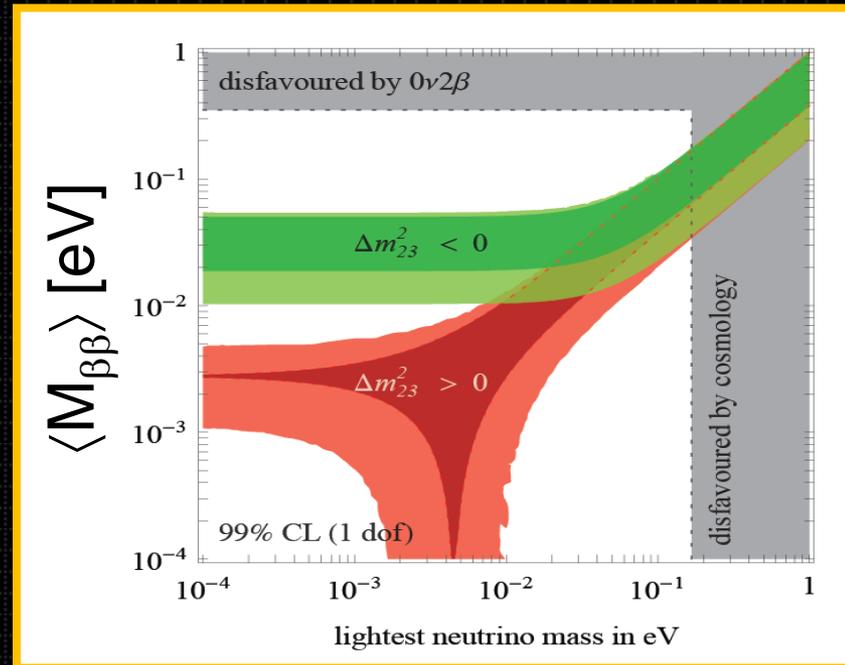
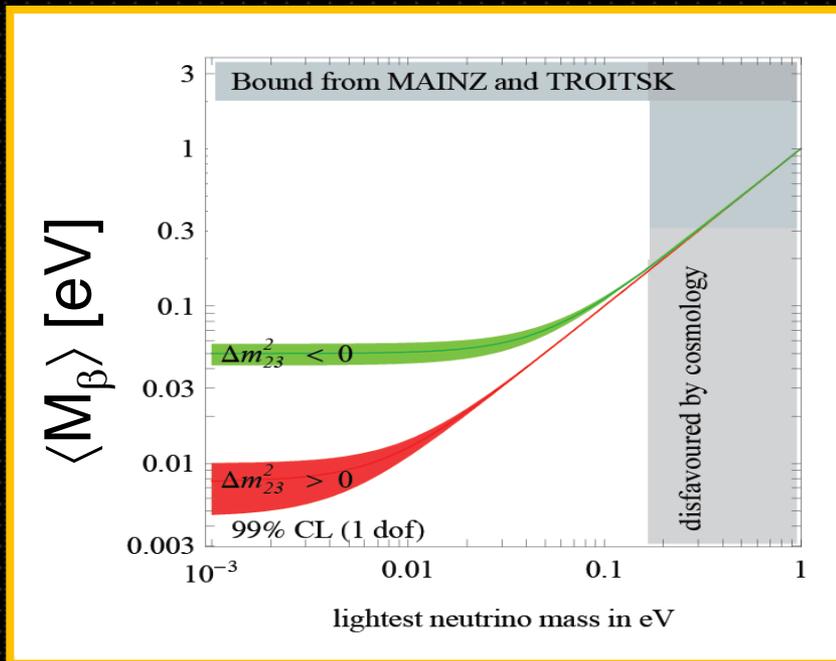
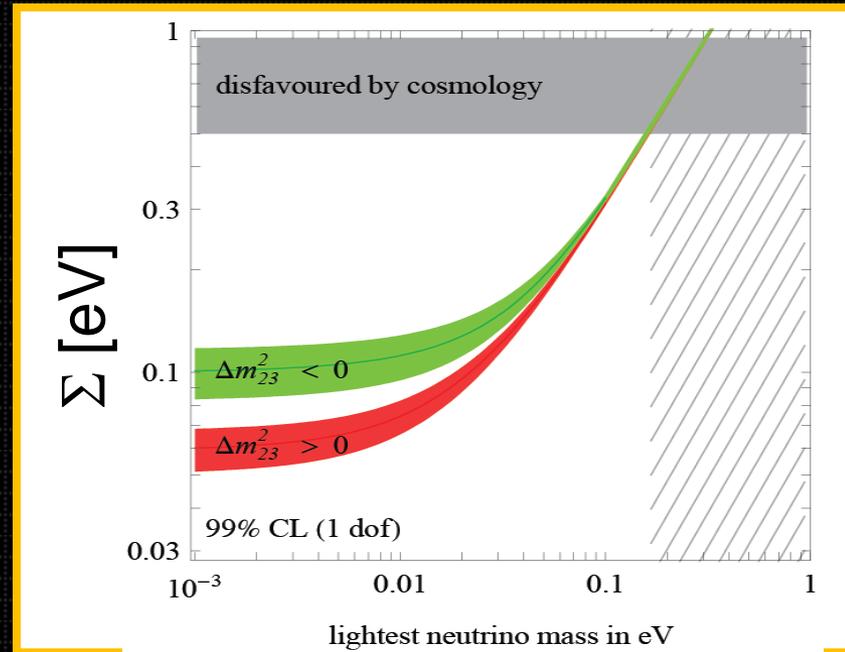
Décroissance $\beta\beta$
Somme cohérente
Neutrino virtuel
Phases de Majorana

Contraintes actuelles

Les trois types d'échelle de masse peuvent être tracés en fonction de la masse du neutrino le plus léger.

Deux bandes apparaissent dans chaque plot, qui correspondent à la hiérarchie *inverse* et *directe*.

Les deux bandes fusionnent en cas de *dégénération*



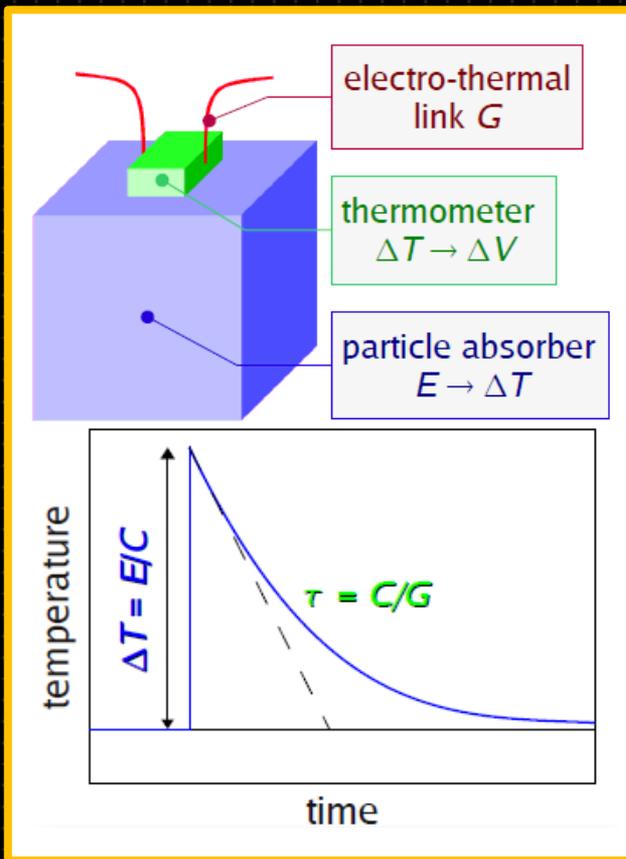
Plan

- Les neutrinos aujourd'hui
- Détecteurs à basse températures pour les neutrinos
 - Mesures directes de la masse
 - La diffusion cohérente neutrino-noyau
 - La double décroissance bêta
- Conclusions

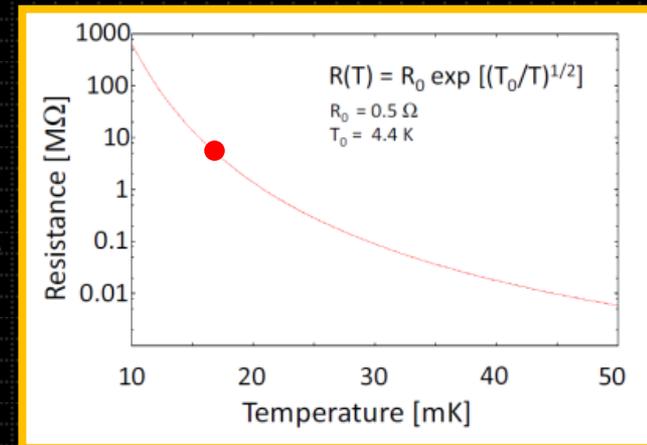
Détecteurs à basse température pour la physique du neutrino (1)

Calorimètres parfaits

➔ Un absorbeur et un thermomètre : l'ensemble est mis à froid



Le thermomètre (par exemple un semi-conducteur dopé - Ge NTD ou Si implanté) est très lent ($\sim 1-10\text{ms}$) et on peut supposer une thermalisation complète de l'énergie déposée



Déjà utilisés pour :

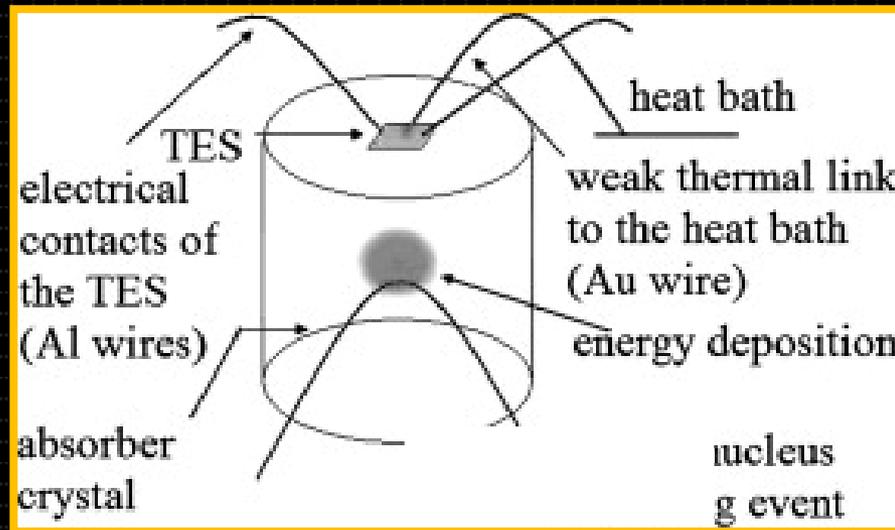
- Double Beta (expériences de pointe)
- Mesure directe (phase initiale)

Proposés pour :

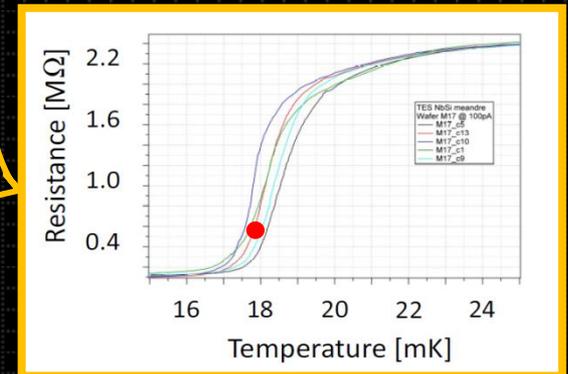
- Diffusion cohérente neutrino-nucleus

Détecteurs à basse température pour la physique du neutrino (2)

Détecteurs avec couche mince



Un absorbeur avec une couche mince supraconducteur (TES) ou isolant d'Anderson déposée sur une surface



La couche a une réponse rapide ($\sim \mu\text{s}$) et elle est sensible aussi aux phonons hors équilibre thermique (information sur la position)

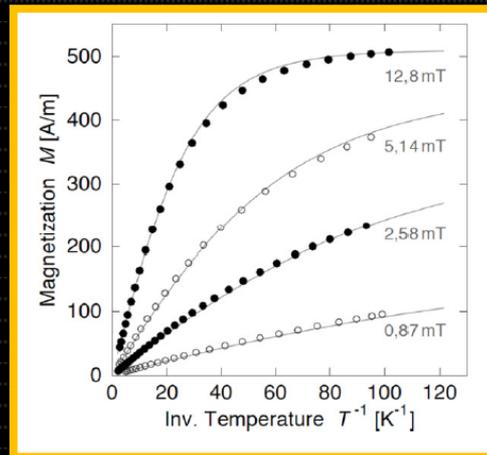
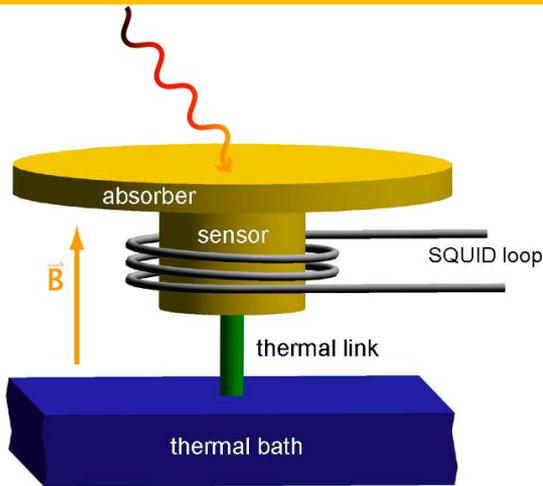
Utilisés au niveau de R&D pour :

- Double bêta (rejection de bruit de fond)
- Mesure directe (rapidité)

Détecteurs à basse température pour la physique du neutrino (3)

Détecteurs MMC

Un capteur paramagnétique (Au:Er) mesure des impulsions de température grâce à une variation de magnétisation



$$\Delta\Phi_s \propto \frac{\partial M}{\partial T} \Delta T \rightarrow \Delta\Phi_s \propto \frac{\partial M}{\partial T} \frac{E}{C_{\text{sens}} + C_{\text{abs}}}$$

Le capteur a une réponse rapide ($\sim 0.1 \mu\text{s}$) et l'utilisation d'absorbeurs métalliques permet des résolutions énergétiques exceptionnelles ($\sim 1 \%$ à $\sim 1 \text{ KeV}$)

Utilisés au niveau de R&D pour :

- Mesure directe
- Double bêta

Plan

- Les neutrinos aujourd'hui
- Détecteurs à basse températures pour les neutrinos
 - Mesures directes de la masse
 - La diffusion cohérente neutrino-noyau
 - La double décroissance bêta
- Conclusions

