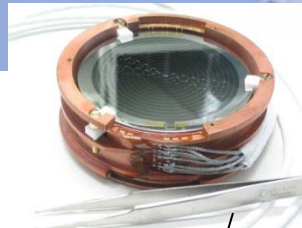
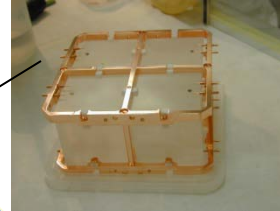


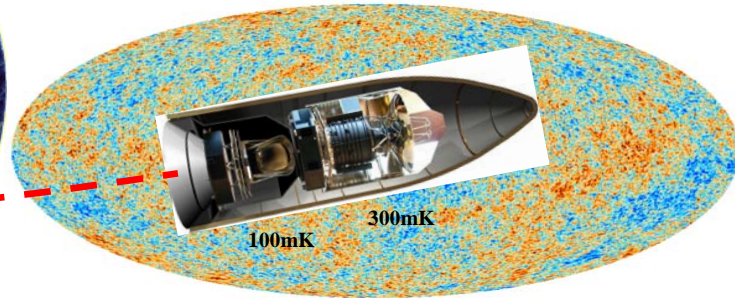
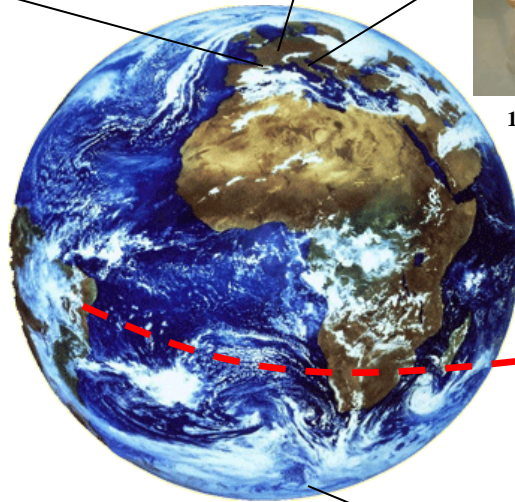
20mK



18mK



10mK



100mK 300mK

# Détecteurs bolométriques refroidis

## 2. Applications



300mK



??



## Applications des bolomètres

### En spectroscopie

- X
- $\alpha$
- Noyaux de Reculs
- Neutrons rapides

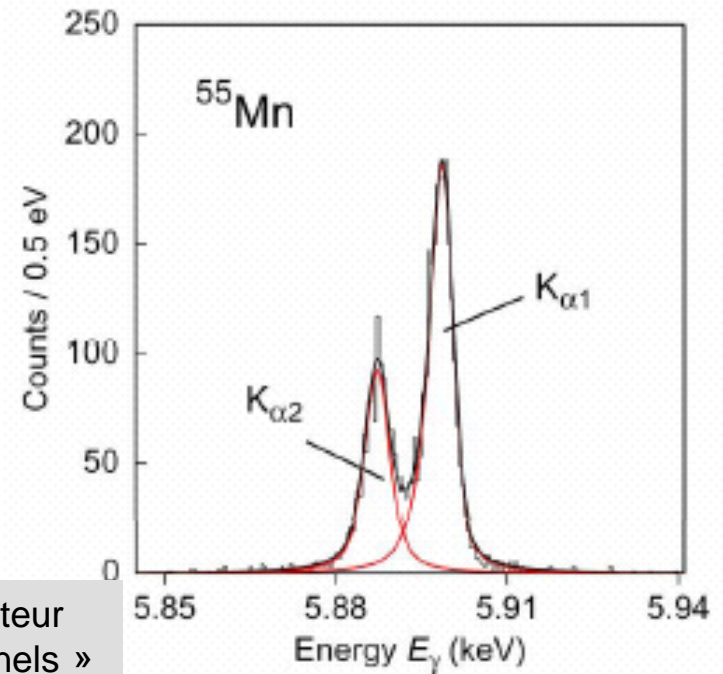
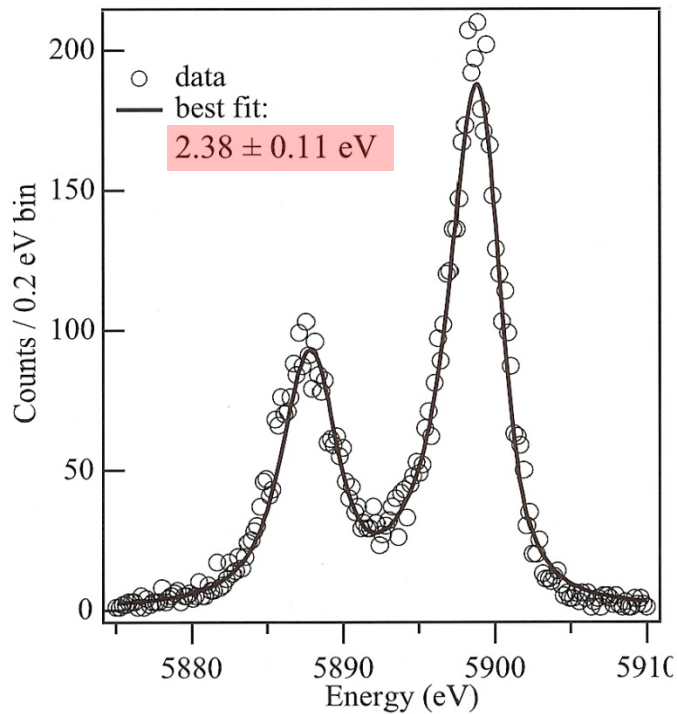
### Sur faisceaux

### En physique fondamentale

- Rayonnement fossile cosmologique (CMB): Planck-HFI
- Neutrino:
  - Masse
  - Désintégration double bêta sans neutrino  $\beta\beta 0\nu$
- Autres événements rarissimes (hors  $\beta\beta 0\nu$ )
  - Désintégrations alpha
  - Détection de la Matière noire

# □ spectroscopie X

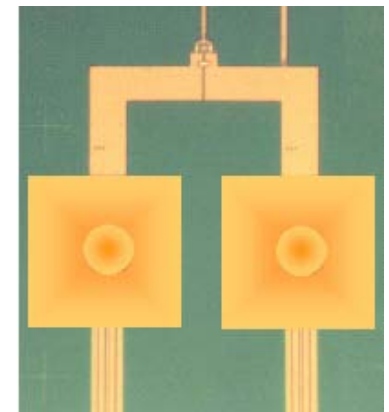
# Spectroscopie X très haute résolution...monopixels



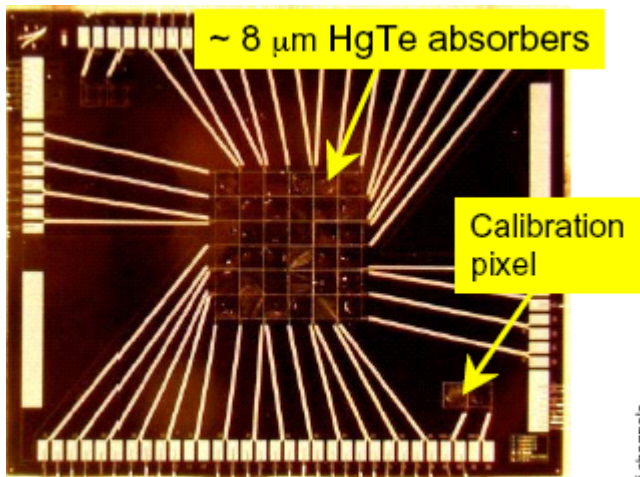
Rappel: les détecteur Si(Li) « conventionnels » plafonnent à 110eV !

- bolomètre semi-métallique à lecture TES (Mo-Cu); 100mK
- Cible Bi  $250 \times 250 \times 1.5 \mu\text{m}^3$
- $\tau \approx 230 \mu\text{s}$
- NIST, Boulder, Colorado

- bolomètre métallique à lecture magnétique (Au:Er); T=35mK
- Cible Au  $160 \times 160 \times 5 \mu\text{m}^3$
- $3.4 \text{ eV @ } 6 \text{ keV}$
- $\tau \approx \text{ms}$ ; efficacité >98 %
- KIP Heidelberg



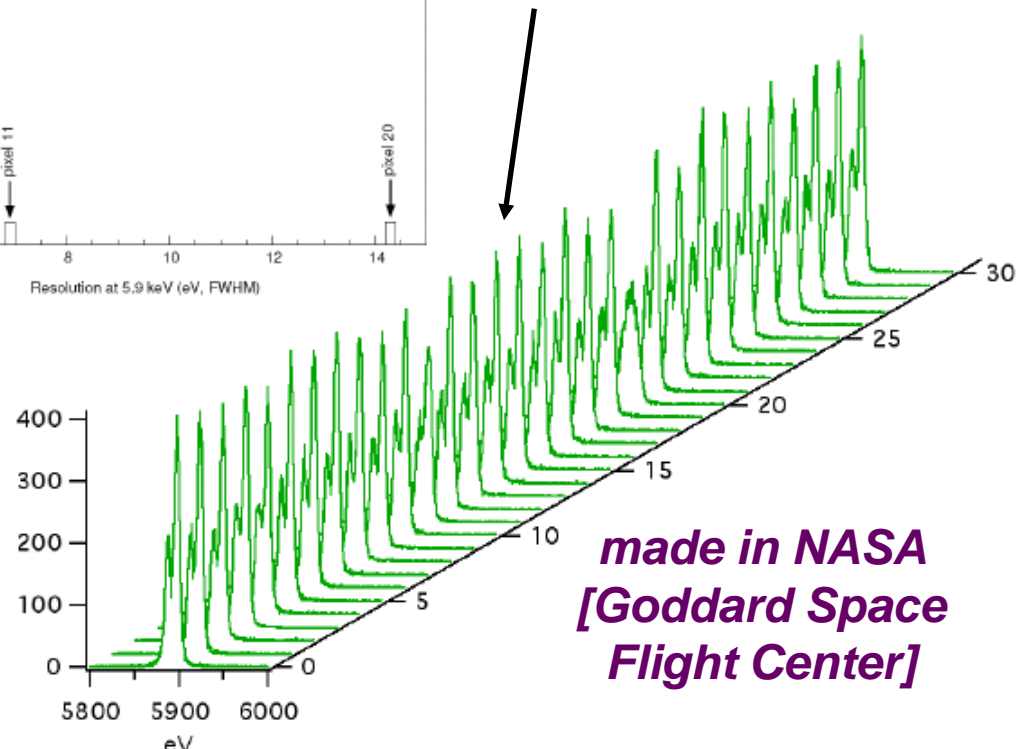
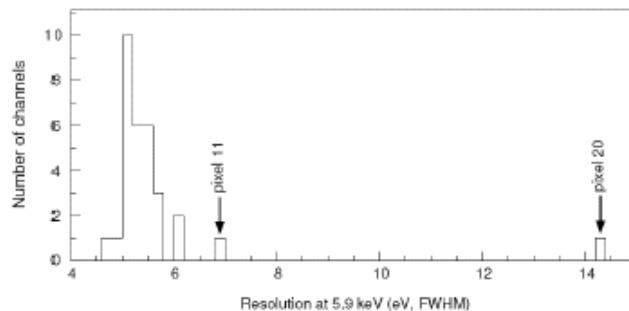
# Spectroscopie X: matrice 6 x 6 de l'instrument XRS



Pixels are 625  $\mu\text{m}$  square, or 30"

- lancé le 10 juillet 2005
- objectifs: amas de galaxies, trous noirs, SuperNovae
- premier satellite à  $T < 100\text{mK}$  dans l'espace (ADR+cryocooler+Néon solide) !  
 Note: pb. cryogénique  
 3 semaines après le lancement  
 → XRS s'est réchauffé !

- matrice 6x6 à bord de Suzaku (ex Astro-E2)
- télescope: miroir en incidence rasante
- thermométrie Si implanté;  $T=60\text{mK}$
- résolution moyenne:  $\Delta E=5.5\text{ eV FWHM @ } 5.9\text{ keV}$

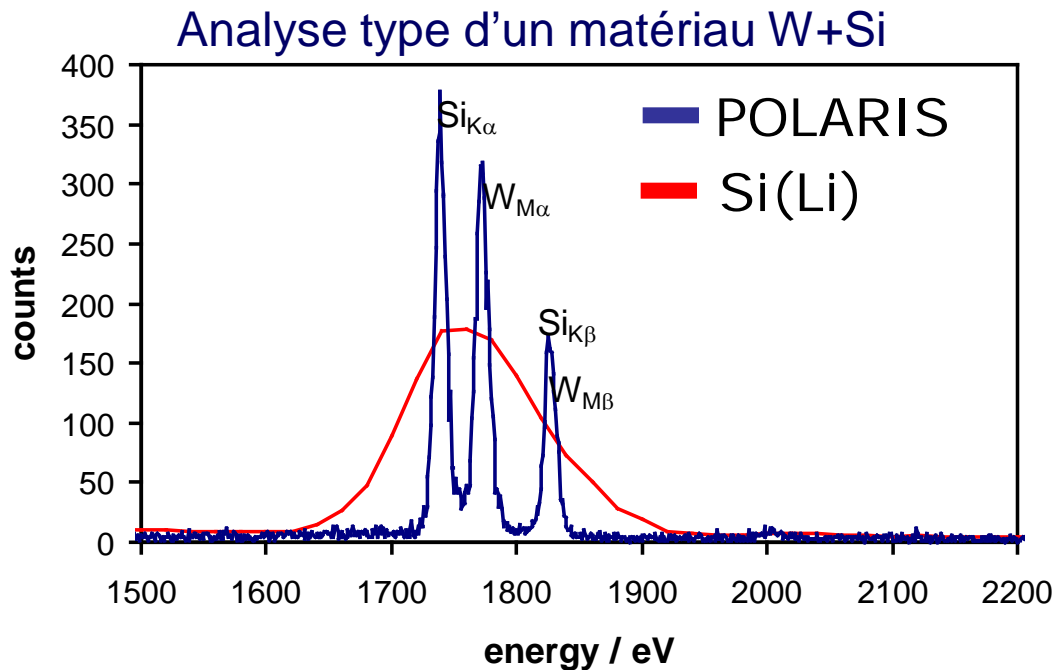


*made in NASA  
 [Goddard Space  
 Flight Center]*

Successeur: SXS (Soft X-ray Spectrometer)/Astro-H (@ 50mK; NASA/JAXA, 2014)

# Analyse par fluorescence X: offre commerciale

- POLARIS® (VeriCold technologies)
- Spectroscopie X (< 5 keV)
- Adaptation directe sur MEB (Microscope Electronique à Balayage)
- Résolution 15eV @ 1.5 keV
- ADR 100mK sans fluide cryogénique
- Microcalorimètre X à TES

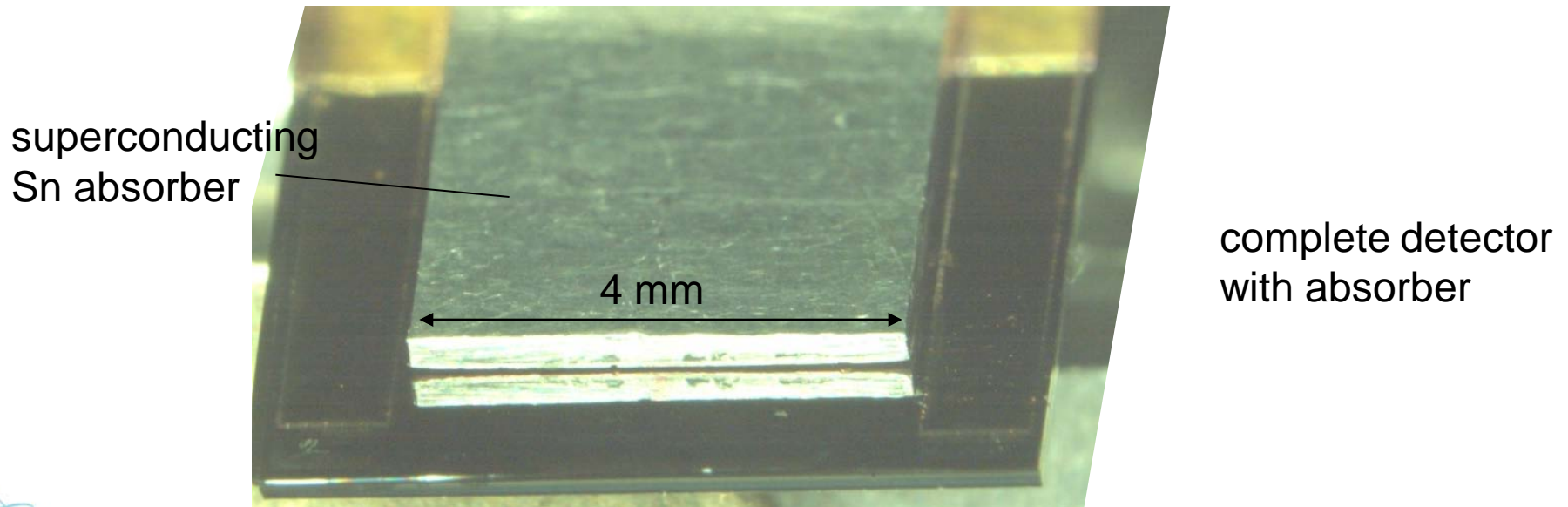
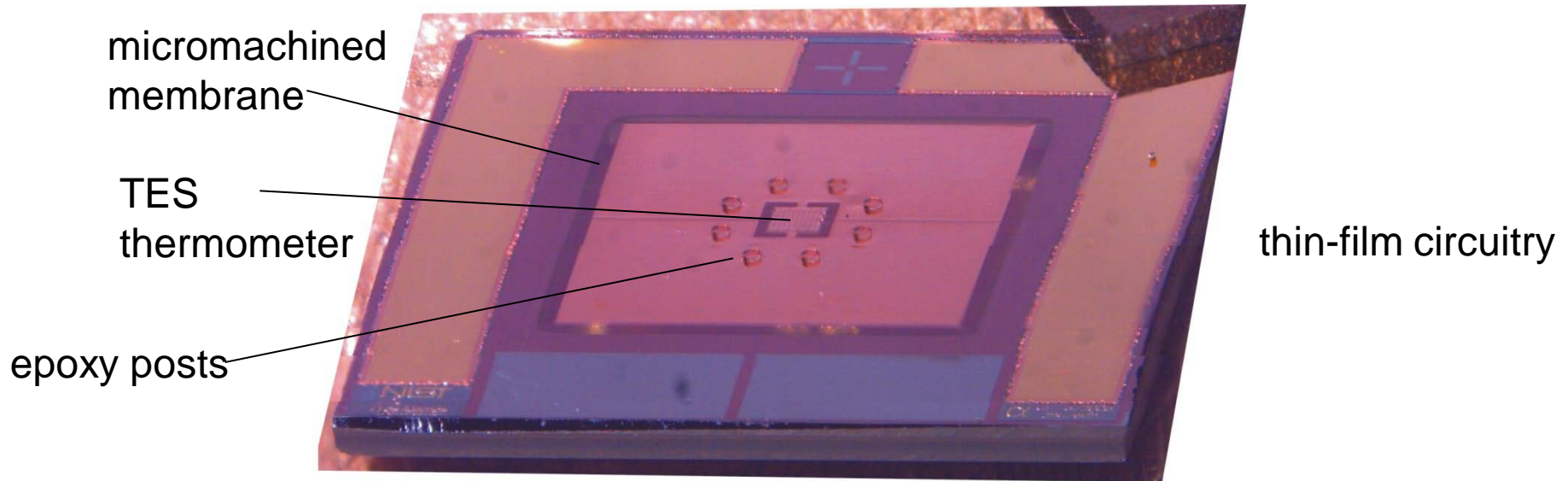


Coût ≈ 500 k€

# □ spectroscopie $\alpha$

# Microcalorimètres alpha du NIST

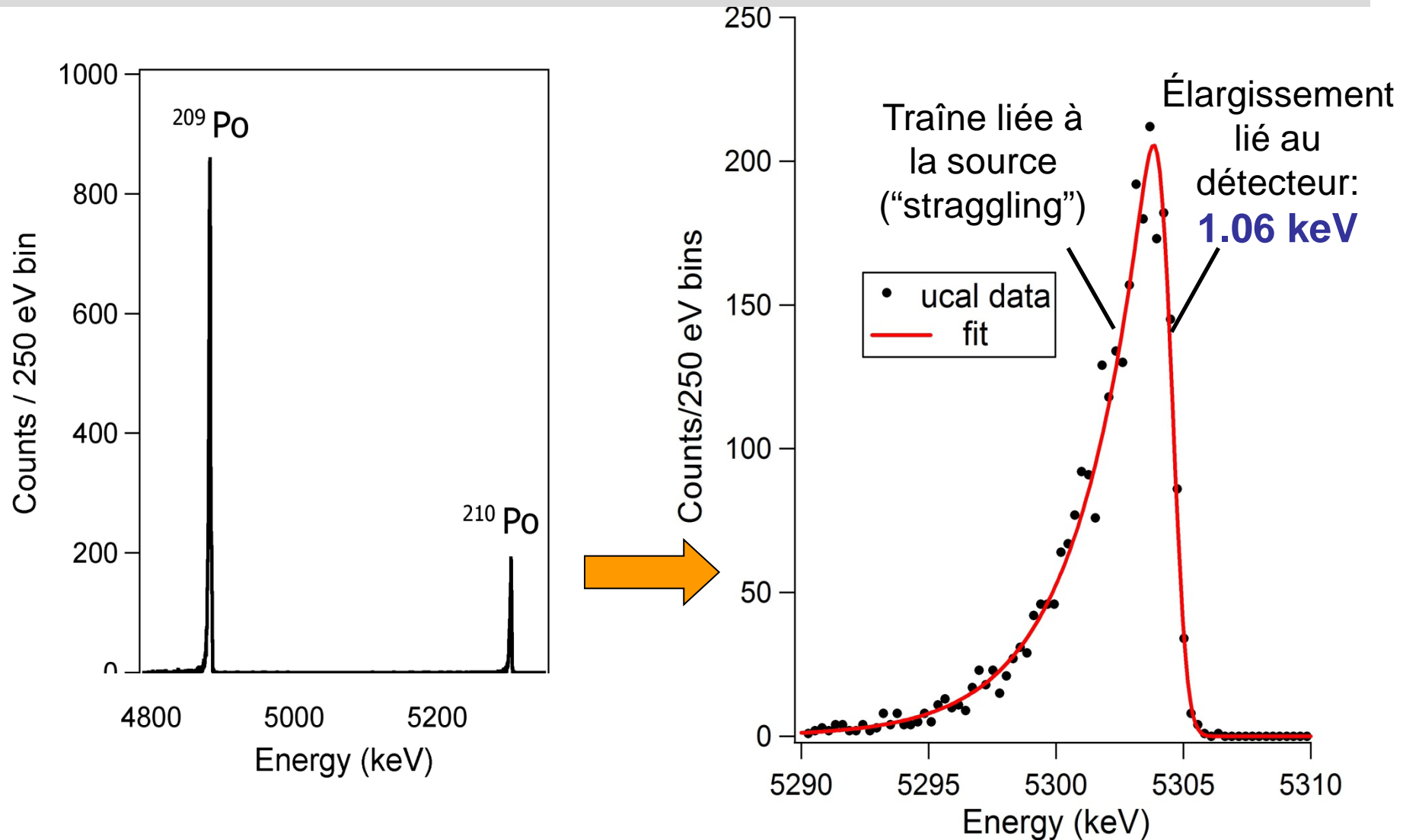
présentation de J. Ullom @ LTD13



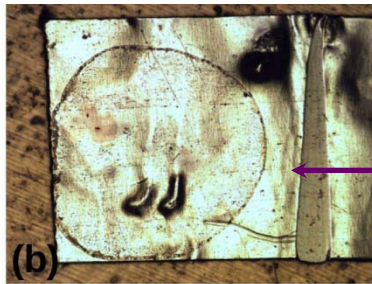
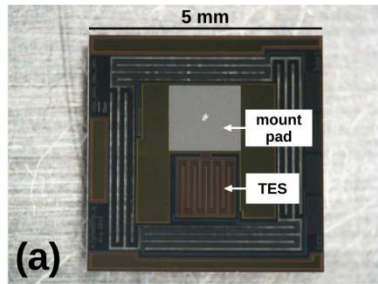


# Spectre alpha d'une source de Polonium

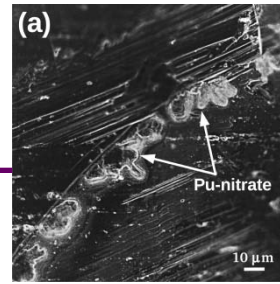
Record mondial de résolution alpha: **1.06 keV FWHM** à 5.3 MeV (.02%)



# Sources enfouies: mesure des énergies de réaction $Q_\alpha$



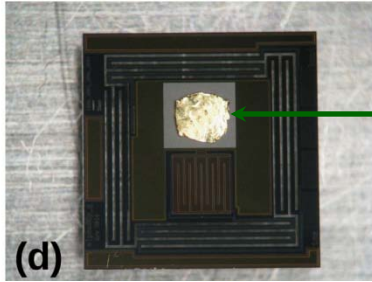
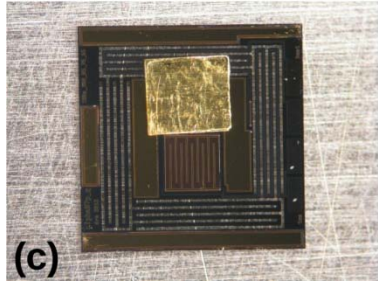
Évaporation sur or



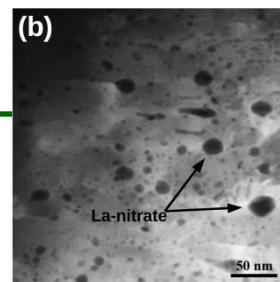
- ✓ Mo/Cu TES @ 120mK
- ✓  $E = Q_\alpha = E_\alpha + E_{\text{recoil}}$

- ✓ limitation également à  $\Delta E_{\text{FWHM}} \approx 1 \text{ keV}$

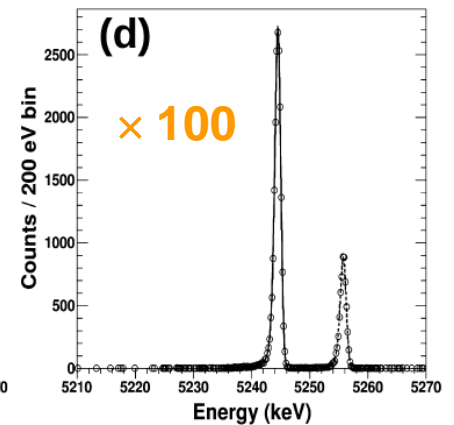
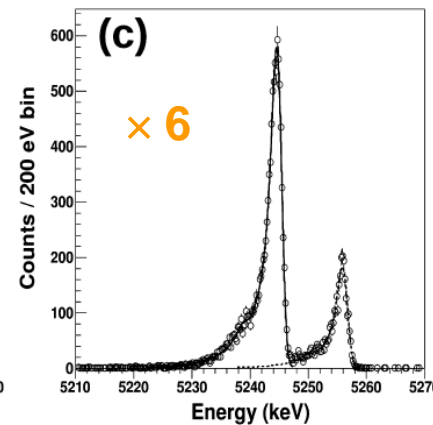
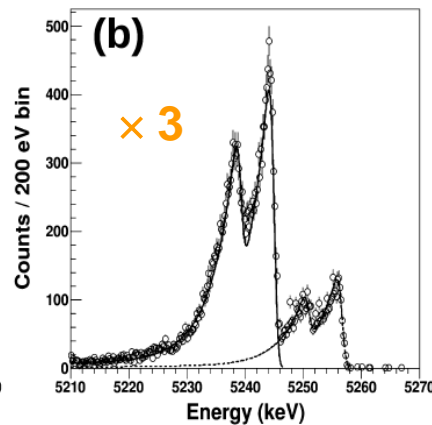
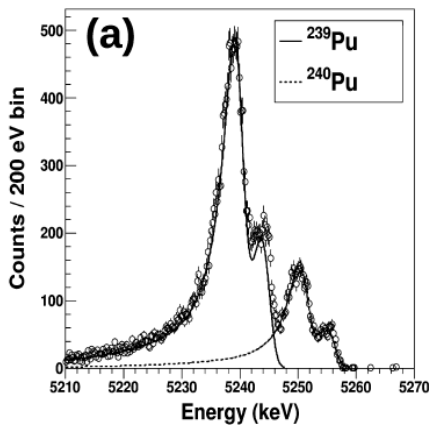
*Hoover et al., 2015*  
*LANL & NIST*



Or laminé



Tours de laminage



# Bilan des bruits du microcalorimètre $\alpha$ du NIST

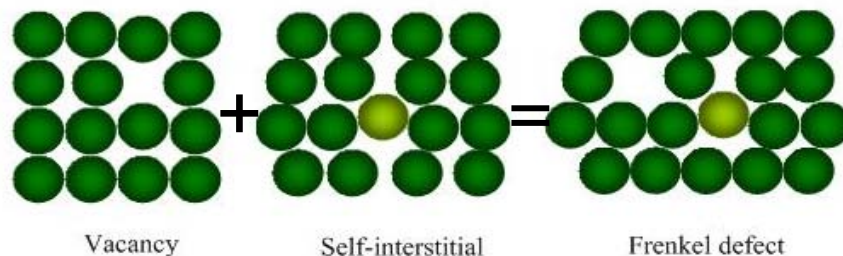
Origine	$\Delta E$ (eV)
Bruit thermodynamique	102- <b>380</b>
éjection d'électrons	80
variation de T	135
Ligne de base (électronique)	320
Somme quadratique des bruits connus	520
$\Delta E$ mesuré	$1060 \pm 60$
→ <b>Source résiduelle de bruit</b>	<b>925 eV !</b>

✓ La résolution ultime alpha pour un détecteur solide est peut-être atteinte !

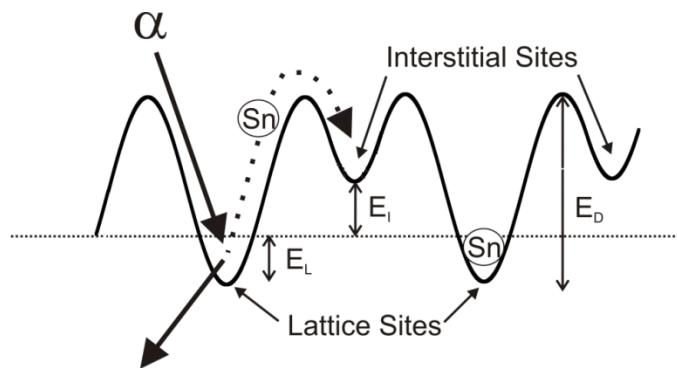
✓ c'est suffisant pour séparer des raies alpha proches (ex: les isotopes stratégiques de Pu) qu'un détecteur Si « classique » (8keV FWHM au mieux) confondrait

Interprétation ?  
→ fluctuations dans le nombre de défauts créés (paires de Frenkel) ?

Point defects of crystals

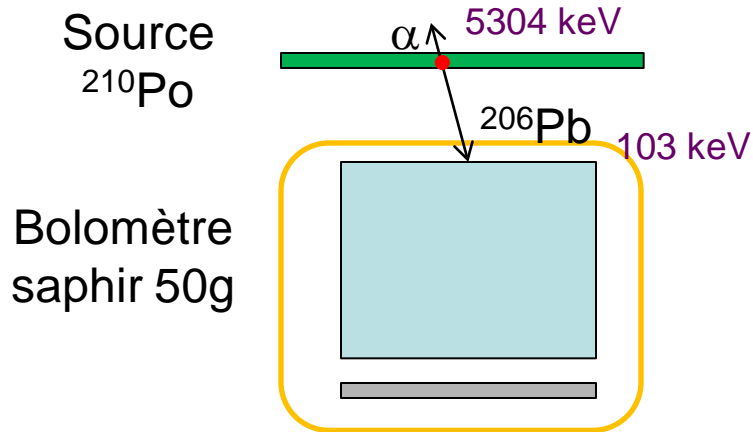


$$E_F \cong 4-7 \text{ eV dans Sn}$$

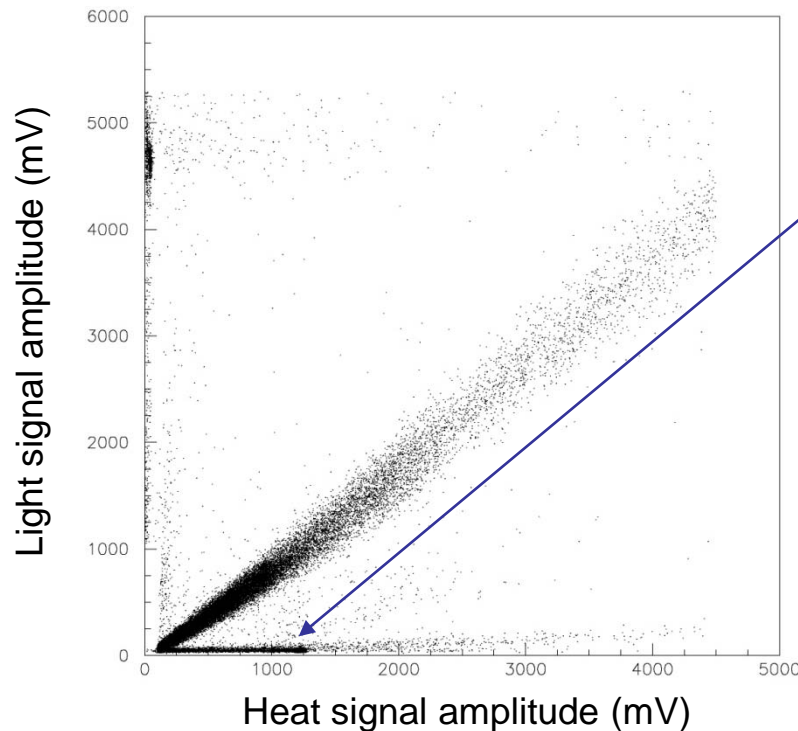


# □ spectroscopie de noyaux de recul

# Reculs de $^{206}\text{Pb}$ & production de sources $\alpha$ hyper fines

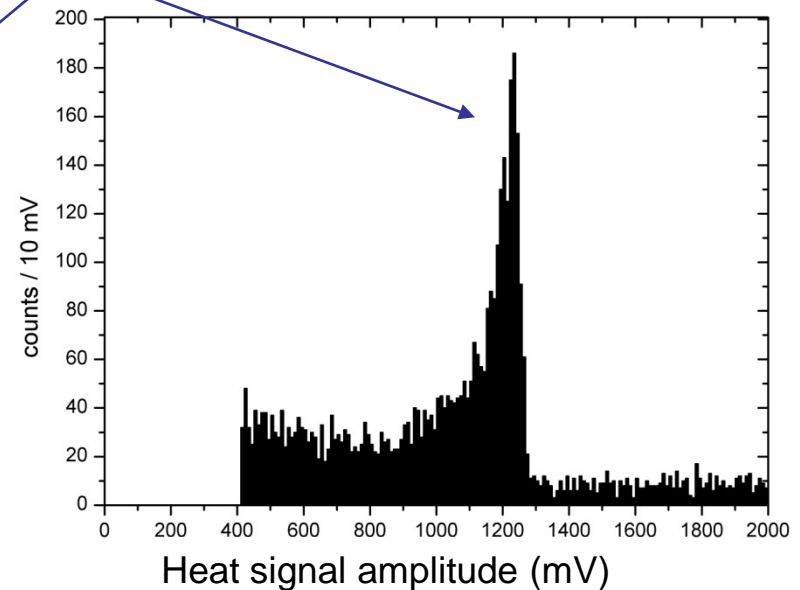


- Spectre des reculs très sensible à l'état de surface de la source → **test de sources  $\alpha$**
- Calibration de matrices de bolomètres, implantation  $\sim 100 \text{ \AA}$  → **qualifications de micro-structures (membranes  $\text{Si}_3\text{N}_4, \dots$ )**



**Recul  $^{206}\text{Pb}$**

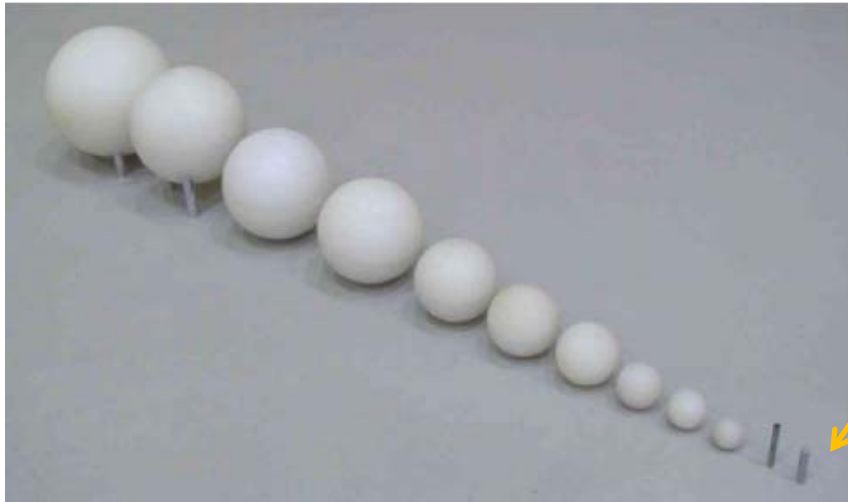
Spectre des événements de la bande des reculs



Thèse Lidia Torres (2008)

# □ spectroscopie des neutrons rapides

# Spectroscopie « traditionnelle » des neutrons rapides

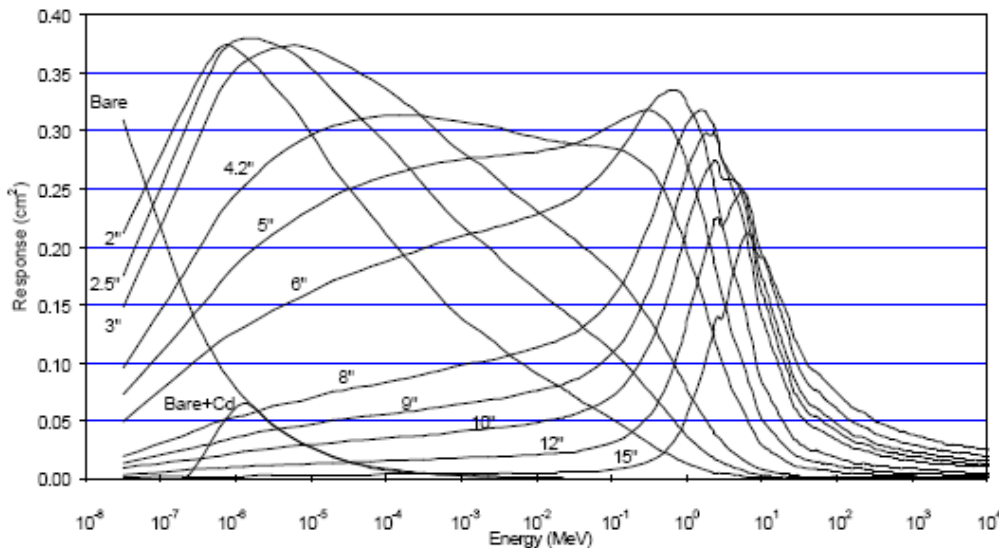


Sphères de Bonner  
(polyéthylène)

détecteur  $^3\text{He}$



Un processus de mesure  
long et incertain  
(+ besoin de spécialistes)



Matrice de réponse des sphères

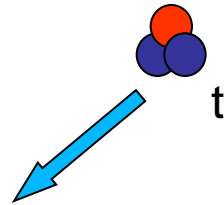
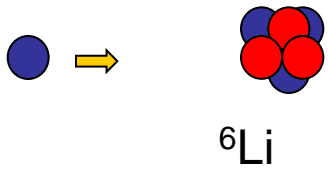
Une mesure au PSI (Suisse)



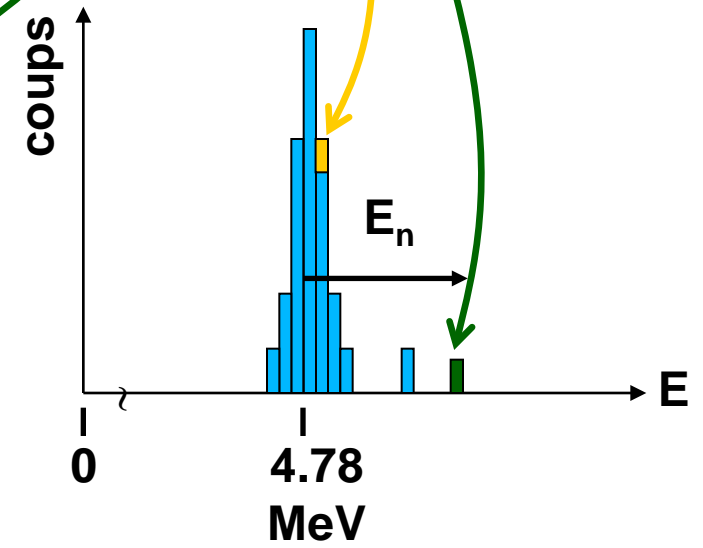
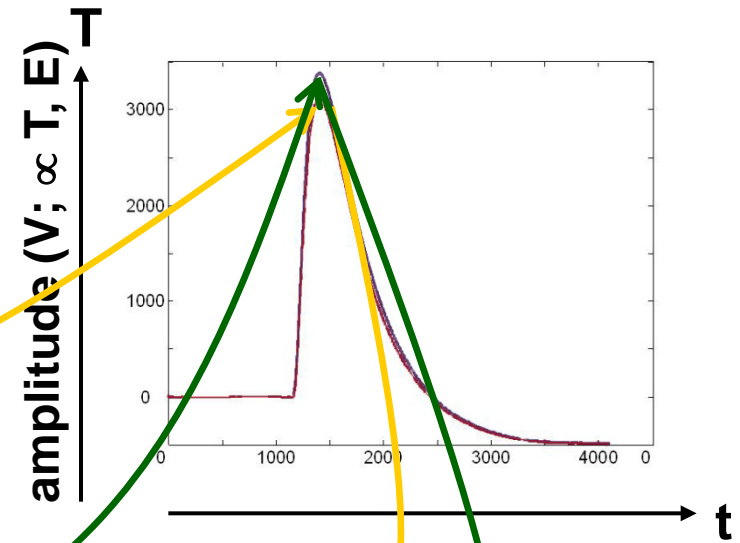
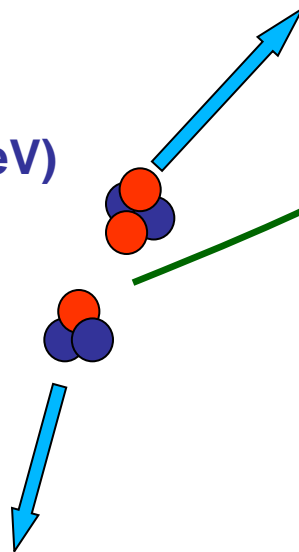
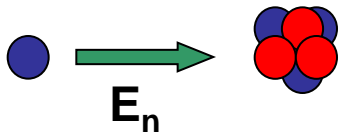
# Réaction de capture: $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + t$    $E = 4.78 \text{ MeV} + E_{\text{neutron}}$

ce qu'on doit voir dans un bolomètre  ${}^6\text{Li}$ -thié

Neutron thermique (25 meV)



