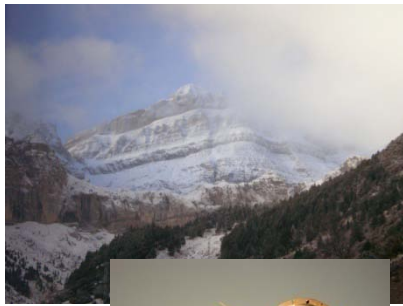
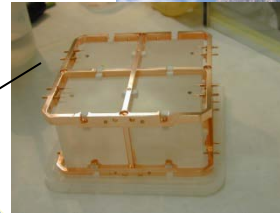




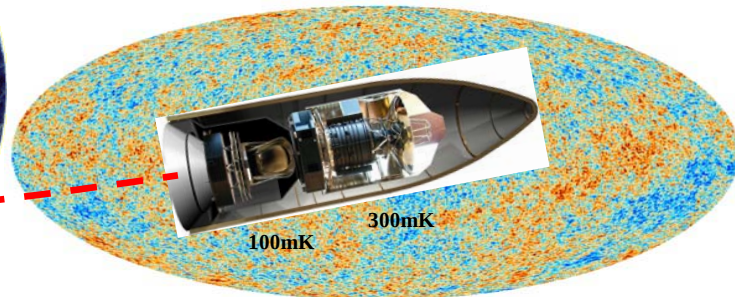
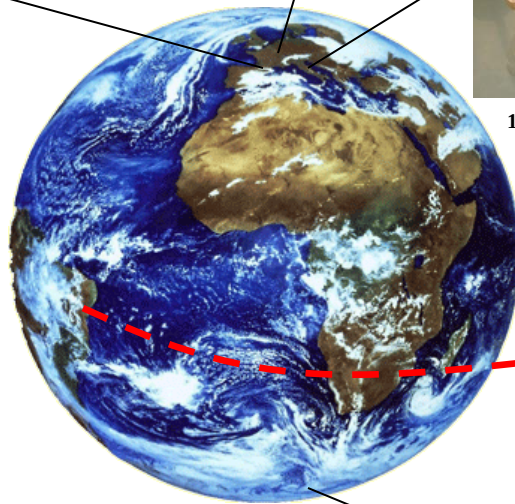
20mK



18mK



10mK



100mK 300mK

300mK



??



IN2P3

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



Détecteurs bolométriques refroidis

2. Applications

Applications des bolomètres

☐ En spectroscopie

- ☐ X
- ☐ α
- ☐ Noyaux de Reculs
- ☐ Neutrons rapides

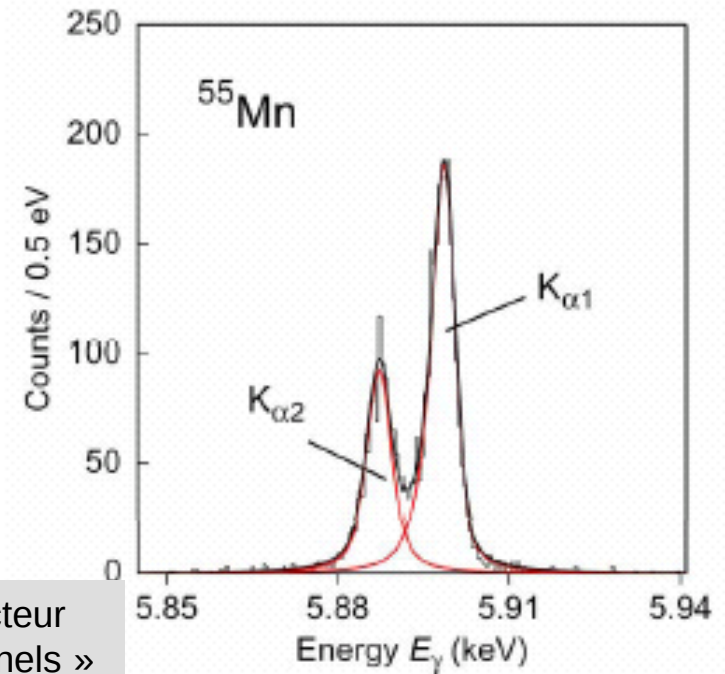
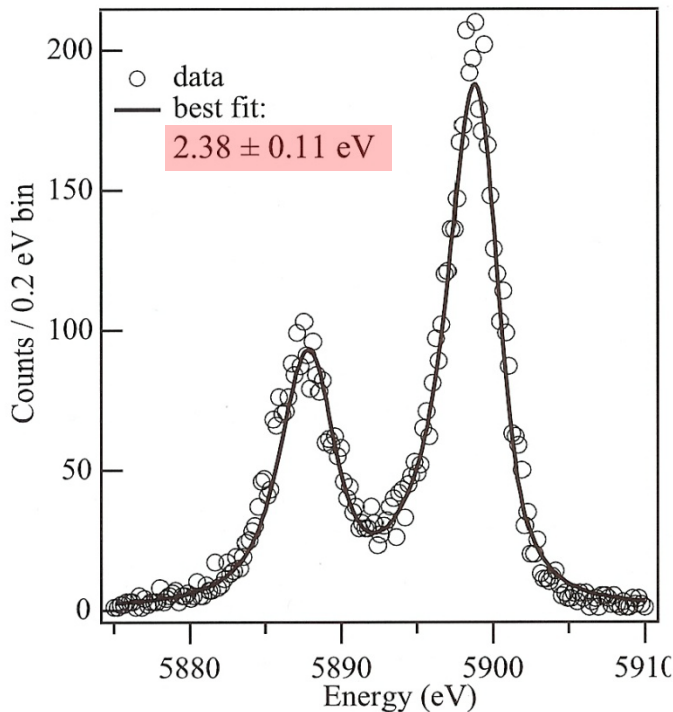
☐ Sur faisceaux

☐ En physique fondamentale

- ☐ Rayonnement fossile cosmologique (CMB): Planck-HFI
- ☐ Neutrino:
 - ☐ Masse
 - ☐ Désintégration double bêta sans neutrino $\beta\beta 0\nu$
 - ☐ Diffusion élastique cohérente des neutrinos sur les noyaux
- ☐ Autres événements rarissimes (hors $\beta\beta 0\nu$)
 - ☐ Désintégrations alpha
 - ☐ Détection de la Matière noire

□ spectroscopie X

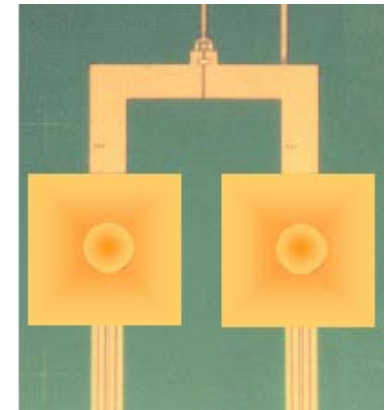
Spectroscopie X très haute résolution...monopixels



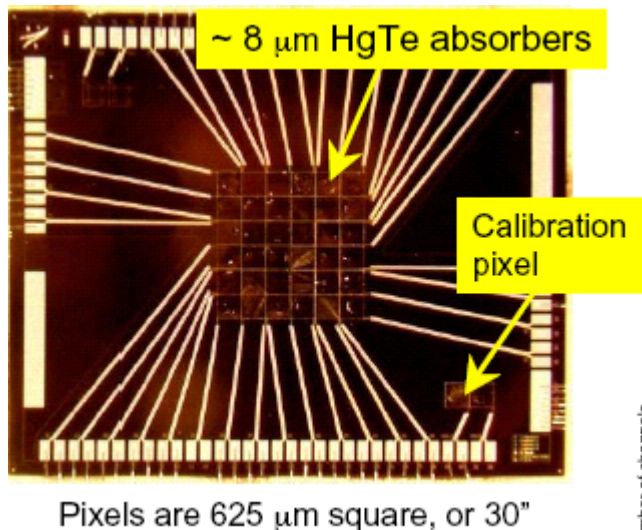
Rappel: les détecteur Si(Li) « conventionnels » plafonnent à 110eV !

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

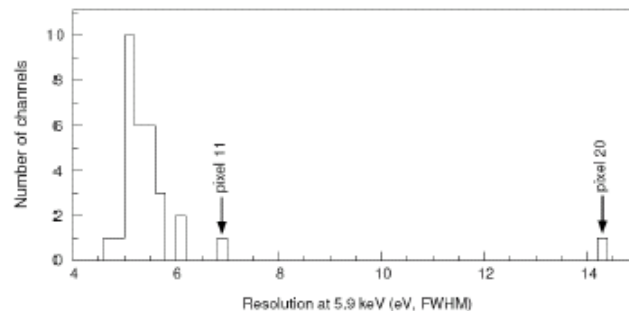
- bolomètre métallique à lecture magnétique (Au:Er); T=35mK
- Cible Au 160×160×5 μm^3
- **3.4 eV @ 6keV**
- $\tau \approx \text{ms}$; efficacité >98 %
- KIP Heidelberg



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

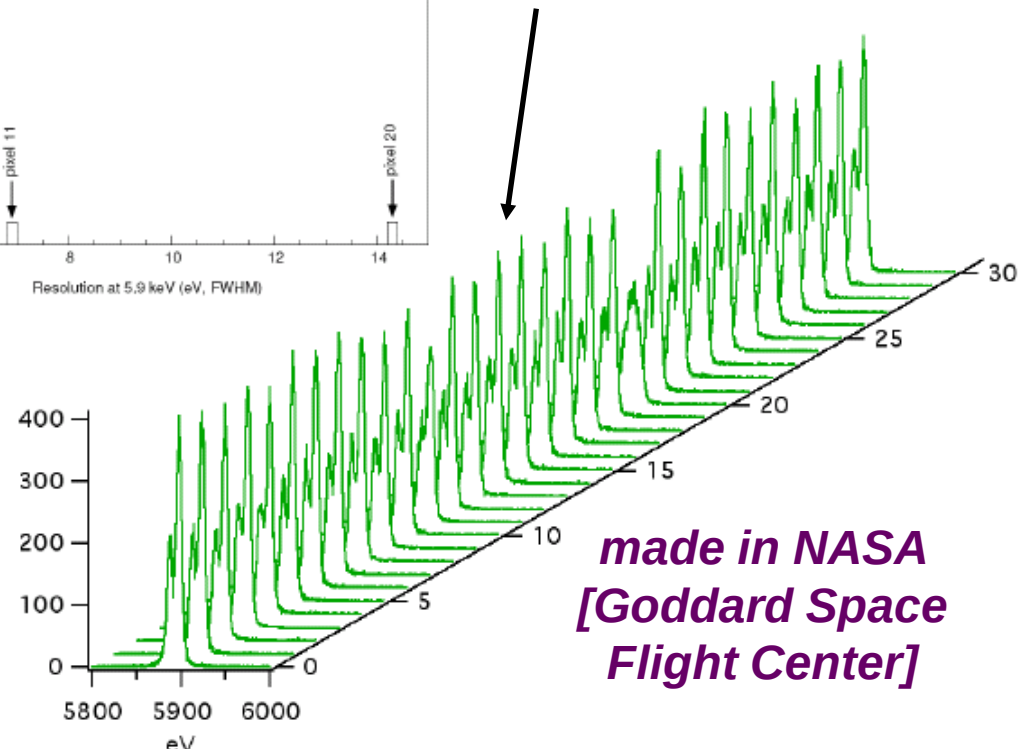


- matrice 6×6 à bord de Suzaku (ex Astro-E2)
- télescope: miroir en incidence rasante
- thermométrie Si implanté; T=60mK
- résolution moyenne: $\Delta E = 5.5$ eV FWHM @ 5.9 keV



- lancé le 10 juillet 2005
- objectifs: amas de galaxies, trous noirs, SuperNovae
- premier satellite à T<100mK dans l'espace (ADR+cryocooler+Néon solide) !

Note: pb. cryogénique
3 semaines après le lancement
→ XRS s'est réchauffé !

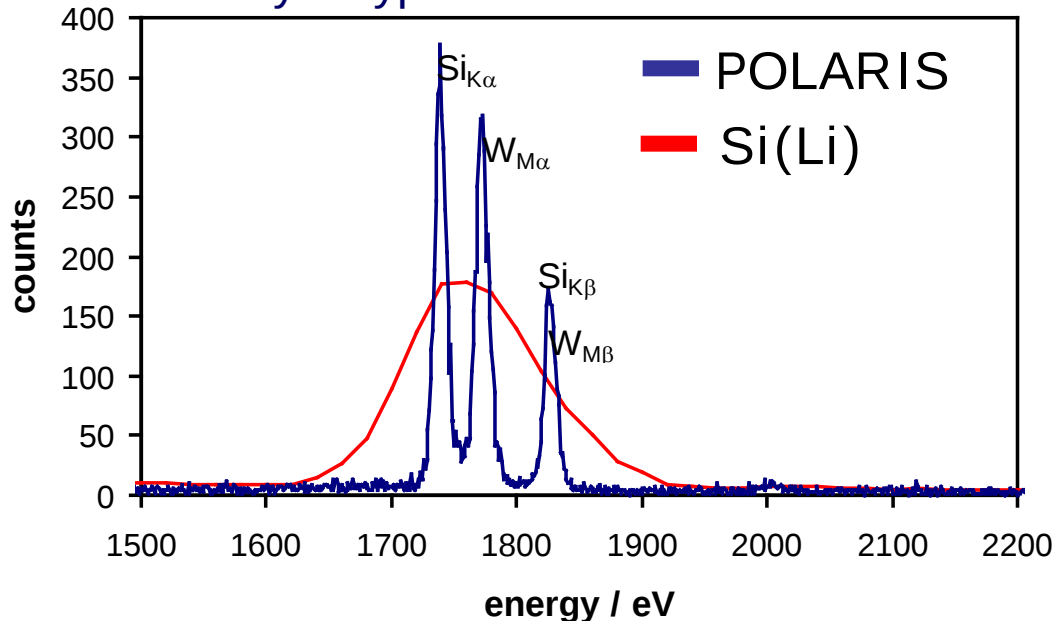


Successeur: SXS (Soft X-ray Spectrometer)/Astro-H (@ 50mK; NASA/JAXA, 2014)

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

Analyse type d'un matériau W+Si

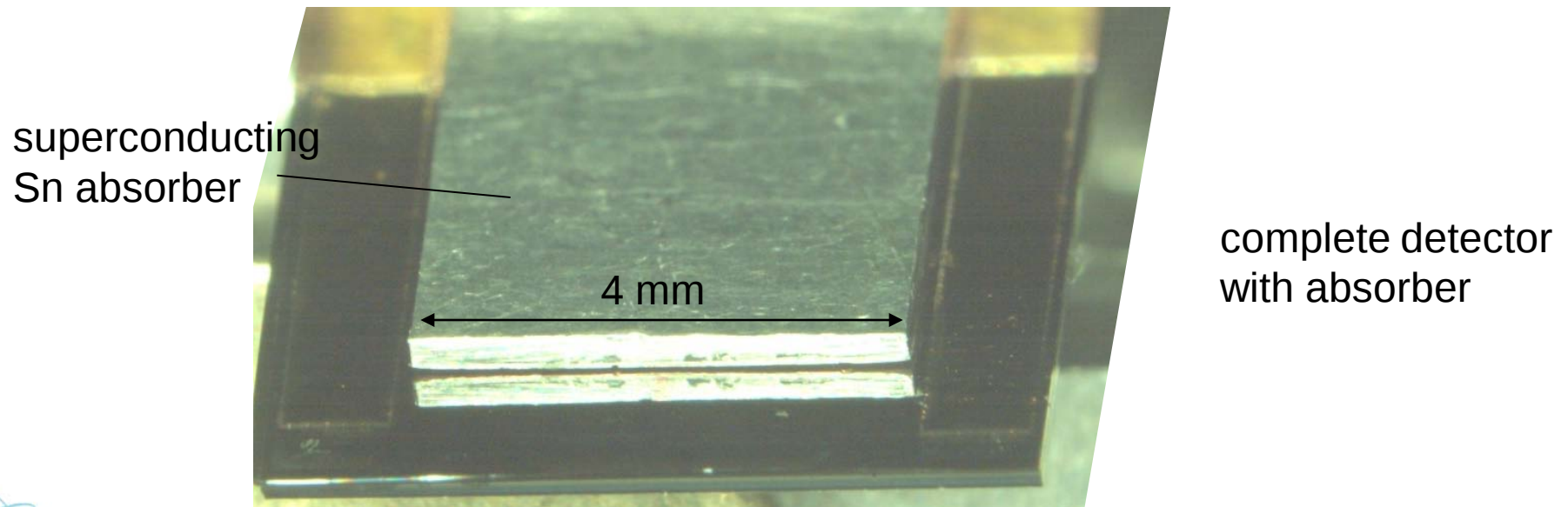
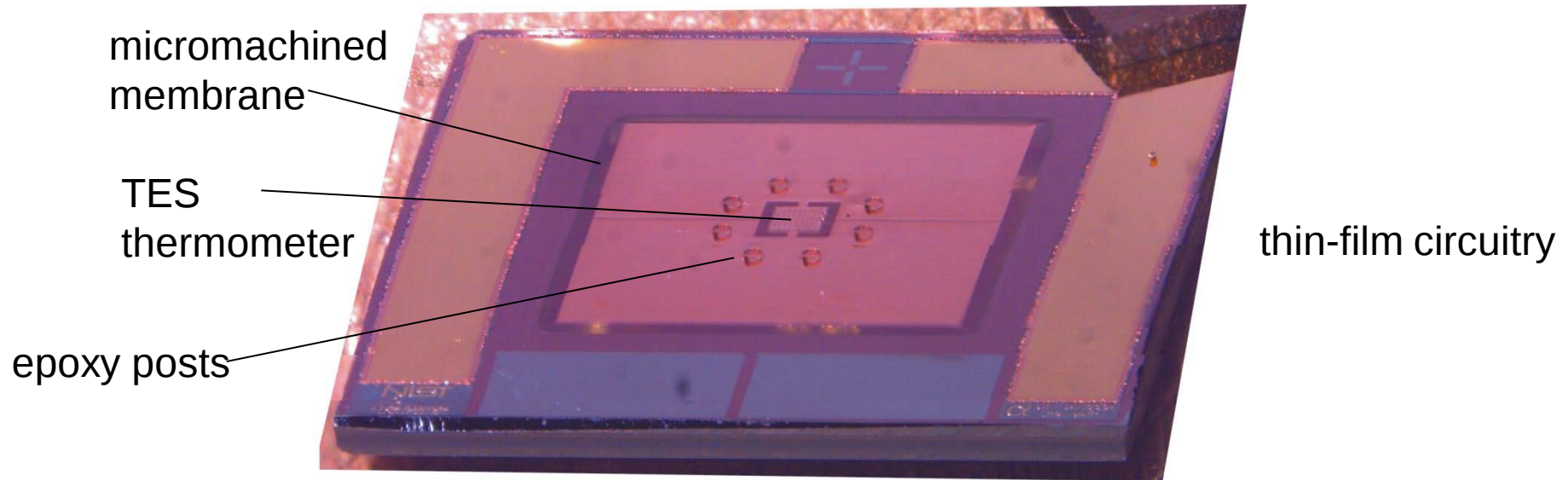


Coût ≈ 500 k€

□ spectroscopie α

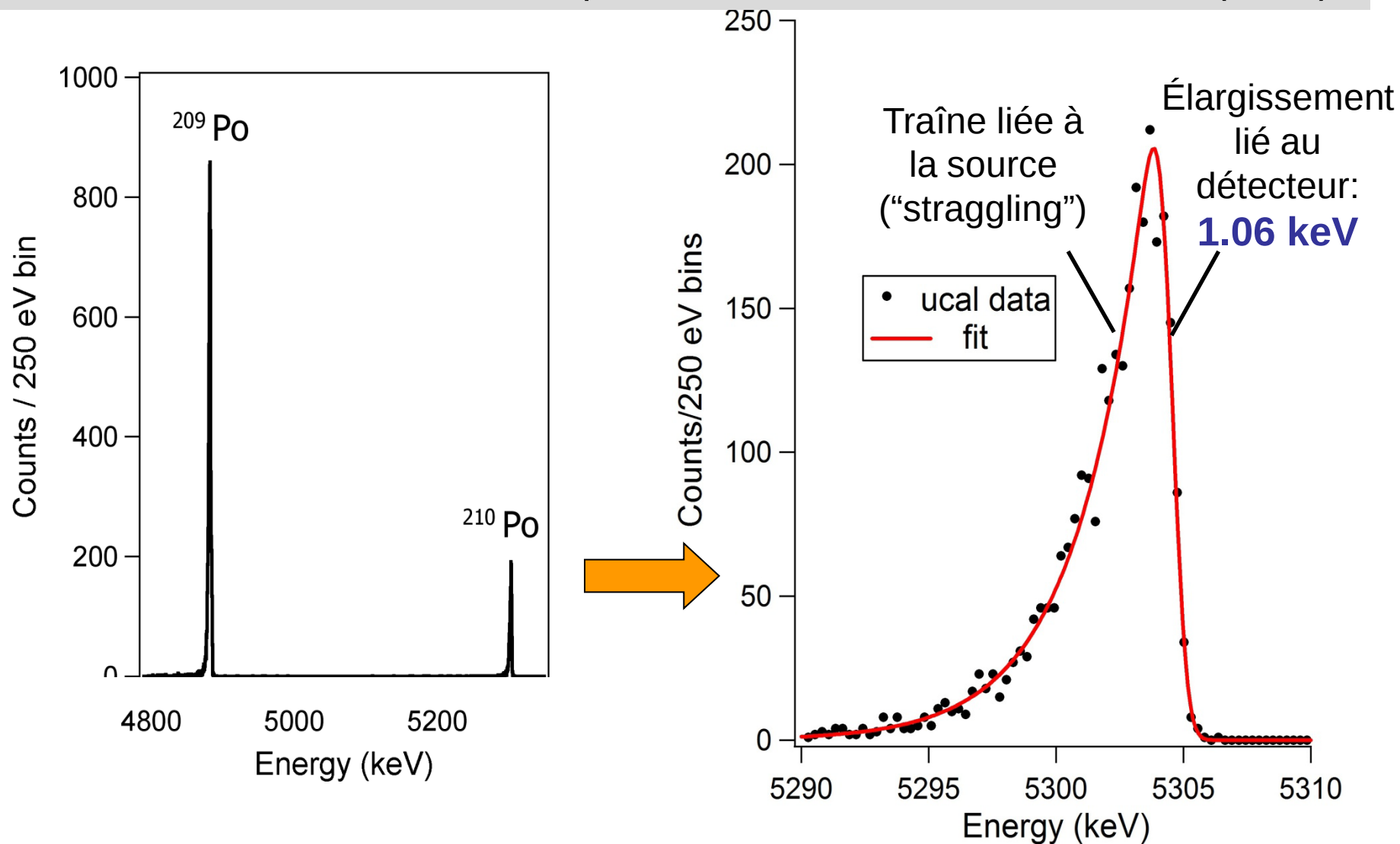
Microcalorimètres alpha du NIST

présentation de J. Ullom @ LTD13

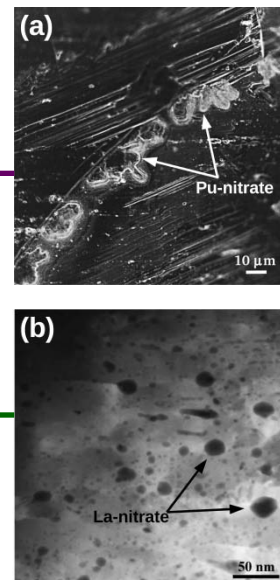
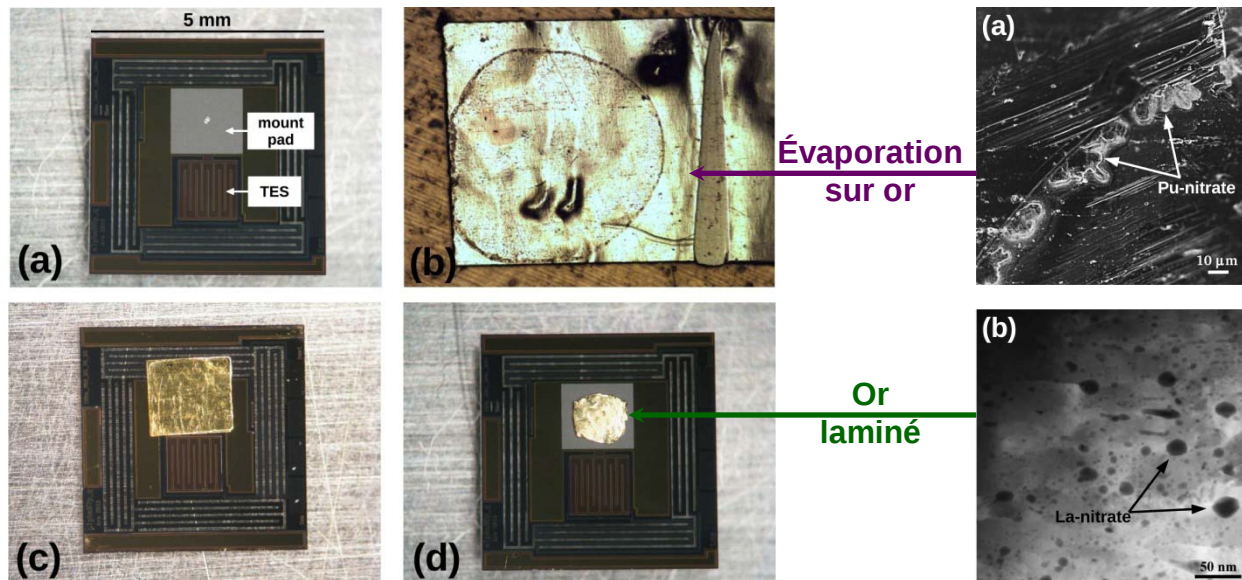


Spectre alpha d'une source de Polonium

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



Sources enfouies: mesure des énergies de réaction Q_α

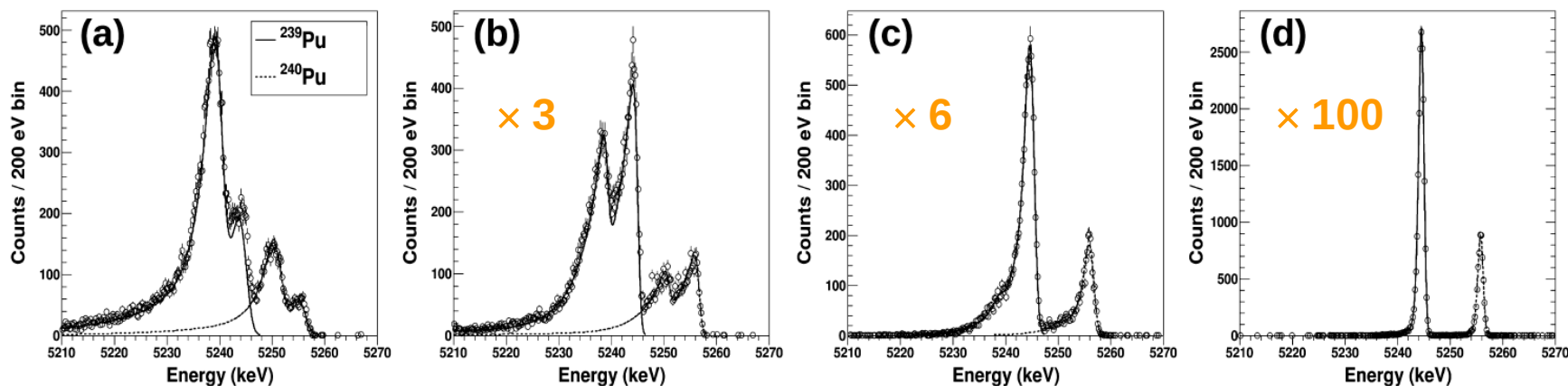


- ✓ Mo/Cu TES @ 120mK
- ✓ $E = Q_\alpha = E_\alpha + E_{\text{recoil}}$

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

Hoover et al., 2015
LANL & NIST

Tours de laminage



Bilan des bruits du microcalorimètre α du NIST

Origine	ΔE (eV)
Bruit thermodynamique	102- 380
éjection d'électrons	80
variation de T	135
Ligne de base (électronique)	320
Somme quadratique des bruits connus	520
ΔE mesuré	1060 ± 60
→ Source résiduelle de bruit	925 eV !

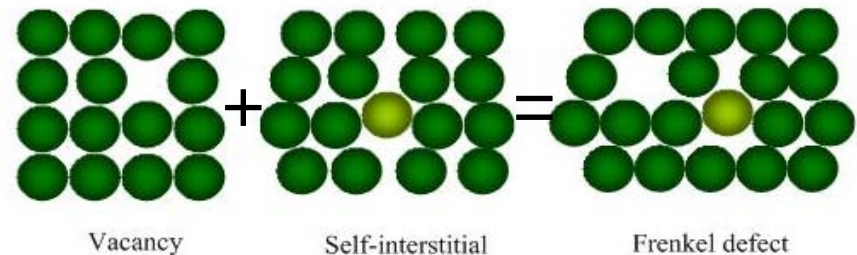
✓ La résolution ultime alpha pour un détecteur solide est peut-être atteinte !

✓ 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

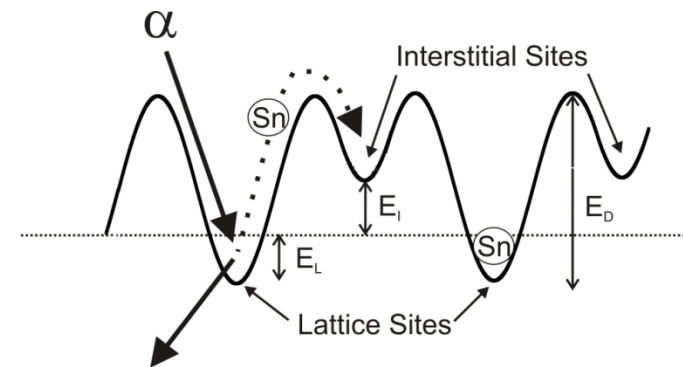
Interprétation ?

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

Point defects of crystals

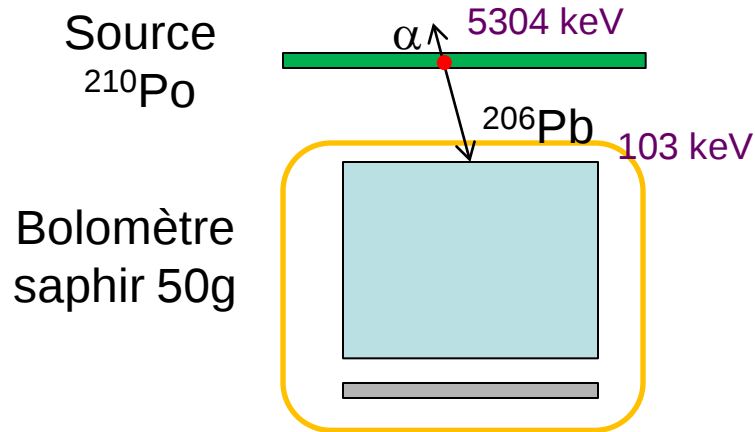


$E_F \cong 4-7$ eV dans Sn

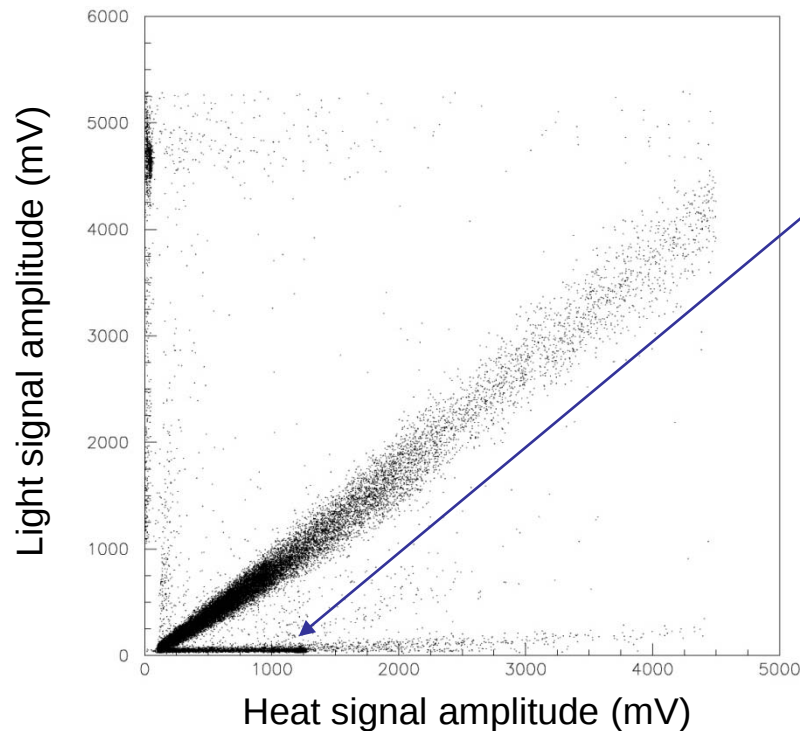


□ spectroscopie de noyaux de recul

Reculs de ^{206}Pb & production de sources α hyper fines

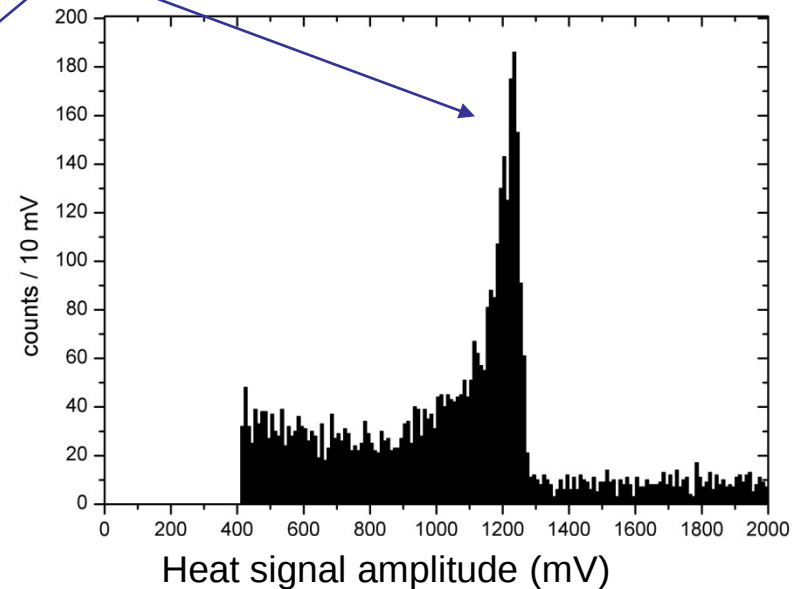


- Spectre des reculs très sensible à l'état de surface de la source → **test de sources α**
- Calibration de matrices de bolomètres, implantation $\sim 100 \text{ \AA}$ → **qualifications de micro-structures (membranes $\text{Si}_3\text{N}_4, \dots$)**



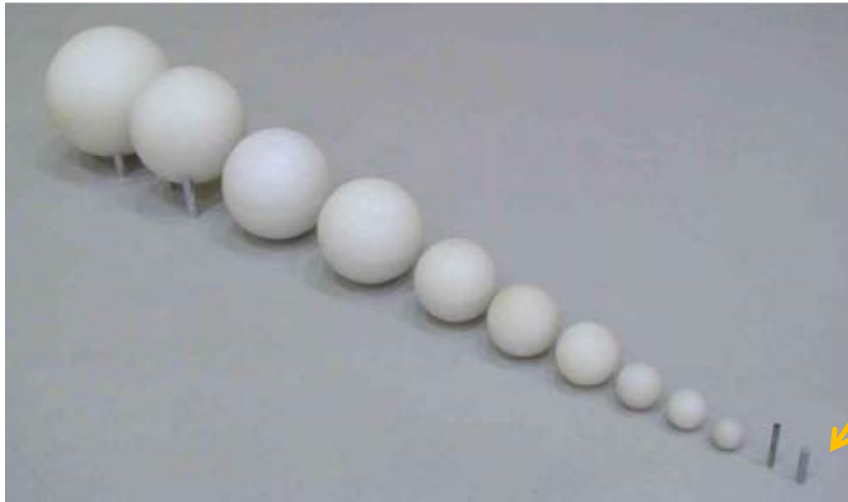
Recul ^{206}Pb

Spectre des événements de la bande des reculs



□ spectroscopie des neutrons rapides

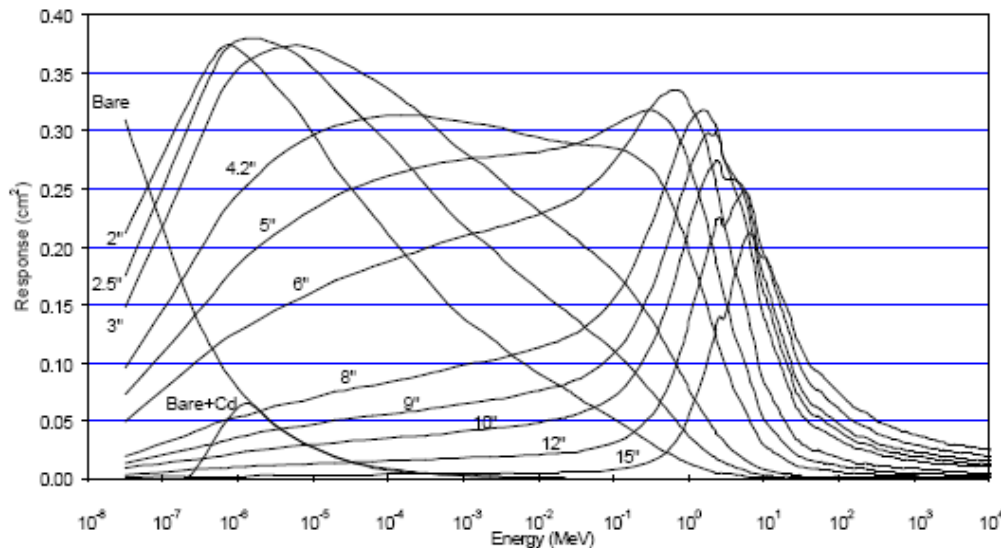
Spectroscopie « traditionnelle » des neutrons rapides



Sphères de Bonner
(polyéthylène)

détecteur ^3He

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



Matrice de réponse des sphères

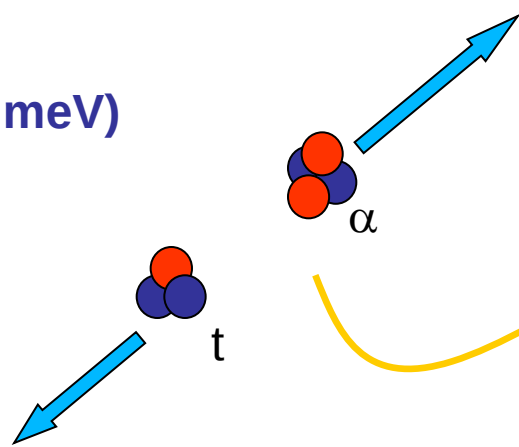
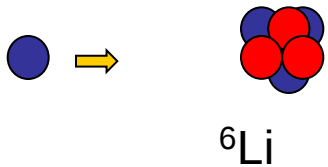
Une mesure au PSI (Suisse)



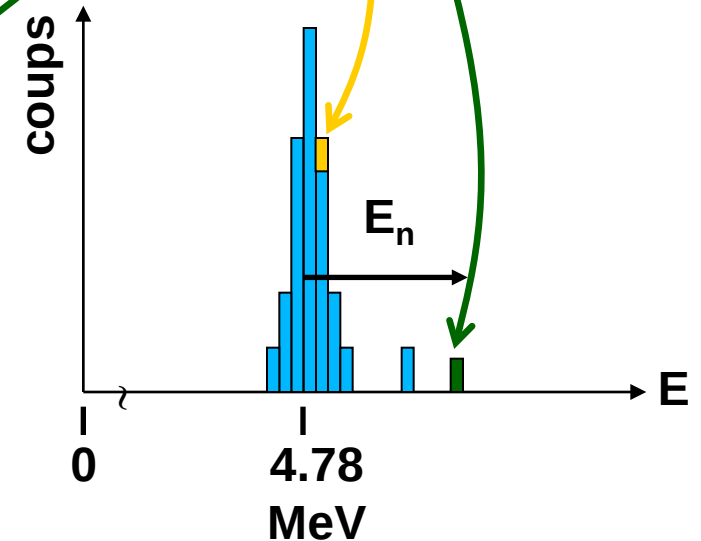
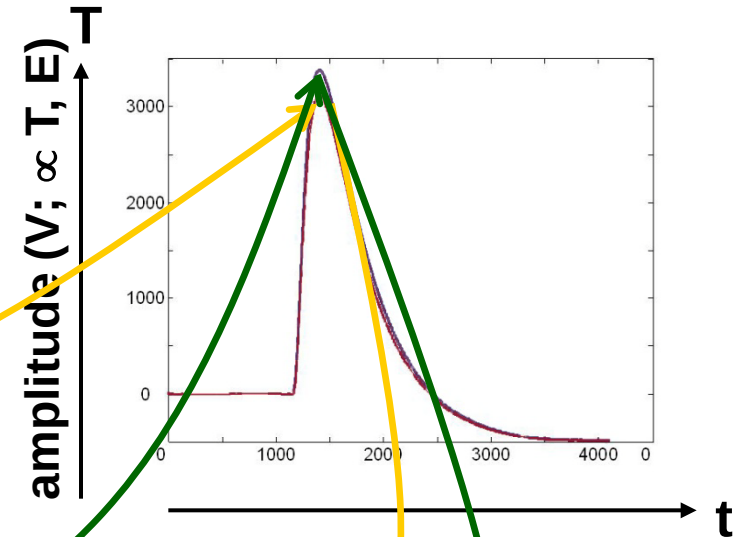
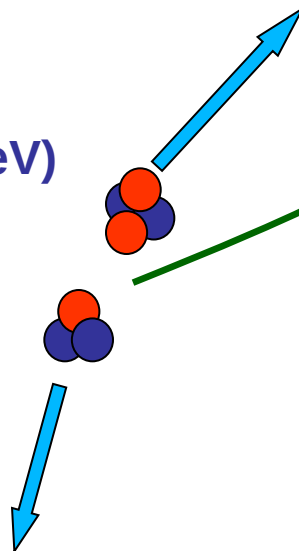
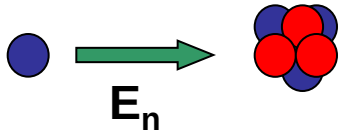
Réaction de capture: $n+{}^6\text{Li}\rightarrow\alpha+t$ $E=4.78\text{ MeV} + E_{\text{neutron}}$

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

Neutron thermique (25 meV)