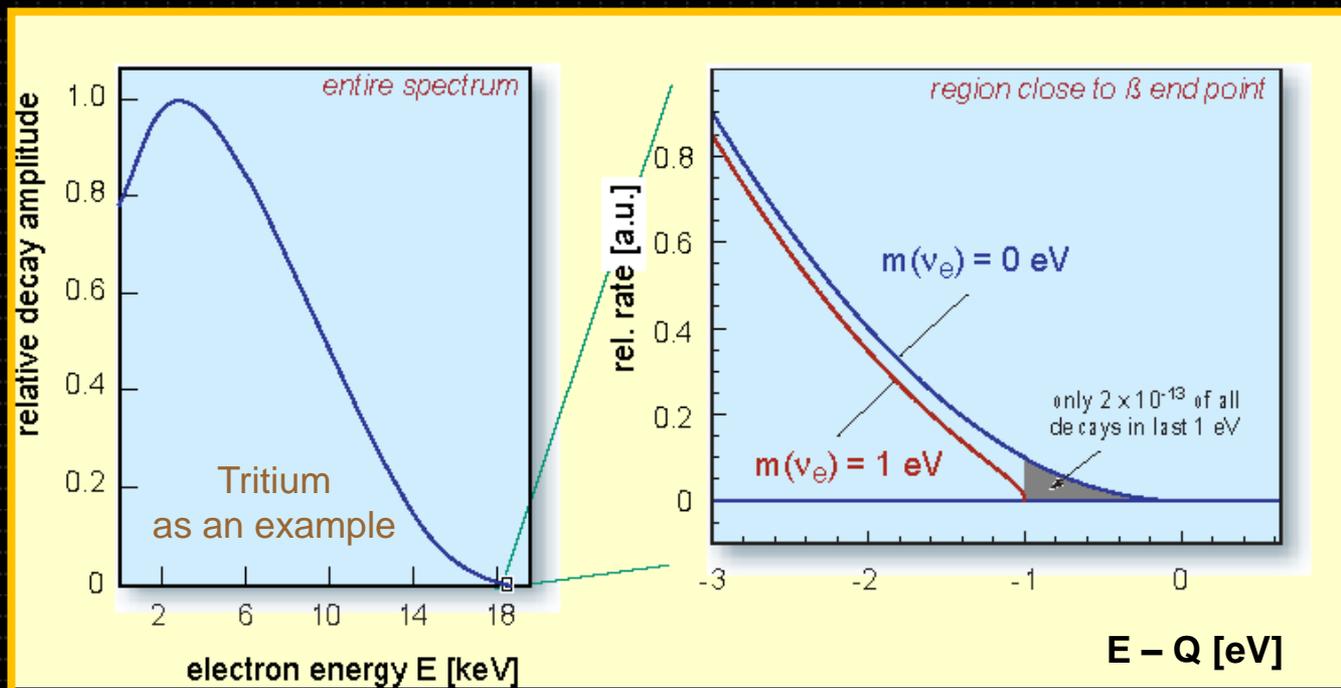
Mesures directes de la masse

Science : contraindre (ou mesurer?) la masse du neutrino dans une façon complètement indépendante des modèles
⇒ mesure ne basée que sur la cinématique

Approche historique : utiliser la décroissance beta du Tritium ➔

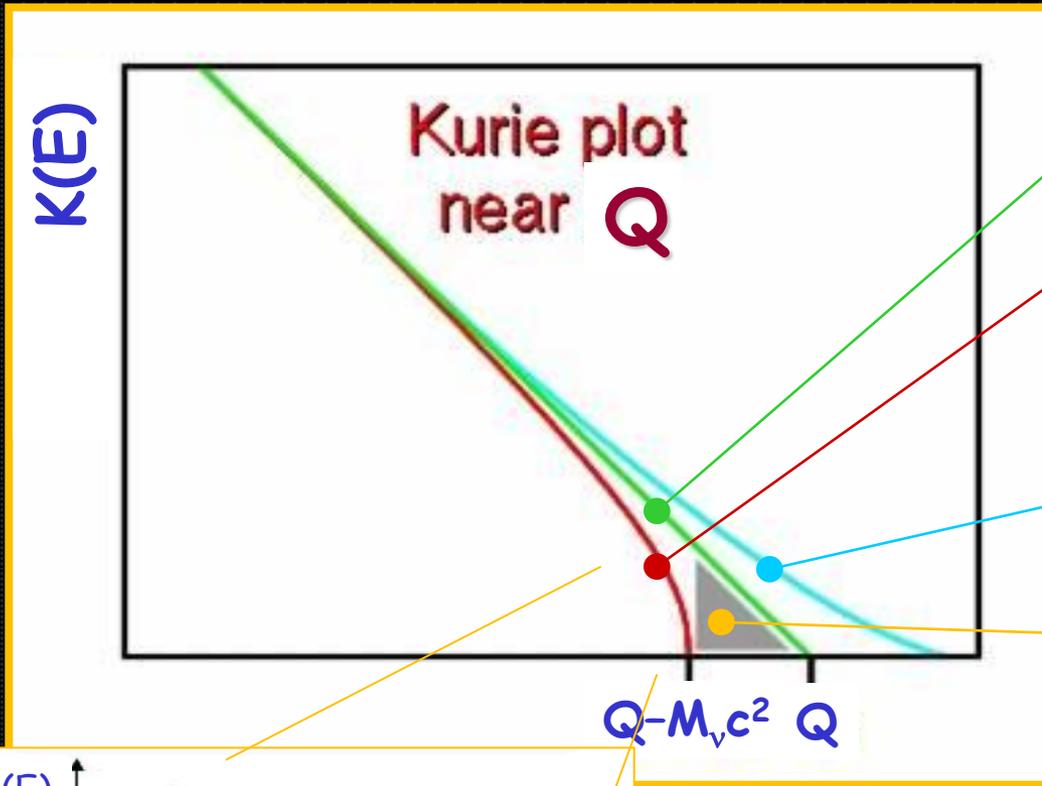


$Q=18.6 \text{ keV}$



Ce que on mesure

Kurie plot $K(E)$: convenante linéarisation du spectre bêta



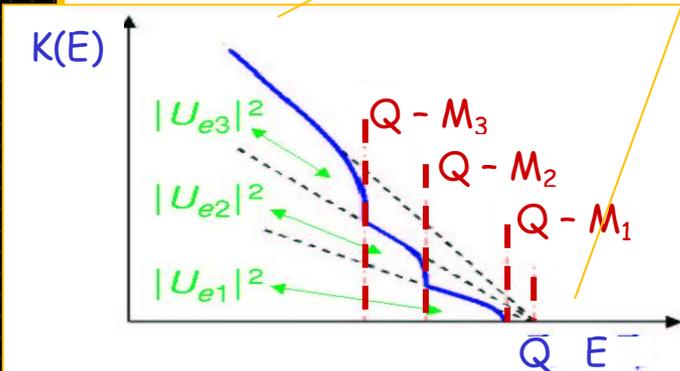
Masse du neutrino nulle

Masse du neutrino positive

effets de:

- Fond
- Résolution en énergie
- Etats finals excités

$$\int_{Q-\delta E}^Q (dN/dE) dE \cong 2(\delta E/Q)^3$$



➔ Avec la sensibilité actuelle, les masses ne peuvent pas être résolues

$$\langle M_\beta \rangle = \left[\sum M_i^2 |U_{ei}|^2 \right]^{1/2}$$

Les demandes et la sensibilité

Demandes:

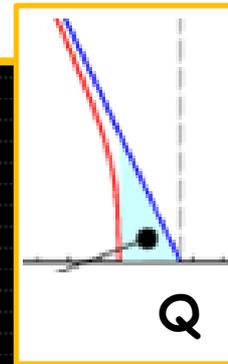
- haute résolution énergétique \Rightarrow on cherche une petite distorsion spectrale
- haute statistique dans une région étroite du spectre proche à Q
- control de toute systématique qui pourrait déformer le spectre

Approche approximative pour évaluer la sensibilité à la masse du neutrino $\sigma(\langle M_\beta \rangle)$

On demande que le déficit de coups proche au point final du spectre du à une masse non-nulle du neutrino soit égale à la fluctuation de Poisson du nombre de coups dans le spectre à masse nulle



$$\sigma(\langle M_\beta \rangle) \cong \sqrt[4]{\frac{1.6 Q^3 \Delta E}{N_{\text{tot}}}}$$



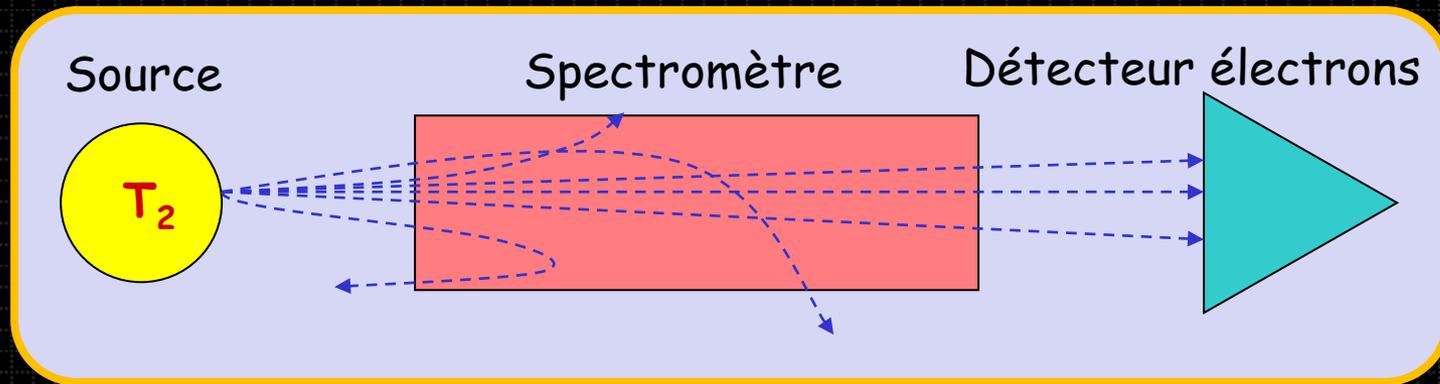
Nombre total de coups recueillis

Résolution énergétique

Si je place un limite en 5 ans, pour l'améliorer d'un facteur 2 je dois mesurer pendant autres 75 ans !

Les spectromètres

Technique conventionnelle → Source ≠ Détecteur



Avantages :

- Haute statistique dans la région d'intérêt
- Excellente résolution énergétique: ~ 2 eV

Désavantages :

- Energie déposée dans la source (états finals excités)
- Effets systématiques
- Fond

Contrainte actuelle
(MAINZ, TROITZK)
 $\langle M_\beta \rangle < 2.1$ eV (90% c.l.)

Expérience **KATRIN** (à Karlsruhe - Tritium laboratory)
⇒ La seule expérience compétitive pour l'instant

KATRIN

Sensibilité

$$\langle M_{\beta} \rangle < 0.2 \text{ eV (90\%c.l.)}$$

Potentiel de découverte

$$\langle M_{\beta} \rangle = 0.35 \text{ eV @ } 5\sigma$$

Il y a un consensus général que KATRIN n'est pas expansible...

Prise de données prévue pour le
2014

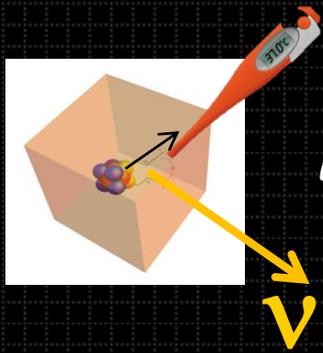
5 ans de retard !



Défi aux détecteurs à basse température : faire mieux avec une expérience modulaire et expansible

Effet de la masse du neutrinos sur les décroissances nucléaires faibles

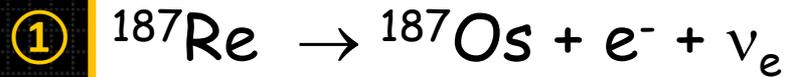
Transition nucléaire \rightarrow recul nucléaire + autre chose + ν



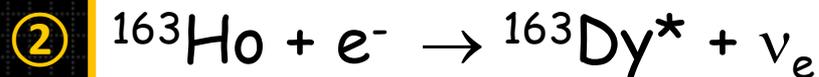
Mesurer toute l'énergie sauf celle du neutrino (calorimètre)

Distorsions spectrale proches à Q donnent info sur m_ν

Deux réalisations pratiques avec détecteurs basse température



$T_{1/2} = 4.32 \times 10^{10} \text{ y}$ $Q \sim 2.5 \text{ keV}$



$T_{1/2} = 4570 \text{ y}$ $Q \sim 2.2-2.8 \text{ keV}$

\rightarrow De-excitations atomiques, brehmsstrahlung interne

Les concepts des détecteurs

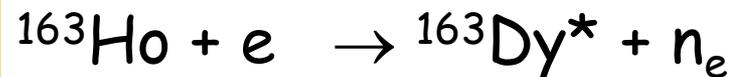


S. Vitale, 1985

Rhénium naturel: ~ 1 Bq/mg

Développement d'un détecteur
fait de Rhénium naturel

Défi : Faire bien marcher le
détecteur de Re
 $T_c = 1.6$ K



A. De Rujula M. Lusignoli

1982

$\sim 10^{11}$ noyaux donnent ~ 1 Bq

Intégration de noyaux de Holmium
dans un absorbeur pré-optimisée

Défi : Produire, séparer, intégrer
noyaux de ^{163}Ho dans un absorbeur
approprié

MARE



MARE
ECHO

Pros et cons des calorimètres

Avantages :

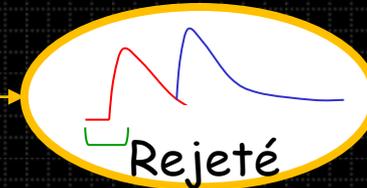
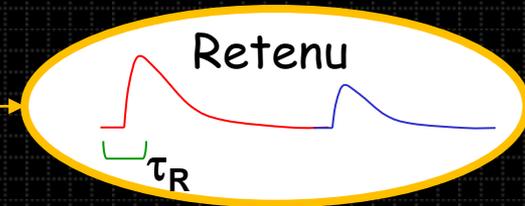
- pas des pertes d'énergie dans la source
- pas de problèmes dus aux états excités

Désavantage principale :

- **Tous les événements sont acquis**
- fond et effets systématiques générés par le **pile-up**

Paramètre crucial pour le pile-up : $\tau_R \Rightarrow$ résolution temporelle

Si deux signaux sont séparés par $T > \tau_R$
 \Rightarrow Reconnus comme doubles



Si deux signaux sont séparés par $T < \tau_R$
 \Rightarrow Mal interprétés comme single avec amplitude somme