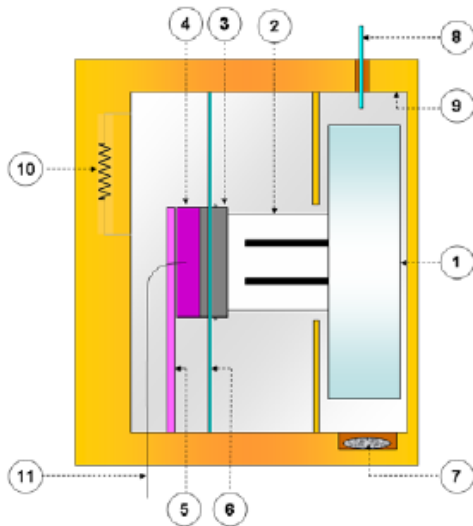
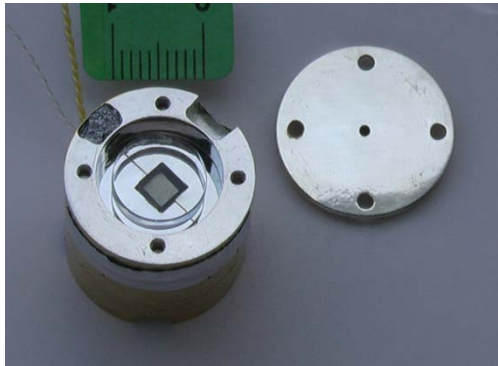
Neutron rapide (1keV-10MeV)





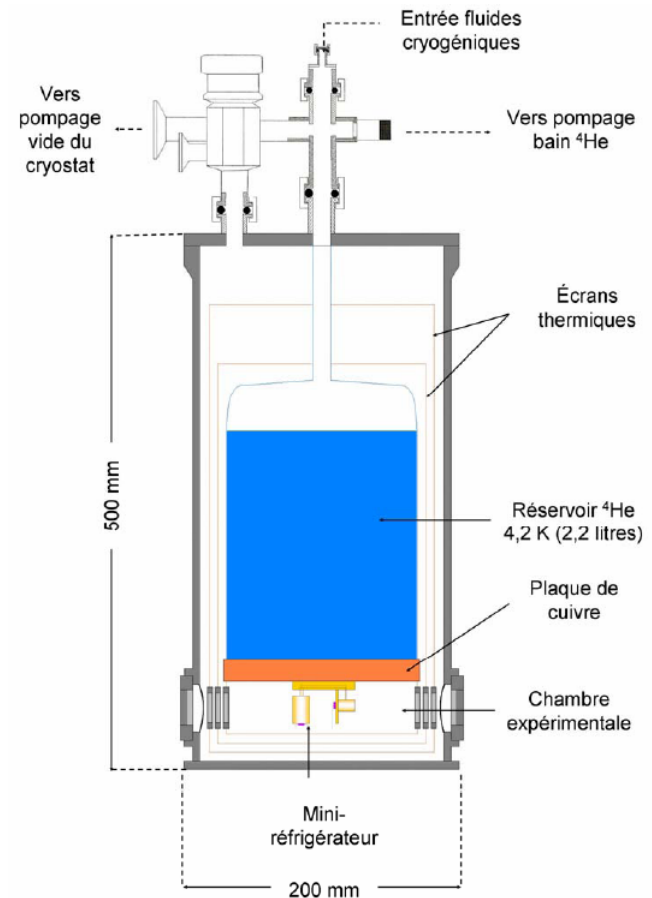
# Une spectroscopie « directe » des neutrons rapides: la preuve par la mesure ! *(thèse J. Gironnet, 2010)*

Bolo 0.5g  $^6\text{LiF}$  de l'IAS (@400mK)

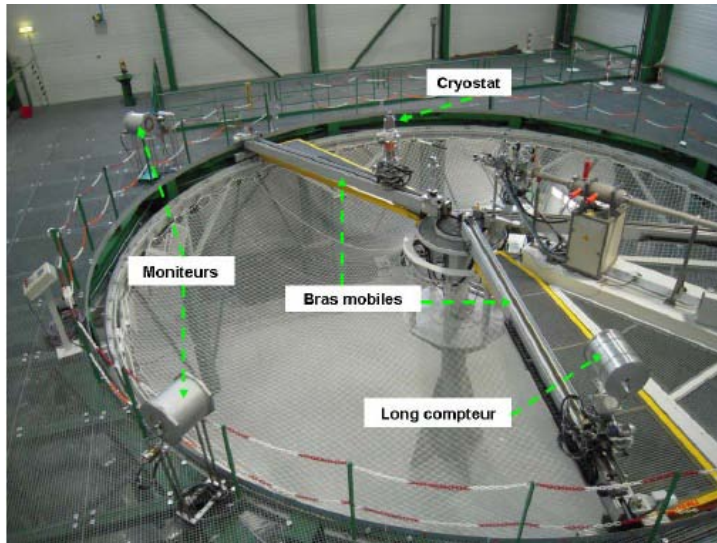


## Légende :

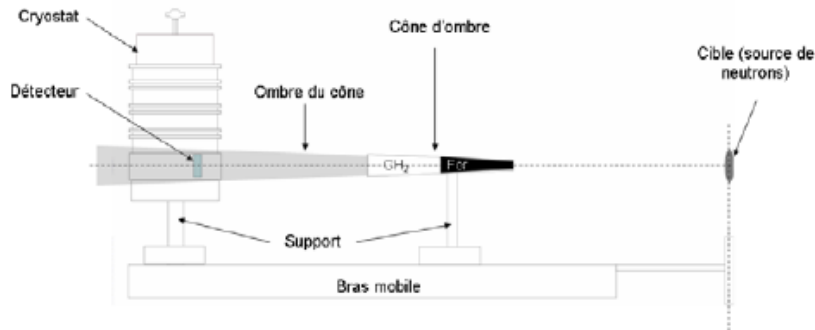
- 1 : Cristal de  $^6\text{LiF}$  ( $\phi = 10 \text{ mm}$  ;  $e = 2,62 \text{ mm}$ )
- 2 : Cube de BGO fendu partiellement collé sur le cristal en 9 points pour limiter les efforts de dilatation thermiques.
- 3 : Cale en Ge pur
- 4 : Détecteur Ge-NTD ( $6,14 \times 4,08 \times 0,84 \text{ mm}^3$ )
- 5 : Fuite thermique en Ge pur
- 6 : Fibres en saphir (suspensions et lien thermique)
- 7 : Source  $^{241}\text{Am}$  (4 Bq)
- 8 : Fibre optique (guide pour impulsions LED à  $\lambda=830 \text{ nm}$ )
- 9 : Cavité en cuivre argentée
- 10 : Résistance de charge
- 11 : Fils de lecture du détecteur Ge-NTD



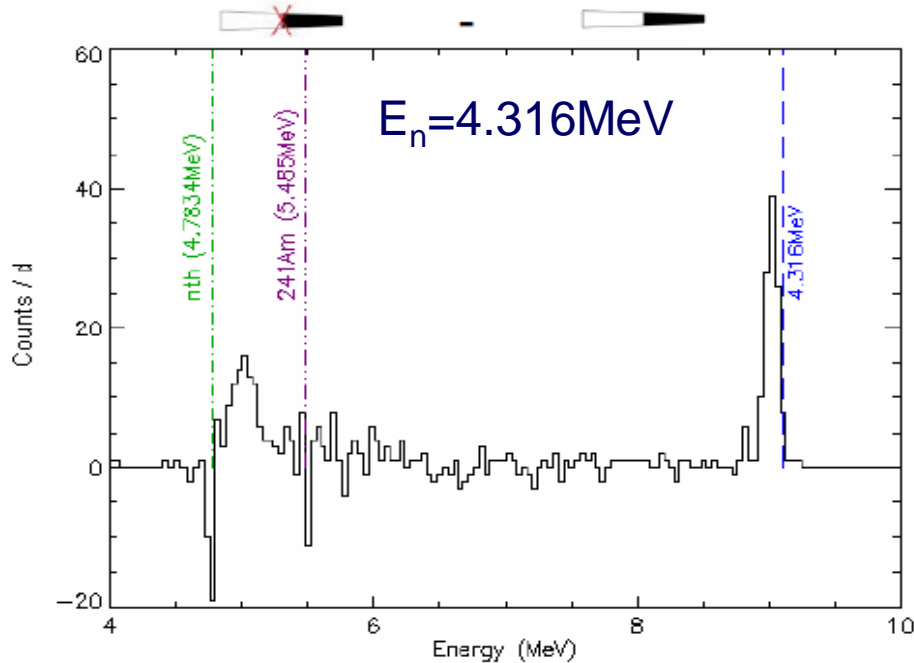
# Etalonnage @ AMANDE (IRSN/Cadarache)



Spectromètre 0.5g 6LiF  
(juillet 2009)



# Détection de pics neutrons dans un bolomètre en ${}^6\text{LiF}$ ...

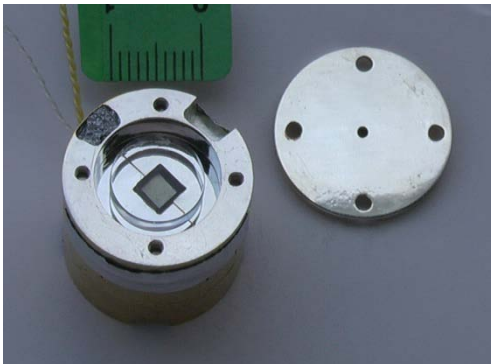


...avec un léger décalage systématique,

$E_{\text{B\_AMANDE}}$	$\Delta E =  E_{\text{B\_AMANDE}} - E_{\text{B\_BOLOMETE}} $
50 keV [ $\pm 3$ ]	-
241,5 keV [ $\pm 3$ ]	6,7 keV [ $\pm 0,03$ ]
1,2 MeV [ $\pm 0,003$ ]	27,86 keV [ $\pm 1,72$ ]
4,316 MeV [ $\pm 0,002$ ]	109 keV [ $\pm 2,02$ ]
17 MeV [ $\pm 0,004$ ]	431 keV [ $\pm 7,5$ ]

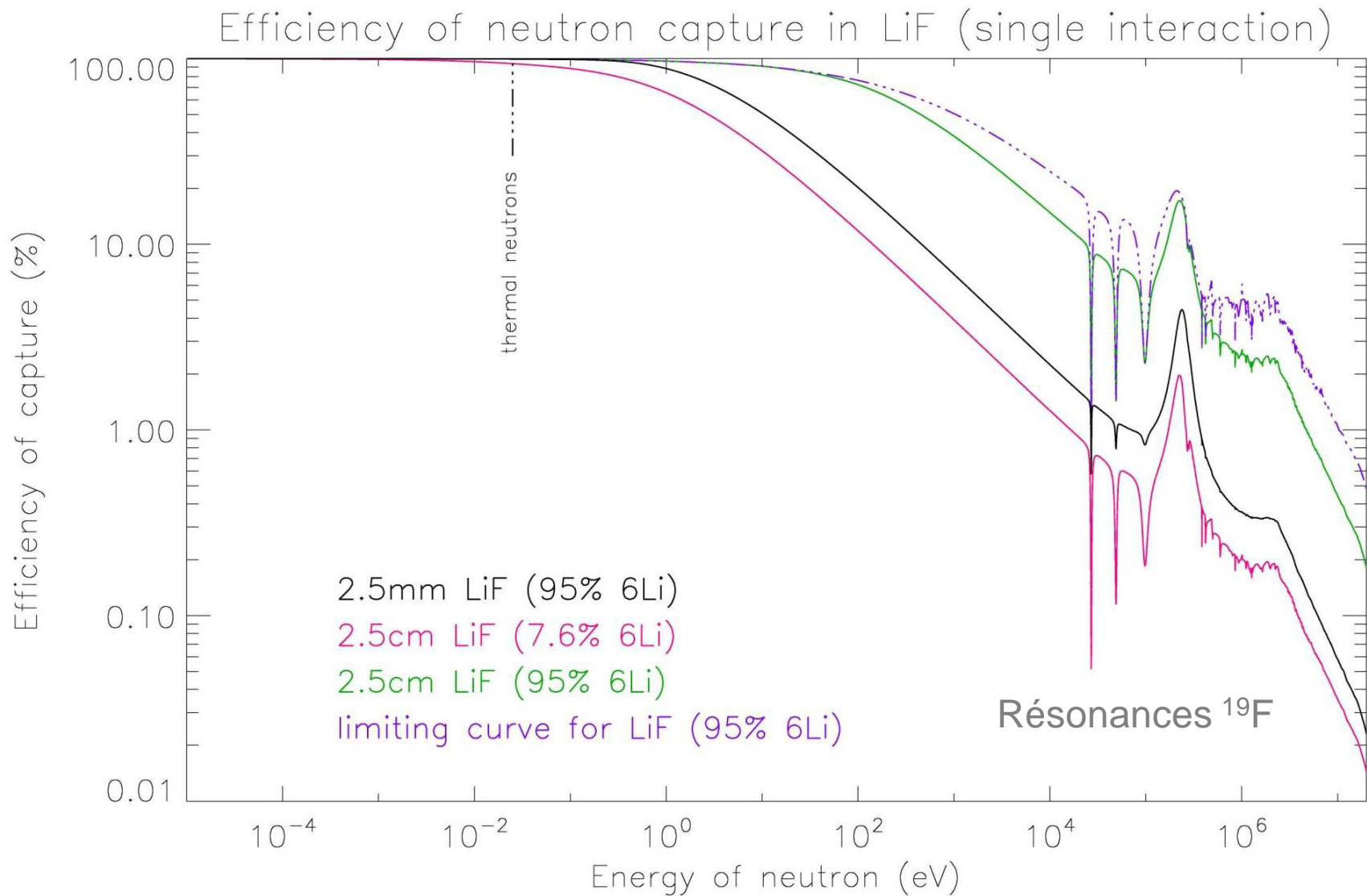
et une bonne résolution en énergie.

0.5g  ${}^6\text{LiF}$

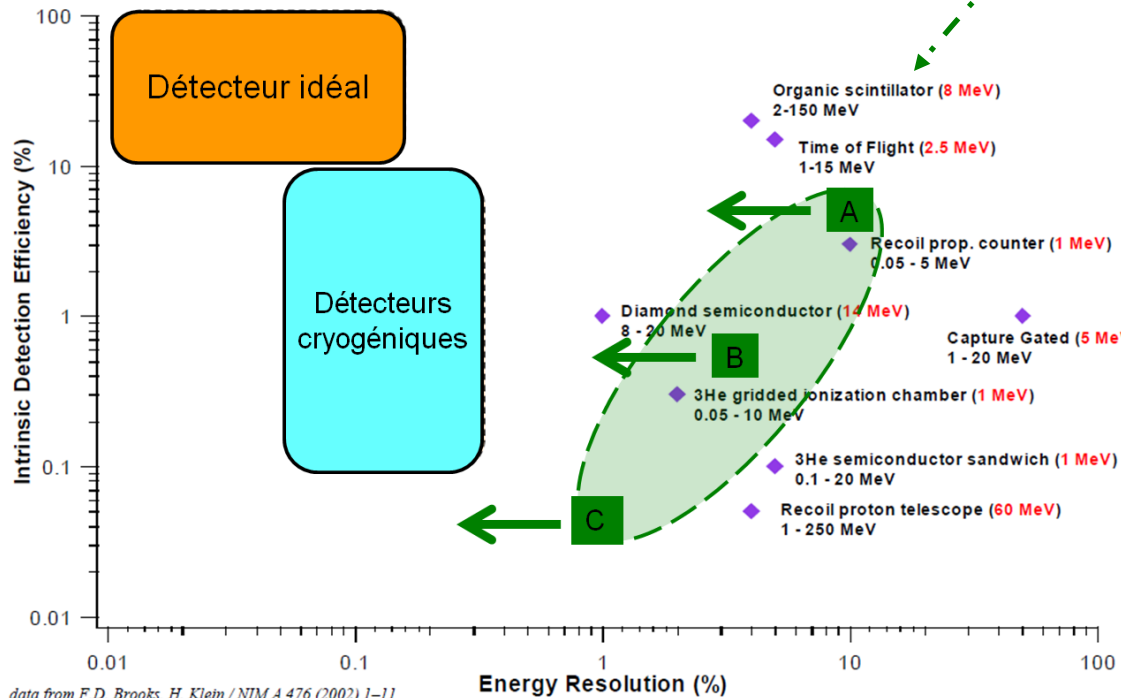


Energie	Résolution en énergie	$\Delta E/E$
Ligne de base	24,7 keV [ $\pm 0,5$ ]	-
Ref ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	28,7 keV [ $\pm 0,5$ ]	-
241,5 keV	42,6 keV [ $\pm 2$ ]	0,17
Ligne Alpha	58,3 keV [ $\pm 3$ ]	-
1200 keV	72,8 keV [ $\pm 4$ ]	0,06
4,316 MeV	103,6 keV [ $\pm 6$ ]	0,024
17 MeV	150,3 keV [ $\pm 14$ ]	0,008

# Bolomètre en ${}^6\text{LiF}$ : efficacité de détection



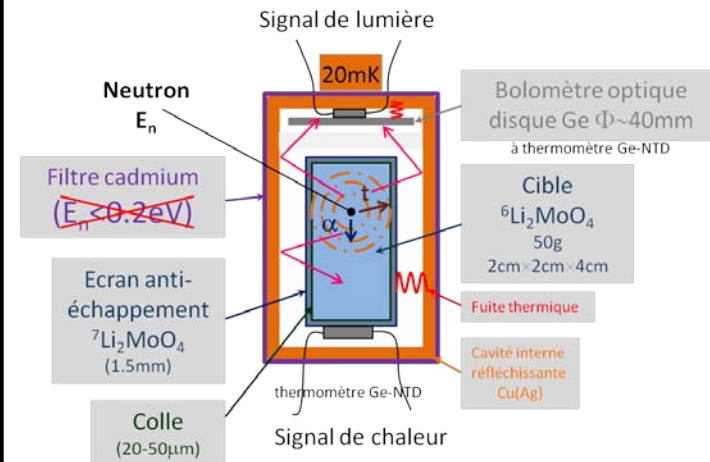
# Détecteurs cryogéniques & spectroscopie des neutrons rapides



d'après T. NiederMayr @ LTD10, 2003

A:  $E_n = 240$  keV  
 B: 2.5 MeV  
 C: 17 MeV

Projet « BOLIDE »  
 50g  $^6\text{Li}_2\text{MoO}_4$   
 CSNSM & ICMCB



DEFI Instrumentation  
 aux Limites CNRS 2015

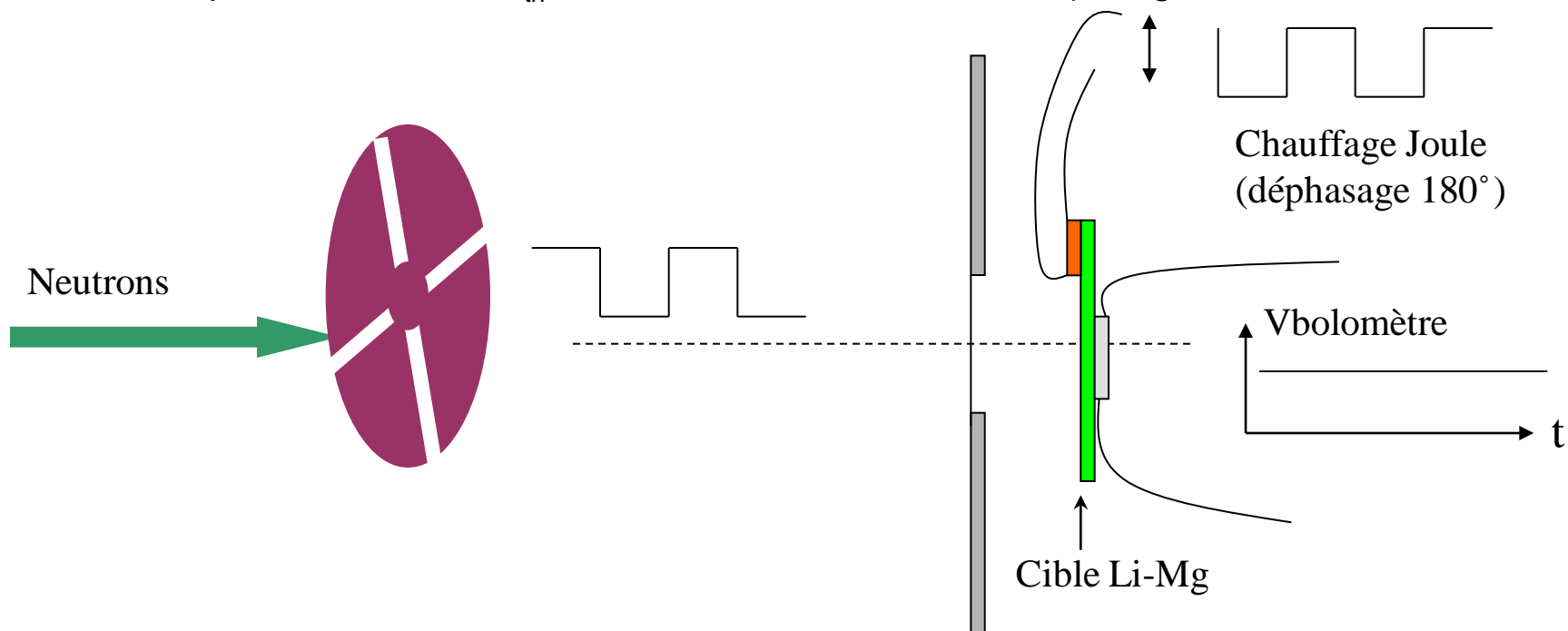
□ sur faisceaux

## Bolomètres fonctionnant en mode ESR: « Electronic Substitution Radiometry »

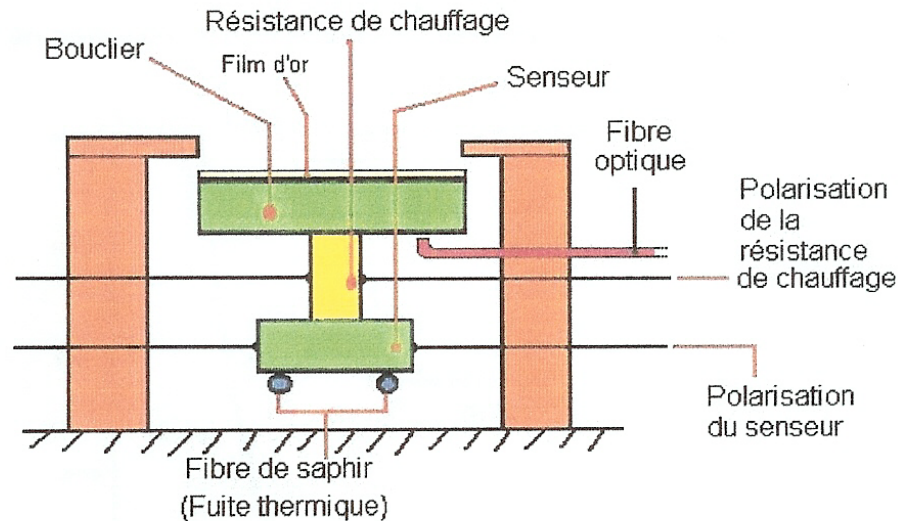
L'énergie du paquet de particules absorbé au niveau du bolomètre est déduite de l'énergie injectée par effet Joule (dans une résistance couplée au bolomètre) produisant la même élévation de température...

### ✓ Radiomètre $n_{th}$ (NIST/Univ. Indiana; **Z. Chowdhuri et al., in RSI 2003**)

- mesure de flux de neutrons thermiques  $> 10^5 \text{ s}^{-1}$  avec une précision absolue de 0.1 %
- Bolomètre en alliage Li-Mg ( ${}^6\text{Li}_{0.74}\text{Mg}_{0.26}$ ) refroidi à 2K
- on exploite la réaction  $n_{th} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$   $Q=4.78 \text{ MeV}$  (charge  $P=50 \rightarrow 500 \text{ nW}$  sur bolo)



- ✓ BOLUX (Collaboration CEA/DAM/DE (P. Troussel), CEA/LNHB, CNRS/IAS) détecteur de référence pour **ligne de métrologie sur Soleil**



Shéma du bolomètre

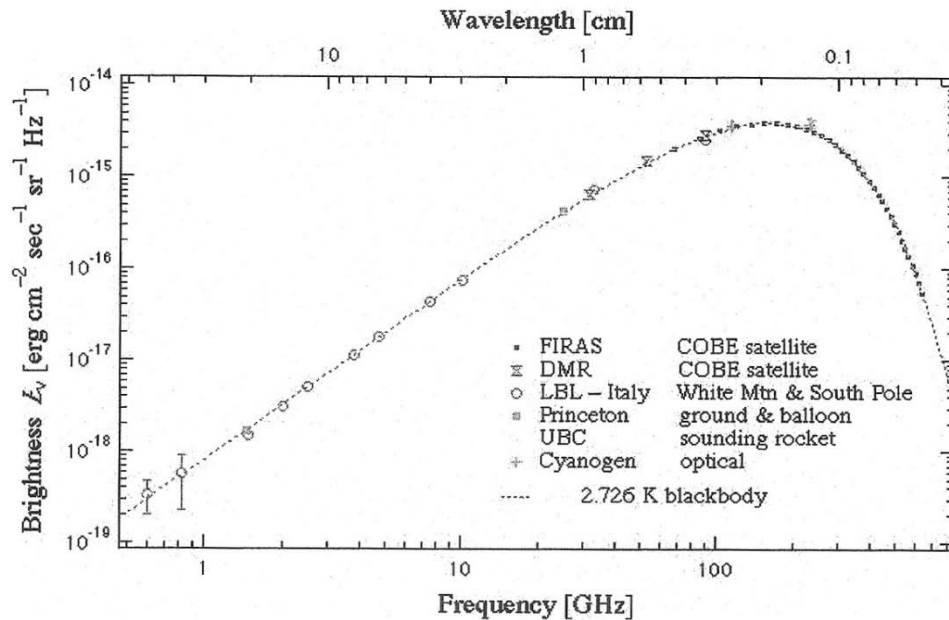
## Bolomètre Ge @ 300mK

- Absence de sélectivité spectrale
- Insensibilité aux dommages d'irradiation
- Qualifié sur lignes synchrotron du LURE (Orsay) et de BESSY (Berlin)



# □ Rayonnement fossile cosmologique (CMB)

# CMB: le corps noir était presque parfait



- Corps noir à 2.726K; un des piliers du Big-Bang & objet d'étude essentiel pour la cosmologie
- Extrêmement homogène !
- produit à un redshift  $Z=1000$  quand l'Univers était âgé de  $\approx 380\,000$  ans (découplage matière-rayonnement)
- Anisotropies détectées  $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ : leur croissance permet d'expliquer la formation des structures actuelles

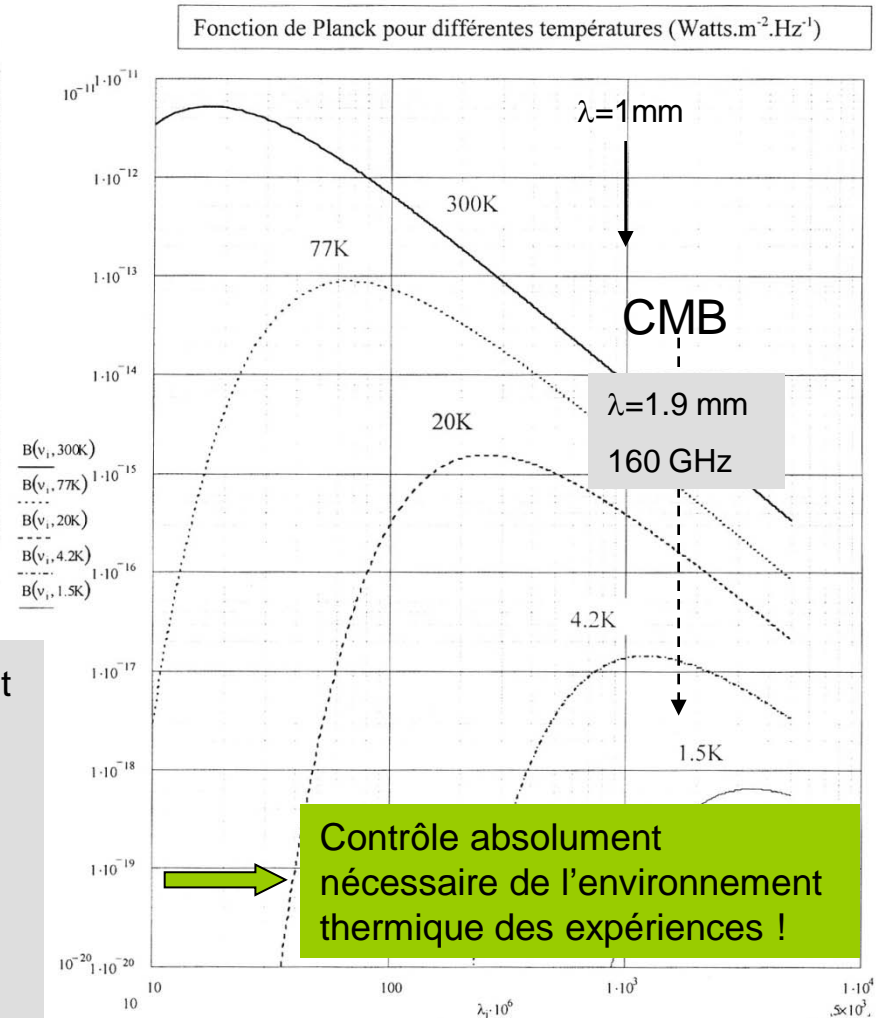
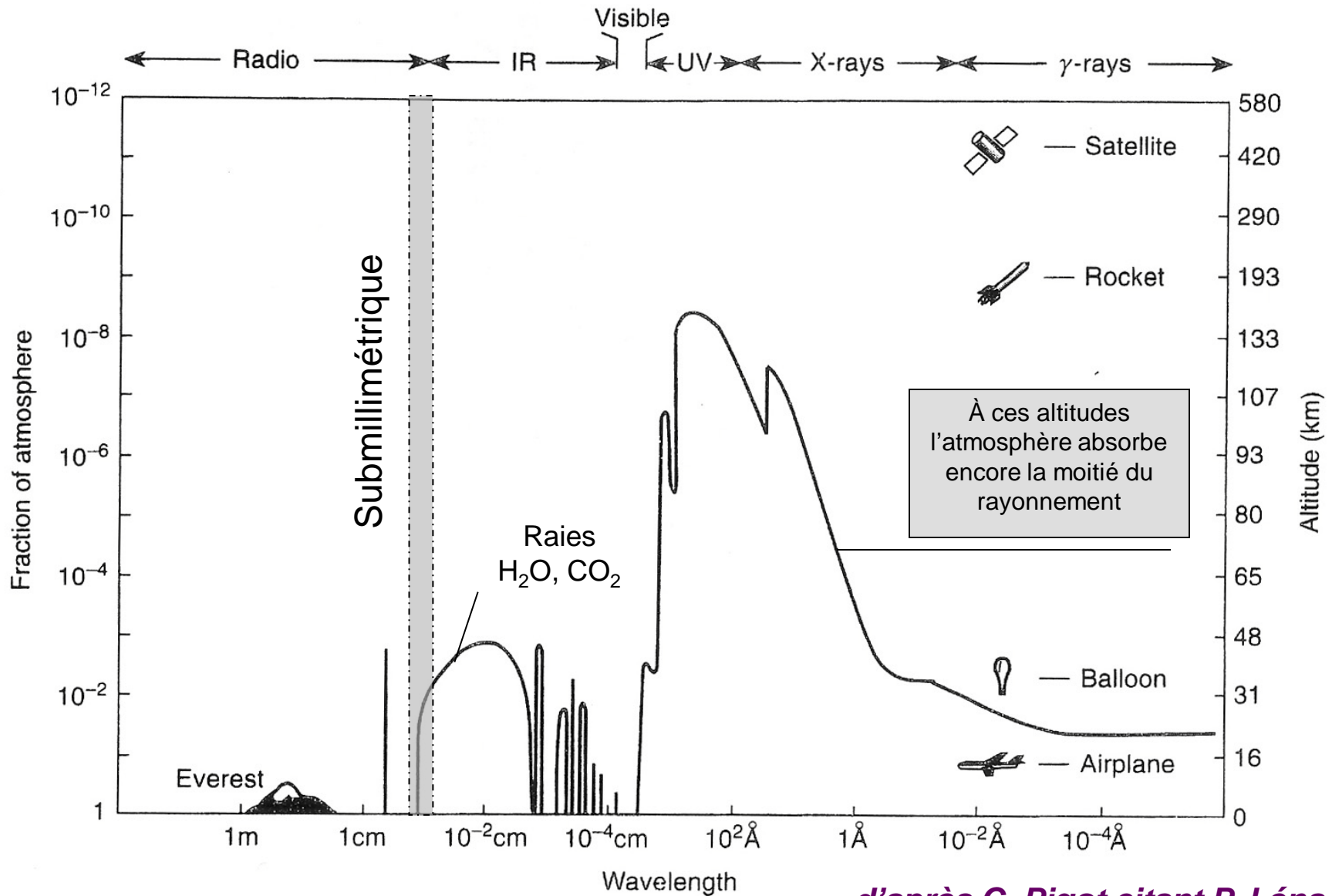


Figure 1 : Graphe de la fonction de Planck (corps noir) – Angle solide =  $1^{\text{st}}$

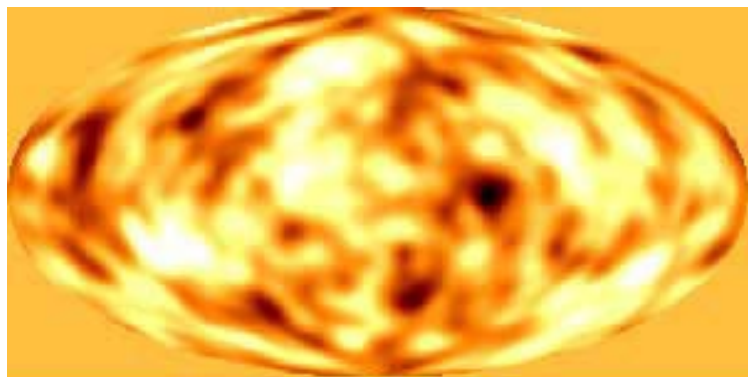
d'après Bruno Mafféi et Jacques Delabrouille (Ecoles d'automne)

# CMB: l'appel de l'espace



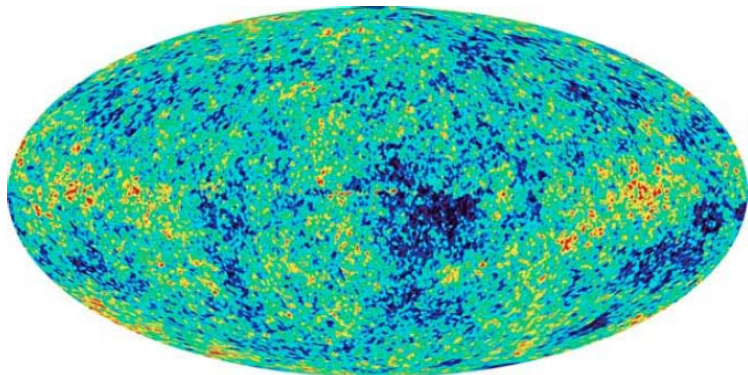
*d'après C. Pigot citant P. Léna*

# Cartes des anisotropies du CMB



COBE (1989)

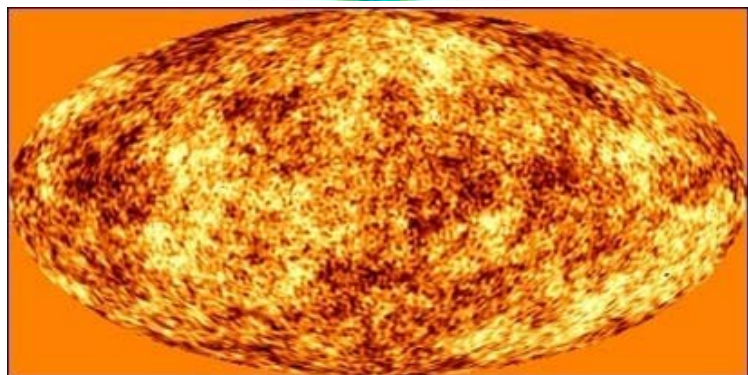
7°



WMAP (2001)

12'

Avènement de la cosmologie de précision...



Planck (2009)

5'

Planck-LFI

Planck-HFI

Détecteurs

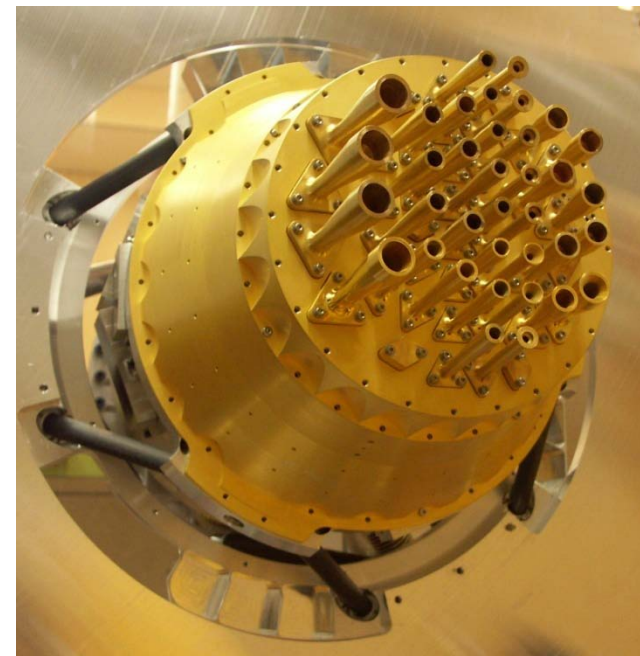
radiomètres

bolomètres

simulation

## ✓ Performances des détecteurs de Planck-HFI

- Sensibilité dominée par le bruit de photon du CMB
- ..... •
- ..... % $\sigma$  ..... † •
- **52 bolomètres à 100 mK**
- une technologie éprouvée par **Archéops** (manip ballon stratosphérique)



## ✓ Caractéristiques du relevé Planck

- Résolution spatiale améliorée
- Signal / Bruit par pixel  $\uparrow$  (jusqu' à x10)
- Mesures de la polarisation du CMB

**Planck-HFI**  
modèle de qualification « CQM »

Consortium Planck-HFI (PI: Jean-Loup Puget @ IAS; mission ESA)

Caltech, CITA (Ca), CESR, CRTBT, CdF-APC, CEA, DSRI (DK), LPAC(UK), IAOP, LAOG, IoA (UK), JPL(USA), LAL, MPI(D), MRAO(UK), NUI(IR), Cardiff Univ. (UK), RAL(UK), ESA-SSDE(NL), Univ. Genève(CH), Univ. Grenada(E), Univ. LaSapienza(It)

- HFI : High Frequency Instrument 100 GHz à 857 GHz **(6 Bandes)**
- LFI : Low Frequency Instrument 30 GHz à 70 GHz (3 bandes)

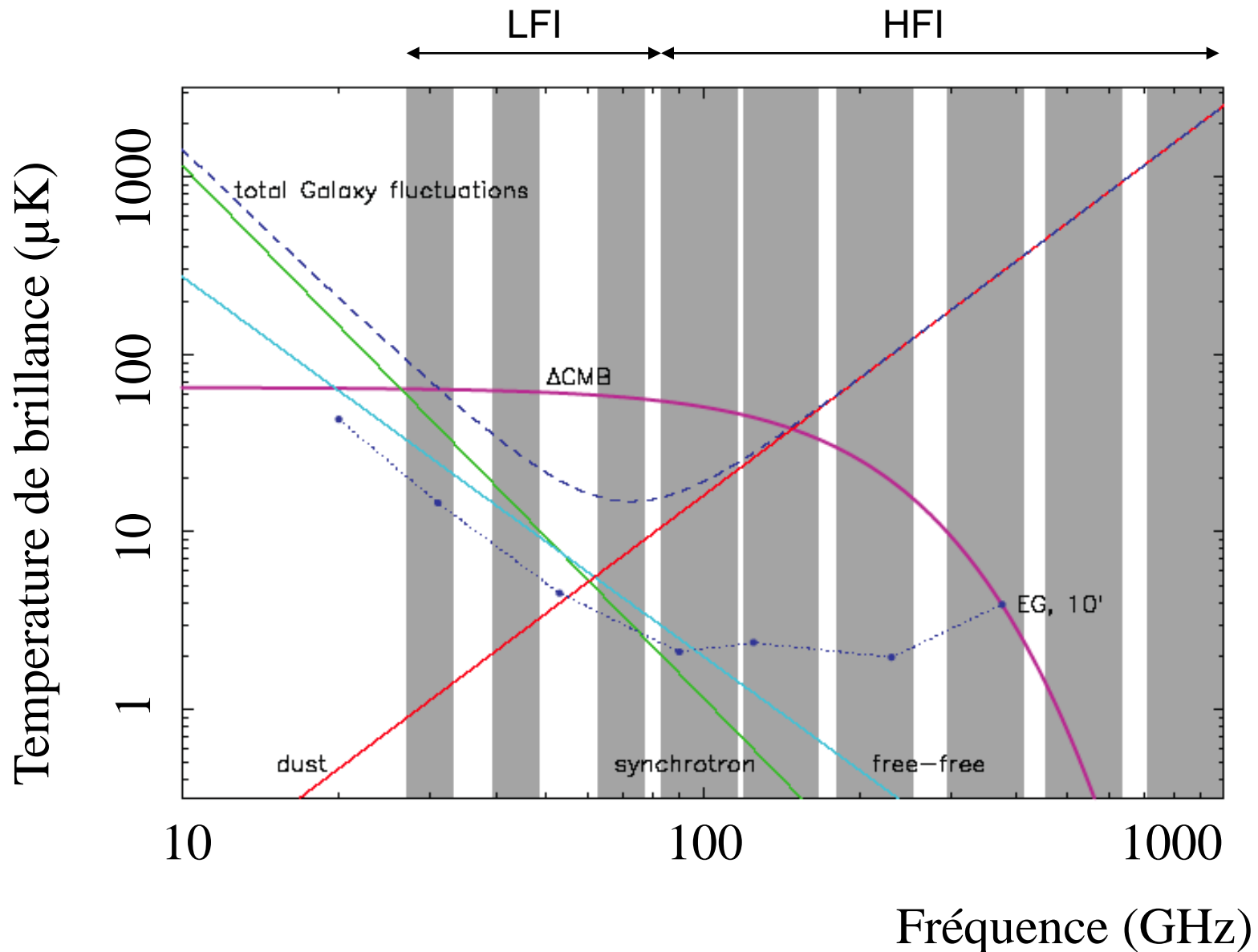
SUMMARY OF PLANCK INSTRUMENT CHARACTERISTICS

INSTRUMENT CHARACTERISTIC	LFI			HFI					
	HEMT arrays			Bolometer arrays					
Center Frequency [GHz]	30	44	70	100	143	217	353	545	857
Bandwidth ( $\Delta\nu/\nu$ )	0.2	0.2	0.2	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Angular Resolution (arcmin)	33	24	14	10	7.1	5.0	5.0	5.0	5.0
$\Delta T/T$ per pixel (Stokes $I$ ) <sup>a</sup>	2.0	2.7	4.7	2.5	2.2	4.8	14.7	147	6700
$\Delta T/T$ per pixel (Stokes $Q$ & $U$ ) <sup>a</sup>	2.8	3.9	6.7	4.0	4.2	9.8	29.8	...	...