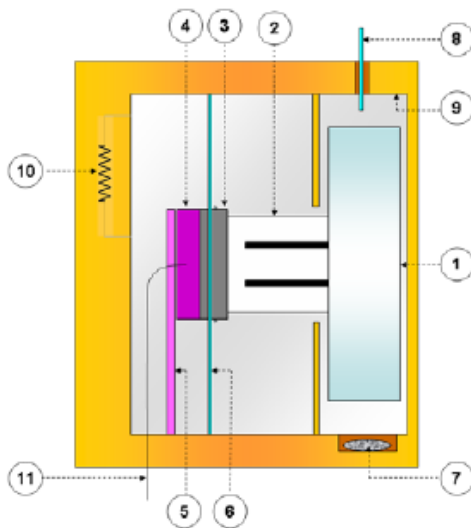
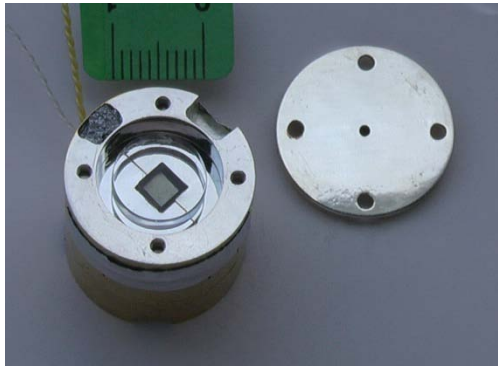


Neutron rapide (1keV-10MeV)



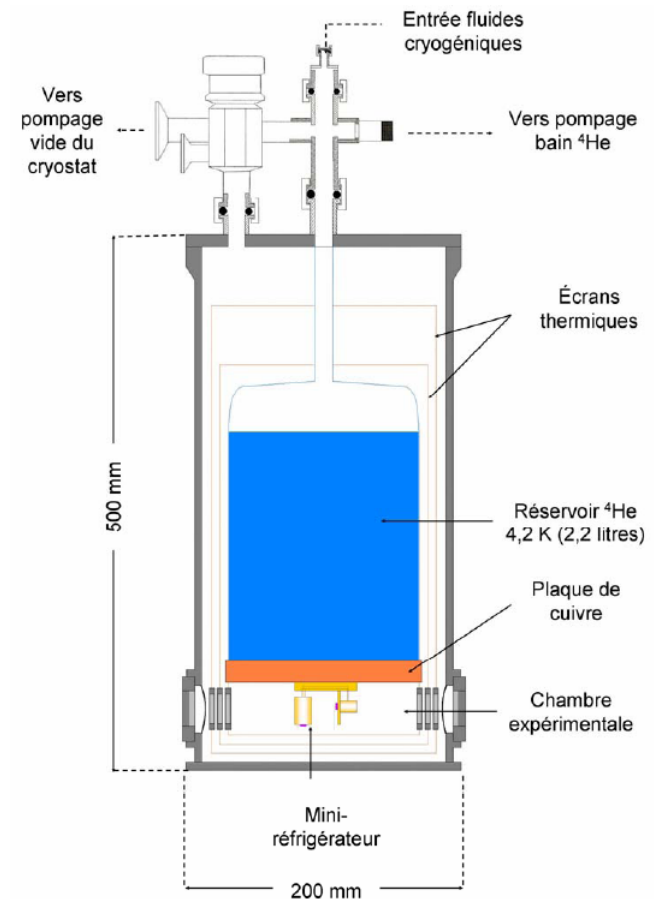
Une spectroscopie « directe » des neutrons rapides: la preuve par la mesure ! *(thèse J. Gironnet, 2010)*

Bolo 0.5g ^6LiF de l'IAS (@400mK)

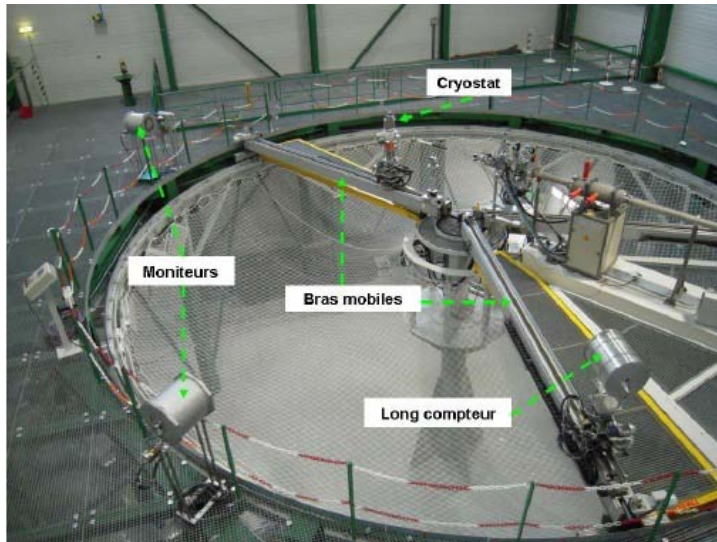


Légende :

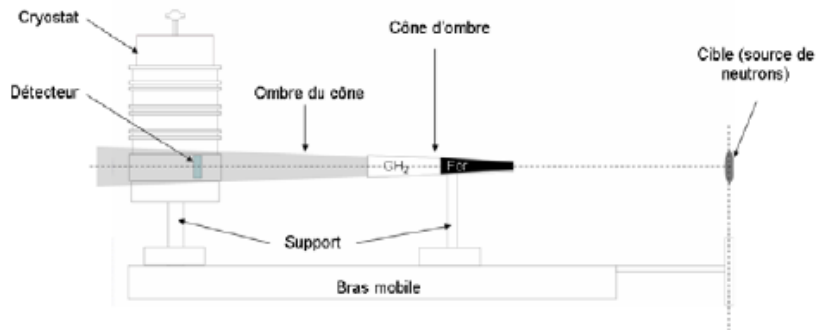
- 1 : Cristal de ^6LiF ($\phi = 10 \text{ mm}$; $e = 2,62 \text{ mm}$)
- 2 : Cube de BGO fendu partiellement collé sur le cristal en 9 points pour limiter les efforts de dilatation thermiques.
- 3 : Cale en Ge pur
- 4 : Détecteur Ge-NTD ($6,14 \times 4,08 \times 0,84 \text{ mm}^3$)
- 5 : Fuite thermique en Ge pur
- 6 : Fibres en saphir (suspensions et lien thermique)
- 7 : Source ^{241}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



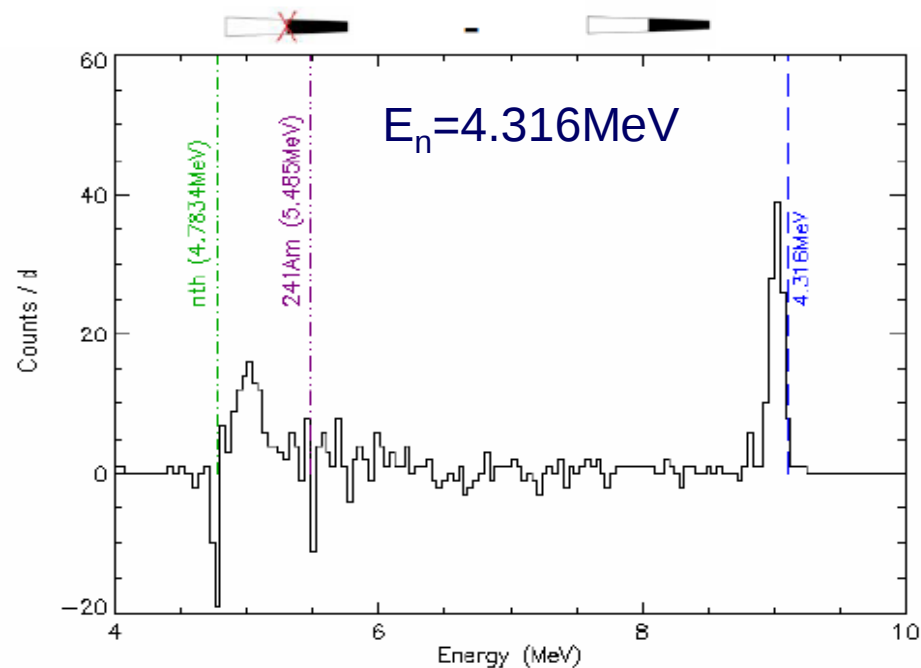
Etalonnage @ AMANDE (IRSN/Cadarache)



Spectromètre 0.5g 6LiF
(juillet 2009)



Détection de pics neutrons dans un bolomètre en ^6LiF ...

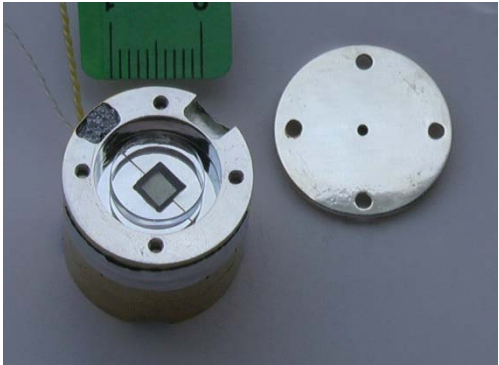


...avec un léger décalage systématique,

E_{n_AMANDE}	$\Delta E = E_{n_AMANDE} - E_{n_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 $[\pm 7,5]$

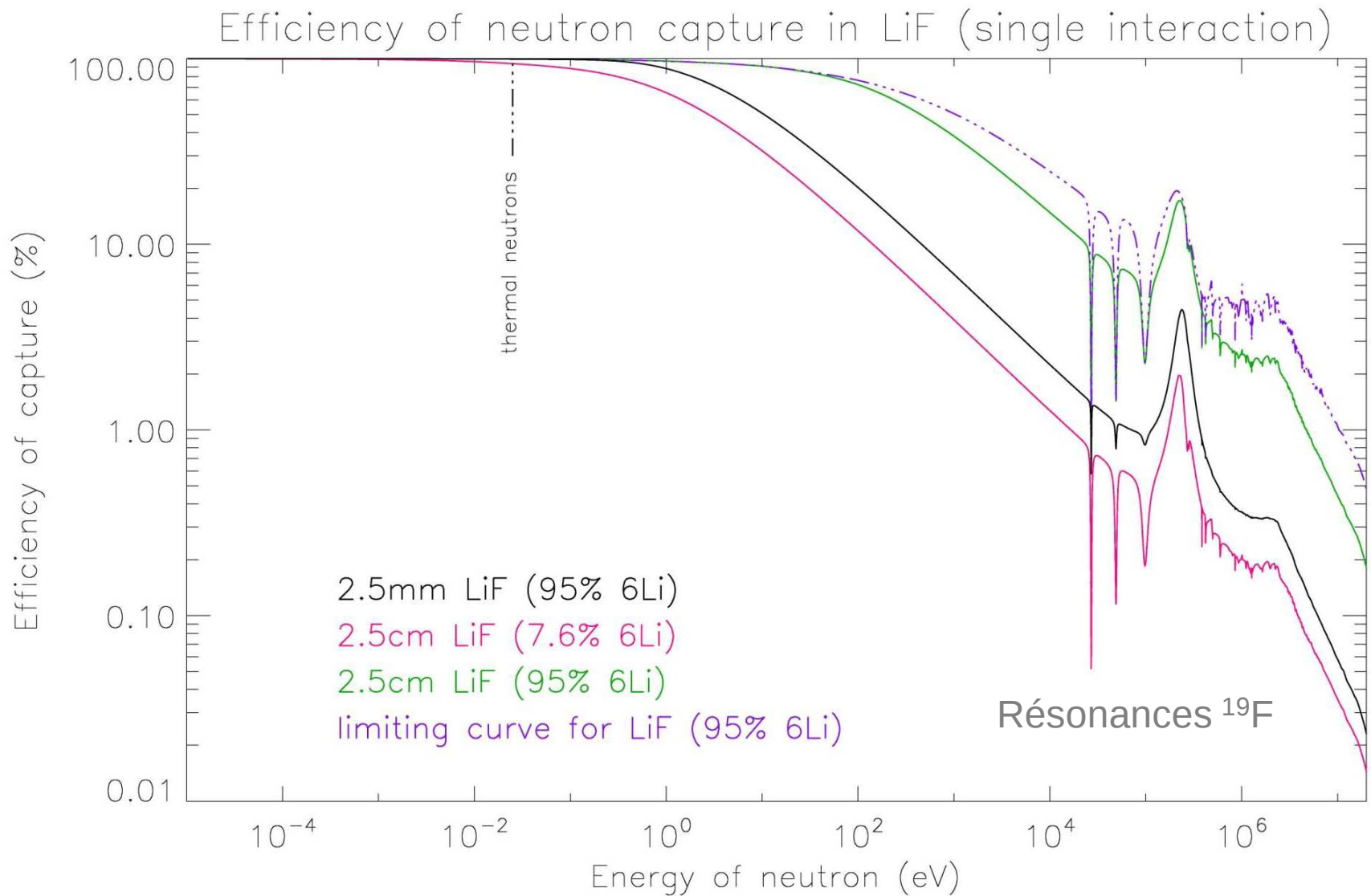
et une bonne résolution en énergie.

0.5g ^6LiF

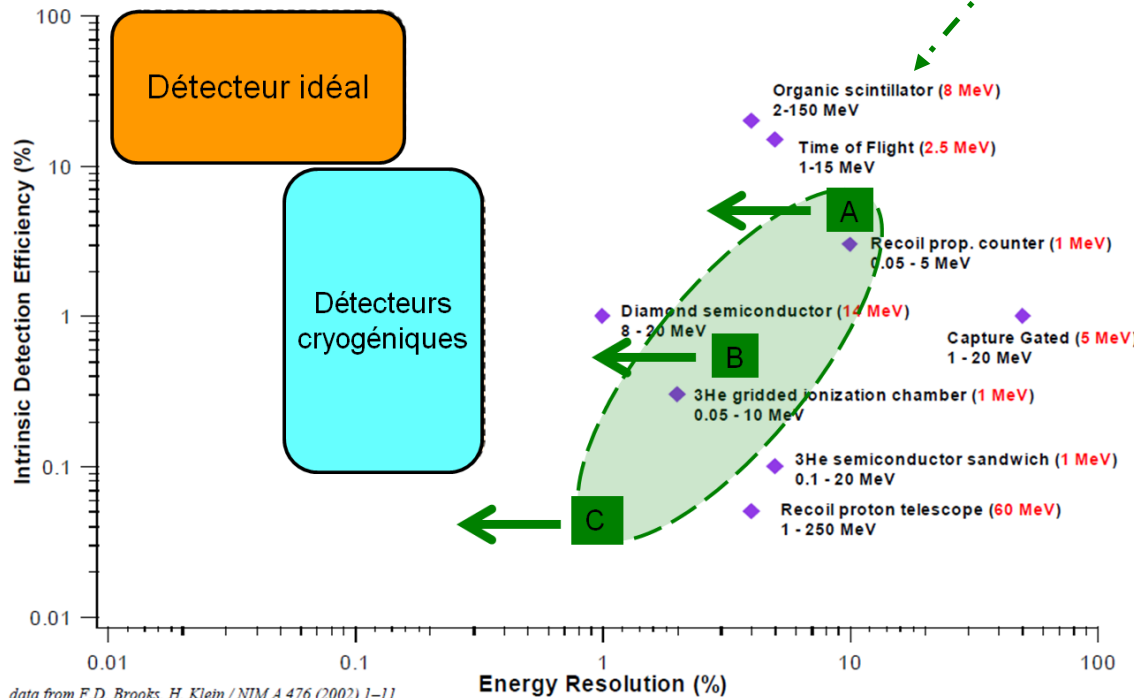


Energie	Résolution en énergie	$\Delta E/E$
Ligne de base	24,7 keV $[\pm 0,5]$	-
Ref $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	28,7 keV $[\pm 0,5]$	-
241,5 keV	42,6 keV $[\pm 2]$	0,17
Ligne Alpha	58,3 keV $[\pm 3]$	-
1200 keV	72,8 keV $[\pm 4]$	0,06
4,316 MeV	103,6 keV $[\pm 6]$	0,024
17 MeV	150,3 keV $[\pm 14]$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

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



Détecteurs cryogéniques & spectroscopie des neutrons rapides



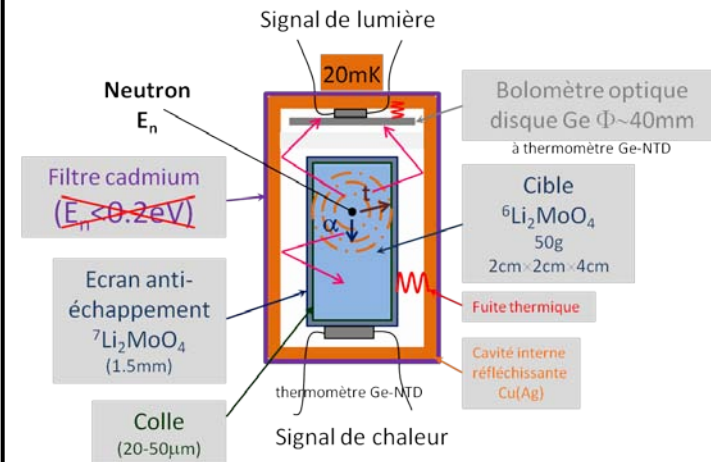
d'après T. NiederMayr @ LTD10, 2003

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

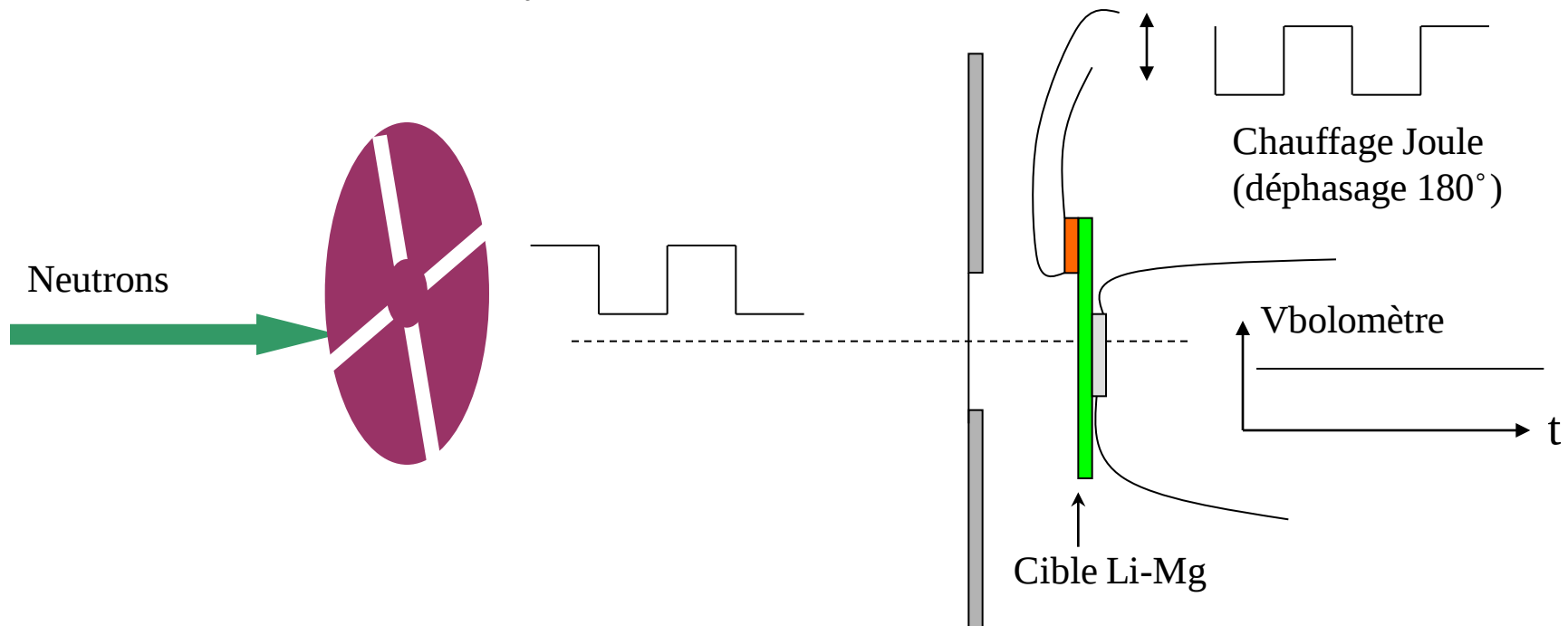
□ sur faisceaux

Bolomètres fonctionnant en mode ESR: « Electronic Substitution Radiometry »

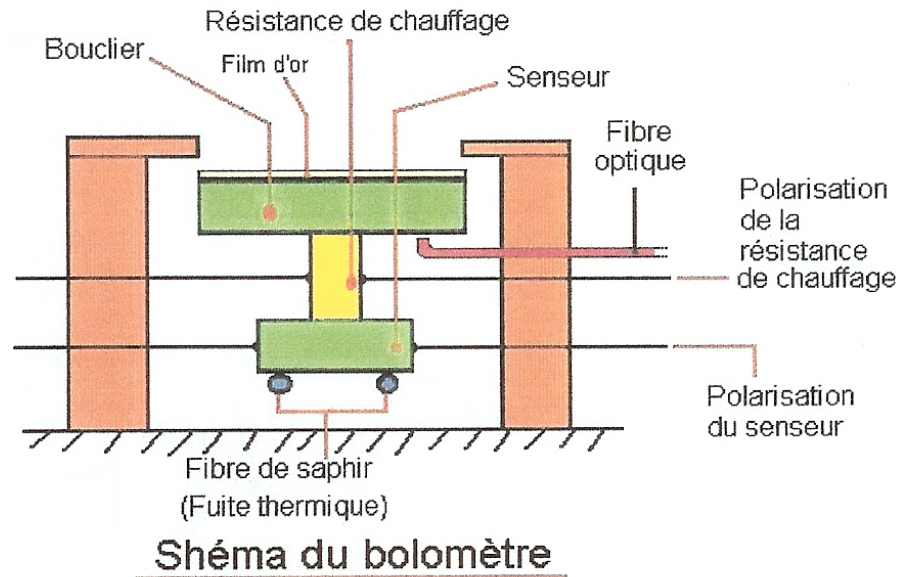
L'énergie du paquet de particules absorbé au niveau du bolomètre est déduite de l'énergie injectée par effet Joule (dans une résistance couplée au bolomètre) produisant la même élévation de température...

✓ **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**



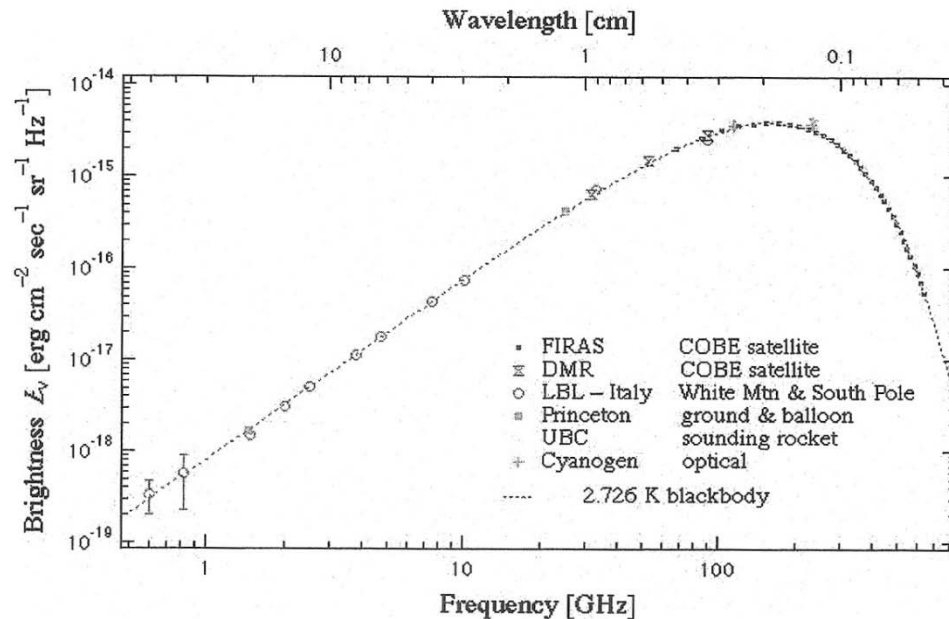
Bolomètre Ge @ 300mK

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

Applications en Physique Fondamentale

□ 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

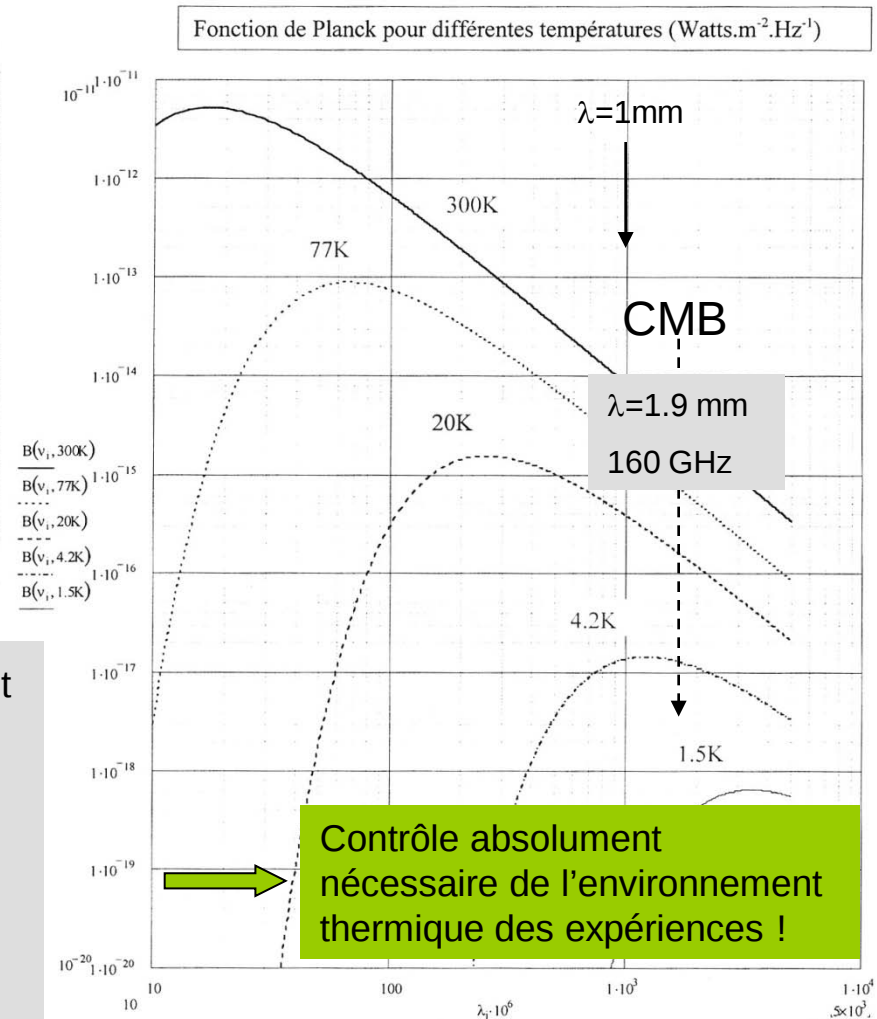
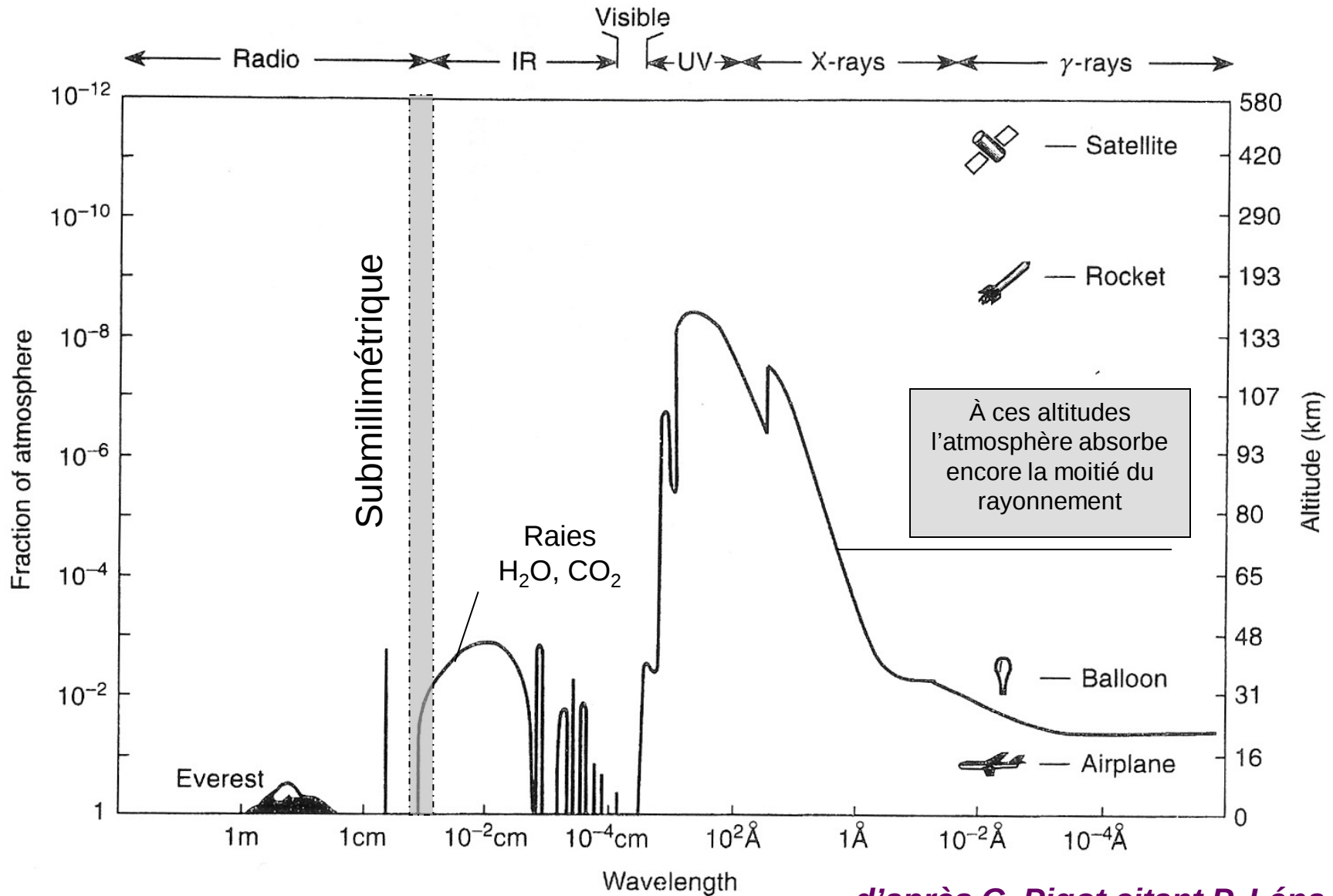


Figure 1 : Graphe de la fonction de Planck (corps noir) – Angle solide = 1St

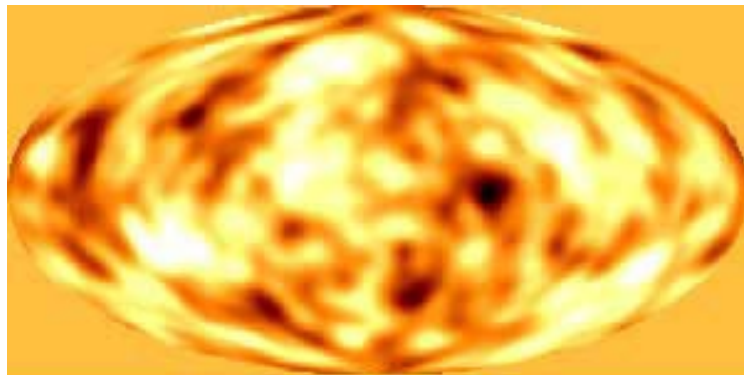
d'après Bruno Mafféi et Jacques Delabrouille (Ecoles d'automne)

CMB: l'appel de l'espace



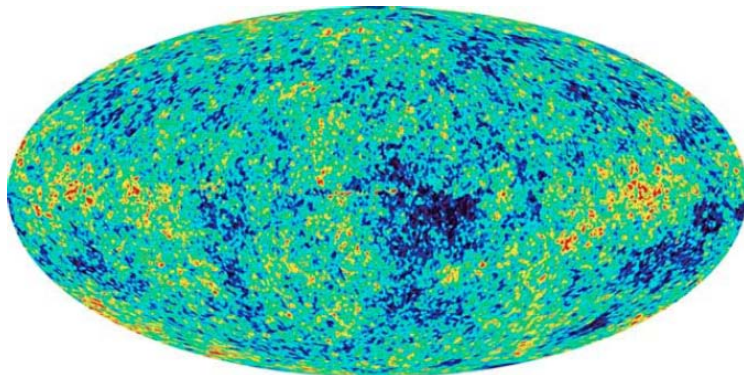
d'après C. Pigot citant P. Léna

Cartes des anisotropies du CMB



COBE (1989)

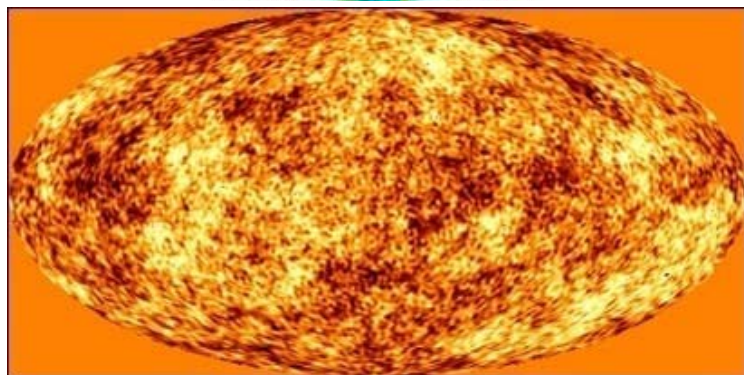
7°



WMAP (2001)

12'

Avènement de la
cosmologie de
précision...



Planck (2009)

5'

Planck-LFI

Planck-HFI

simulation

Détecteurs

radiomètres

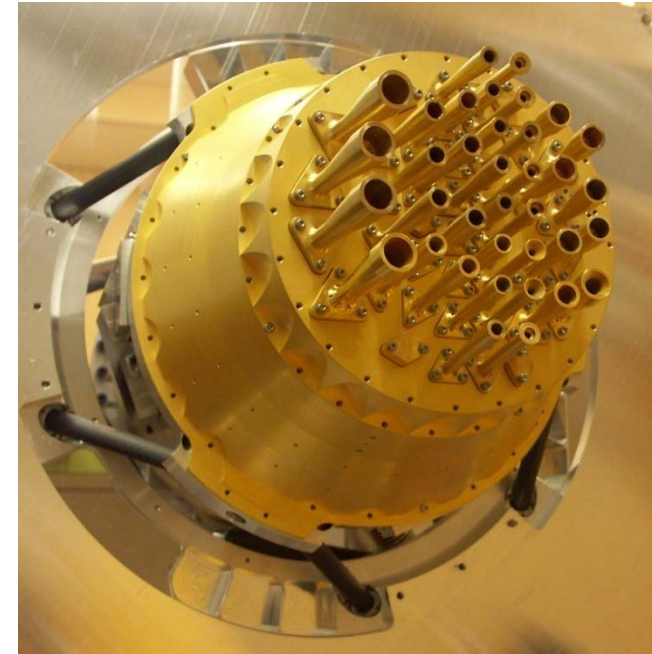
bolomètres

✓ Performances des détecteurs de Planck-HFI

- Sensibilité dominée par le bruit de photon du CMB
- 1000 fois plus sensible que COBE
- **20 à 30 fois plus sensible que WMAP**
- **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)

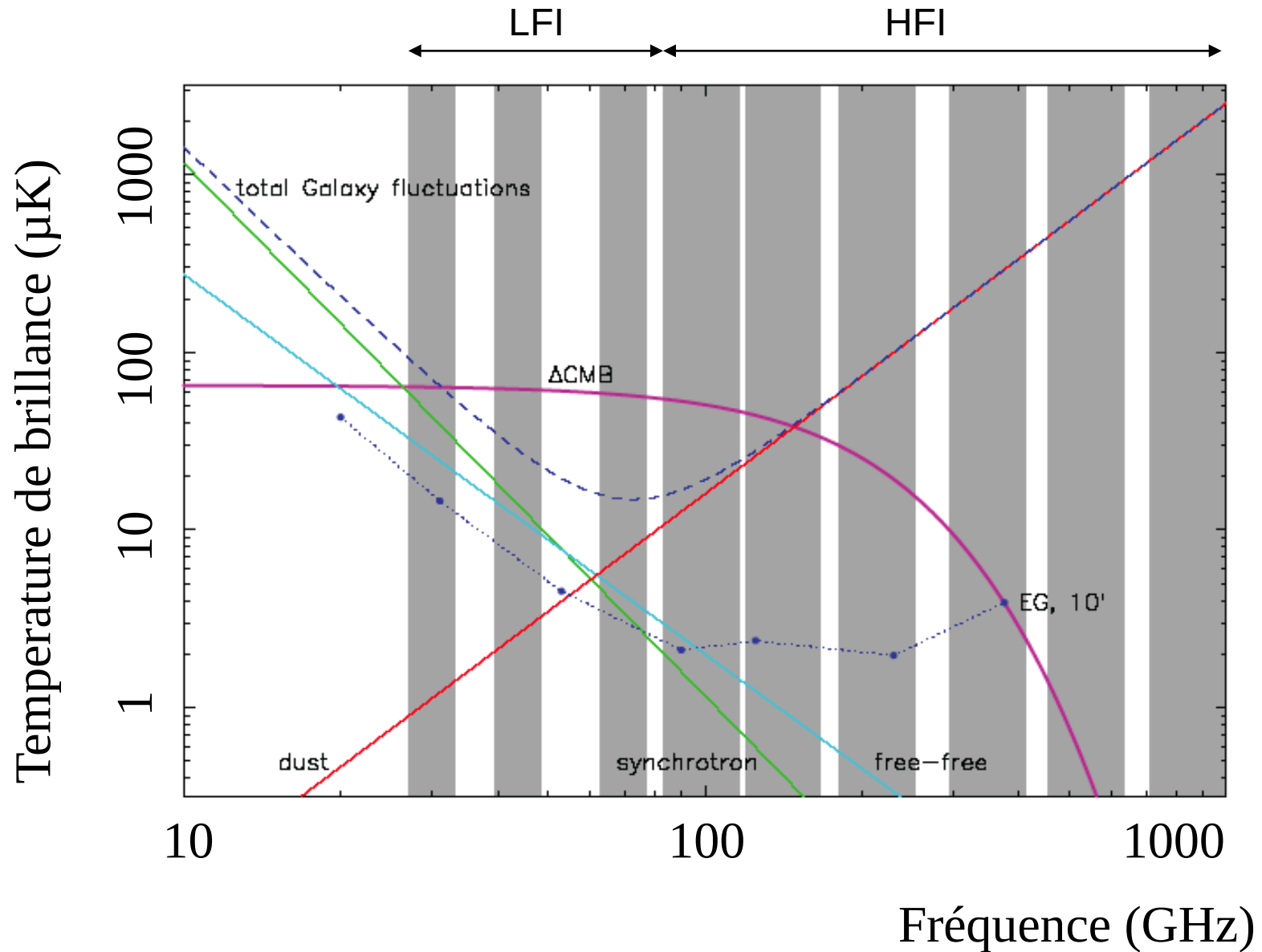
Caltech, CITA (Ca), CESR, CRTBT, CdF-APC, CEA, DSRI (DK),
LPAC(UK), IAOP, LAOG, IoA (UK), JPL(USA), LAL, MPI(D), MRAO(UK),
NUI(IR), Cardiff Univ. (UK), RAL(UK), ESA-SSDE(NL), Univ. Genève(CH),
Univ. Grenada(E), Univ. LaSapienza(It)

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

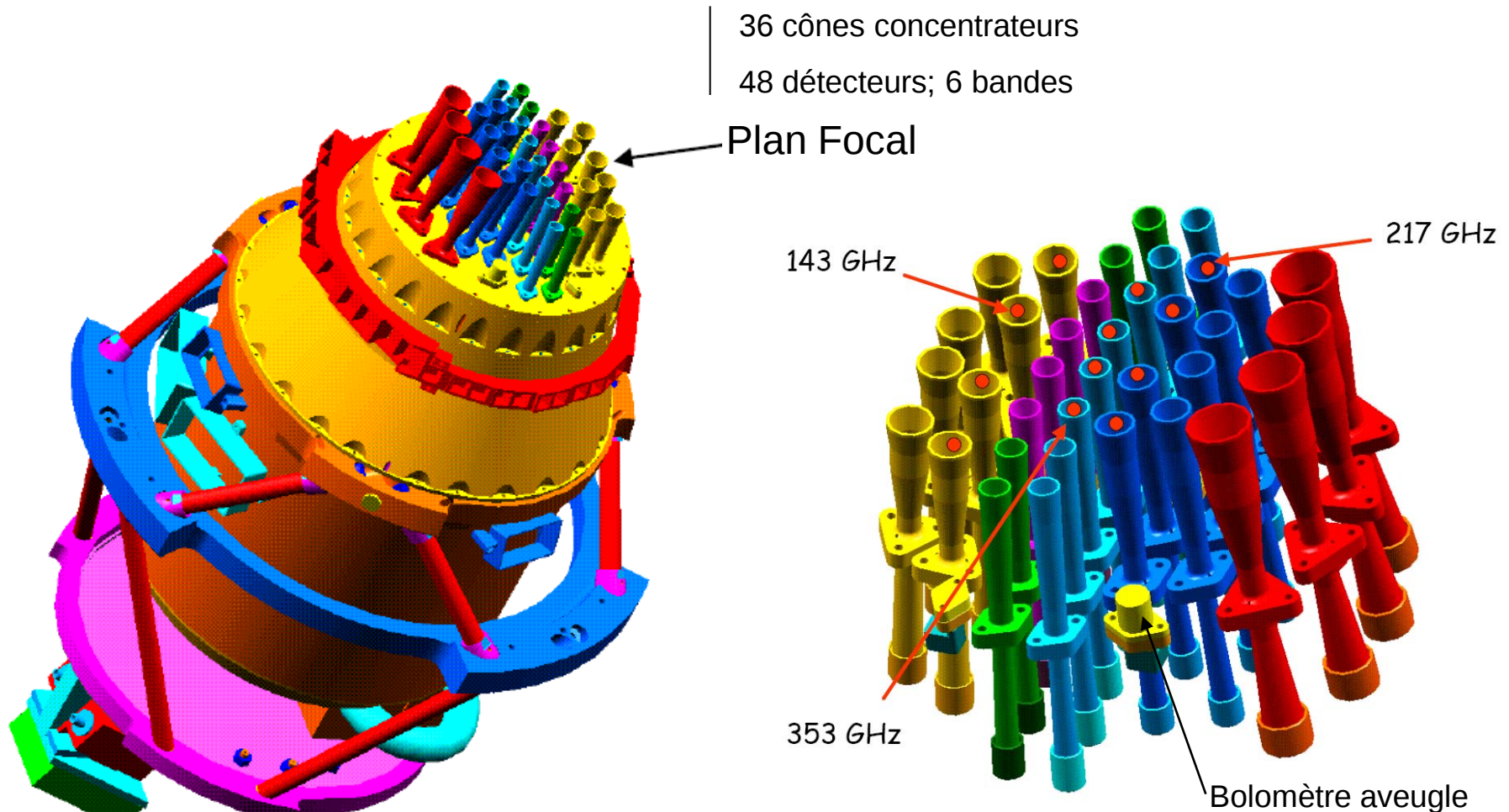
SUMMARY OF PLANCK INSTRUMENT CHARACTERISTICS