Les concepts des détecteurs

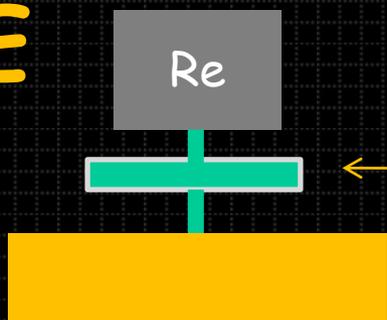


Rhénium naturel: ~ 1 Bq/mg

Développement d'un détecteur
fait de Rhénium naturel

Défi : Faire bien marcher le
détecteur de Re
 $T_c = 1.6$ K

MARE

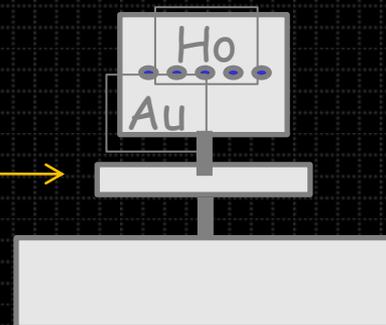


$\sim 10^{11}$ noyaux donnent ~ 1 Bq

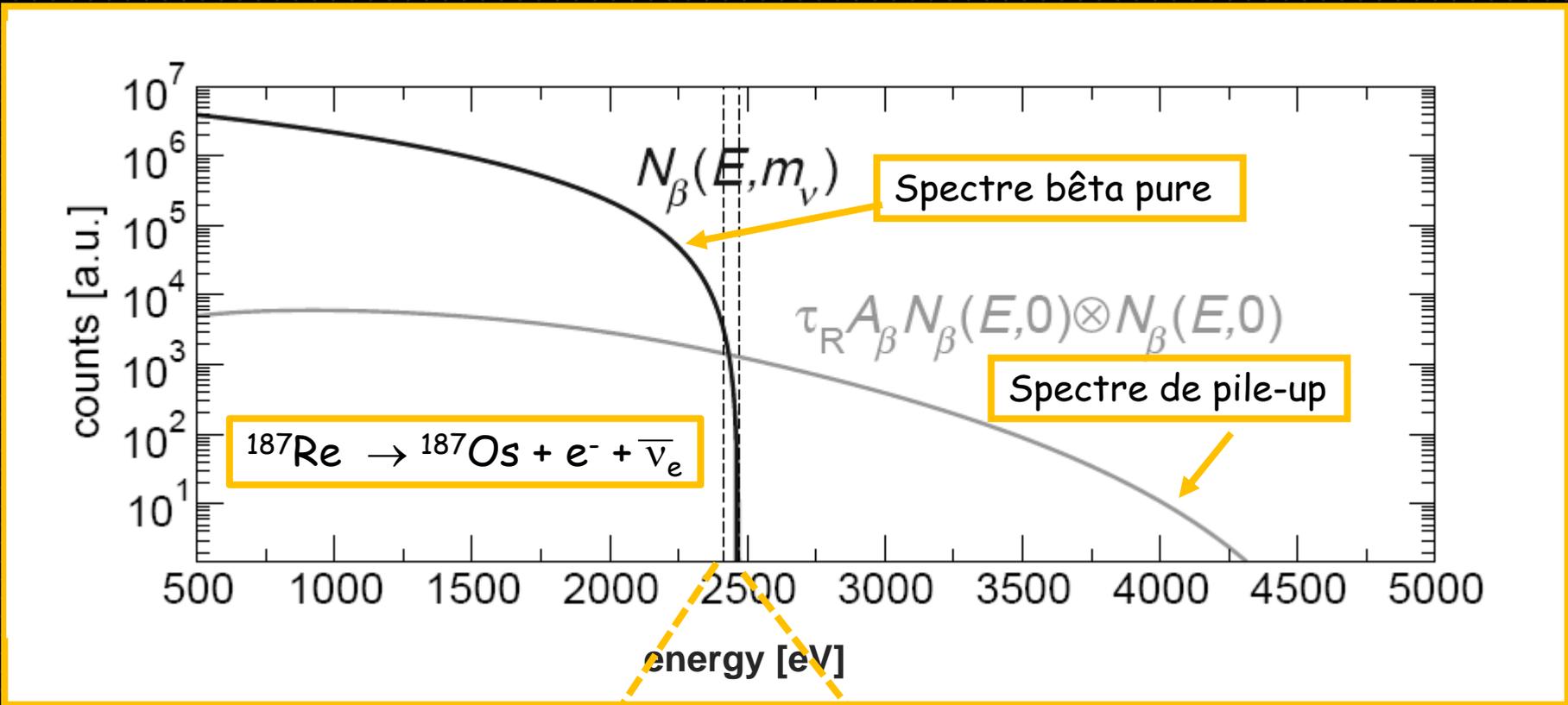
Intégration de noyaux de Holmium
dans un absorbeur pré-optimisée

Défi : Produire, séparer, intégrer
noyaux de ^{163}Ho dans un absorbeur
approprié

**MARE
ECHO**



Effet mauvais du pile-up (1)



Région relevant pour la masse du neutrino

$$\text{Fraction pile-up } (f_{\text{pile-up}}) = \tau_R \times A_{\beta}$$

A_{β} : activité du détecteur single

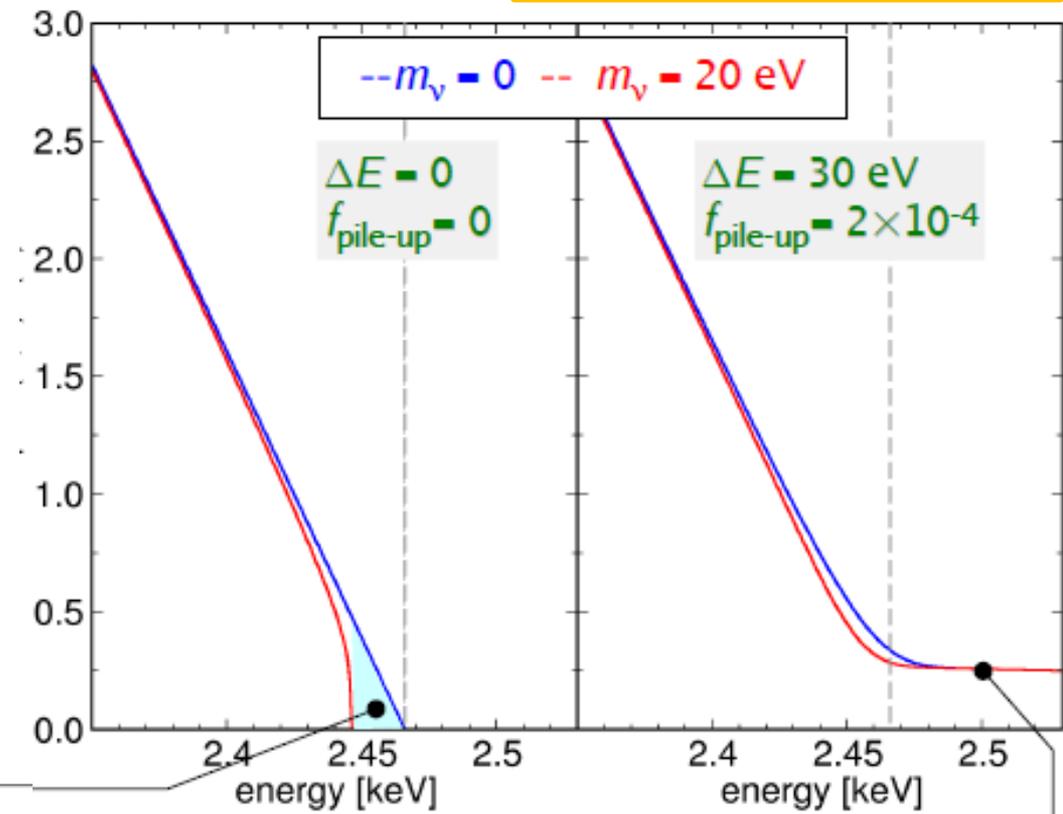
Pour détecteurs lents : $f_{\text{pile-up}} \sim 10^{-3} - 10^{-4}$

Effet mauvais du pile-up (2)

L'effet combiné du pile-up et de la résolution énergétique limitée affecte sérieusement la sensibilité



$K(E)$



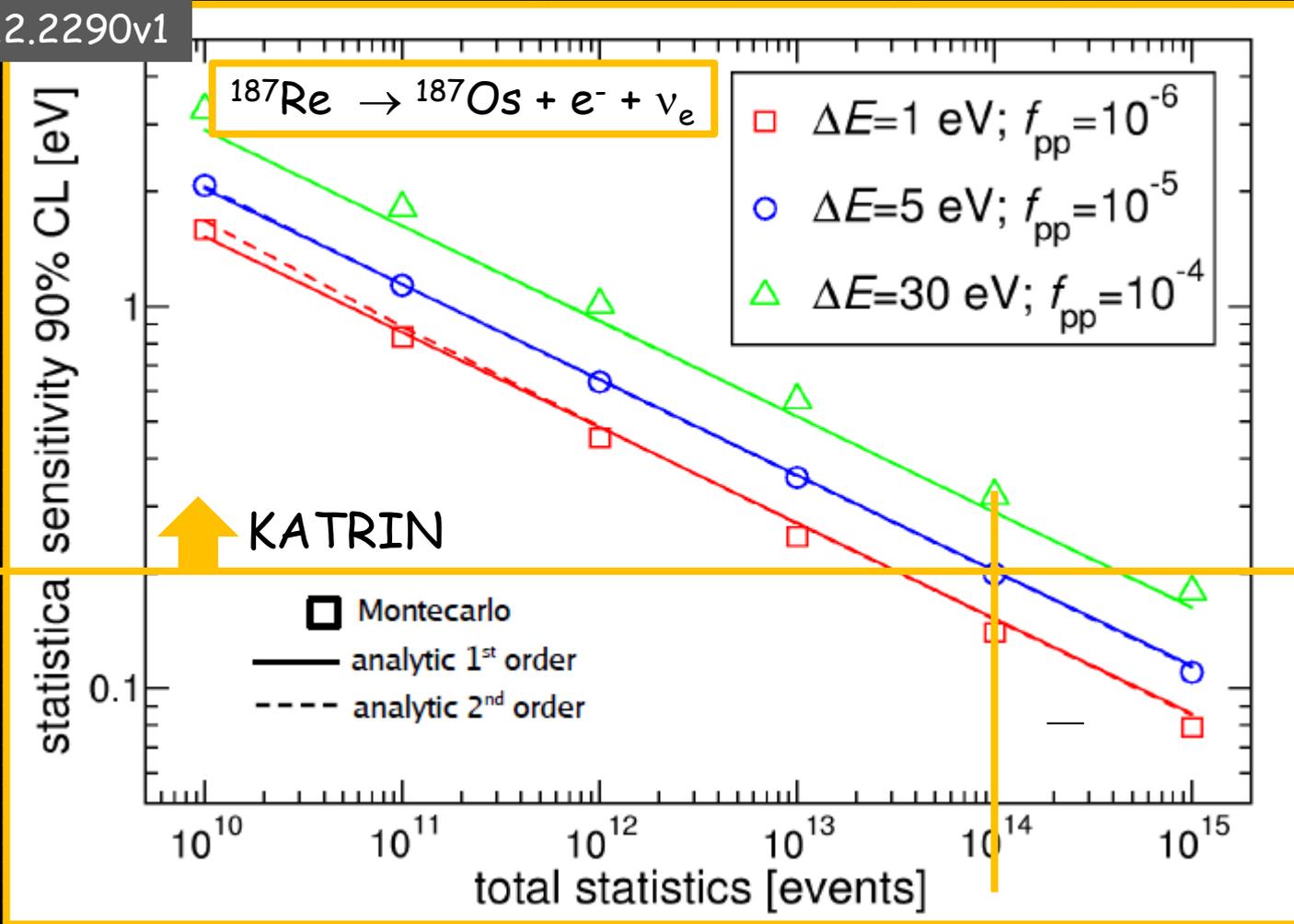
$$F(\Delta E) \approx \left(\frac{\Delta E}{E_0} \right)^3$$

pile-up fraction: $f_{\text{pile-up}} = \tau_R A_B$

Nécessité d'une haute statistique

Astropart. Phys. 34(2010), p. 80

arXiv:1012.2290v1



But $\Rightarrow N_{\text{tot}} \sim 10^{14}$ événements

Dimensionnement approximatif d'une expérience bolométrique



$$N_{\text{tot}} \sim 10^{14} \text{ événements}$$

$$T_{\text{mesure}} \sim 10 \text{ ans}$$



$$10^{13} \text{ événements / an}$$

$$1 \text{ Bq/detecteur} \Rightarrow 3.15 \times 10^7 \text{ événements/an/det}$$



$$N_{\text{det}} = 10^{13} / 3.15 \times 10^7 \sim 3 \times 10^5$$

Par exemple, 30 matrices de 10^4 pixels chaque un

Tout ça avec:

- Résolution énergétique excellente ($\sim 1 \text{ eV}$)
- Résolution temporelle excellente ($\leq \sim 1 \mu\text{s}$)
- Possibilités de multiplexing

C. Pigot/JL. Sauvageot - 24/5
Astrophysique X

Plus en détail

exposure required for 0.2 eV m_ν sensitivity

A_β [Hz]	τ_R [μ s]	ΔE [eV]	N_{ev} [counts]	exposure [det \times year]
1	1	1	$0.2 \cdot 10^{14}$	$7.6 \cdot 10^5$
10	1	1	$0.7 \cdot 10^{14}$	$2.1 \cdot 10^5$
10	3	3	$1.3 \cdot 10^{14}$	$4.1 \cdot 10^5$
10	5	5	$1.9 \cdot 10^{14}$	$6.1 \cdot 10^5$
10	10	10	$3.3 \cdot 10^{14}$	$10.5 \cdot 10^5$

8 matrices
5000 pixels
10 ans
400 g Rhenium

exposure required for 0.1 eV m_ν sensitivity

A_β [Hz]	τ_R [μ s]	ΔE [eV]	N_{ev} [counts]	exposure [det \times year]
1	0.1	0.1	$1.7 \cdot 10^{14}$	$5.4 \cdot 10^6$
10	0.1	0.1	$5.3 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^6$
10	1	1	$10.3 \cdot 10^{14}$	$3.3 \cdot 10^6$
10	3	3	$21.4 \cdot 10^{14}$	$6.8 \cdot 10^6$
10	5	5	$43.6 \cdot 10^{14}$	$13.9 \cdot 10^6$

16 matrices
20000 pixels
10 ans
3.2 kg Rhenium

Le choix de l'absorbeur

Historiquement, **deux pistes** pour l'absorbeur ont été suivies:

← Matériau diélectrique (choisi après plusieurs tentatives)

①

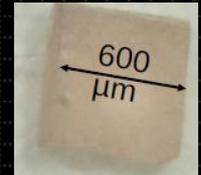
AgReO₄



Basse chaleur spécifique - que réseau contribue



Cristaux de qualité médiocre, pas reproductibles
Absence d'une surface plate ⇒ capteurs collés ⇒ réponse lente



Cependant, beaucoup de travail préliminaire avec précieuses informations sur la systématique

← Matériau supraconducteur ($T_c = 1.6$ K, $\theta_D = 416$ K)

②

Re



Cristaux singles de haute qualité mécanique →

Micro-fabrication de capteurs possible

Toute type de couplage peut être utilisé normalement

Déposition de couche, intégration (TES, MMC) ⇒ réponse rapide



Preuves de mauvaise thermalisation de l'énergie déposé

Long temps de descente des signaux

Déficit d'amplitude des impulsions

Raies spectrales larges par rapport au S/N

Parcours de MARE

Précurseurs (MANU, MIBETA)

Semi-conducteurs collés

Mono pixel
Matrice de 10 pixels
 10^6 événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
20 eV

MARE-1 - $\Delta E \sim 10 - 30$ eV - $\tau_R \sim 100$ μ s - proche à prendre données

Semi-conducteurs collés

Matrice de 300 pixels
 10^{10} événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
2 eV