<sup>a</sup> Goal (in  $\mu\text{K}/\text{K}$ ) for 14 months integration,  $1\sigma$ , for square pixels whose sides are given in the row "Angular Resolution".

$\lambda=1\text{ cm}$ 
 $\lambda=3\text{ mm}$ 
 $\lambda=350\mu\text{m}$

# Approche multi-bandes: réduction des avant-plans

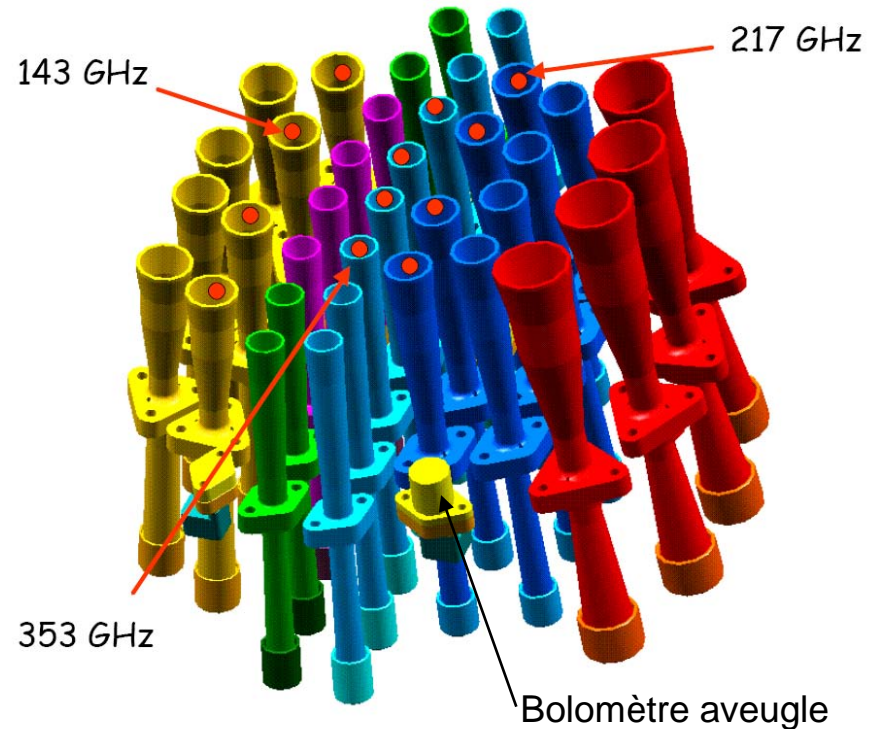
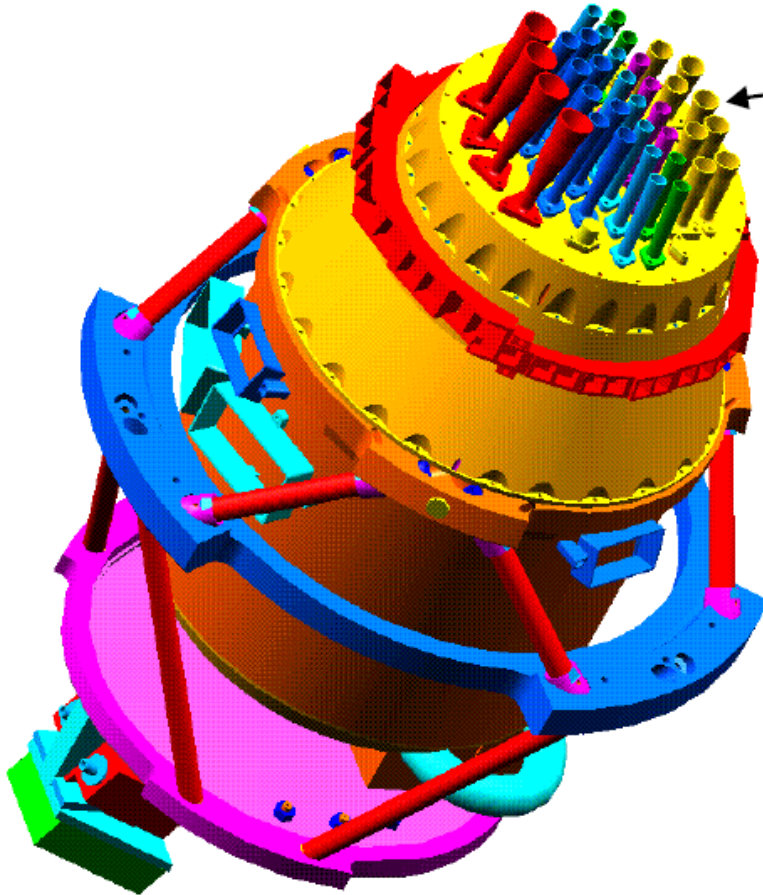


# L'instrument Planck-HFI

36 cônes concentrateurs

48 détecteurs; 6 bandes

Plan Focal



Canaux sensibles à la polarisation  
(12 « PSB »)

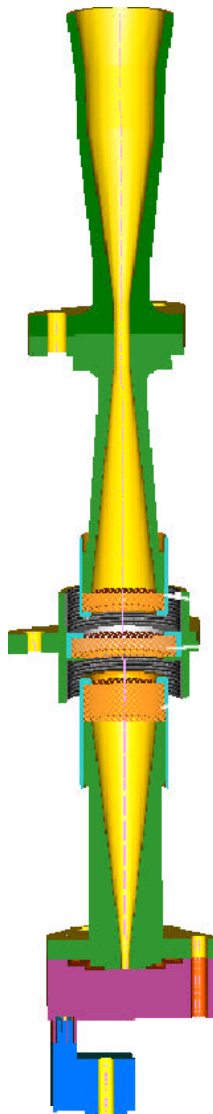
d'après Jacques Delabrouille (Moriond 2002)



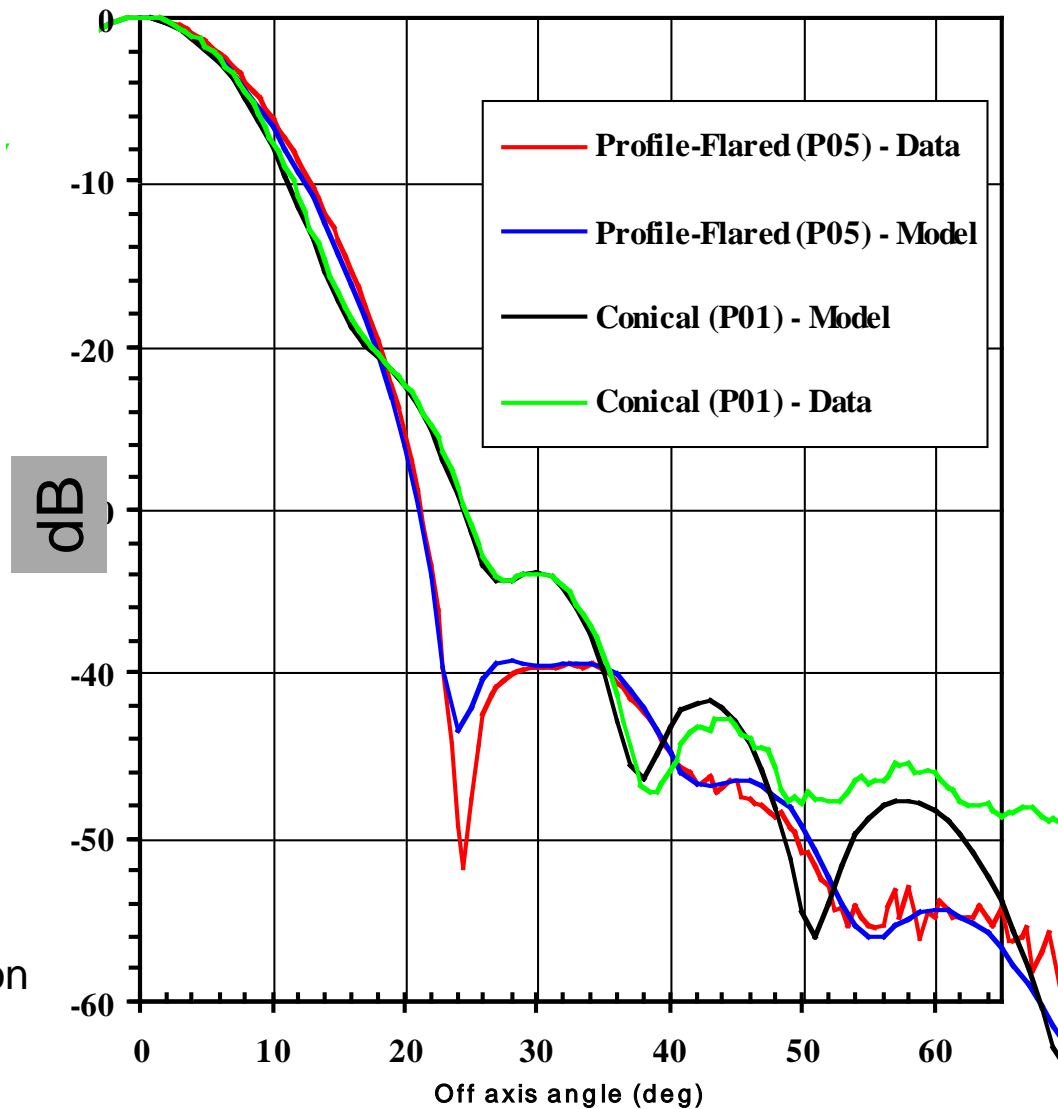
# Couplage optique et définition angulaire

« Flared horn »  
(cône évasé)

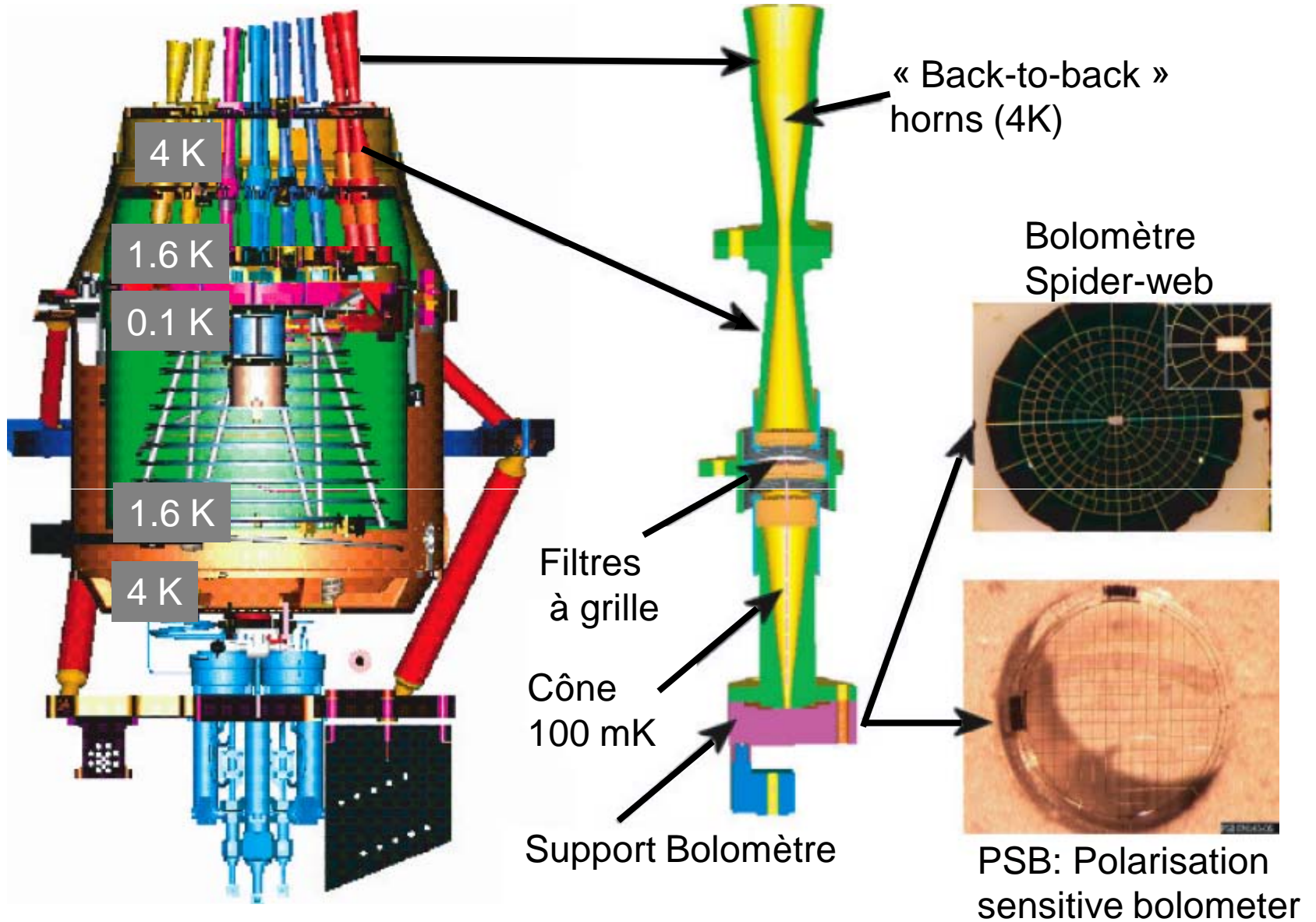
Made in  
Cardiff  
(UK)



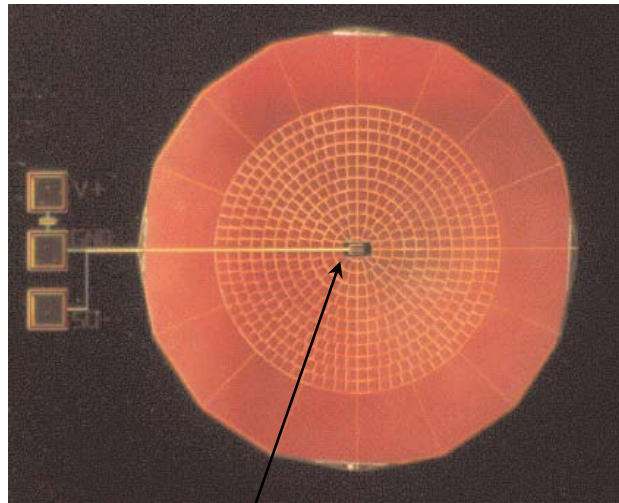
Atténuation  
1/1000



# Architecture thermique



# Bolomètres araignées (JPL @ Caltech)



Ge-NTD

## Performances

Table 4. Average Values and Dispersion in Parameters for Ten Micromesh Bolometers

Parameter	Value	Unit	% Disp
$T_b$	315	mK	
$R_0$	8.843	$\Omega$	6.31%
$\Delta$	50.388	K	0.75%
$G$ (400 mK)	$9.1 \times 10^{-10}$	W/K	3.83%
$C$ (400 mK)	$1.8 \times 10^{-11}$	J/K	11.1%
$\tau$ (400 mK)	15.5	ms	14.1%
Voltage Noise	$6 \times 10^{-9}$	$V/\sqrt{\text{Hz}}$	
Responsivity (0 Hz)	$7.2 \times 10^7$	V/W	
NEP (0 Hz)	$8.5 \times 10^{-17}$	$W/\sqrt{\text{Hz}}$	

Table 3. Thermal Conductance and Web Properties

H Web	300 mK	100 mK
$G_{\text{absorber}}$ (W/K)	$6.0 \times 10^{-11}$	$1.4 \times 10^{-11}$
$G_{\text{supports}}$ (W/K)	$\leq 2 \times 10^{-11}$	$\leq 1.0 \times 10^{-12}$
$\tau_{\text{therm}}$ ( $\mu\text{s}$ )	250	500
$G_{\text{ctr}}/G_{\text{opt}}$	0.95	0.99

Conduction thermique de la toile

- Substrat: membrane  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (qq  $\mu\text{m}$ )
- Film résistif: Au
- **Coefficient de remplissage  $\approx 2\% \rightarrow 10\%$**  (lutte efficacement contre les rayons cosmiques)

# Bolomètres araignées: bilan détaillé de C(T)

Table 2. Estimated Heat Capacities of Thermistor and Lead Components

Component	$C_v$ Electron (J/cc K <sup>2</sup> )	$C_v$ Lattice (J/cc K <sup>4</sup> )	Volume (cc)	C (400 mK) (J/K)
<b>Thermistor</b>				
Ge <sup>a</sup>	$1.9 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$1.66 \times 10^{-5}$	$4.52 \times 10^{-12}$
Pd <sup>b</sup>	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$1.25 \times 10^{-12}$
Au <sup>b</sup>	$7.3 \times 10^{-5}$	$4.2 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-8}$	$1.65 \times 10^{-12}$
Total				$7.42 \times 10^{-12}$
<b>Electrical Leads</b>				
Cu <sup>b</sup>	$9.7 \times 10^{-5}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$8.75 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-12}$
NbTi <sup>b</sup>	superconducting	$4.0 \times 10^{-6}$	$1.71 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-13}$
In <sup>b</sup>	$1.15 \times 10^{-4}(n)$	$9.58 \times 10^{-5}$	$1.25 \times 10^{-7}$	$7.7 \times 10^{-13}$
Pb <sup>b</sup>	$1.71 \times 10^{-4}(n)$	$1.2 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-13}$
Total				$4.82 \times 10^{-12}$
<b>Absorber</b>				
Cr <sup>b</sup>	$2.03 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-13}$
Au <sup>b</sup>	$7.25 \times 10^{-4}$	$4.23 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-13}$
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>c</sup>	*	*	$2.5 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-14}$
Total				$5.5 \times 10^{-13}$
<b>Heat Capacity of Thermistor + Leads</b>				$1.3 \times 10^{-11}$

<sup>a</sup>Ref. 17 (Electronic heat capacity estimated assuming a doping density of  $4.9 \times 10^{-16}/\text{cc}^2$ ).

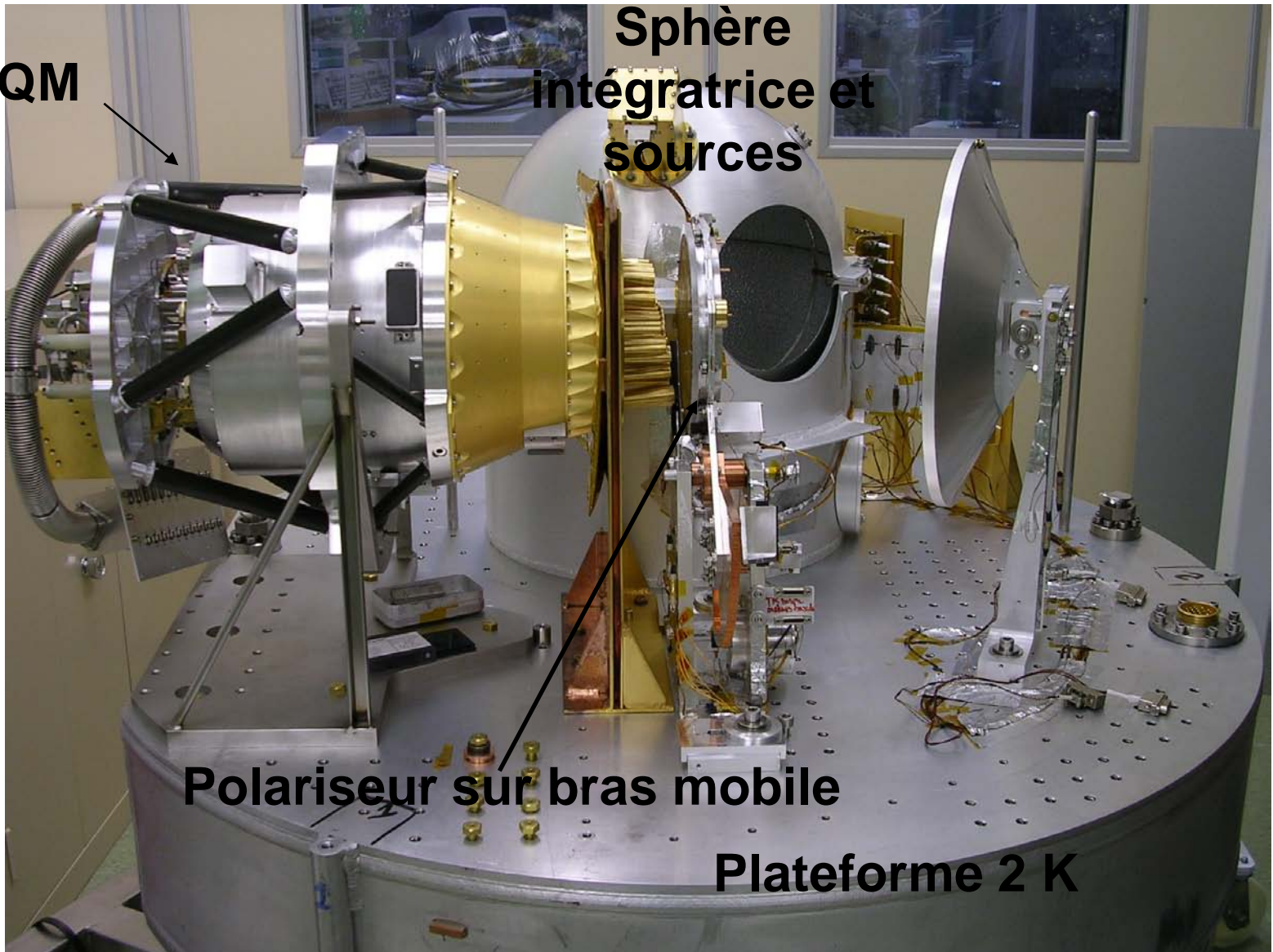
<sup>b</sup>Ref. 18.

<sup>c</sup>Ref. 19.

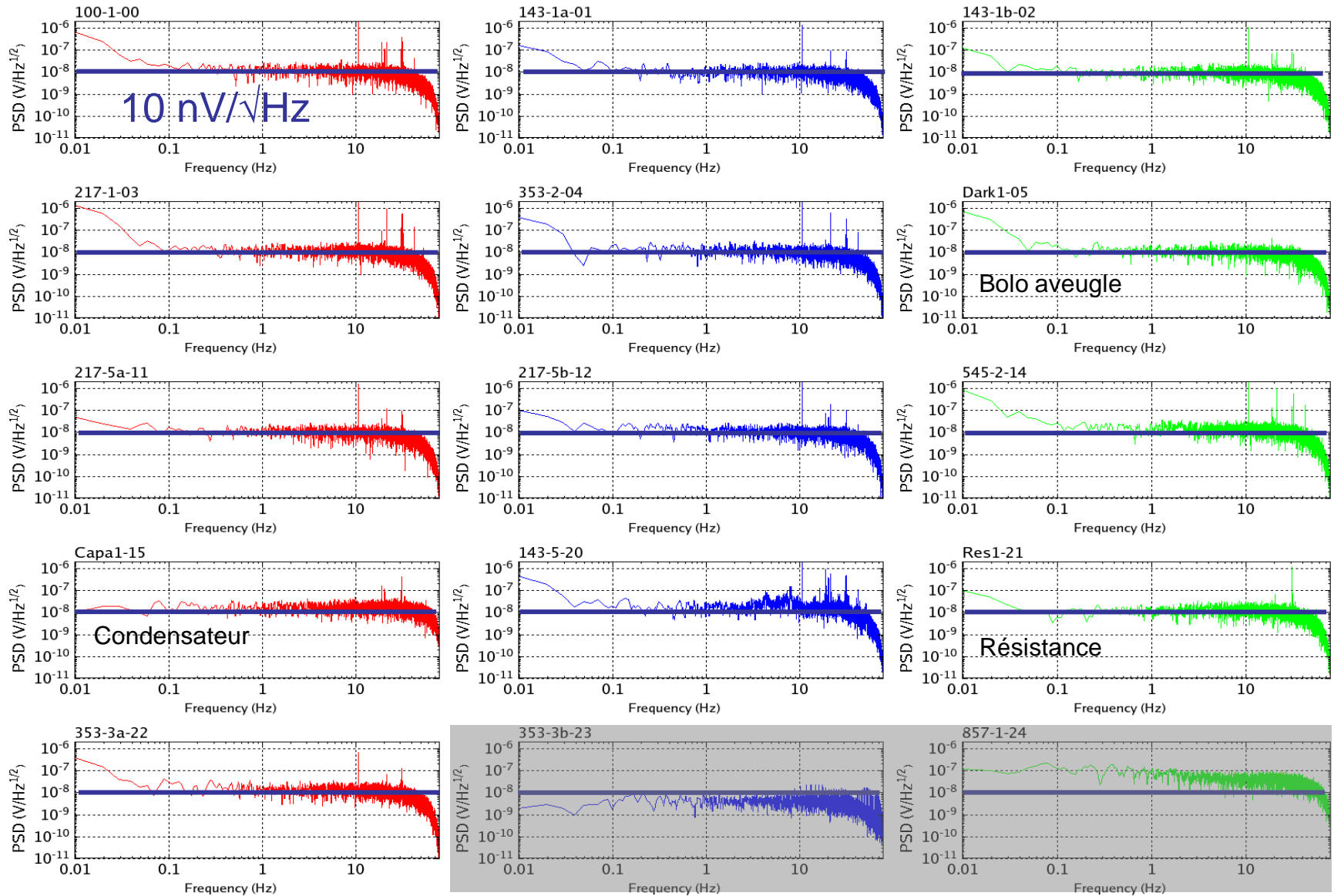
*in P.D. Mauskopf et al., 1997*

## 1. le CQM (Cryogenic Qualification Model) à l' IAS (2004)

HFI CQM

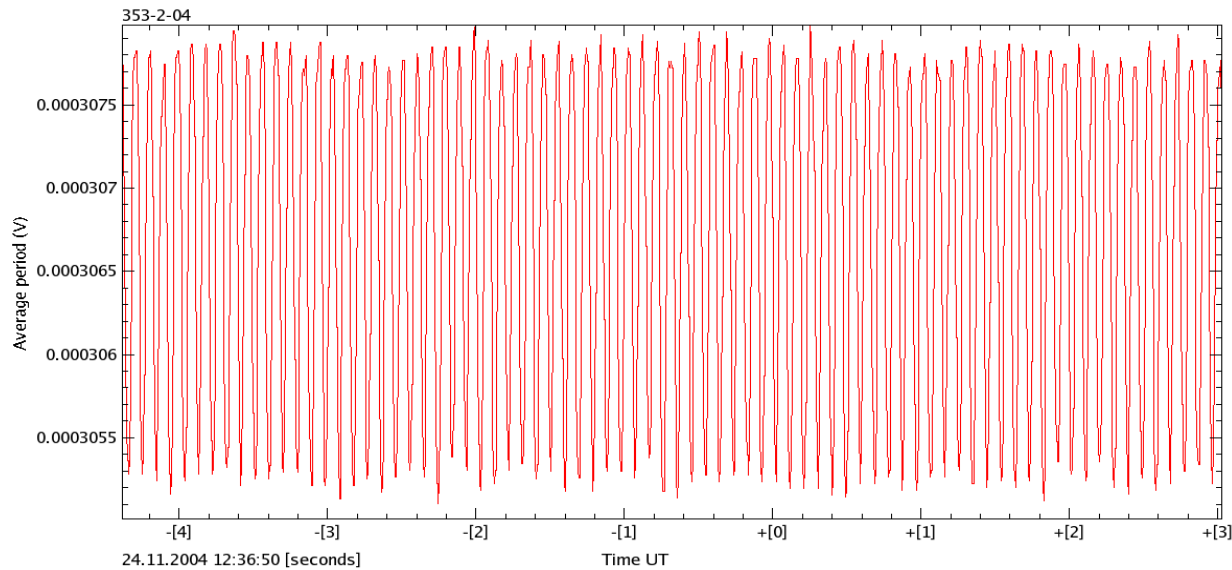


## 2. Mesures dans les six bandes du corps noir modulé @ 10Hz

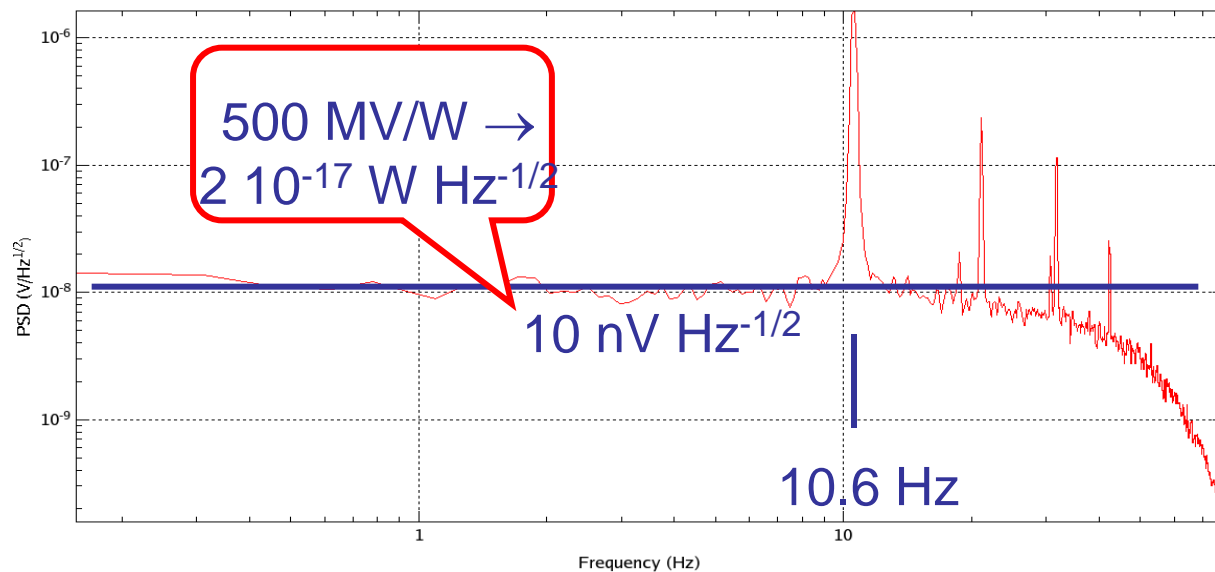


# Calibration Planck-HFI

## Modèle CQM: un NEP dans les spécifications !



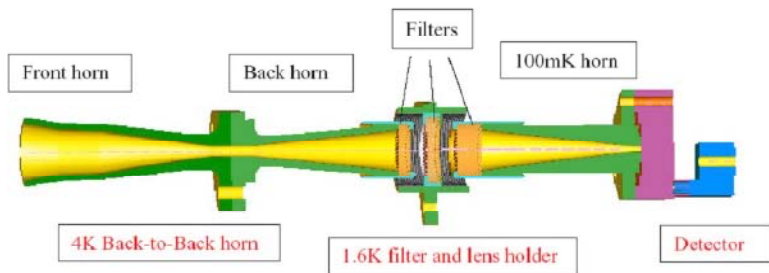
Source CS2 (corps noir modulé par un diapason à 10.6Hz), vue par un bolomètre du canal 353 GHz ( $\approx 7$ sec)



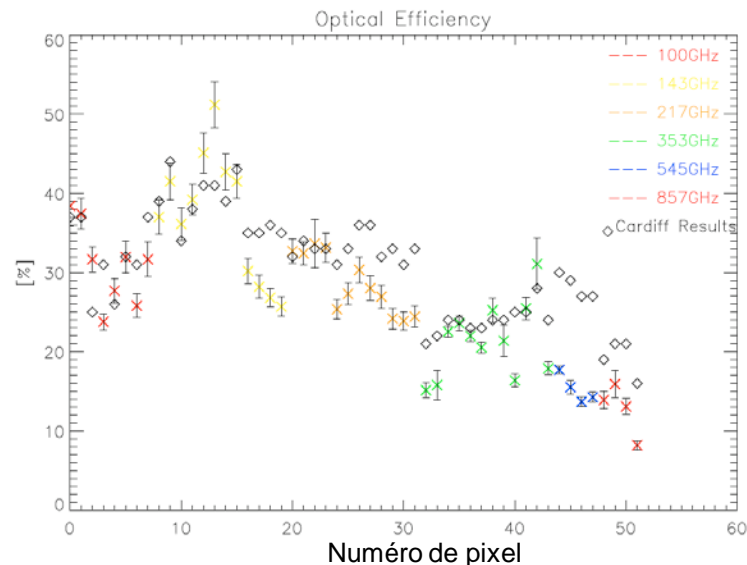
SPhase:	5
MPhase:	0
IBias:	0
VBias:	0
Transient:	4095

# Planck-HFI: calibration IAS (juin-juillet 2006)

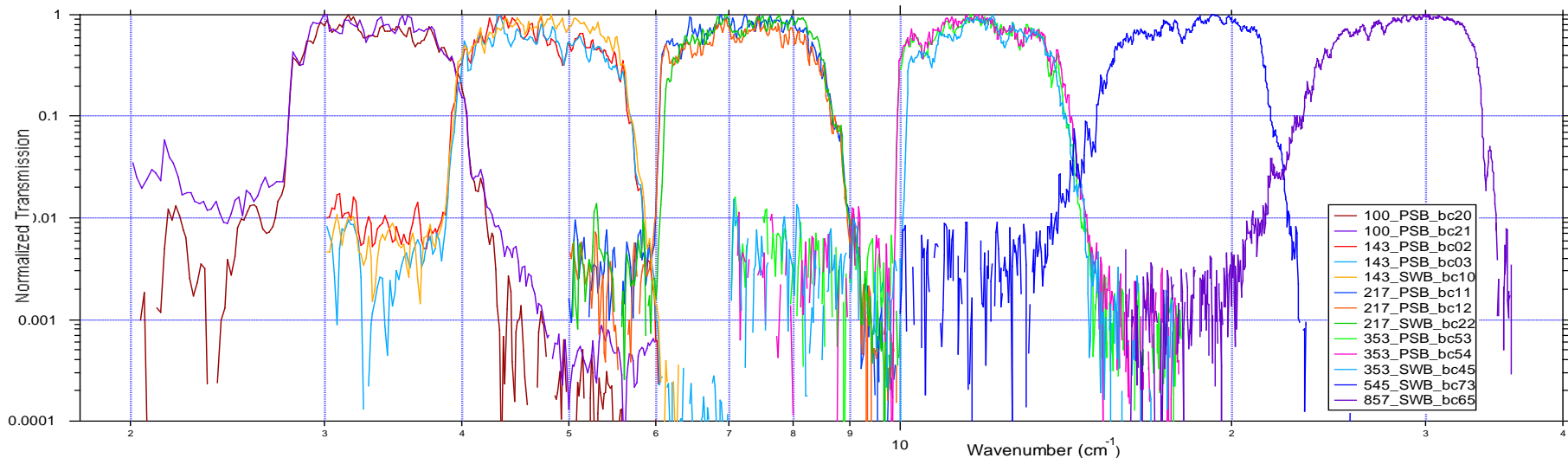
## Chaîne optique



## Efficacité optique

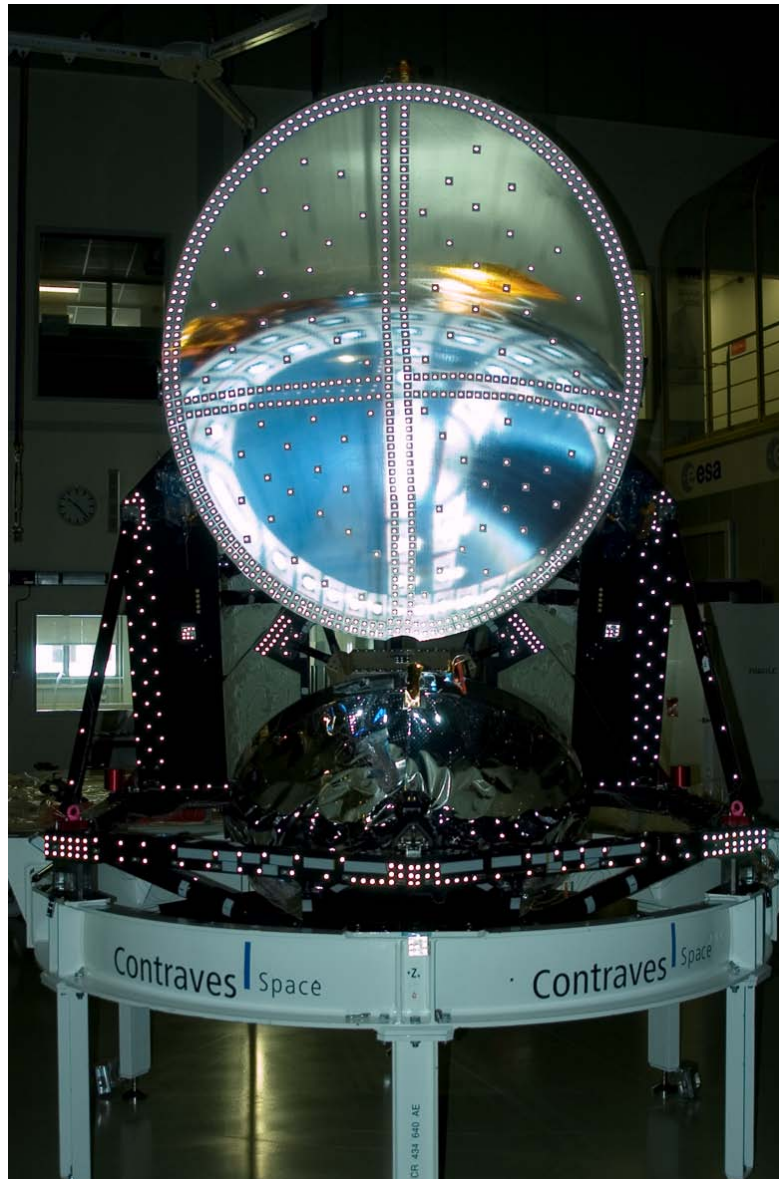


## Transmission spectrale

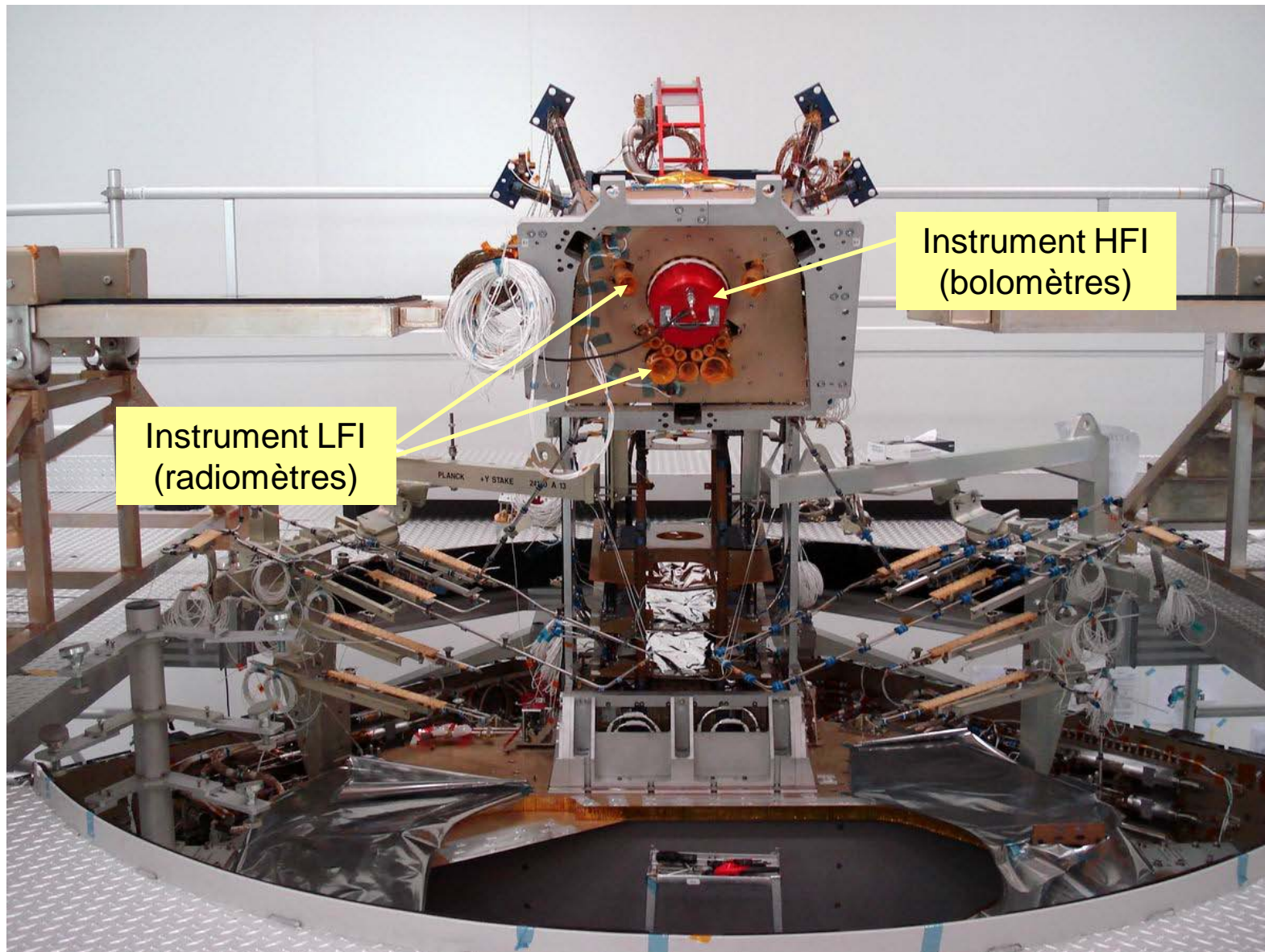




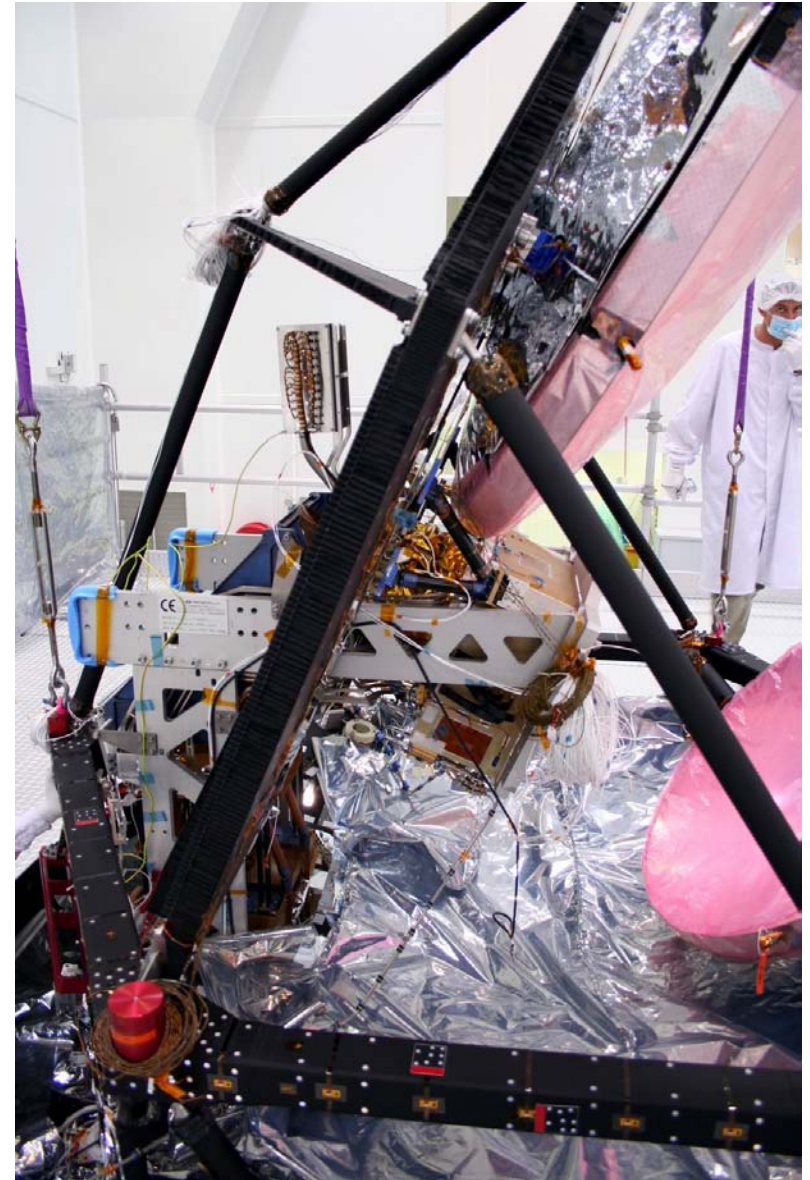
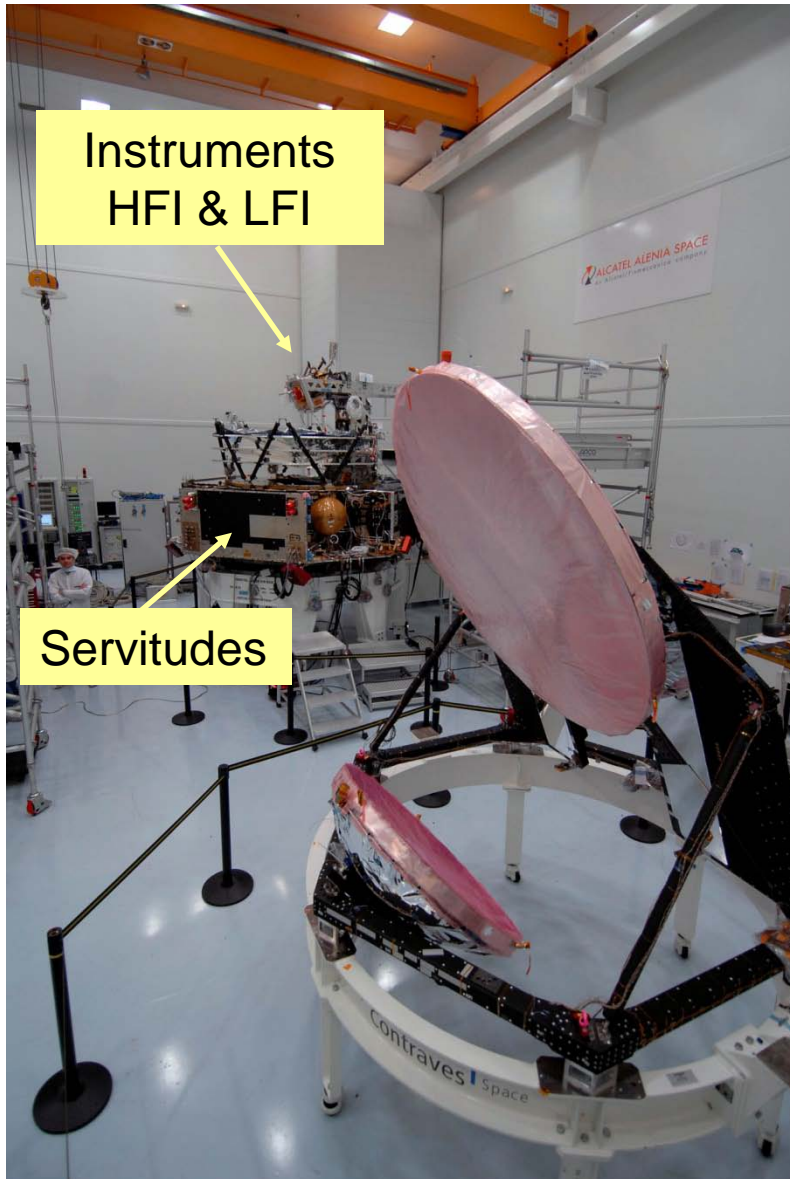
# Planck-HFI: test des déformations du télescope à froid