INSTRUMENT CHARACTERISTIC	LFI			HFI					
Detector Technology	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) ^a	2.0	2.7	4.7	2.5	2.2	4.8	14.7	147	6700
$\Delta T/T$ per pixel (Stokes Q & U) ^a	2.8	3.9	6.7	4.0	4.2	9.8	29.8	...	...
^a Goal (in $\mu\text{K/K}$) for 14 months integration, 1σ , 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



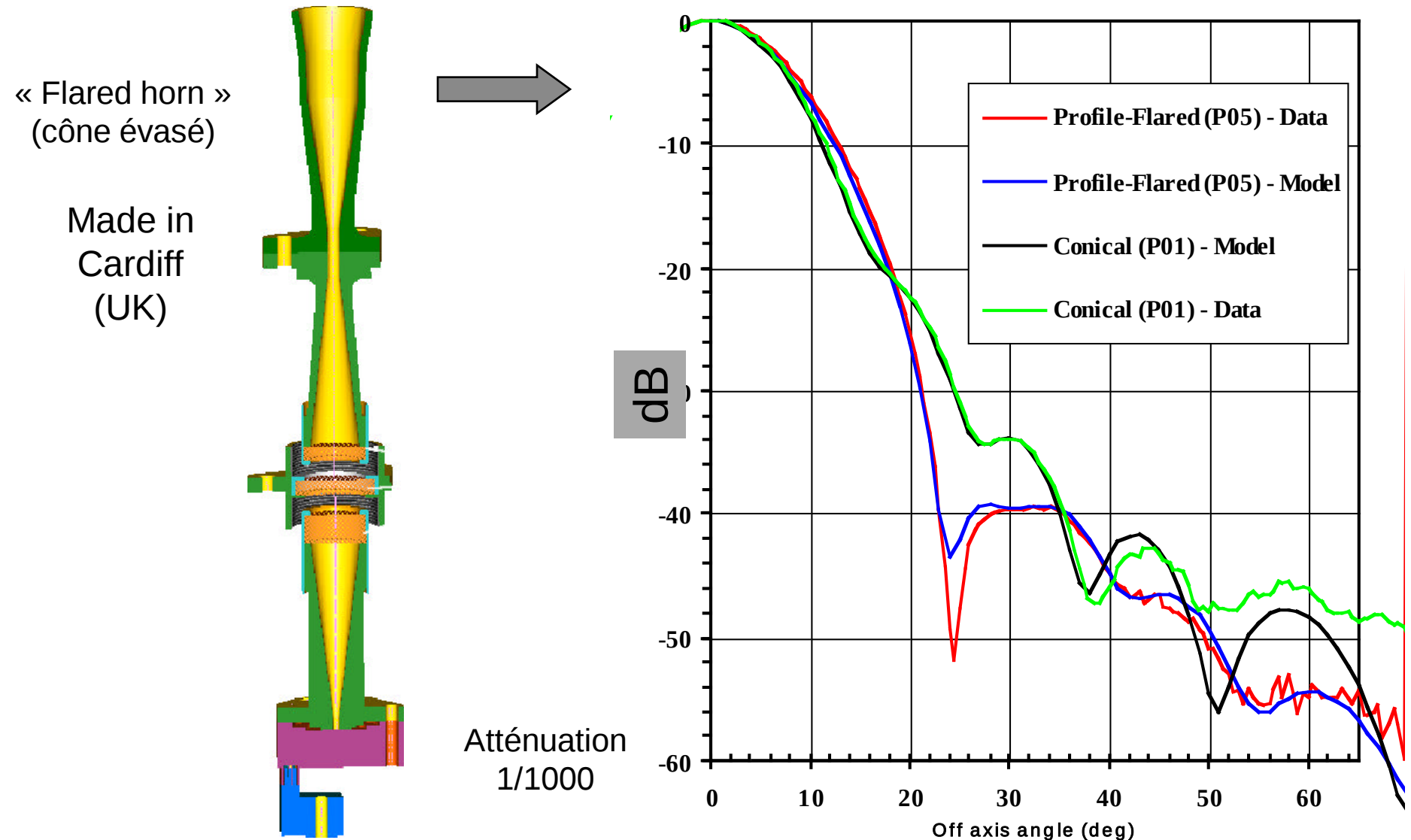
L'instrument Planck-HFI



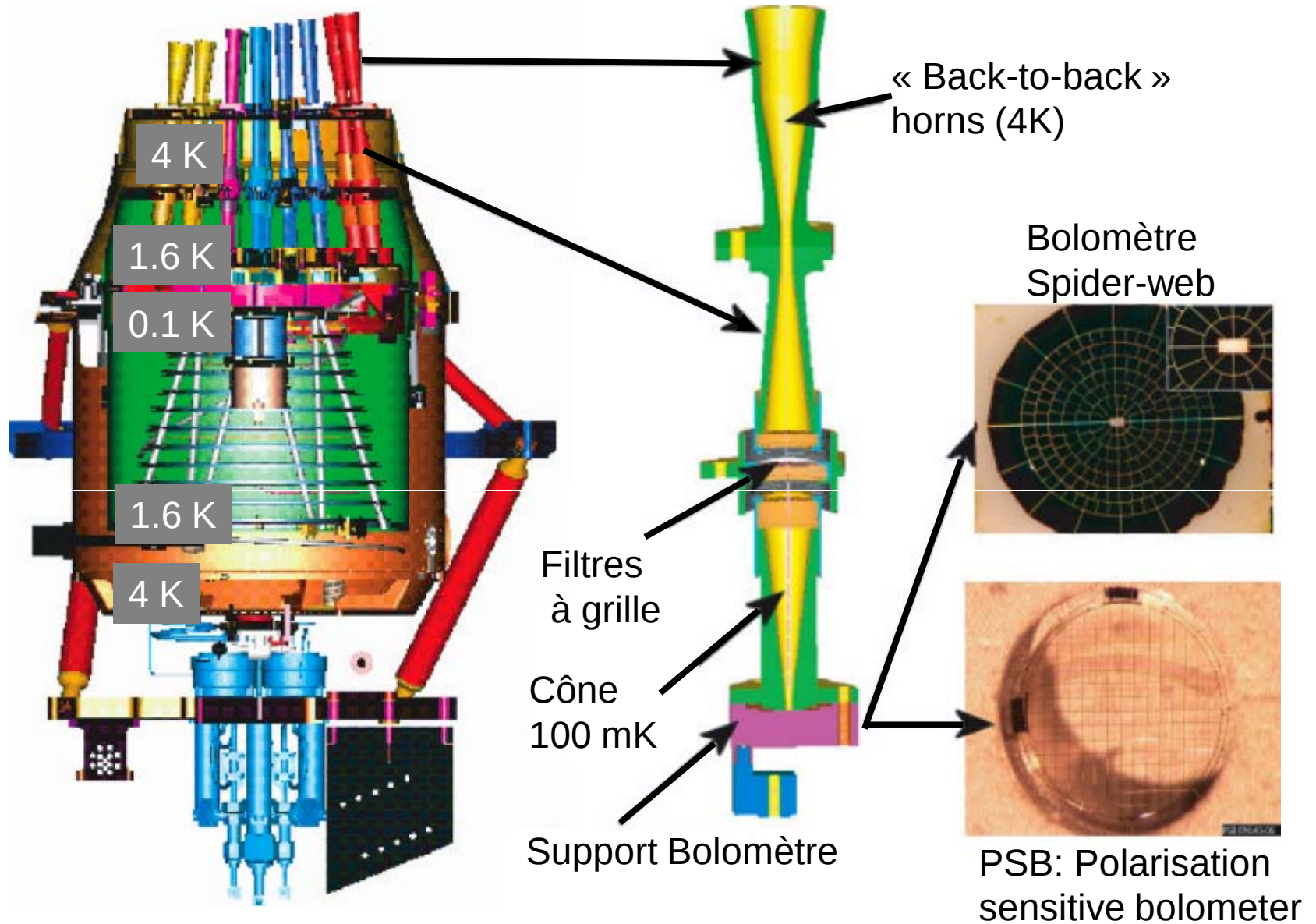
Canaux sensibles à la polarisation
(12 « PSB »)

d'après Jacques Delabrouille (Moriond 2002)

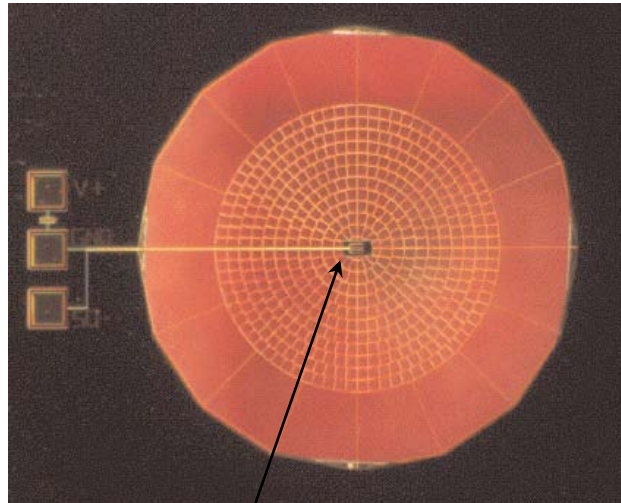
Couplage optique et définition angulaire



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	Ω	6.31%
Δ	50.388	K	0.75%
G (400 mK)	9.1×10^{-10}	W/K	3.83%
C (400 mK)	1.8×10^{-11}	J/K	11.1%
τ (400 mK)	15.5	ms	14.1%
Voltage Noise	6×10^{-9}	V/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Responsivity (0 Hz)	7.2×10^7	V/W	
NEP (0 Hz)	8.5×10^{-17}	W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	

Table 3. Thermal Conductance and Web Properties

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

Conduction thermique de la toile

- Substrat: membrane Si_3N_4 (qq μm)
- 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 ²)	C_v Lattice (J/cc K ⁴)	Volume (cc)	C (400 mK) (J/K)
Thermistor				
Ge ^a	1.9×10^{-7}	3.0×10^{-6}	1.66×10^{-5}	4.52×10^{-12}
Pd ^b	1.2×10^{-3}	1.1×10^{-5}	2.6×10^{-9}	1.25×10^{-12}
Au ^b	7.3×10^{-5}	4.2×10^{-5}	5.2×10^{-8}	1.65×10^{-12}
Total				7.42×10^{-12}
Electrical Leads				
Cu ^b	9.7×10^{-5}	6.7×10^{-6}	8.75×10^{-8}	3.4×10^{-12}
NbTi ^b	superconducting	4.0×10^{-6}	1.71×10^{-6}	4.5×10^{-13}
In ^b	$1.15 \times 10^{-4}(n)$	9.58×10^{-5}	1.25×10^{-7}	7.7×10^{-13}
Pb ^b	$1.71 \times 10^{-4}(n)$	1.2×10^{-4}	2.5×10^{-8}	2.0×10^{-13}
Total				4.82×10^{-12}
Absorber				
Cr ^b	2.03×10^{-4}	1.19×10^{-6}	3.0×10^{-9}	2.4×10^{-13}
Au ^b	7.25×10^{-4}	4.23×10^{-5}	1.2×10^{-8}	3.0×10^{-13}
Si ₃ N ₄ ^c	*	*	2.5×10^{-7}	1.0×10^{-14}
Total				5.5×10^{-13}
Heat Capacity of Thermistor + Leads				1.3×10^{-11}

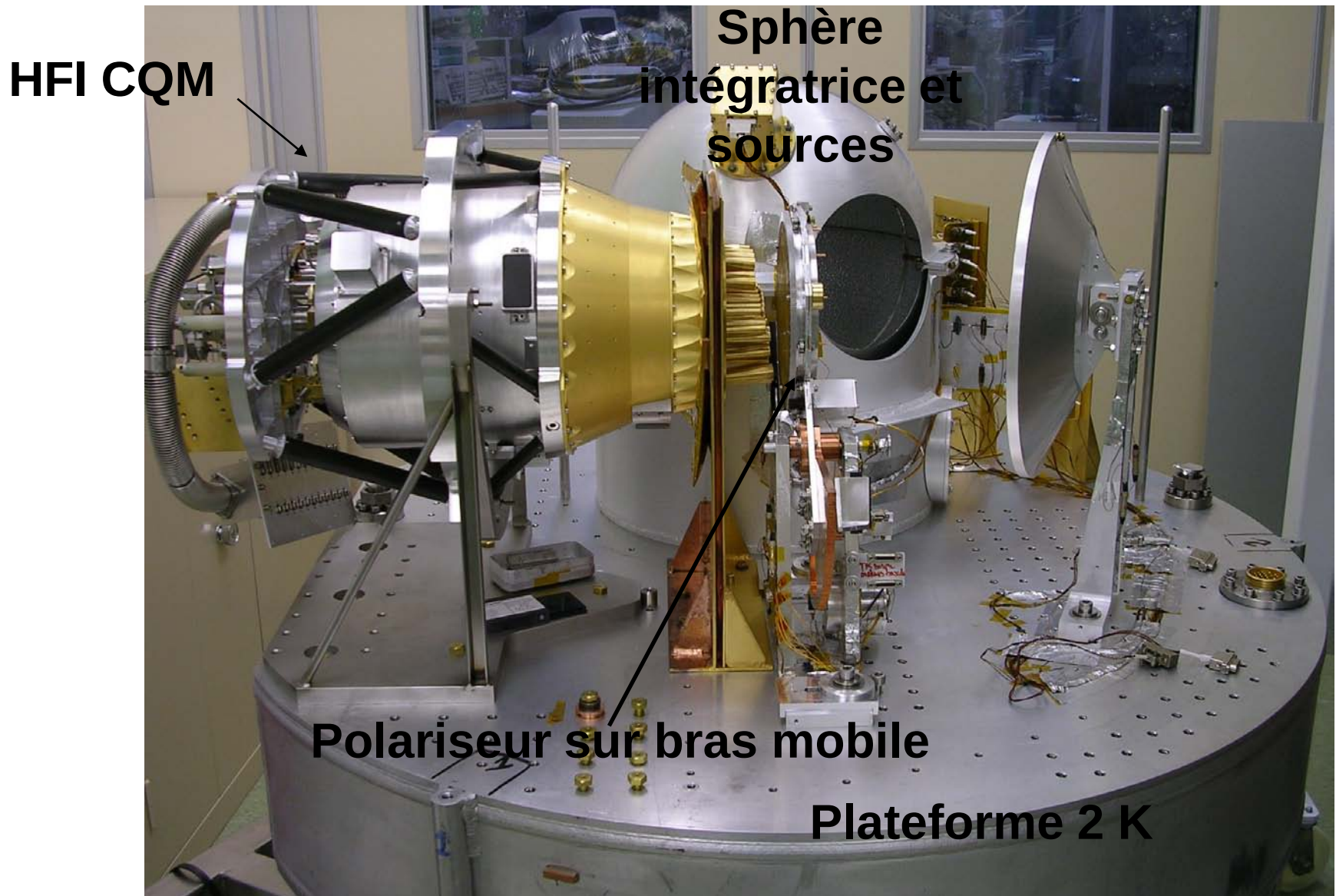
^aRef. 17 (Electronic heat capacity estimated assuming a doping density of $4.9 \times 10^{-16}/\text{cc}^2$).

^bRef. 18.

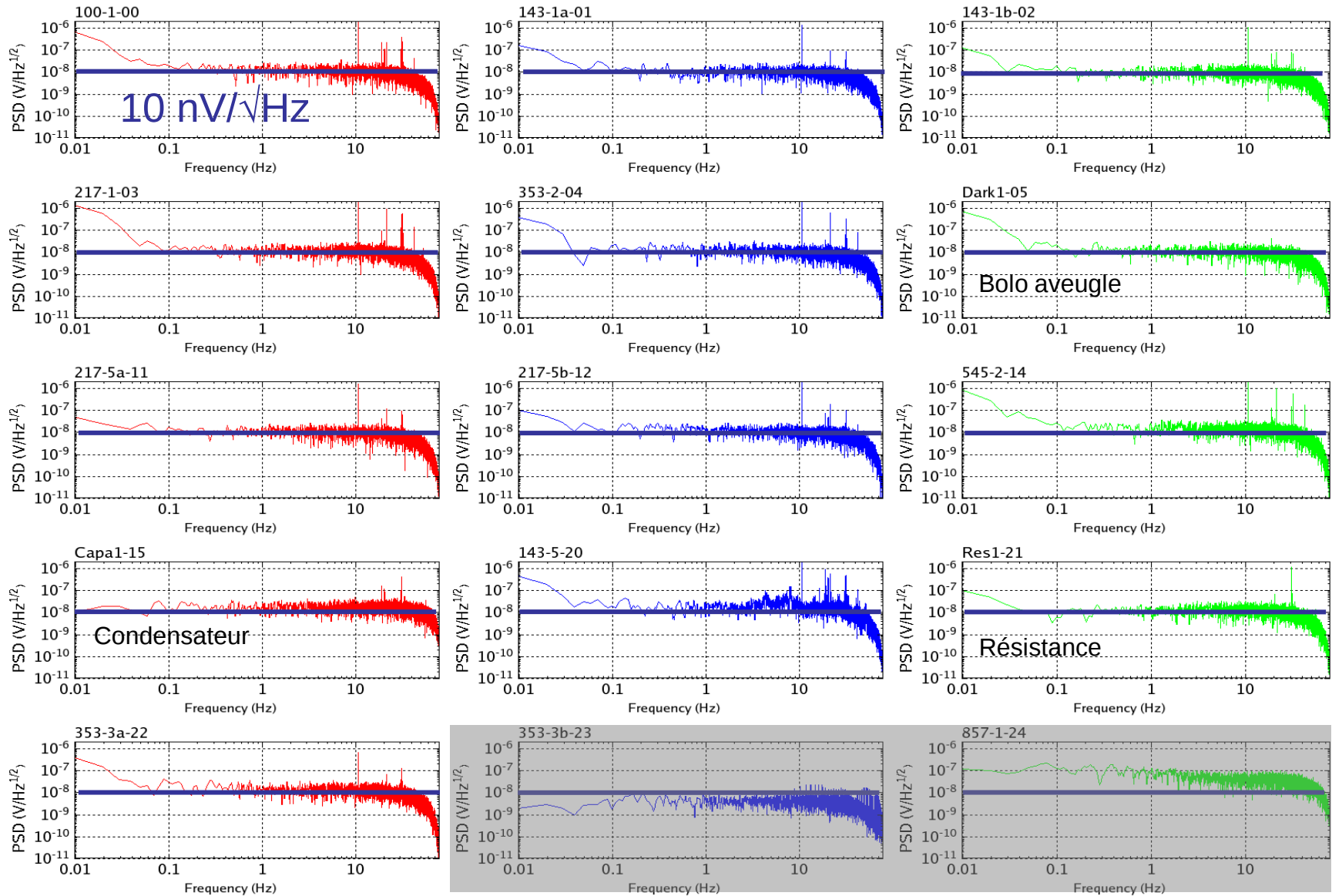
^cRef. 19.

in P.D. Mauskopf et al., 1997

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

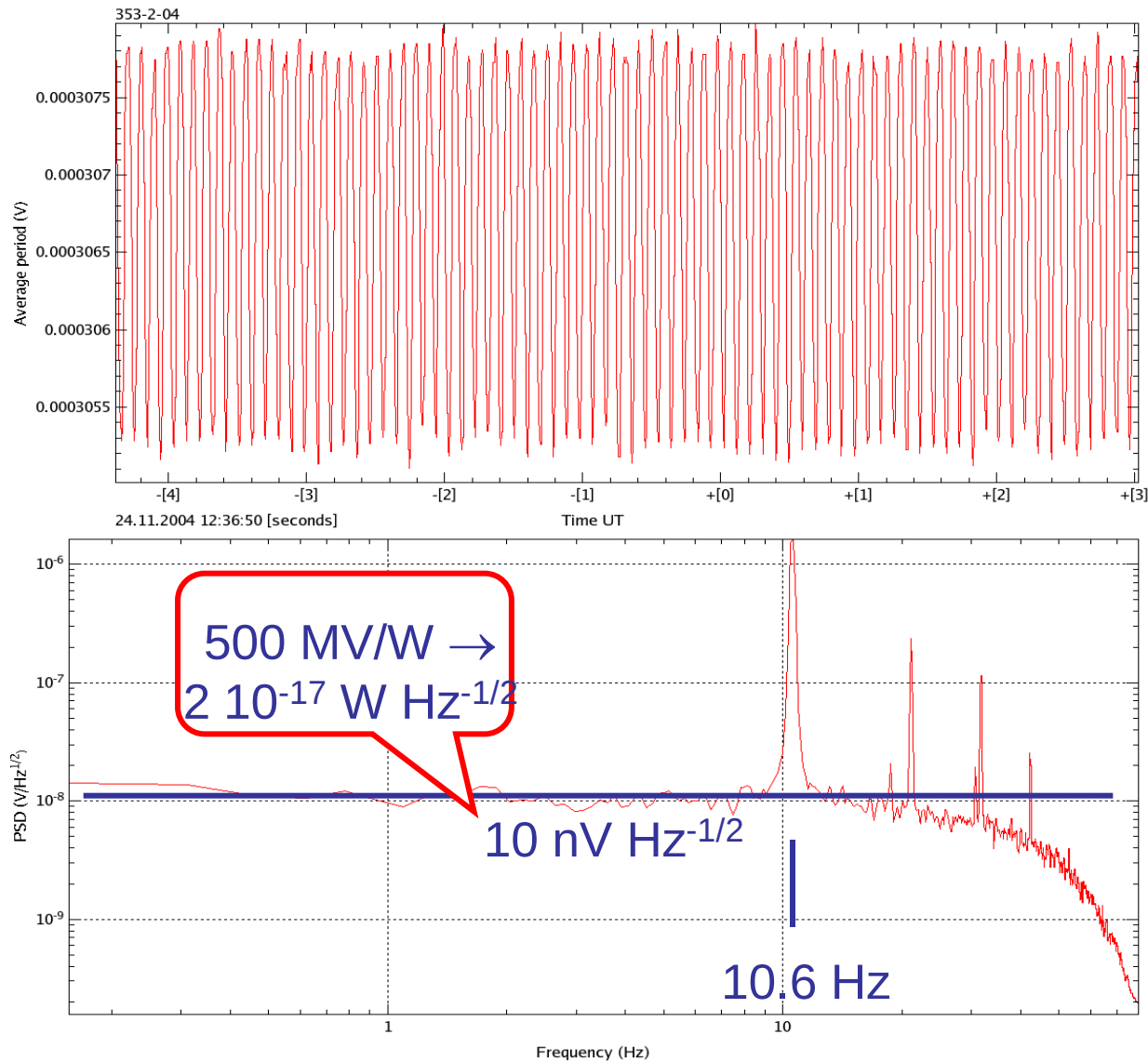


2. Mesures dans les six bandes du corps noir modulé @ 10Hz



Calibration Planck-HFI

Modèle CQM: un NEP dans les spécifications !

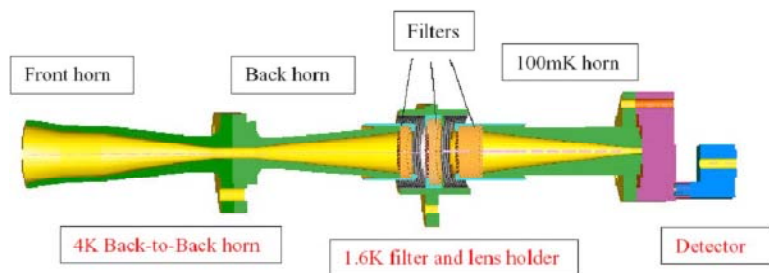


Source CS2 (corps noir
modulé par un diapason
à 10.6Hz),
vue par un bolomètre du
canal 353 GHz (≈7sec)

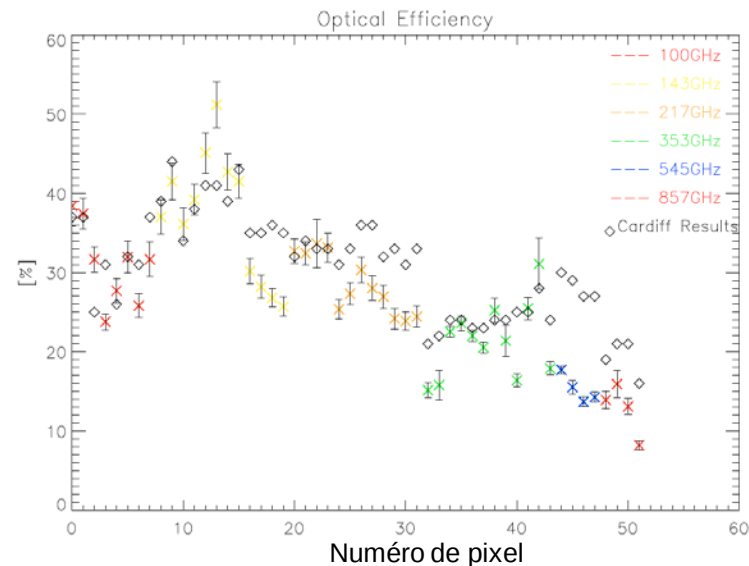
SPhase: 5
MPhase: 0
IBias: 0
VBias: 0
Transient: 4095

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

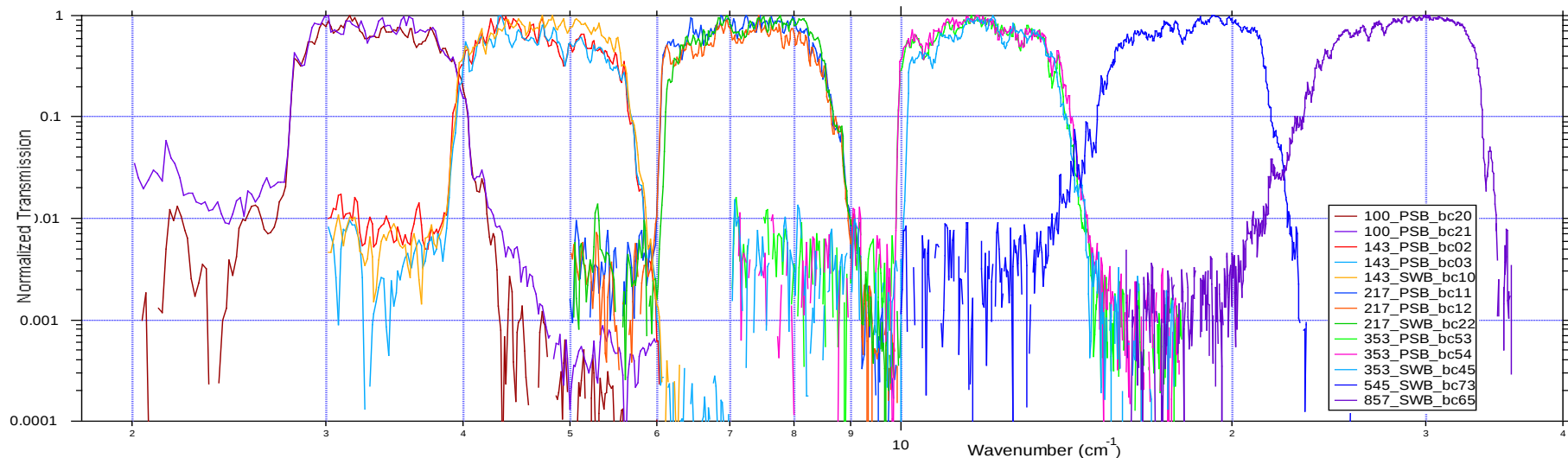
Chaîne optique



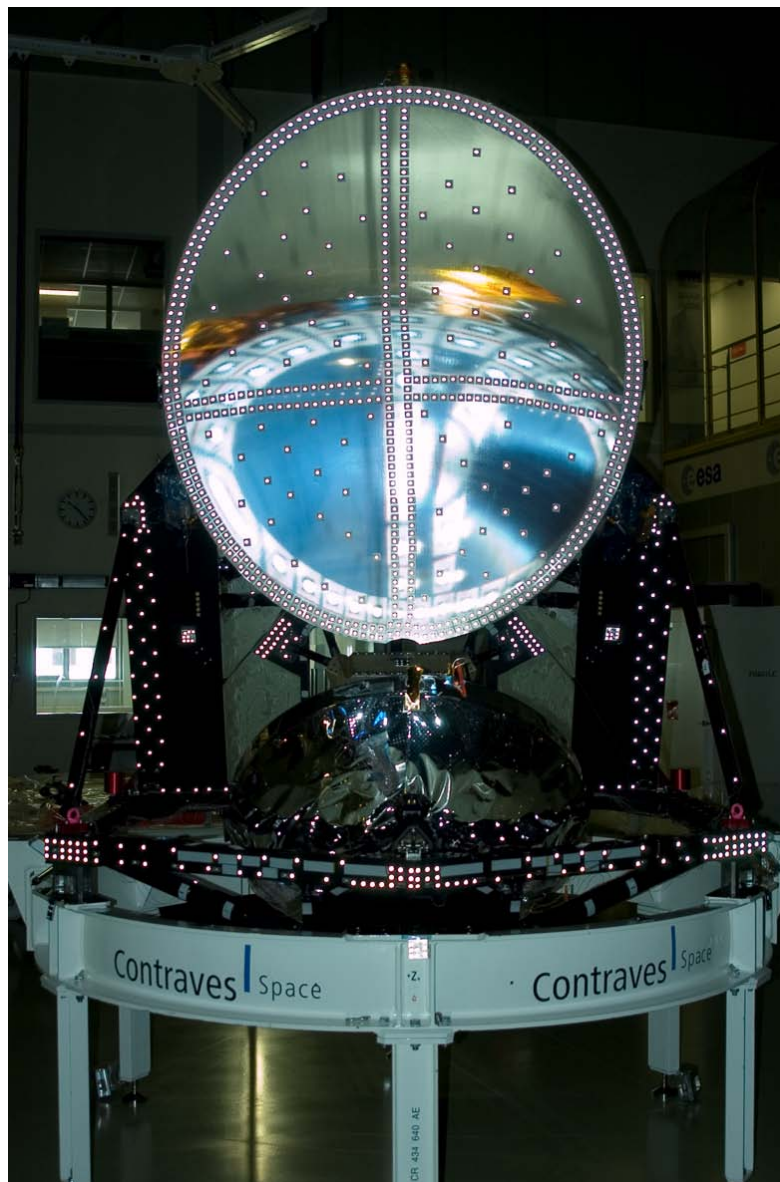
Efficacité optique



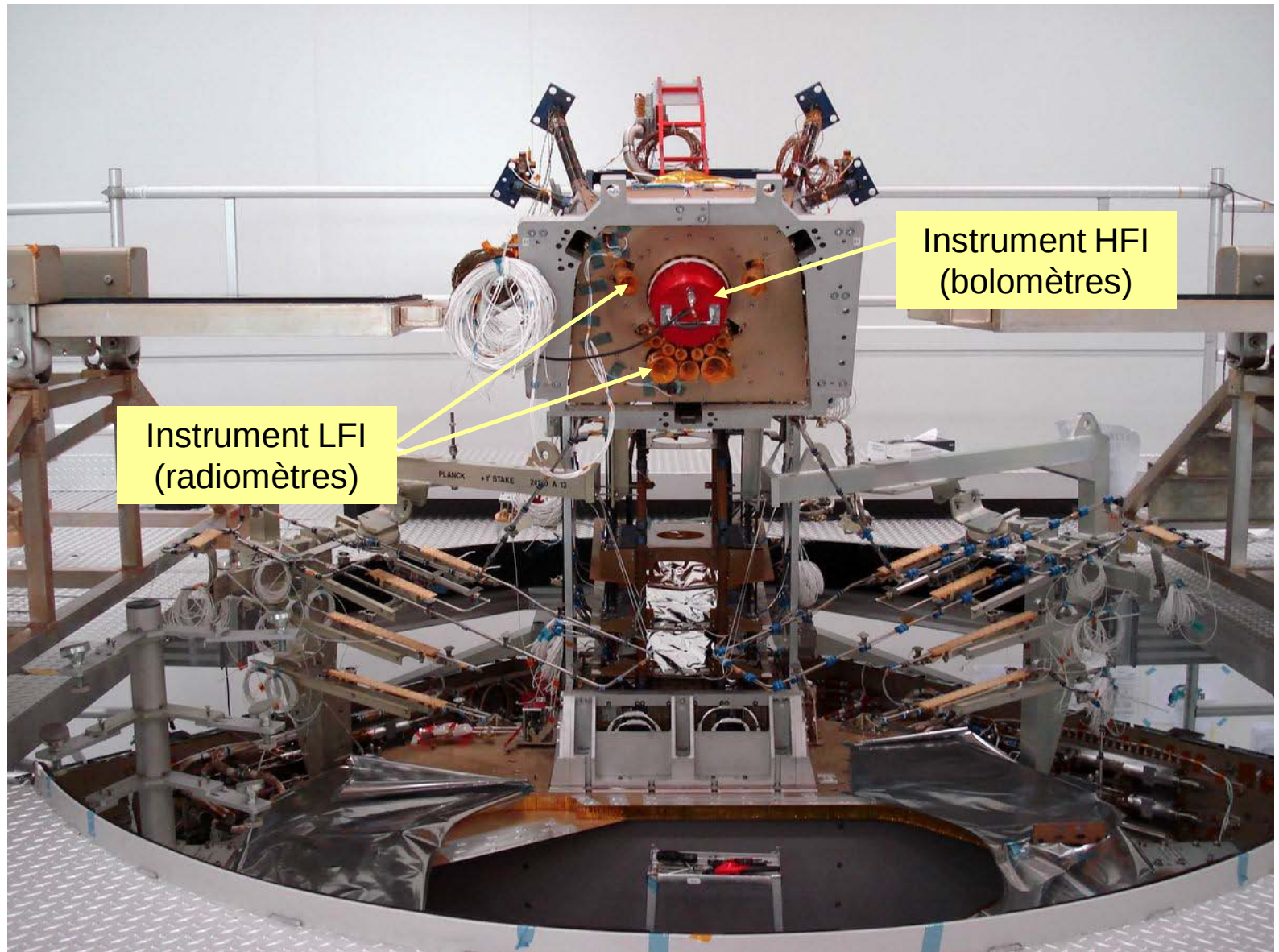
Transmission spectrale



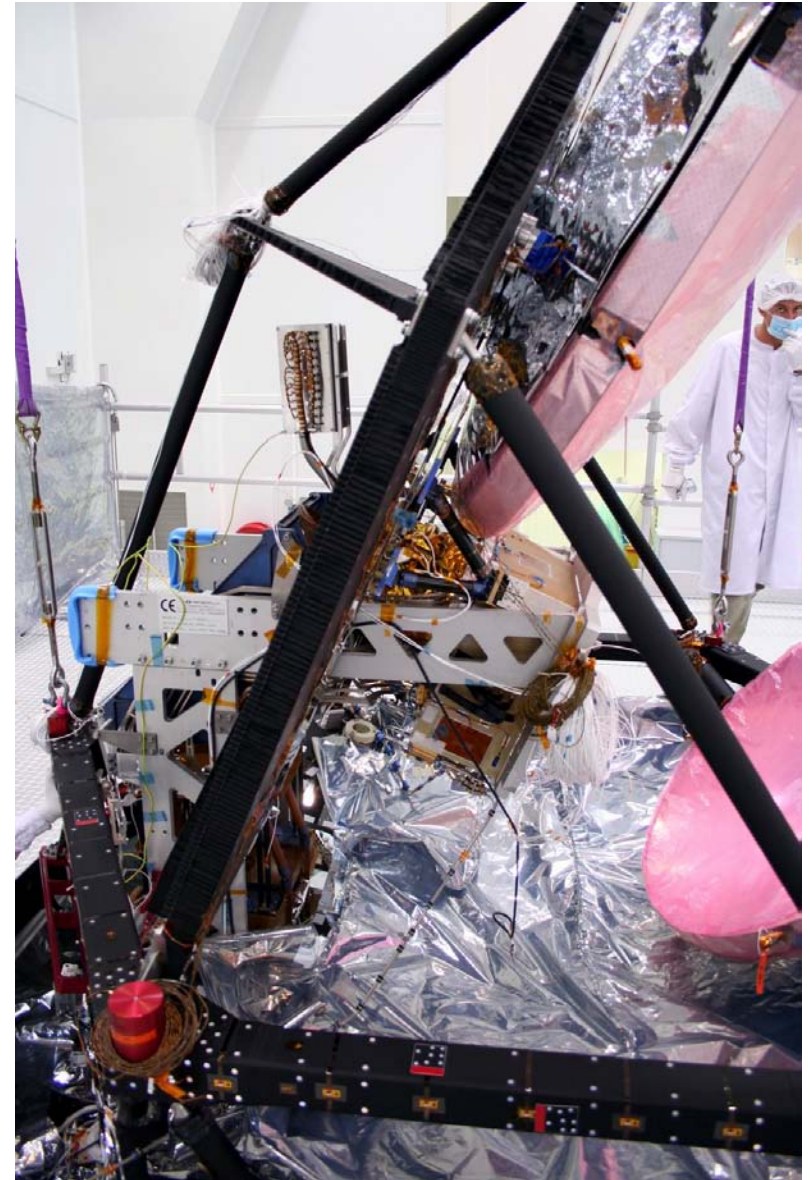
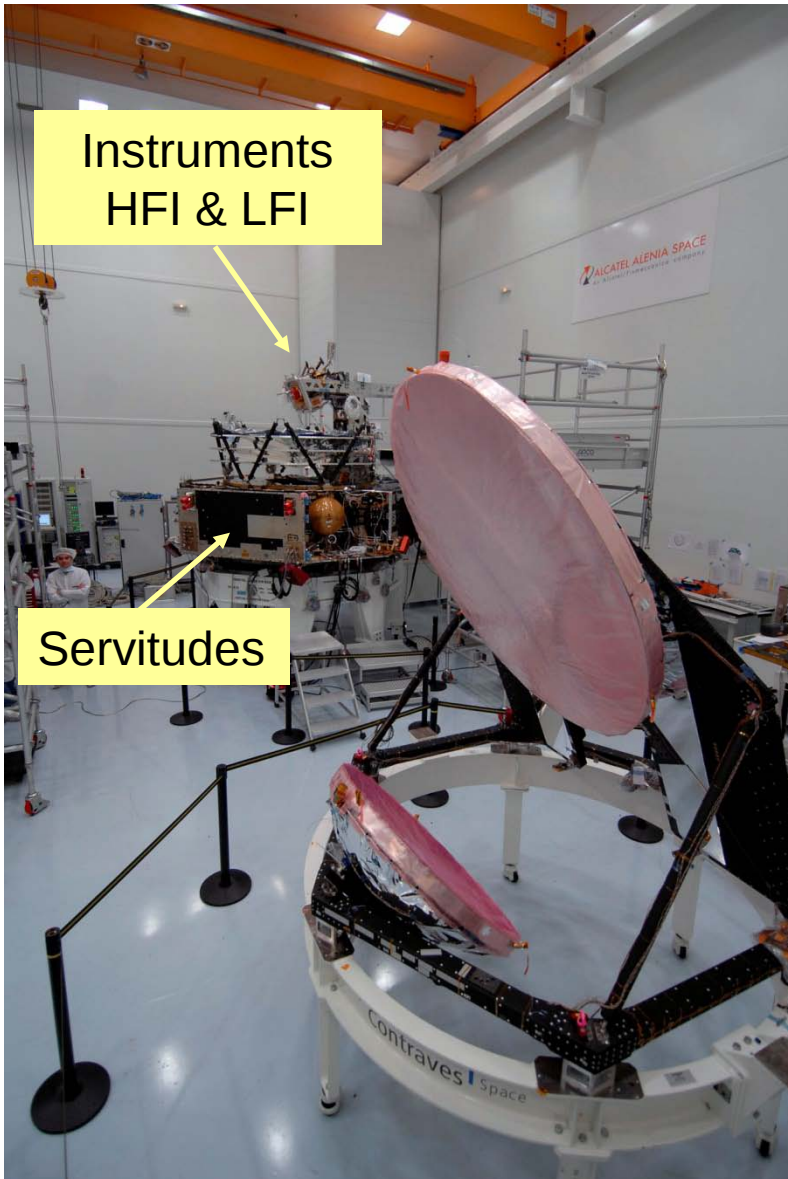
Planck-HFI: test des déformations du télescope à froid



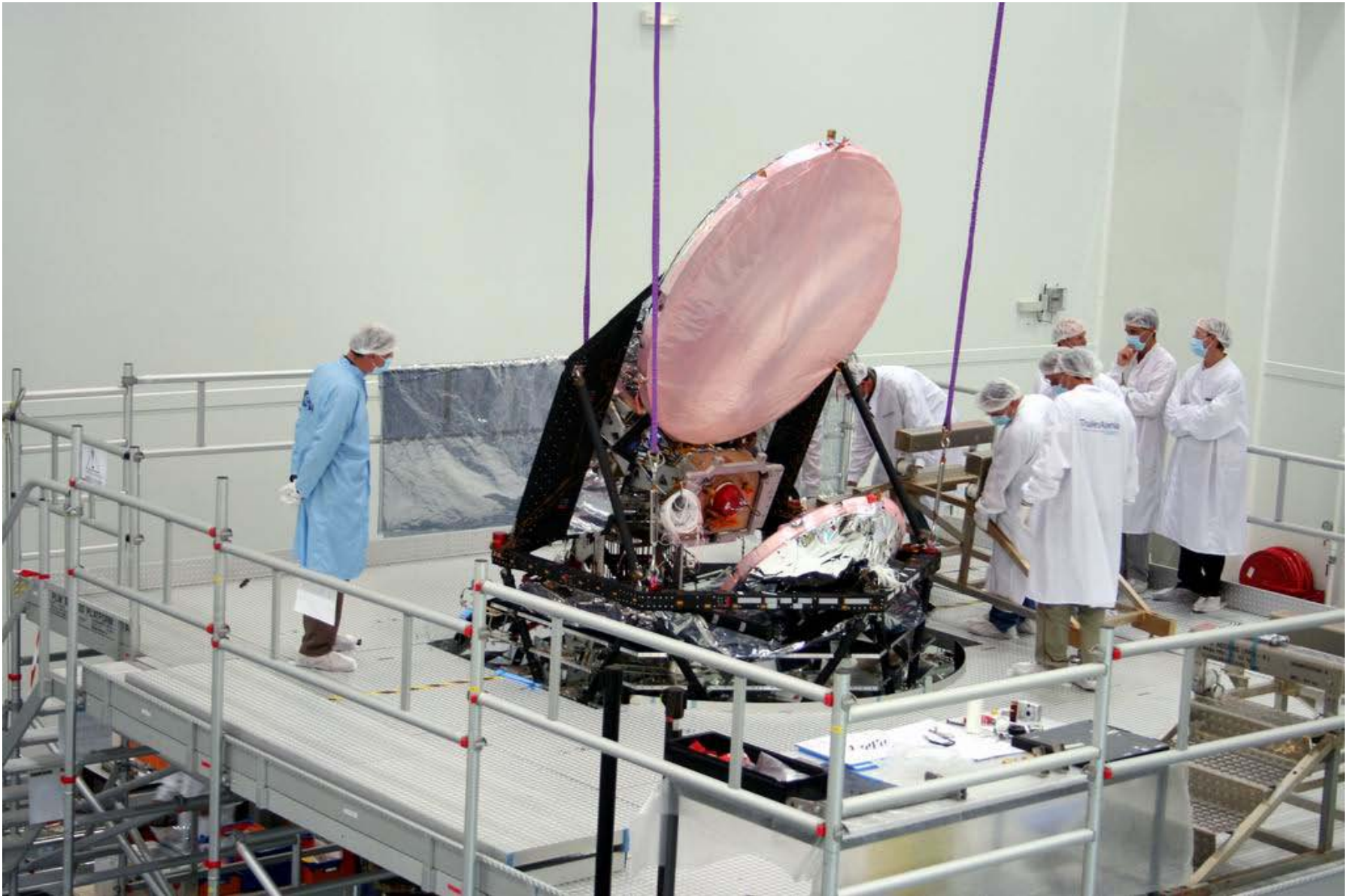
Intégration de Planck HFI, LFI et d'un refroidisseur à sorption



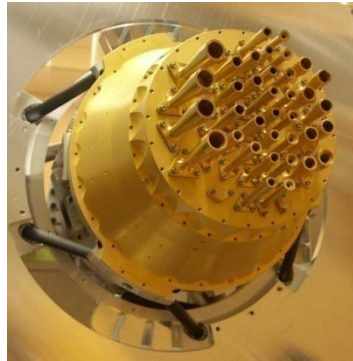
Intégration du télescope et des instruments



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



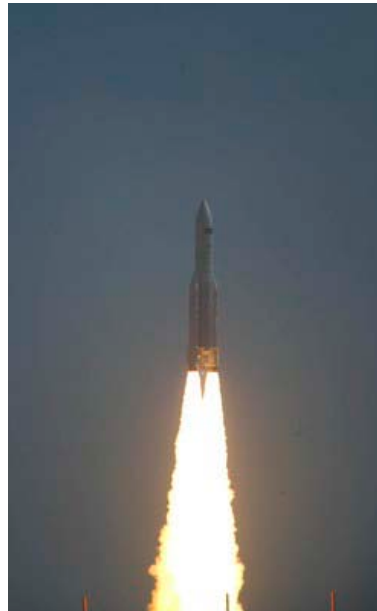
Planck-HFI: c'est parti !



