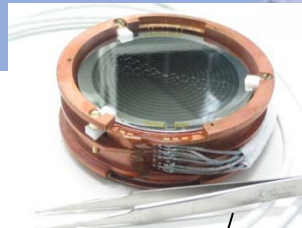
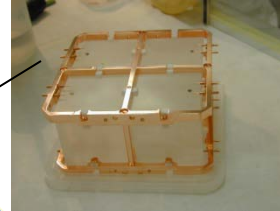


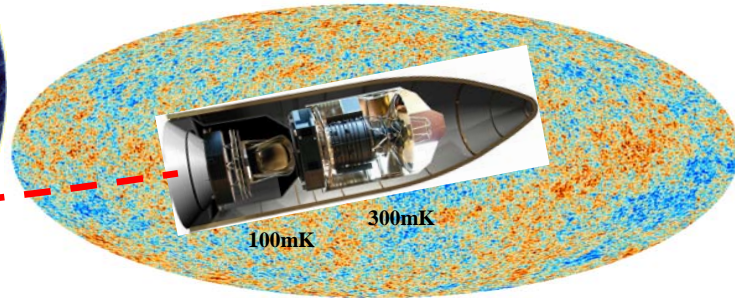
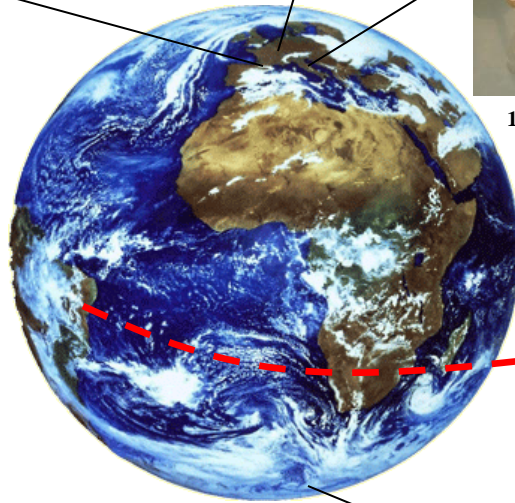
20mK



18mK



10mK



# Détecteurs bolométriques refroidis

## 2. Applications

300mK



??

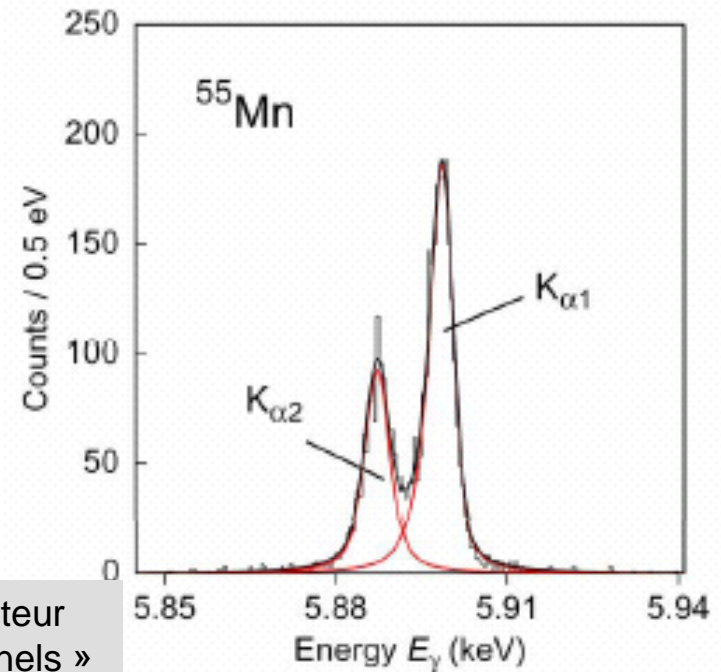
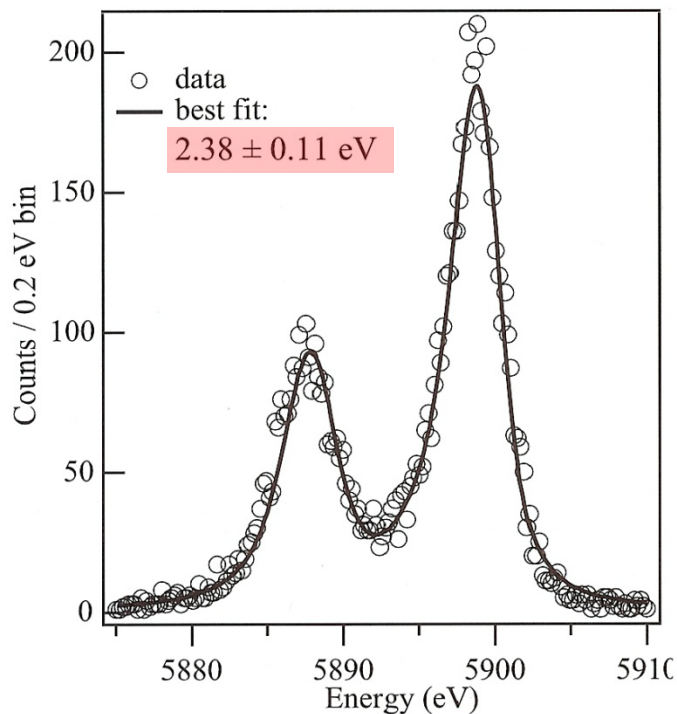


## Applications des bolomètres:

- En spectroscopie
  - X,  $\gamma$
  - $\alpha$
  - Neutrons
  - Noyaux de Reculs, ions lourds
- En physique fondamentale
  - Rayonnement fossile cosmologique (CMB): Archéops ; Planck-HFI
  - Masse du neutrino
  - Recherche d'événements rares
    - Double bêta sans neutrino
    - Détection de la Matière noire
      - Avec discrimination « Charge & chaleur »: CDMS (US) ; EDELWEISS (Fr)
      - Avec discrimination « Lumière et chaleur »: CRESST (All.); ROSEBUD (Fr, Es)
    - Désintégrations rarissimes
- Tendances: polarisation du CMB, matrices

□ spectroscopie X,  $\gamma$

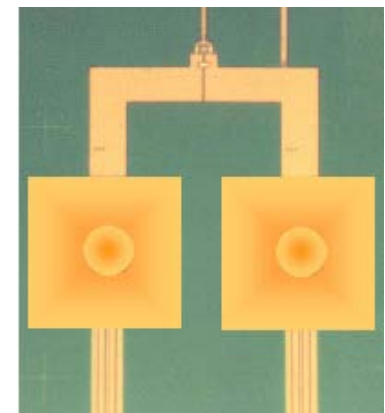
# Spectroscopie X très haute résolution...monopixels



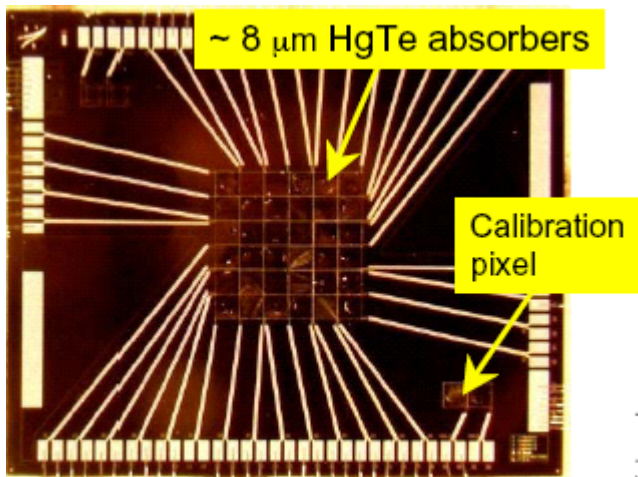
Rappel: les détecteur Si(Li) « conventionnels » plafonnent à 110eV !