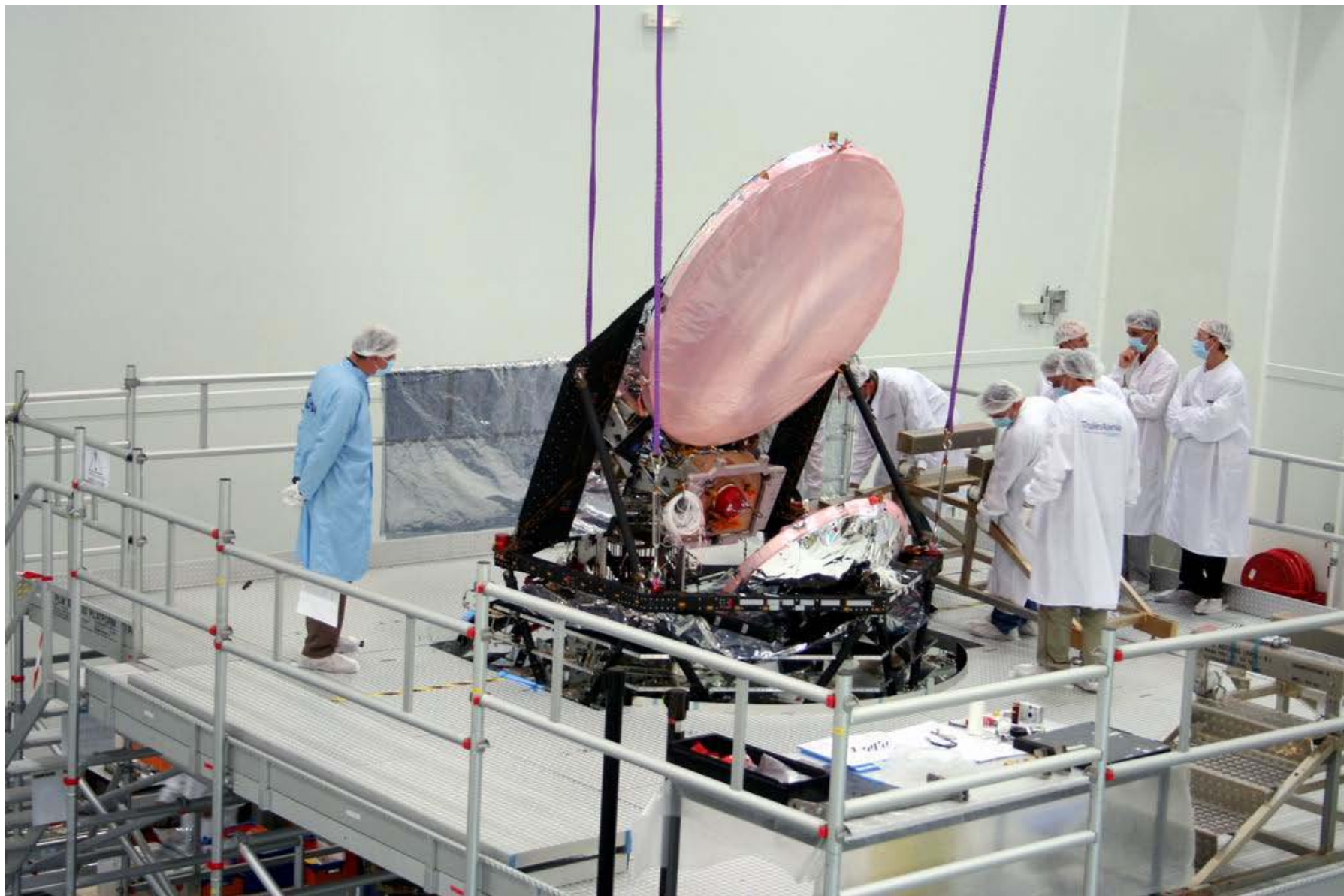
# Intégration de Planck HFI, LFI et d'un refroidisseur à sorption



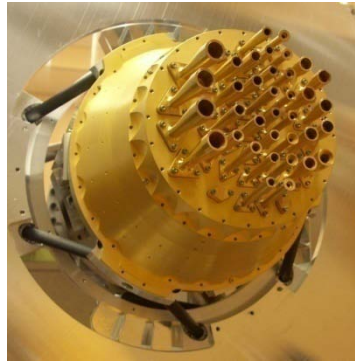
# Intégration du télescope et des instruments



# Le satellite Planck à Cannes (Hall Alcatel-Alenia-Space) en juin 2007



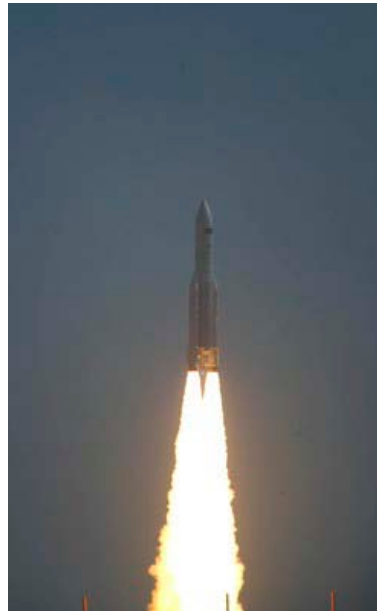
# Planck-HFI: c'est parti !



Planck-HFI  
(CQM)  
@ 100mK



Kourou, le 14 Mai 2009

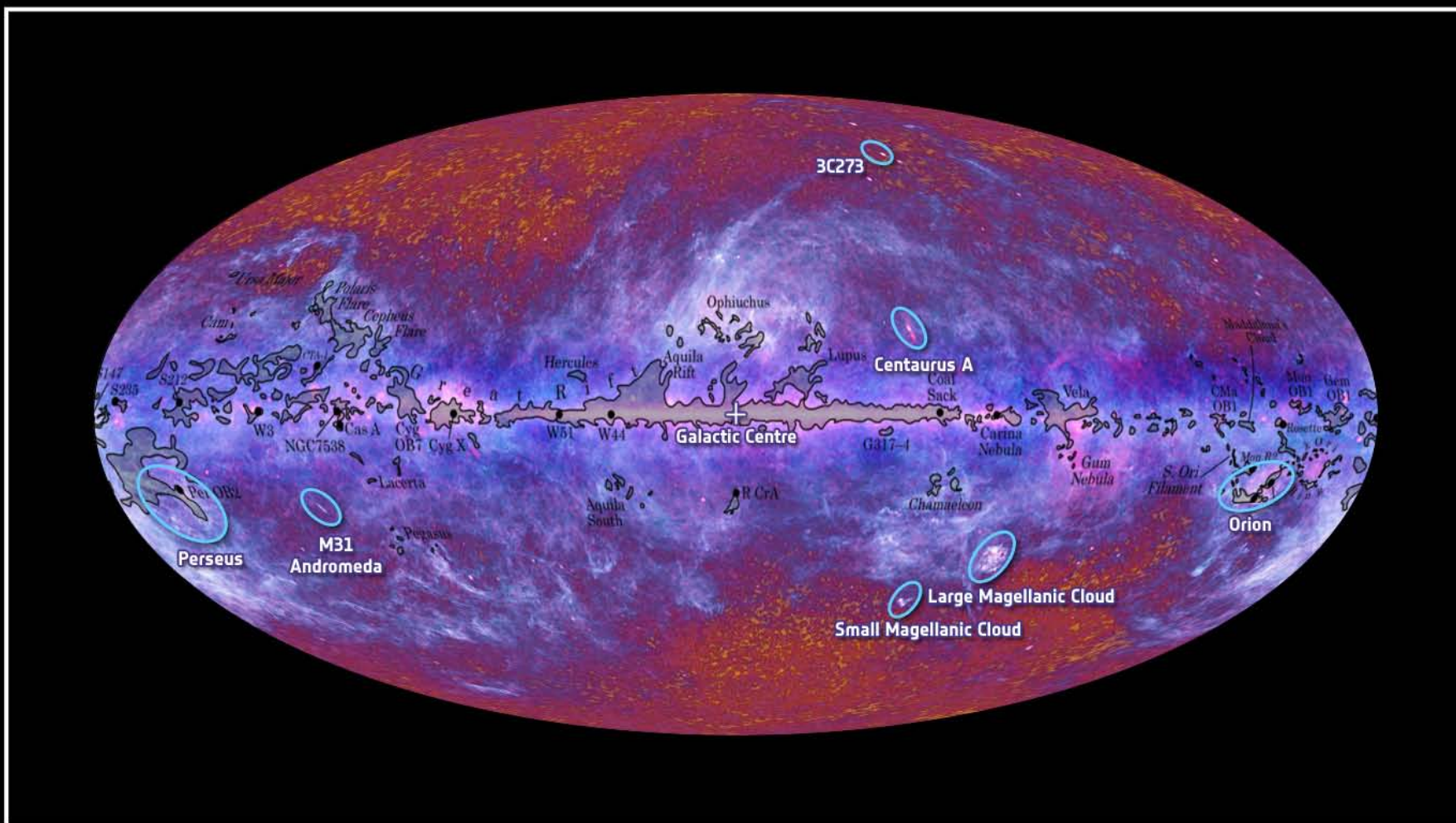


"Du détecteur à la mesure"



Herschel  
@ 300mK

## la plus ancienne carte (submm) de l'Univers



The Planck one-year all-sky survey

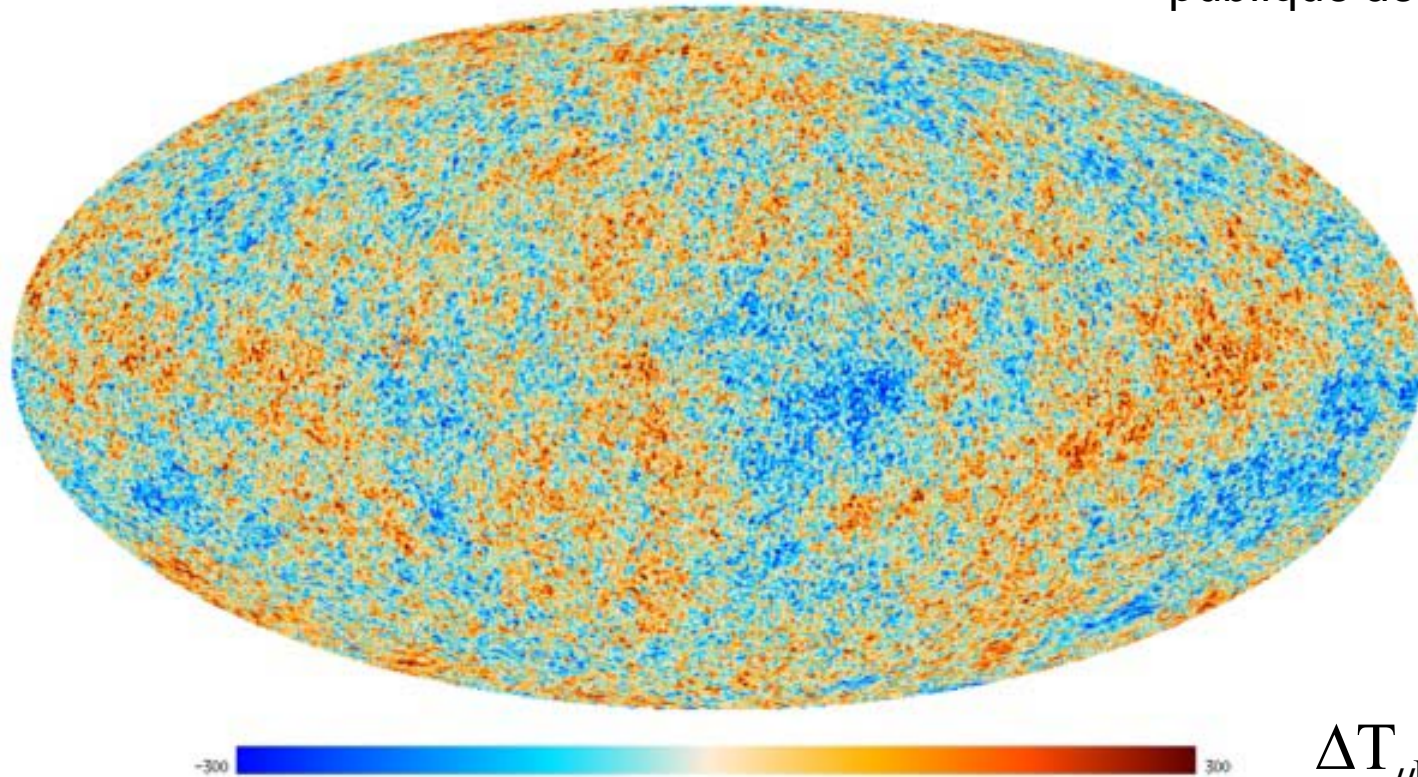


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

# Planck-HFI/LFI: carte haute résolution des anisotropies du corps noir cosmologique

LE RAYONNEMENT FOSSILE par PLANCK

publique depuis le 21 Mars 2013

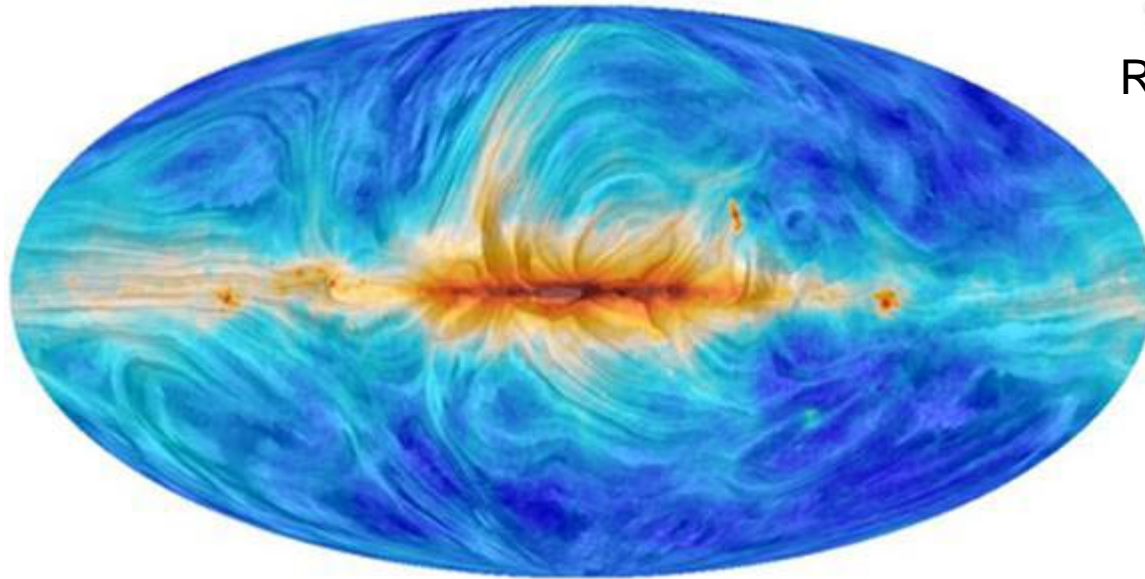


$$\Delta T_{\mu K} = T - 2.726 K$$

- ✓ une carte de référence pour des années de recherche en cosmologie !
- ✓ un succès de l'ESA...avec une forte contribution NASA ("mission enabling technology")

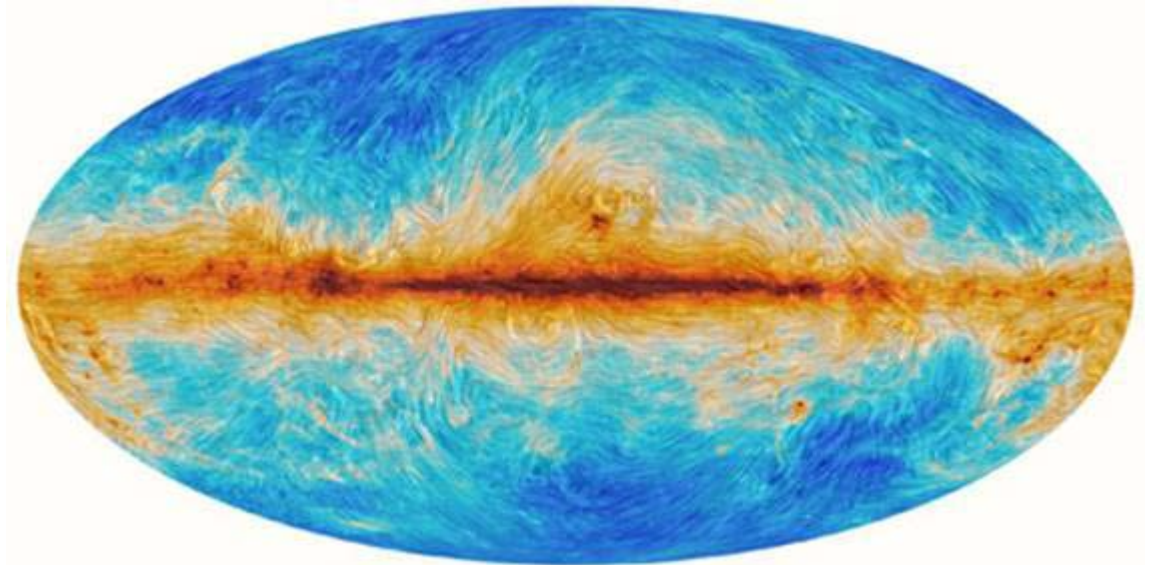
# 2014: la composante polarisée du CMB par Planck

---



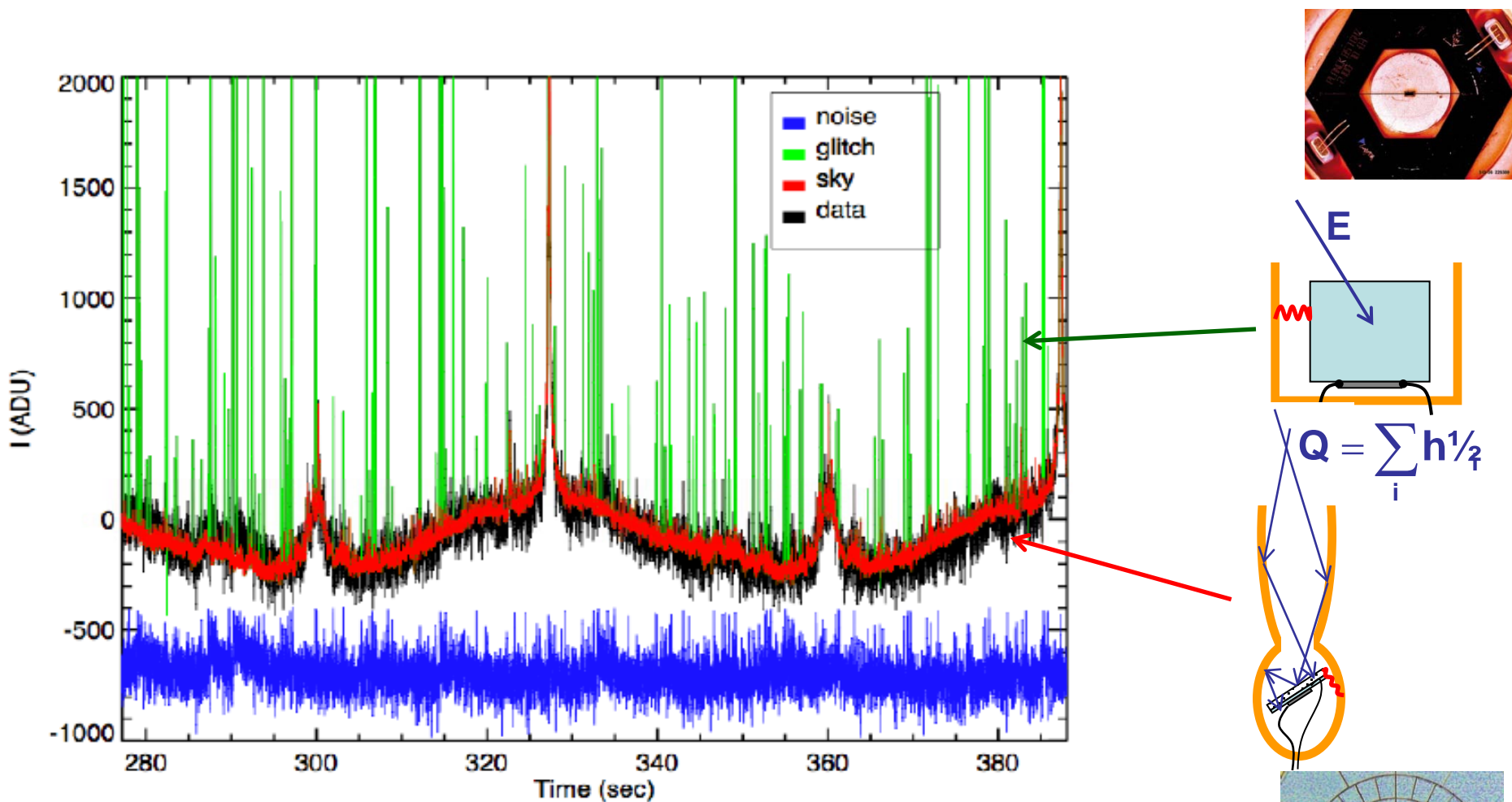
Rayonnement synchrotron

Poussières



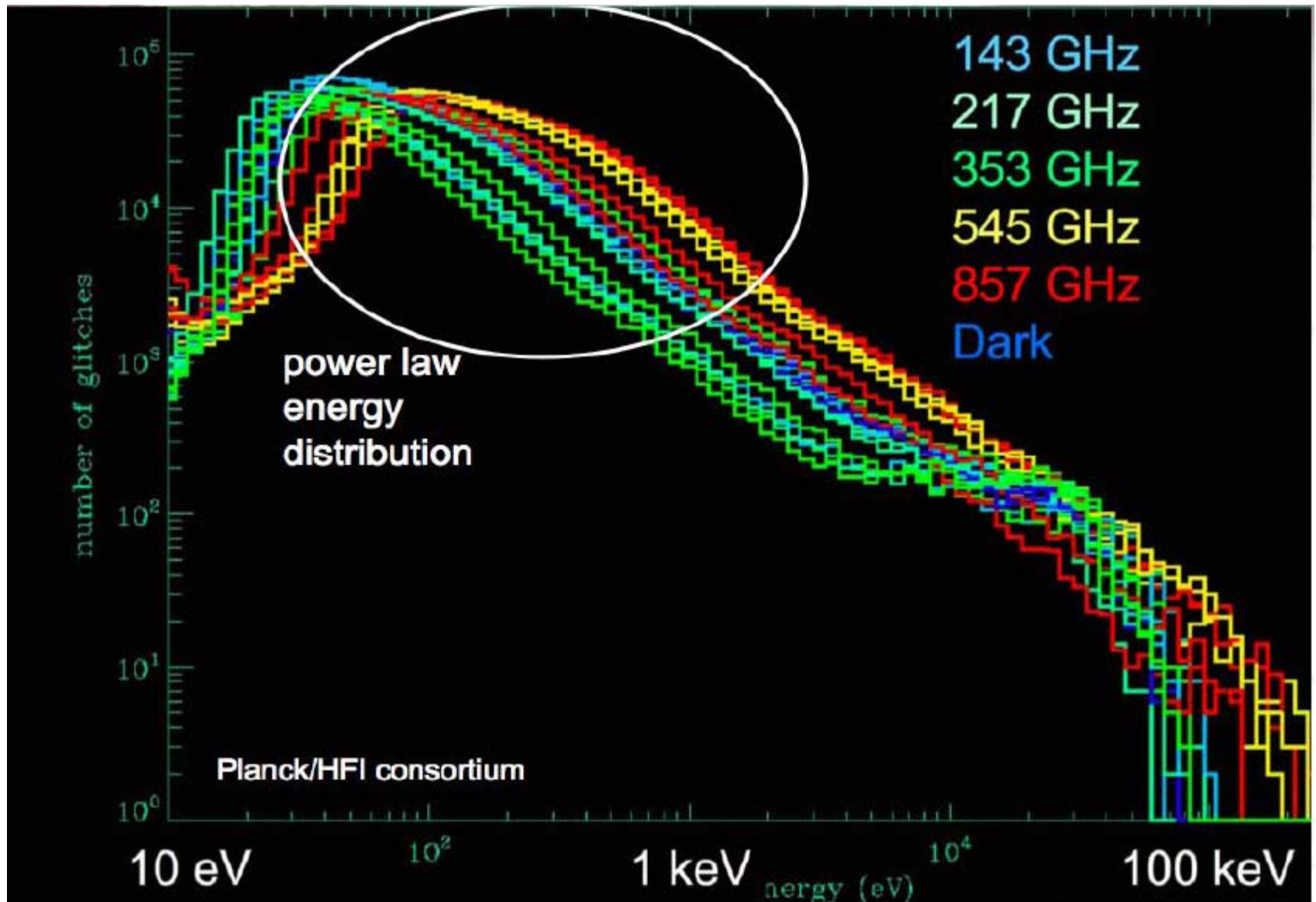


# Des détecteurs au top... mais des particules parasites en nombre !



Base de temps en vol d'un bolomètre 353GHz de Planck-HFI

# Spectre en énergie estimée des « glitches » de Planck-HFI



Source: A. Catalano, IAS

# Les « glitches » affectent 15% des données de Planck-HFI

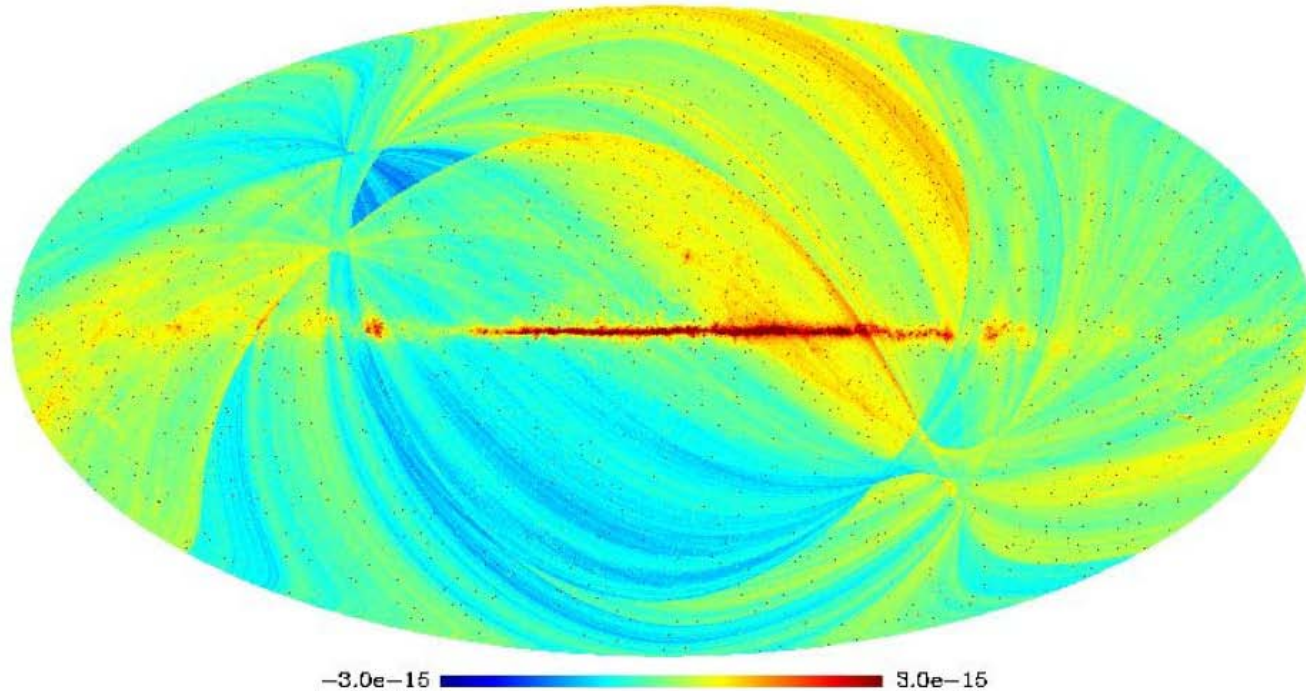


FIGURE 10.2 – Carte obtenue en projetant le signal non *déglitché* du détecteur 04\_217\_1 de HFI. On voit clairement les effets systématiques dominants : les rayons cosmiques (ponctuels et de grande intensité) et les stries dues aux fluctuations de la ligne de base des données entre les différents passages sur un même point du ciel. On voit également la Galaxie. L'échelle de couleurs représente l'amplitude en watt.

Calibrations (post-tir) en cours:

- au tandem IPNL (protons 26MeV)
- à l'IAS (alphas, 5.5MeV)
- ...



Une interprétation correcte est indispensable pour le dimensionnement des missions futures au point L2 !

## Applications des bolomètres en physique fondamentale (suite)

### ❑ Neutrino

#### ❑ masse $m_\nu$ ?

- ❑ désintégration bêta  $\beta^-$ :  $^{187}\text{Re}$
- ❑ capture électronique (EC):  $^{163}\text{Ho}$

#### ❑ nature ?

- ❑ Double désintégration bêta sans neutrino  $\beta\beta_{0\nu}$ :  $^{130}\text{Te}$  (**CUORE**,...)  
+ discrimination « Lumière & Chaleur »:  
→ **bolomètres scintillants** (**LUMINEU**, R&D,...)

### ❑ Autres événements rarissimes (hors $\beta\beta_{0\nu}$ )

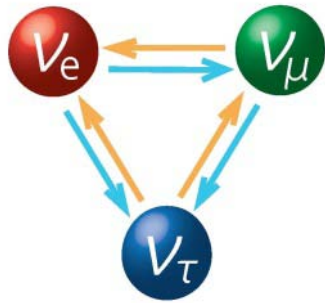
#### ❑ Désintégrations alpha

#### ❑ Détection de la **Matière Noire**

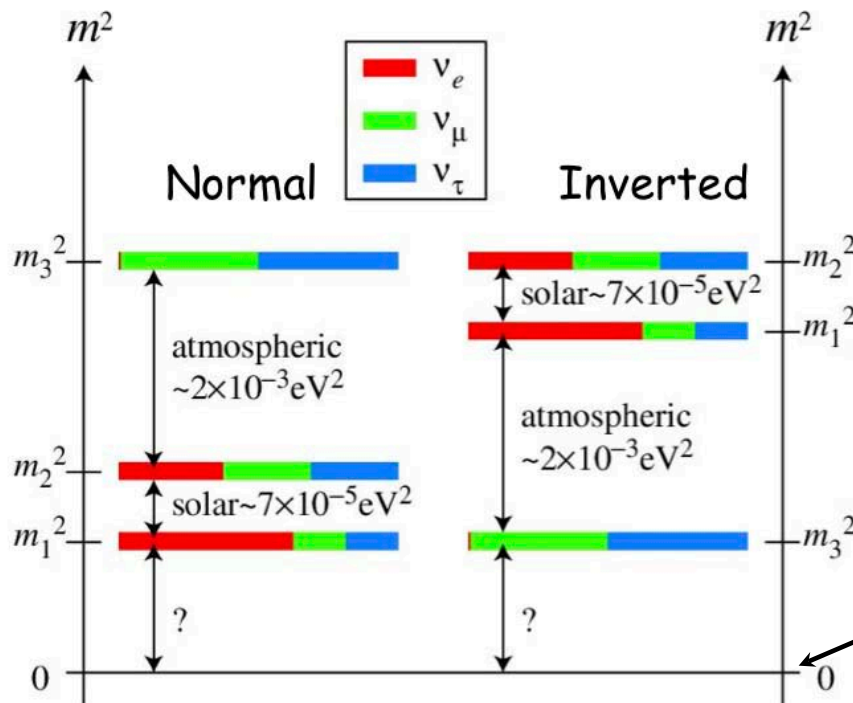
- ❑ par bolomètre scintillant:  $\text{CaWO}_4$ ,... (**CRESST**,...)
- ❑ par bolomètre à semiconducteur: Ge (**EDELWEISS**,...)

# Des neutrinos massifs

□ 1998, 2001: les neutrinos (atmosphériques, solaires,...) oscillent !



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



Oscillation

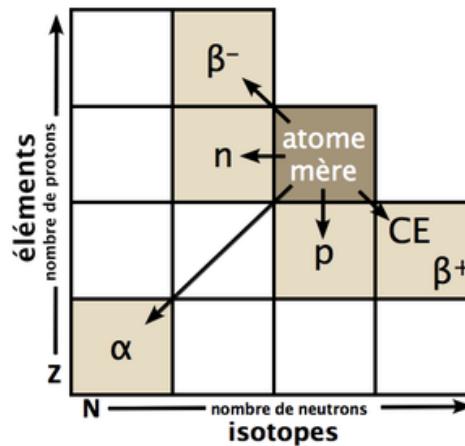
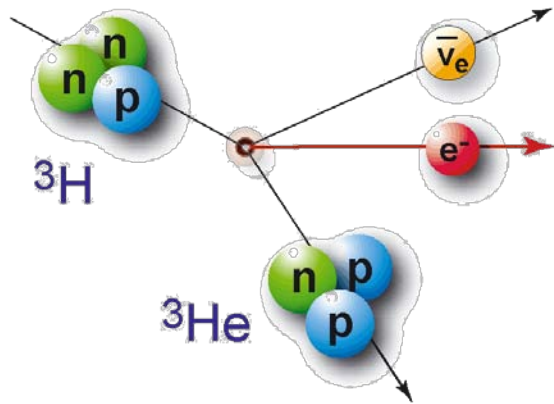
$$\Delta m_{i,j}^2 = m_j^2 - m_i^2 \neq 0$$

Les  $\nu_s$  sont massifs (au moins 2/3)

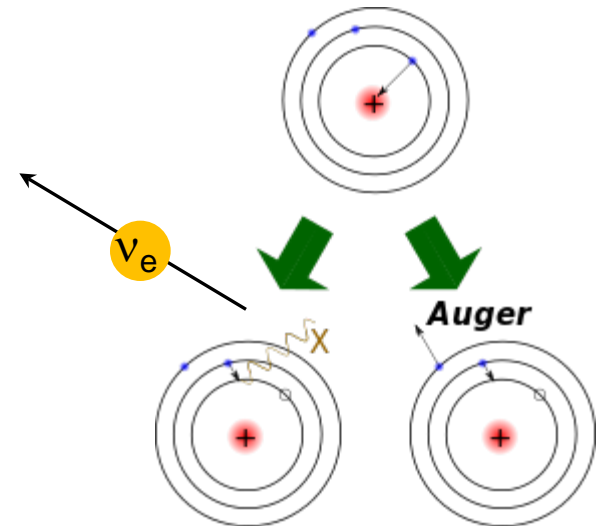
- Hiérarchie de masse: Normale ou Inverse?
- Echelle absolue de masse ?
- ...