MARE-2 - But : $\Delta E \sim 1 - 5$ eV - $\tau_R \sim 0.1 - 10$ μ s - R&D en cours

TES
MMC
MKIDs

Matrices de $10^3 - 10^4$ pixels
 10^{14} événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
0.2 eV

Parcours de MARE

Précurseurs (MANU, MIBETA)

Semi-conducteurs
collés



Mono pixel
Matrice de 10 pixels
 10^6 événements



$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
20 eV

MARE-1 - $\Delta E \sim 10 - 30$ eV - $\tau_R \sim 100$ μ s - proche à prendre données

Semi-conducteurs
collés



Matrice de 300 pixels
 10^{10} événements



$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
2 eV

MARE-2 - But : $\Delta E \sim 1 - 5$ eV - $\tau_R \sim 0.1 - 10$ μ s - R&D en cours

TES
MMC
MKIDs



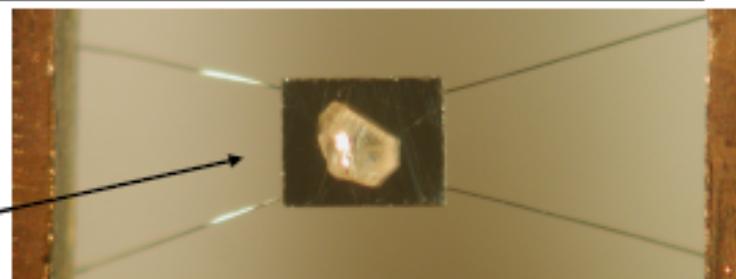
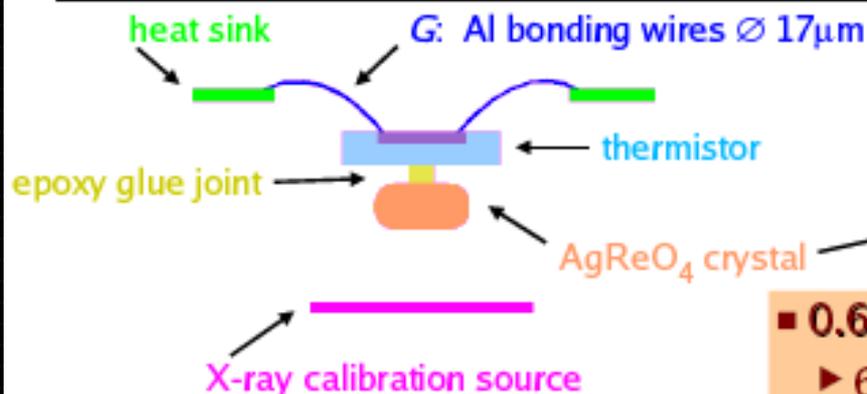
Matrices de $10^3 - 10^4$ pixels
 10^{14} événements



$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
0.2 eV

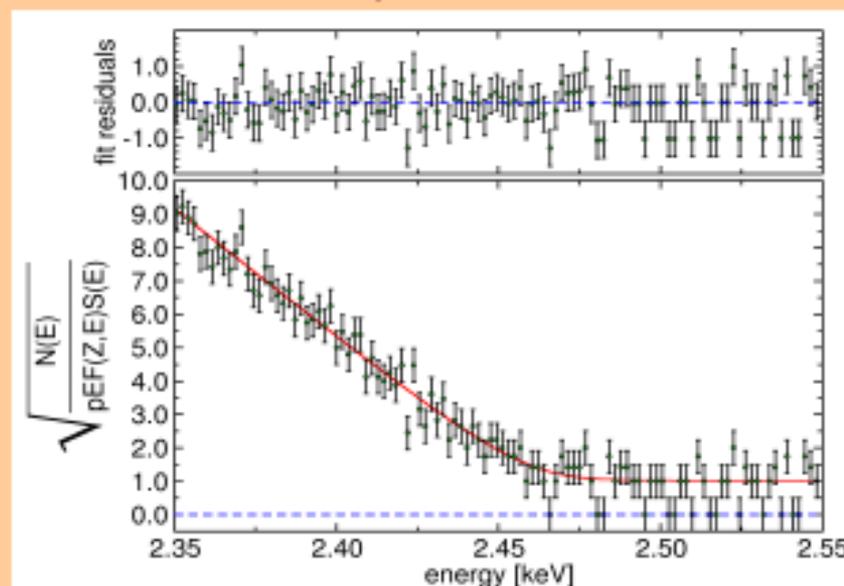
MIBETA

MIBETA experiment: 2002/03



- Si-implanted thermistors (ITC-irst)
- AgReO₄ single crystals
 - ▶ ¹⁸⁷Re activity $A_\beta = 0.54$ dec/mg/s
- 10 microcalorimeter array
 - ▶ $\langle m_{\text{AgReO}_4} \rangle = 271 \mu\text{g}$
 - ▷ $\langle A_\beta \rangle = 0.15$ decay/s
 - ▷ $m_{\text{tot}} = 2.71$ mg
 - ▶ $\langle \Delta E_{\text{FWHM}} \rangle = 28.5$ eV
 - ▶ $\langle \tau_{\text{rise}} \rangle = 490 \mu\text{s}$
 - ▷ $f_{\text{pile-up}} \approx 2 \times 10^{-4}$

- 0.6 years live time (0.45 years only β)
 - ▶ 6.2×10^6 ¹⁸⁷Re decays above 700 eV
 - ▶ $m_\nu^2 = -96 \pm 189_{\text{stat}} \pm 63_{\text{sys}} \text{ eV}^2$
 - ▶ $m_\nu < 15.2 \pm 2.0_{\text{sys}} \text{ eV}$ (90 % C.L.)

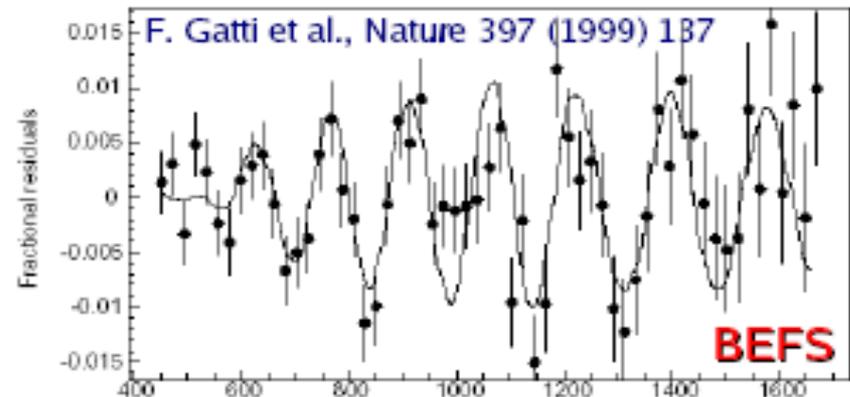
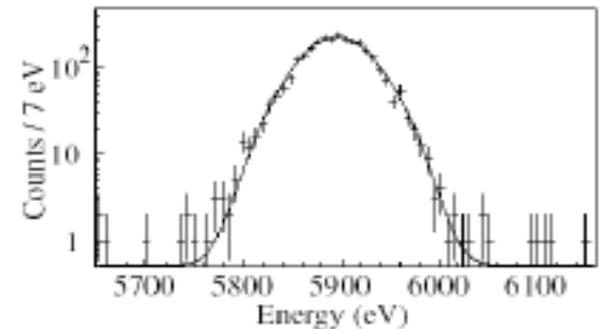
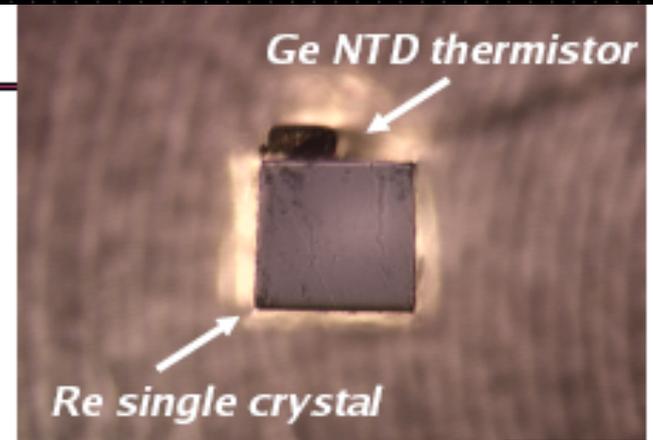
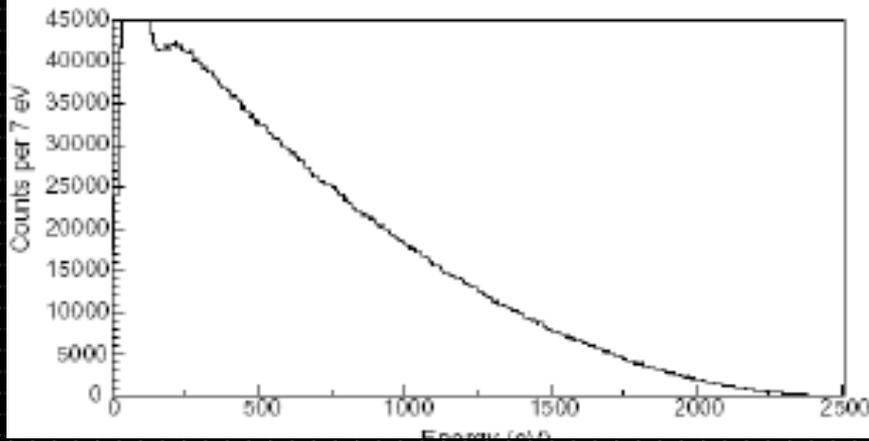


MANU

MANU experiment (1999)

- 1.6 mg metallic rhenium single crystal
- one detector only
- Ge-NTD thermistor
 - ▷ $\Delta E = 96$ eV FWHM
 - ▷ symmetric and without tails
- 0.5 years live-time
 - ▷ 6.0×10^6 ^{187}Re decays above 420 eV
 - ▷ $m_\nu^2 = -462^{+579}_{-679} \text{ eV}^2$
 - ▷ $m_\nu < 26$ eV (95 % C.L.)
- first observation of BEFS in ^{187}Re decay

M. Galeazzi et al., Phys. Rev. C 63, 014302 (2001)
F. Gatti, Nucl. Phys. B 91, 293 (2001)



Parcours de MARE

Précurseurs (MANU, MIBETA)

Semi-conducteurs collés

Mono pixel
Matrice de 10 pixels
 10^6 événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
20 eV

MARE-1 - $\Delta E \sim 10 - 30$ eV - $\tau_R \sim 100$ μ s - proche à prendre données

Semi-conducteurs collés

Matrice de 300 pixels
 10^{10} événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
2 eV

MARE-2 - But : $\Delta E \sim 1 - 5$ eV - $\tau_R \sim 0.1 - 10$ μ s - R&D en cours

TES
MMC
MKIDs

Matrices de $10^3 - 10^4$ pixels
 10^{14} événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
0.2 eV

Optimisation du single pixel (1)

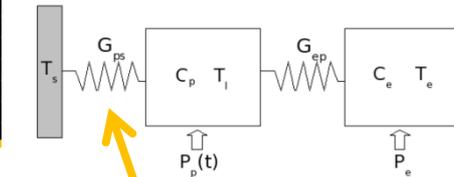
Capteur individuel : Si:P implanté $300 \times 300 \times 1.5 \mu\text{m}$

Matrice de 6×6 pixels

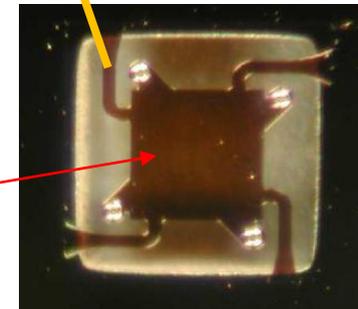
Perspective : 8 matrices = 8×36 capteurs = 288 éléments

Milano-Bicocca,
NASA

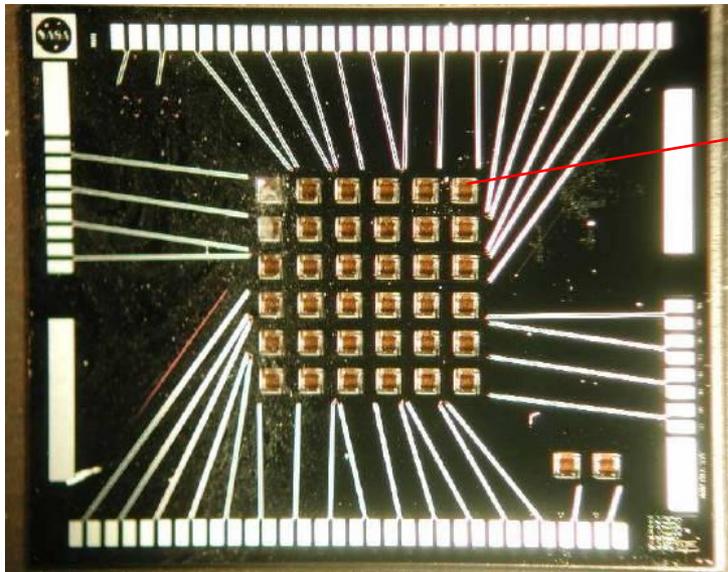
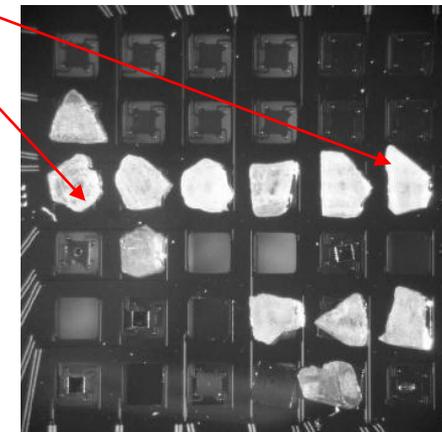
E. Ferri - LTD13