- 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



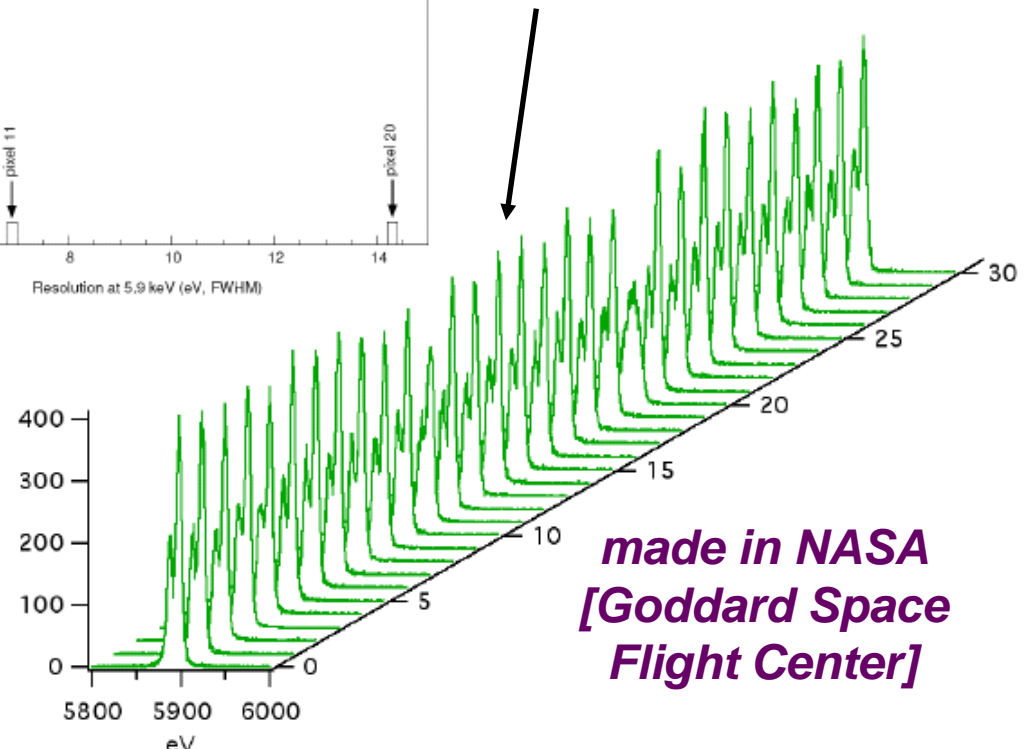
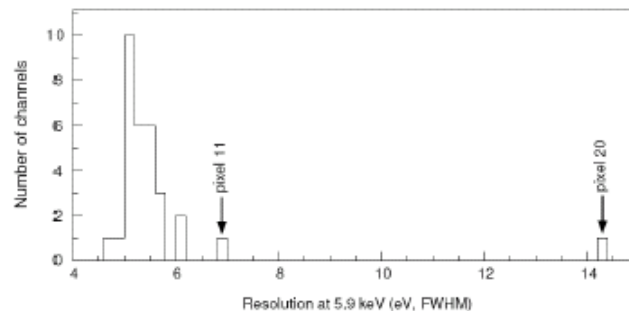
# Spectroscopie X: matrice 6 x 6 de l'instrument XRS



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 !

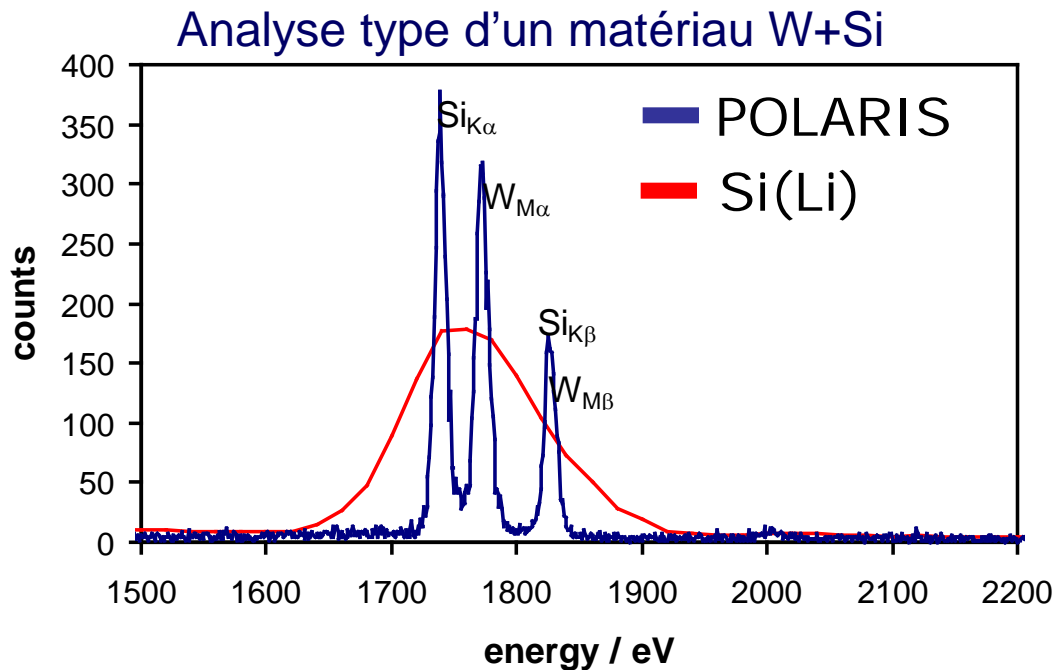
- matrice 6x6 à bord de Suzaku (ex Astro-E2)
- télescope: miroir en incidence rasante
- thermométrie Si implanté;  $T=60\text{mK}$
- résolution moyenne:  $\Delta E=5.5\text{ eV FWHM @ } 5.9\text{ keV}$