# ☐ Masse du neutrino

Par désintégration  $\beta^-$



Par Capture Electronique

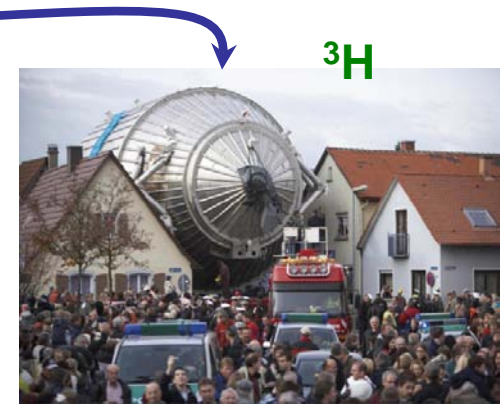


# Mesures cinématiques (end-point) de $m(\nu_e)$

Nucléide	Réaction	Type	Durée de vie	Q (énergie de la réaction)
$^3\text{H}$	$^3\text{He} + \bar{\nu}_e + e$	$\beta^-$	12.3 ans	18.6 keV
$^{187}\text{Re}$	$^{187}\text{Os} + \bar{\nu}_e + e$	$\beta^-$	$43 \cdot 10^9$ ans	2.5 keV
$^{163}\text{Ho}$	$^{163}\text{Dy} + \nu_e + e + e$	EC	4300 ans	2.2-2.8 keV

**KATRIN**

$m_{\nu_e} \leq 0.2$  eV visé  
 $m_{\nu_e} \leq 2.2$  eV actuellement



$^3\text{H}$

$^{187}\text{Re}$

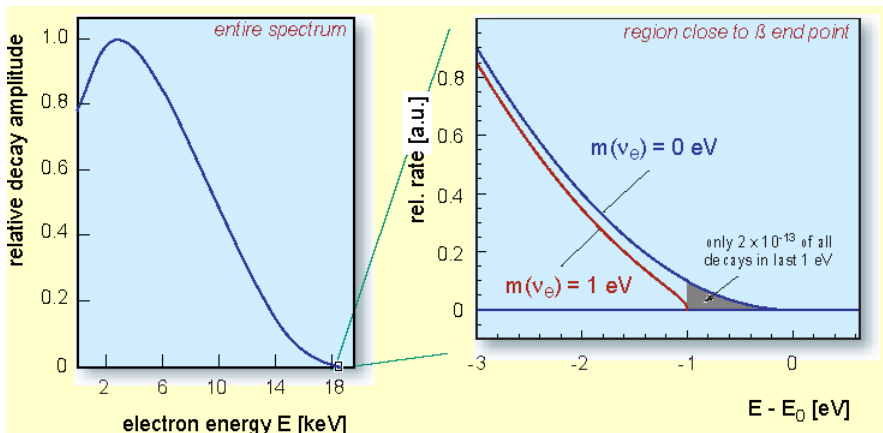
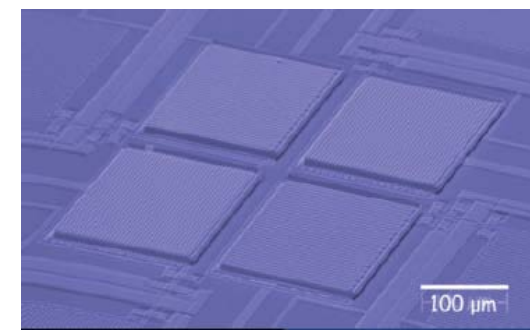
**MARE** (abandonné)



Si implanté

$^{163}\text{Ho}$

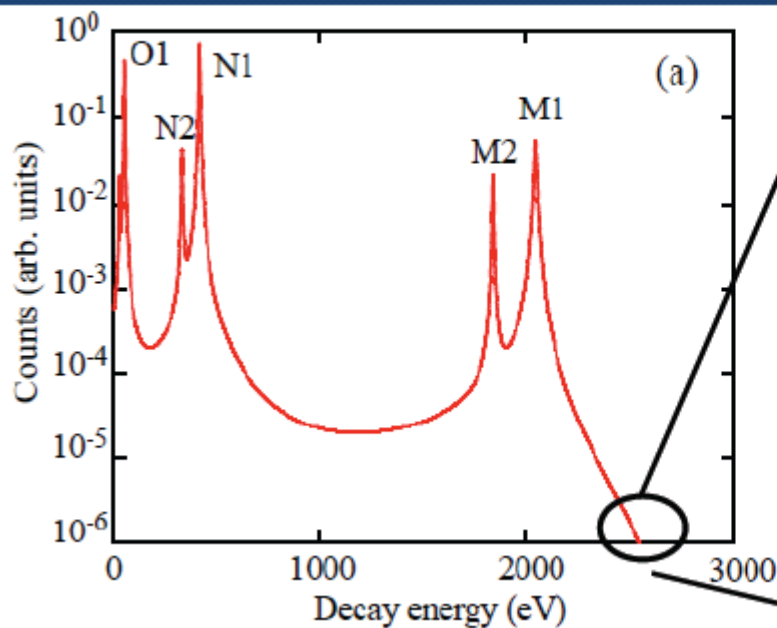
**ECHO** (All.),  
**HOLMES** (It.)  
**NUMECS** (US)



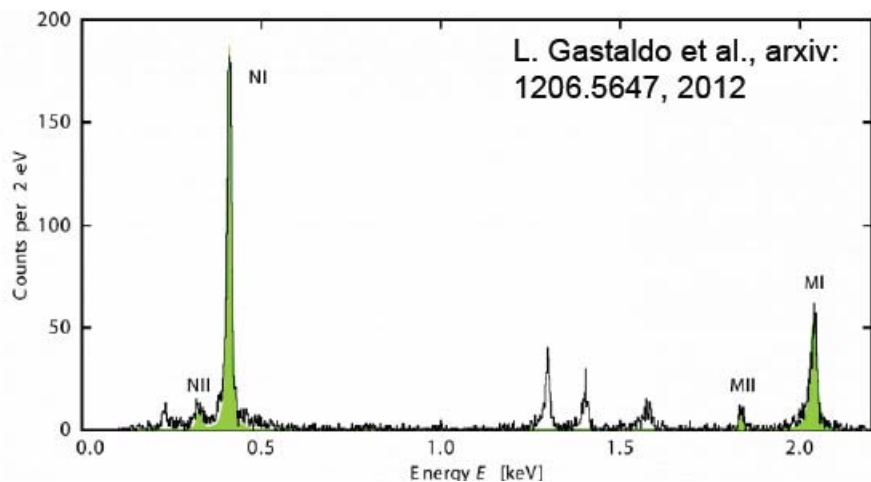
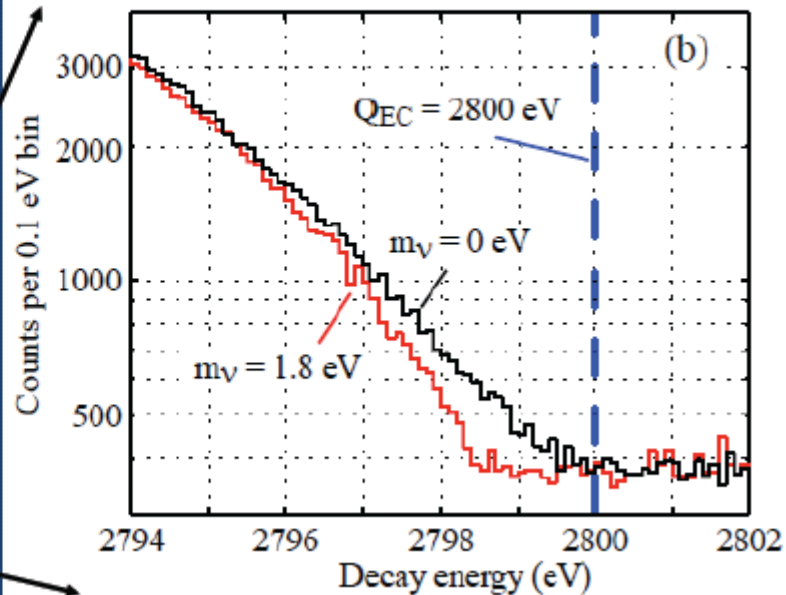
→ voir cours Ulli Koester

# Mesure de $m(\nu_e)$ par $^{163}\text{Ho}$

Calculated  $^{163}\text{Ho}$  decay spectrum

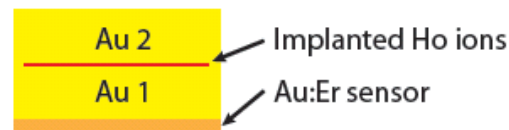


Zoom on endpoint



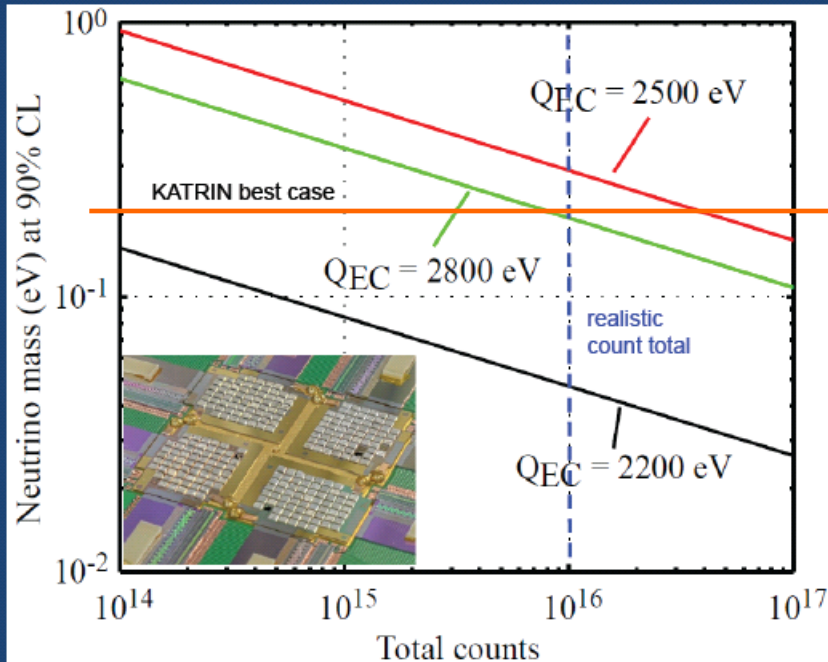
Collaboration ECHO (Heidelberg), 2012

- Au implanté  $^{163}\text{Ho}$
- Senseur magnétique @ 35mK
- $\Delta E_{\text{FWHM}} \sim 12 \text{ eV}$  @ 2 keV

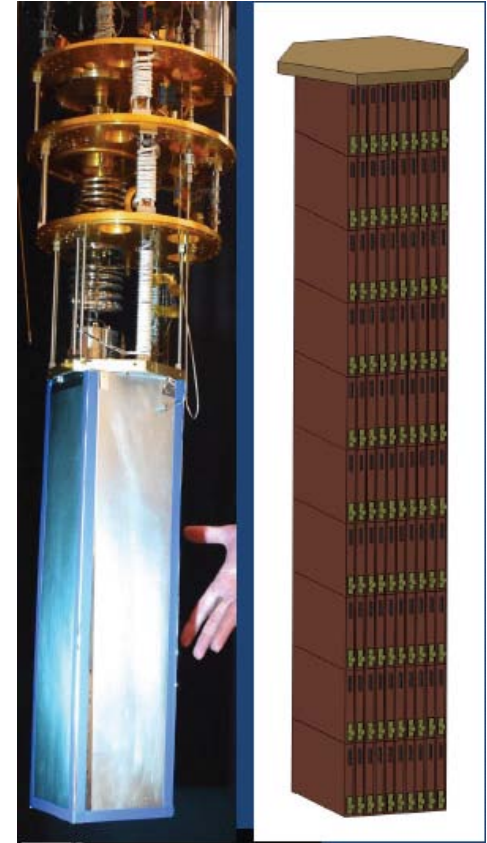




# David contre Goliath ?



realistic  
 $3 \times 10^5$  pixels at  
 200 cps/pixel  
 for 5 years =  
 $10^{16}$  counts



d'après M. Rabin, 2013

- A huge scale-up in array size is needed: from 256 pixels (shown) to  $\sim 10^5$
- Science reach dependent on Q and statistics
- Mass limit can be better than best KATRIN predictions. Systematics different, simpler.

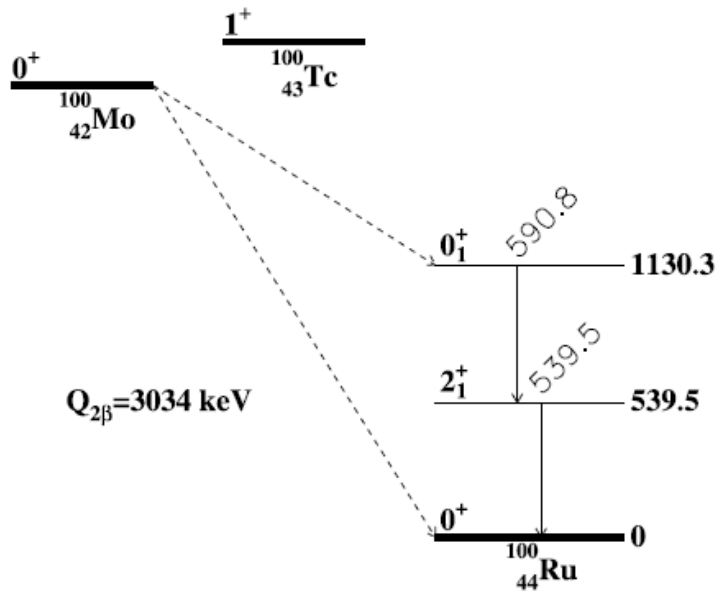
✓ TES@ 100mK, Au implanté

✓ R&D sur multiplexage:

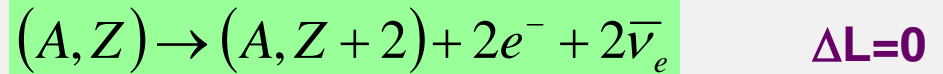
lecture Micro-onde des Squids  $\rightarrow 10^3$  à  $10^4$  voies résonantes par ampli

# □ Désintégration Double bêta sans neutrino

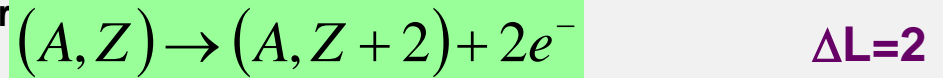
# La désintégration $\beta\beta 0\nu$ , un test fondamental de la nature des neutrinos



- $\beta\beta 2\nu$  (rare, mais existe; 17 isotopes; record  $^{124}\text{Te}$   $T_{1/2} \sim 10^{24}$  ans)

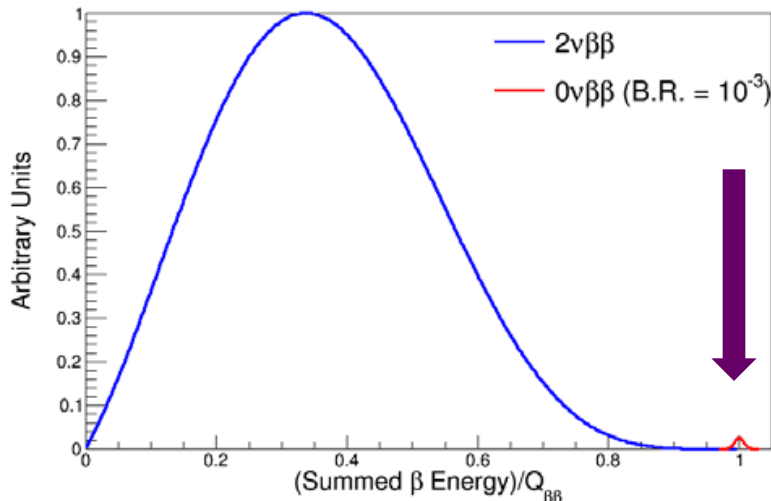


- $\beta\beta 0\nu$  (existence ?  $\rightarrow$  Physique au delà du Modèle Standard)



$\rightarrow$  violation du "Nombre Leptonique" L  
 $\rightarrow$  le neutrino est "de Majorana"

$$\nu_e = \bar{\nu}_e$$



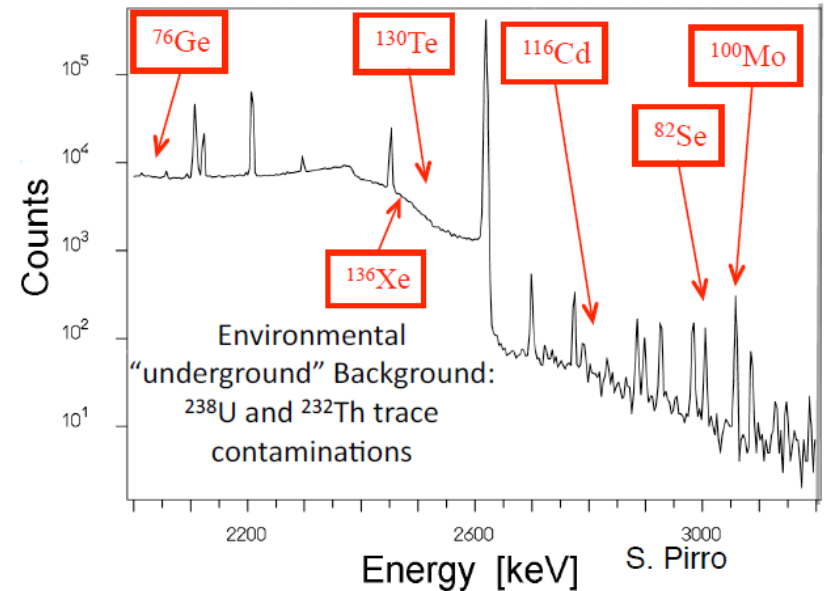
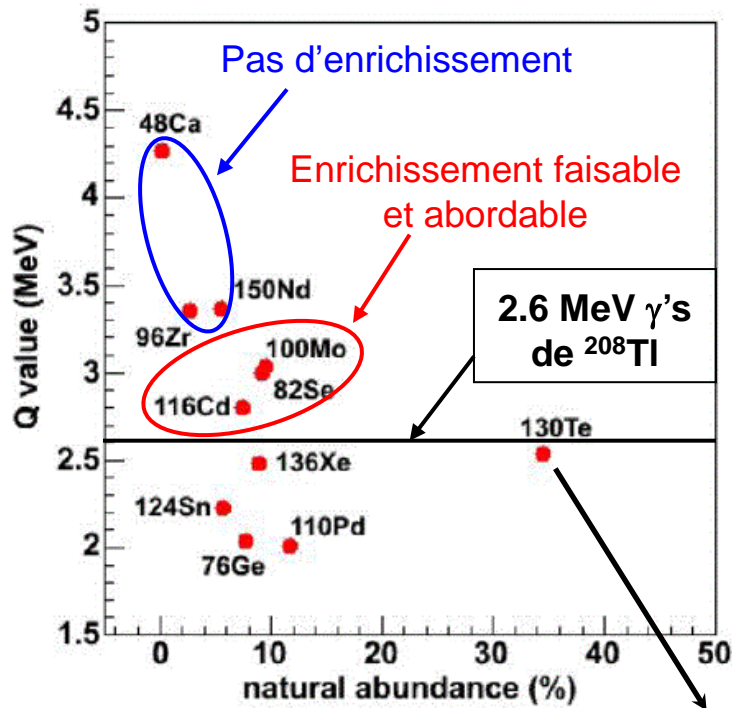
Durée de vie | Espace des phases | Élément de matrice nucléaire

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) \cdot |M^{0\nu}(A, Z)|^2 \cdot \frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle^2}{m_e^2}$$

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

Masse "effective" de Majorana

# Le choix des isotopes



Le choix de l'expérience CUORE au Gran Sasso (bolomètres massifs en  $\text{TeO}_2$ ): existence, abondance, radiopureté

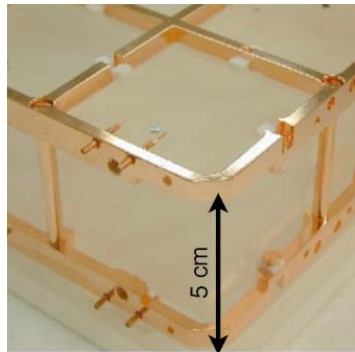
Expériences de 2<sup>nde</sup> génération (post-CUORE):

→  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$  : le choix du ROI

LUCIFER,  
SUPERNEMO

LUMINEU  
AMORE,  
LUCINEU

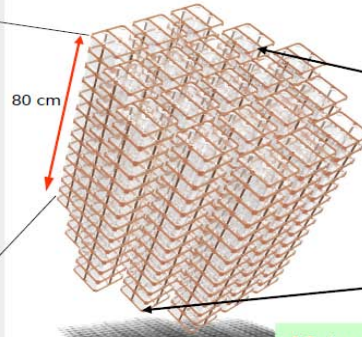
# L'approche bolométrique: l'expérience de CUORE



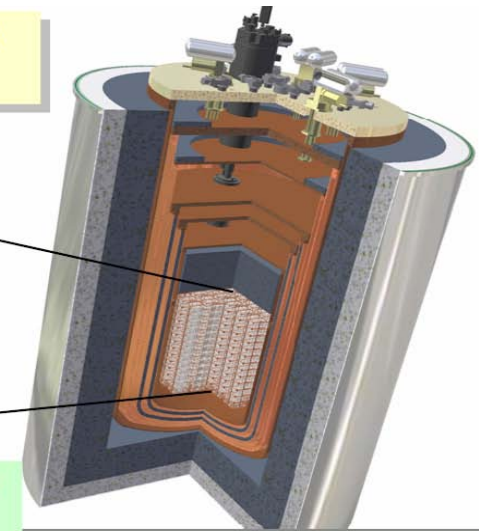
Array of 988  $\text{TeO}_2$   $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  detectors (750 g each)  
 $M = 741 \text{ kg}$  of  $\text{TeO}_2 = 206 \text{ kg}$  of  $^{130}\text{Te}$



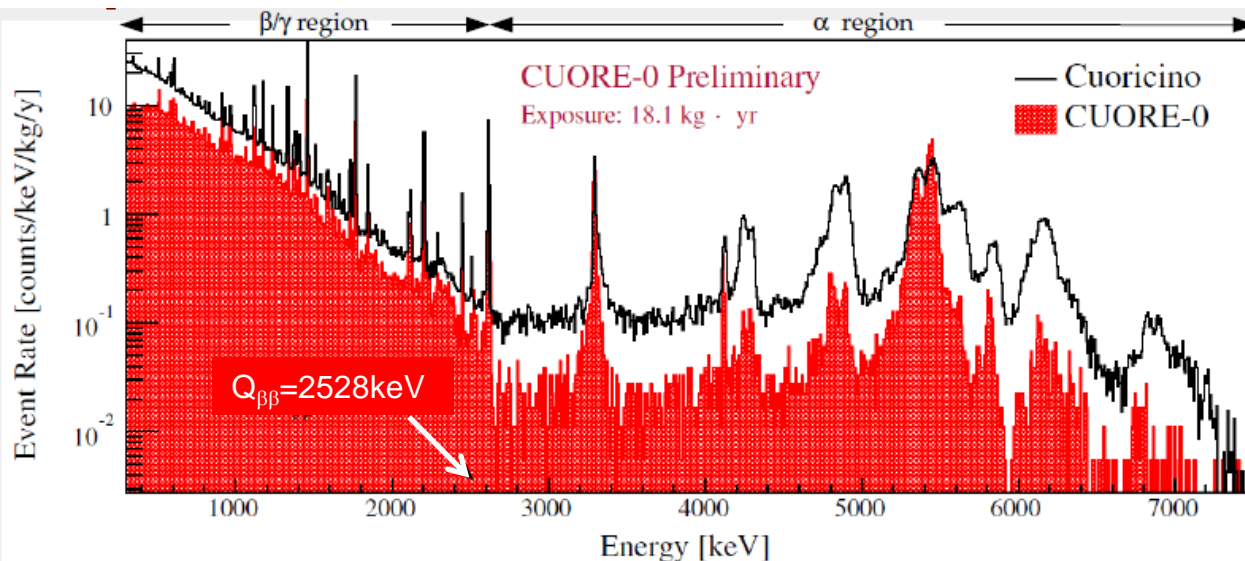
80 cm



19 towers with  
 13 planes of  
 4 crystals each



Monica Sisti — ICHEP 2014, Valencia (Spain), 3 Jul 2014



Un fond dominé par des alphas dégradés provenant des surfaces dans la ROI

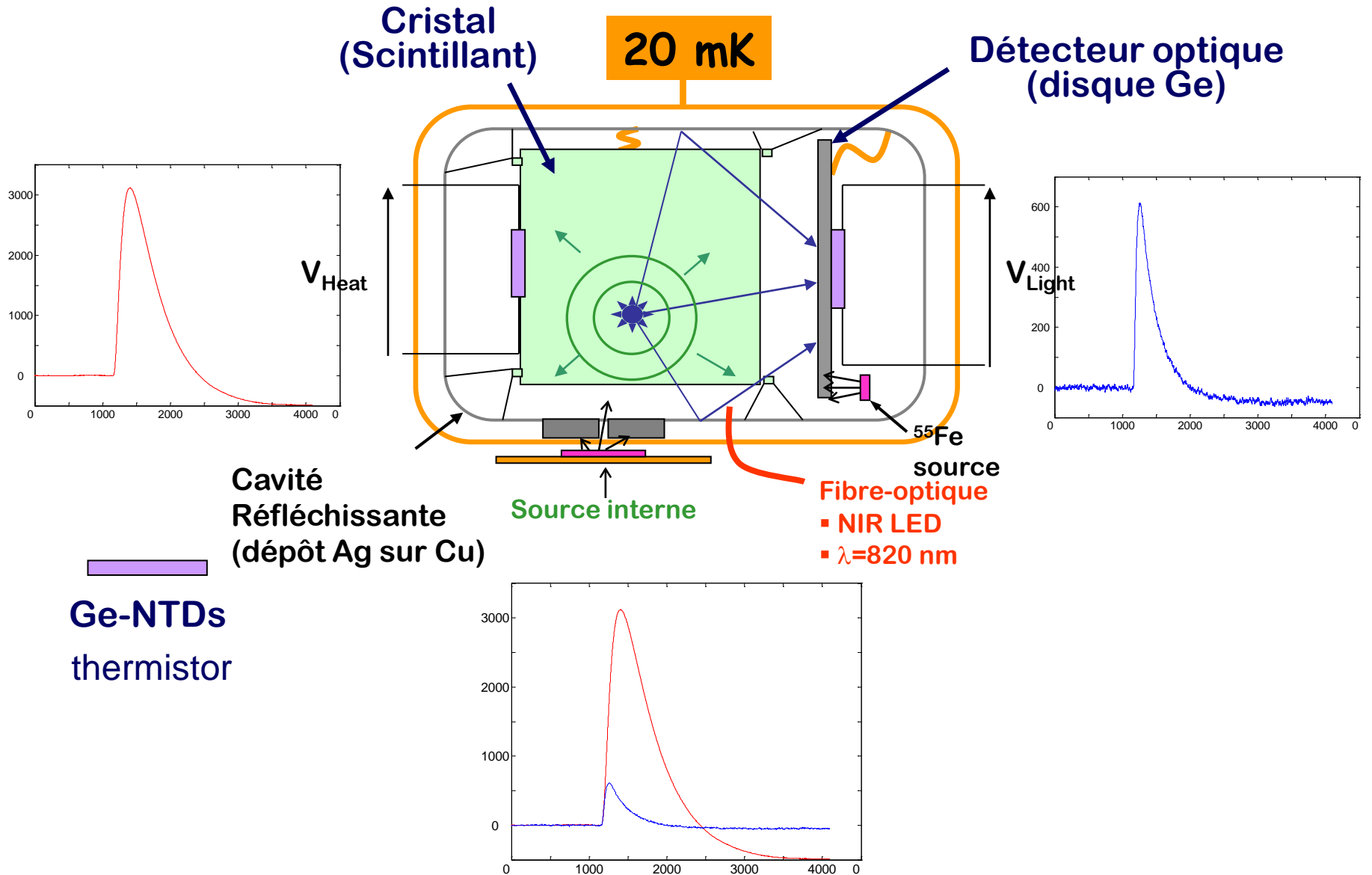
$$\lim T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M \cdot t}{B \cdot \Delta E}}$$

→ Comment s'en débarrasser ?

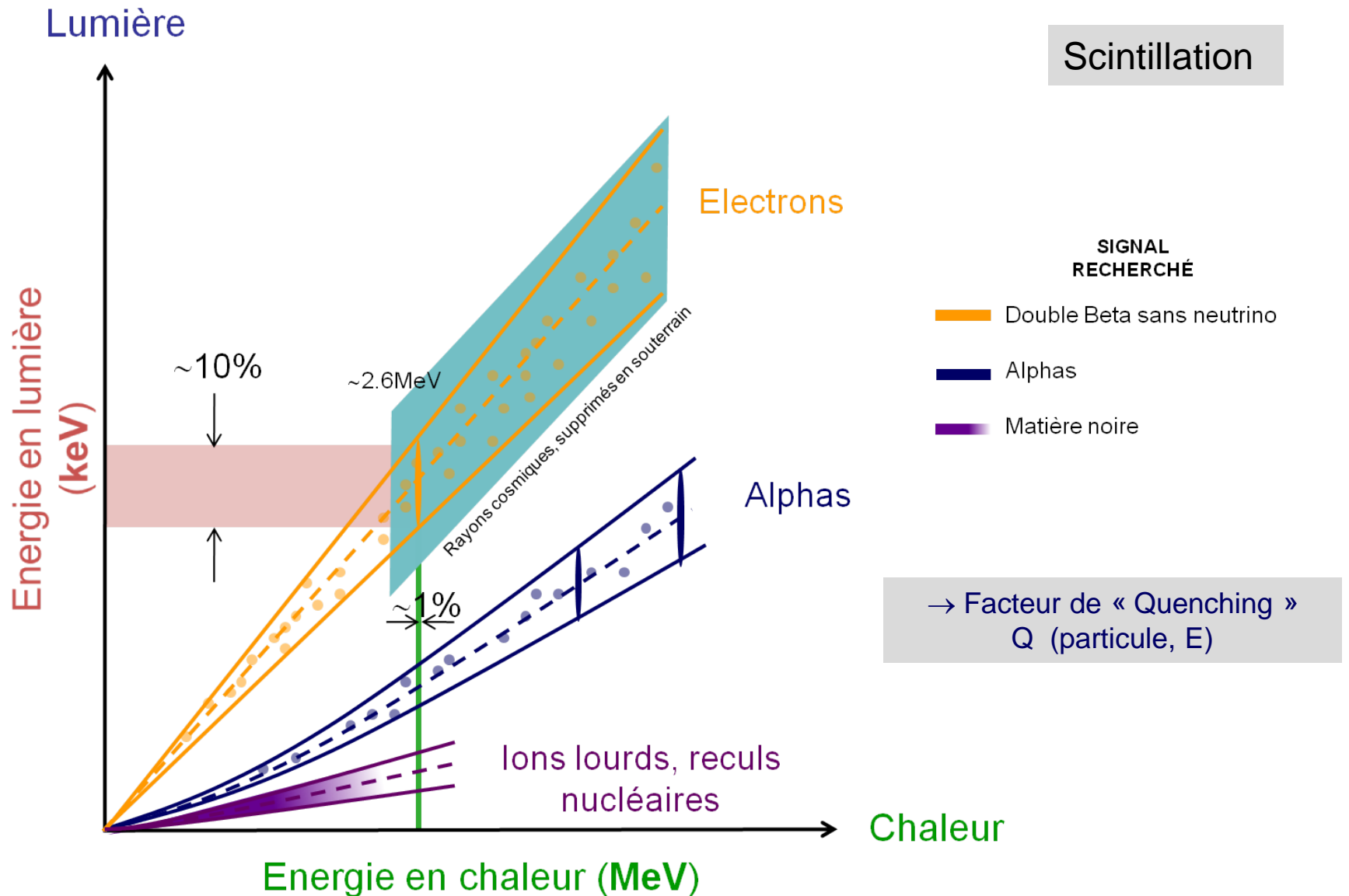
# Bolomètres scintillants

✓  $\beta\beta 0\nu$  (LUMINEU,...)

# Bolomètres Scintillants



# Une discrimination multi-usages



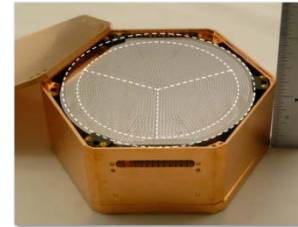


## SEMI-CONDUCTEURS [DISCRIMINATION « CHARGE / CHALEUR »]

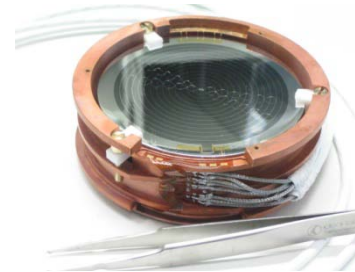
d'après Knoll G., Radiation Detection and measurement

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Cristaux massifs commerciaux
R&D sur petits échantillons
Géométrie plane (e ≈ mm)



CDMS: Ge, Si



EDELWEISS: Ge

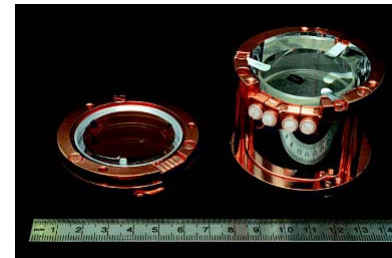
## SCINTILLATEURS [DISCRIMINATION « LUMIERE / CHALEUR »]

d'après: Derenzo S. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-37 (1990) 203-208; Derenzo S. & Moses W., proceedings of CRYSTAL 2000, sept. 1992,...

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Cristaux massifs commerciaux
R&D monocristaux, non commercialisés
R&D poudres

CRESST, CaWO<sub>4</sub>, ...



ROSEBUD, Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, ...



ββ  
LUMINEU  
ZnMoO<sub>4</sub>, ...



## Luminescent **U**nderground **M**olybdenum **I**nvestigation for **NEU**trino mass and nature

- ✓ expérience prototype pour les prochaines générations de recherche  $\beta\beta 0\nu$  (test du scénario de « Hiérarchie de masse Inverse » des neutrinos)
- ✓ à base de  $^{100}\text{Mo}$  (~1kg à l'horizon **2015**)
- ✓ dans des bolomètres scintillants en ZMO ( $\text{ZnMoO}_4$ ), ou LMO ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ )
- ✓ dans les laboratoires souterrains du LSM ou du LNGS

 **FRANCE**  
 CNRS: CSNSM (IN2P3)  
 IAS (INSU)  
 ICMCB (INC)  
 CEA/IRFU

 **UKRAINE** INR Kiev  
 **RUSSIE** NIIC Novosibirsk  
 **ALLEMAGNE** KIP Heidelberg

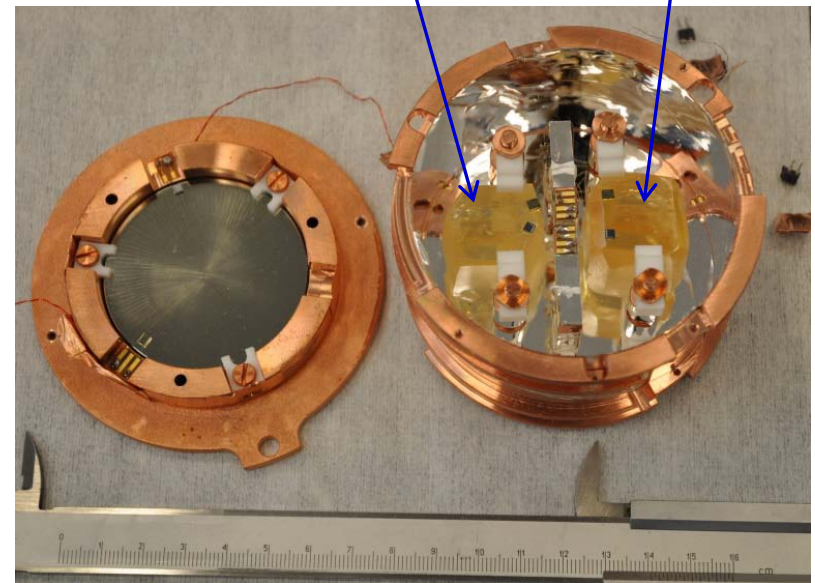
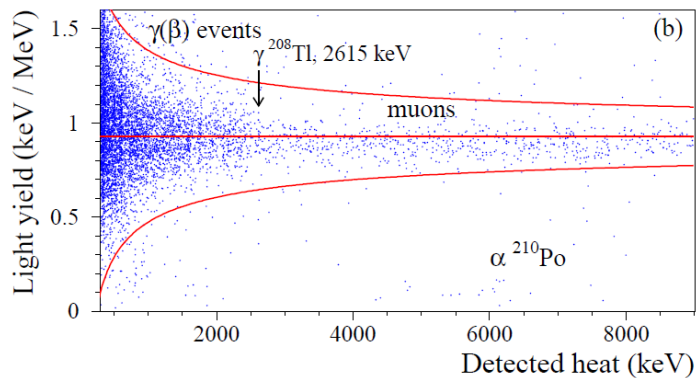
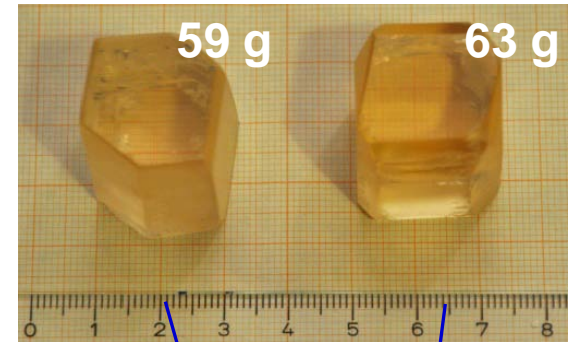
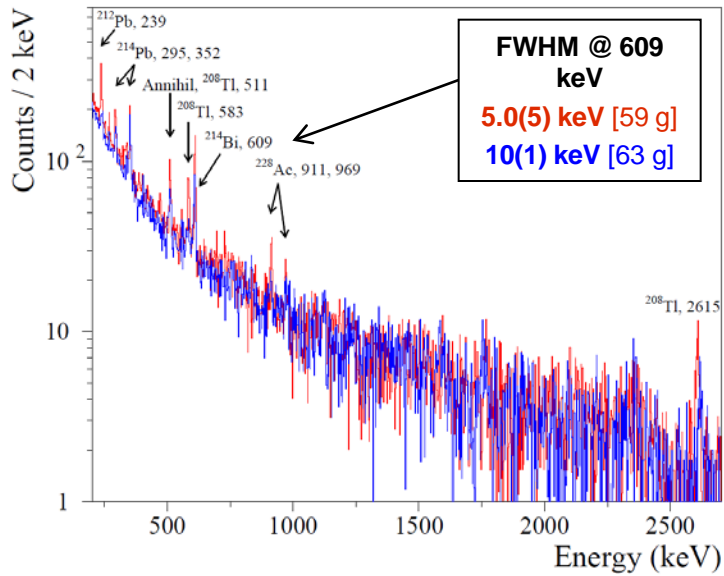
 **ITALIE** INFN Milano Bicocca

Sensibilité visée sur 5 ans à 90% CL  
 $\text{ZnMoO}_4$  nat. ou enrichi en  $^{100}\text{Mo}$  (97%)  
 Fond  $\approx 4 \times 10^{-4}$  evts/keV/kg/an  
 à  $Q_{\beta\beta} \pm 3\text{keV}$

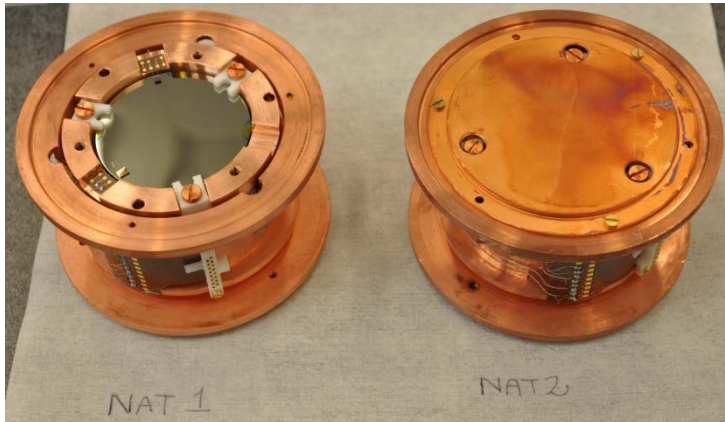
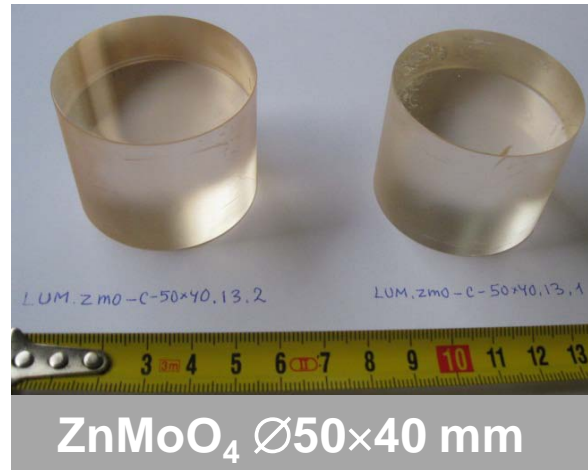
Number of $\approx 400$ g crystals	Total isotope mass [kg]	Half-life sensitivity [ $10^{25}$ y]	$m_{\beta\beta}$ sensitivity [meV]
4	0.676	0.53	167-476
40	6.76	4.95	55-156
2000 (nat.)	33.1	15.3	31-89
2000	338	92.5	13-36



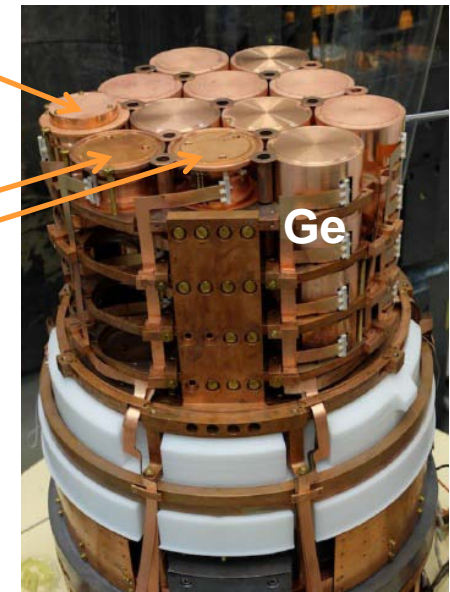
- ✓ test de cristaux de  $\text{ZnMoO}_4$
- ✓ enrichis à 99.5% en  $^{100}\text{Mo}$
- ✓ perte de ~4% seulement lors du tirage



# LUMINEU: sous sol (@LSM)



$\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$   
59 g & 63 g  
2 x  $\text{ZnMoO}_4$   
334 g + 336 g

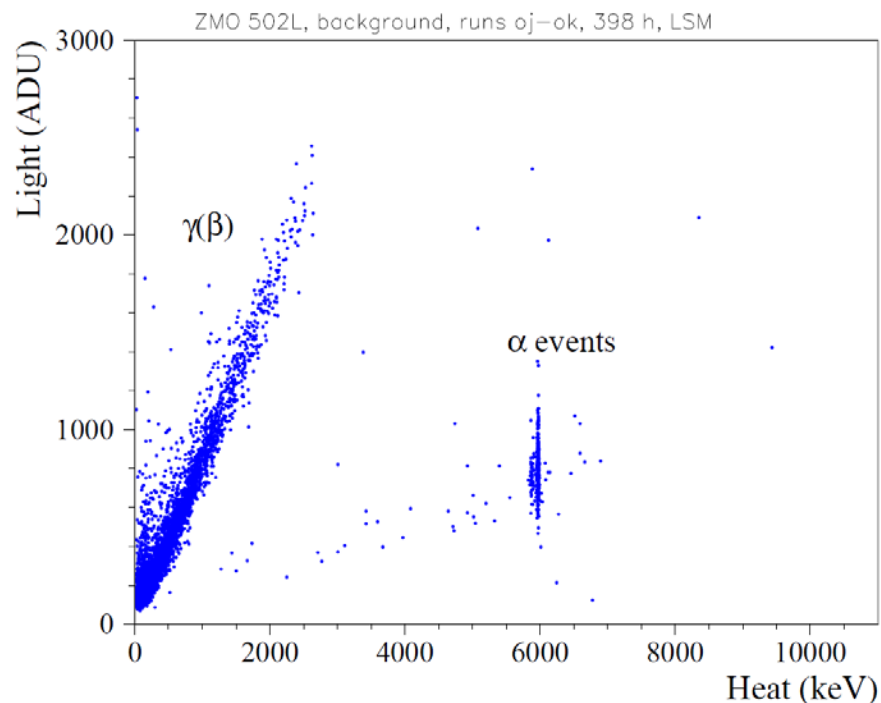


Banc EDELWEISS  
@ LSM (Modane)  
juin 2014 →

# LUMINEU: état des lieux en mars 2015

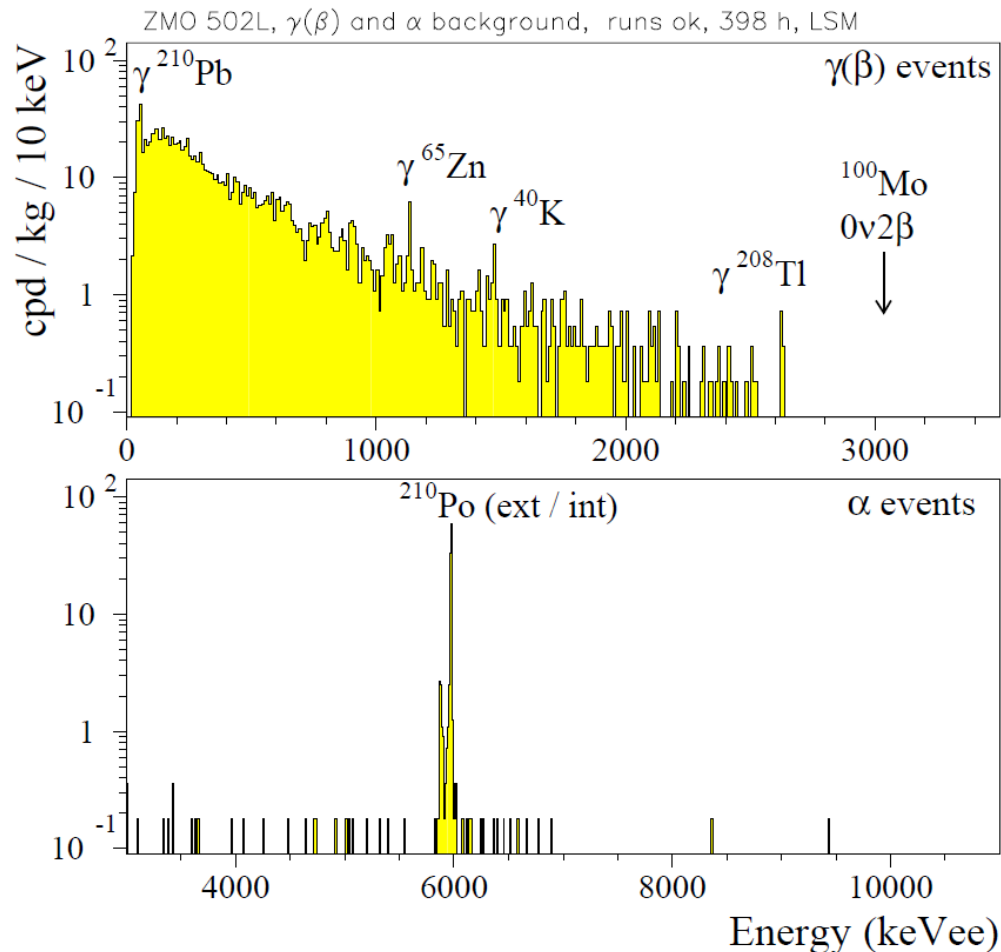
→ un fond “zero” dans la ROI est faisable !