Planck-HFI
(CQM)
@ 100mK

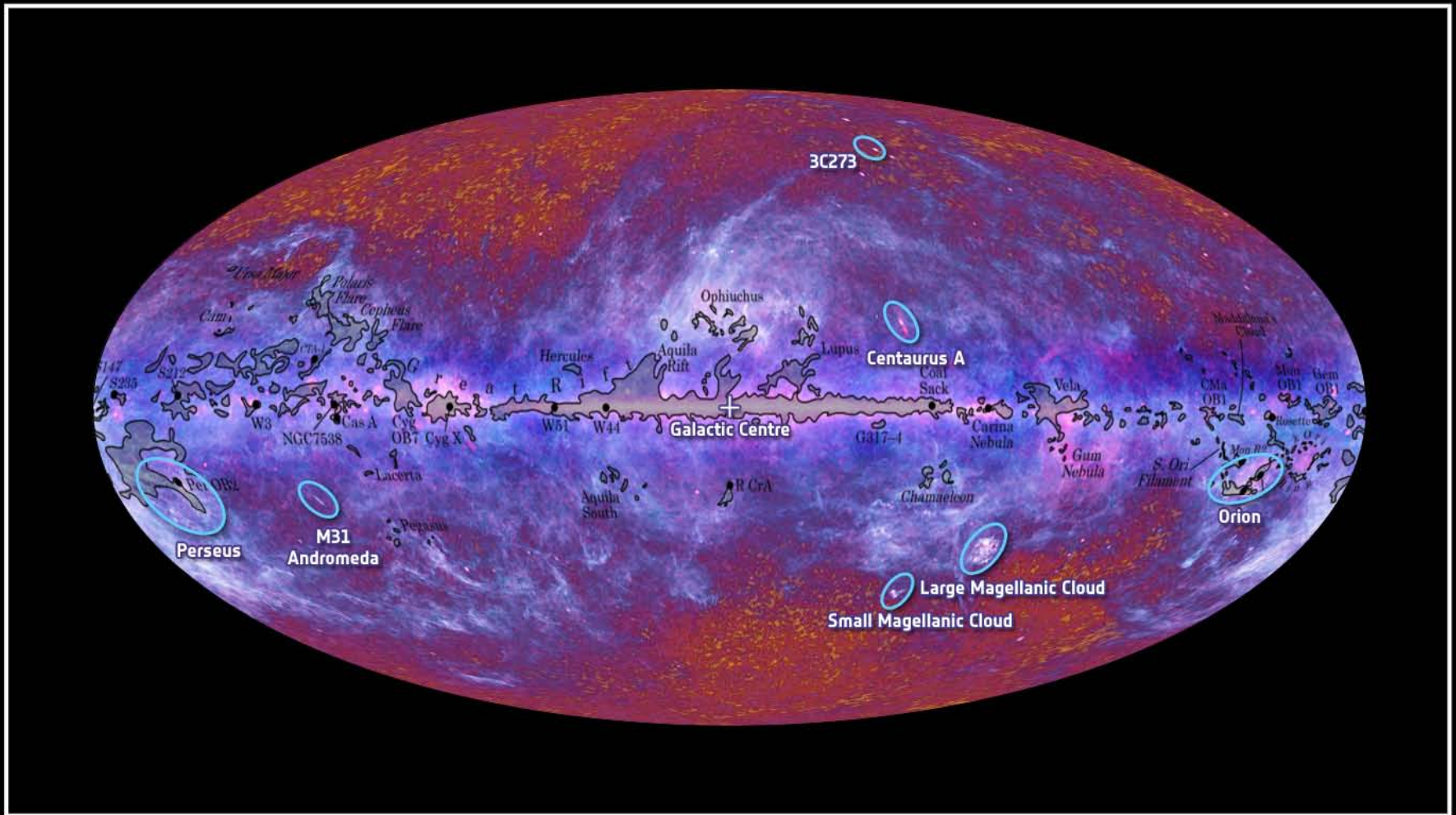


Kourou, le 14 Mai 2009



Herschel
@ 300mK

Planck-HFI/LFI: la plus ancienne carte (submm) de l'Univers



The Planck one-year all-sky survey

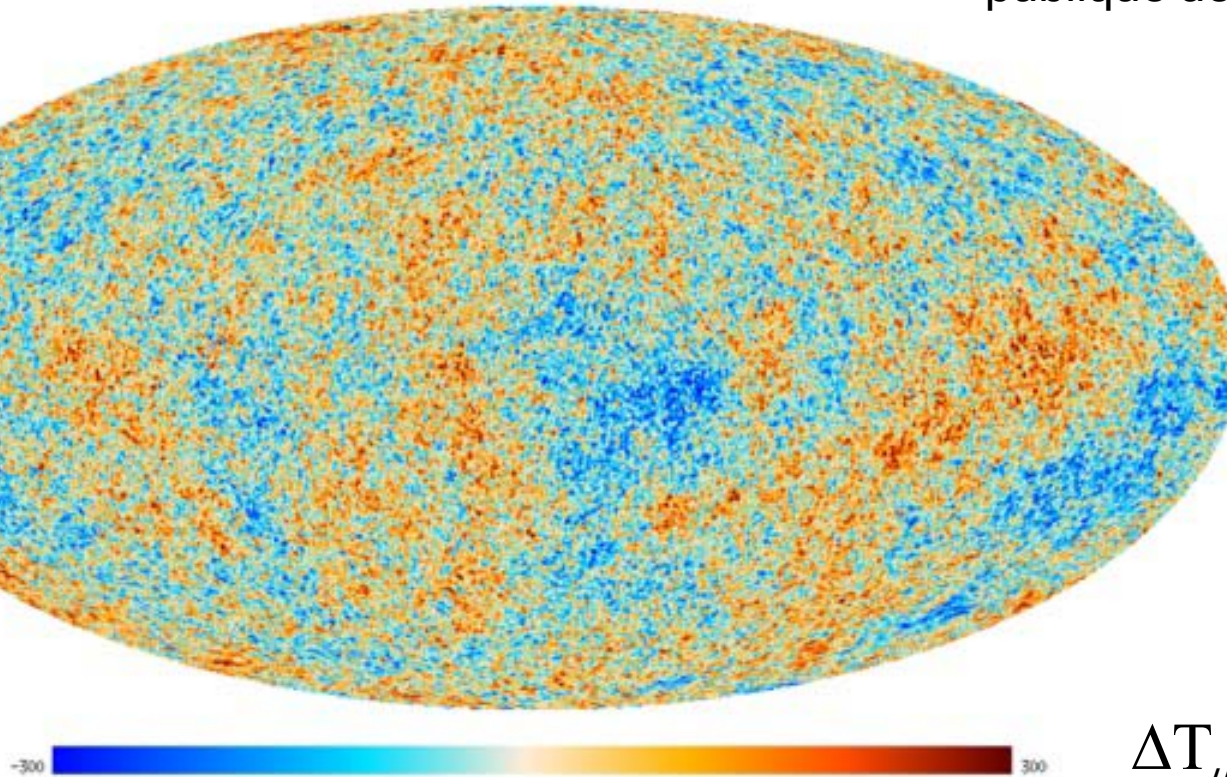


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

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

LE RAYONNEMENT FOSSILE par PLANCK

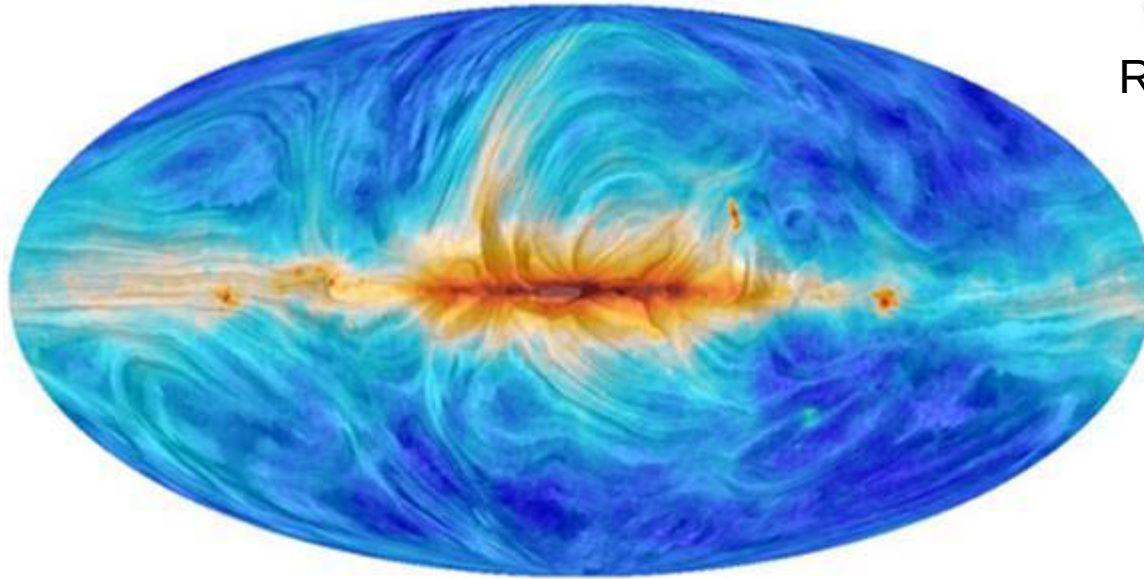
publique depuis le 21 Mars 2013



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

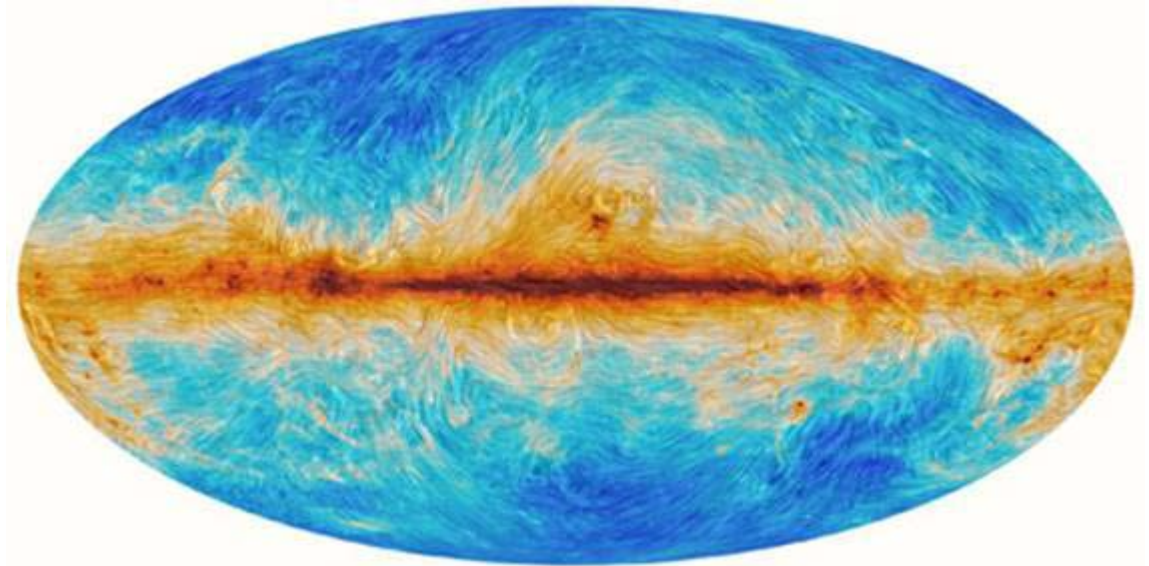
- ✓ une carte de référence pour des années de recherche en cosmologie !
- ✓ un succès de l'ESA...avec une forte contribution NASA ("mission enabling technology")

2014: la composante polarisée du CMB par Planck

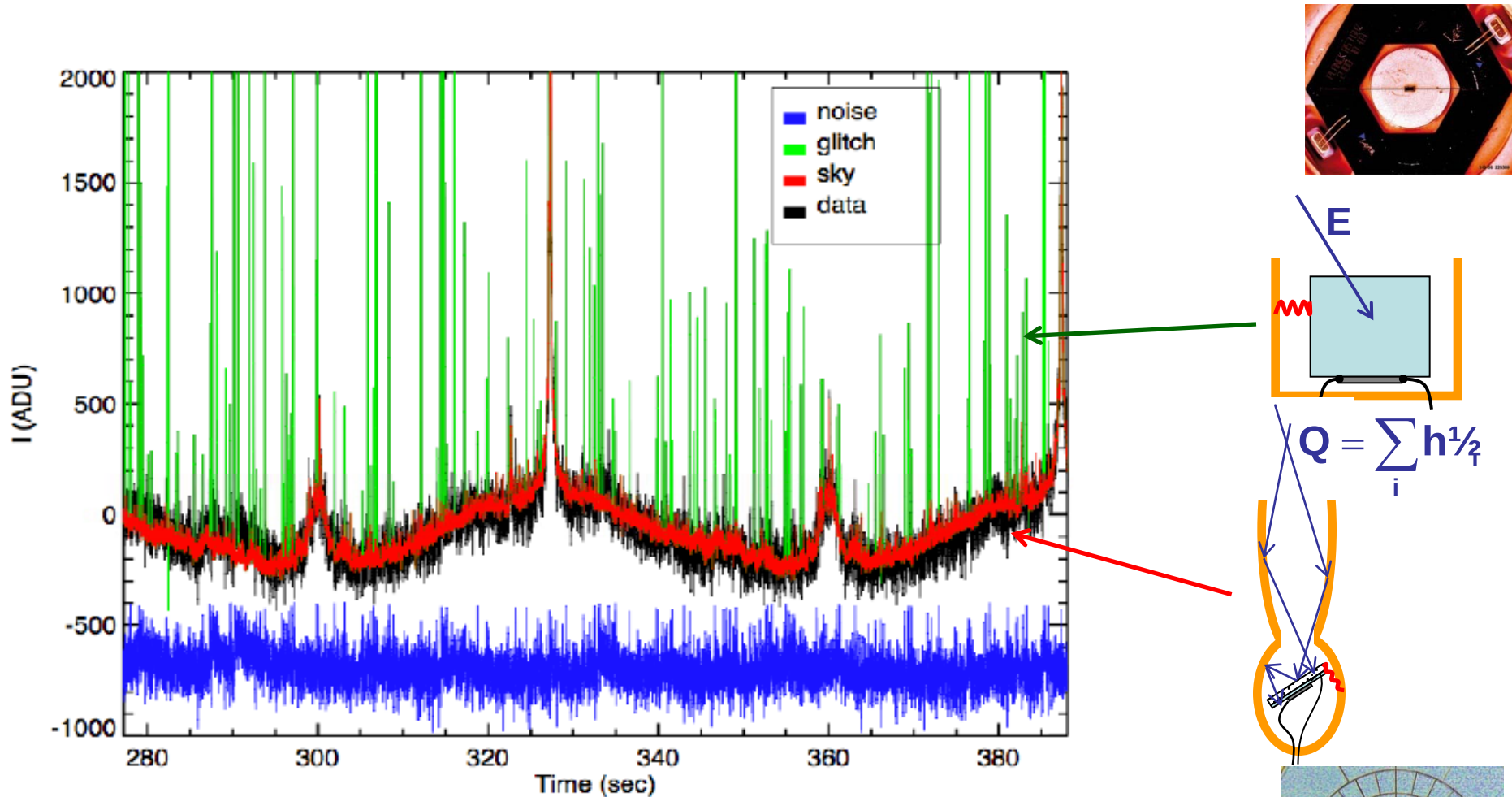


Rayonnement synchrotron

Poussières

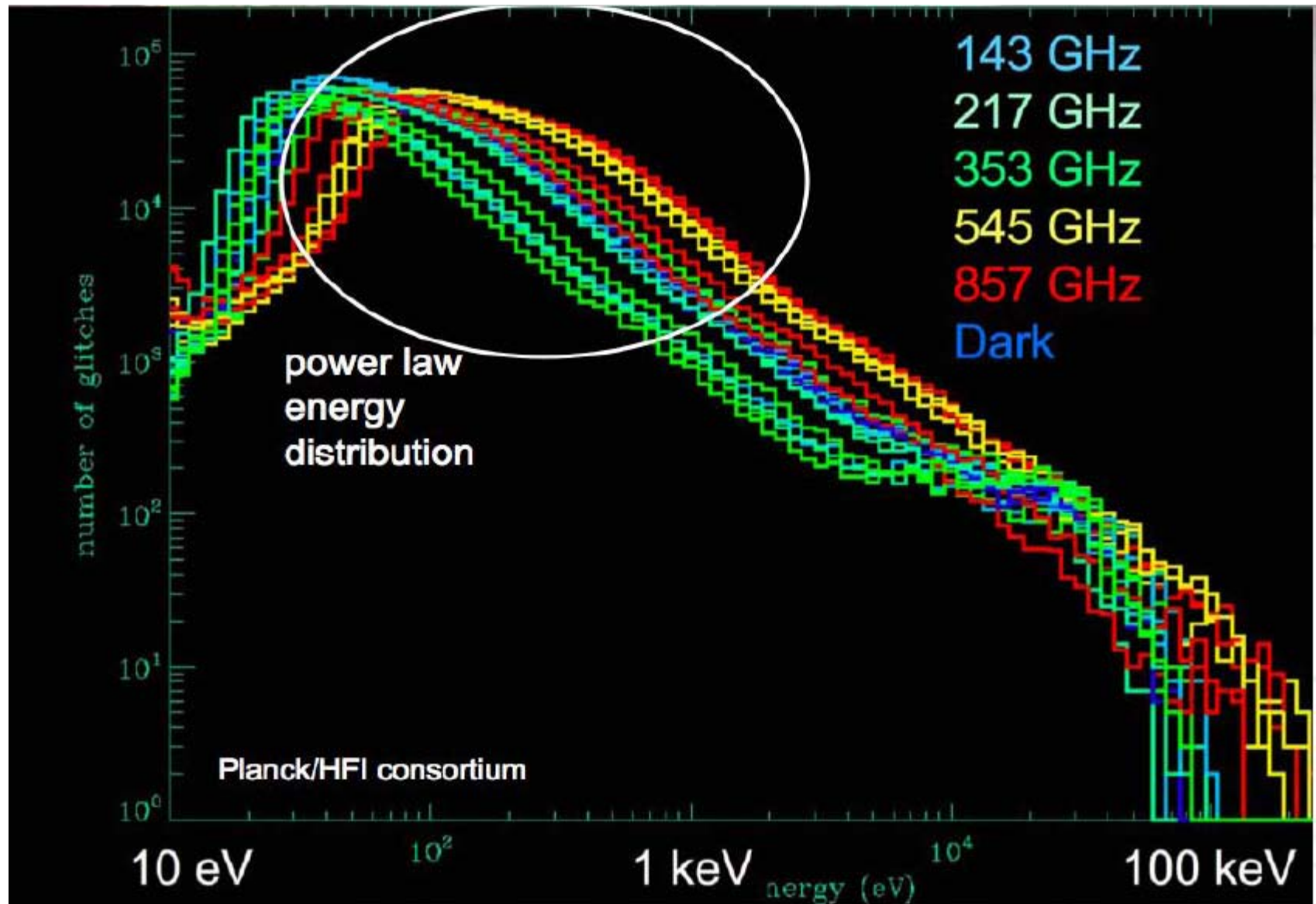


Des détecteurs au top... mais des particules parasites en nombre !



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

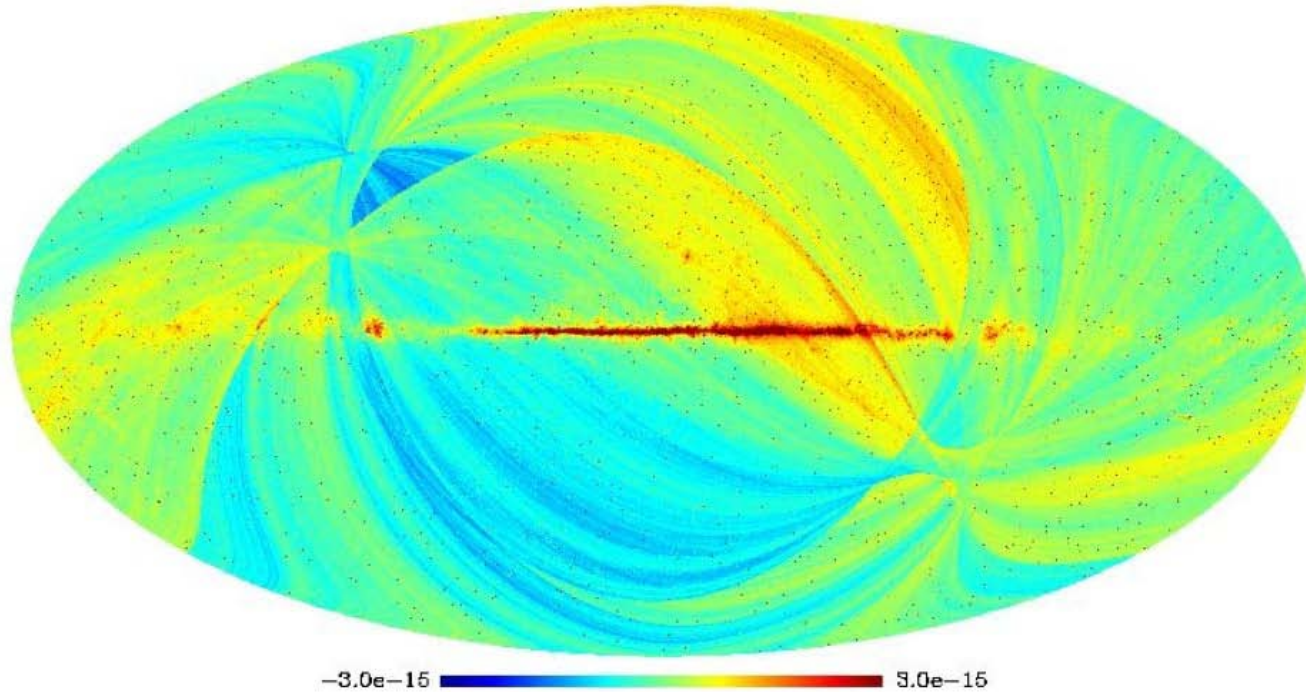


FIGURE 10.2 – Carte obtenue en projetant le signal non *déglitché* du détecteur 04_217_1 de HFI. On voit clairement les effets systématiques dominants : les rayons cosmiques (ponctuels et de grande intensité) et les stries dues aux fluctuations de la ligne de base des données entre les différents passages 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:

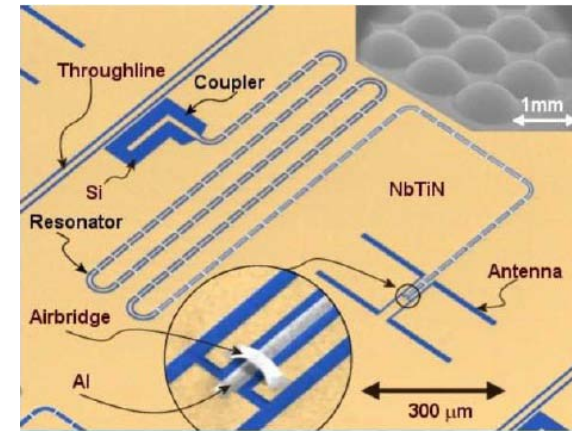
- au tandem IPNL (protons 26MeV)
- à l'IAS (alphas, 5.5MeV)
- ...



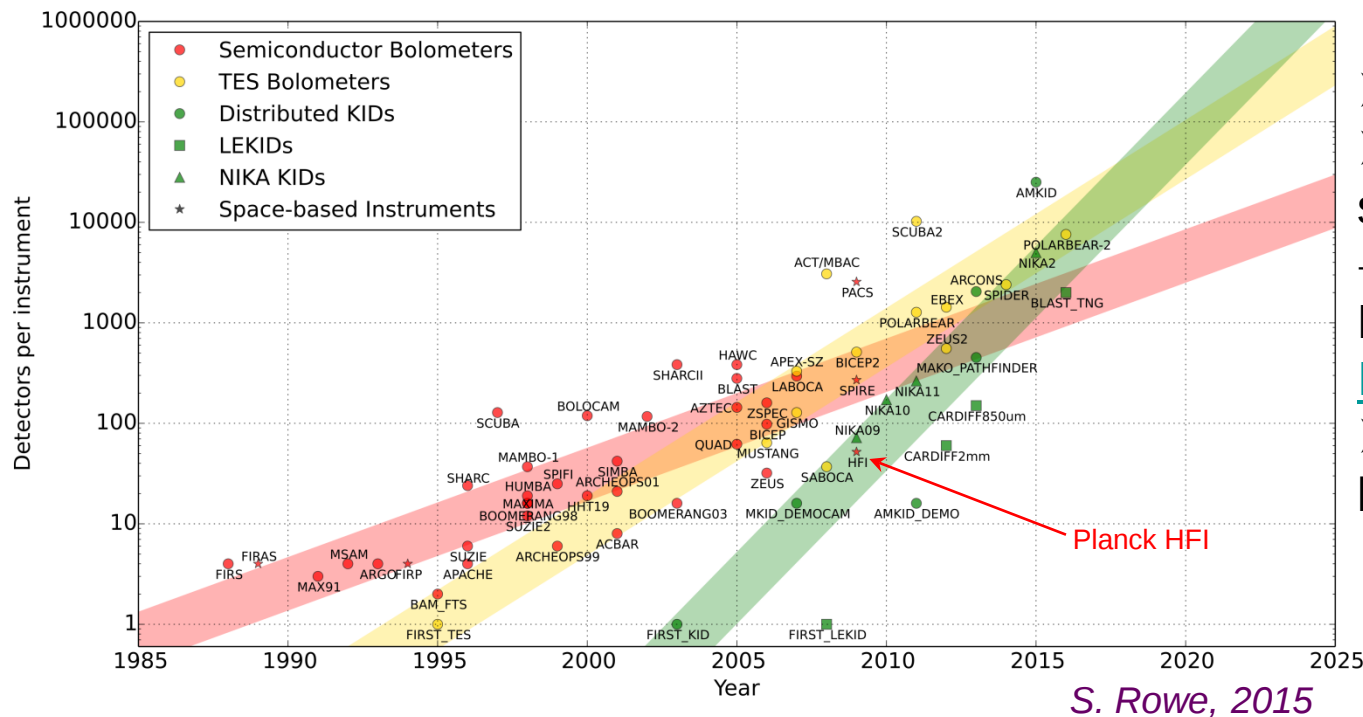
Une interprétation correcte est indispensable pour le dimensionnement des missions futures au point L2 !

Un nouveau venu de la supraconductivité qui monte, qui monte.....: le KID

- **Kinectic Inductance Detector**
- Simplicité de fabrication (et coût ↓↓)
- Adapté au multiplexage: pixels résonants avec une seule ligne de lecture
- Une sensibilité au rendez-vous dans le submm et l'IR lointain: qq. 10^{-19} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$



Antenna coupled distributed KIDs du SRON



- $T < 1\text{K}$
- Une physique des solides très “complexe”
→ cours de S. Doyle à DRTBT2012:
[Introduction to KIDs](#)
- Caméras NIKA de l'Institut Néel à l'IRAM

Applications en Physique Fondamentale (suite)

❑ Neutrino

❑ masse m_ν ?

- ❑ désintégration bêta β^- : ^{187}Re
- ❑ capture électronique (EC): ^{163}Ho

❑ nature ?

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

❑ interactions ?

- ❑ Diffusion élastique cohérente des neutrinos par les noyaux (CEvN)

❑ Autres événements rarissimes (hors $\beta\beta 0\nu$)

❑ Désintégrations alpha

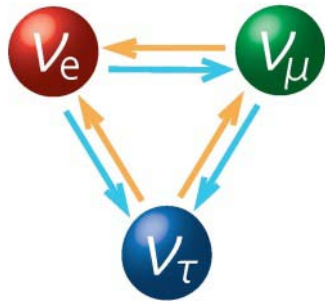
❑ Détection de la Matière Noire

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

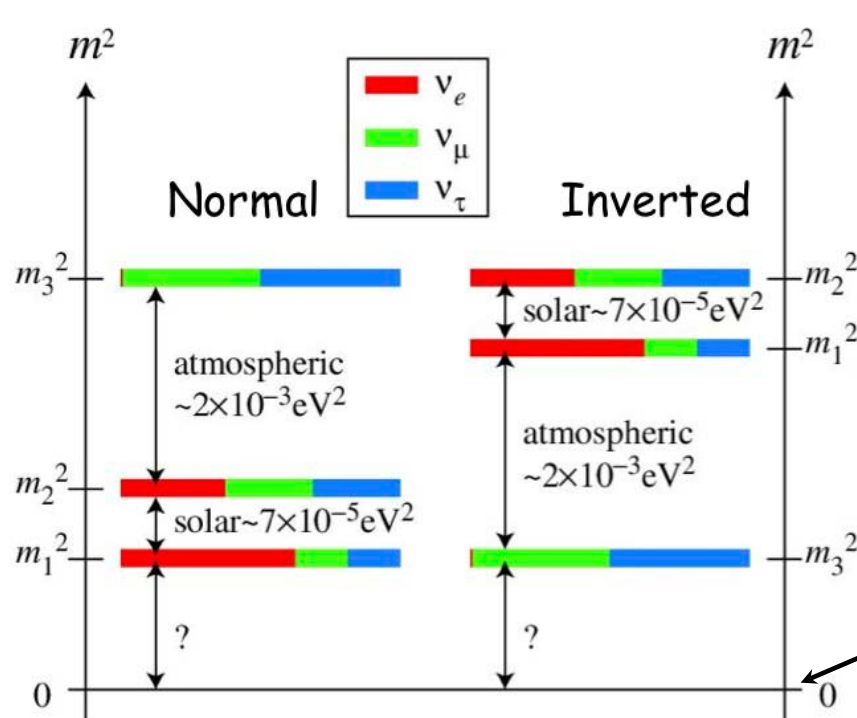


Des neutrinos massifs

□ 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



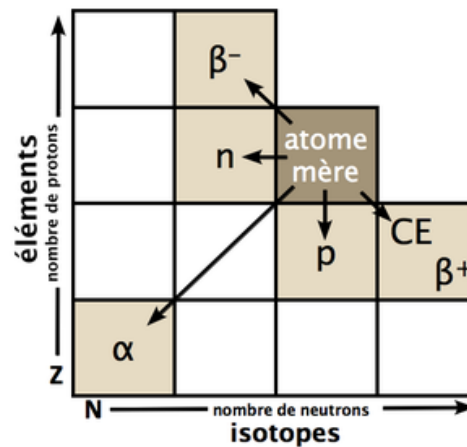
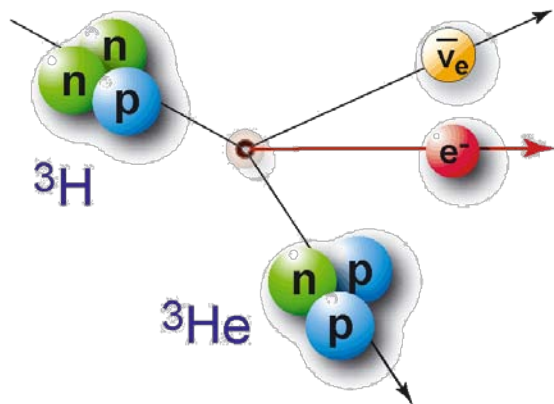
$$\Delta m_{i,j}^2 = m_j^2 - m_i^2 \neq 0$$

Les ν_s sont massifs (au moins 2/3)

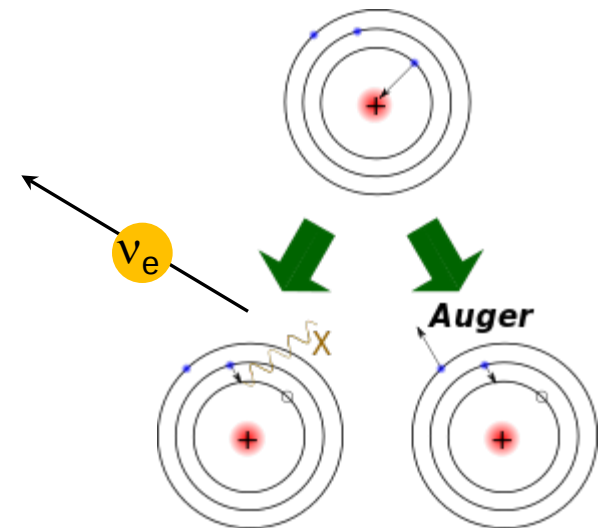
- Hiérarchie de masse: Normale ou Inverse?
- Echelle absolue de masse ?
- ...

☐ Masse du neutrino

Par désintégration β^-



Par Capture Electronique



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

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

^3H



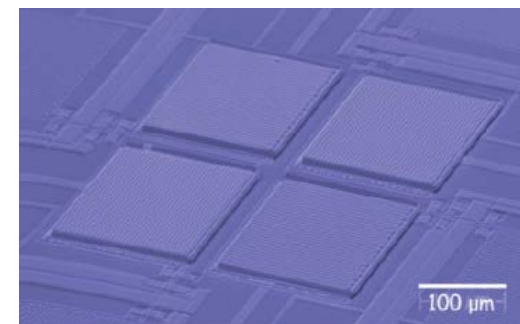
^{187}Re

MARE (abandonné)

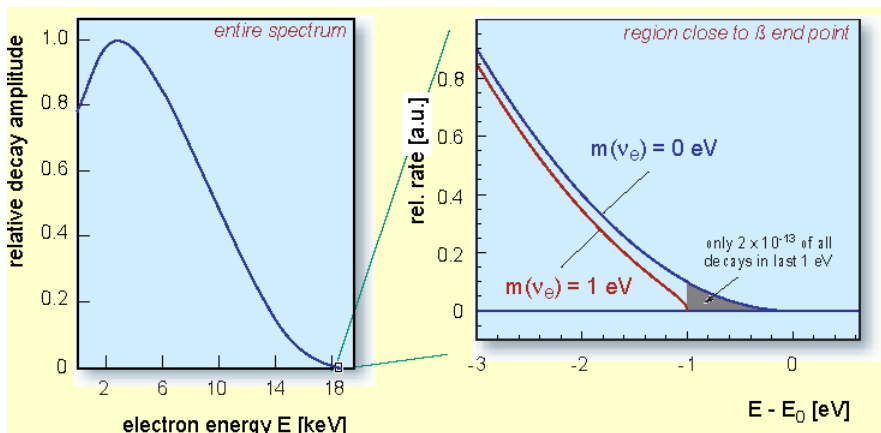


Si implanté

^{163}Ho



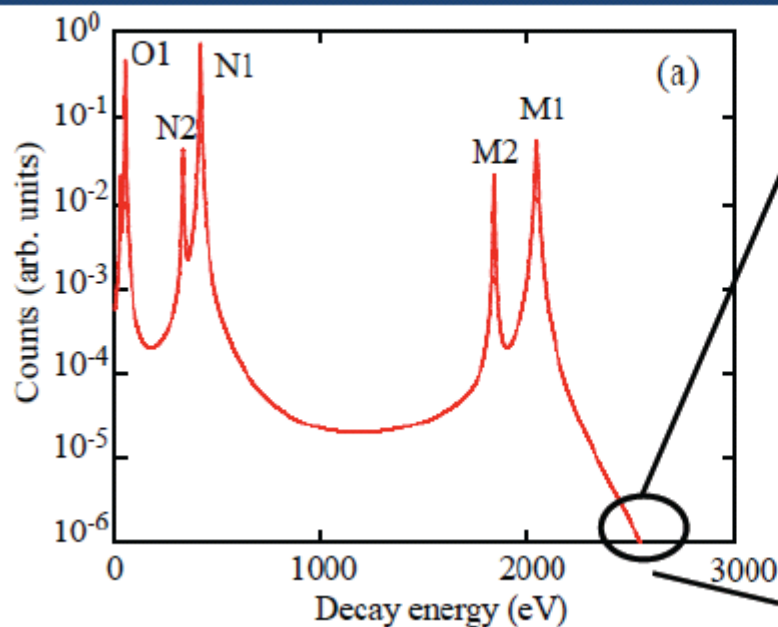
ECHO (All.),
HOLMES (It.)
NUMECS (US)



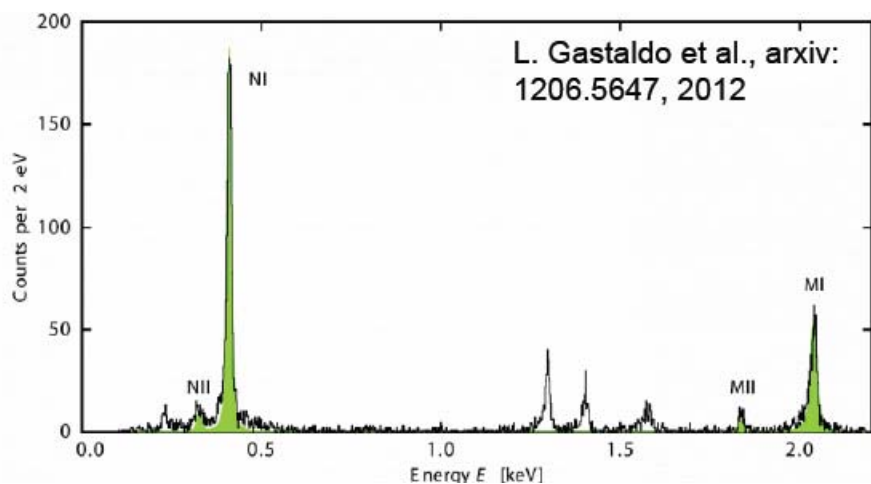
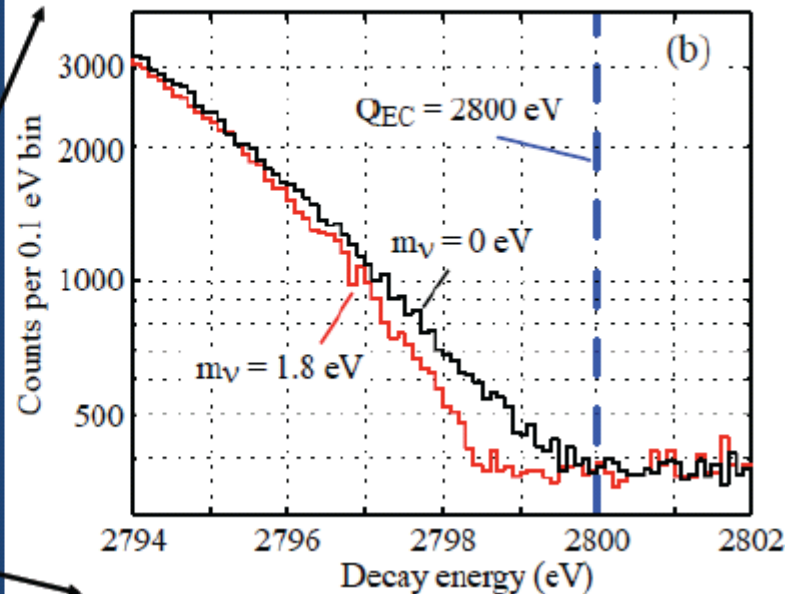
→ voir cours Ulli Koester

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

Calculated ^{163}Ho decay spectrum

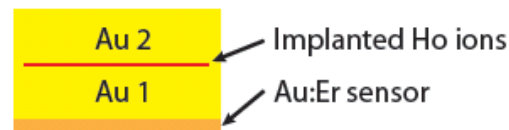


Zoom on endpoint

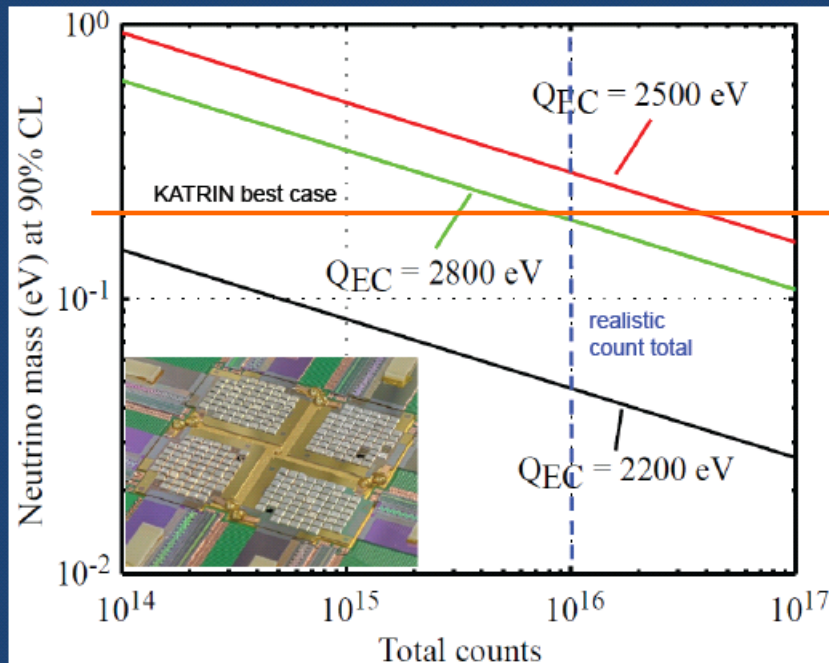


Collaboration ECHO (Heidelberg), 2012

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

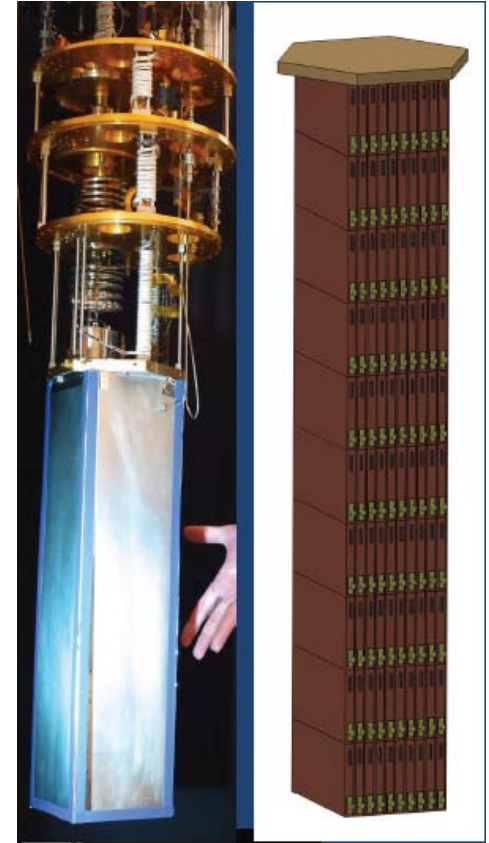


David contre Goliath ?