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

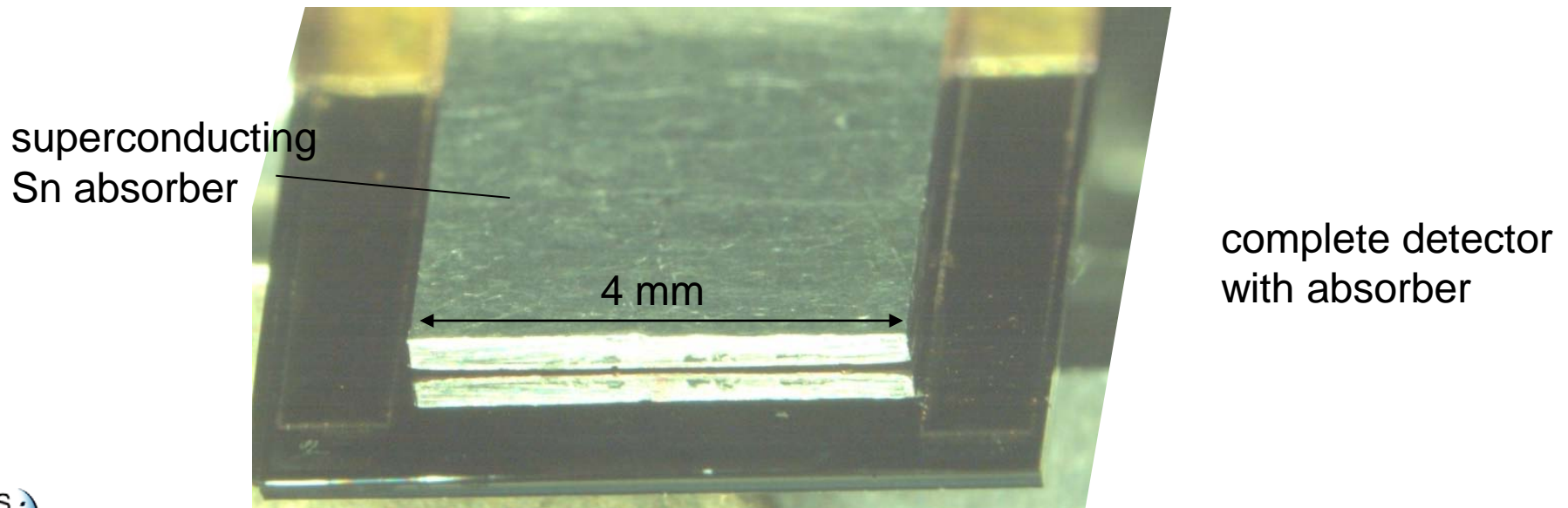
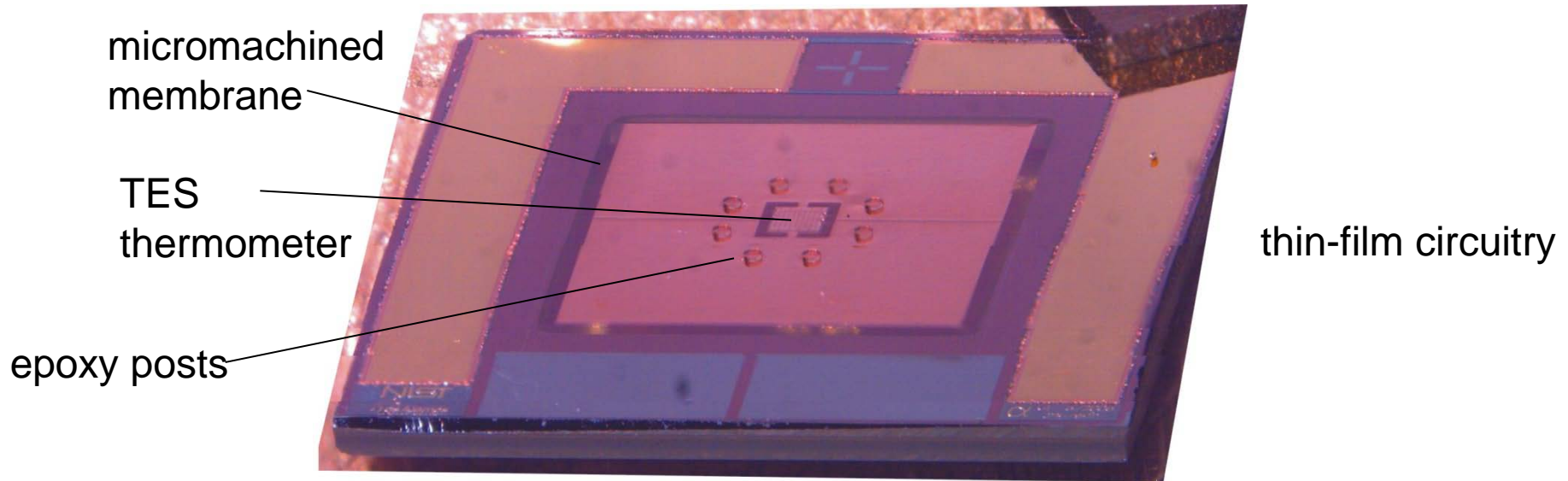