single pixel
 $0.3 \times 0.3 \text{ mm}$

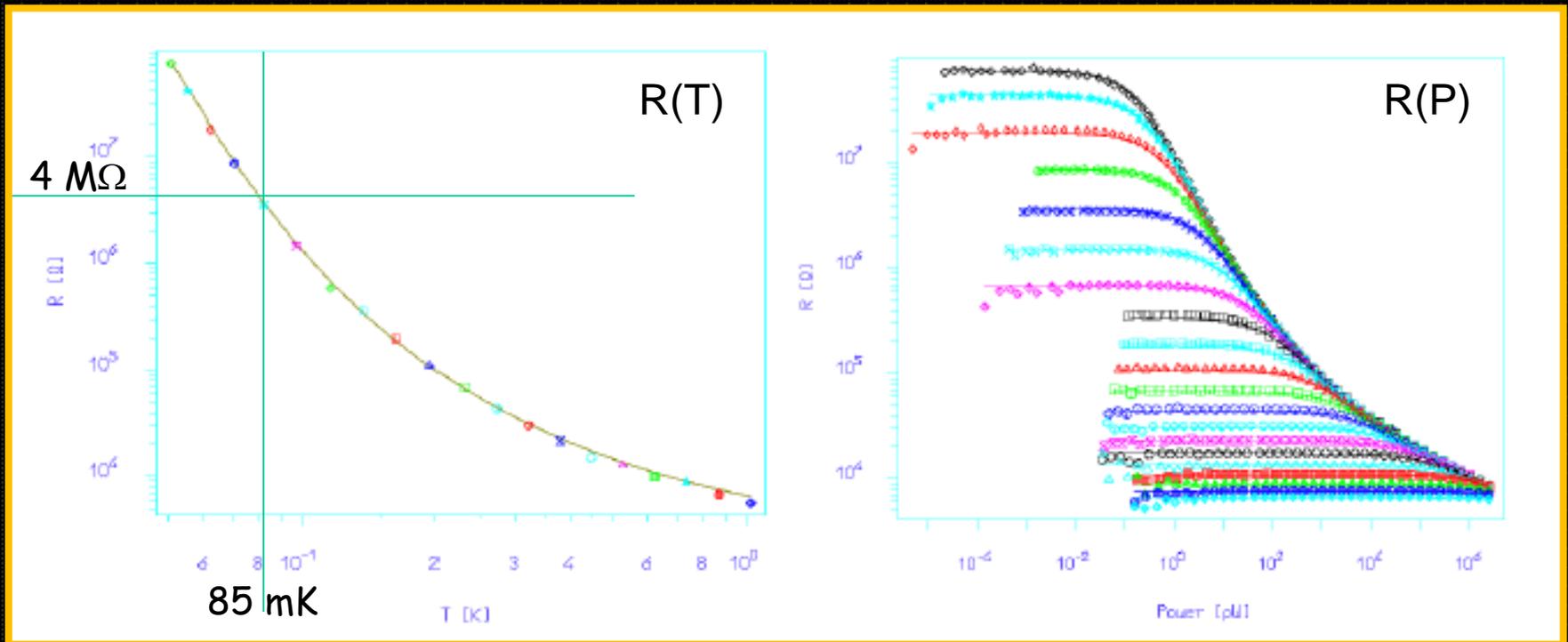


AgReO_4
crystals



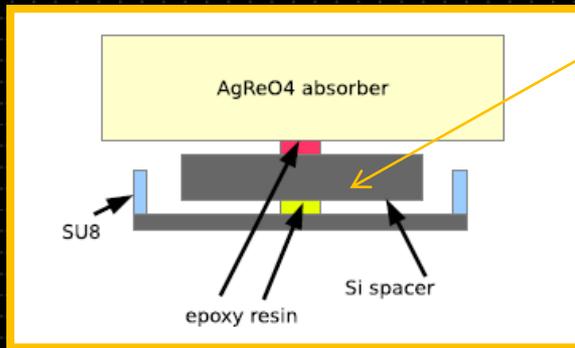
Optimisation du single pixel (2)

Paramètres statiques : courbes R(T) et R(P)

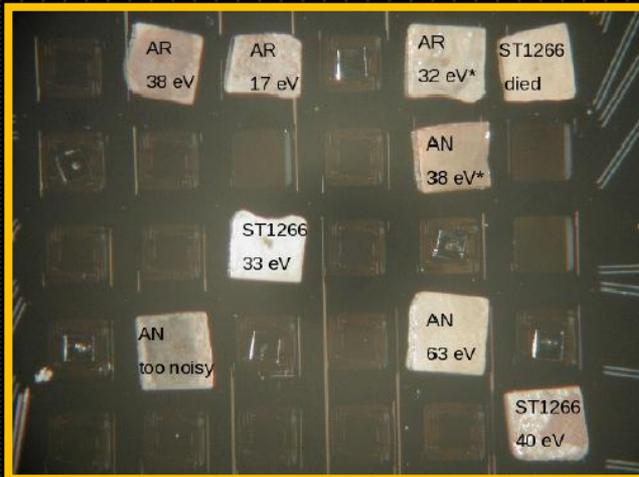


Optimisation du single pixel (3)

C'est facile dire : colle... l'optimisation du couplage est compliquée



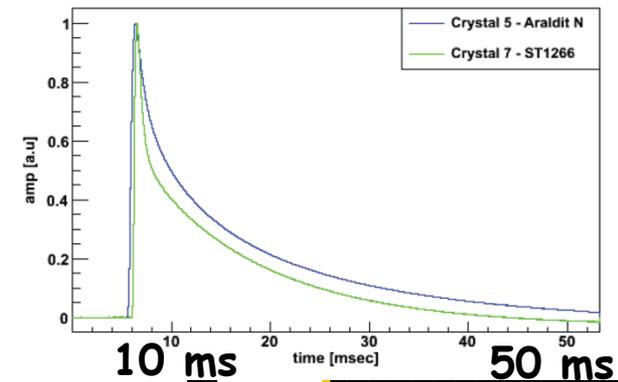
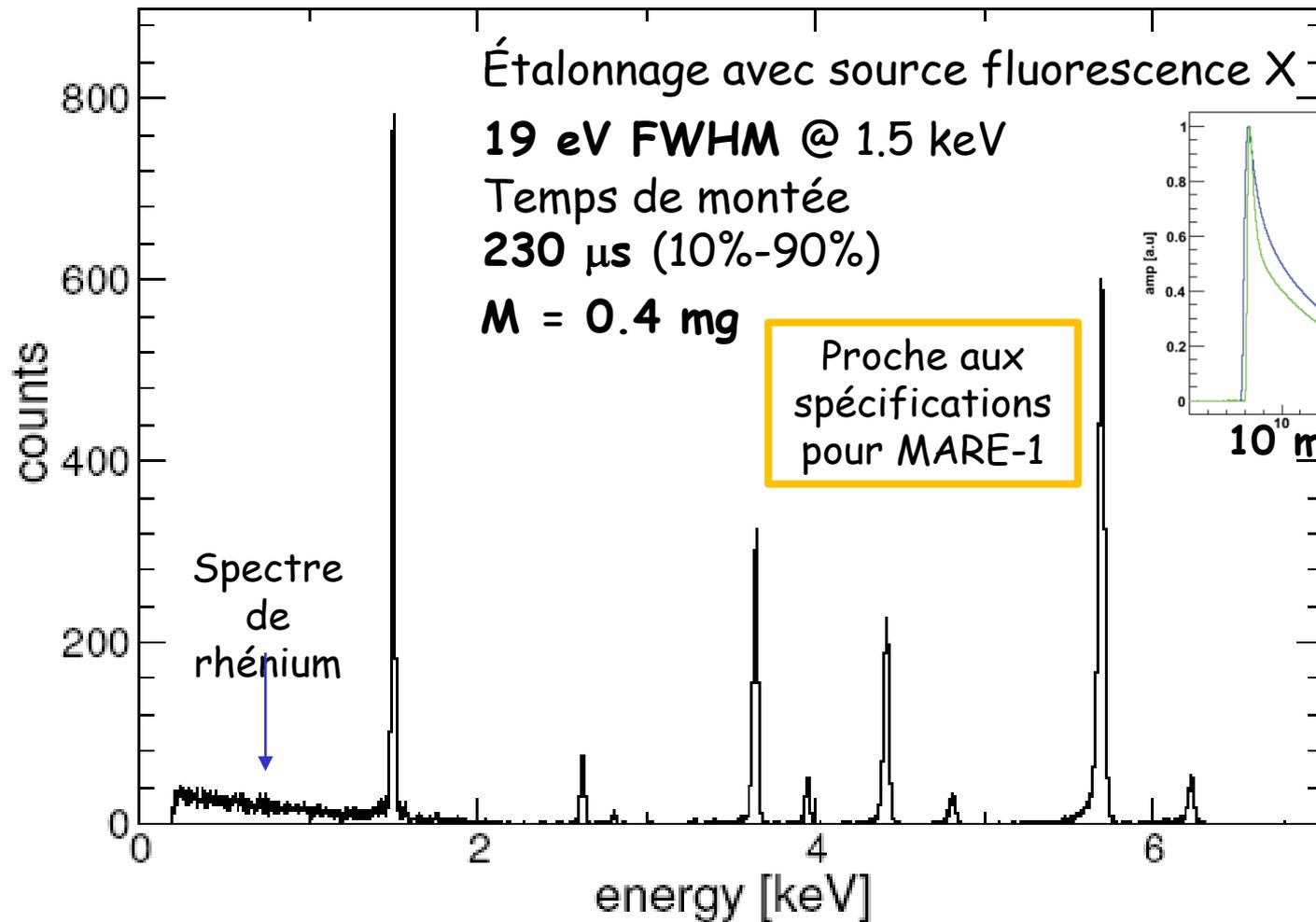
Un épaisseur entre le cristal et le capteur
 ⇒ Deux types de colle à optimiser



RUN	mass [μg]	resin	baseline [eV]	ΔE_{FWHM} [eV]	τ_{rise} [μs]	$\Delta V/6\text{keV}$ [$\mu\text{V}/(6\text{ keV})$]
4X	402	Araldit R/Araldit R	14	28 \pm 1	308 \pm 3	155.1 \pm 0.1
4X	388	Araldit R/Araldit R	28	36 \pm 2	289 \pm 5	79.1 \pm 0.3
4X	456	Araldit R/ST2850	21	35 \pm 1	347 \pm 7	92.1 \pm 0.4
4X	470	Araldit R/ST2850	33	36 \pm 2	354 \pm 9	64.2 \pm 0.3
4X	406	ST1266/ST2850	22	36 \pm 1	314 \pm 5	95.2 \pm 0.4
4X	442	ST1266/ST2850	30	38 \pm 1	380 \pm 8	61.1 \pm 0.2
4X	506	ST2850/ST2850	113	-	507 \pm 27	21.4 \pm 0.2
4X	430	ST2850/ST2850	132	-	552 \pm 46	27.2 \pm 0.2
4X	390	SU8/ST2850	131	-	663 \pm 42	24.4 \pm 0.1
4X	386	SU8/ST2850	190	-	712 \pm 22	17.6 \pm 0.2
6X	273	Araldit R/Araldit R	18	22 \pm 1	200 \pm 3	136.3 \pm 0.3
6X	300	Araldit R/Araldit R	12	17 \pm 1	352 \pm 4	145.1 \pm 0.3
6X	427	Araldit N/Araldit N	36	44 \pm 1	240 \pm 9	64.2 \pm 0.3
6X	*402	Araldit R/Araldit R	35	36 \pm 1	273 \pm 4	94.2 \pm 0.3

Optimisation du single pixel (4)