## ZnMoO<sub>4</sub>, 334 g, Bkg, 398 h, LSM Heat-vs-Light scatter-plot

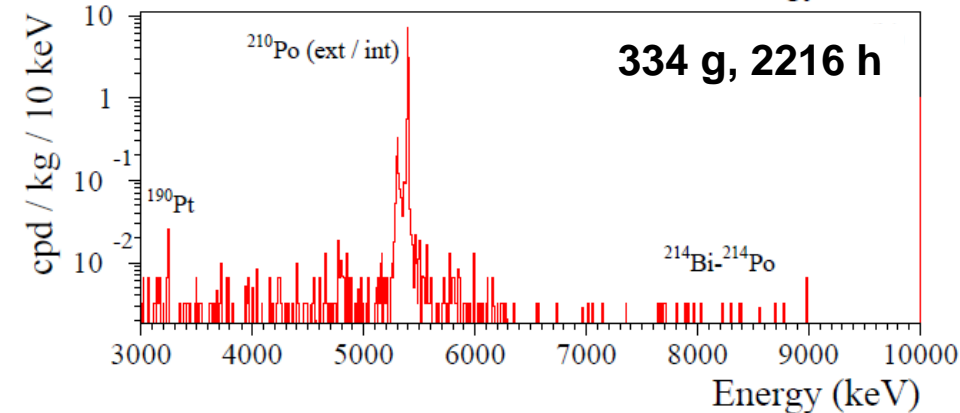
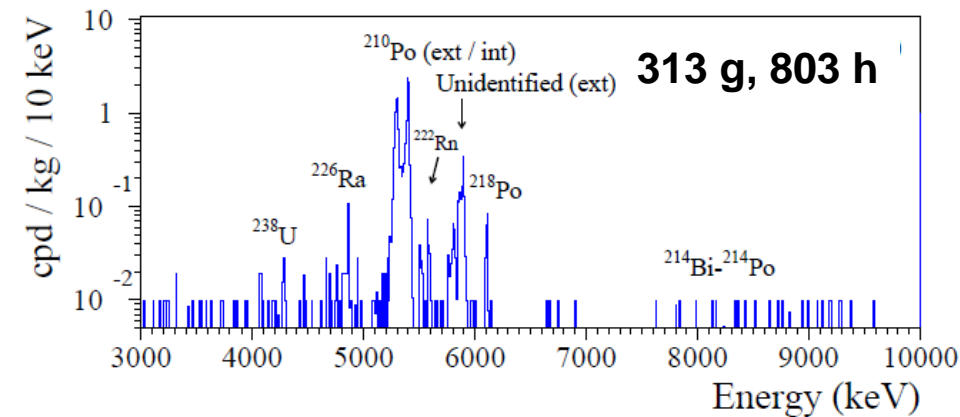


Preliminary

d'après D.V. Poda, LAL, 10 March 2015



# LUMINEU: une radio-pureté au rendez-vous



Radio-pureté de  $\text{ZnMoO}_4$  visée initialement  
(expérience de 2<sup>nde</sup> génération  $0\nu\beta\beta$ ):

**$^{228}\text{Th} / ^{226}\text{Ra} \sim 10 \mu\text{Bq} / \text{kg}$**

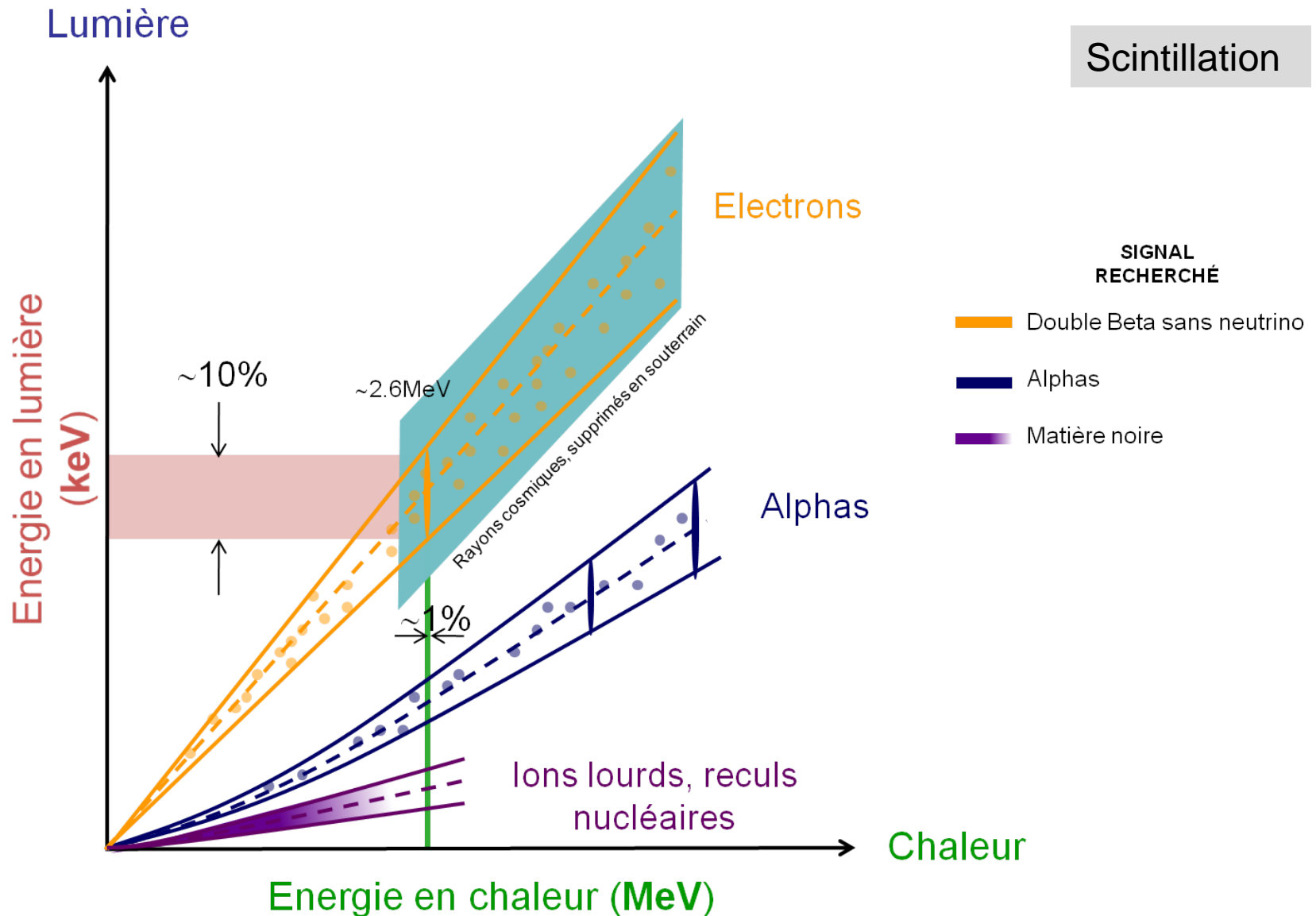
	Activity, $\mu\text{Bq}/\text{kg}$			
	LUMINEU crystals		Precursor crystals	
	LSM [1]	LSM [2]	LSM [1]	LNGS [3]
	334 g	336 g	313 g	329 g
	2216 h	291 h	803 h	524 h
$^{232}\text{Th}$	$\leq 2$	$\leq 10$	$\leq 6$	$\leq 8$
$^{228}\text{Th}$	$\leq 5$	$\leq 24$	12(4)	$\leq 6$
$^{238}\text{U}$	$\leq 2$	$\leq 8$	8(3)	$\leq 6$
$^{234}\text{U}$	$\leq 3$	$\leq 22$	$\leq 8$	$\leq 11$
$^{230}\text{Th}$	$\leq 2$	$\leq 13$	$\leq 8$	$\leq 6$
$^{226}\text{Ra}$	$\leq 5$	$\leq 21$	22(5)	27(6)
$^{210}\text{Po}$	1271(22)	939(52)	703(28)	700(30)
$^{235}\text{U}$	$\leq 3$	$\leq 10$	$\leq 7$	–
$^{190}\text{Pt}$	4(1)	$\leq 5$	$\leq 7$	–

[1] E. Armengaud et al., submitted to JINST.

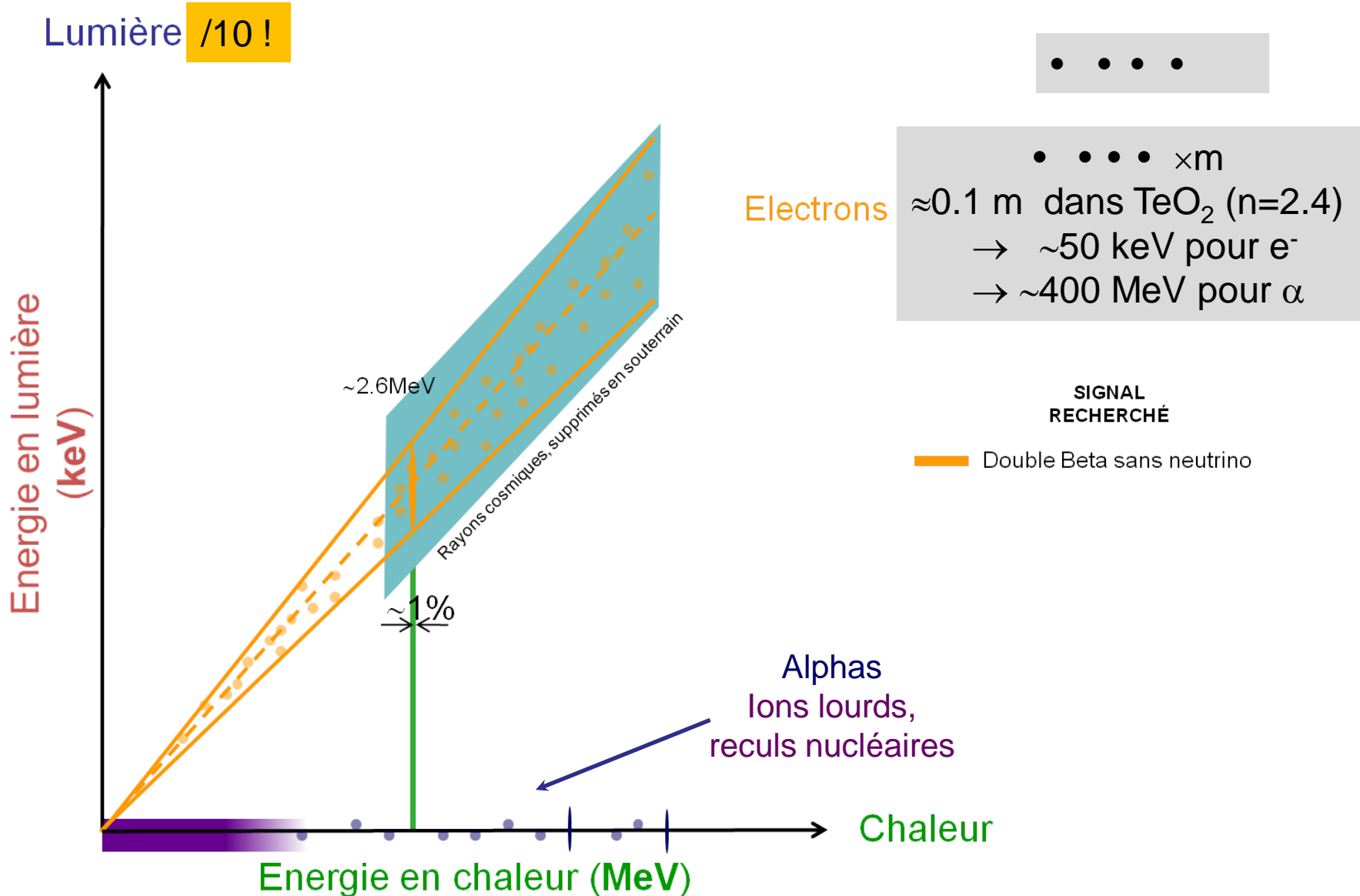
[2] D.V. Poda et al., arXiv:1502.01161.

[3] J. Beeman et al., EPJC 72 (2012) 2142.

# Une discrimination multi-usages



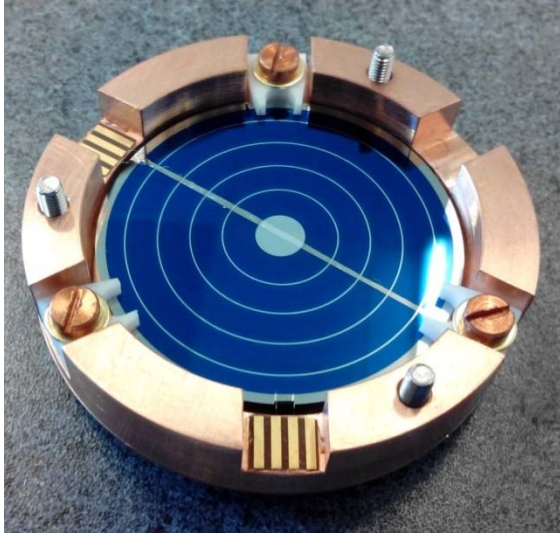
# Une discrimination multi-usages





# Amplification thermique du signal de luminescence

## Bolomètre Ge optique (R&D CSNSM)

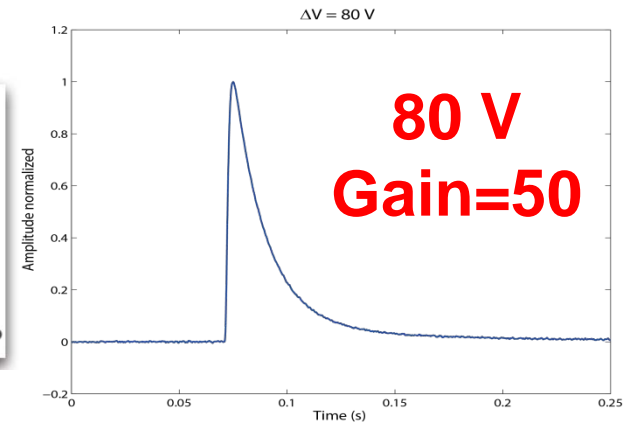
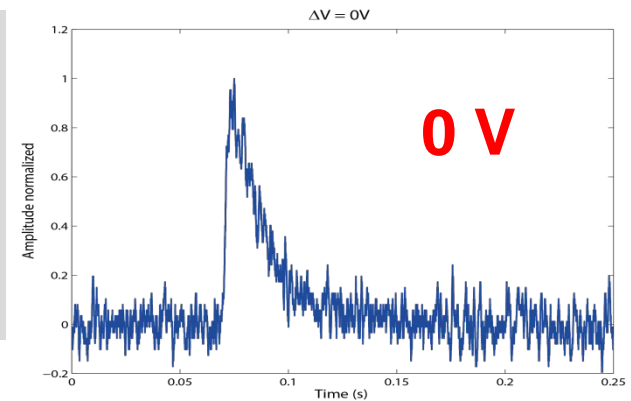


Accélération des charges entre électrodes → conversion en chaleur par effet (Joule) « Neganov-Luke »

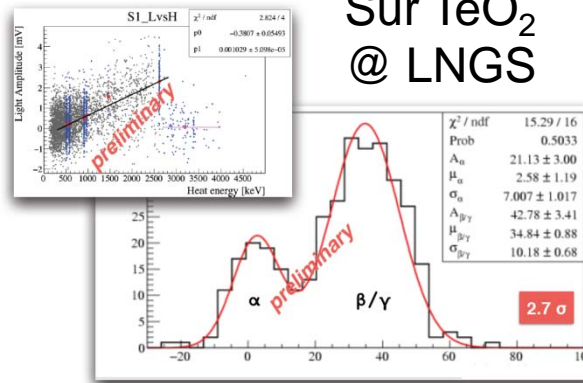
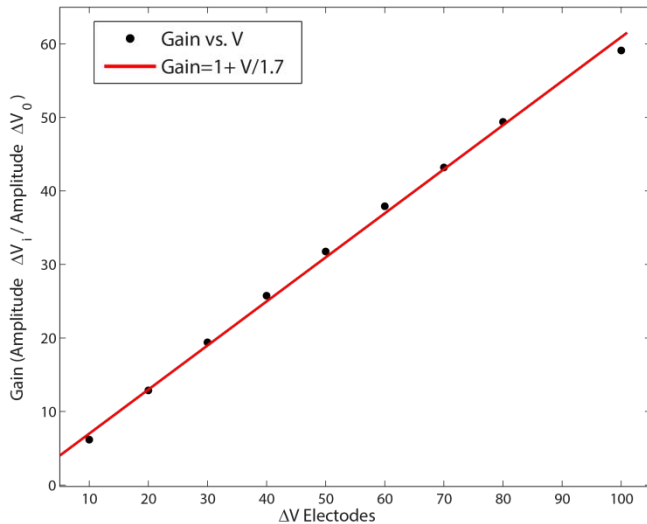


Applications:  
 ✓ « boost » des signaux de reculs matière noire  
 ✓ discrimination dans les matériaux non-scintillants  
 ( $\beta\beta 0\nu$  par • • • • )

### Signal d'une LED

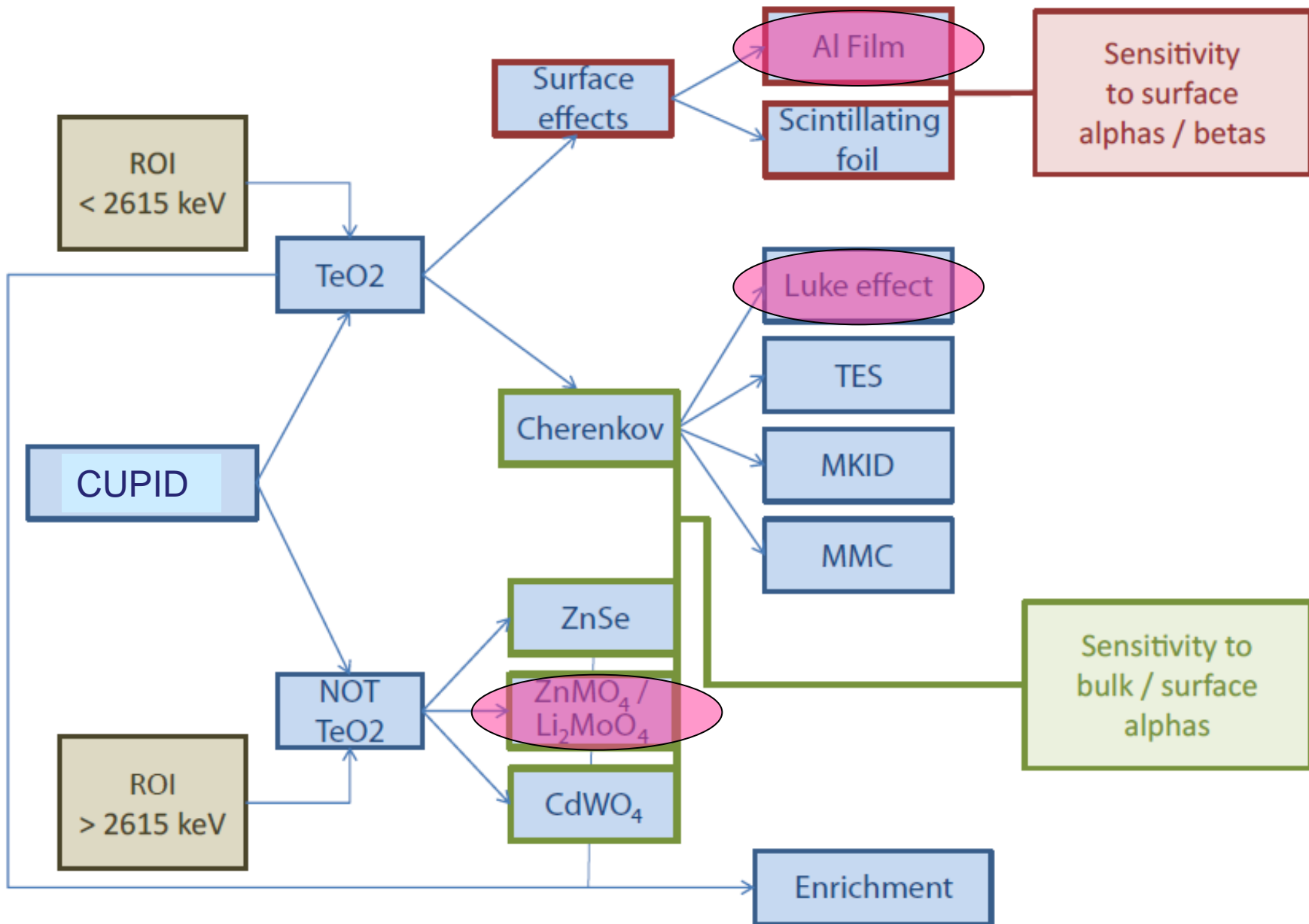


Neganov-Luke Gain on LED



d'après M.Mancuso & E.Olivieri

# CUPID: futur bolométrique du $\beta\beta 0\nu$

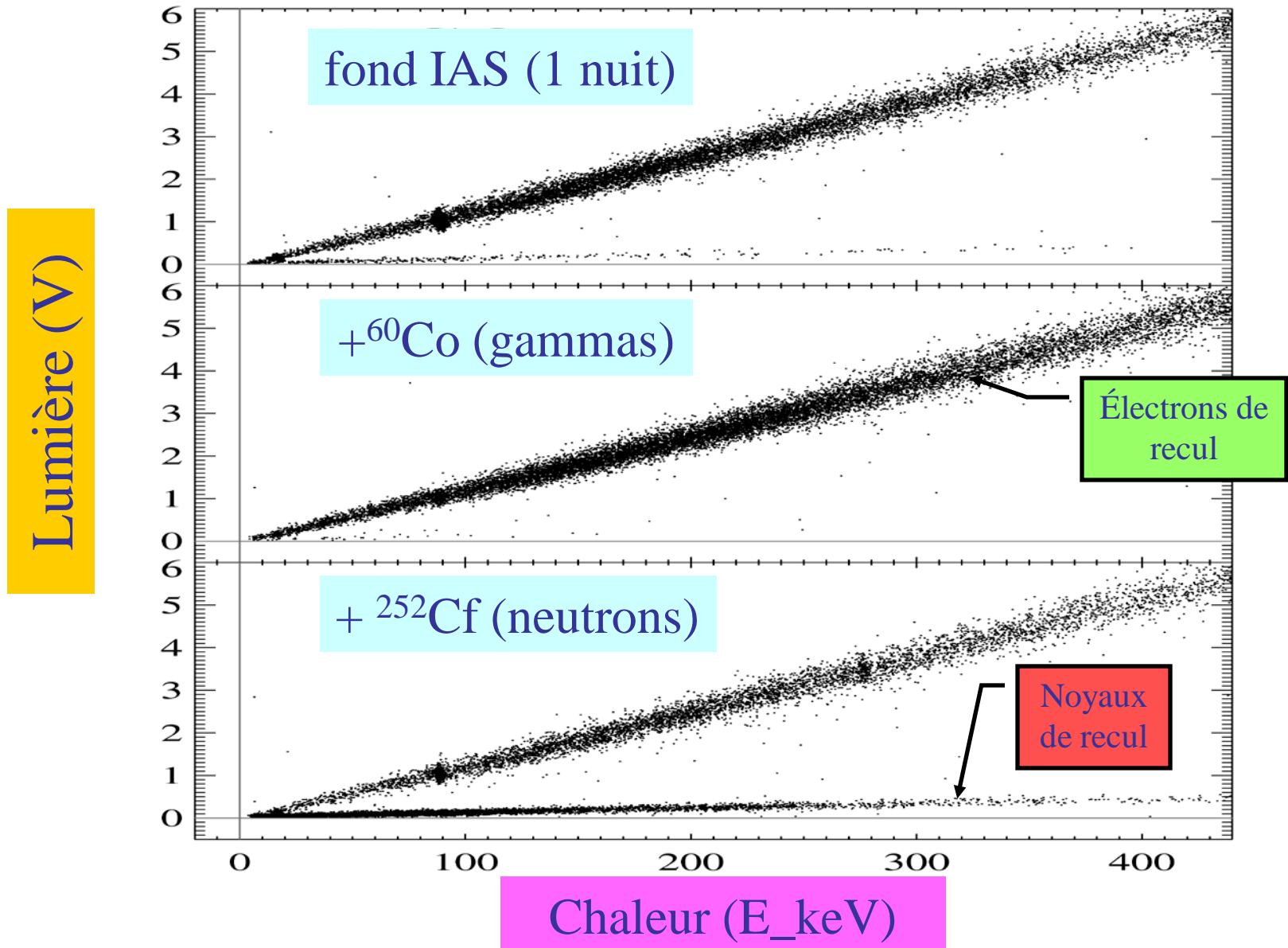


# □ Désintégrations rarissimes (par bolomètres scintillants !)

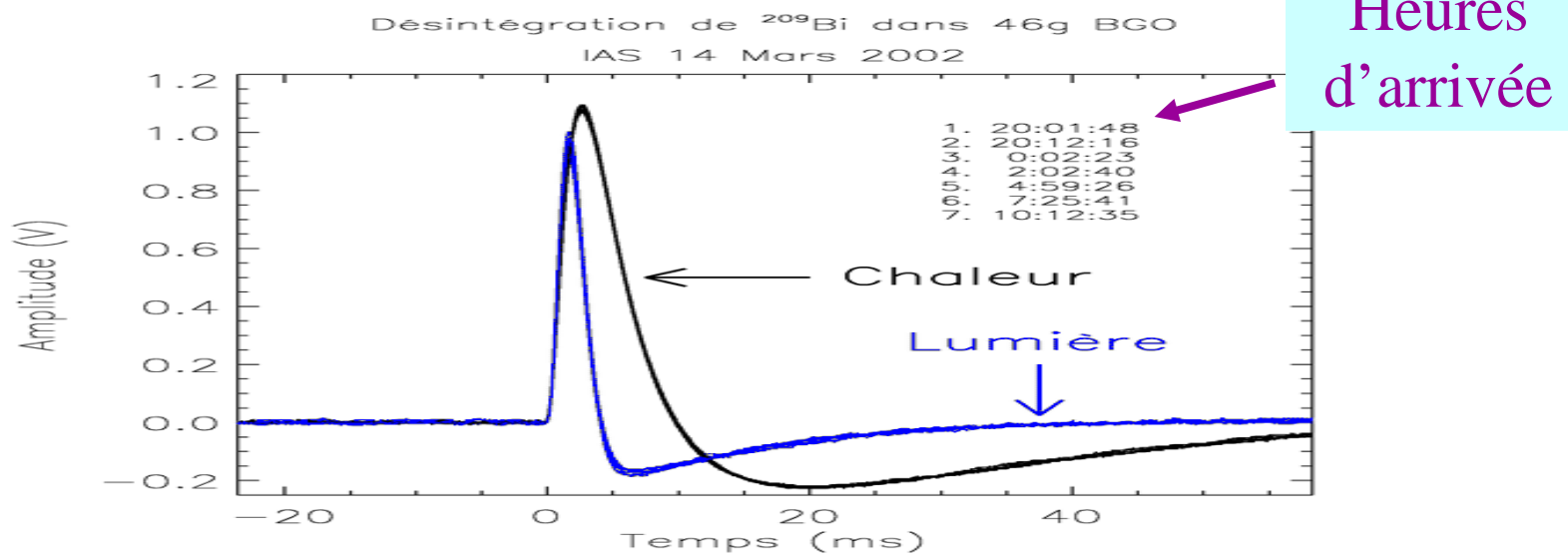
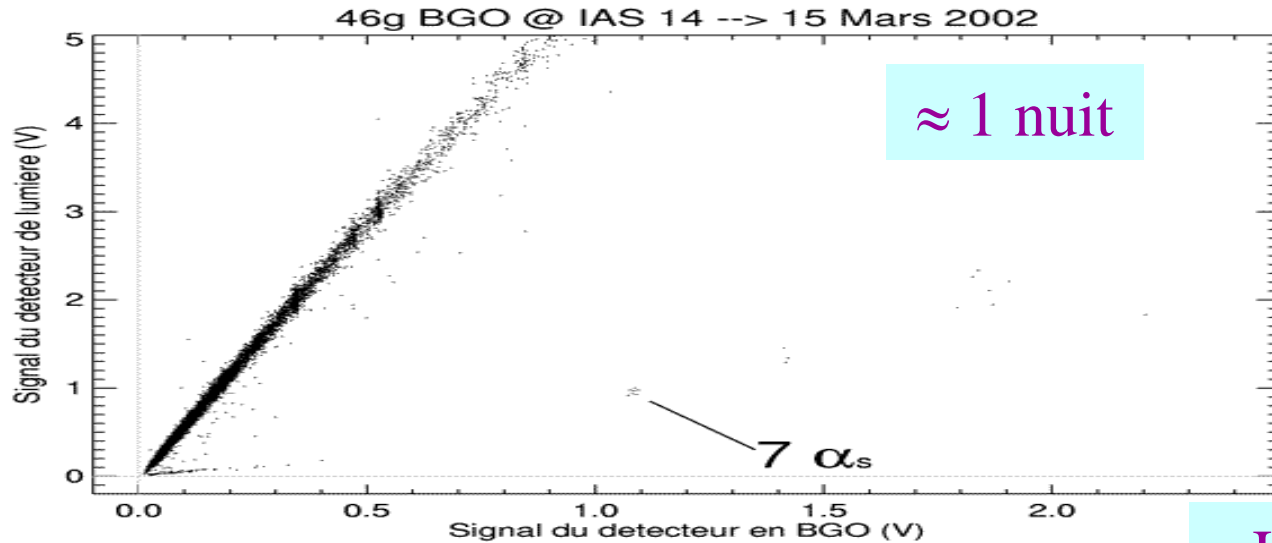
Désintégrations alpha de

- $^{209}\text{Bi}$  (IAS; 2002 & Gran Sasso; 2010)  $T_{1/2} \approx 2.0 \cdot 10^{19}$  ans
- $^{180}\text{W}$  (CRESST; 2004)  $T_{1/2} \approx 1.6 \cdot 10^{18}$  ans
- $^{151}\text{Eu}$  (R&D Gran Sasso, 2015)  $T_{1/2} \approx 4.6 \cdot 10^{18}$  ans

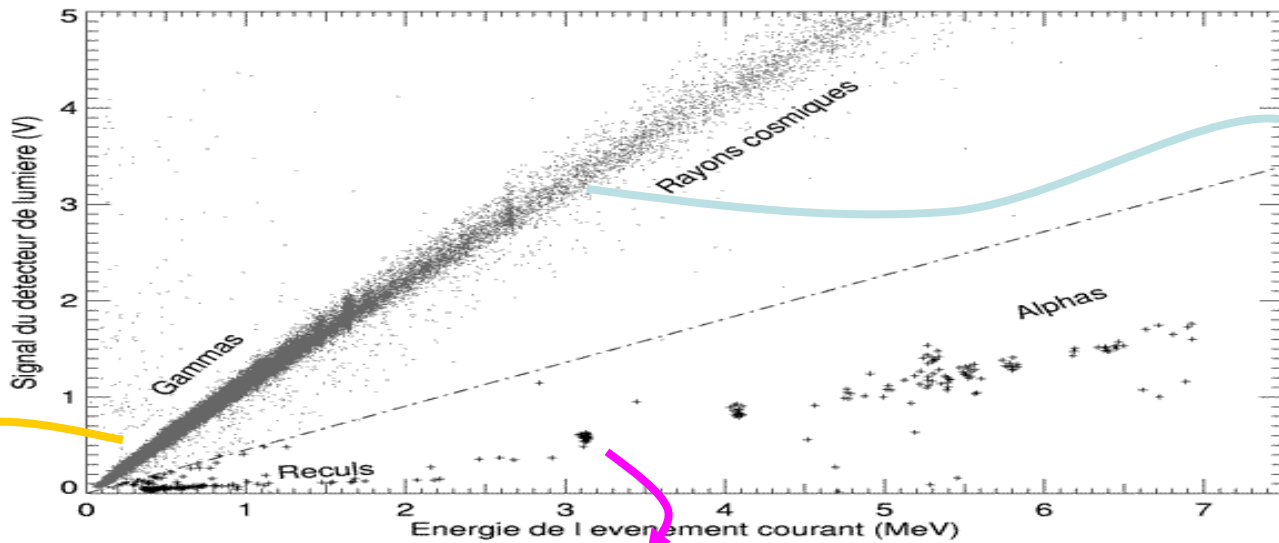
# Discrimination à l'oeuvre dans 46g BGO (basse énergie)



# BGO à « haute » énergie: 7 (évts Bi-zarres)!



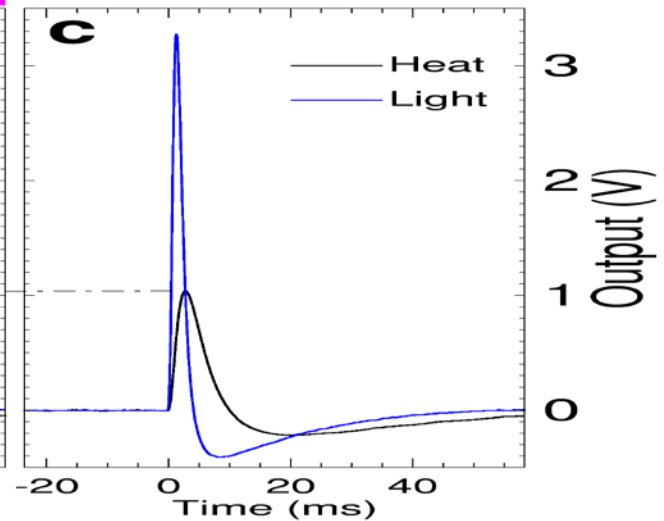
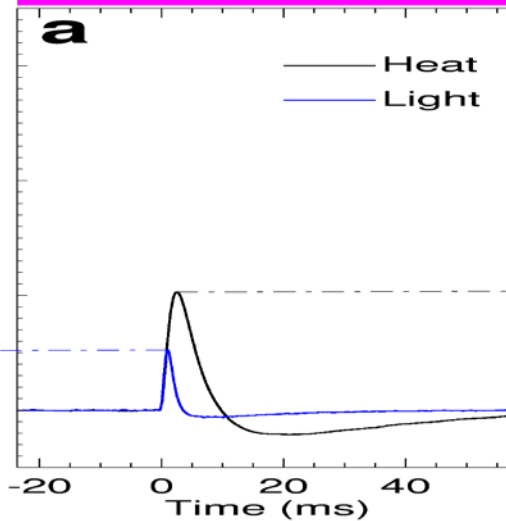
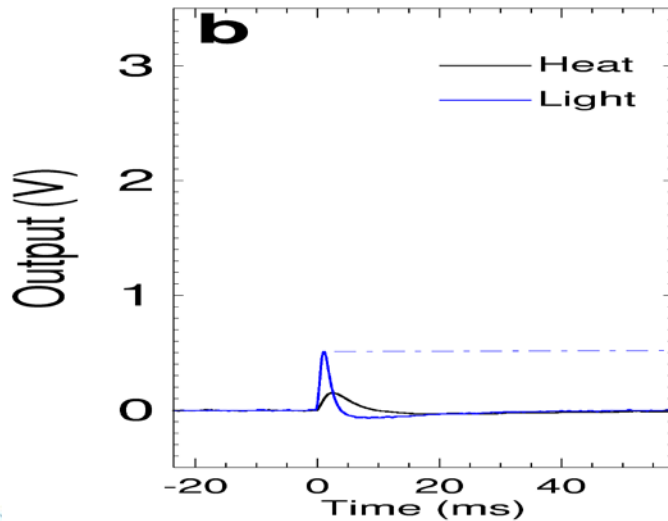
# Diagramme de discrimination dans 46g BGO (5j)



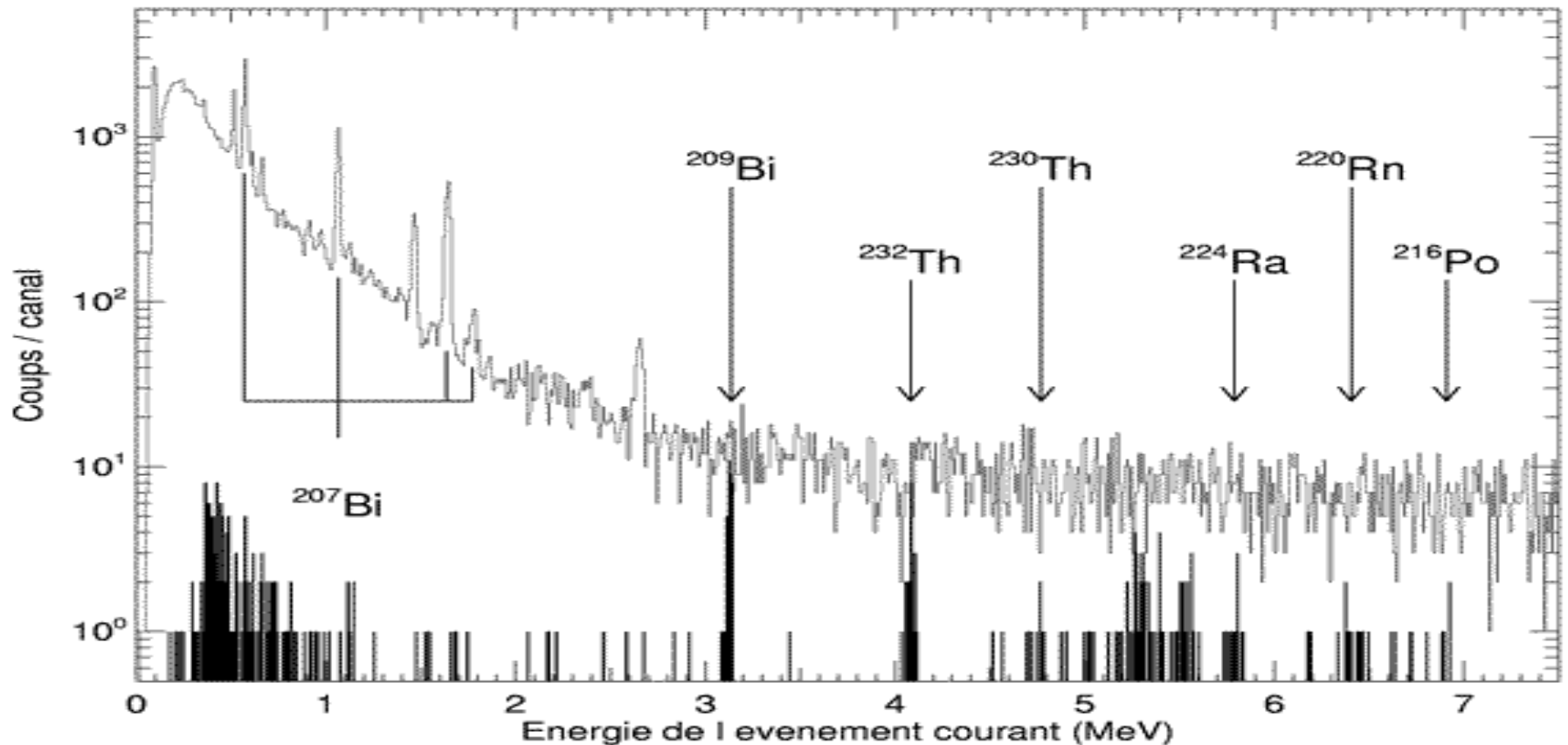
Gamma ray  
E~500 keV

<sup>209</sup>Bi decay  
E~3137 keV

Cosmic ray event  
E~3.4 MeV



# Spectres dans 46g BGO



Contamination  $^{207}\text{Bi}$  ( $\approx 3$  Bq/kg)