Coût ≈ 500 k€

□ spectroscopie  $\alpha$

# Microcalorimètres alpha du NIST

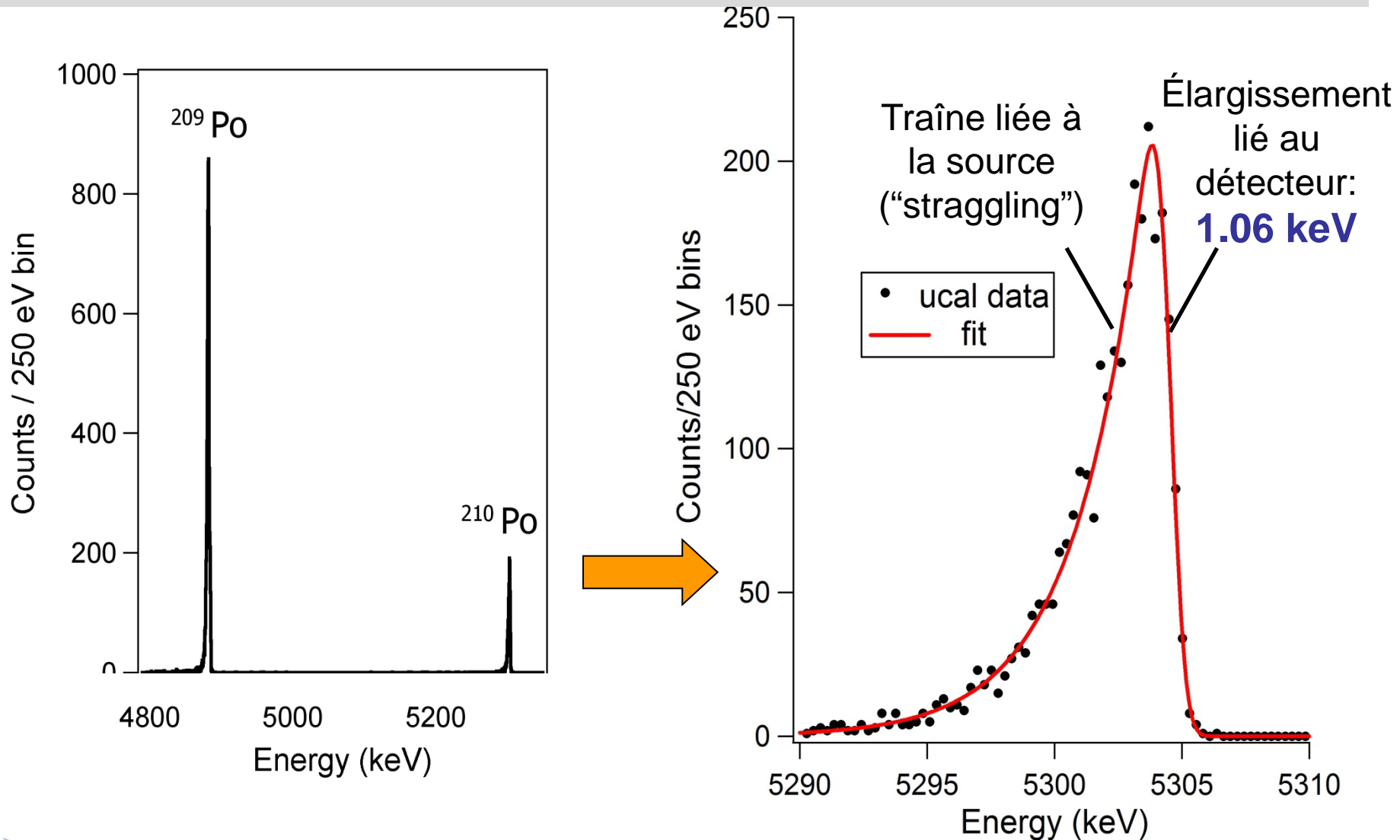
présentation de J. Ullom @ LTD13





# Spectre alpha d'une source de Polonium

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



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

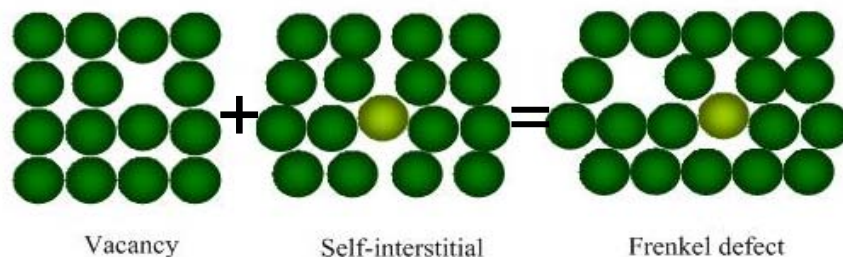
Origine	$\Delta E$ (eV)
Bruit thermodynamique	102- <b>380</b>
éjection d'électrons	80
variation de T	135
Ligne de base (électronique)	320
Somme quadratique des bruits connus	520
$\Delta E$ mesuré	$1060 \pm 60$
→ <b>Source résiduelle de bruit</b>	<b>925 eV !</b>

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

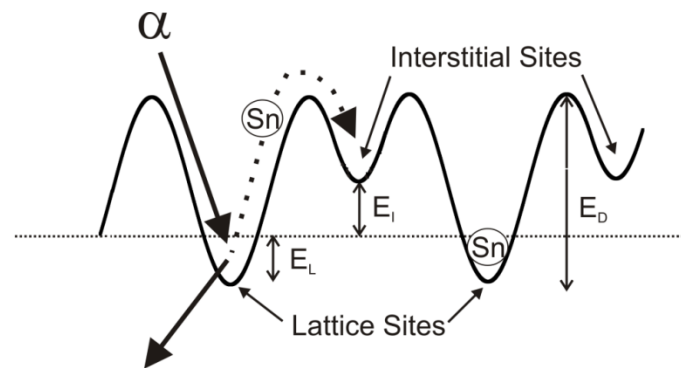
✓ c'est suffisant pour séparer des raies alpha proches (ex: les isotopes stratégiques de Pu) qu'un détecteur Si « classique » (8keV FWHM au mieux) confondrait

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

Point defects of crystals

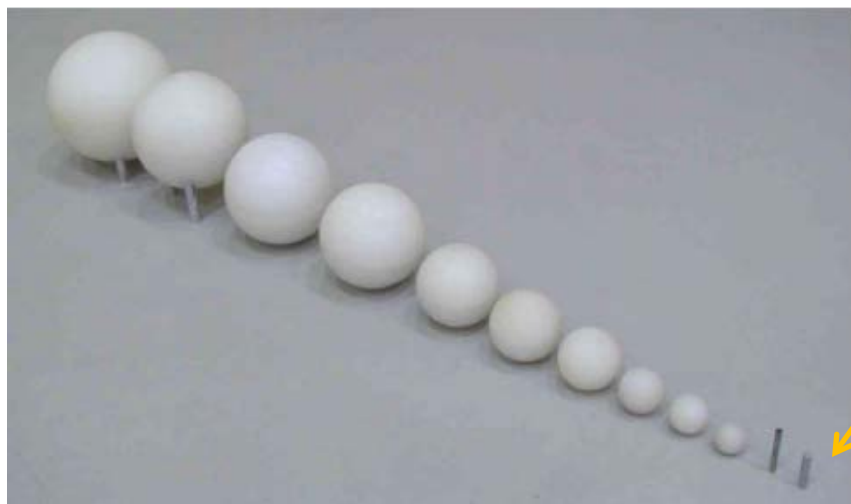


$$E_F \cong 4-7 \text{ eV dans Sn}$$



□ spectroscopie de neutrons

# Spectroscopie « traditionnelle » des neutrons rapides

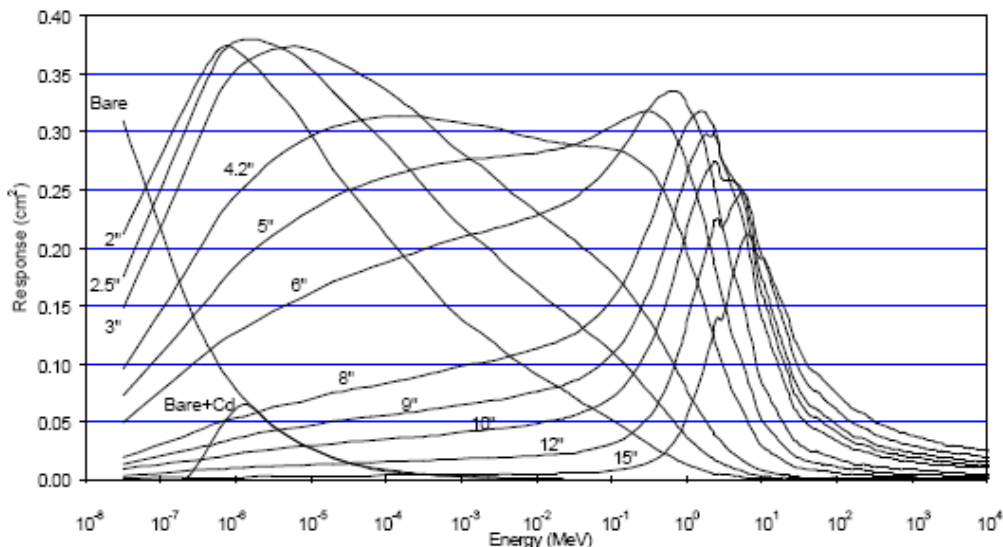


Sphères de Bonner  
(polyéthylène)