Exemple de spectre X à basse énergie

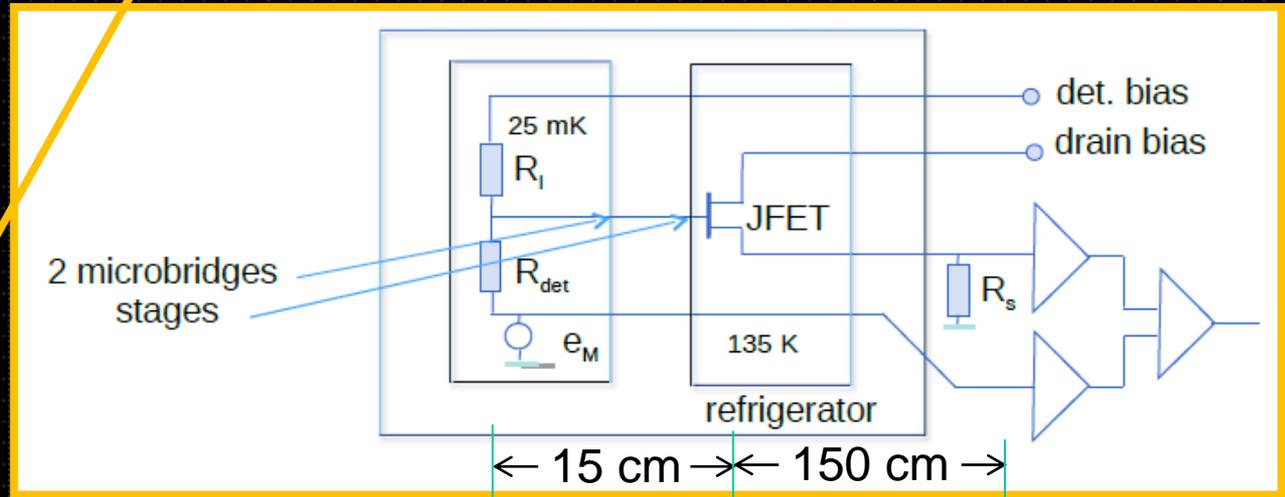


Installation pour 288 canaux



Chambre de mélange

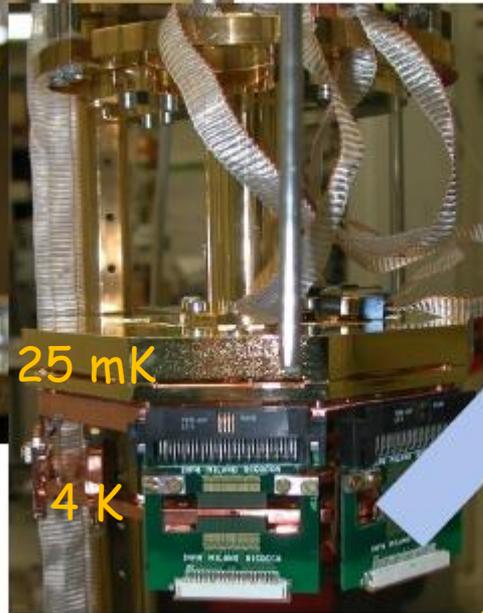
Prise thermique à 4.2 K



Installation pour 288 canaux

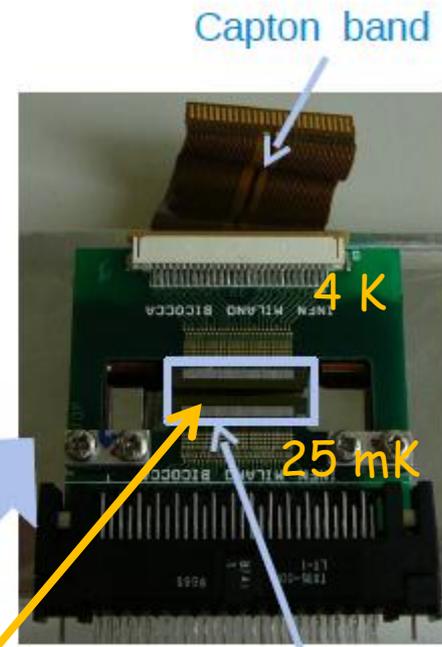


manganin wiring thermalization



25 mK

4 K

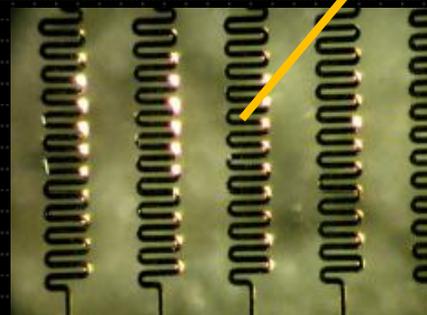


Capton band

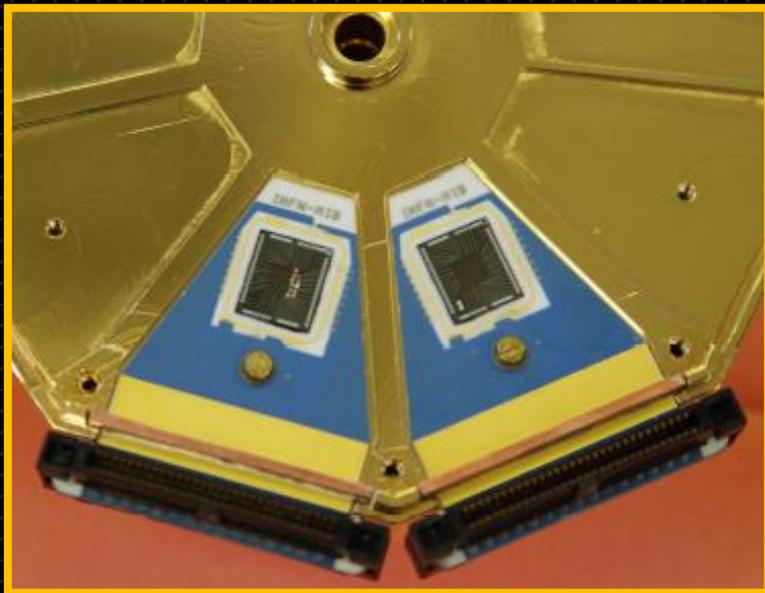
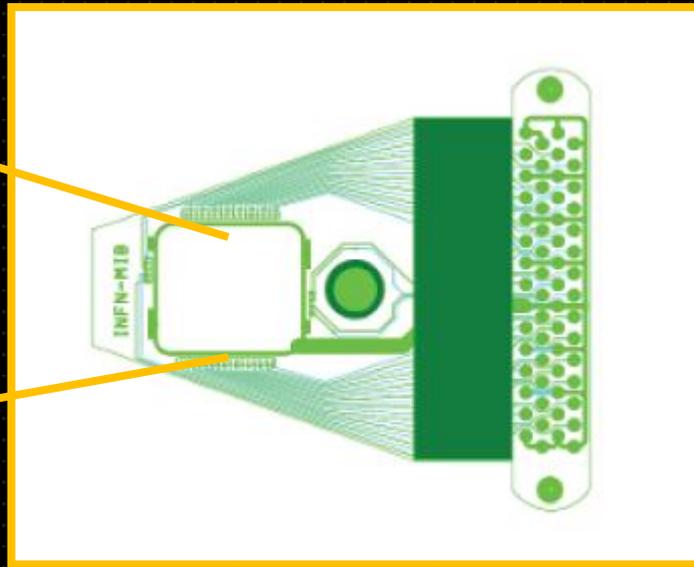
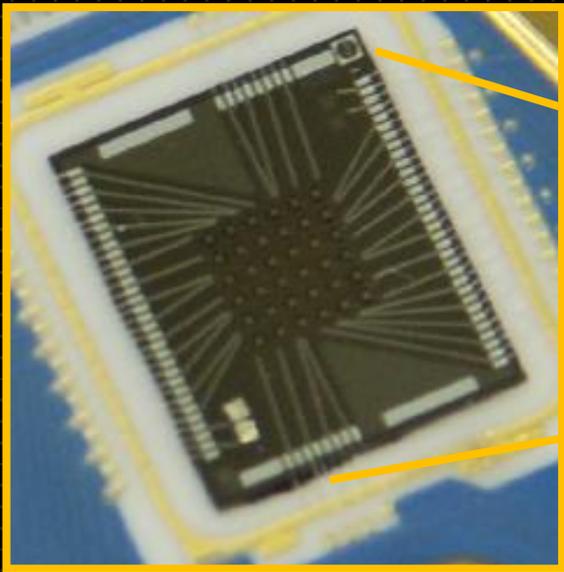
4 K

25 mK

Ti microbridges



Installation pour 288 canaux



Trois problèmes majeurs:

- Echec des microponts (remplacés par fils inox)
- Radiation 4 K (addition d'un écran 25 mK)
- Thermalisation carte détecteurs en céramique



Prise de données pas encore démarrée

Parcours de MARE

Précurseurs (MANU, MIBETA)

Semi-conducteurs
collés

Mono pixel
Matrice de 10 pixels
 10^6 événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
20 eV

MARE-1 - $\Delta E \sim 10 - 30$ eV - $\tau_R \sim 100$ μ s - proche à prendre données

Semi-conducteurs
collés

Matrice de 300 pixels
 10^{10} événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
2 eV

MARE-2 - But : $\Delta E \sim 1 - 5$ eV - $\tau_R \sim 0.1 - 10$ μ s - R&D en cours

TES
MMC
MKIDs

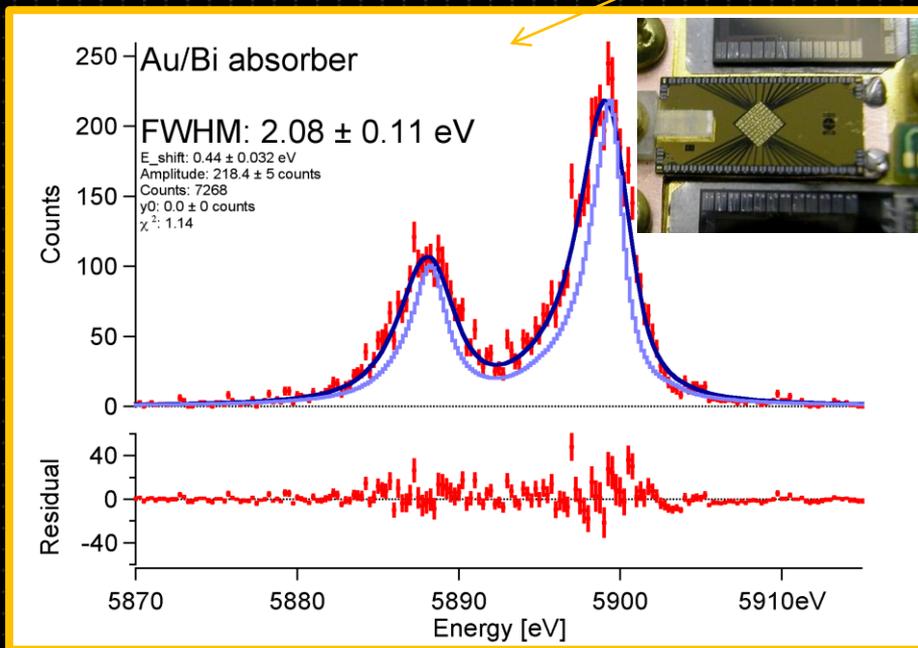
Matrices de $10^3 - 10^4$ pixels
 10^{14} événements

$\sigma(\langle M_\beta \rangle)$
 \sim
0.2 eV

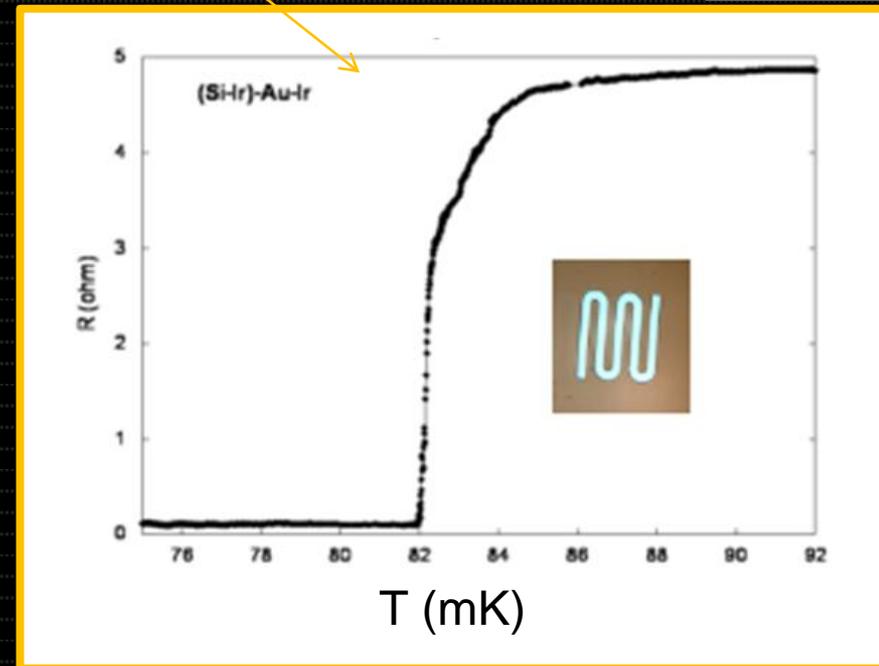
Re métallique + TES (1)

Technologie du capteur TES : double couche / multicouche (effet proximité) \Rightarrow options : **MoAu** ou **(Si-Ir)-AuIr**

NASA Goddard



Genova



Difficultés :

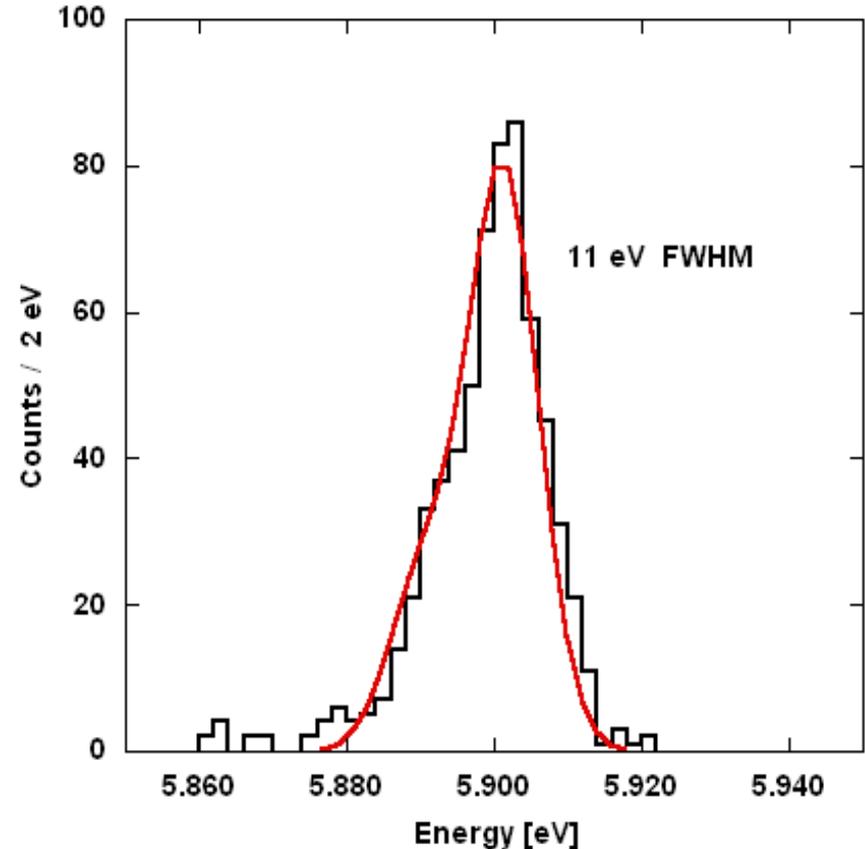
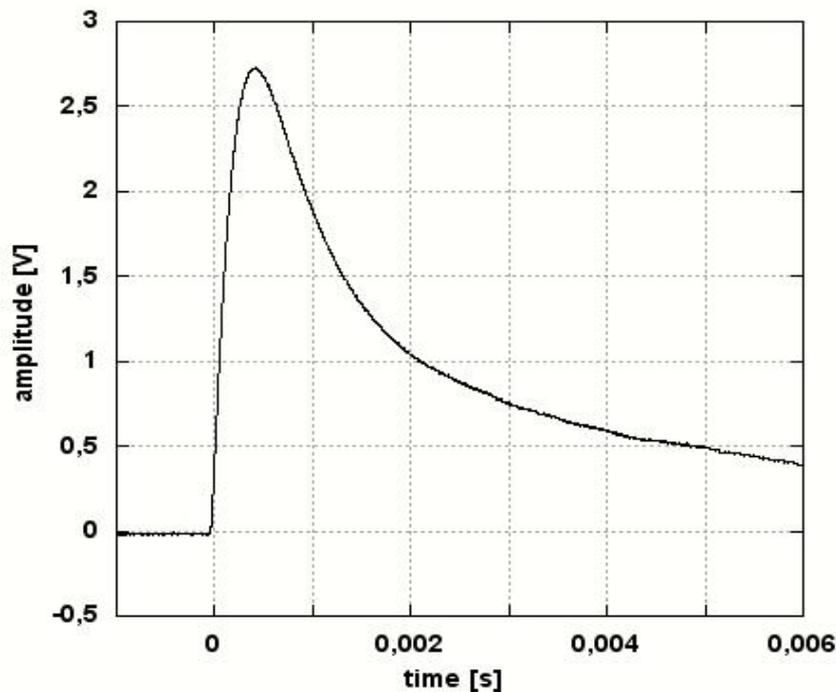
- Couplage des cristaux de Re au TES
- Thermalisation dans les cristaux de Re

Re métallique + TES (2)

Pixel individuel avec cristal de Re collé à TES IrAu :

Genova

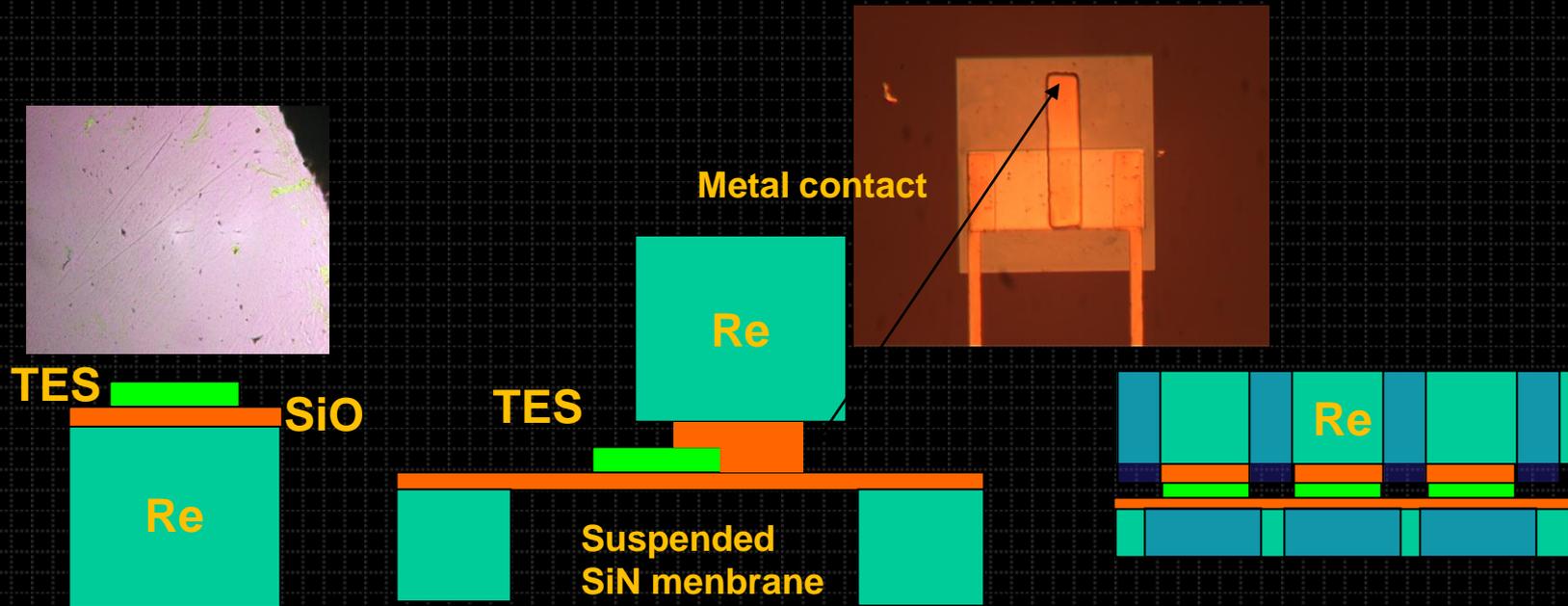
- $\Delta E_{fwhm} = 11 \text{ eV FWHM}$
- Temps montée = $160 \mu\text{s}$
- $M_{\text{Re}} = 0.2 \text{ mg}$