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

- 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.



d'après M. Rabin, 2013

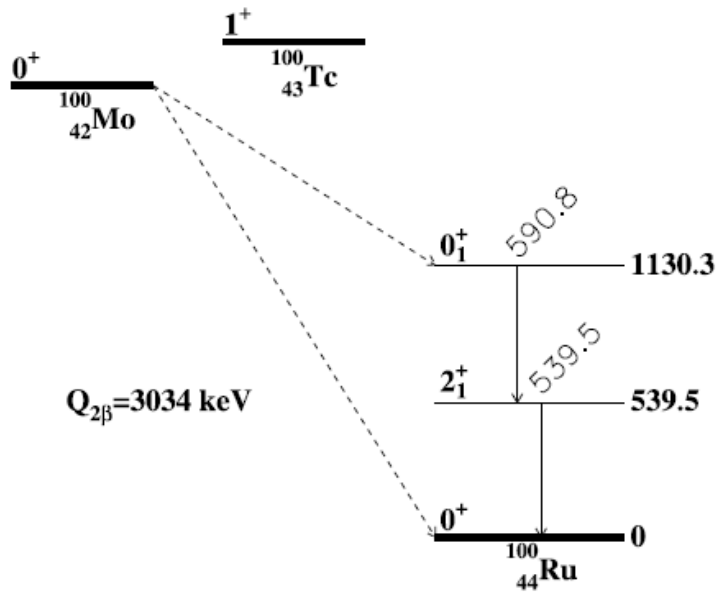
✓ TES@ 100mK, Au implanté

✓ 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}Te $T_{1/2} \sim 10^{24}$ ans)

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad \Delta L = 0$$

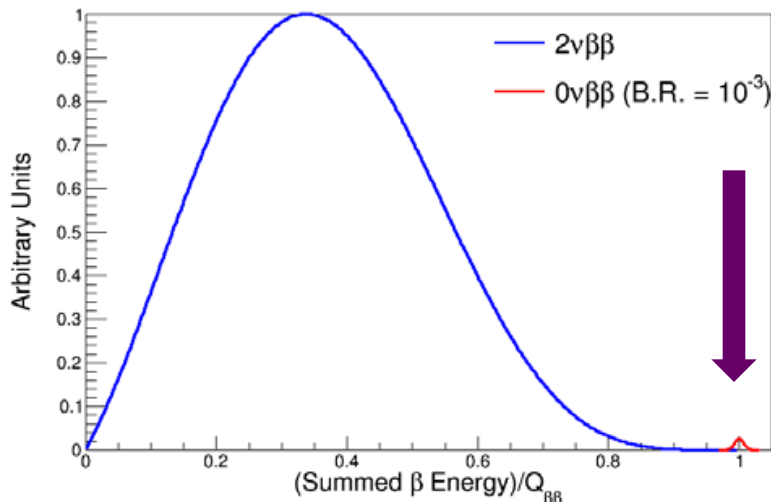
- $\beta\beta 0\nu$ (existence ? → **Physique au delà du Modèle Standard**)

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- \quad \Delta L = 2$$

→ violation du “Nombre Leptonique” L

→ le neutrino est “de Majorana”

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



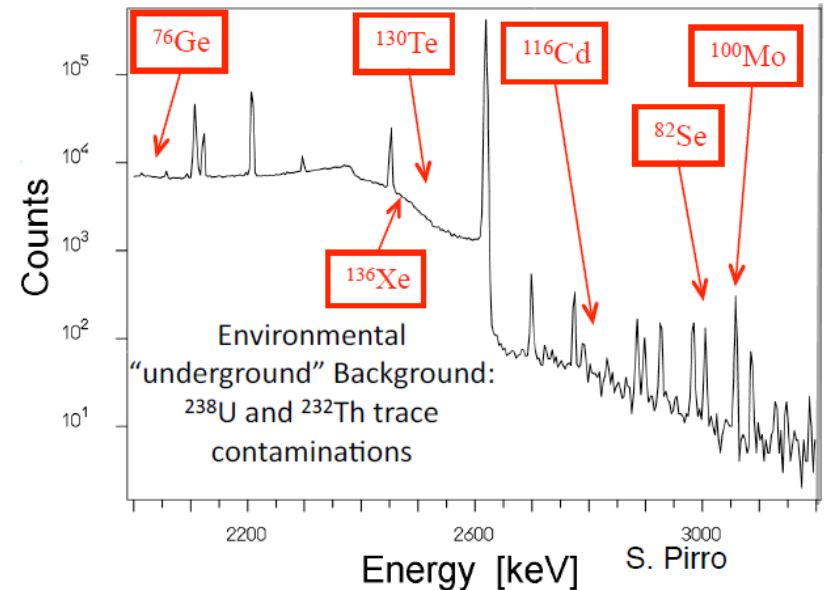
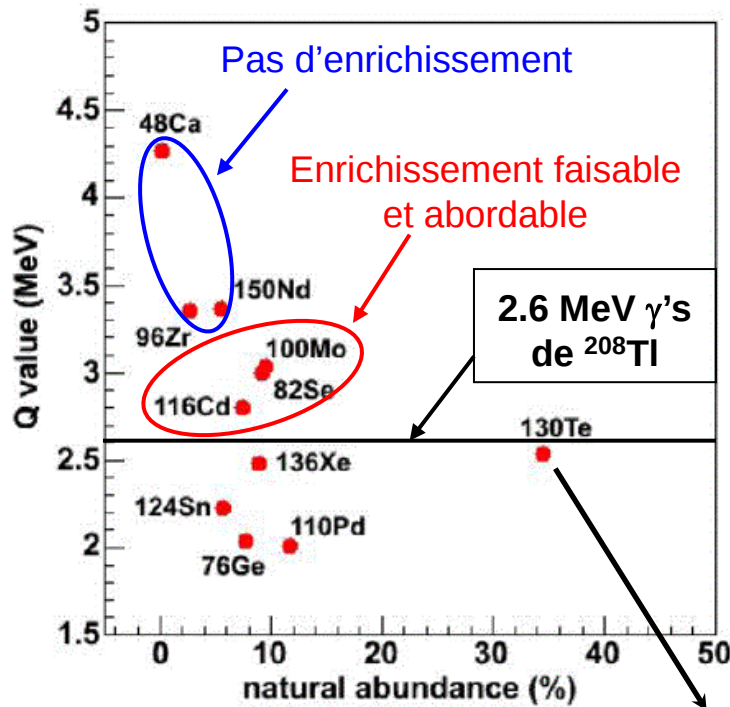
Durée de vie Espace des phases Élément de matrice nucléaire

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

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

Masse “effective”
de Majorana

Le choix des isotopes



Le choix de l'expérience CUORE au Gran Sasso (bolomètres massifs en TeO_2): existence, abondance, radiopureté

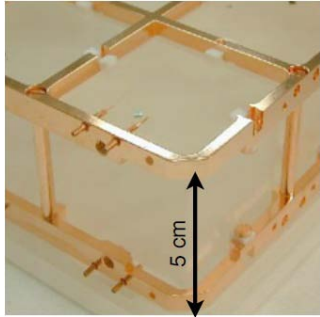
Expériences de 2^{nde} génération (post-CUORE):

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

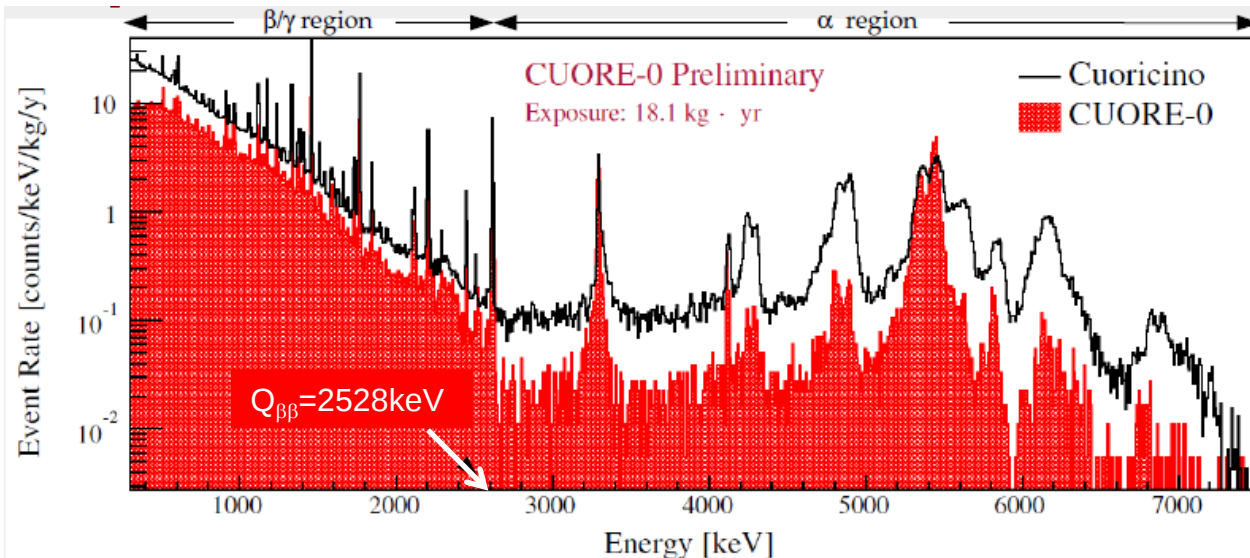
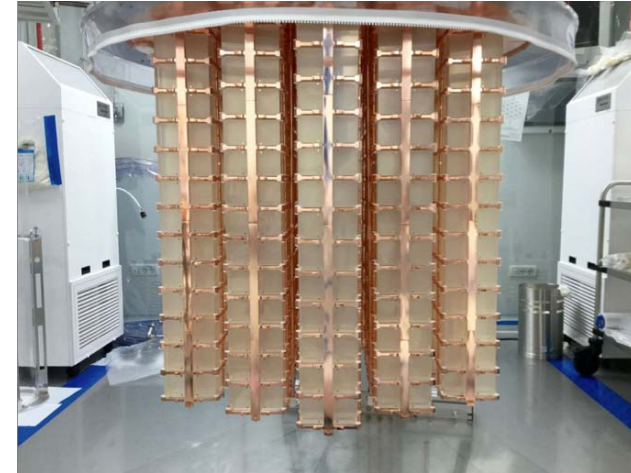
LUCIFER,
SUPERNEMO

LUMINEU
AMORE,
LUCINEU

L'approche bolométrique: l'expérience de CUORE



- $T \approx 7\text{mK}$ depuis janvier 2017
- Lab. souterrains du Gran Sasso (It)
- 988 détecteurs de 750g de TeO_2
→ 206 kg de ^{130}Te
- le m^3 le plus froid de l' "Univers connu"
- fond du démonstrateur CUORE-0 /4



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

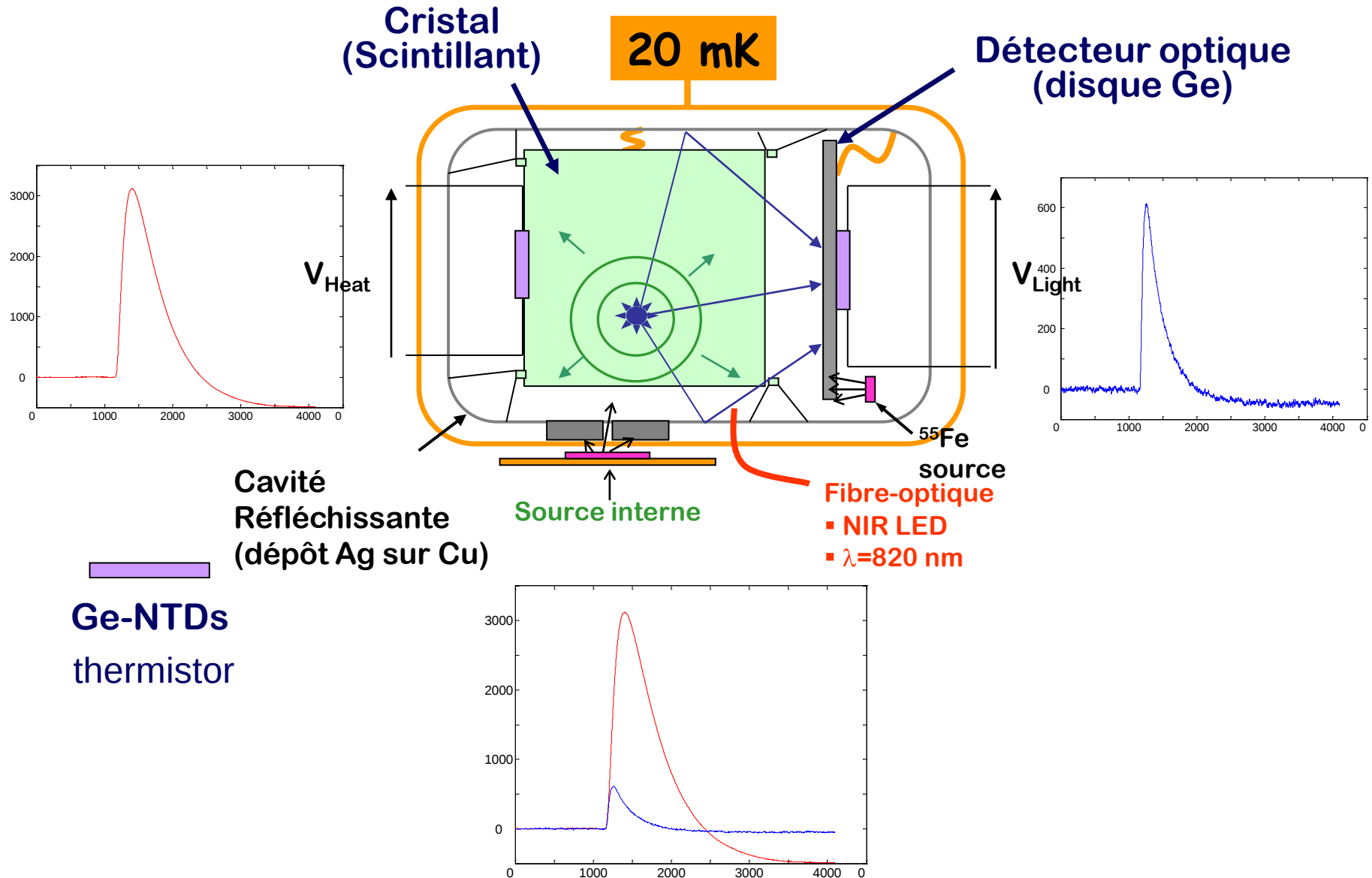
$$\lim T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M \cdot t}{B \cdot \Delta E}}$$

→ Comment s'en débarrasser ?

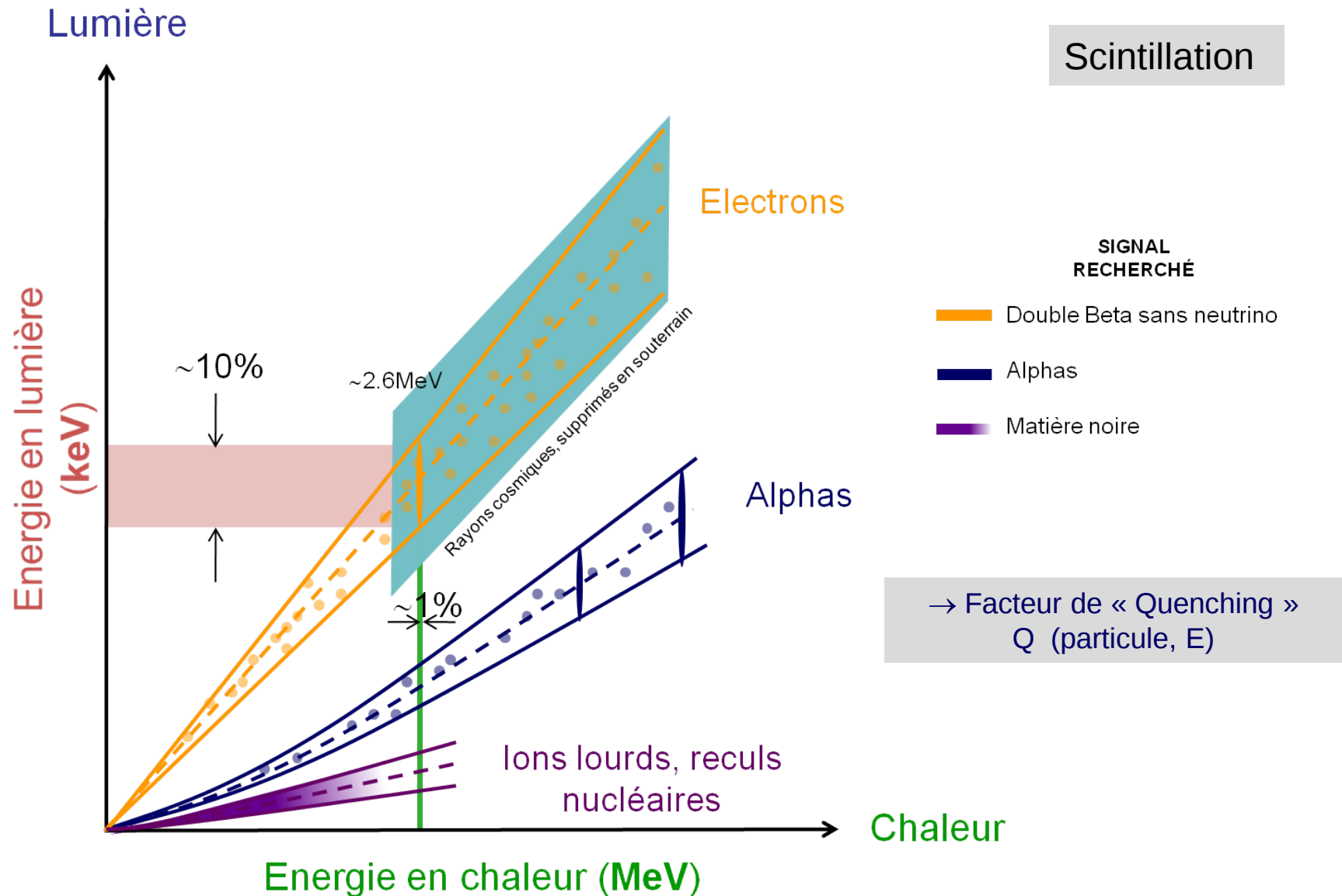
Bolomètres scintillants

✓ $\beta\beta 0\nu$ (LUMINEU,...)

Bolomètres Scintillants



Une discrimination multi-usages



SEMI-CONDUCTEURS [DISCRIMINATION « CHARGE / CHALEUR »]

d'après Knoll G., *Radiation Detection and measurement*

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

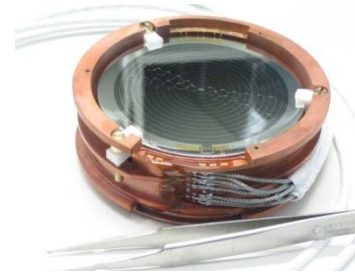
Cristaux massifs commerciaux

Géométrie plane (e ≈ mm)

R&D sur petits échantillons



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															

Cristaux massifs
commerciaux

R&D poudres

R&D monocristaux,
non commercialisés

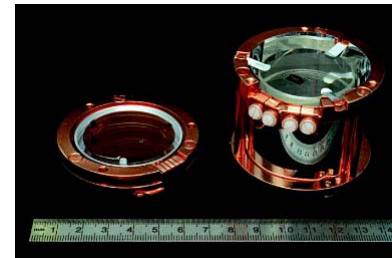
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Cristaux massifs commerciaux

R&D monocristaux, non commercialisés

R&D poudres

CRESST, CaWO_4 , ...



ROSEBUD, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, ...



$\beta\beta$
LUMINEU
 ZnMoO_4 , ...



Luminescent Underground Molybdenum Investigation for NEutrino 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}Mo (~1kg à l'horizon **2015**)
- ✓ dans des bolomètres scintillants en ZMO (ZnMoO_4), ou LMO (Li_2MoO_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



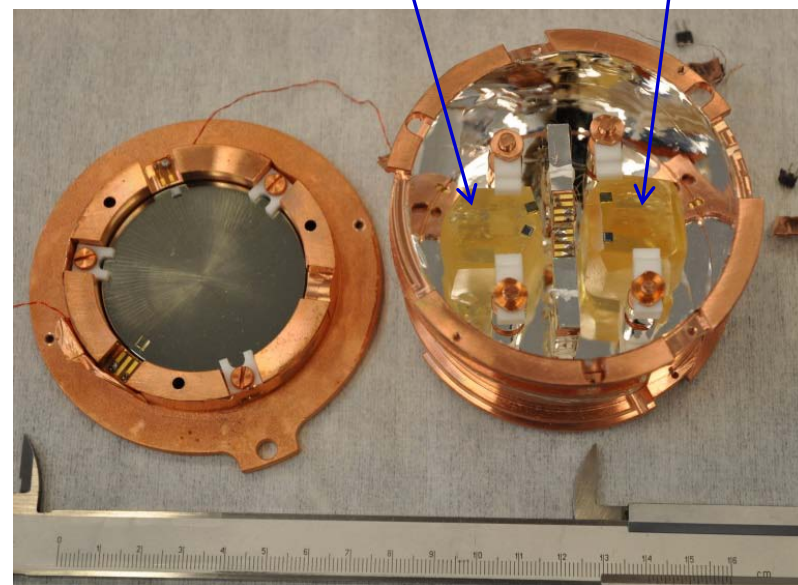
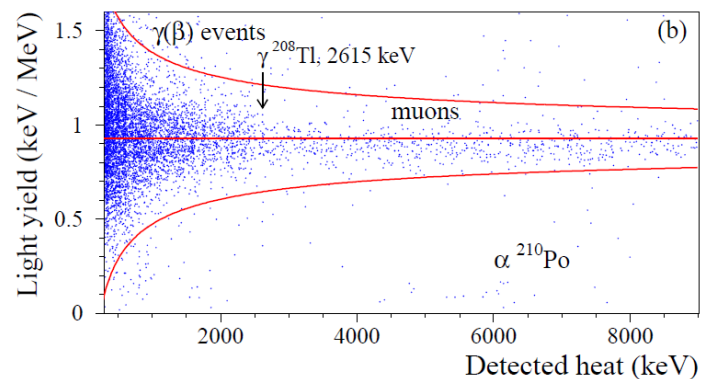
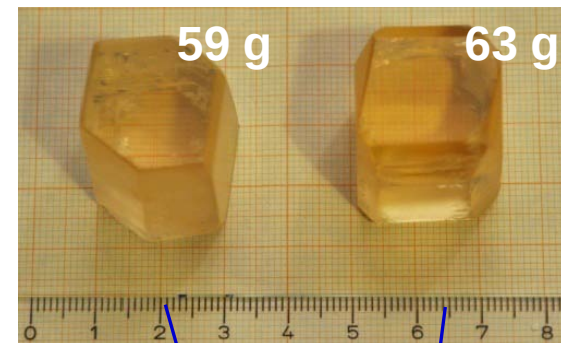
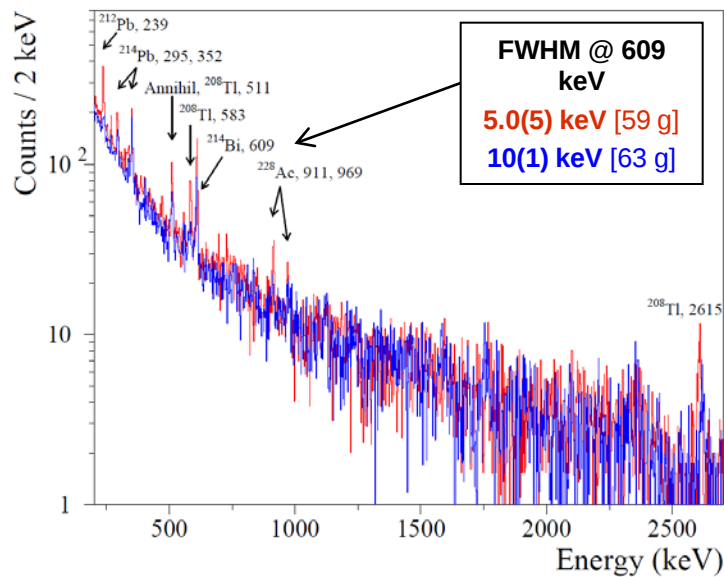
ITALIE INFN Milano Bicocca

Sensibilité visée sur 5 ans à 90% CL
 ZnMoO_4 nat. ou enrichi en ^{100}Mo (97%)
Fond $\approx 4 \times 10^{-4}$ evts/keV/kg/an
à $Q_{\beta\beta} \pm 3\text{keV}$

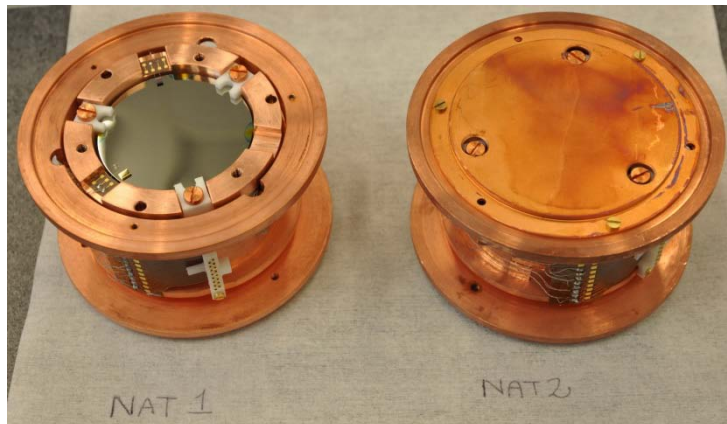
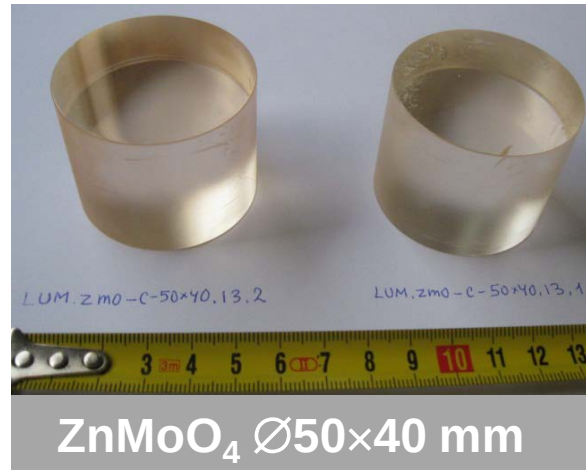
Number of ≈ 400 g crystals	Total isotope mass [kg]	Half-life sensitivity [10^{25} y]	$m_{\beta\beta}$ sensitivity [meV]
4	0.676	0.53	167-476
40	6.76	4.95	55-156
2000 (nat.)	33.1	15.3	31-89
2000	338	92.5	13-36



- ✓ test de cristaux de ZnMoO_4
- ✓ enrichis à 99.5% en ^{100}Mo
- ✓ perte de $\sim 4\%$ seulement lors du tirage

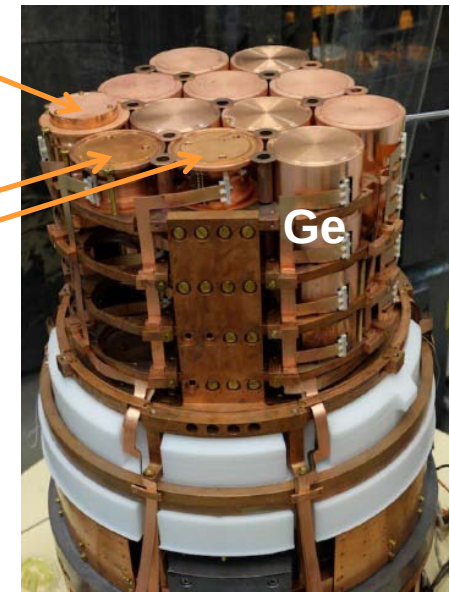


LUMINEU: sous sol (@LSM)



$\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$
59 g & 63 g

2 x ZnMoO_4
334 g + 336 g



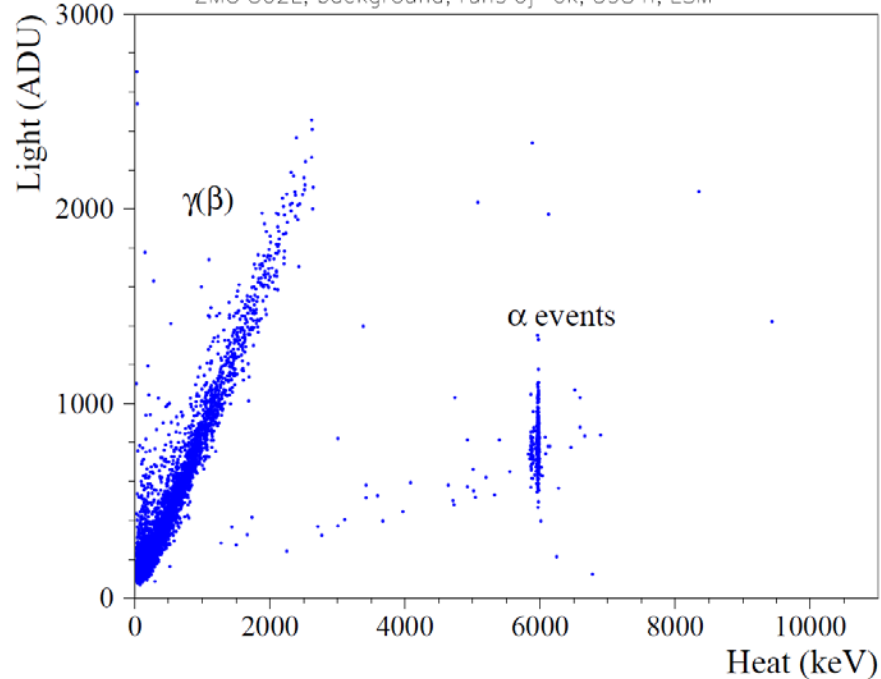
Banc EDELWEISS
@ LSM (Modane)
juin 2014→

LUMINEU: état des lieux en mars 2015

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

ZnMoO₄, 334 g, Bkg, 398 h, LSM Heat-vs-Light scatter-plot

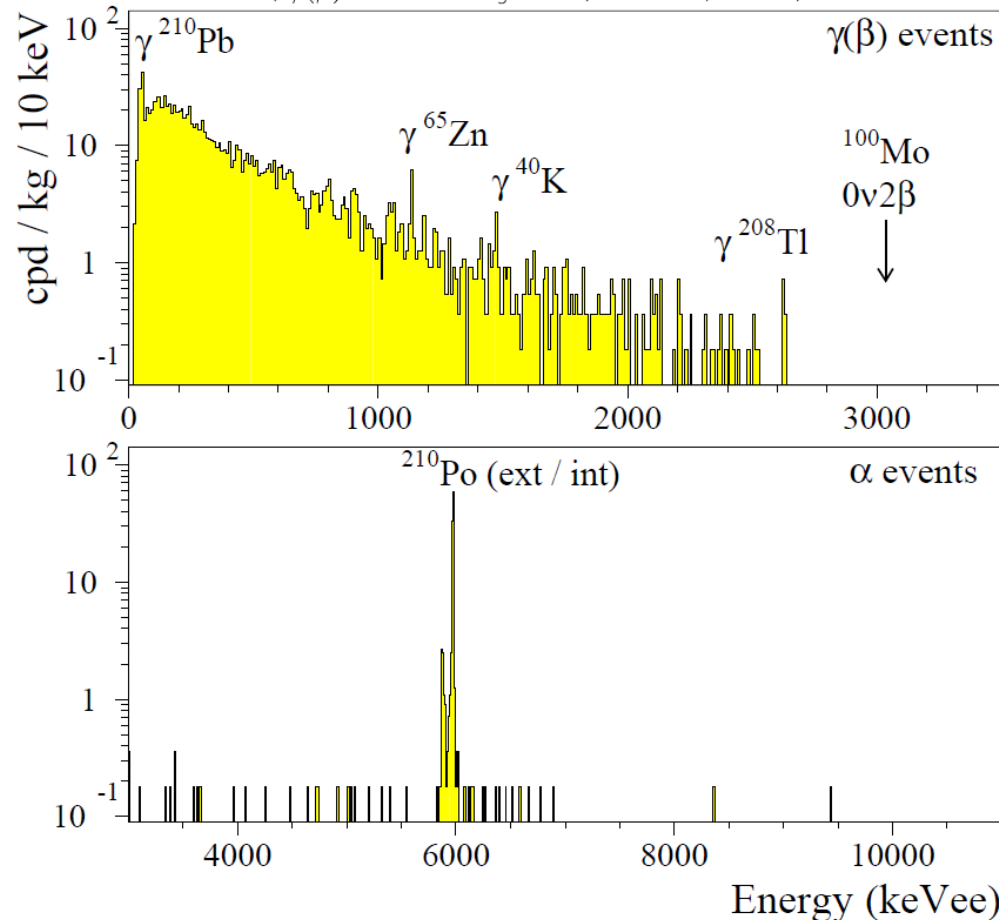
ZMO 502L, background, runs ok—ok, 398 h, LSM



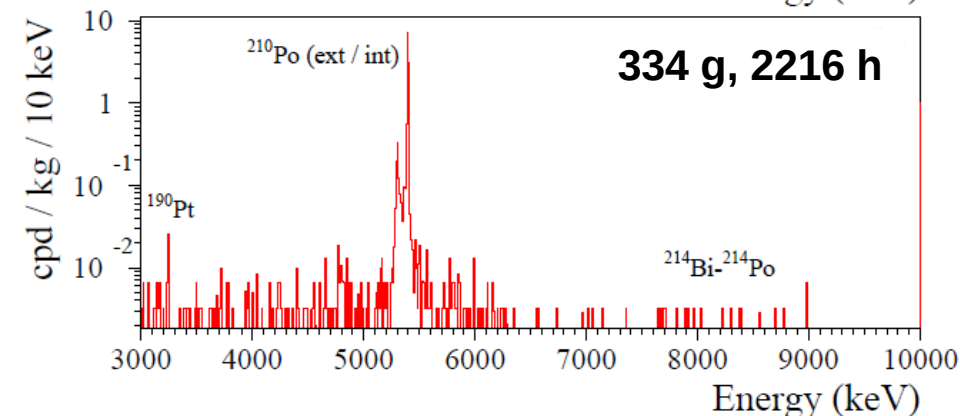
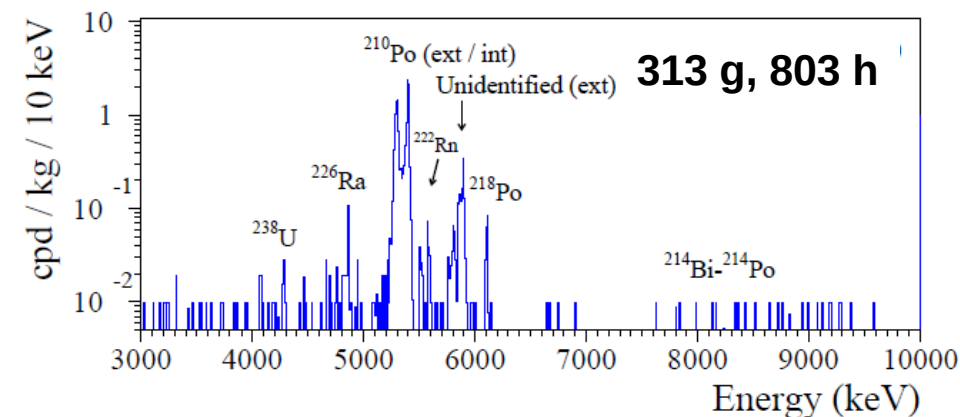
Preliminary

d'après D.V. Poda, LAL, 10 March 2015

ZMO 502L, $\gamma(\beta)$ and α background, runs ok, 398 h, LSM



LUMINEU: une radio-pureté au rendez-vous



Radio-pureté de ZnMoO_4 visée initialement
(expérience de 2^{nde} génération $0\nu\beta\beta$):

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

	Activity, $\mu\text{Bq/kg}$			
	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}Th	≤ 2	≤ 10	≤ 6	≤ 8
^{228}Th	≤ 5	≤ 24	12(4)	≤ 6
^{238}U	≤ 2	≤ 8	8(3)	≤ 6
^{234}U	≤ 3	≤ 22	≤ 8	≤ 11
^{230}Th	≤ 2	≤ 13	≤ 8	≤ 6
^{226}Ra	≤ 5	≤ 21	22(5)	27(6)
^{210}Po	1271(22)	939(52)	703(28)	700(30)
^{235}U	≤ 3	≤ 10	≤ 7	–
^{190}Pt	4(1)	≤ 5	≤ 7	–

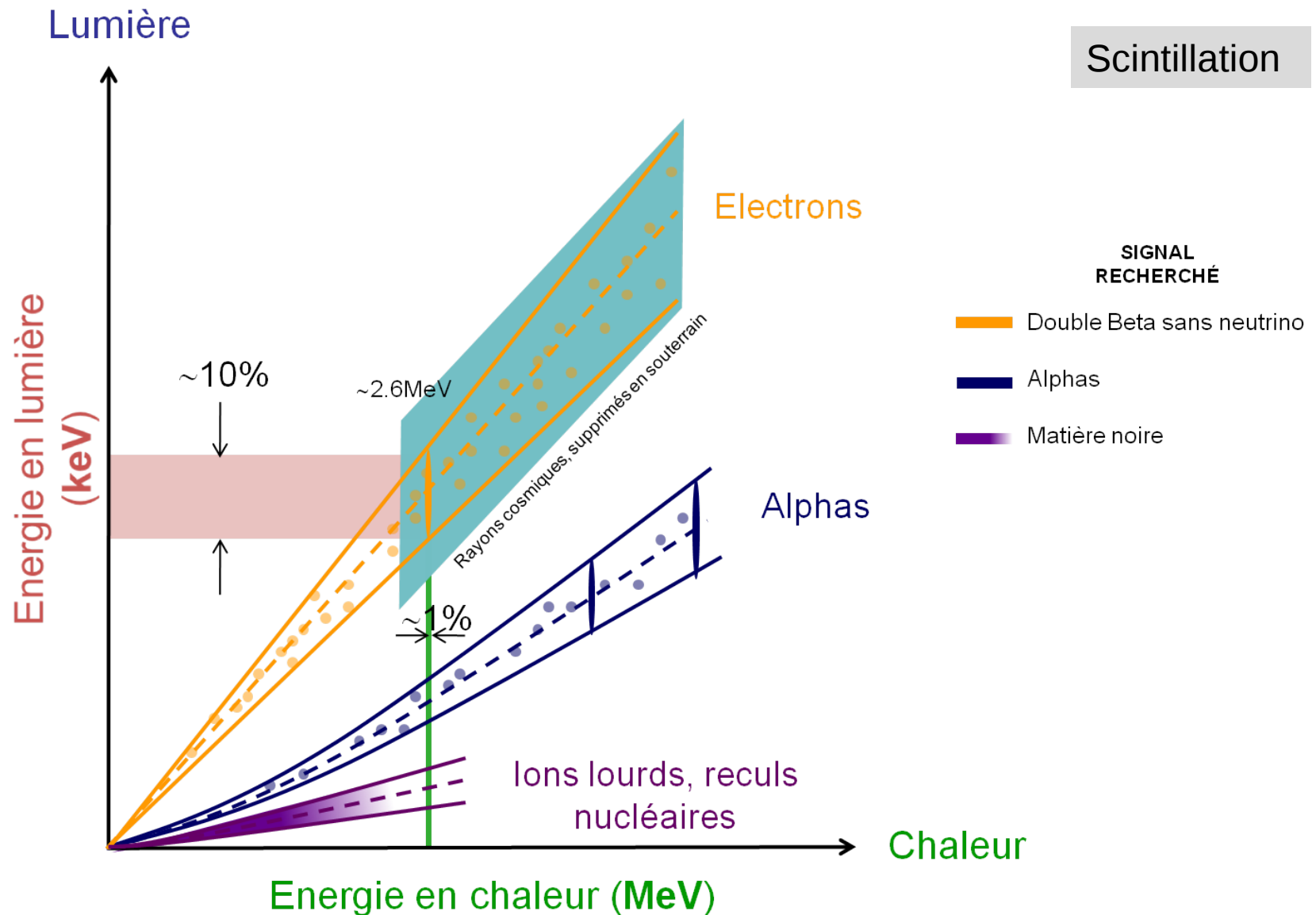
[1] E. Armengaud et al., submitted to JINST.