détecteur  $^3\text{He}$



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



Matrice de réponse des sphères

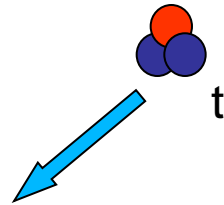
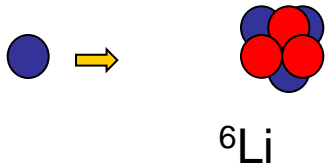
Une mesure au PSI (Suisse)



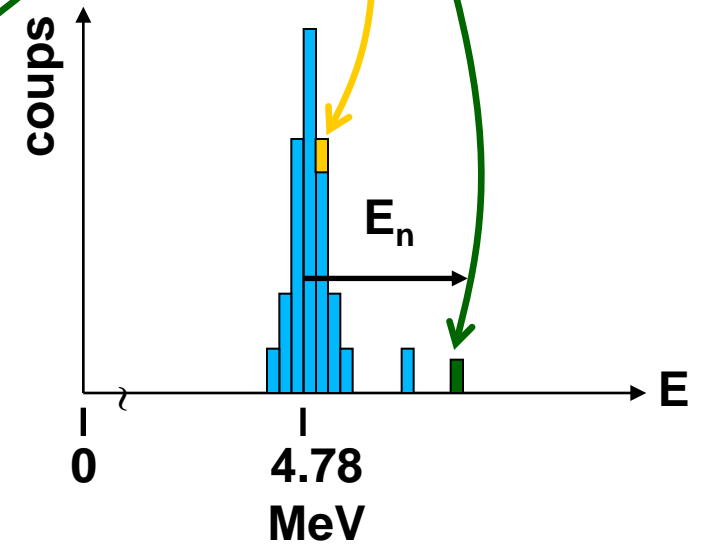
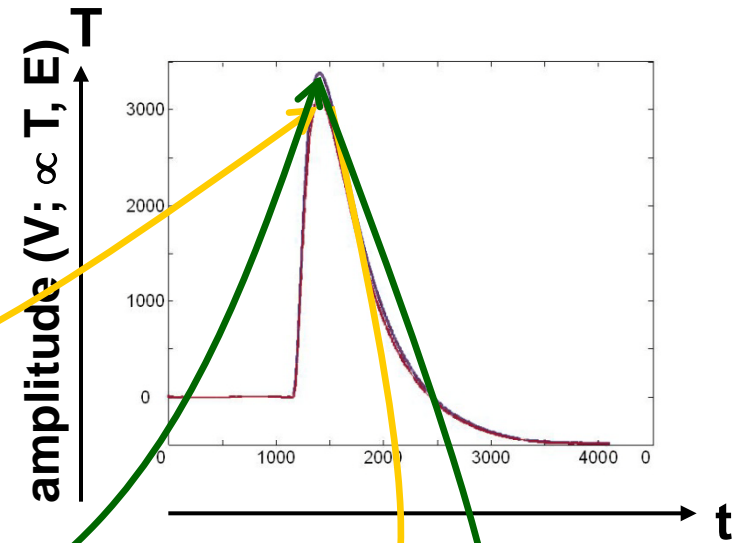
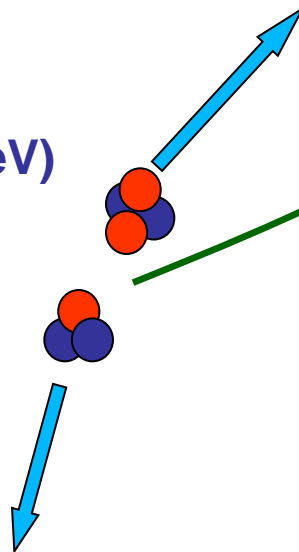
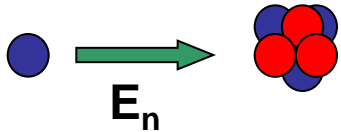
# Réaction de capture: $n+{}^6\text{Li}\rightarrow\alpha+t$    $E=4.78\text{ MeV} + E_{\text{neutron}}$

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

Neutron thermique (25 meV)

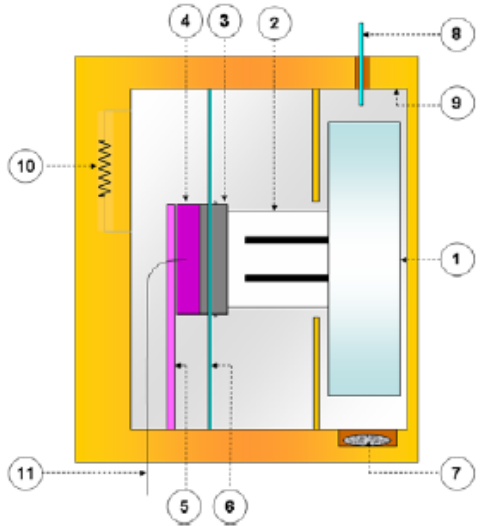
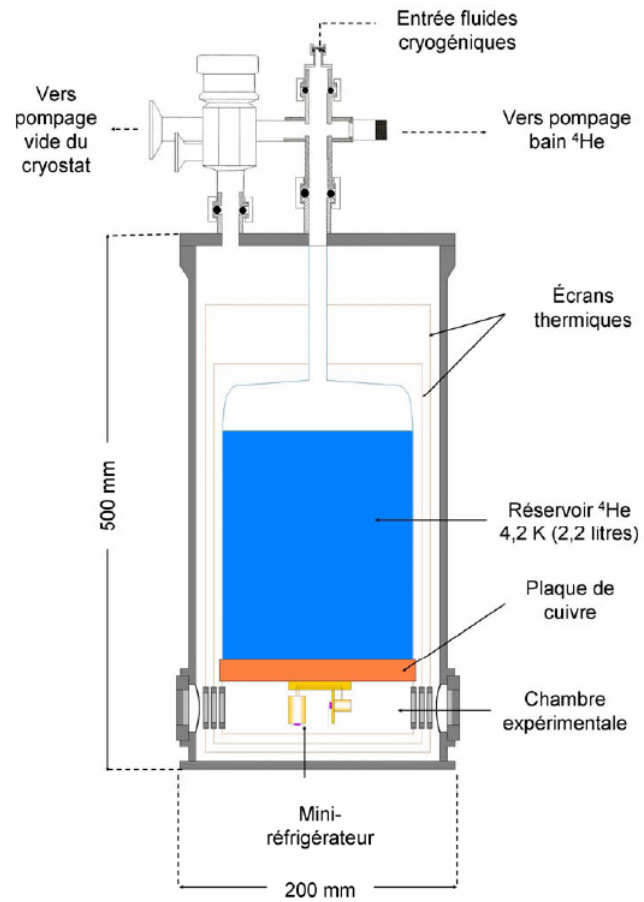
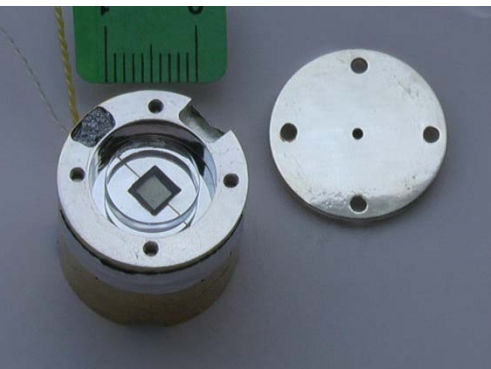