$^{209}\text{Bi}$

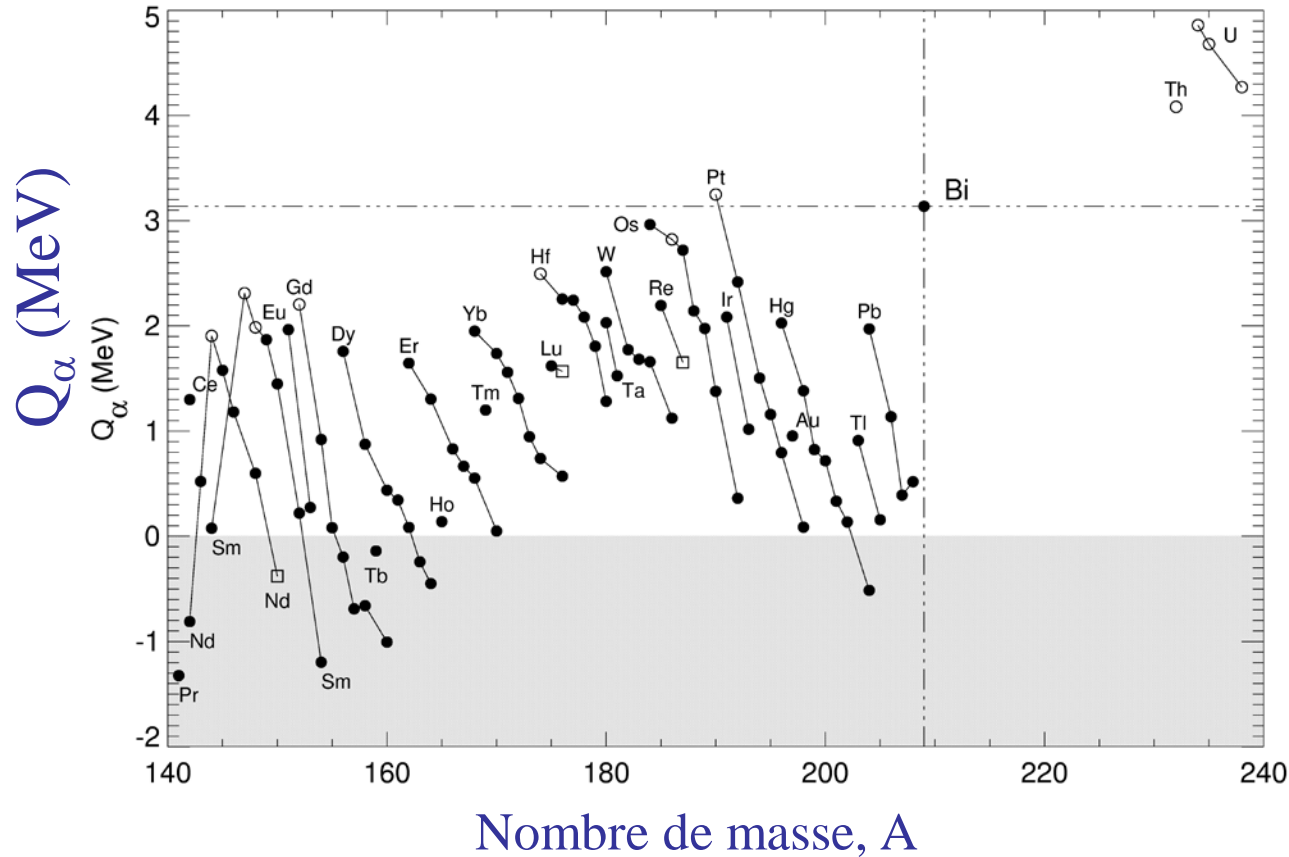


$$Q_{\alpha} = 3130 \pm 16 \text{ keV}$$

$$T_{1/2} = 1.44 - 1.95 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

# Isotopes lourds stables, $Q_\alpha$

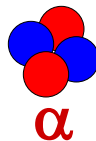
*d'après Tables Audi et al. (1997)*



$$Q_\alpha[{}^{209}\text{Bi}] = 3137 \pm 0.8 \text{ keV}$$

**3077 keV**

$R \approx 8 \mu\text{m}$

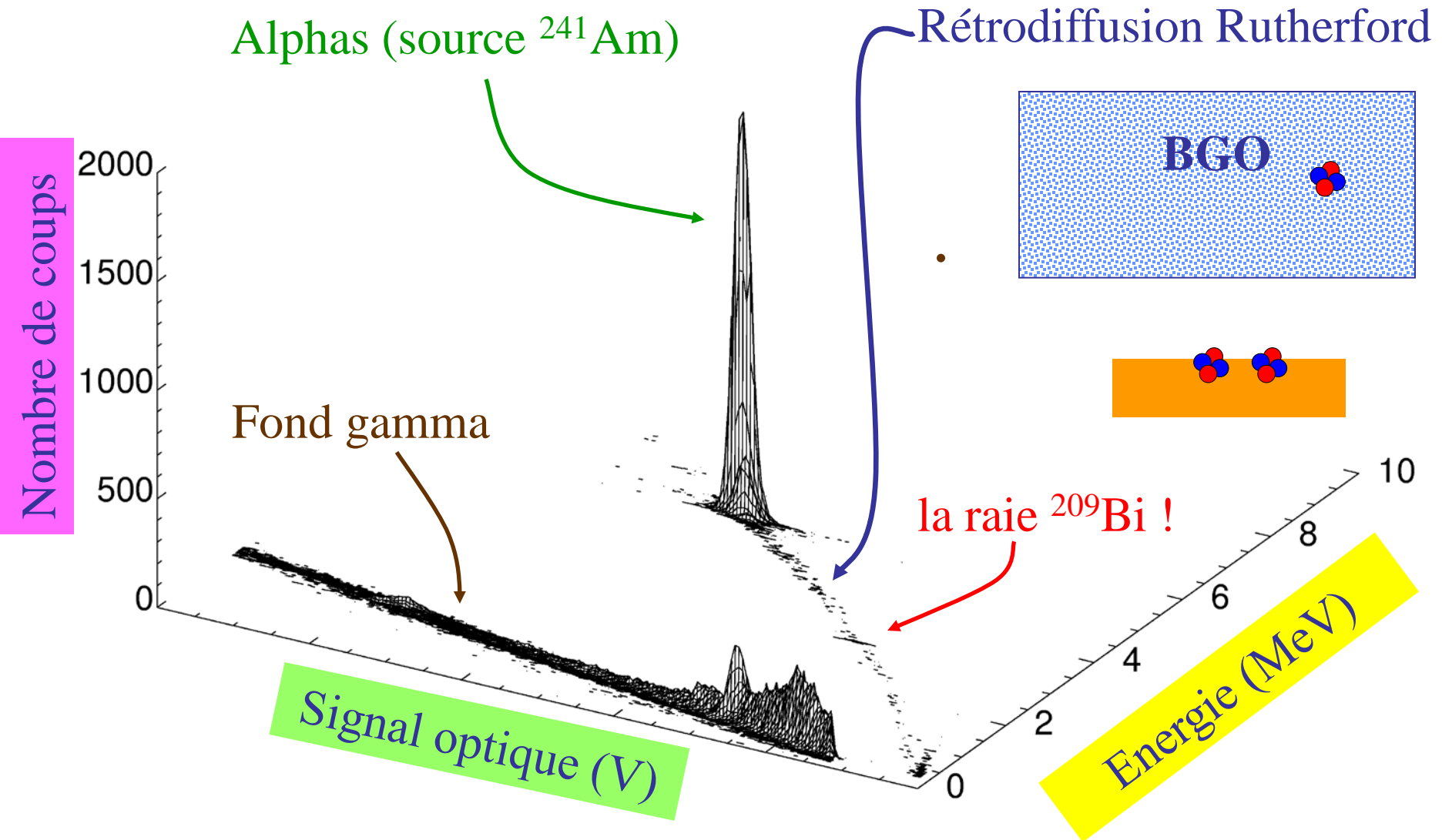


**60 keV**

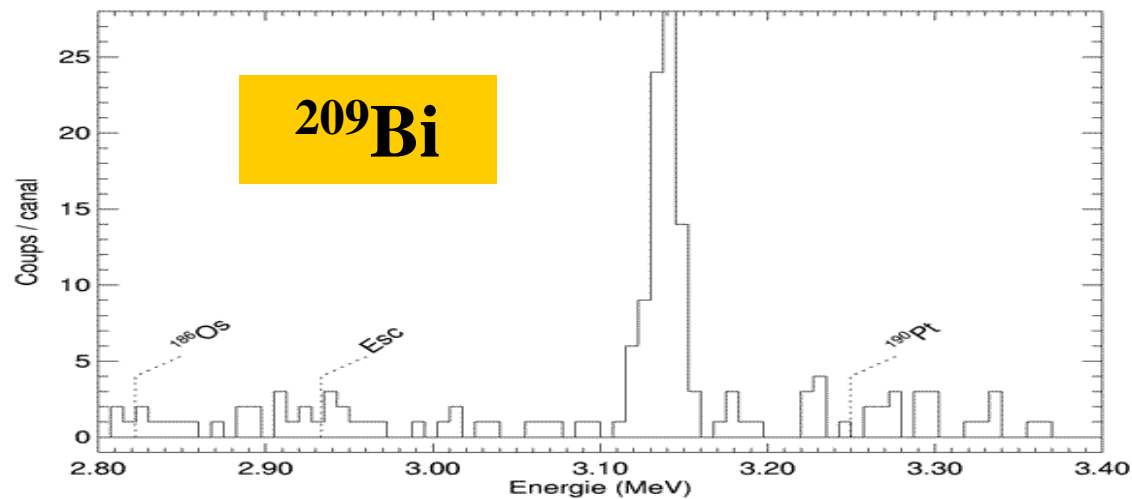
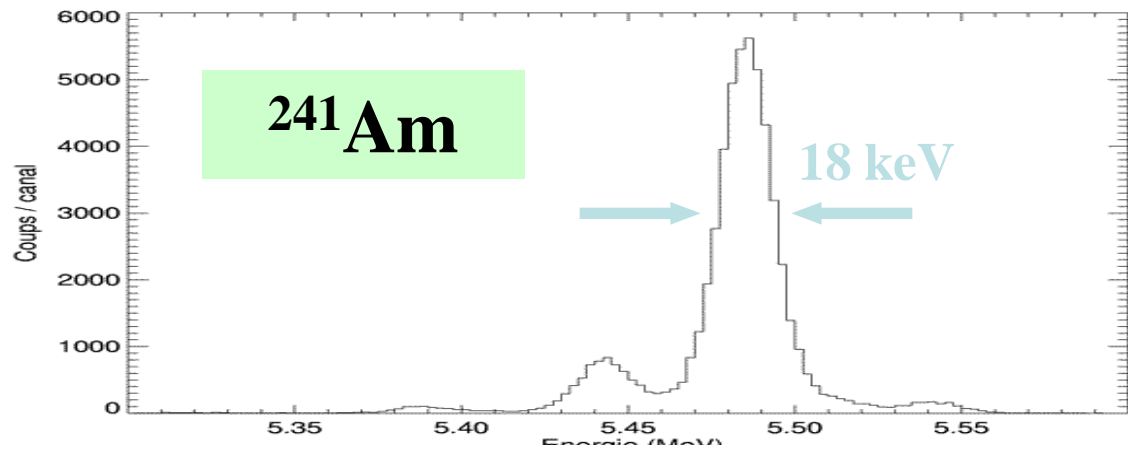
$R \approx 200 \text{ \AA}$



# Discrimination dans 91g BGO



# Spectres alphas finaux



$Q_\alpha = 3137 \pm 1 \text{ (stat.)} \pm 2 \text{ (syst.) keV}$   
 $T_{1/2} = 1.9 \pm 0.2 \cdot 10^{19} \text{ ans}$

# $^{209}\text{Bi}$ (bolomètres scintillants au Gran Sasso)

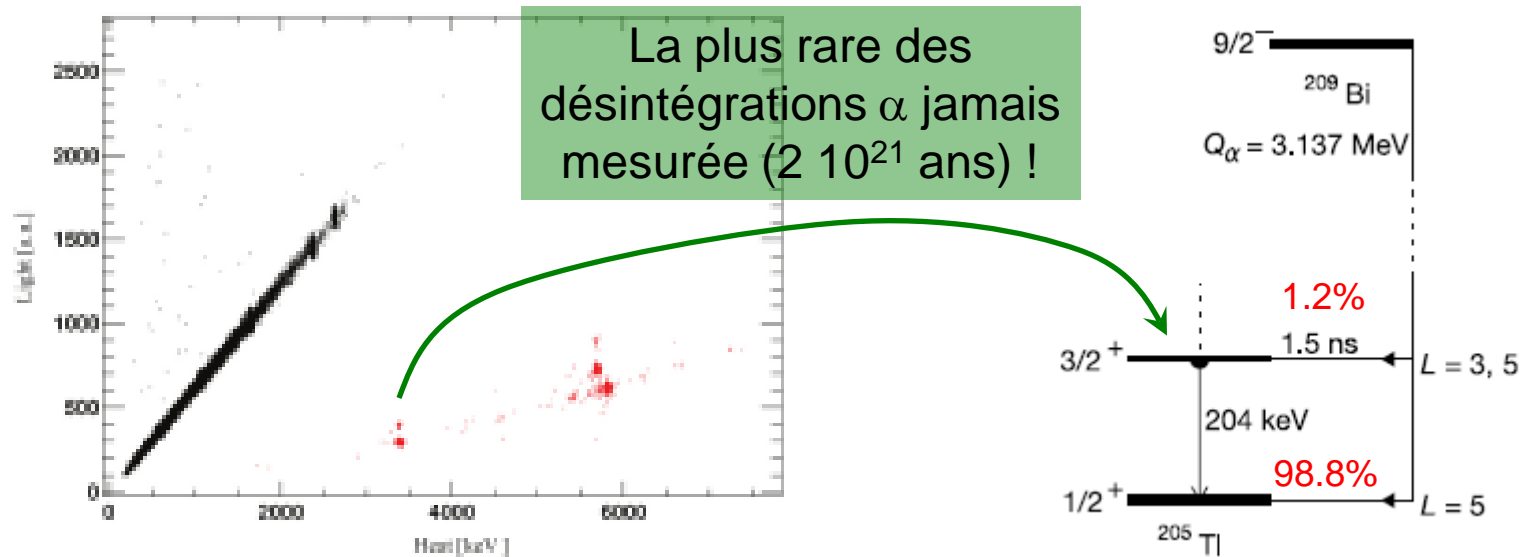
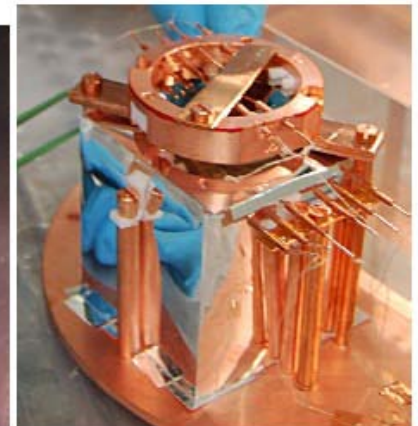
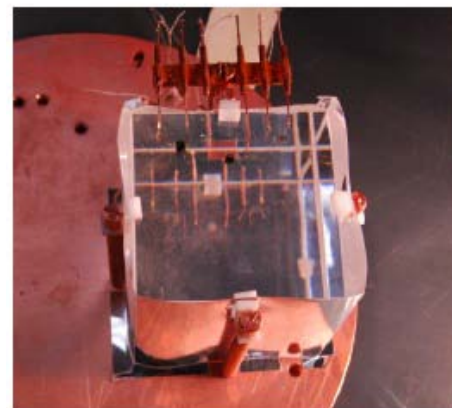


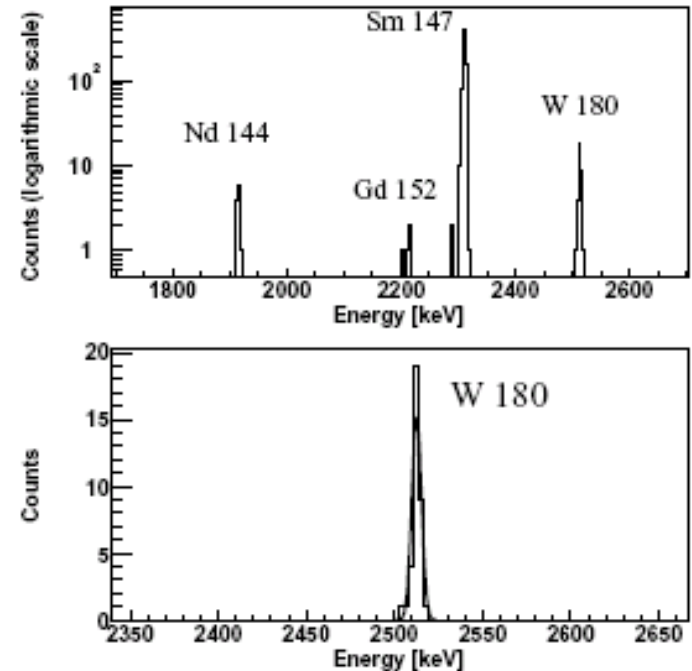
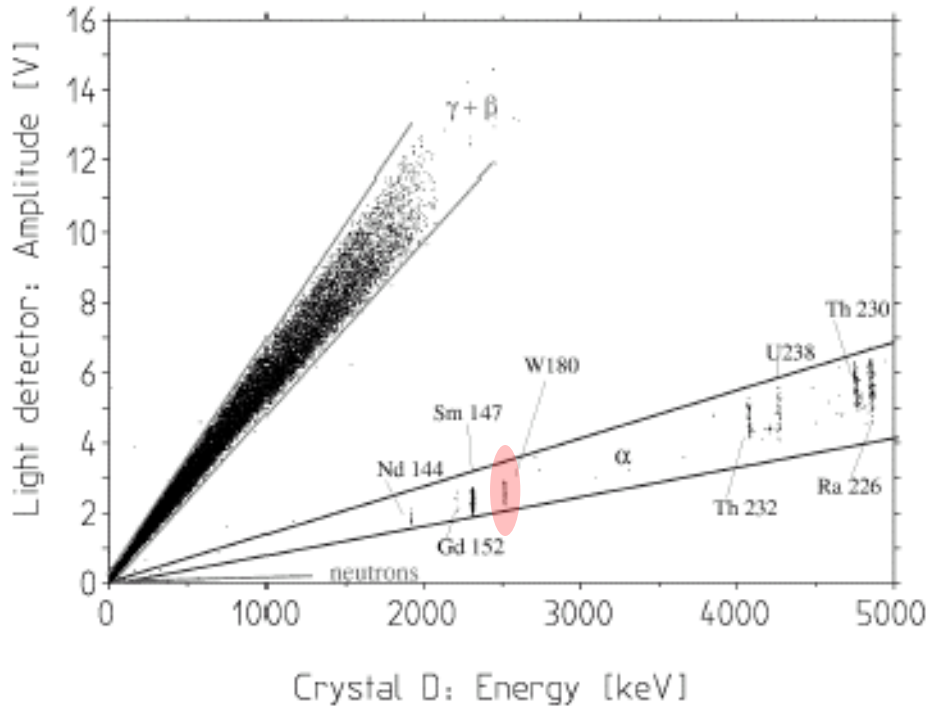
Figure 8.36: Scatter plot heat vs light of a  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  BGO crystal for a  $\sim 540$  hours background measurement.

*Thèse Luca Gironi, Univ. Milan, 2010*

$^{209}\text{Bi}$ :  $T_{1/2} = 1.99 \pm 0.03 \cdot 10^{19}$  ans  
(mesure 10× plus précise)



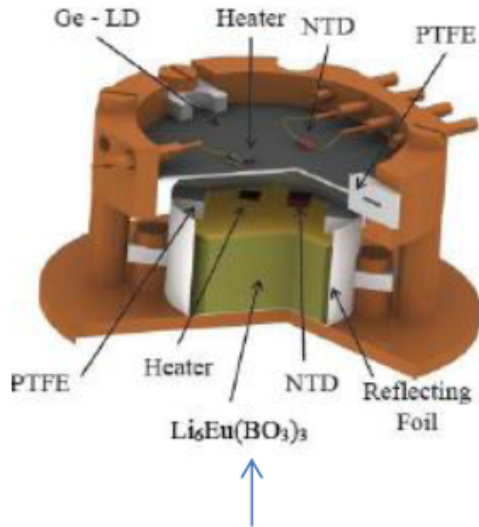
# $^{180}\text{W}$ (collaboration CRESST en 2004)



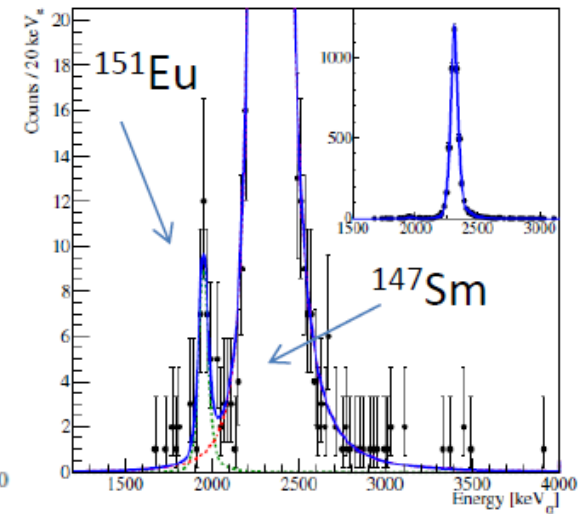
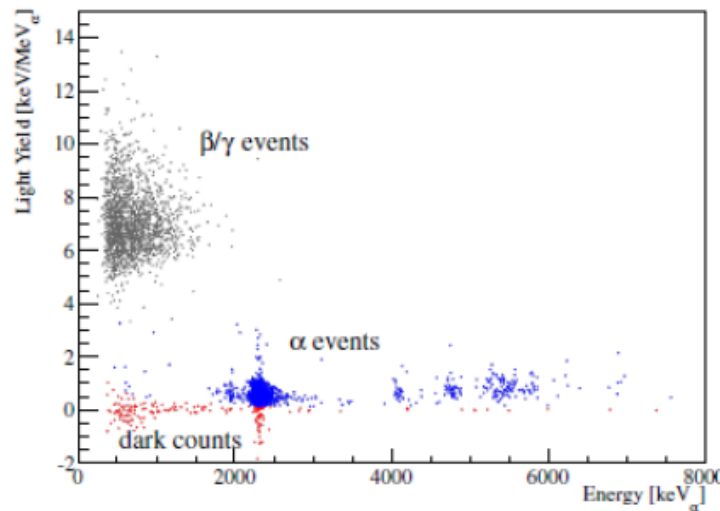
« The natural -decay of  $^{180}\text{W}$  has been unambiguously detected for the first time. The peak is found in a ( $\gamma$ ,  $\beta$  and neutron)-free background spectrum. This has been achieved by the simultaneous measurement of phonon and light signals with the CRESST cryogenic detectors. A half-life of  $T_{1/2} = (1.8 \pm 0.2)$

# $^{151}\text{Eu}$ (bolomètres scintillants au Gran Sasso)

## $\alpha$ decay of natural europium



6.15 g  $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$  cryogenic scintillating bolometer with a very good energy resolution and particle discrimination



$$T_{1/2} = [4.62 \pm 0.95(\text{stat.}) \pm 0.68(\text{syst.})] \times 10^{18} \text{ yr}$$

[2] N Casali et al., Discovery of the  $^{151}\text{Eu}$   $\alpha$  decay, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 41 (2014) 075101

*d'après cours Fedor Danevich, 2015*

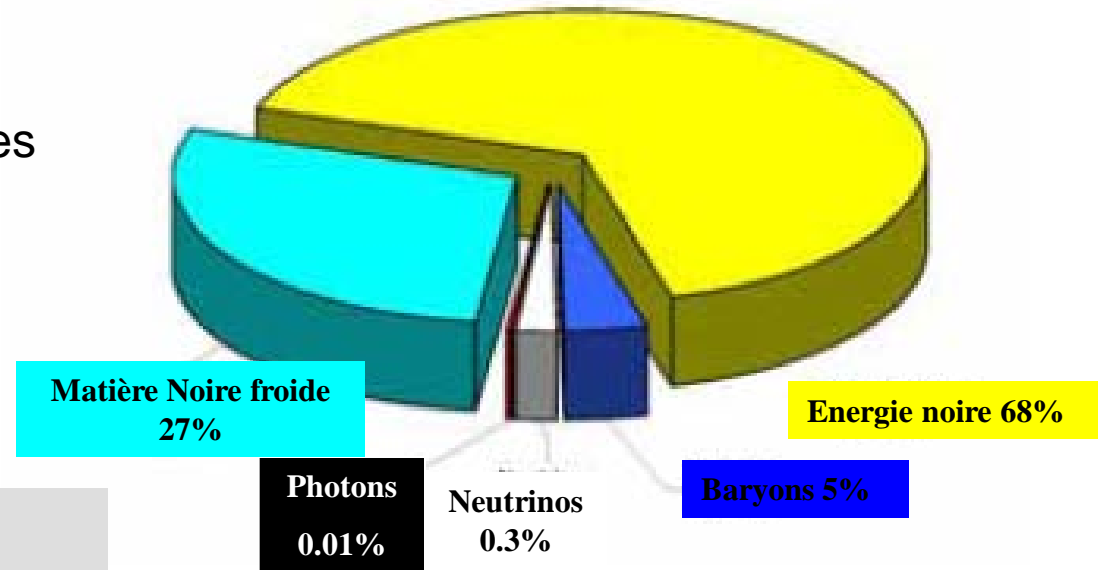
## □ Détection de la Matière noire

*Voir également le cours d'Eric Armengaud à l'Ecole de Gif 2009, Batz sur mer*  
*<http://www-subatech.in2p3.fr/gif2009.html>*

# Détection de la Matière Noire Galactique

- ✓ présence à toutes les échelles de matière sombre
- ✓ argument le plus convaincant: platitude des courbes de rotation des galaxies spirales, dont notre Voie Lactée au delà des concentrations de matière visible (gaz, étoiles)
- ✓ densité labo  $\approx 0.3 \text{ GeV/cc}$

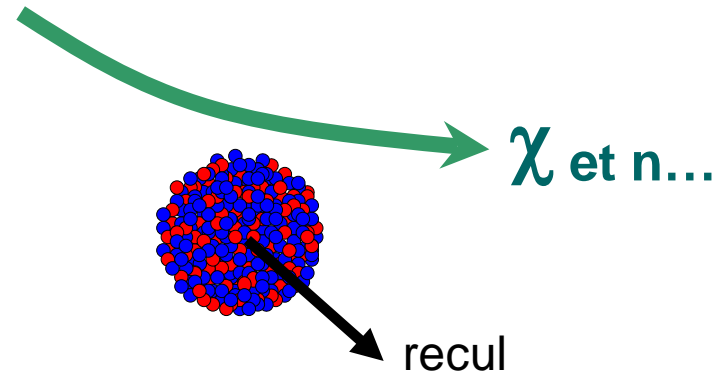
## Contenu énergétique de l'Univers



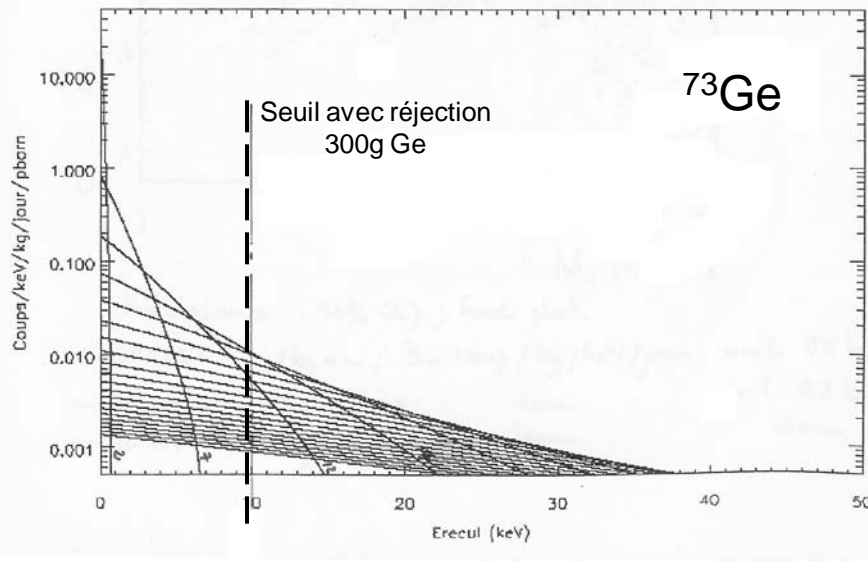
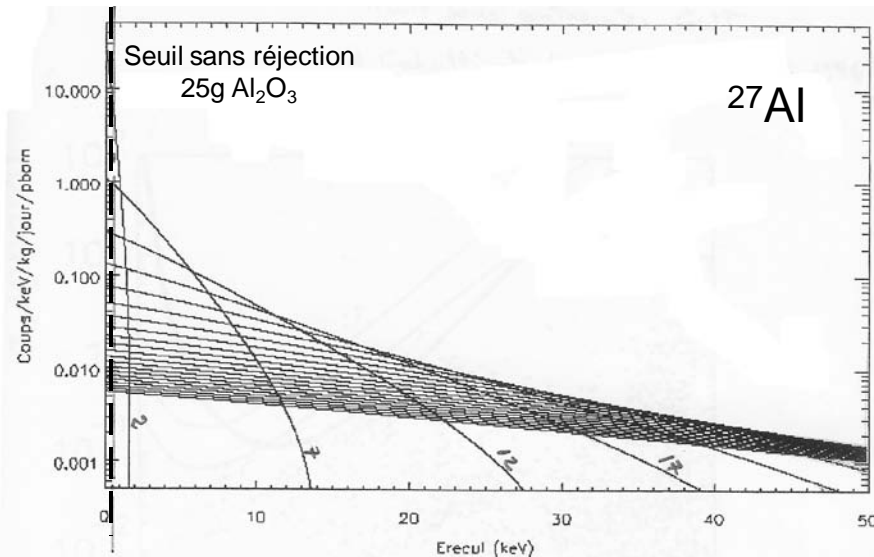
Une des candidats le mieux motivé:

- **Neutralino**  $\chi$  (la plus légère des Particules SuperSymétriques; LSP) • • • • •
- $M \approx 6 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow qq \text{ } 100 \text{ GeV}/c^2$
- Energies labo  $\approx qq \text{ keV}$
- Interaction: diffusion élastique  $\rightarrow$  **reculs**
- Description précise ? paramètres libres ++
- Sections efficaces  $\downarrow\downarrow$  (WIMPs) mais prédictibles

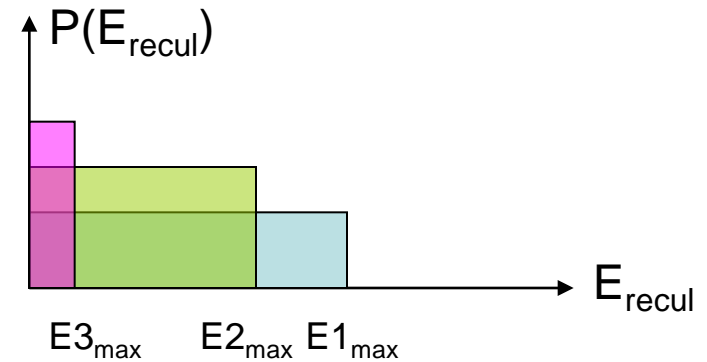
↳ **Weakly Interactive Massive Particles**



# Détection de la matière noire: spectres attendus



- $M_{\chi}=2, 7, 12, \dots, 102 \text{ GeV}/c^2$
- Modèle de halo « isotherme »
  - $V_0=230 \text{ km.s}^{-1}$
  - $V_{\text{échappement}}= 600 \text{ km.s}^{-1}$
  - $v_{\text{terre}}=244 \text{ km.s}^{-1}$  (mars)
  - facteur de forme nucléaire



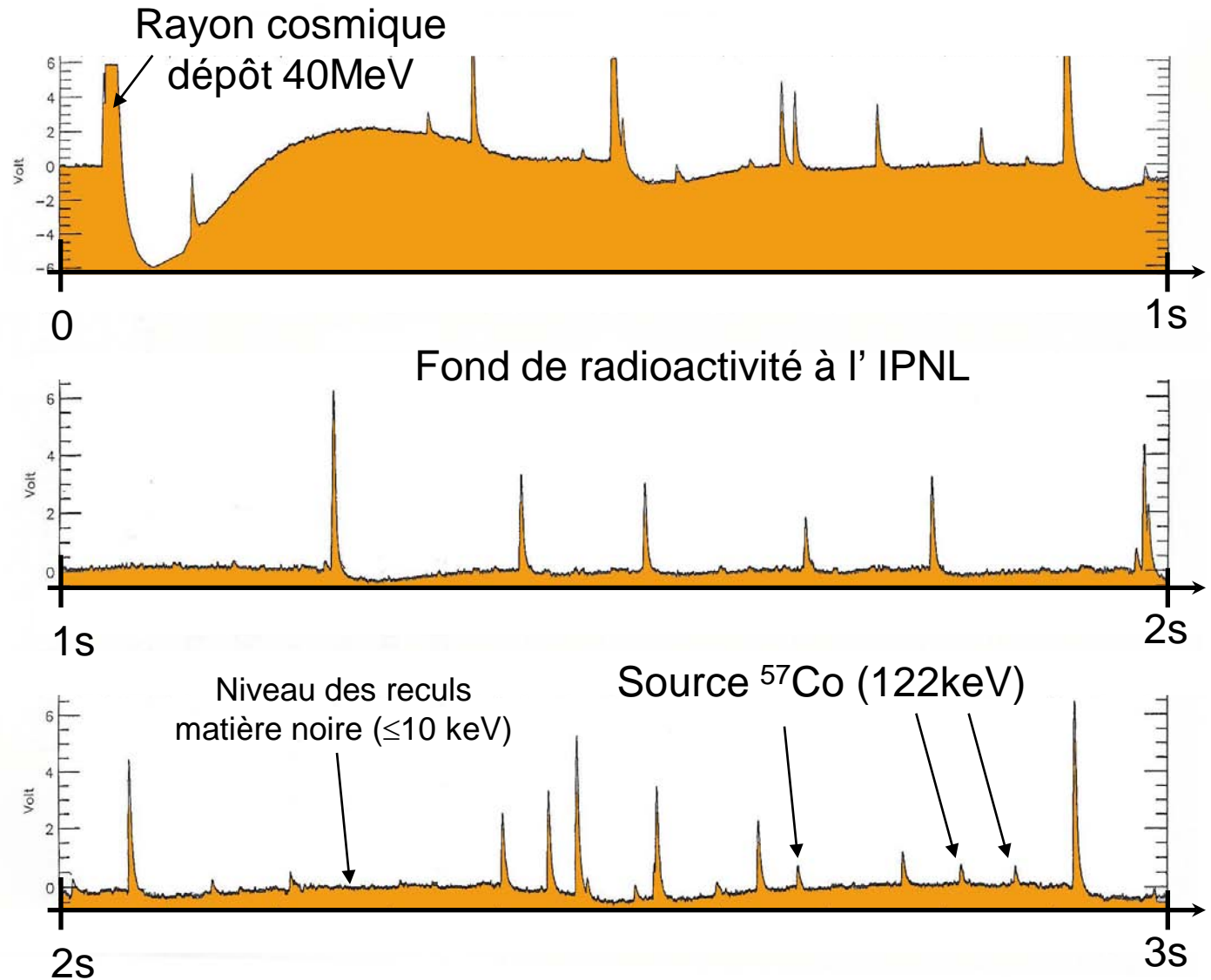
- Cinématique élémentaire  $\rightarrow E_{\text{max}}$   
(adaptation des masses: de la pétanque en labo !)
- Les faibles énergies de recul sont toujours « peuplées »  $\rightarrow$  spectres piqués à basse énergie: **on recherche le meilleur seuil  $\rightarrow$  bolomètres !**



# Détection de la Matière noire: l'appel des souterrains

3 traces  
consécutives  
de 1s dans  
un  
bolomètre  
de 1.2 kg en  
saphir.

Mesures  
IAS/ IPNL  
1996



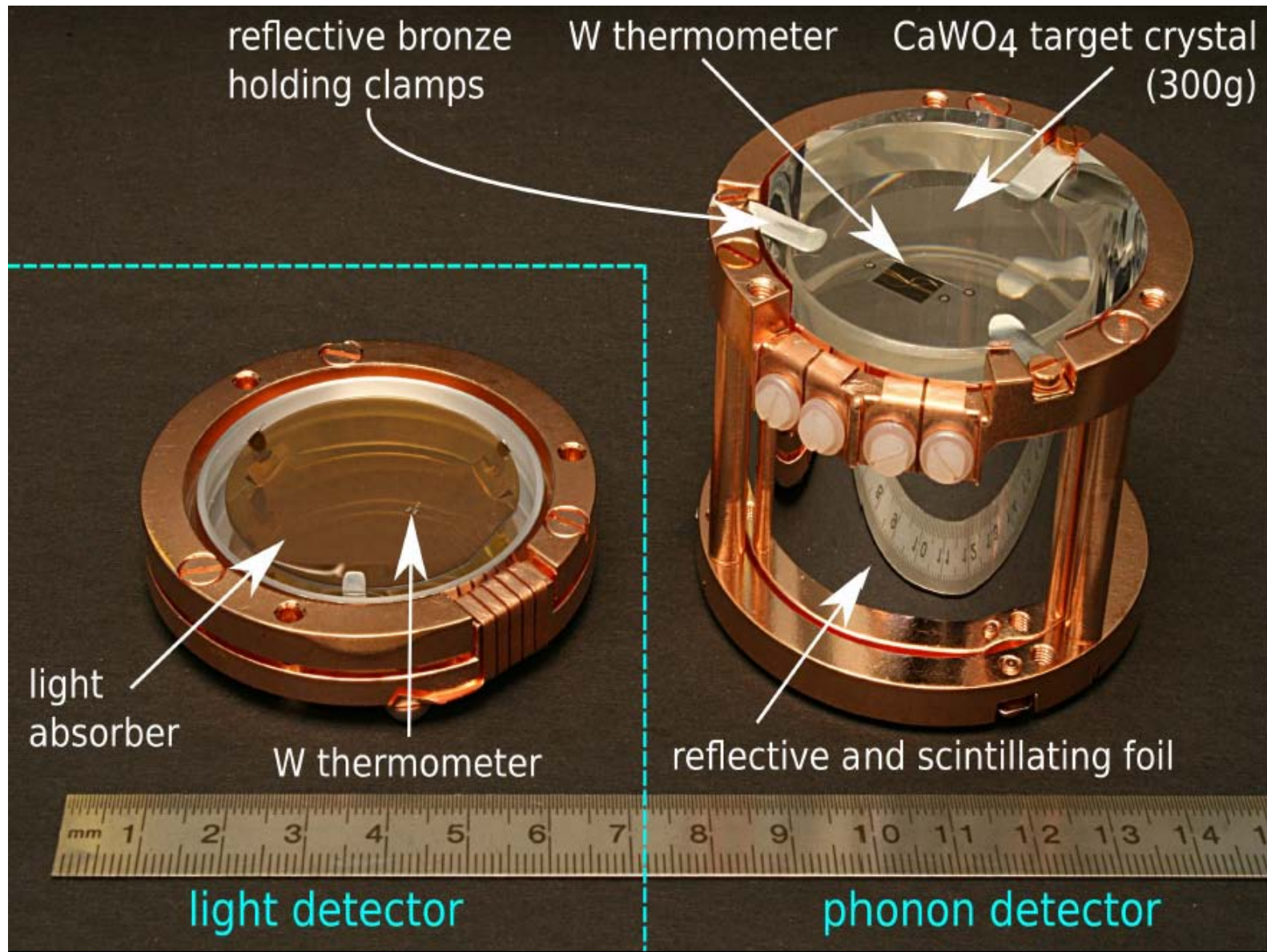
## □ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Lumière & chaleur »

- CRESST (TES; tunnel du GranSasso)

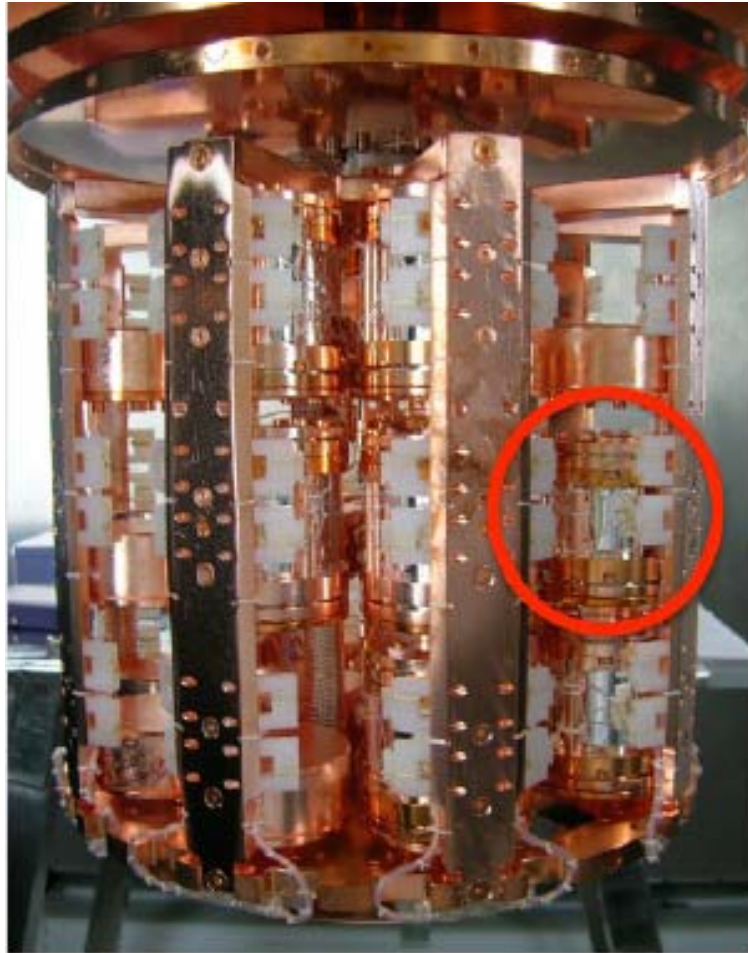
Collaboration MPI & TU München, Univ. d'Oxford, Univ. de Tübingen

# Les détecteurs de CRESST (thermomètre TES en W)



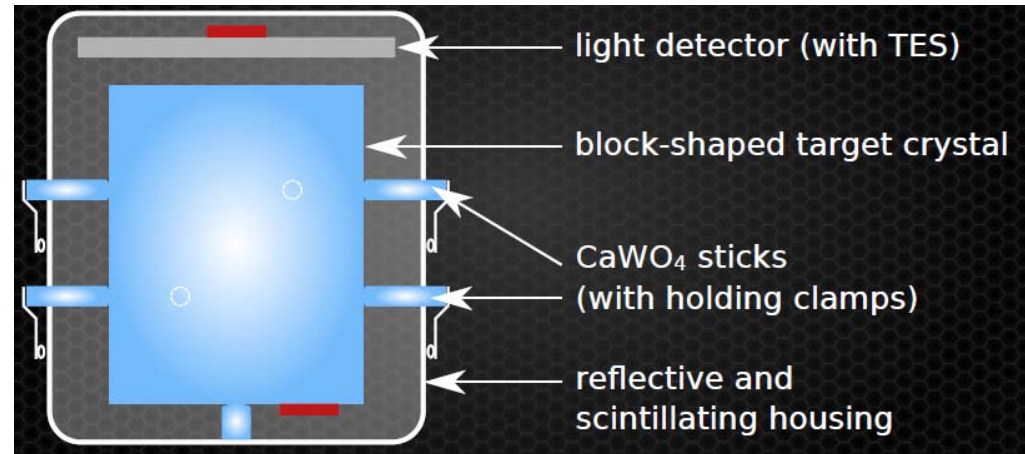
F. Reindl @ NDM'15

# CRESST 2014 @ Gran Sasso

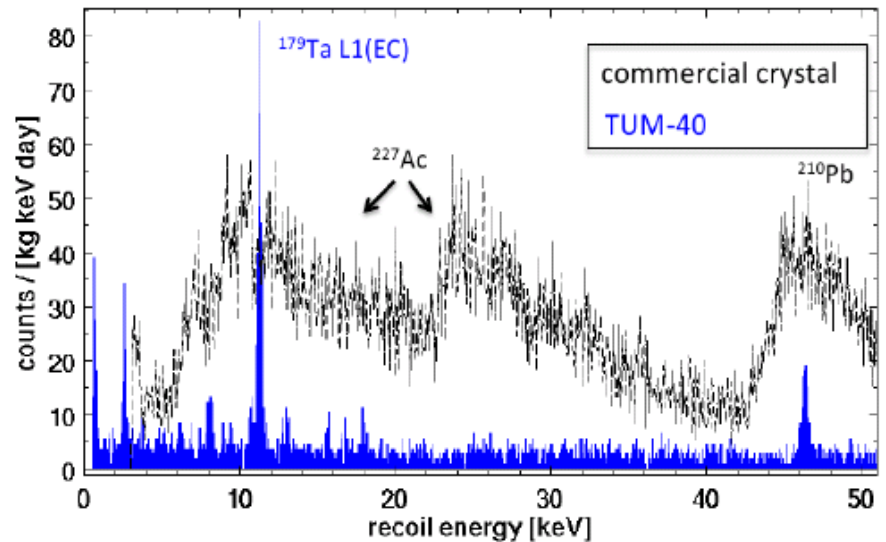


Réfrigérateur à dilution

## Nouveau montage



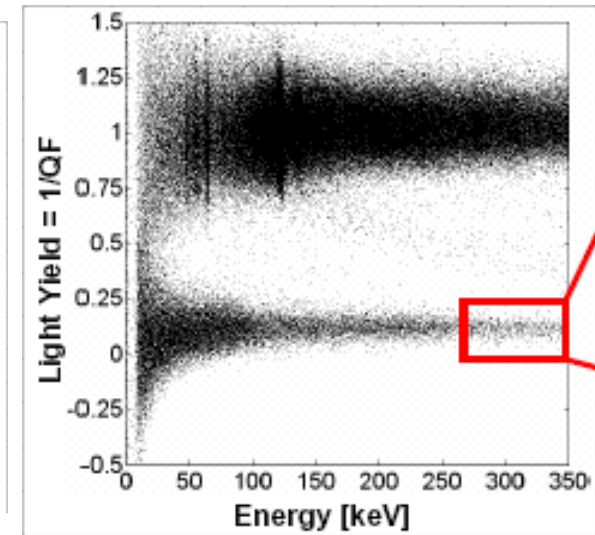
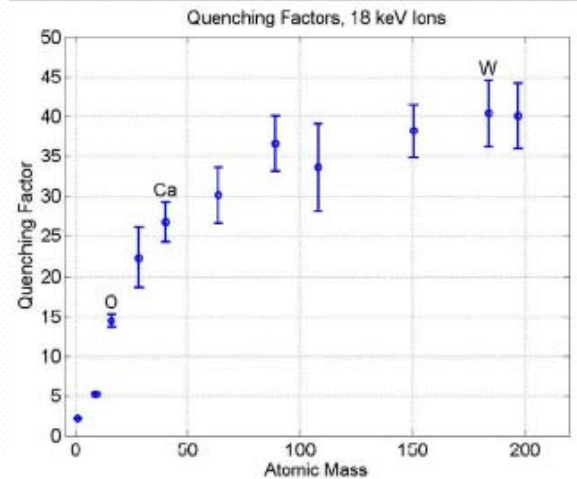
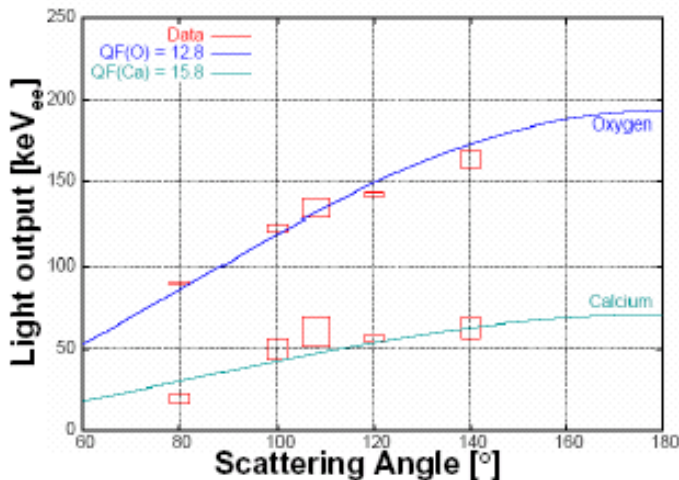
## Radiopureté (tirage à domicile des cristaux)



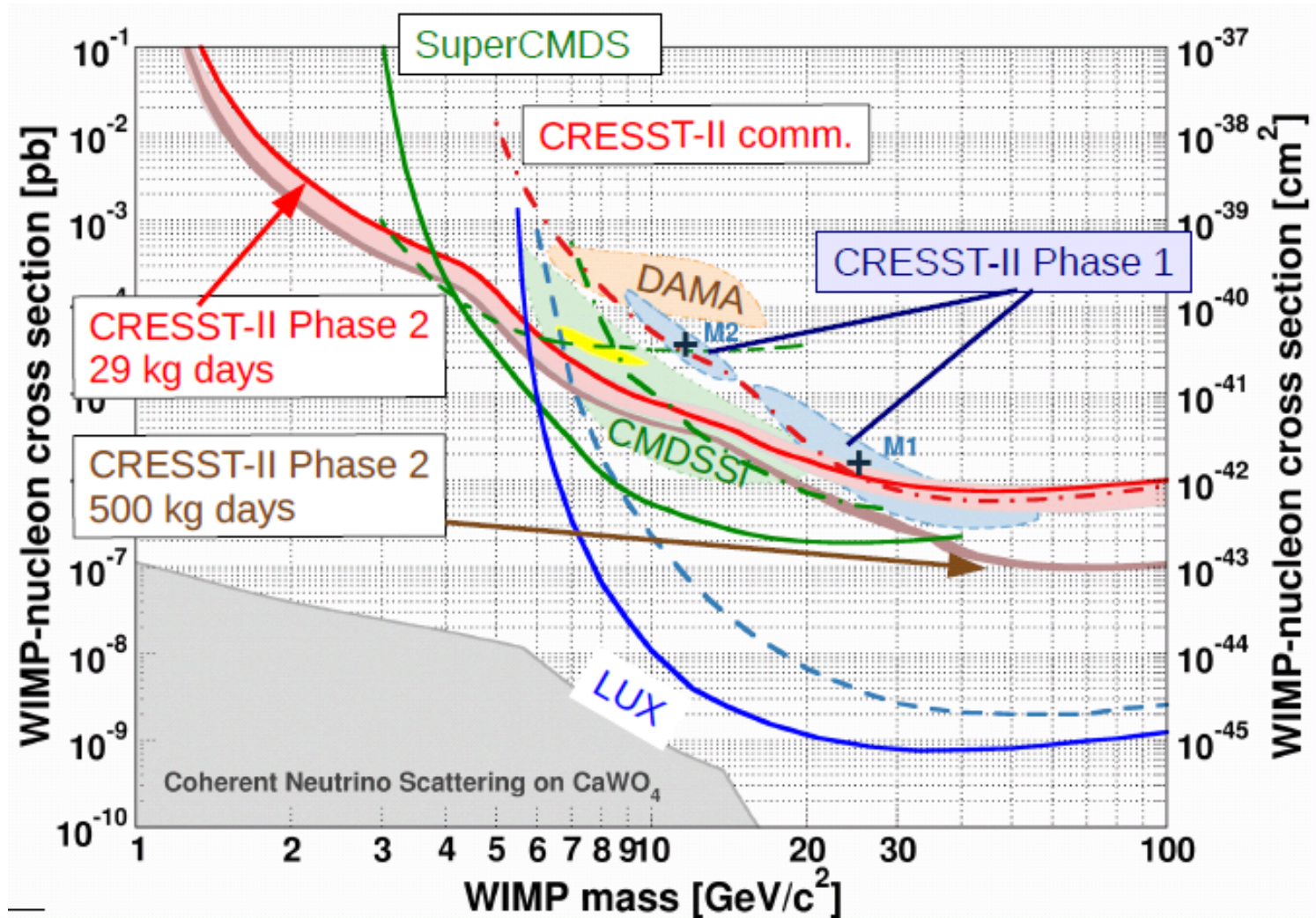
# CRESST: Quenching factors...