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

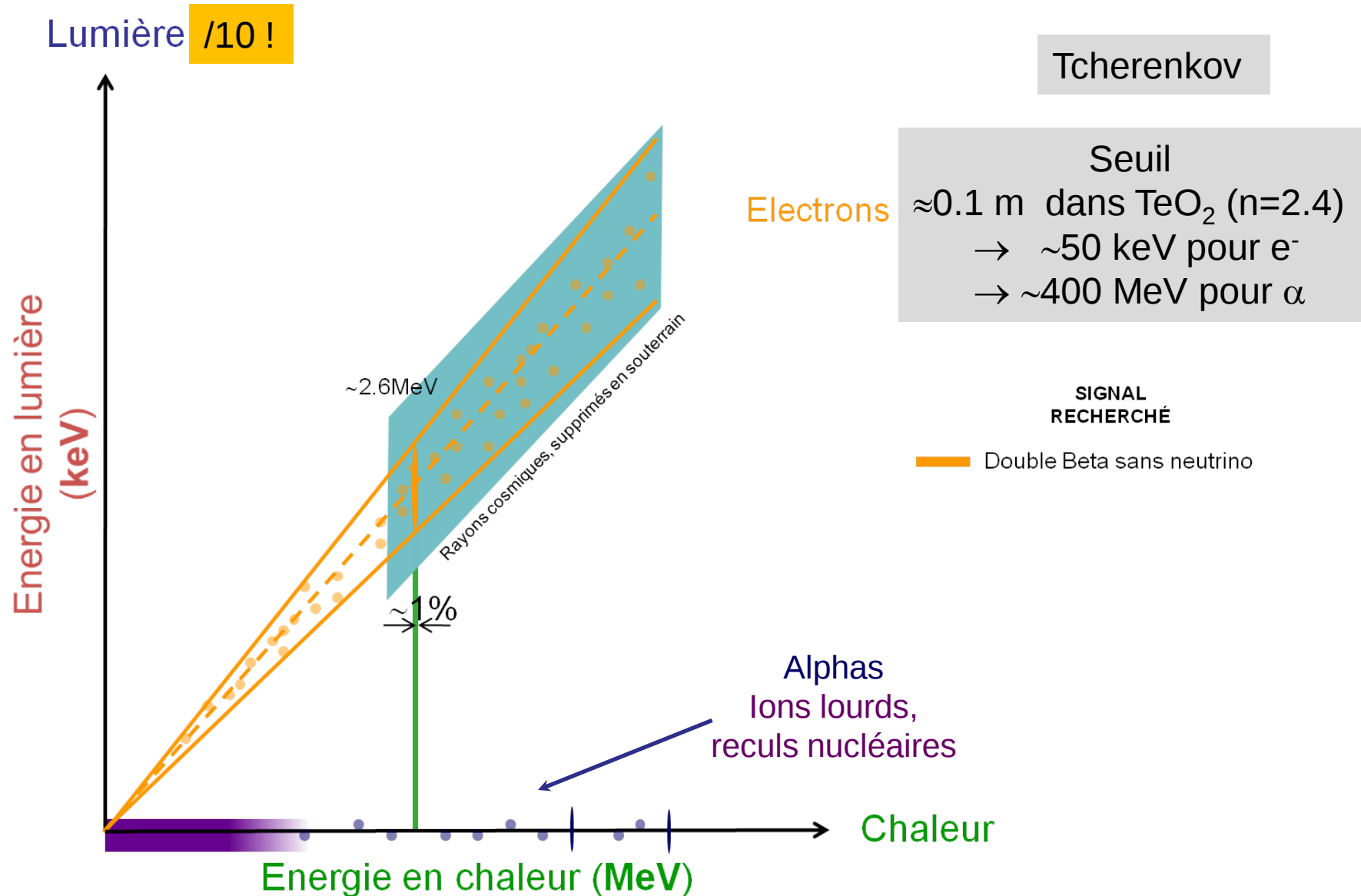
[3] J. Beeman et al., EPJC 72 (2012) 2142.

d'après D.V. Poda

Une discrimination multi-usages

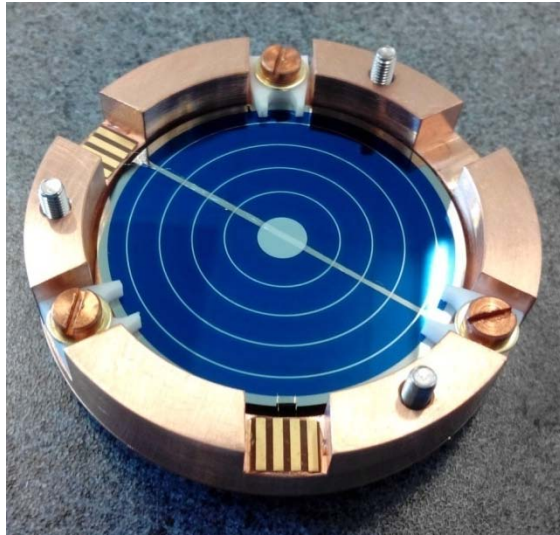


Une discrimination multi-usages



Amplification thermique du signal de luminescence

Bolomètre Ge optique (R&D CSNSM)



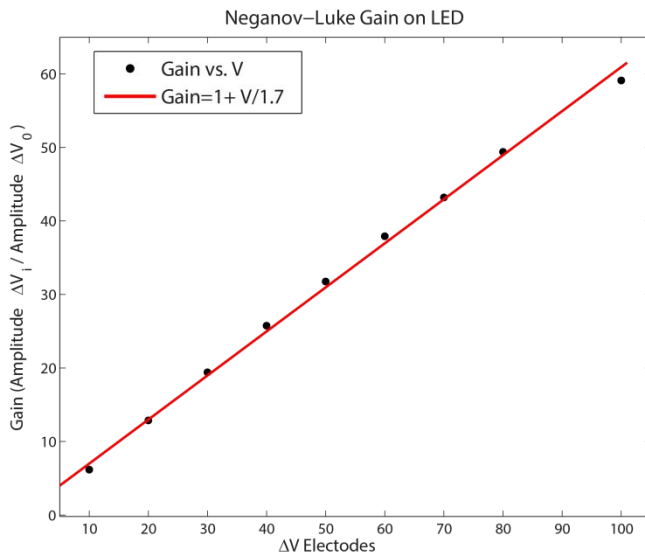
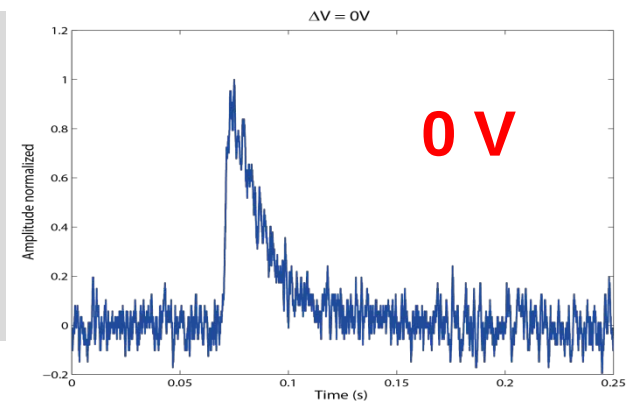
Accélération des charges entre électrodes → conversion en chaleur par effet (Joule) « Neganov-Luke »



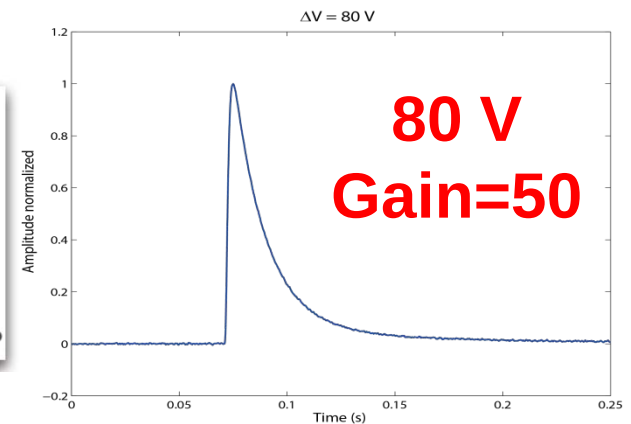
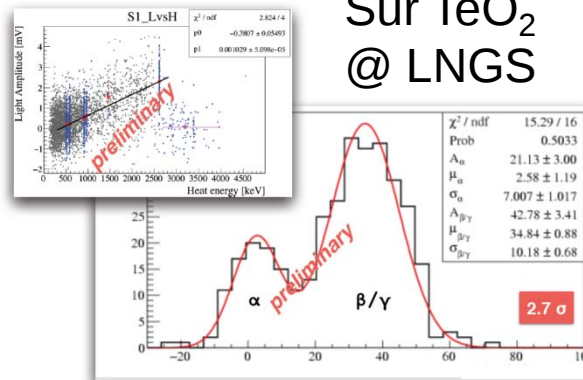
Applications:

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

Signal d'une LED

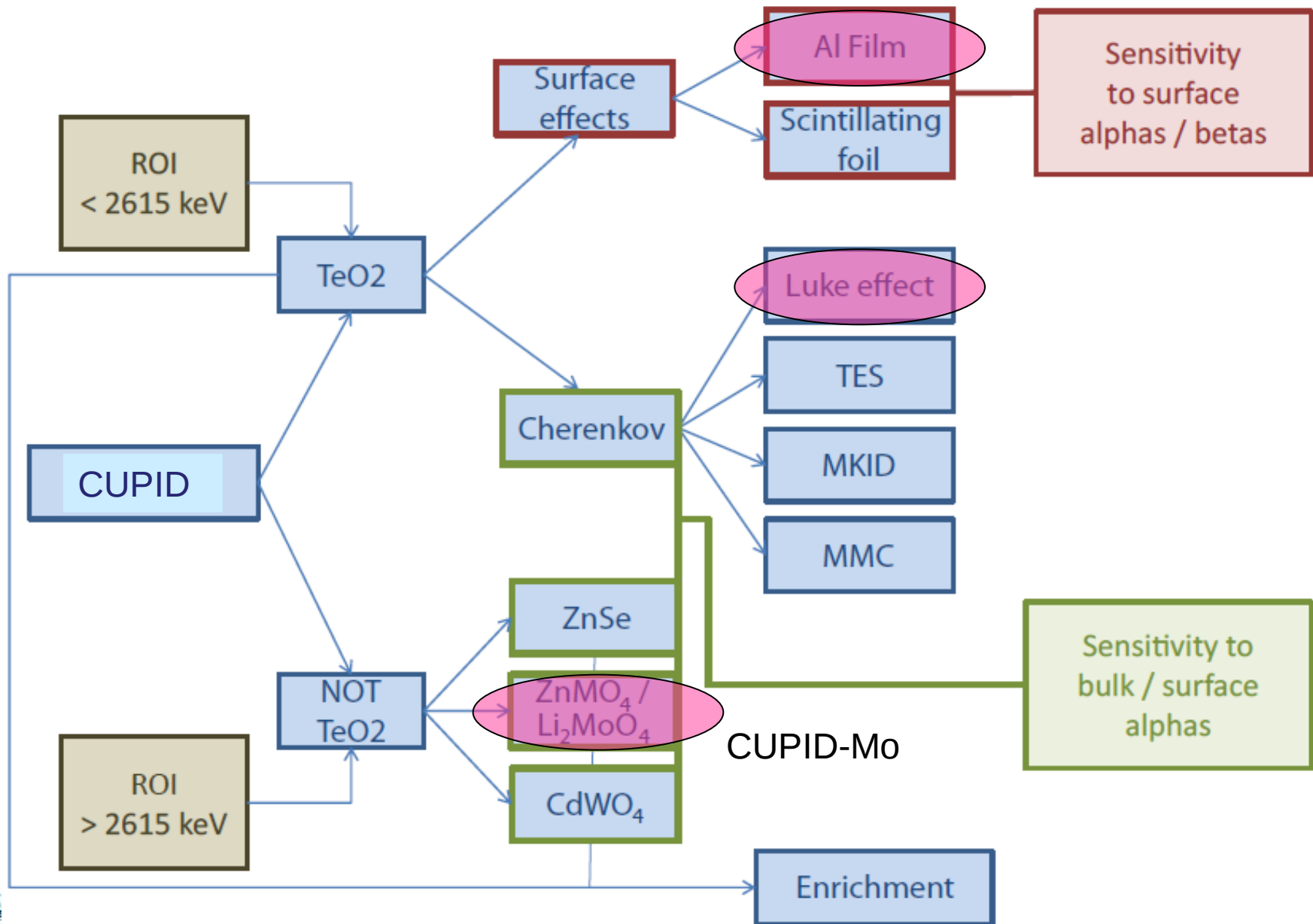


Sur TeO_2
@ LNGS

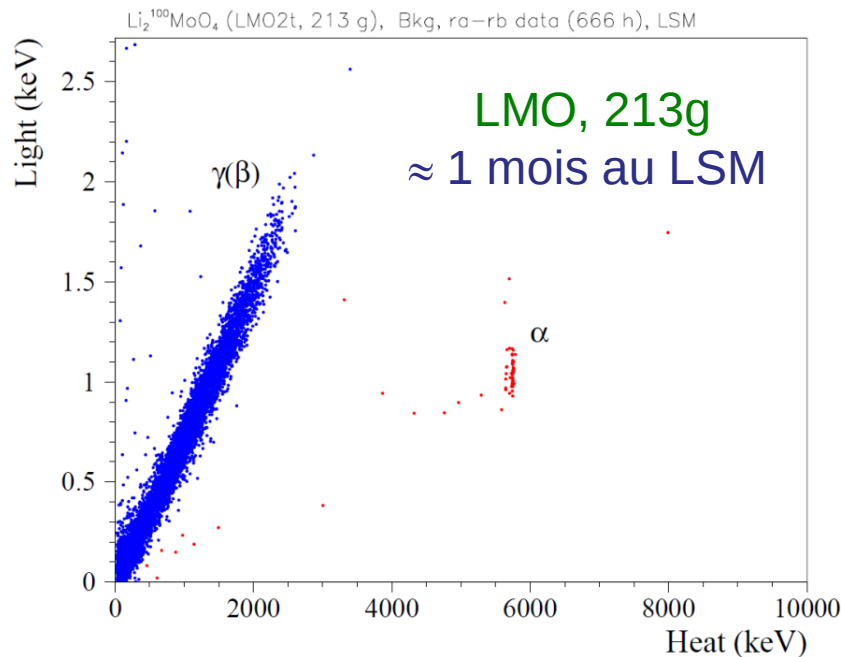


d'après M.Mancuso & E.Olivieri

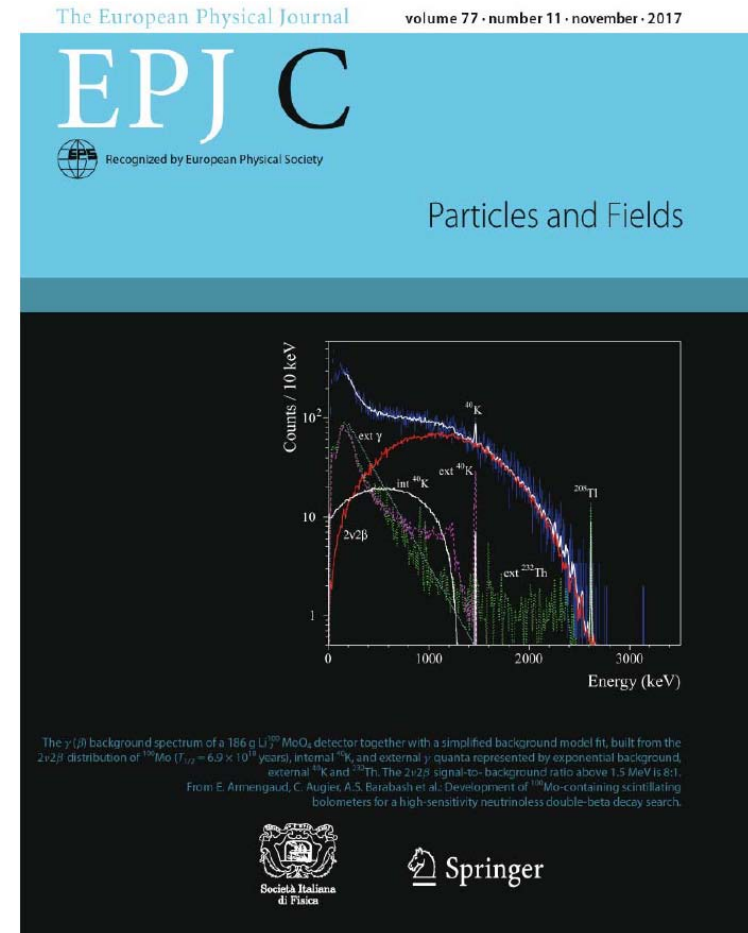
CUPID: futur bolométrique du $\beta\beta 0\nu$



1. test de prototypes de LMO au LSM



- ✓ R&D LUMINEU sur LMO (Li₂MoO₄)
- ✓ une tour de 4 détecteurs LMO enrichis en ¹⁰⁰Mo, testée au LSM en 2017
- ✓ excellente séparation α/γ
→ radiopureté OK
- ✓ tirage plus facile que ZMO



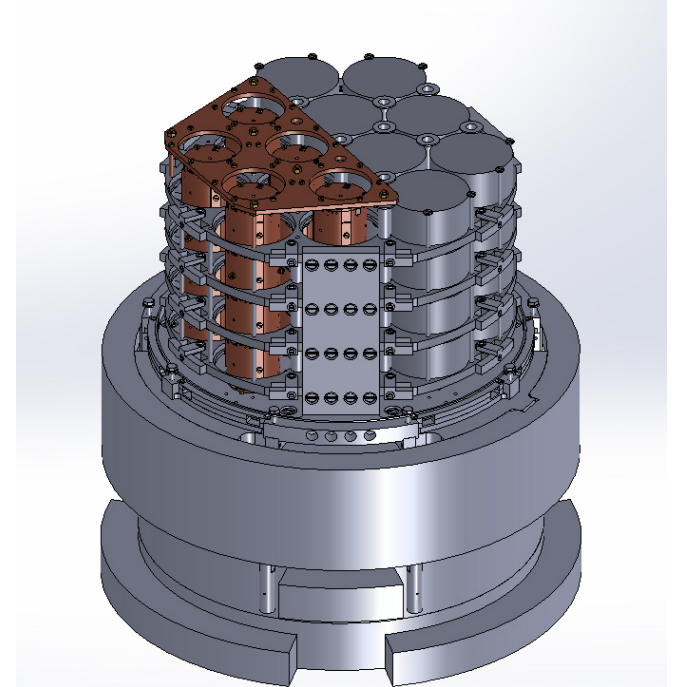
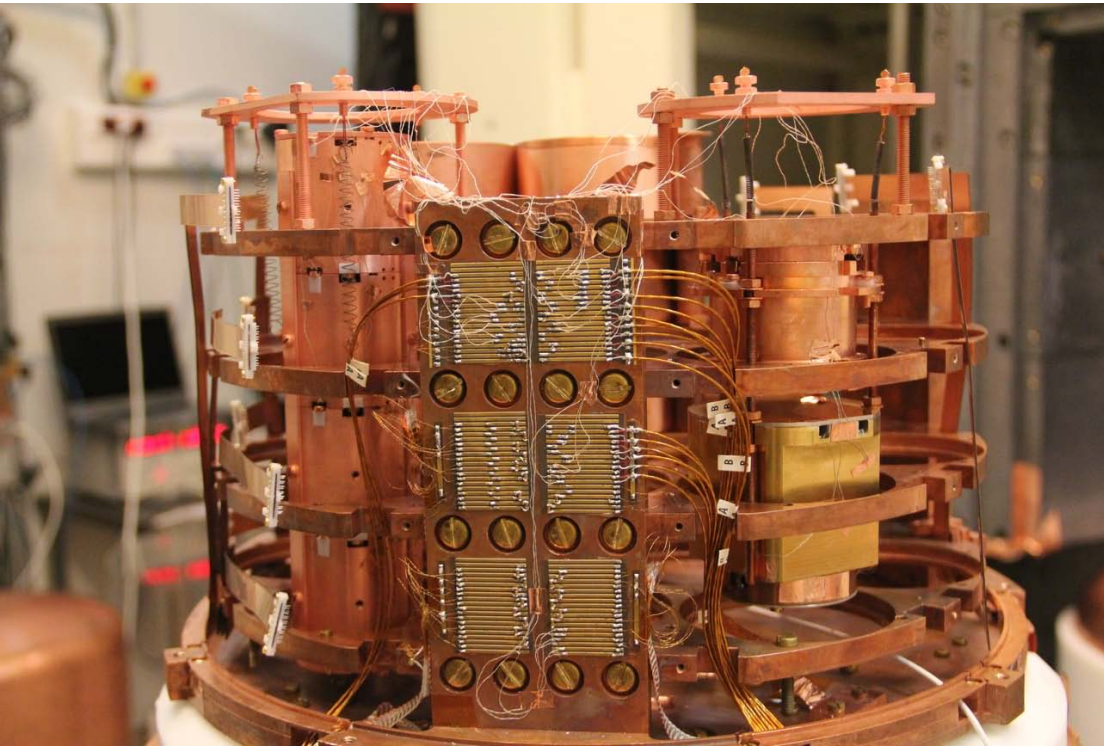
→ $T_{1/2}^{2\nu 2\beta} (^{100}\text{Mo}) \approx (6.95 \pm 0.13) \times 10^{18}$ ans



C'est le résultat le plus précis pour une désintégration $2\nu 2\beta$ malgré une exposition très modeste (0.12 kg×an)

du ZMO au LMO...

2. vers CUPID-Mo



Juin 2018: option #1 pour CUPID !

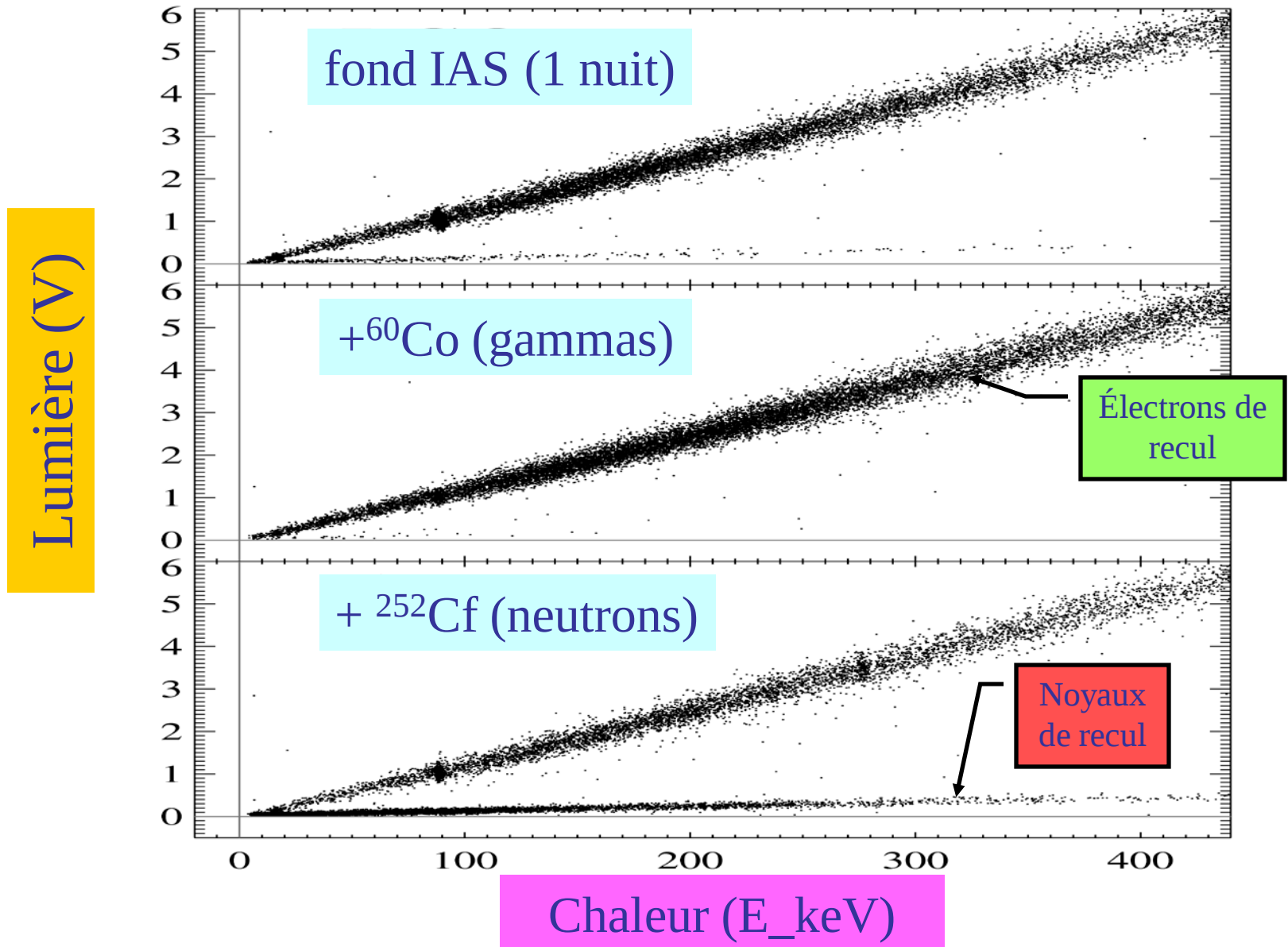
- ≡ Démonstrateur de CUPID-Mo
- sur réfrigérateur d'Edelweiss @ LSM
- 5×4 détecteurs de $\approx 200\text{g}$ en LMO enrichi (2.34kg de ^{100}Mo)
- premier refroidissement $< 20\text{mK}$ en juin 2018
- 6 mois de mesures.

❑ Désintégrations rarissimes (par bolomètres scintillants !)

Désintégrations alpha de

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

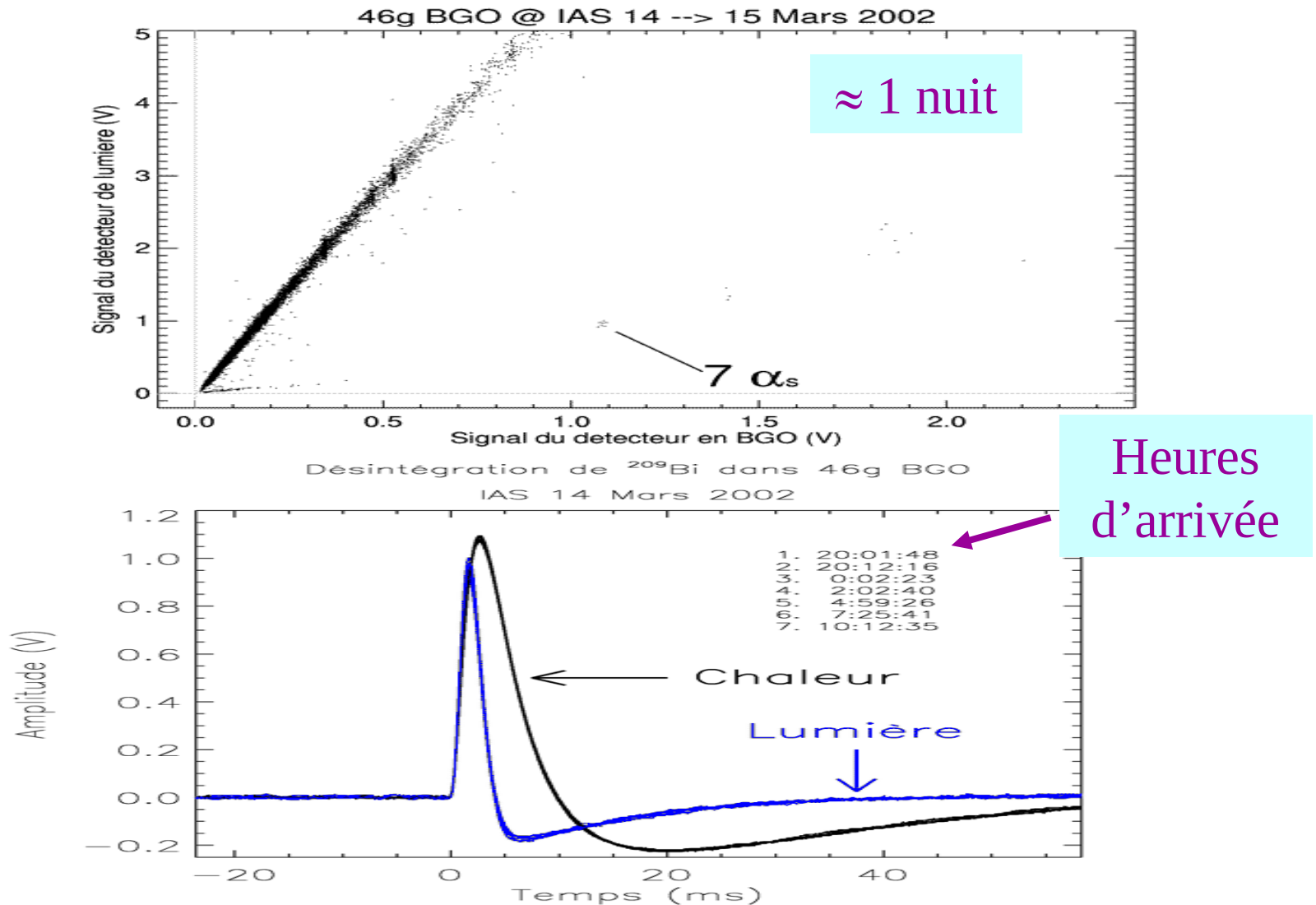
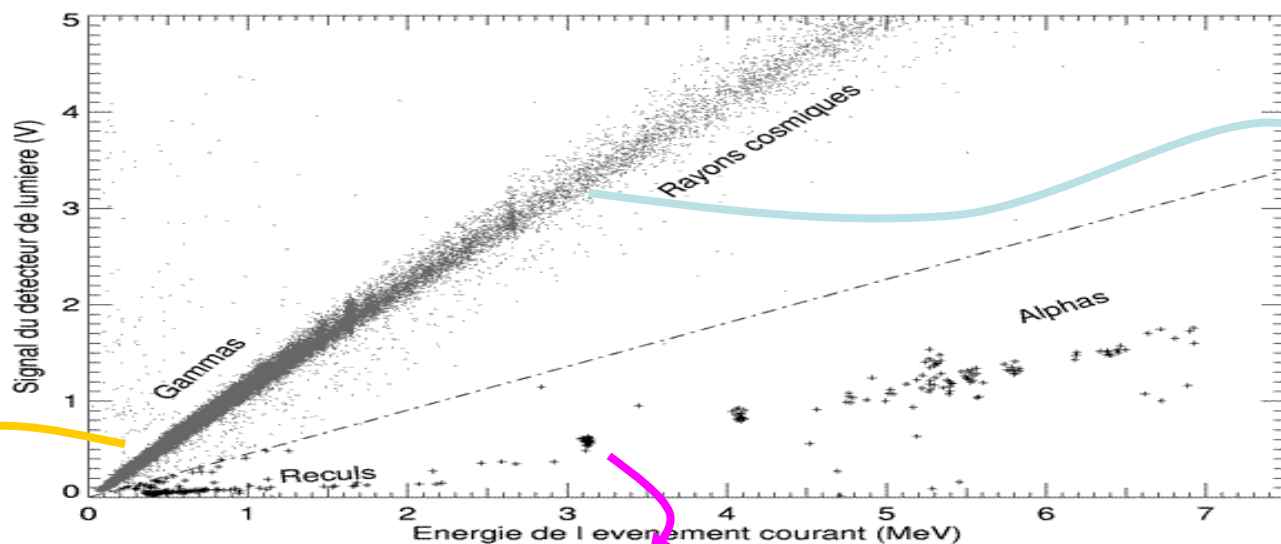
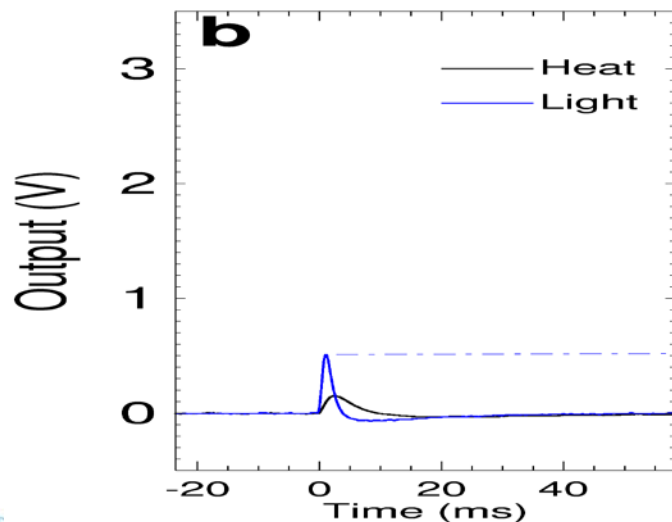


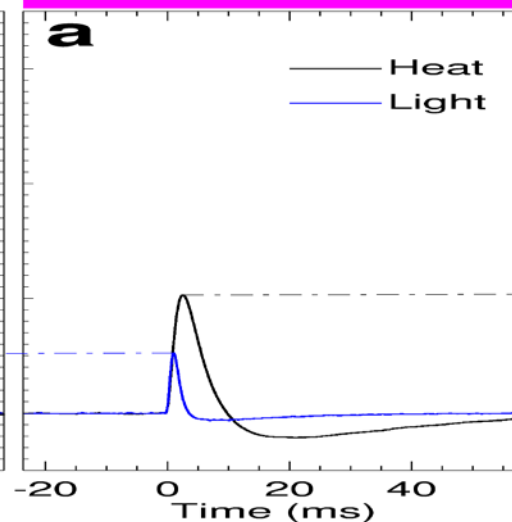
Diagramme de discrimination dans 46g BGO (5j)



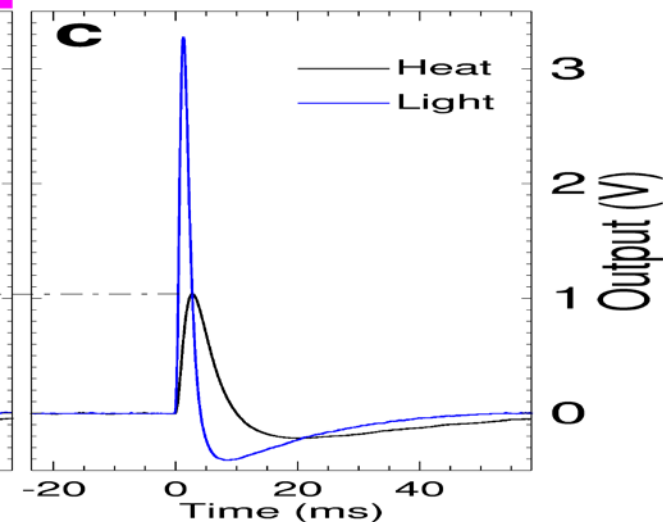
Gamma ray
E~500 keV



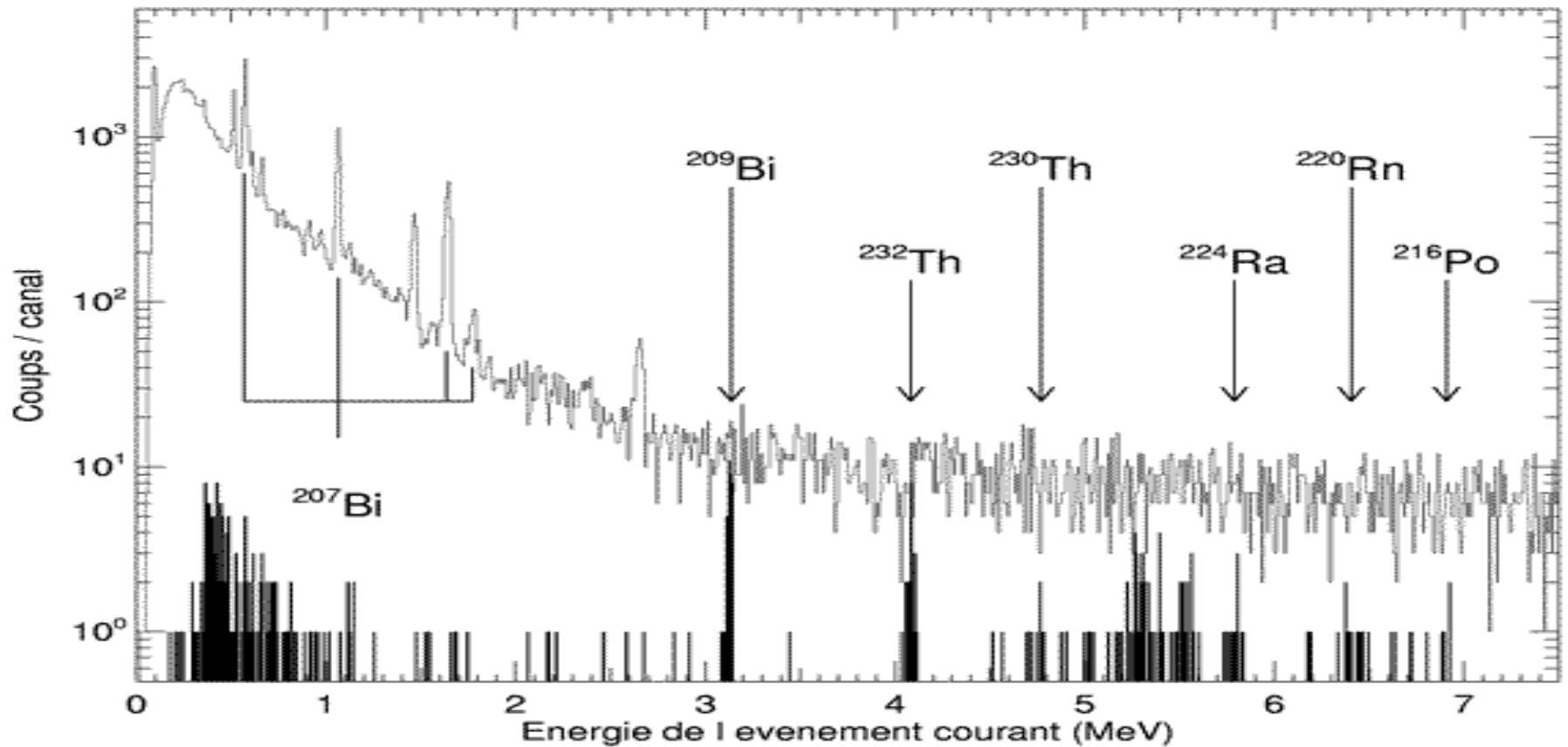
²⁰⁹Bi decay
E~3137 keV



Cosmic ray event
E~3.4 MeV



Spectres dans 46g BGO



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

^{209}Bi

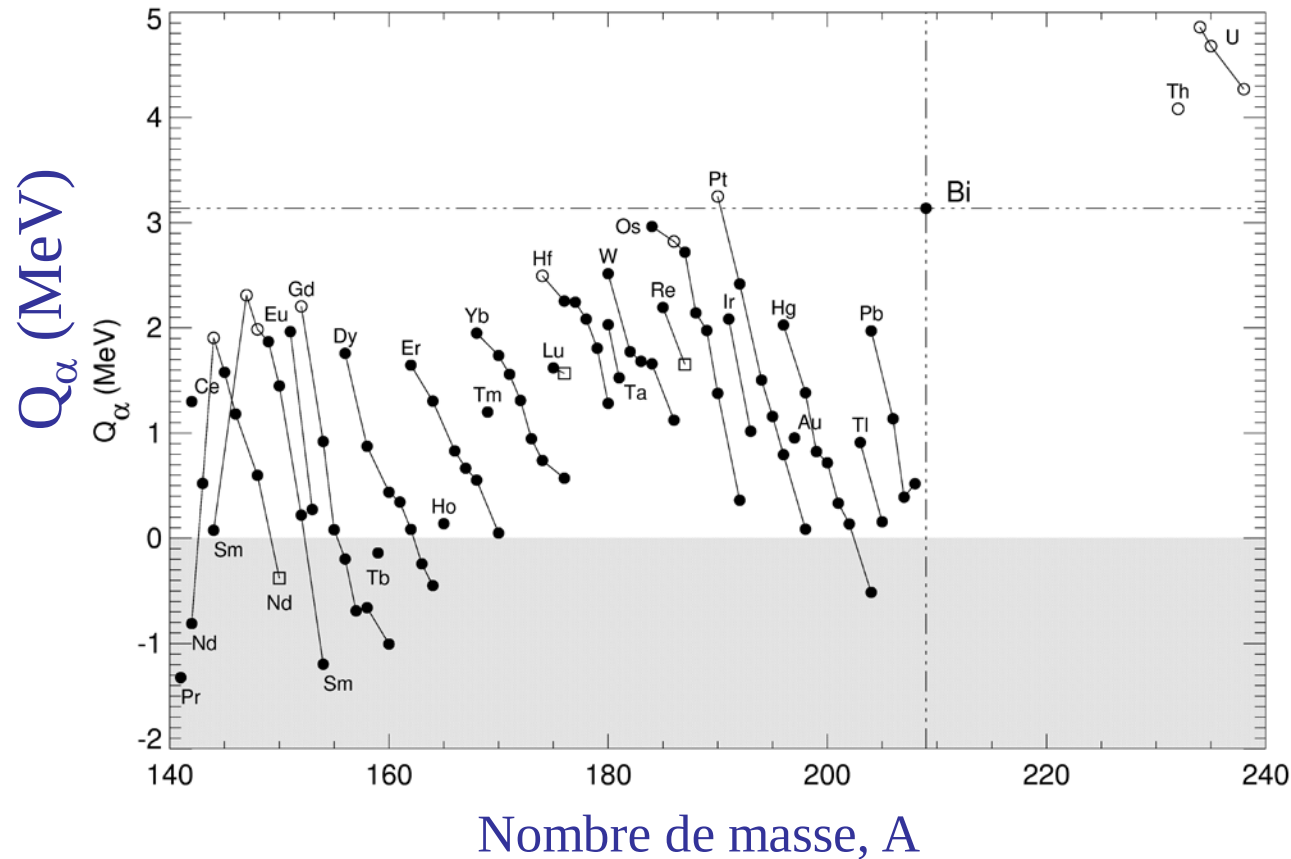


$$Q_{\alpha} = 3130 \pm 16 \text{ keV}$$

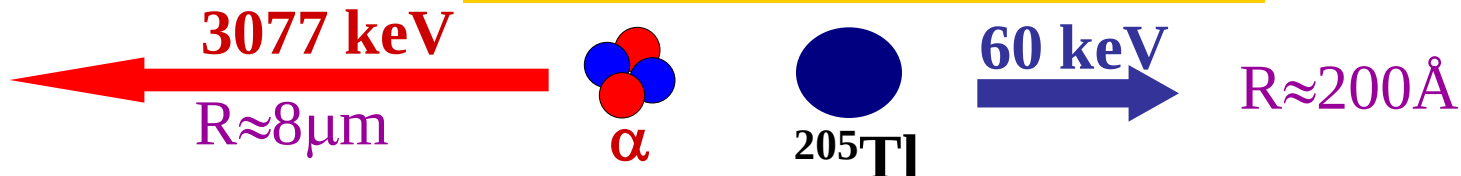
$$T_{1/2} = 1.44 - 1.95 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