Neutron rapide (1keV-10MeV)



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

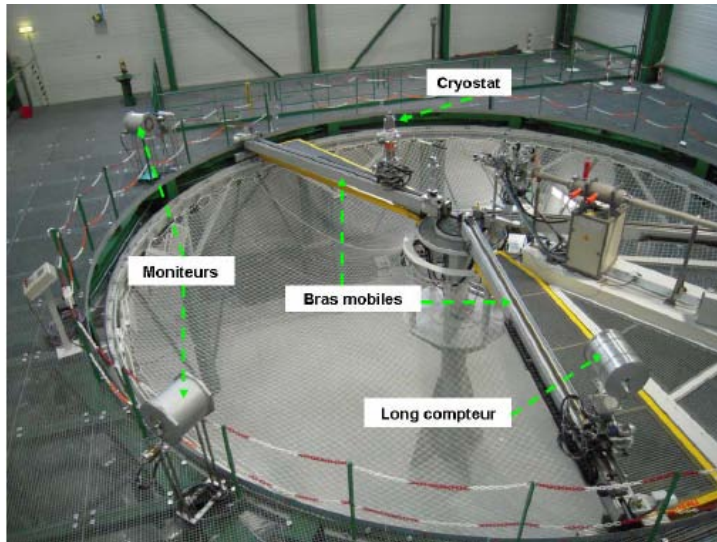
Bolo 0.5g  $^6\text{LiF}$  de l'IAS (@400mK)



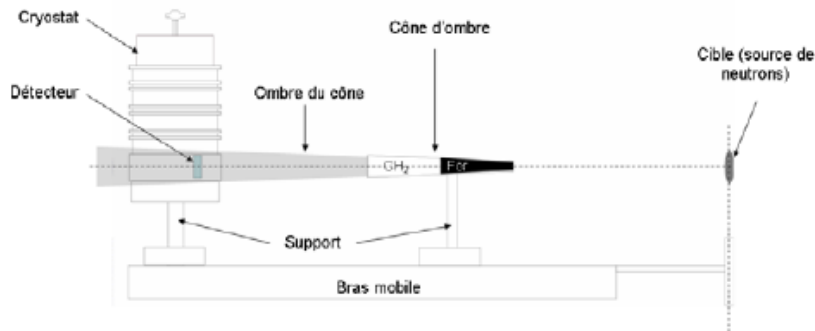
**Légende :**

- 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

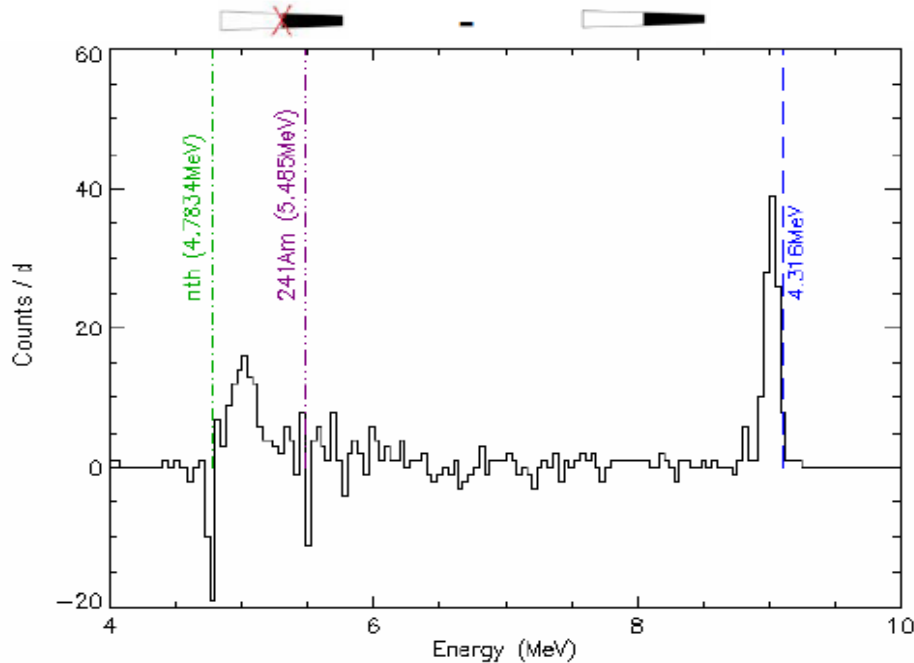
# Etalonnage @ AMANDE (IRSN/Cadarache)



Spectromètre 0.5g 6LiF  
(juillet 2009)