La détermination des facteurs de quenching  $Q$  est essentielle pour l'identification des atomes reculants dans les cristaux polyatomiques. Elle a été abordée par CRESST pour  $\text{CaWO}_4$  par trois techniques (*d'après W.Rau, CRESST coll.;TAUP2005*)

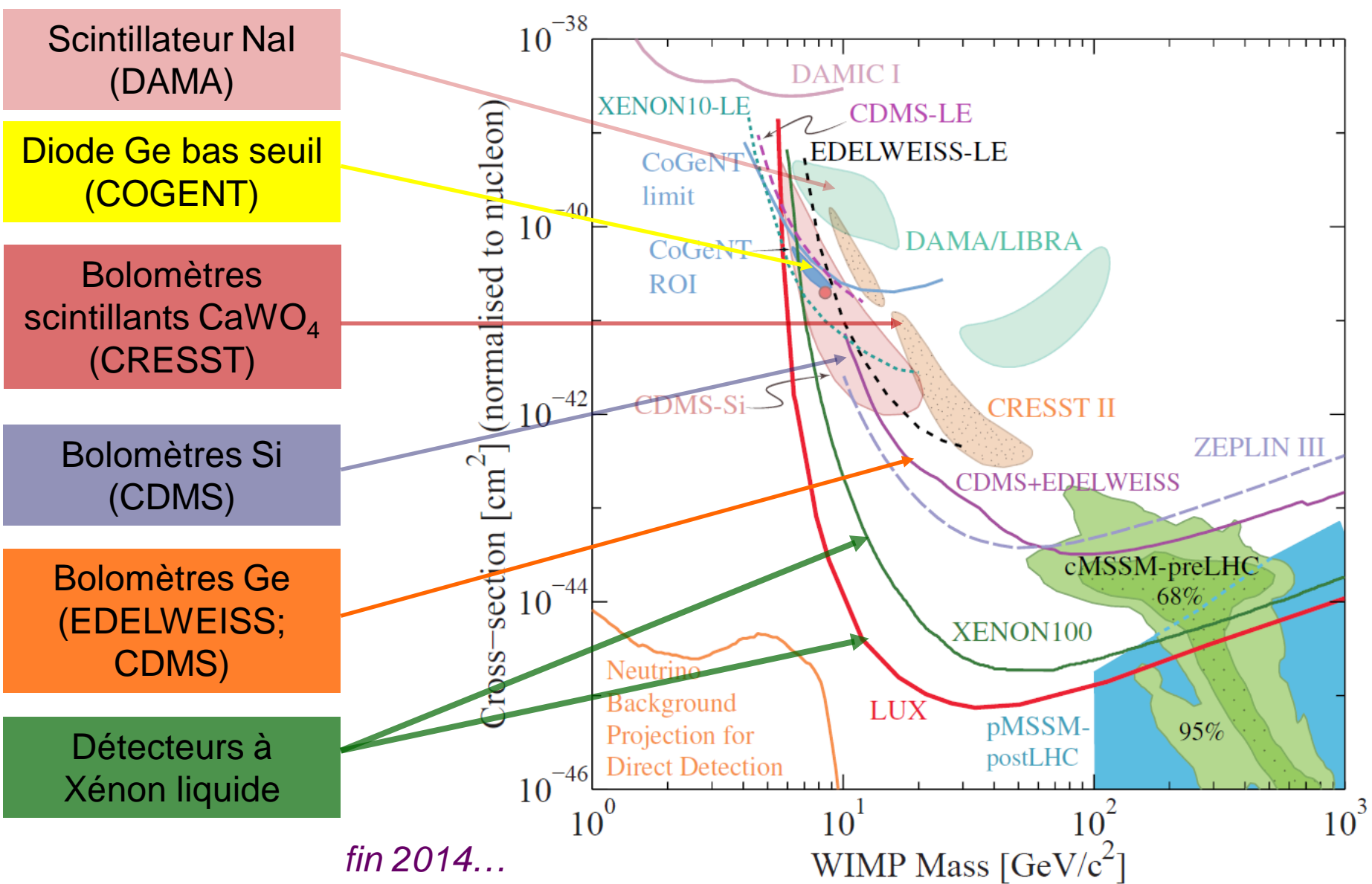
$\text{CaWO}_4$ Facteurs de quenching $Q$	Faisceau de neutrons pulsés et TOF @300K	Irradiation ionique @ 300K	Reculs sous irradiations n @10mK
O	$12.8 \pm 0.5$	$14.5 \pm 0.8$	$8.2 \pm 0.2$
Ca	$16 \pm 0.4$	$26.7 \pm 2.5$	$13.0 \pm 1.7$
W	$>33$ ( $2\sigma$ )	$40.4 \pm 4.2$	



# Diagramme d'existence de la Matière Noire (vue de CRESST)



# La détection directe de la matière noire: une rude compétition... et une situation plus que confuse

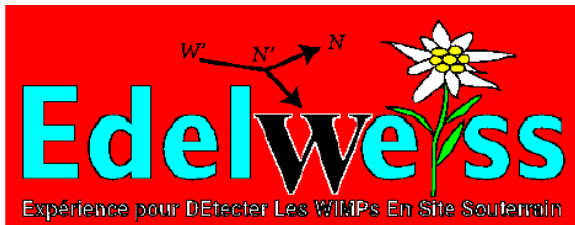


## □ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Charges & Chaleur »

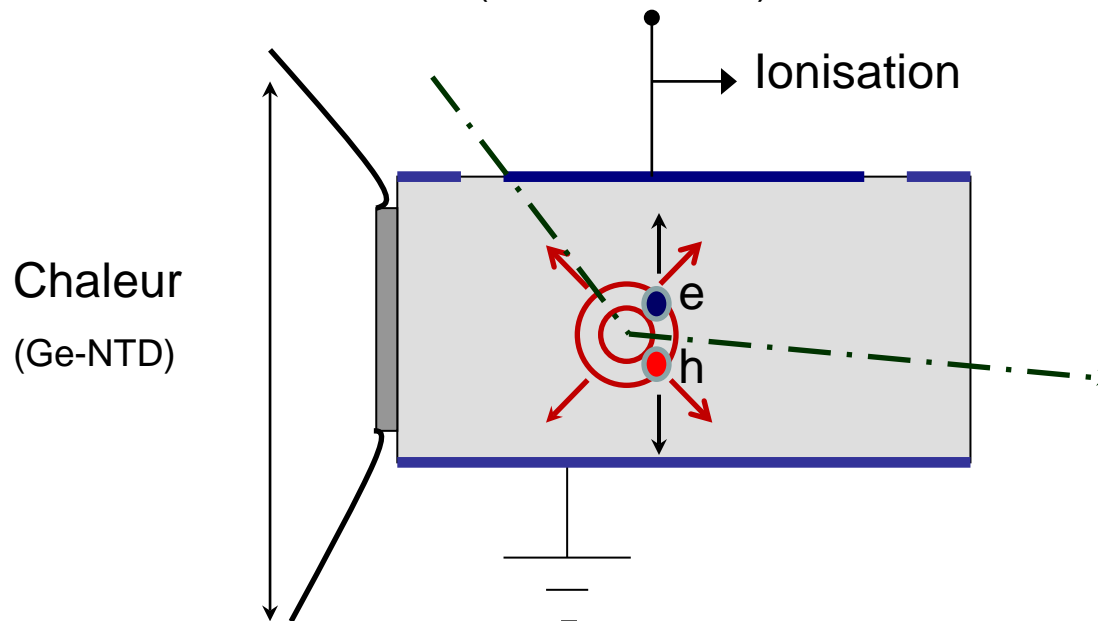
CDMS (US), EDELWEISS (France)



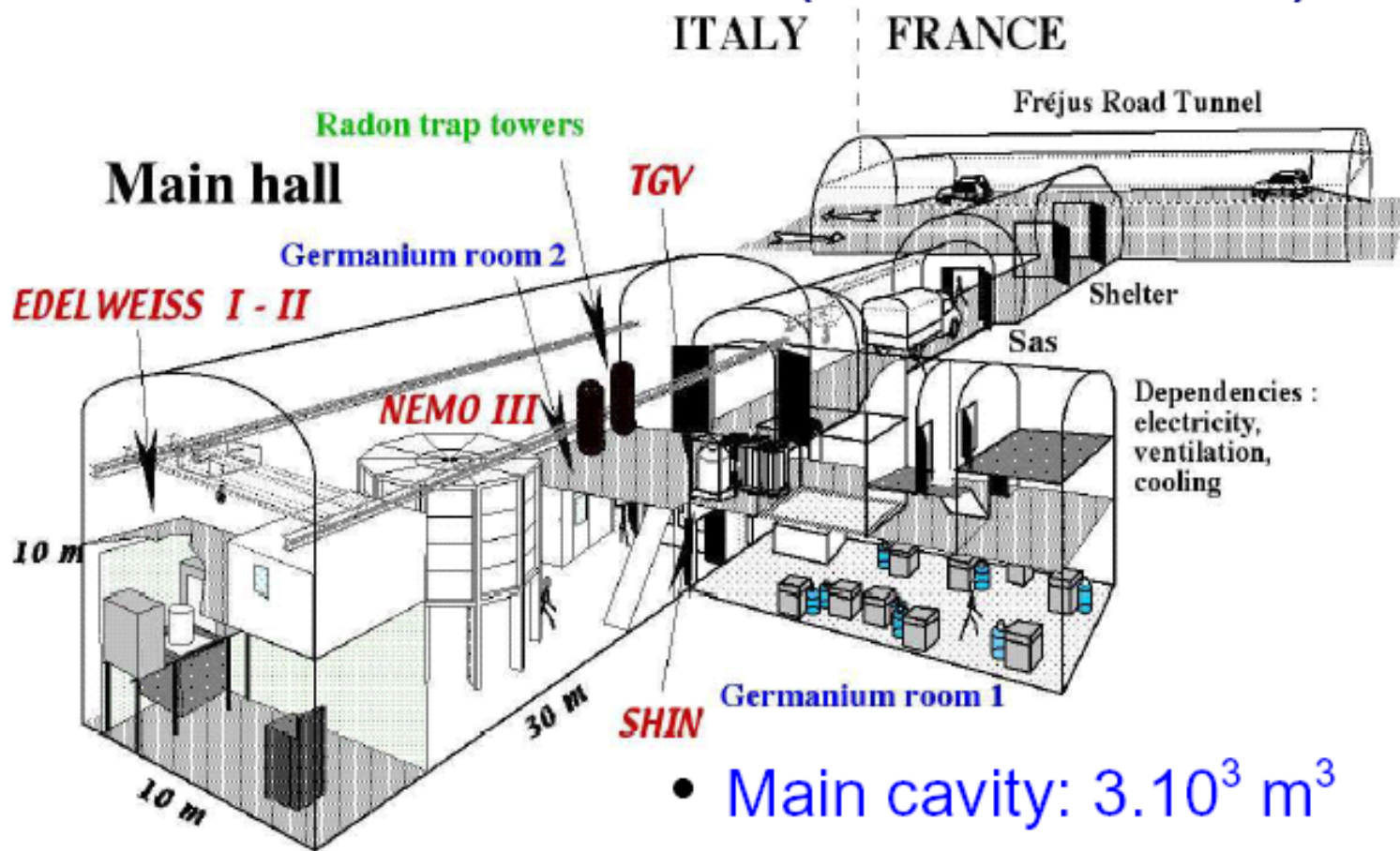


## Expérience pour DÉtecter Les Wimps En Site Souterrain

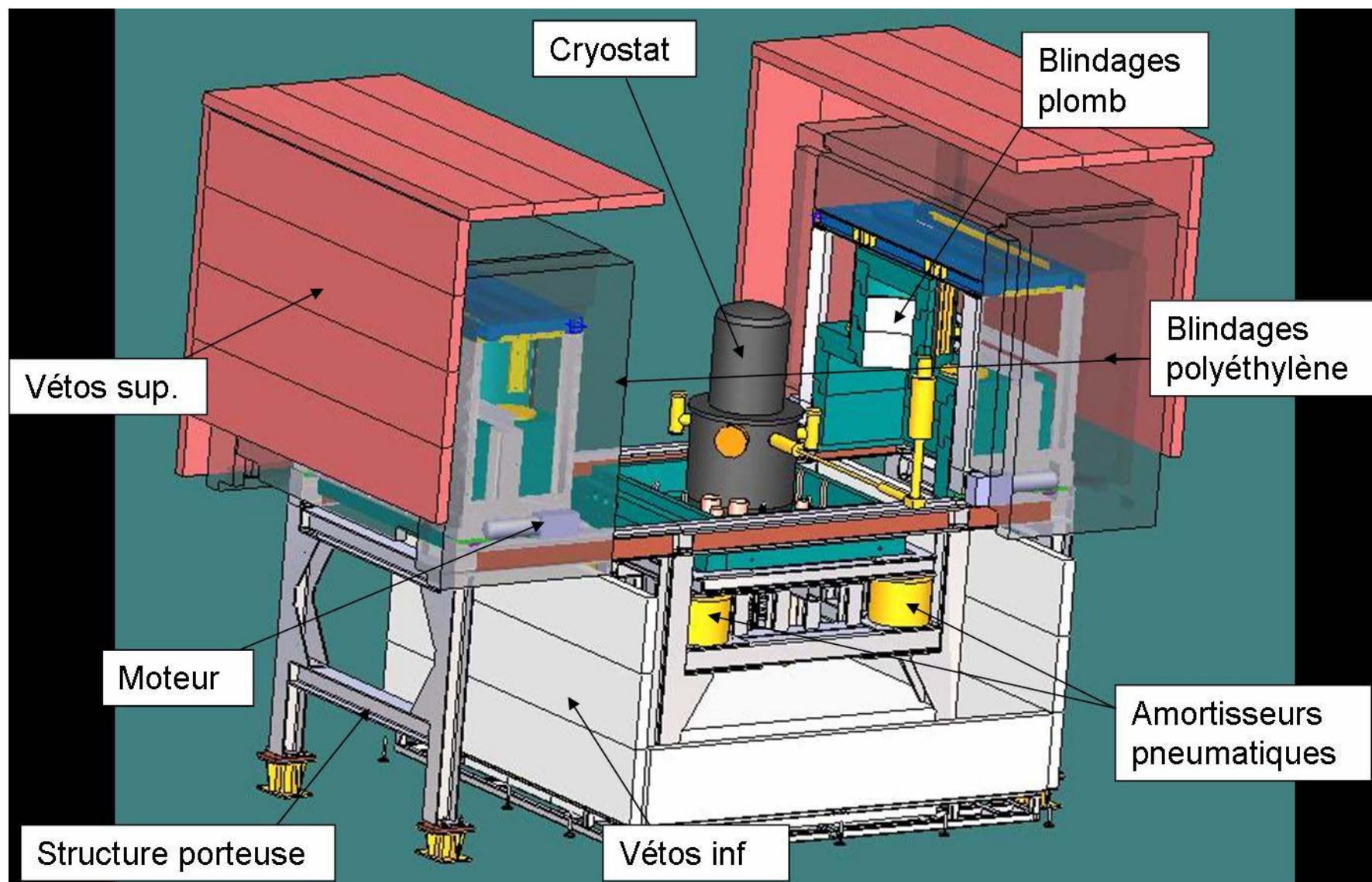
- ✓ tunnel du Fréjus (**LSM**, aboratoire Souterrain de Modane; 4500mwe; 1990→)
- ✓ collaboration **CNRS IN2P3 (CSNSM, IPNL), SPM (Institut Néel),**  
CEA (IRFU, SEDI & SPEC) + Univ. Kalsruhe; JINR Dubna ( $\approx 50$  chercheurs)
- ✓ technique mixte « charges / chaleur » sur Ge;
- ✓ thermométrie EDELWEISS:Ge-NTD ( $\neq$  CDMS: TES)



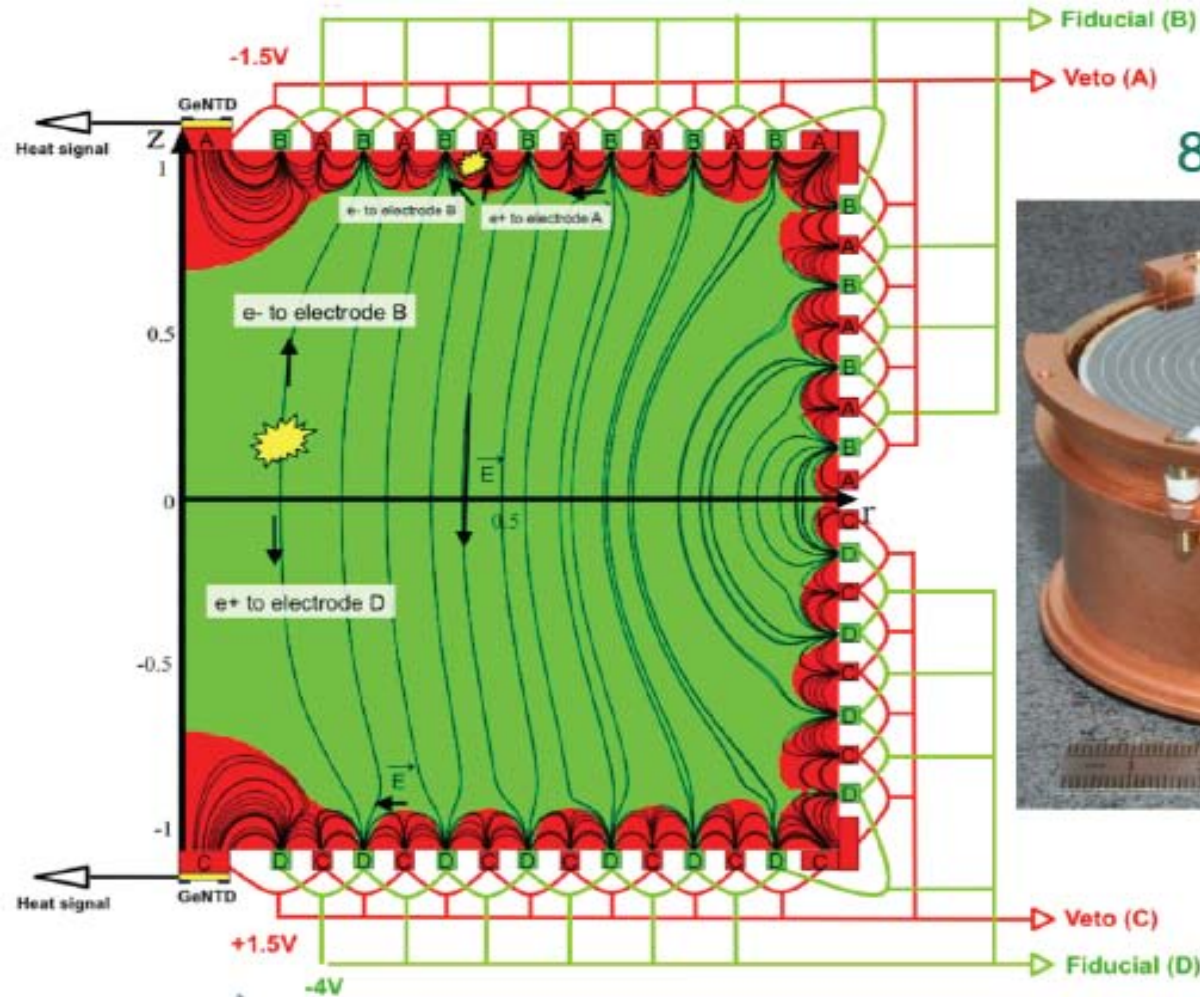
## Inside the LSM (CNRS-CEA)



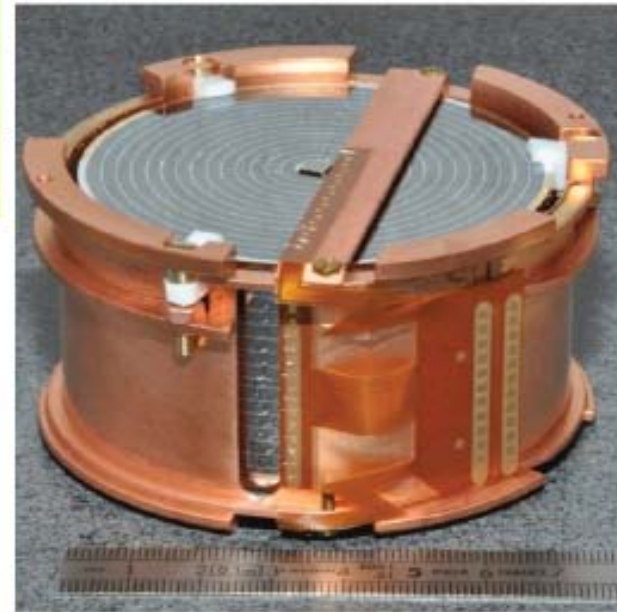
- Main cavity:  $3 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
- Outside: offices, workshop and garage



# Détecteurs FID (Full Inter Digit)



Full Inter-Digitized  
800 g HP-Ge Detector



Height: 4 cm

Diameter: 7 cm



2 heat channels - NTD technology  
4 ionisation channels

C. Nones @ NDM15

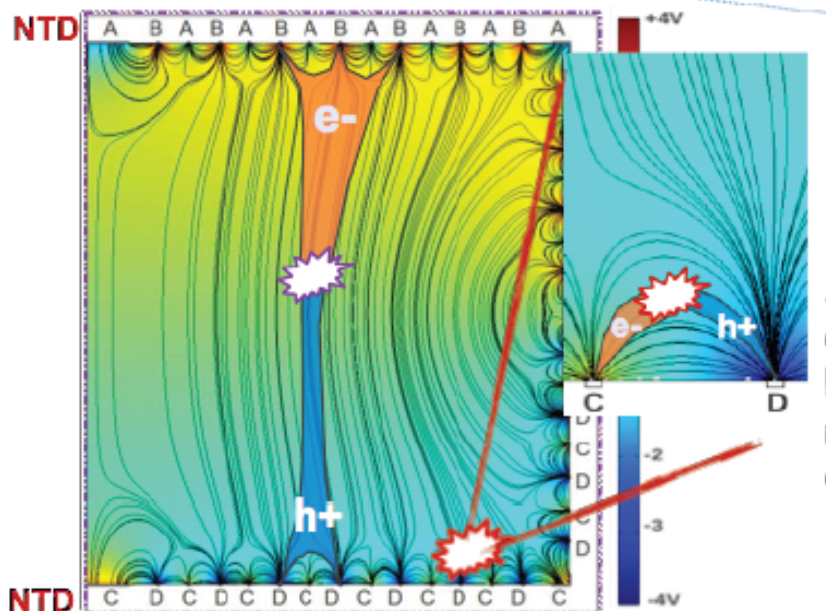
# Détecteurs FID: principes de base

## Simultaneous measurement

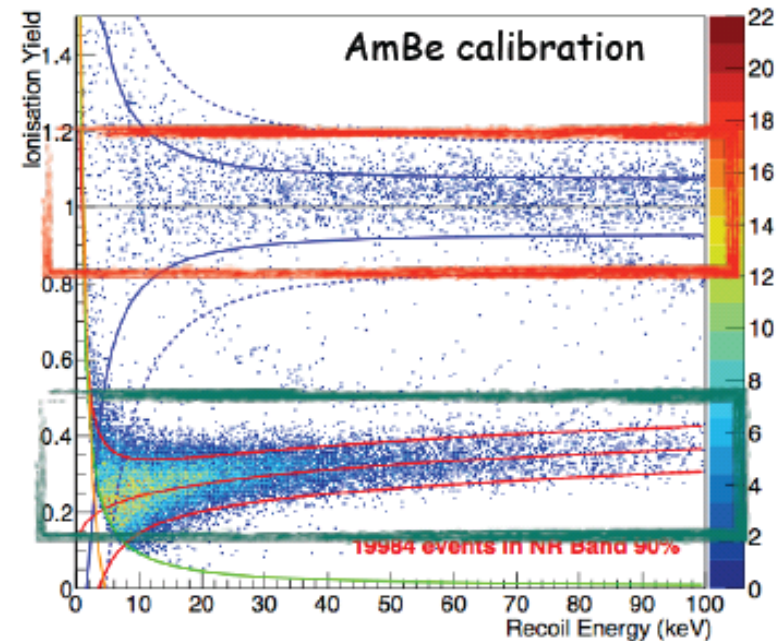
- Heat @ 20 mK with Ge/NTD thermometer
  - Ionization @ few V/cm with Al electrodes
- Evt by evt identification of the recoil

Most backgrounds ( $e, \gamma$ ) produce electron recoils  
Yield (Ionization/recoil)  $\sim 1$

WIMPs and neutrons produce nuclear recoils  
Yield (Ionization/recoil)  $\sim 0.3$



## FID800 Fiducial Events



### Surface Events

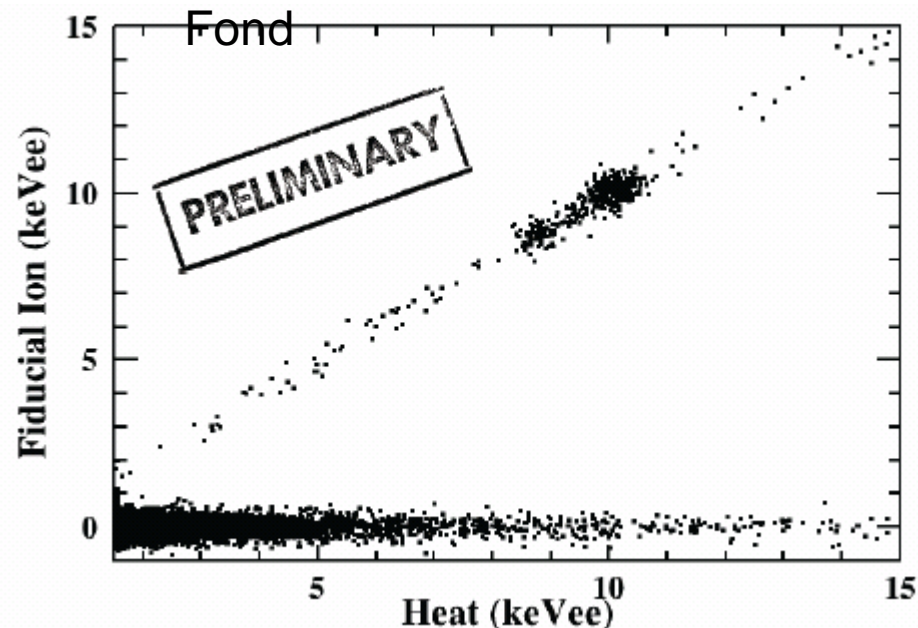
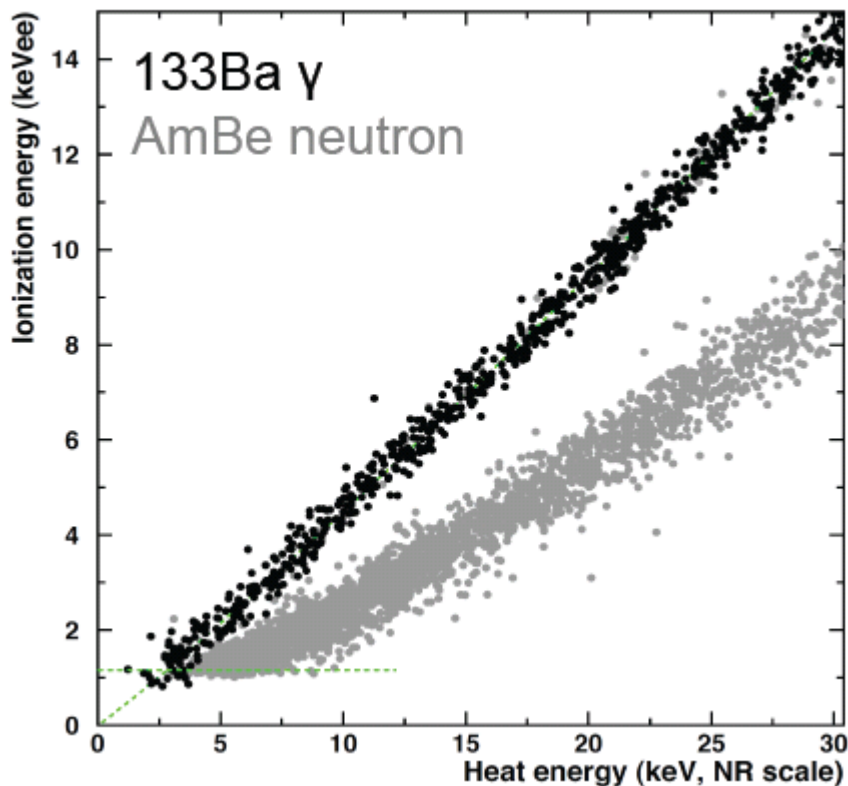
Charge collection shared between one veto and its neighbor fiducial electrodes, e.g. C & D

### Bulk Event

Charge collected on fiducial electrodes B & D

C. Nones @ NDM'15

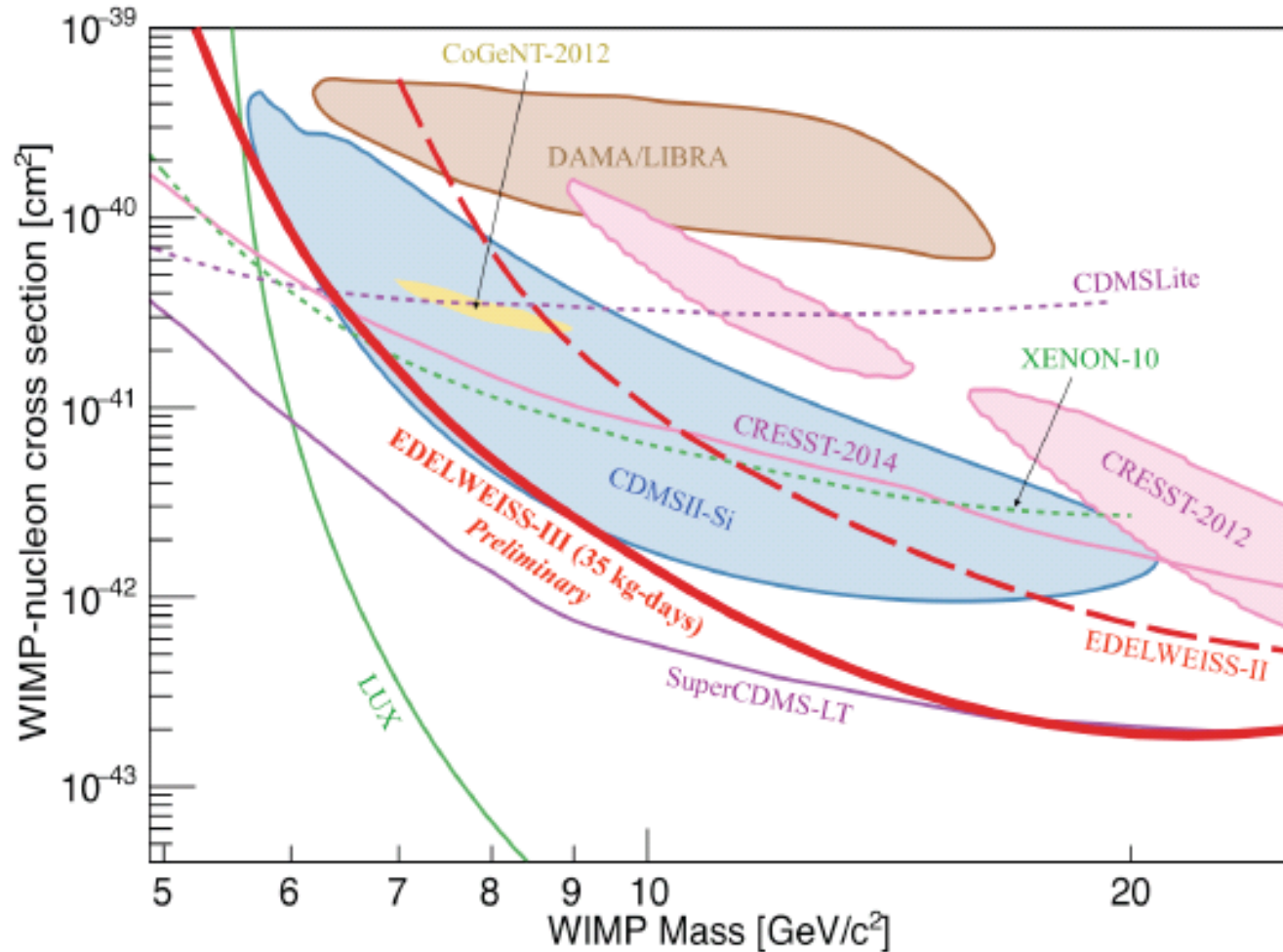
## Calibration



*C. Nones @ NDM'15*

	EDW-III subsample (1 x FID800)
exposure	35 kg.days
threshold	3.6 keVnr
FWHM ion fid	0.54 keVee
FWHM heat	0.33 keVee

# Diagramme d'existence de la Matière Noire (vue d'EDELWEISS)

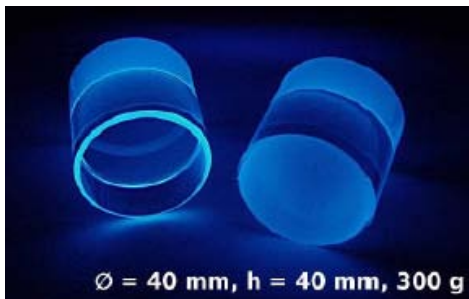
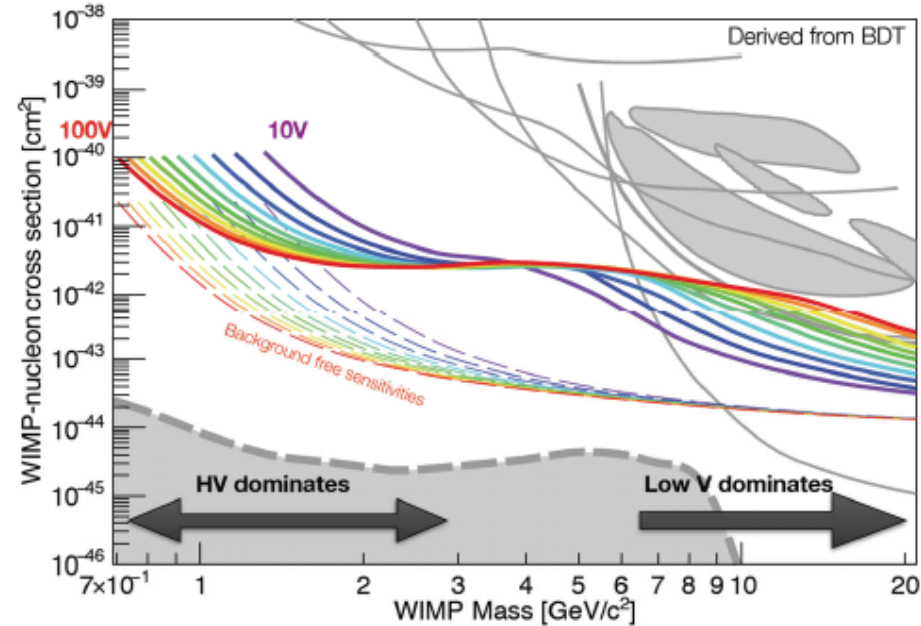
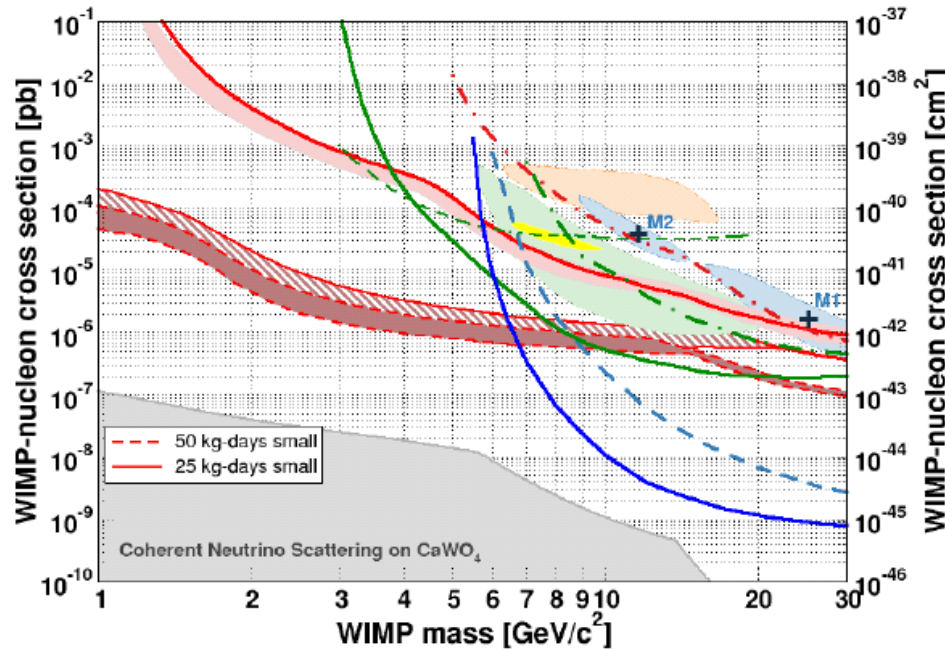


C. Nones @ NDM'15

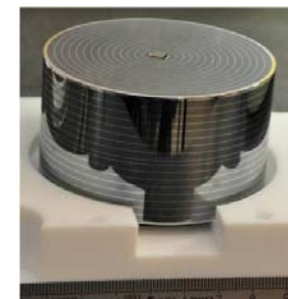
# Course au seuil & prévisions

CRESST,  $\text{CaWO}_4$   
 300g  $\rightarrow$  24g  
 600eV  $\rightarrow$  100eV

EDELWEISS, Ge  
 + R&D: amplis HEMT  
 effet « Neganov-Luke »



sans compter  
 les autres...





## Comptes-rendus des conférences

[tous les deux ans]

### ❑ LTD (Low Temperature Detectors)

- aspects techniques
- publiés généralement dans Journal of Low Temperature Physics
- LTD15 à Pasadena en 2013
- **LTD16 à Grenoble en 2015**

### ❑ TAUP (Topics in Astroparticle and Underground Physics)

- physique des expériences
- publiés
  - ≤2003: généralement dans Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)
  - 2005: Journal of Physics: Conference Series (accès libre)
- TAUP-2013 en Californie
- **TAUP-2015 à Turin**