Beaucoup de difficultés : signal lent (\Rightarrow couplage), masse petite, problèmes de reproductibilité

Re métallique + TES (3)

Hypothèses de couplage :



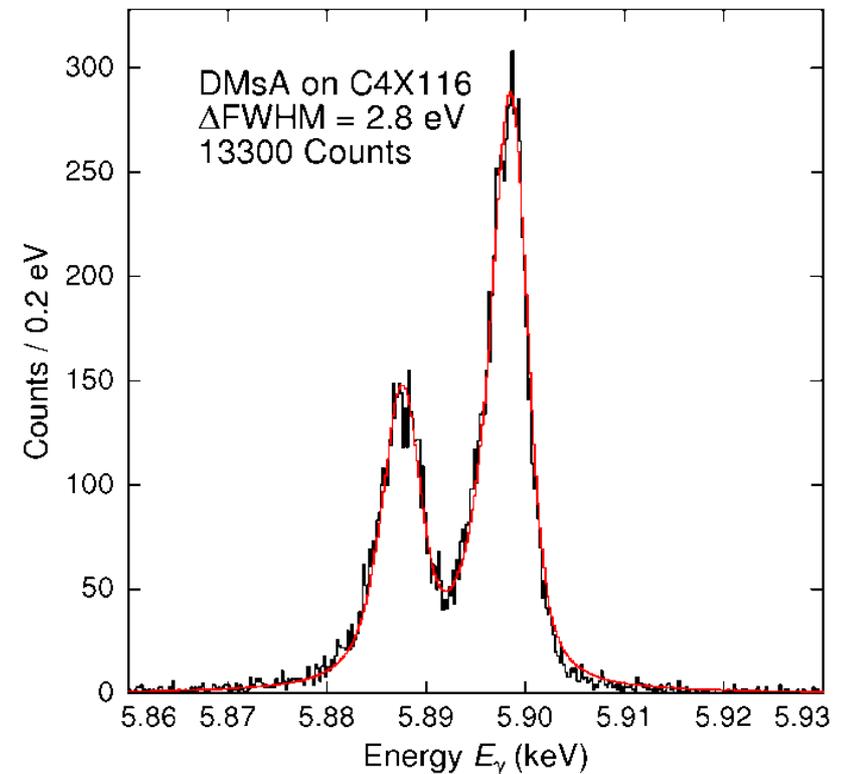
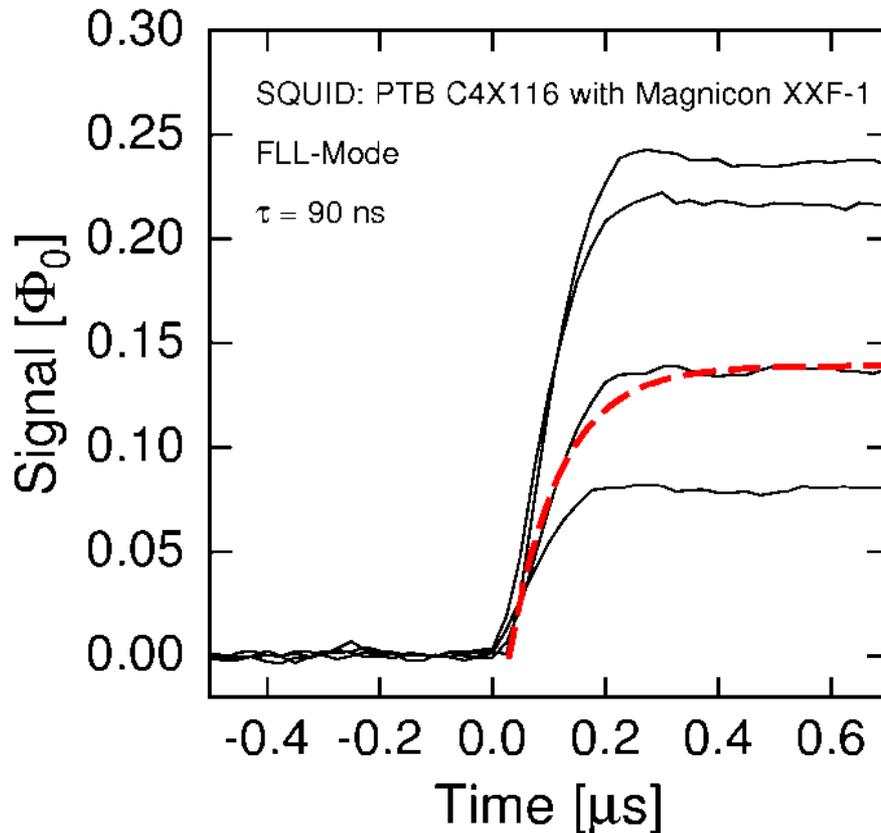
Re métallique + MMC (1)

P.C. Ranitzsch - LTD14

Normalement les MMCs sont la solution idéal pour MARE-2
Avec absorbeur d'or, résolution temporelle et énergétique dans les spécifications :

Temps montée = 0.1 μ s

$\Delta E_{fwhm} = 2.8$ eV FWHM



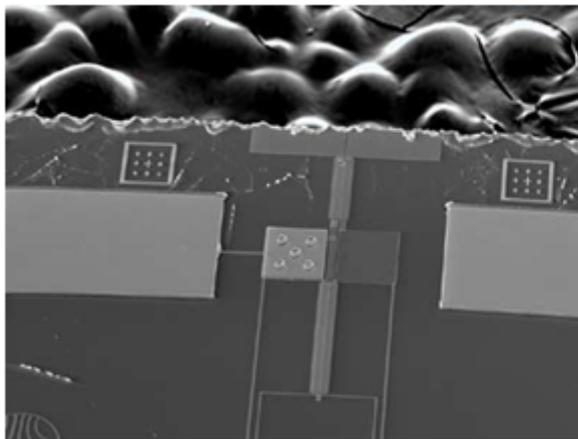
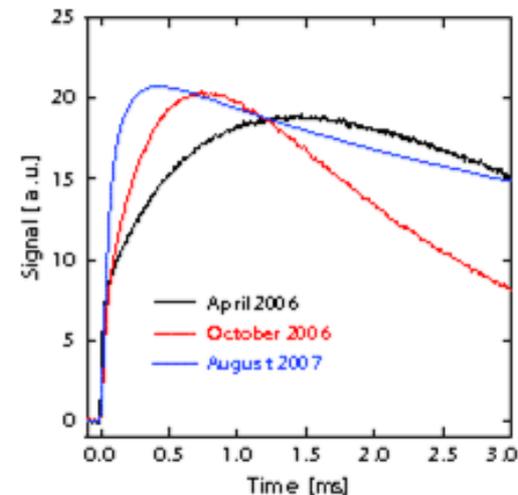
Re métallique + MMC (2)

Encore une fois, le problème c'est le **couplage du Re**

Approche systématique :

1st generation (2005-2010):

- Hand-made detectors on SQUID with meander shaped pick-up coil
- large fraction of the expected pulse height was observed
- slow rise time
- faster rise time by reducing glue layers ←



2nd generation (2008-now):

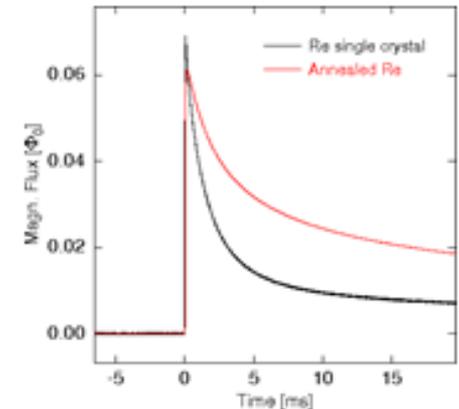
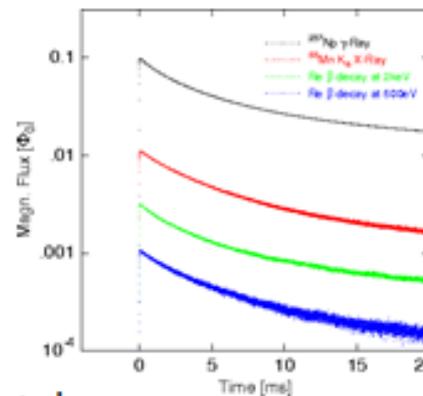
- Detector designed for ^{187}Re experiment
 - $245 \times 245 \mu\text{m}^2$ sensor area
 - Optimized for ~ 1 Bq Re crystals
 - Diffusion welding for metallic contact between absorber and sensor
- soudage par diffusion** ←

Re métallique + MMC (3)

Résultats avec les échantillons de la 2eme génération :

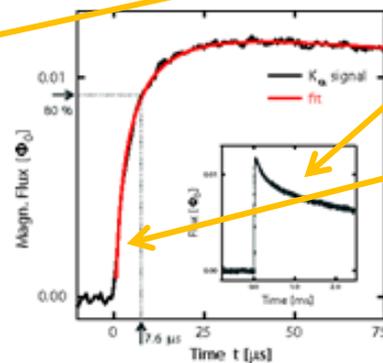
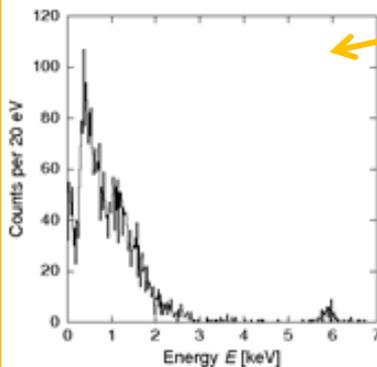
Several different absorbers tested:

- 245x245x30 μm^3 polycristalline foil
- 220x220x500 μm^3 single crystal
- 250x250x500 μm^3 single crystal on large area 1x1mm² sensor
- 250x250x500 μm^3 annealed single crystal



Summarized results:

Encore une fois :
Problème de thermalisation



- Reduced pulse height (down to 3% of expectation)
- Long decay time ($\tau > 600\text{ms}$ @ 30 mK)
- Fast rise time (60% of pulse height with $\tau \sim 3 \mu\text{s}$)
- No pulse shape variation with energy
- $f\Delta T dt$ agrees roughly with expectation
- Crystal treatment plays a role

Re métallique + MKIDs

La difficulté avec le Re métallique a imposée une pause de réflexion sur cette voie

➔ L'R&D continue mais autres solutions sont poursuivies:

S. Doyle - 23/5

① Couplage du Re métallique aux MKIDs

Les excitations qui permettent la détection sont quasi-particules, pas phonons

Programme a` Milano-Bicocca
Grenoble

② Intensification de la voie de l'Holmium

**MARE
ECHO**

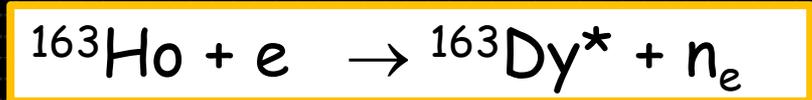
Les concepts des détecteurs



Rhénium naturel: ~ 1 Bq/mg

Développement d'un détecteur fait de Rhénium naturel

Défi : Faire bien marcher le détecteur de Re
 $T_c = 1.6$ K

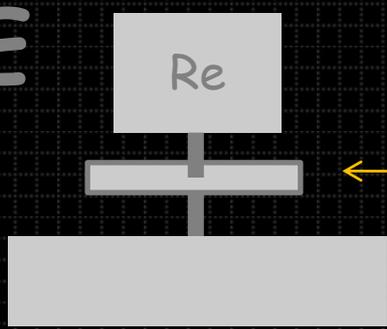


$\sim 10^{11}$ noyaux donnent ~ 1 Bq

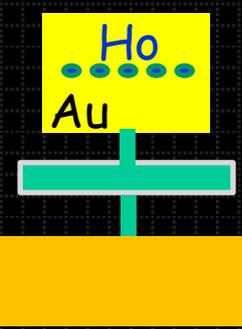
Intégration de noyaux de Holmium dans un absorbeur pré-optimisée

Défi : Produire, séparer, intégrer noyaux de ^{163}Ho dans un absorbeur approprié

MARE



Bain (< 100 mK)



MARE ECHO

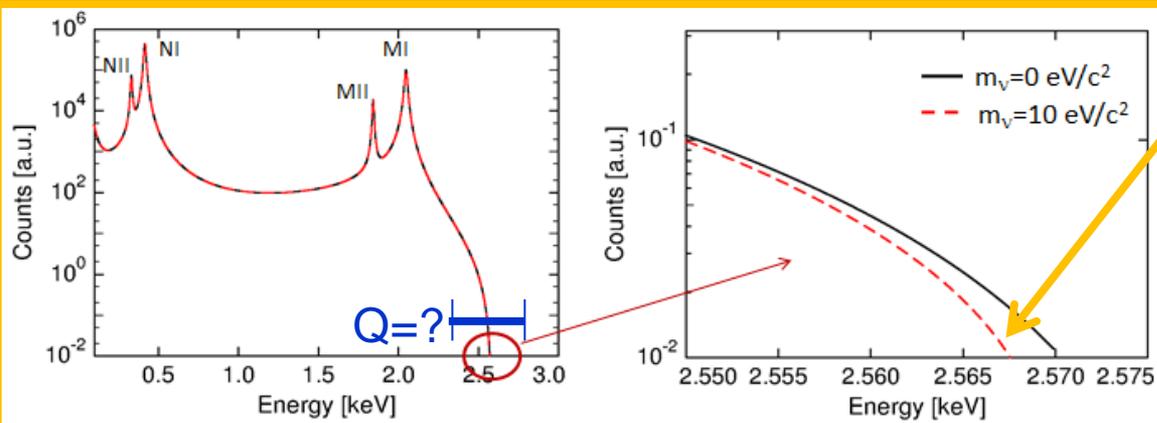
Mesurer la masse du neutrino en utilisant la capture électronique



Si la mesure est calorimétrique, l'énergie mesurée est l'**énergie de liaison** de l'électron capturé