Isotopes lourds stables, Q_α

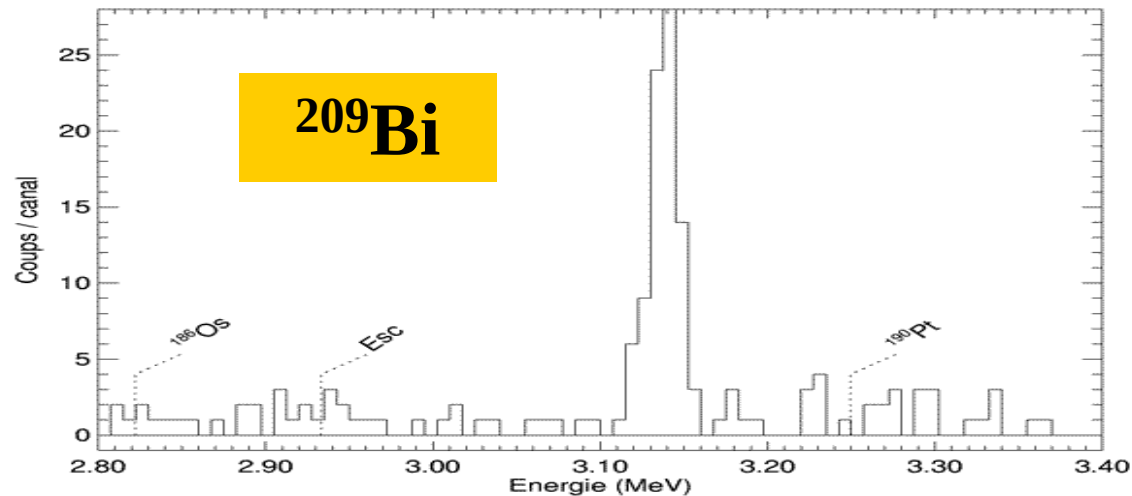
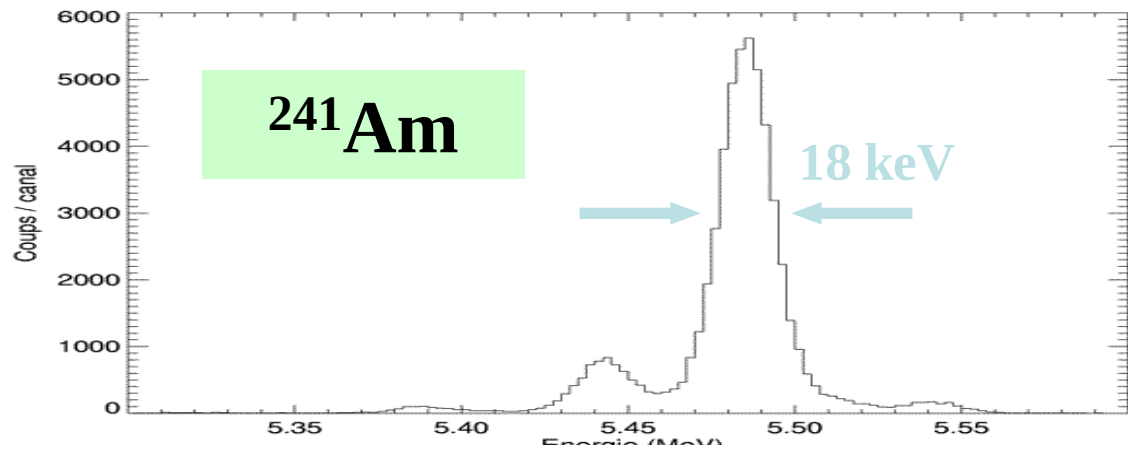
d'après Tables Audi et al. (1997)



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

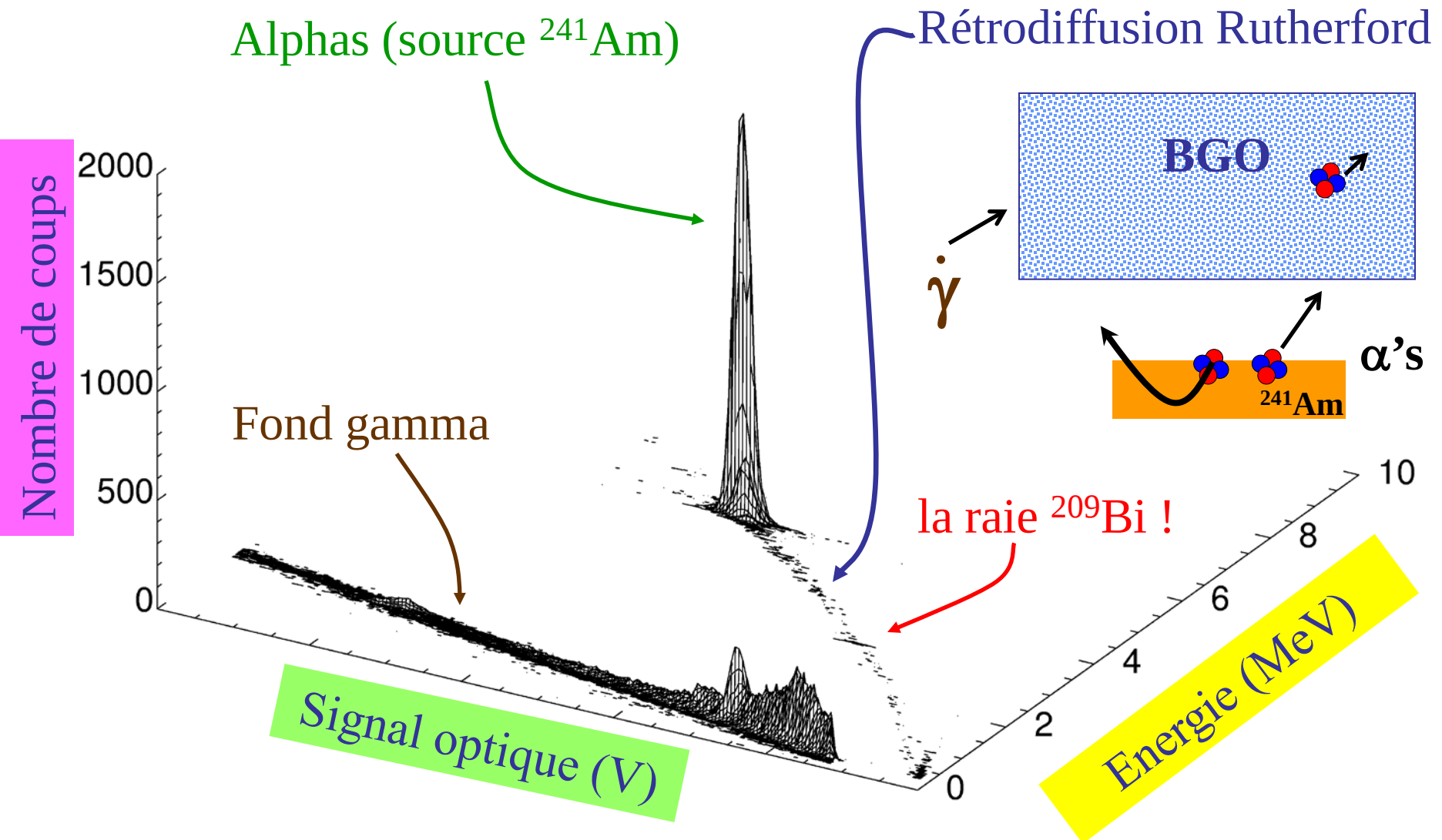


Spectres alphas finaux



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

Discrimination dans 91g BGO



^{209}Bi (bolomètres scintillants au Gran Sasso)

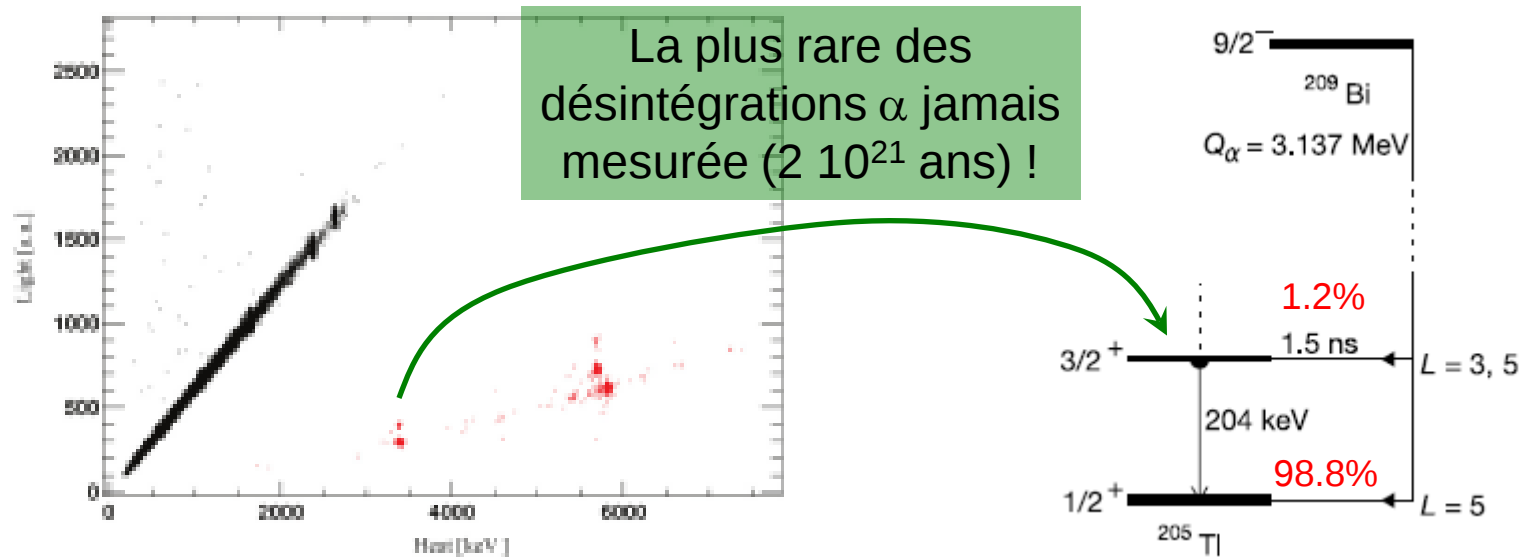
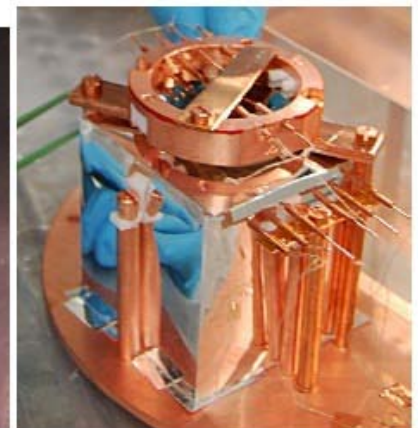
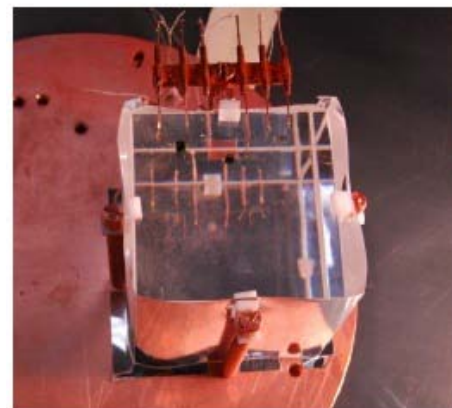


Figure 8.36: Scatter plot heat vs light of a $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ BGO crystal for a ~ 540 hours background measurement.

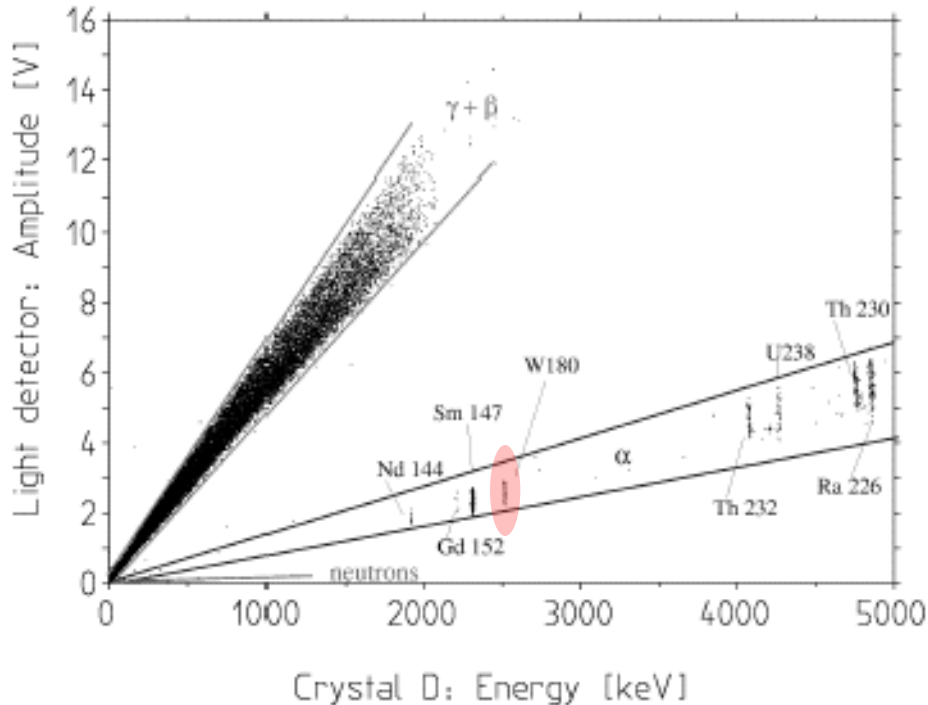
Thèse Luca Gironi, Univ. Milan, 2010

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

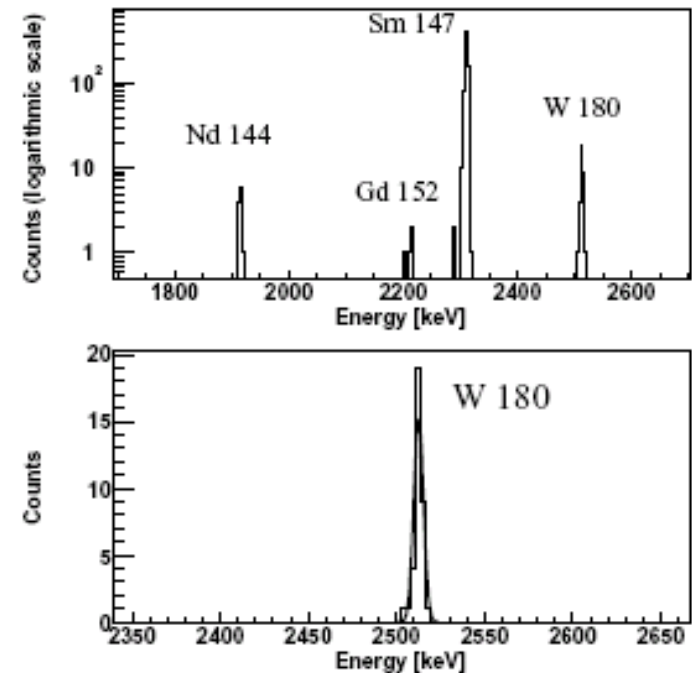


^{180}W (collaboration CRESST en 2004)

Fond haute énergie dans un bolomètre CaWO_4 de CRESST



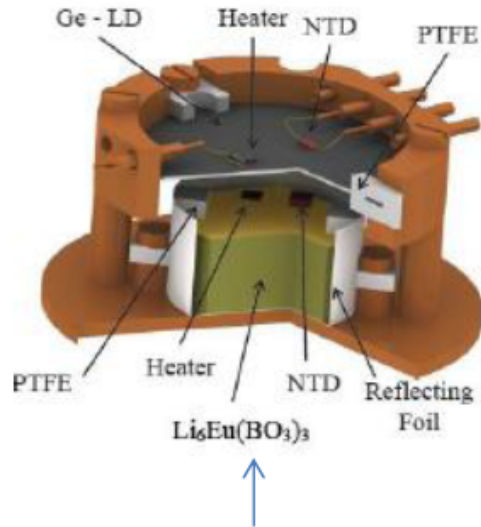
Spectres α



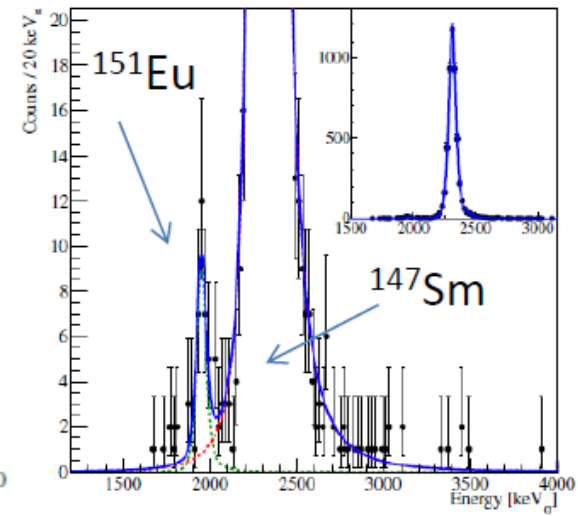
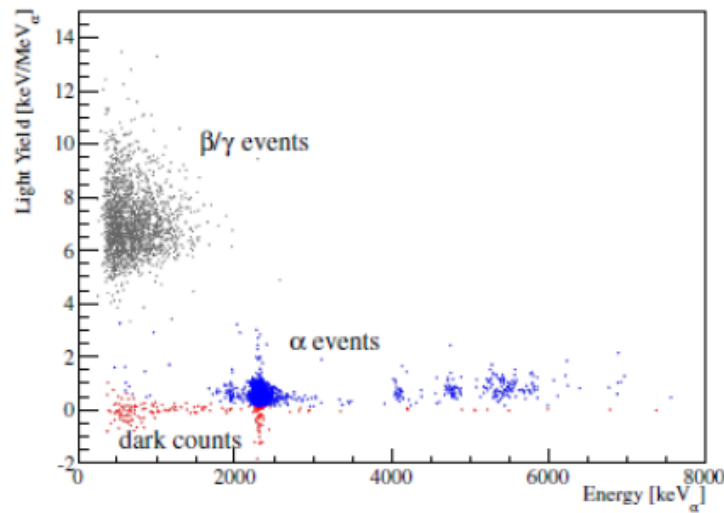
« The natural α -decay of ^{180}W has been unambiguously detected for the first time. The peak is found in a (γ , β and neutron)-free background spectrum. This has been achieved by the simultaneous measurement of phonon and light signals with the CRESST cryogenic detectors. A half-life of $T_{1/2} = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{18}$ y and an energy release of $Q = (2516.4 \pm 1.1 \text{ (stat.)} \pm 1.2 \text{ (sys.)})$ keV have been measured. New limits are also set on the half-lives of the other naturally occurring tungsten isotopes. »

^{151}Eu (bolomètres scintillants au Gran Sasso)

α 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}Eu α decay, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 41 (2014) 075101

d'après cours Fedor Danevich, 2015

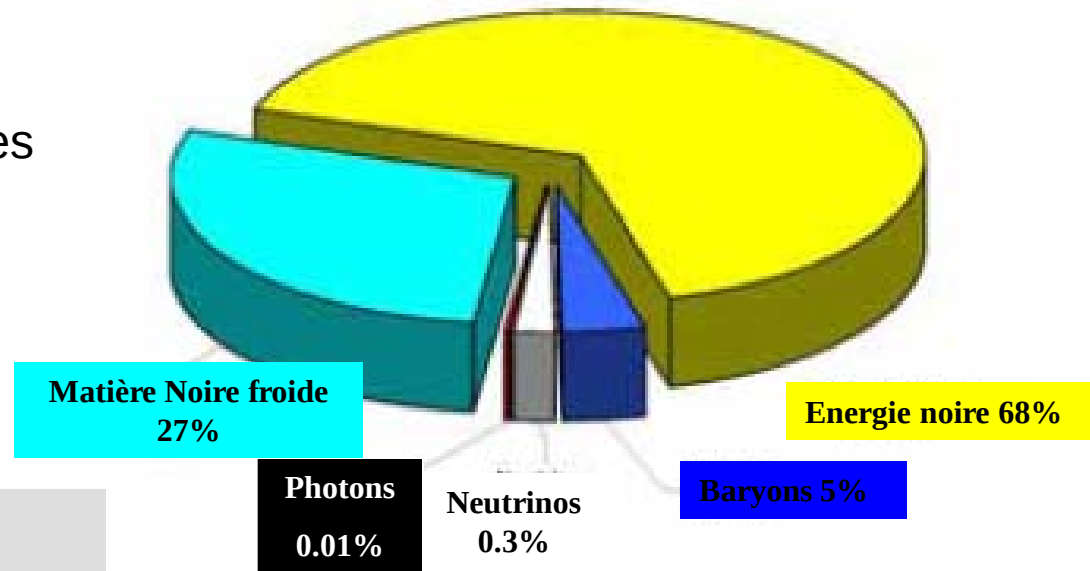
□ Détection de la Matière noire

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 $\approx 0.3 \text{ GeV/cc}$

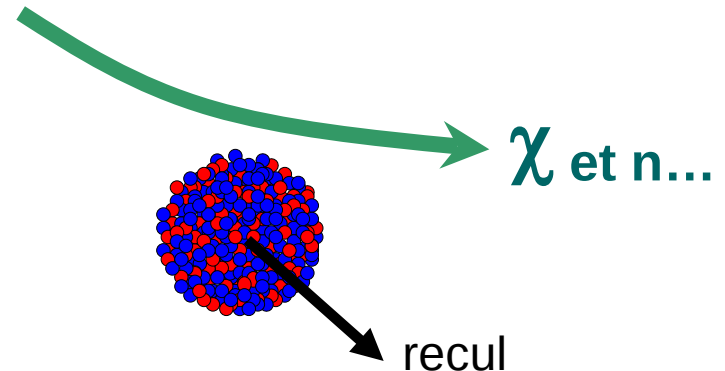
Contenu énergétique de l'Univers



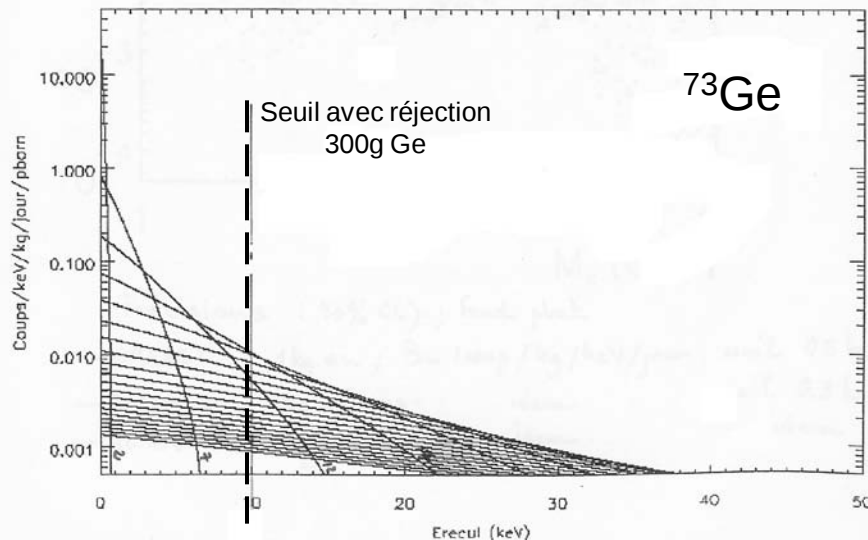
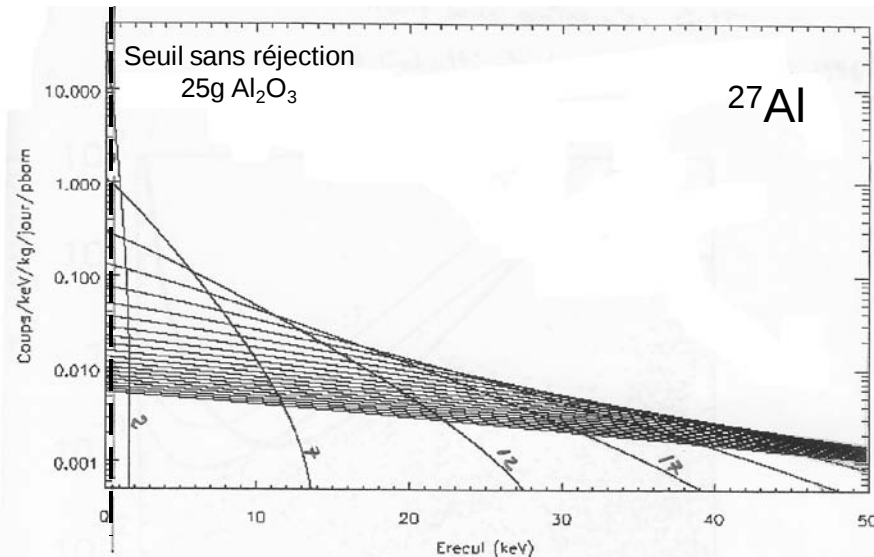
Une des candidats le mieux motivé:

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

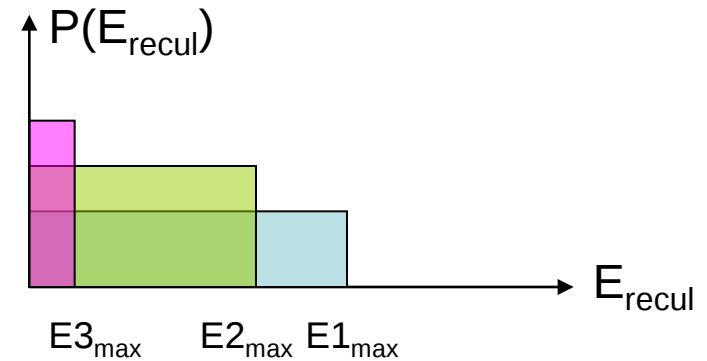
Weakly Interactive Massive Particles



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

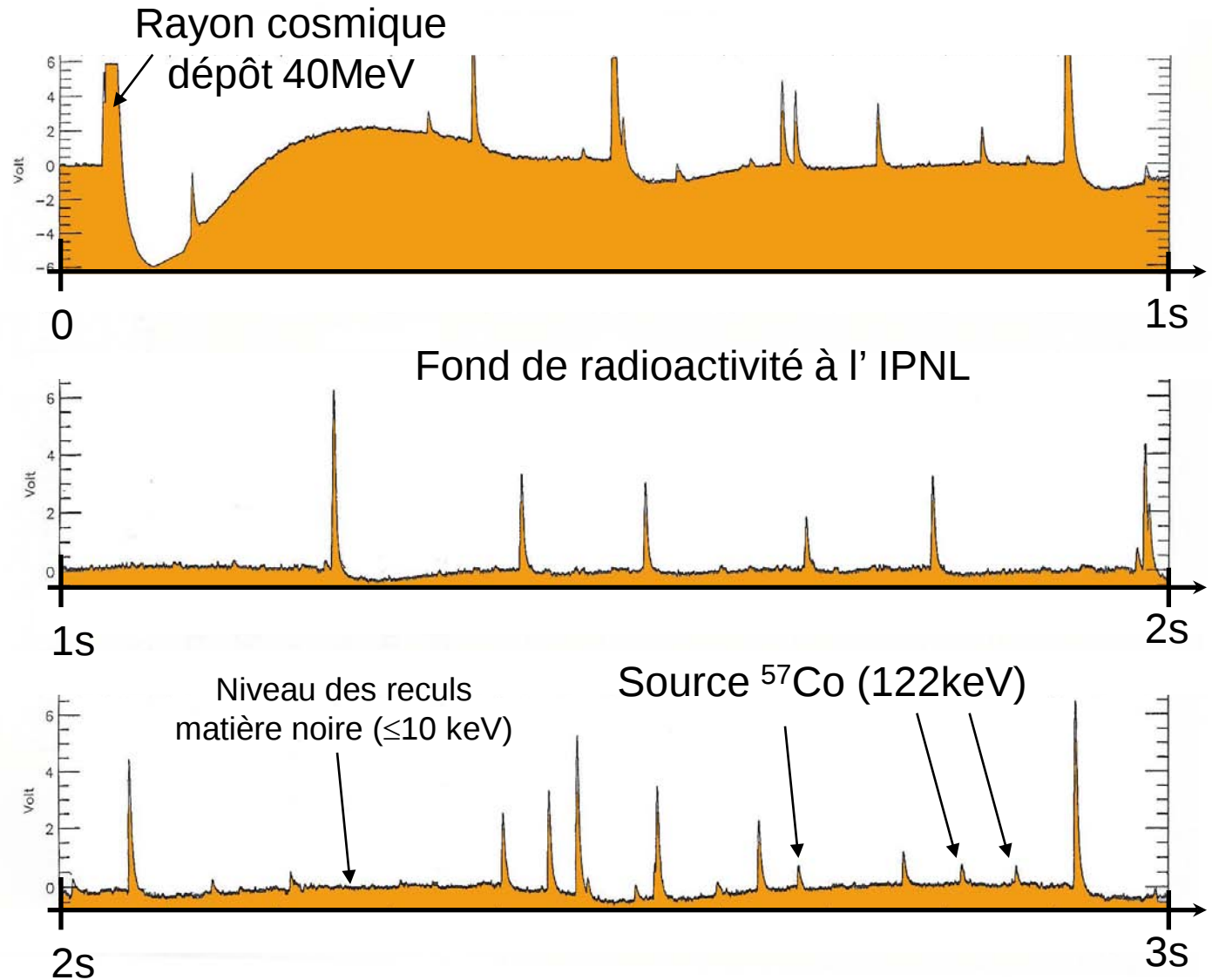


- Cinématique élémentaire $\rightarrow E_{\text{max}}$
(adaptation des masses: de la pétanque en labo !)
- Les faibles énergies de recul sont toujours « peuplées » $\rightarrow$ spectres piqués à basse énergie: **on recherche le meilleur seuil $\rightarrow$ bolomètres !**

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



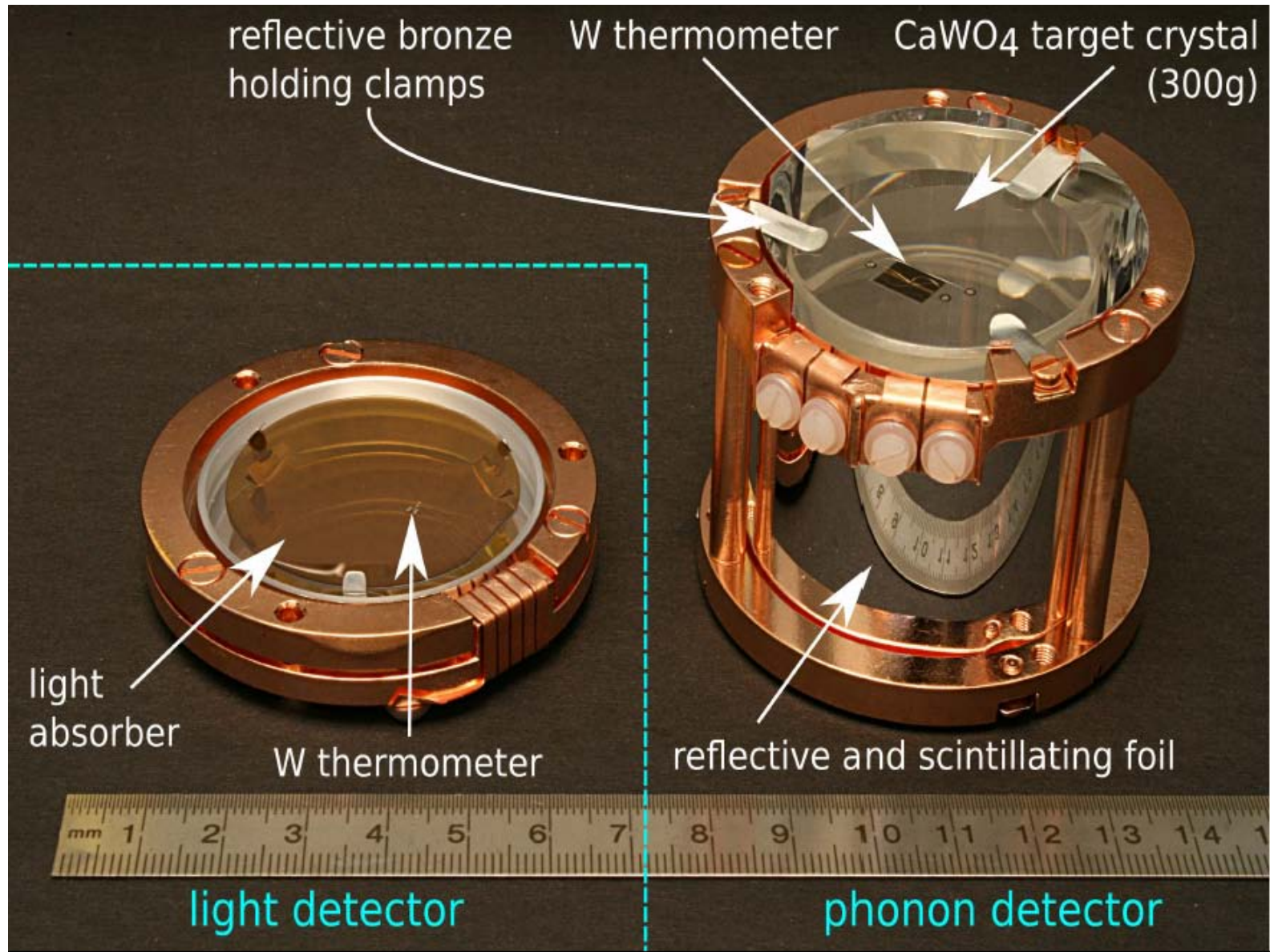
❑ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Lumière & chaleur »

- CRESST (TES; tunnel du GranSasso)

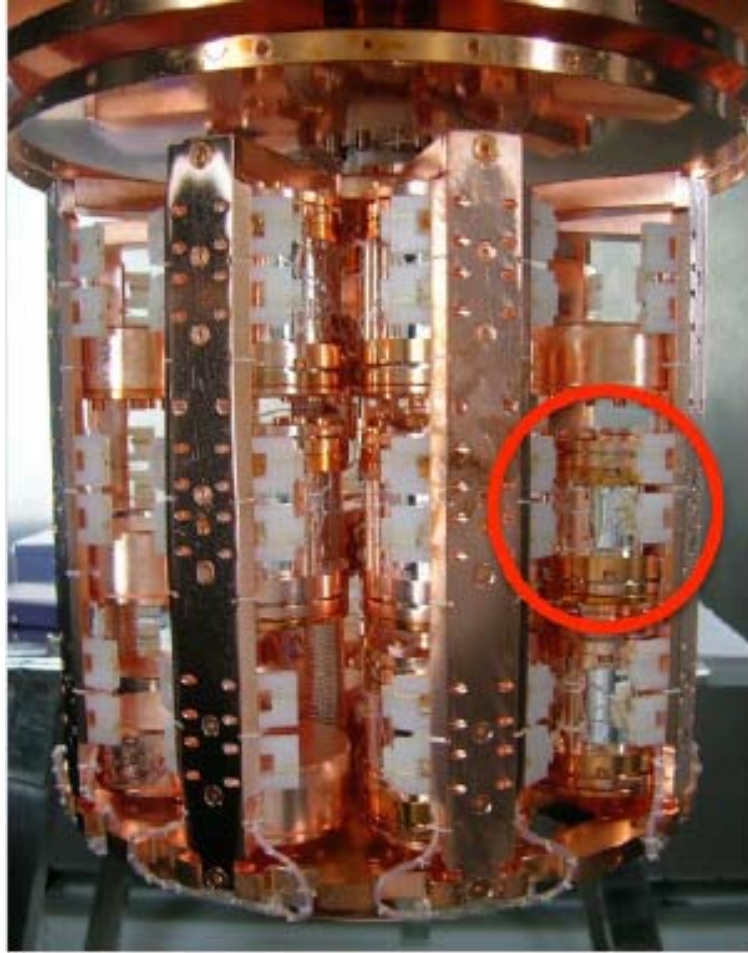
Collaboration MPI & TU München, Univ. d'Oxford, Univ. de Tübingen

Les détecteurs de CRESST (thermomètre TES en W)



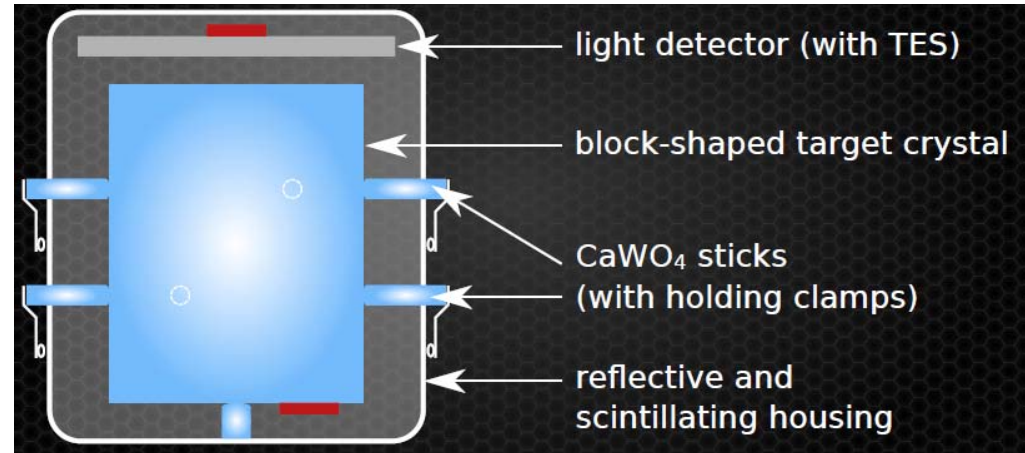
F. Reindl @ NDM'15

CRESST 2014 @ Gran Sasso

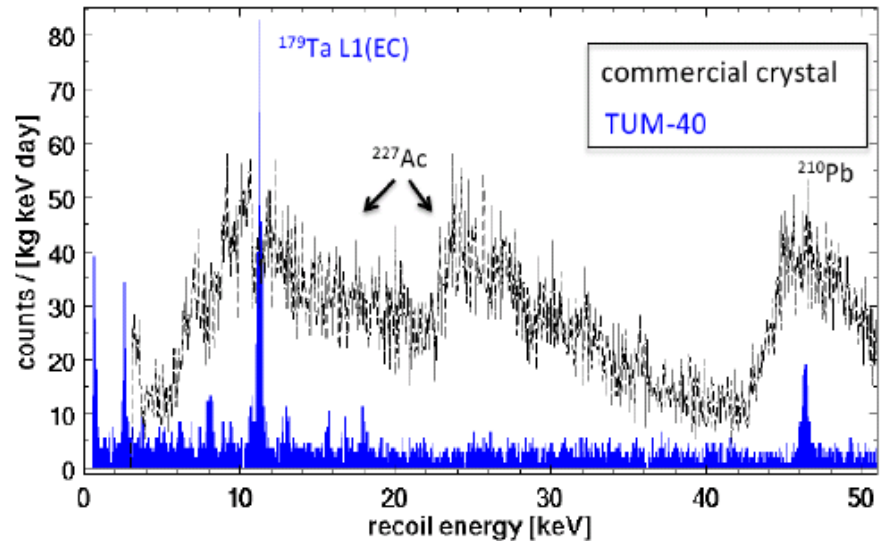


Réfrigérateur à dilution

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 CaWO_4 par trois techniques (*d'après W.Rau, CRESST coll.;TAUP2005*)

CaWO_4 Facteurs de quenching Q	Faisceau de neutrons pulsés et TOF @300K	Irradiation ionique @ 300K	Reculs sous irradiations n @10mK
O	12.8 ± 0.5	14.5 ± 0.8	8.2 ± 0.2
Ca	16 ± 0.4	26.7 ± 2.5	13.0 ± 1.7
W	>33 (2σ)	40.4 ± 4.2	