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



...avec un léger décalage systématique,

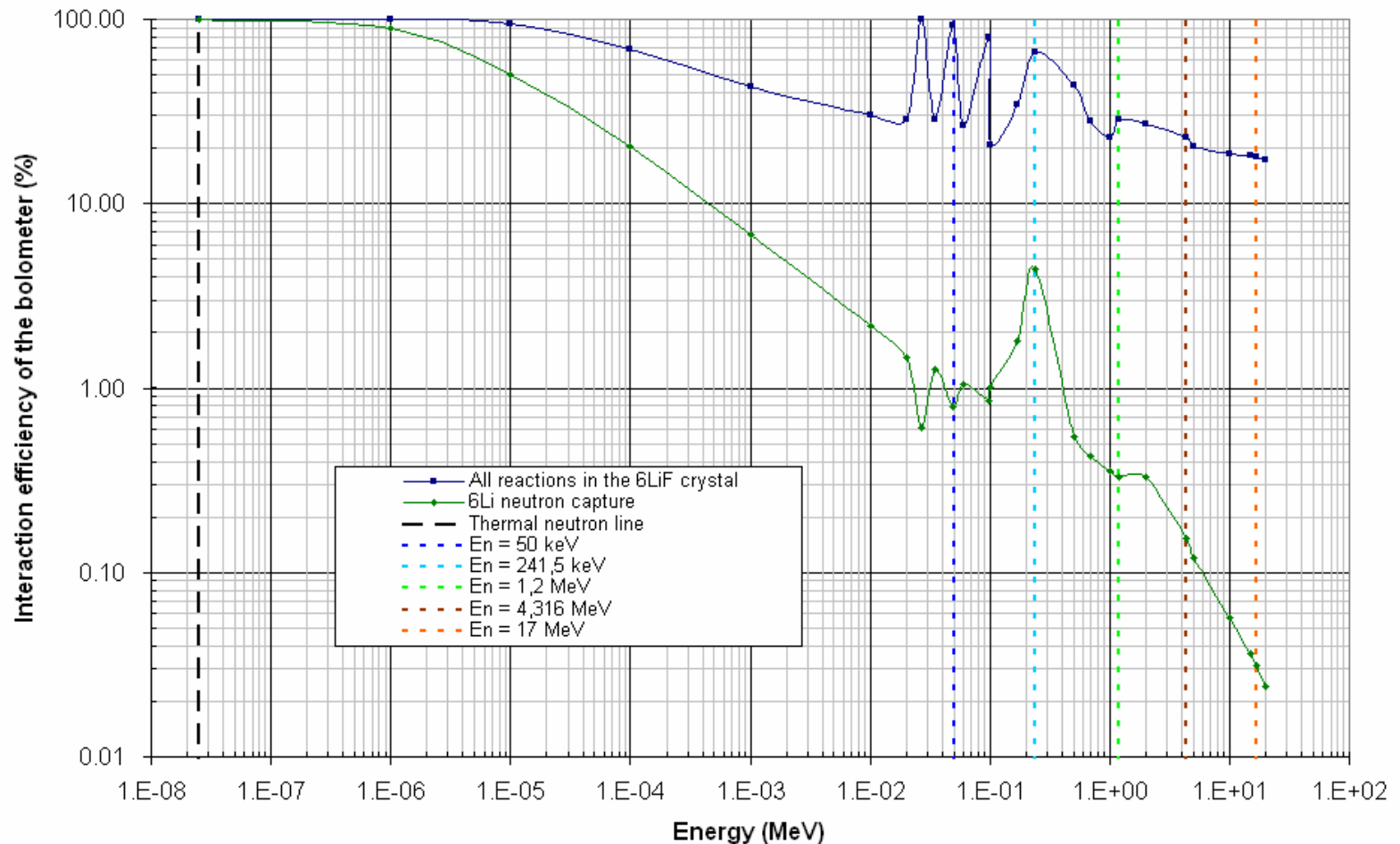
$E_{\text{B\_AMANDE}}$	$\Delta E =  E_{\text{B\_AMANDE}} - E_{\text{B\_BOLOMETE}} $
50 keV [ $\pm 3$ ]	-
241,5 keV [ $\pm 3$ ]	6,7 keV [ $\pm 0,03$ ]
1,2 MeV [ $\pm 0,003$ ]	27,86 keV [ $\pm 1,72$ ]
4,316 MeV [ $\pm 0,002$ ]	109 keV [ $\pm 2,02$ ]
17 MeV [ $\pm 0,004$ ]	431 keV [ $\pm 7,5$ ]

et une bonne résolution en énergie.

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



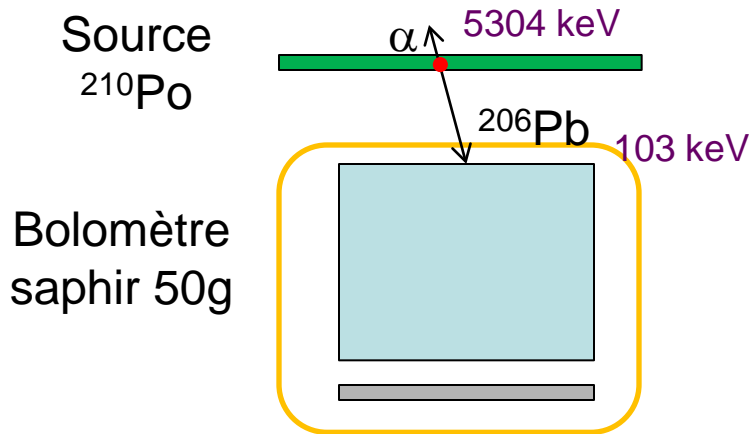
# Bolomètre de 0.5g en ${}^6\text{LiF}$ : efficacité



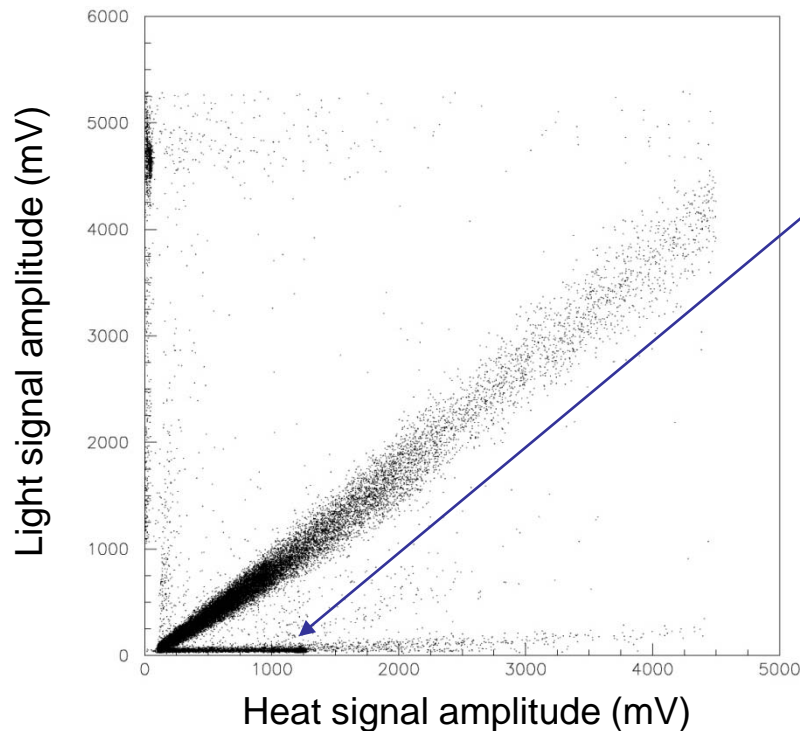
→ Des détecteurs plus gros, donc plus froids (20mK), pour la détection de neutrons rares dans la gamme 100keV-10MeV (R&D IAS en cours)