On attend un spectre à raies. Chaque raie a une largeur liée au temps de désexcitation (largeur naturelle)

Dans tout cas, le spectre s'arrête à Q et est **modifié au point final** par la masse du neutrino



La mesure est tant plus sensible tant que la Q -valeur est proche à la raie la plus énergétique (M_I)

$$E(M_I) = 2.05 \text{ keV}$$



$$Q = 2.2 - 2.8 \text{ keV}$$

Sensibilité d'une expérience basée sur l' ^{163}Ho

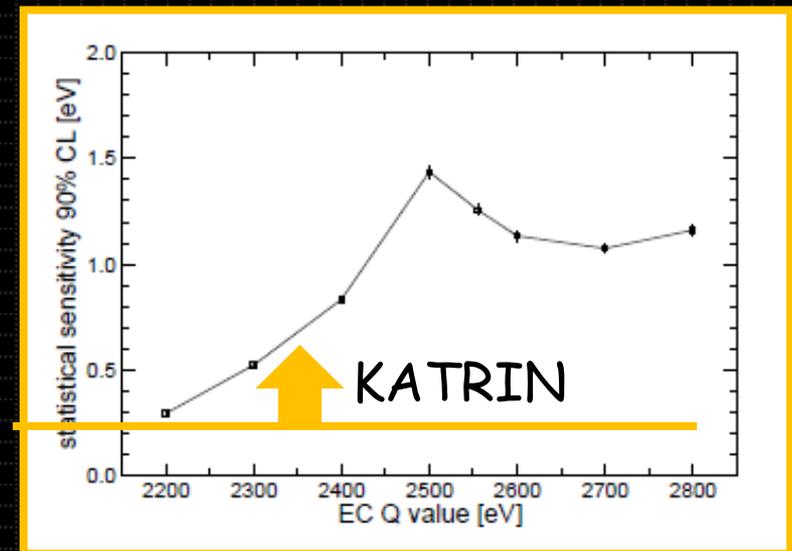
Les demandes pour les détecteurs sont très similaires à celles de l'expérience avec le Rhénium

arXiv:1202.4763v2

- Résolution énergétique excellente ($\sim 1 \text{ eV}$)
- Résolution temporelle excellente ($\leq \sim 1 \mu\text{s}$)
- Possibilités de multiplexing

Exemple : **expérience pilote** avec

- $\Delta E_{\text{fwhm}} = 1.5 \text{ eV}$
- Résolution temporelle = $1 \mu\text{s}$
- Statistique = 8.5×10^{13} événements



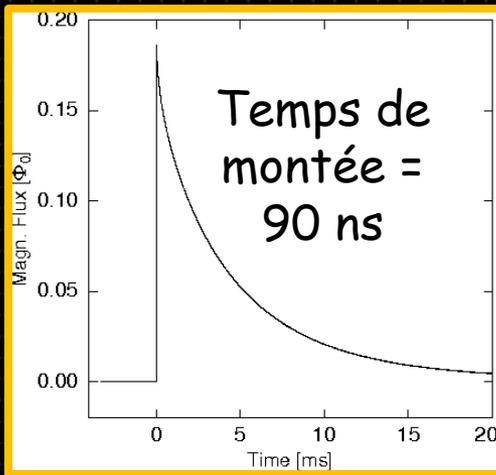
La détermination du Q-valeur peut être faite à travers une expérience calorimétrique à basse température de petite taille

Situation expérimentale de l' ^{163}Ho

Expérience préliminaire à pixel individuel

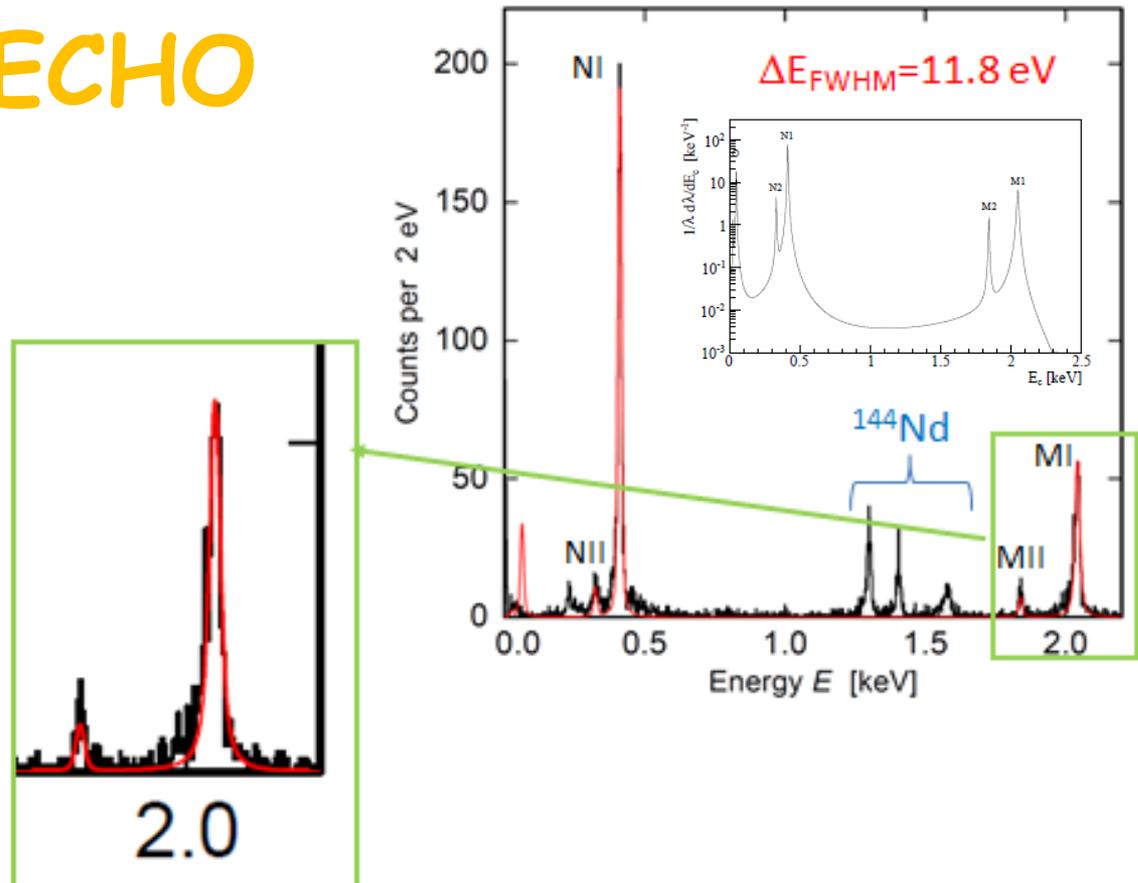
P.C. Ranitzsch - LTD14

- Holmium implanté au CERN (ISOLDE) dans un absorbeur d'or
- Configuration à 4π et 99% d'efficacité calorimétrique
- Absorbeur d'or intégré dans un MMC



Performance non dégradée par implantation

ECHO



Activité en cours

Le concept est appliqué à` trois types différents de capteurs :

MMC → ECHO (Heidelberg...)

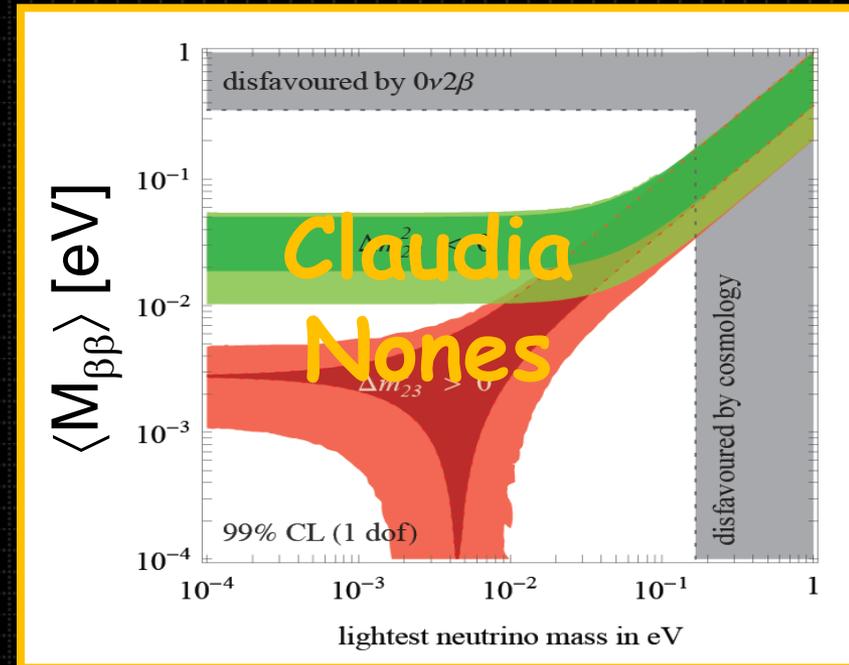
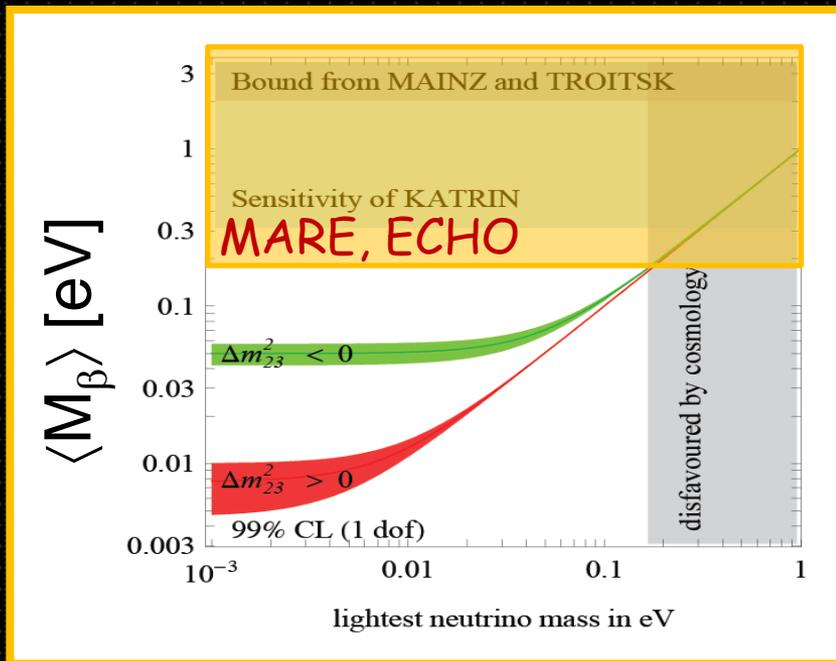
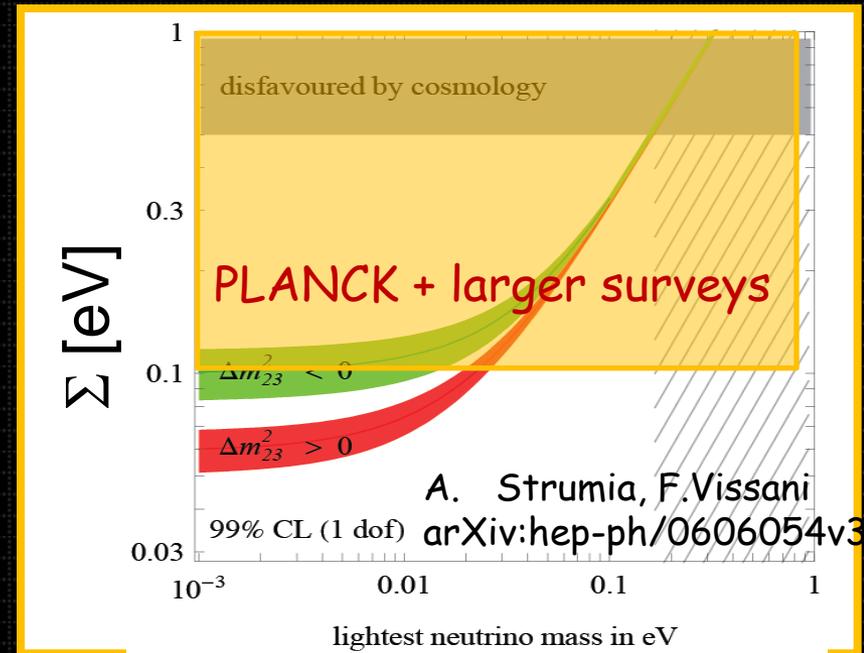
TES → MARE (Genova, NASA-Goddard...)

MKID → Milano-Bicocca

Forte activité sur le problème non banal de la production, purification et intégration de l' ^{163}Ho

Conclusions: contraintes futures

Le rôle des détecteurs à très basse température est extrêmement relevant pour des développements futures de la physique du neutrino



Bibliographie

Pour le propriétés des neutrinos

A. Strumia, F. Vissani, arXiv:hep-ph/0606054v3 (2006)

T. Schwetz, M. Tórtola, J. W. F. Valle,, arXiv:1103.0734v2 (2011)

Pour KATRIN et les mesure directes en général

E.W. Otten, C. Weinheimer, Rep. Prog. Phys. 71, 086201 (2008)

Pour les précurseurs de MARE

M. Galeazzi et al., Phys. Rev. C63 (2001) 014302.

F. Gatti et al., Nucl.Phys. B91 (2001) 293

C. Arnaboldi et al., Phys.Rev. Lett. 91 (2003) 161802.

M. Sisti et al., Nucl. Inst. and Meth. A520 (2004) 125.

Pour MARE

the MARE proposal, <http://mare.dfm.uninsubria.it>

E. Andreotti, *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 572 (2007) 208.

A. Nucciotti, proceeding of Neutrino 2010, Athens, Greece, June 14-19, 2010, arXiv:1012.2290v1

Pour la sensibilité de MARE (Rhénium)

A. Nucciotti, E. Ferri, O. Cremonesi, Astropart. Phys. 34, 80 (2010)

Pour la methode de l'Holmium:

A. De Rujula, M. Lusignoli, Phys. Lett. B 118, 429 (1982)

F.Gatti et al., Phys. Lett. B398 (1997) 415.

M. Galeazzi et al., arXiv:1202.4763v2

Pour la thermalisation dans le Rhenium et résultats sur l'Holmium

Porst, J.-P., et al. Journal of Low Temperature Physics 151, 436-442 (2008)

P. C.-O. Ranitzsch et al., Development of metallic magnetic calorimeters for high precision measurements of calorimetric ^{187}Re and ^{163}Ho spectra, to be published in Journal of Low Temperature Physics (2012)

Production ^{163}Ho

- neutron activation in nuclear reactor of ^{162}Er [$^{162}\text{Er}(n,\gamma)^{163}\text{Er}(75\text{min})\rightarrow^{163}\text{Ho}$] with a cross section σ of about 180 barns;
- alpha particle bombardment of ^{165}Ho target [$^{165}\text{Ho}(^4\text{He},*)^{163}\text{Ho}$] with a σ of about 0.05 barns at 55 MeV;
- gamma bombardment of ^{165}Ho target [$^{165}\text{Ho}(\gamma,2n)^{163}\text{Ho}$] with a σ of about 0.14 barns at 17 MeV.