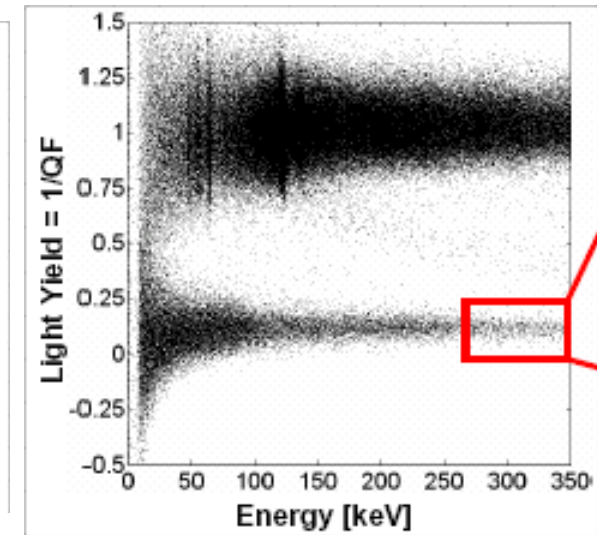
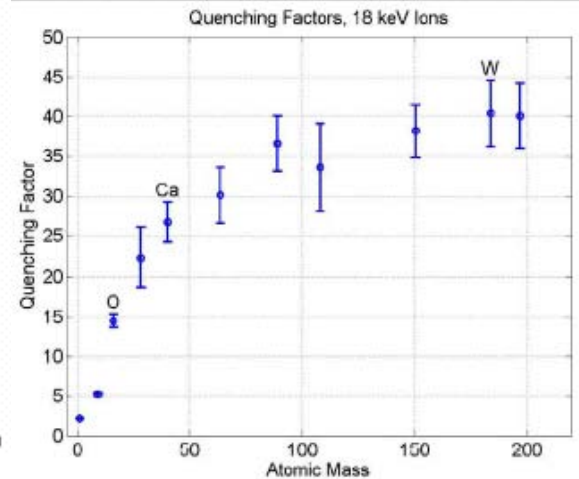
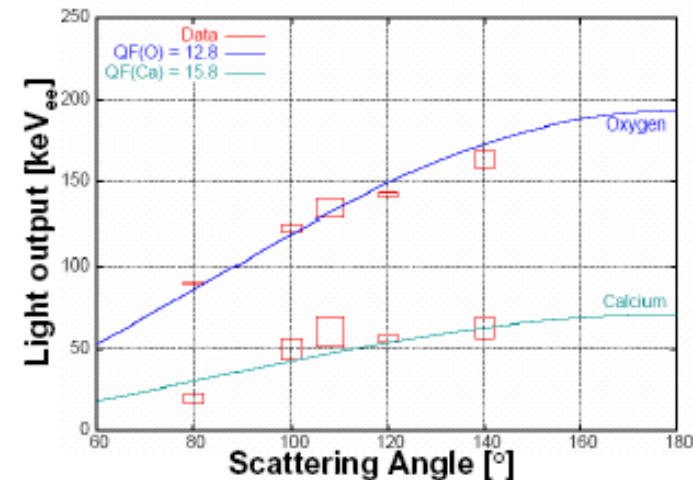
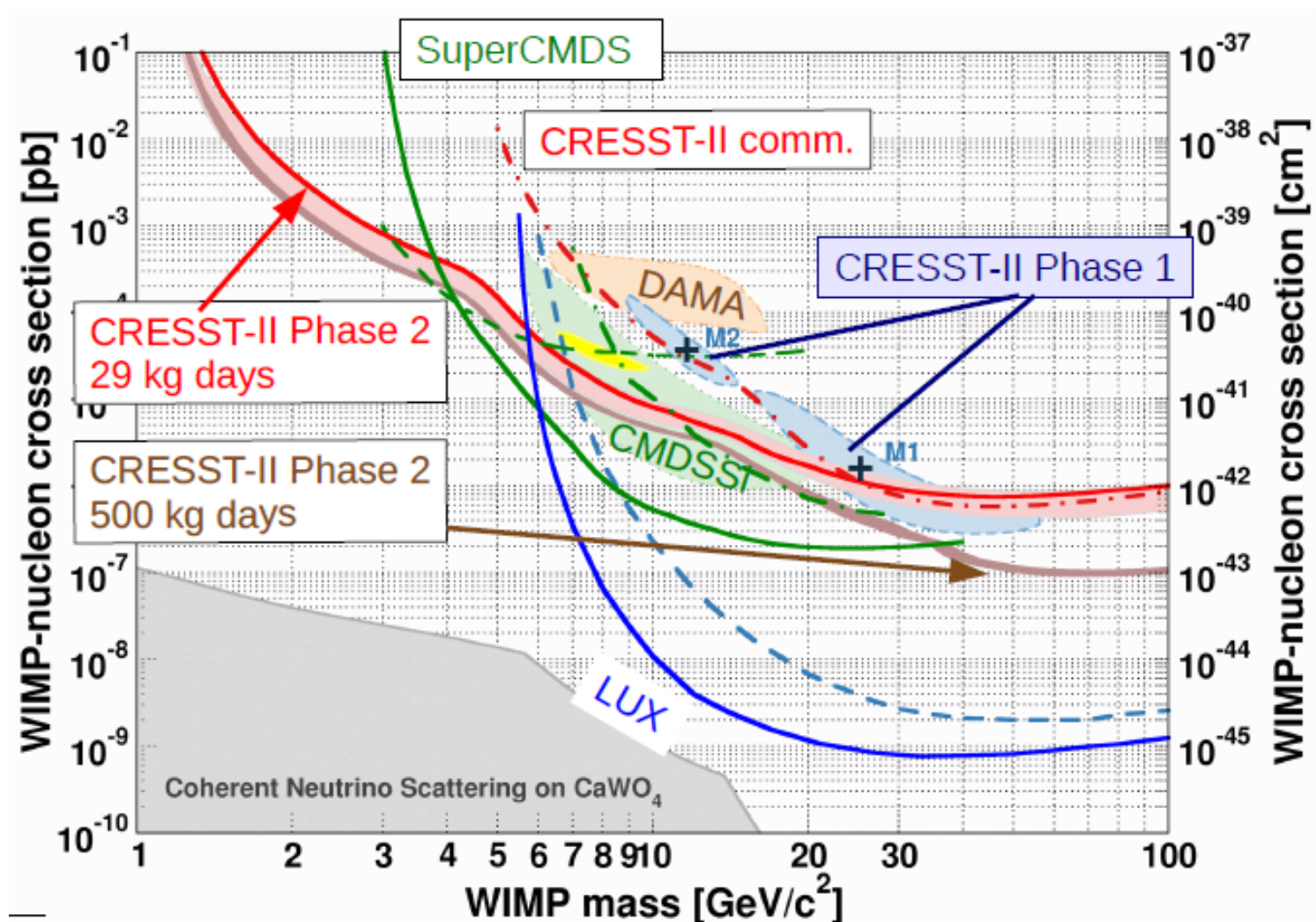


Diagramme d'existence de la Matière Noire (vue de CRESST)



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

Scintillateur NaI
(DAMA)

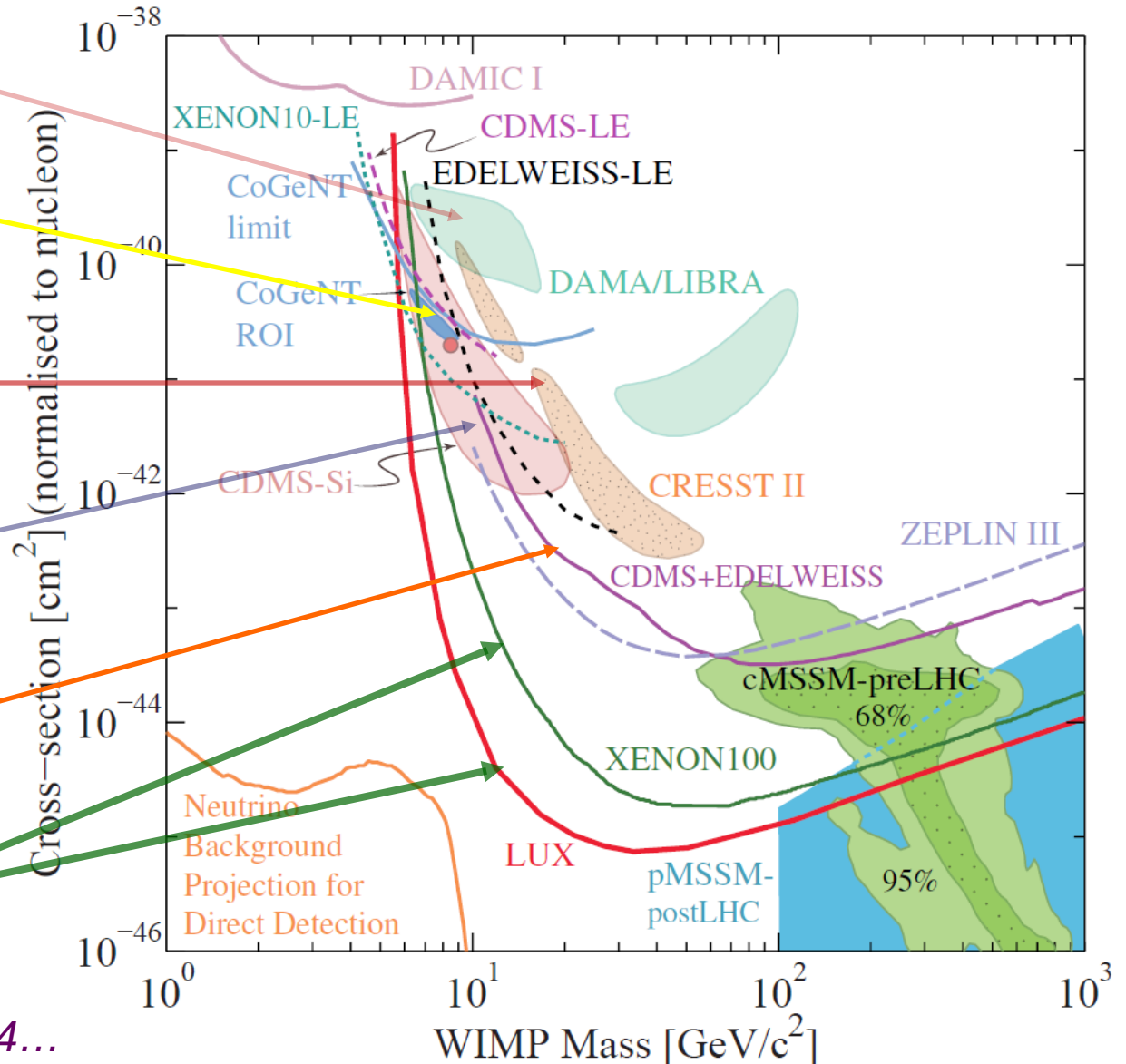
Diode Ge bas seuil
(COGENT)

Bolomètres
scintillants CaWO_4
(CRESST)

Bolomètres Si
(CDMS)

Bolomètres Ge
(EDELWEISS;
CDMS)

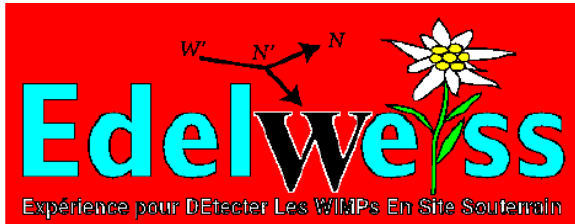
Détecteurs à
Xénon liquide



❑ Détection de la Matière noire

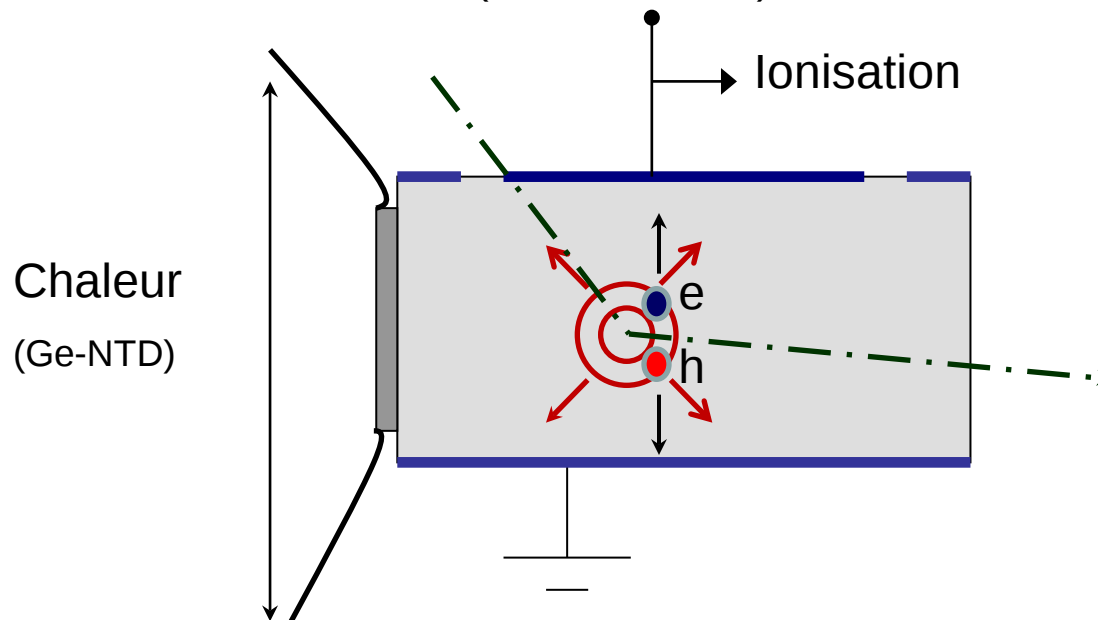
Avec discrimination « Charges & Chaleur »

CDMS (US), EDELWEISS (France)

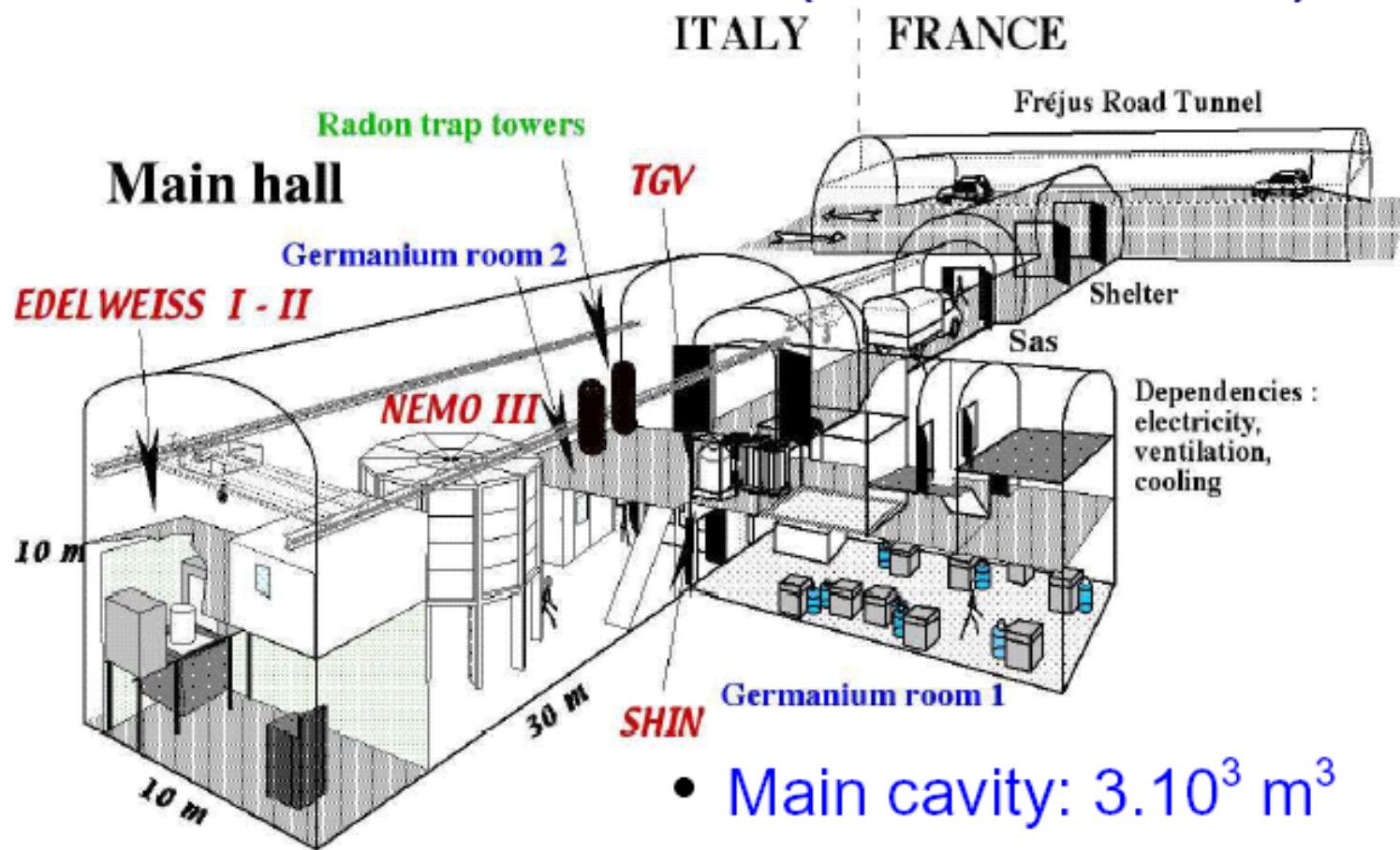


Expérience pour DÉtecter Les Wimps En Site Souterrain

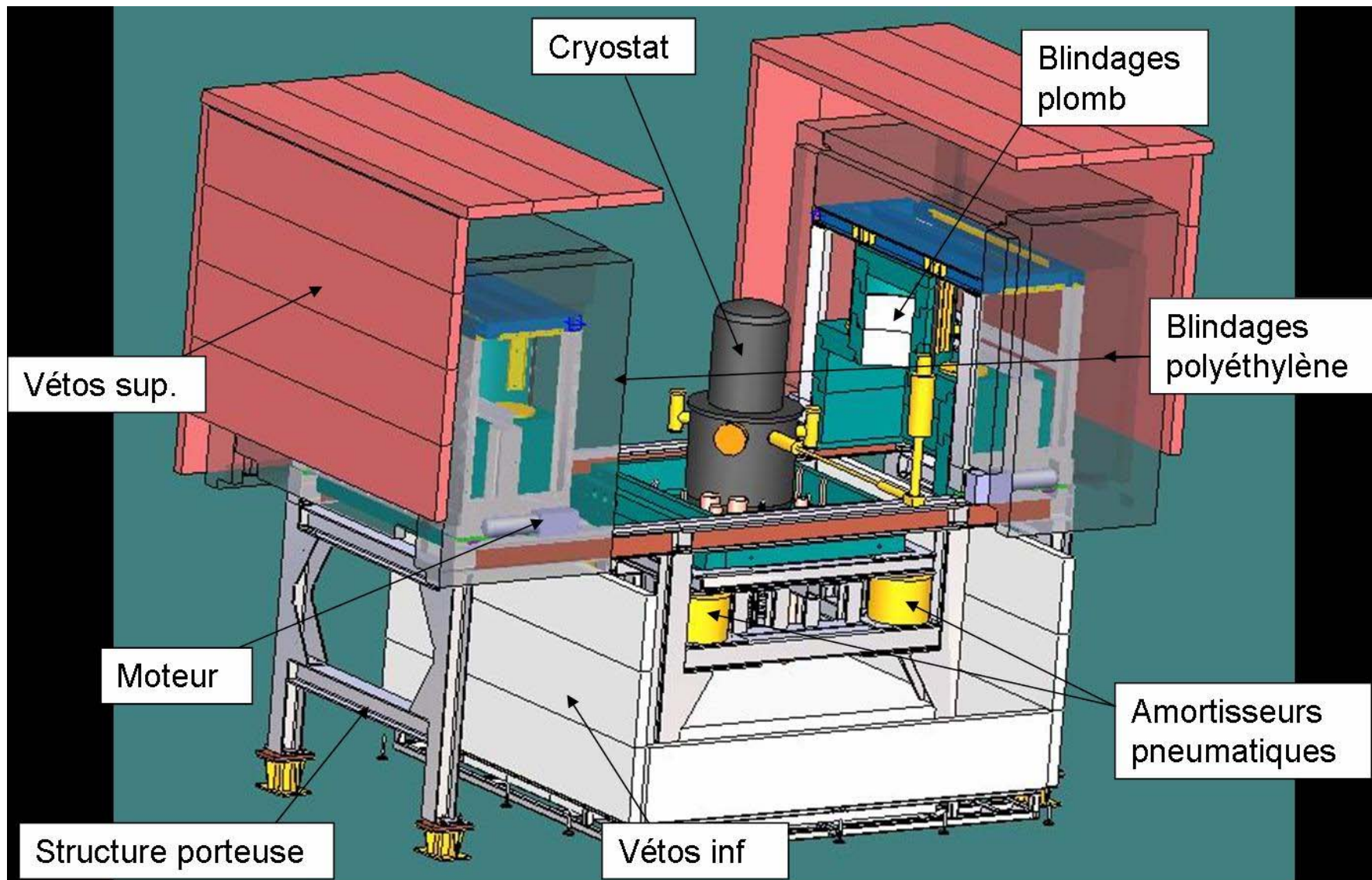
- ✓ tunnel du Fréjus (**LSM**, aboratoire Souterrain de Modane; 4500mwe; 1990→)
- ✓ collaboration **CNRS IN2P3 (CSNSM, IPNL), SPM (Institut Néel)**,
CEA (IRFU, SEDI & SPEC) + Univ. Kalsruhe; JINR Dubna (≈ 50 chercheurs)
- ✓ technique mixte « charges / chaleur » sur Ge;
- ✓ thermométrie EDELWEISS:Ge-NTD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



Inside the LSM (CNRS-CEA)



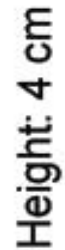
- Main cavity: $3 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
- Outside: offices, workshop and garage



C. Nones @ NDM15



Full Inter-Digitized
800 g HP-Ge Detector



9

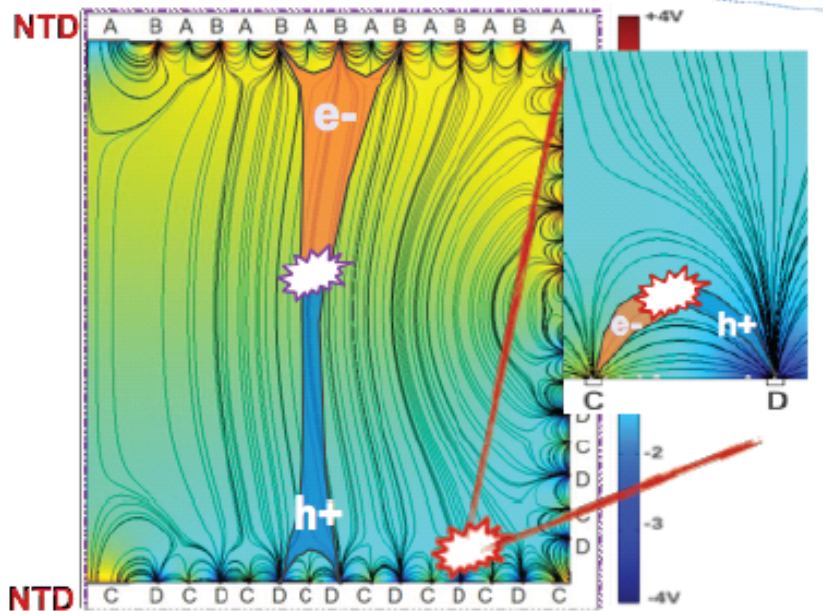
Détecteurs FID: principes de base

Simultaneous measurement

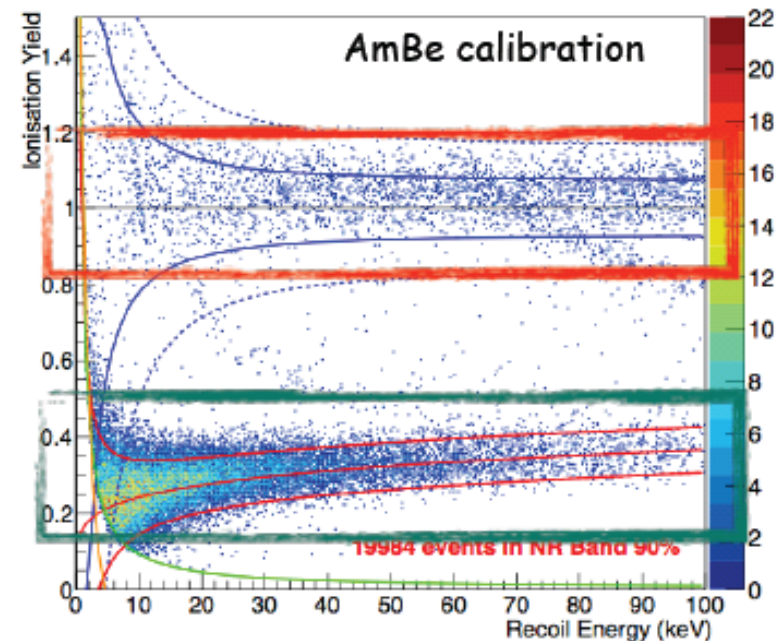
- Heat @ 20 mK with Ge/NTD thermometer
 - Ionization @ few V/cm with Al electrodes
- Evt by evt identification of the recoil

Most backgrounds (e, γ) produce electron recoils
Yield (Ionization/recoil) ~ 1

WIMPs and neutrons produce nuclear recoils
Yield (Ionization/recoil) ~ 0.3



FID800 Fiducial Events



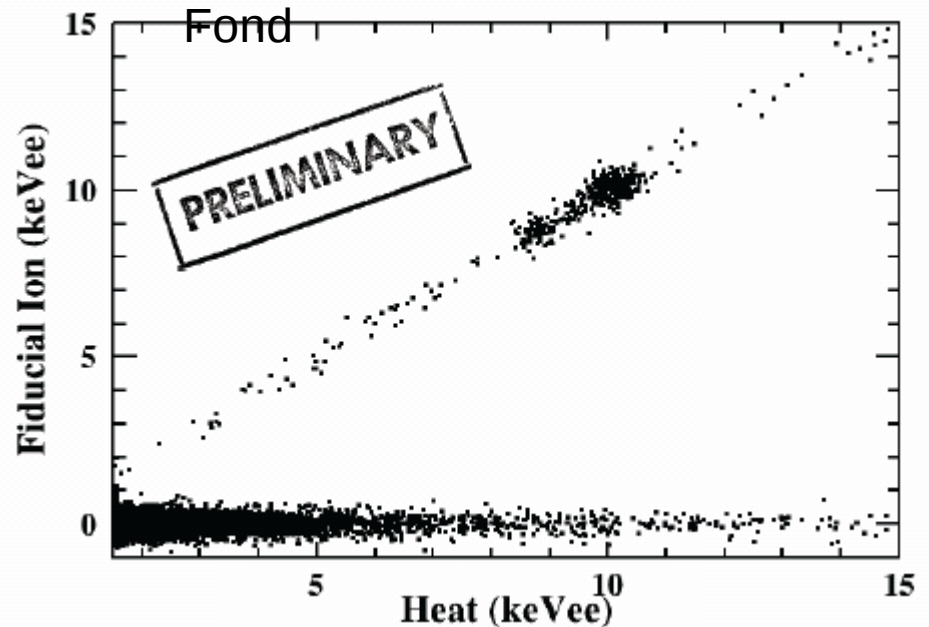
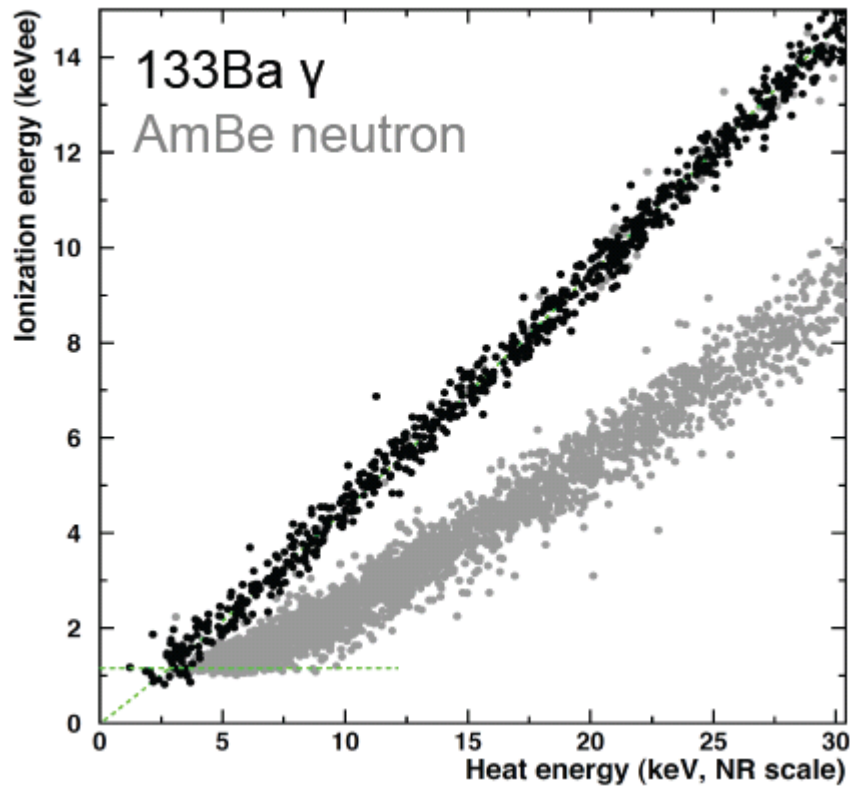
Surface Events

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

Bulk Event

Charge collected on fiducial electrodes B & D

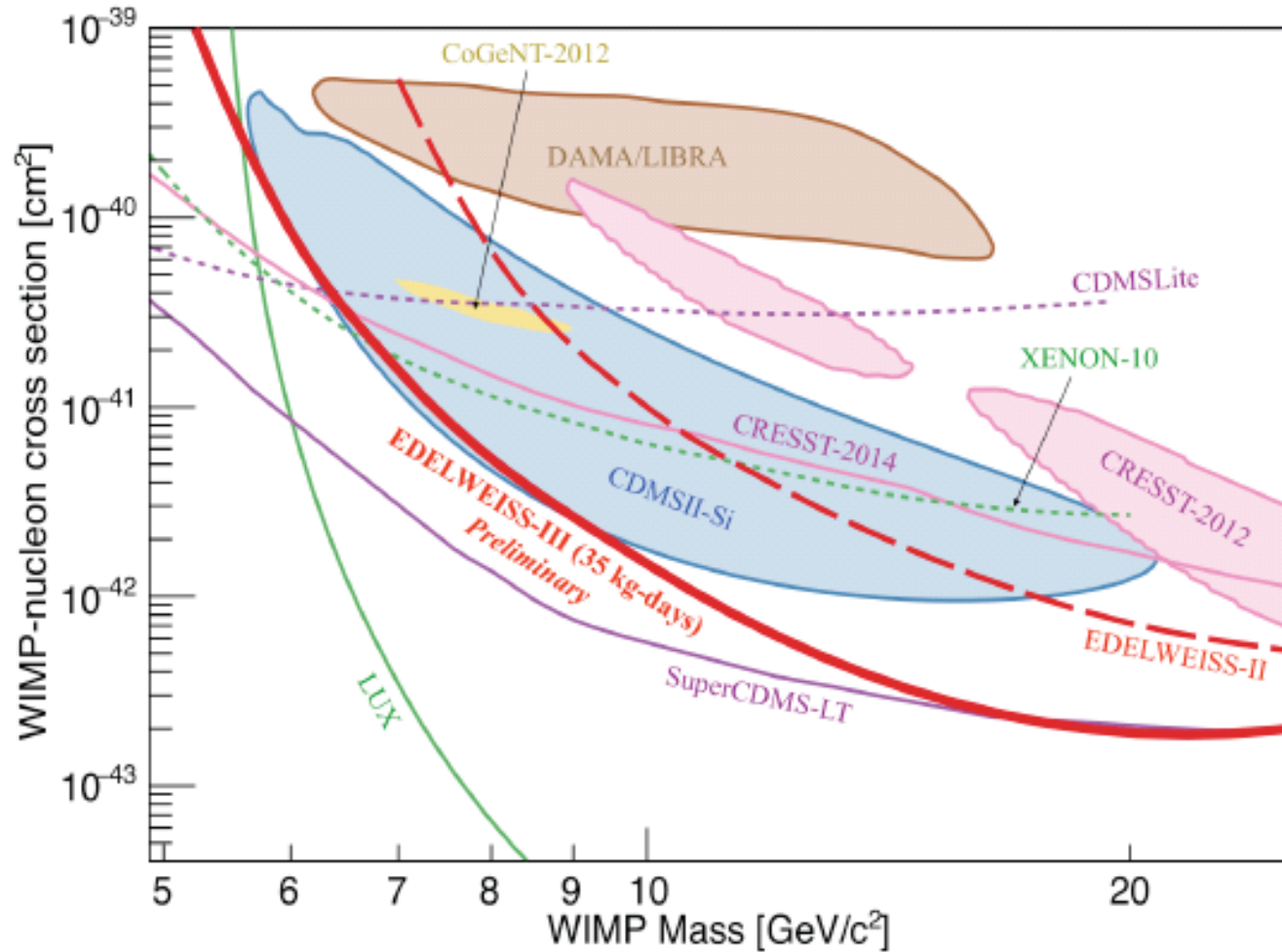
Calibration



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)

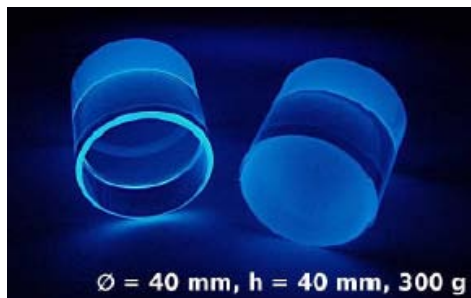
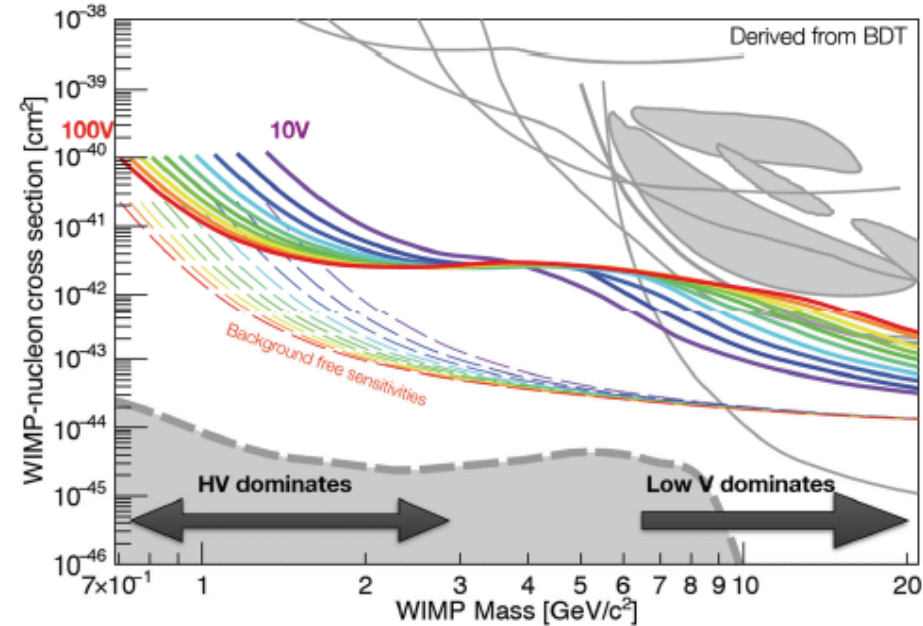
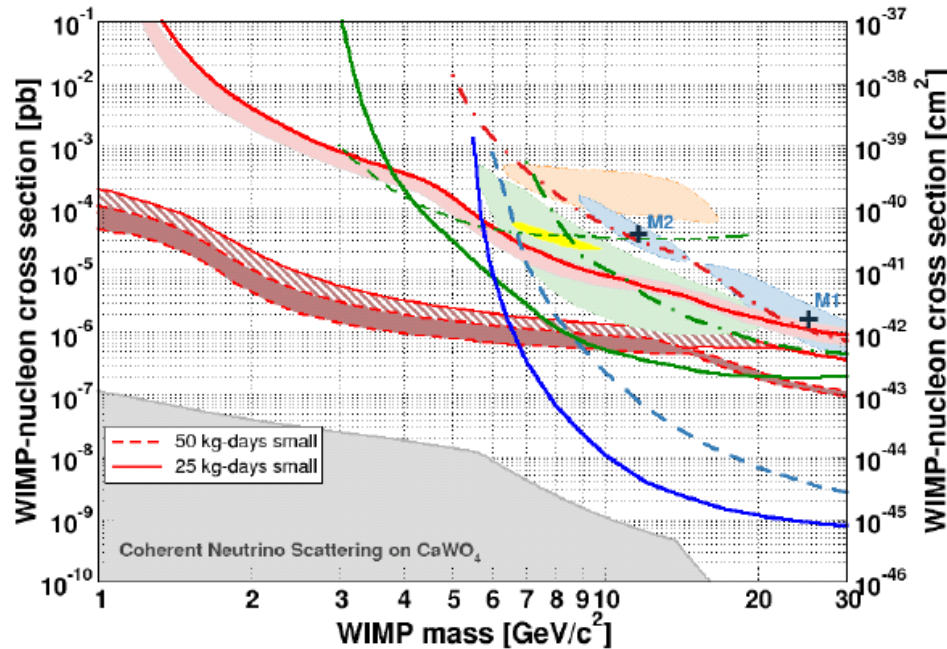


C. Nones @ NDM'15

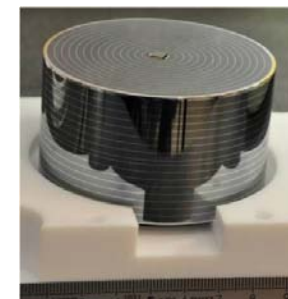
Course au seuil & prévisions

CRESST, CaWO_4
 300g $\rightarrow$ 24g
 600eV $\rightarrow$ 100eV

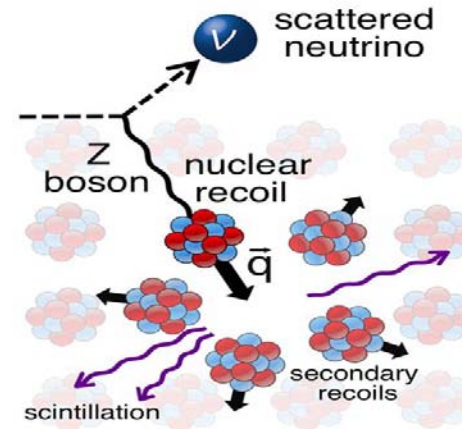
EDELWEISS, Ge
 + R&D: amplis HEMT
 effet « Neganov-Luke »



sans compter
 les autres...



(*) Coherent Elastic scattering
of Neutrinos off Nuclei
Diffusion élastique cohérente
des neutrinos sur les noyaux

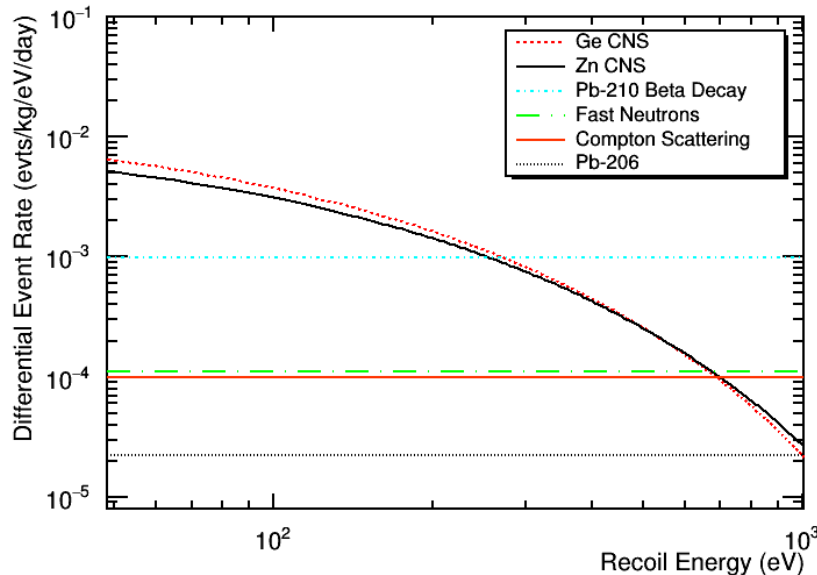


D. Akimov et al., Science 10.1126/science.aao0990 (2017).

- ✓ prédite depuis 1974
- ✓ observée pour la 1ère fois en 2017 (**COHERENT** @ ORNL; dans CsI) !
- ✓ **taux de réaction** $\propto N^2$ quand $\lambda_\nu >$ taille du noyau (effet de “cohérence”)
 - favorisée pour les neutrinos de basse énergie ($< \text{MeV}$)
- ✓ insensible à la saveur du neutrino
- ✓ le signal est **un noyau de recul, de faible énergie**
 - auprès des réacteurs ou accélérateurs (Φ_ν intense), propositions de **manips “à la matière noire”**, mais **à plus bas seuil**... Encore plus dur ?
 - BONUS: possibilité d’éteindre le faisceau pour extraire le signal du fond

→ Étude des propriétés des neutrinos (conformité au modèle standard ?)

□ RICOCHET (←EDW)

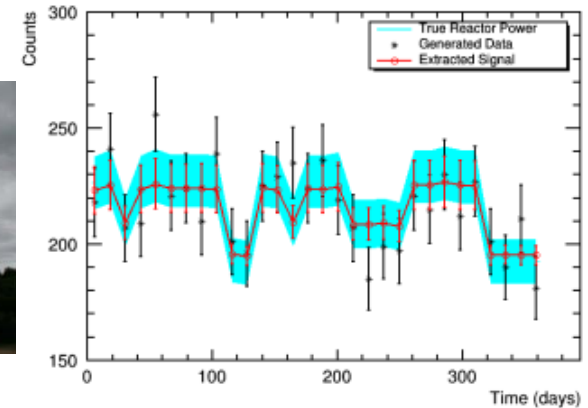


Signal attendu dans Ge et Zn 30-50g à $\approx 400\text{m}$ des réacteurs



@ CHOOZ

Extraction du signal espérée
grâce aux arrêts du réacteur

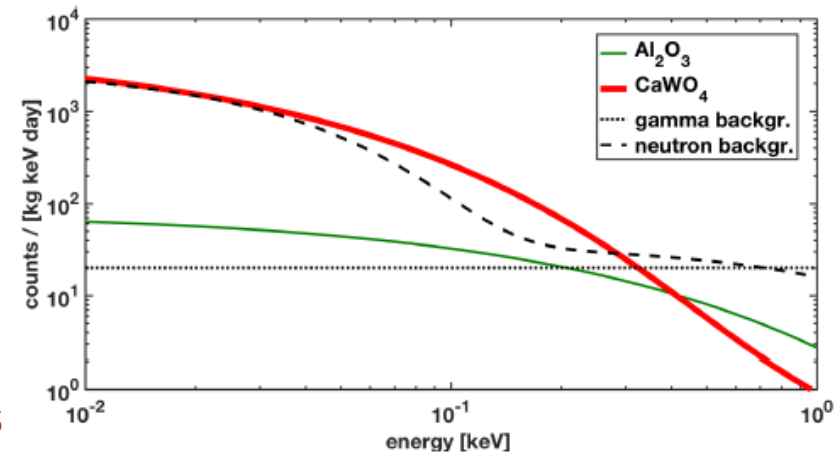


□ ν -CLEUS (←CRESST)

Matrice de cibles sub-g en CaWO_4 , Al_2O_3

CEvN

Neutrons
rapides



Signal attendu à 3m d'un réacteur de recherche de 20MW

J. Billard et al, arXiv:1612.09035v1

R. Strauss et al, arXiv:1704.04320v2,

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**