□ spectroscopie de noyaux de recul,  
d'ions lourds

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

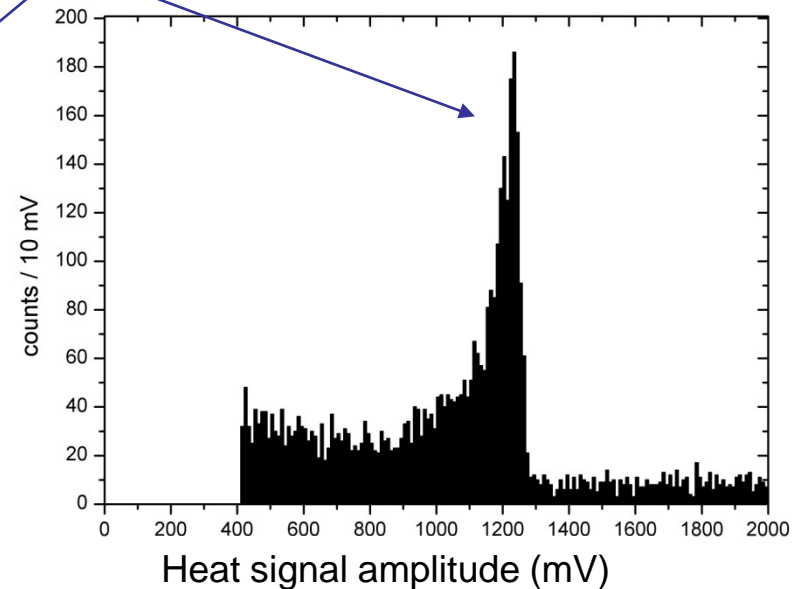


- Spectre des reculs très sensible à l'état de surface de la source → test de sources  $\alpha$
- Calibration de matrices de bolomètres, implantation  $\sim 100 \text{ \AA}$  → qualifications de micro-structures (membranes  $\text{Si}_3\text{N}_4, \dots$ )



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

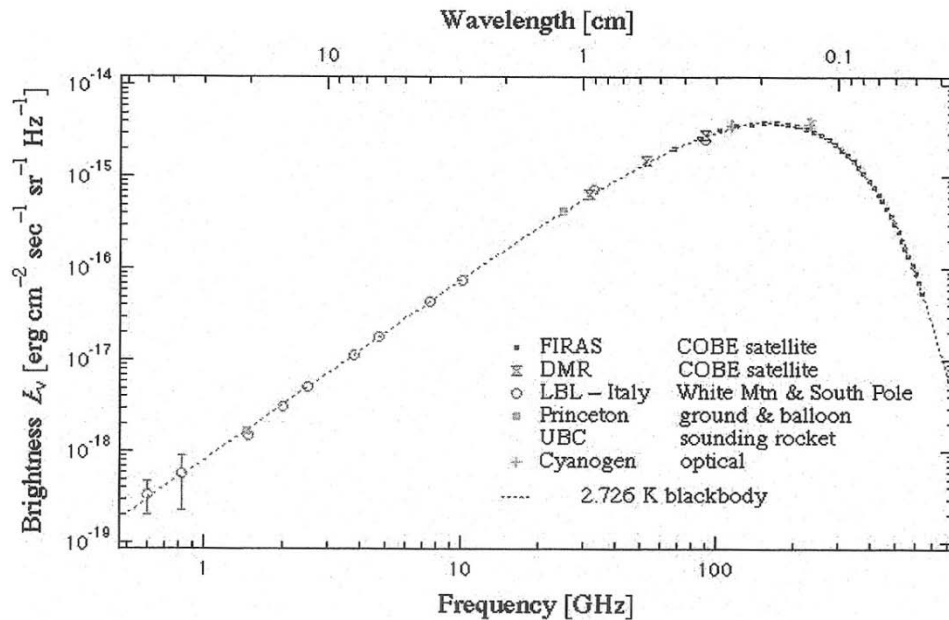
Spectre des événements de la bande des reculs



Thèse Lidia Torres (2008)

□ 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

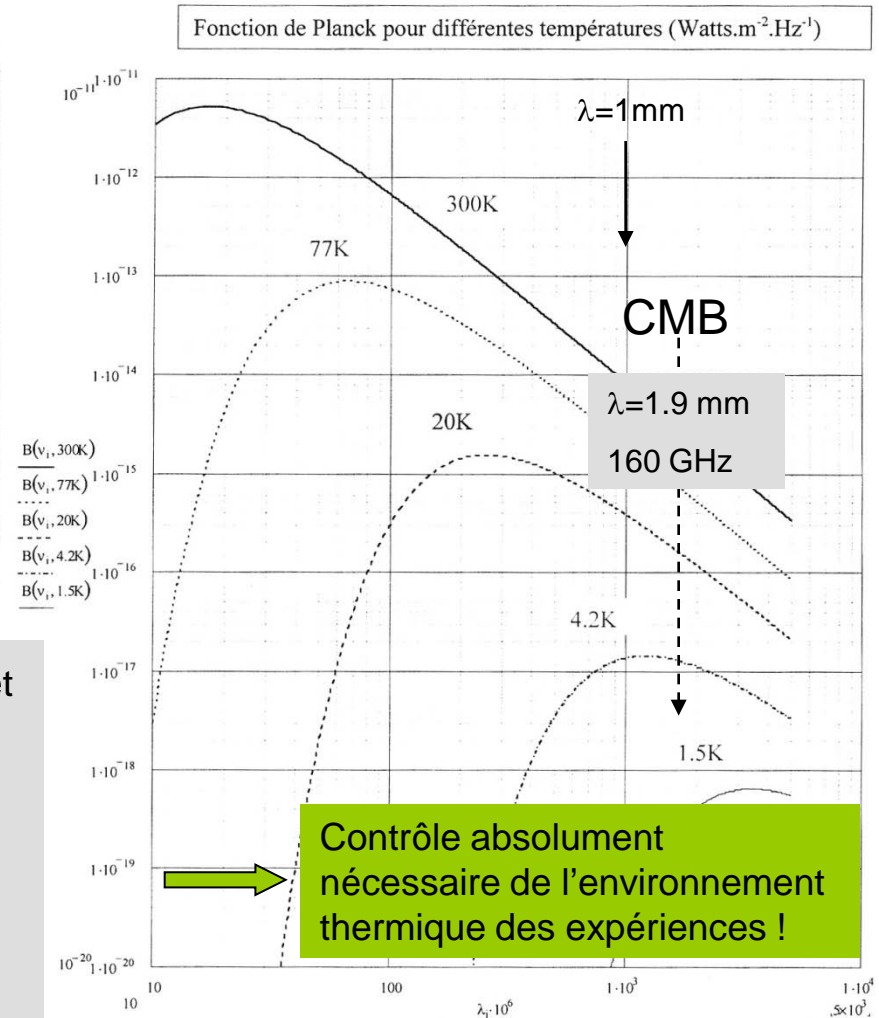
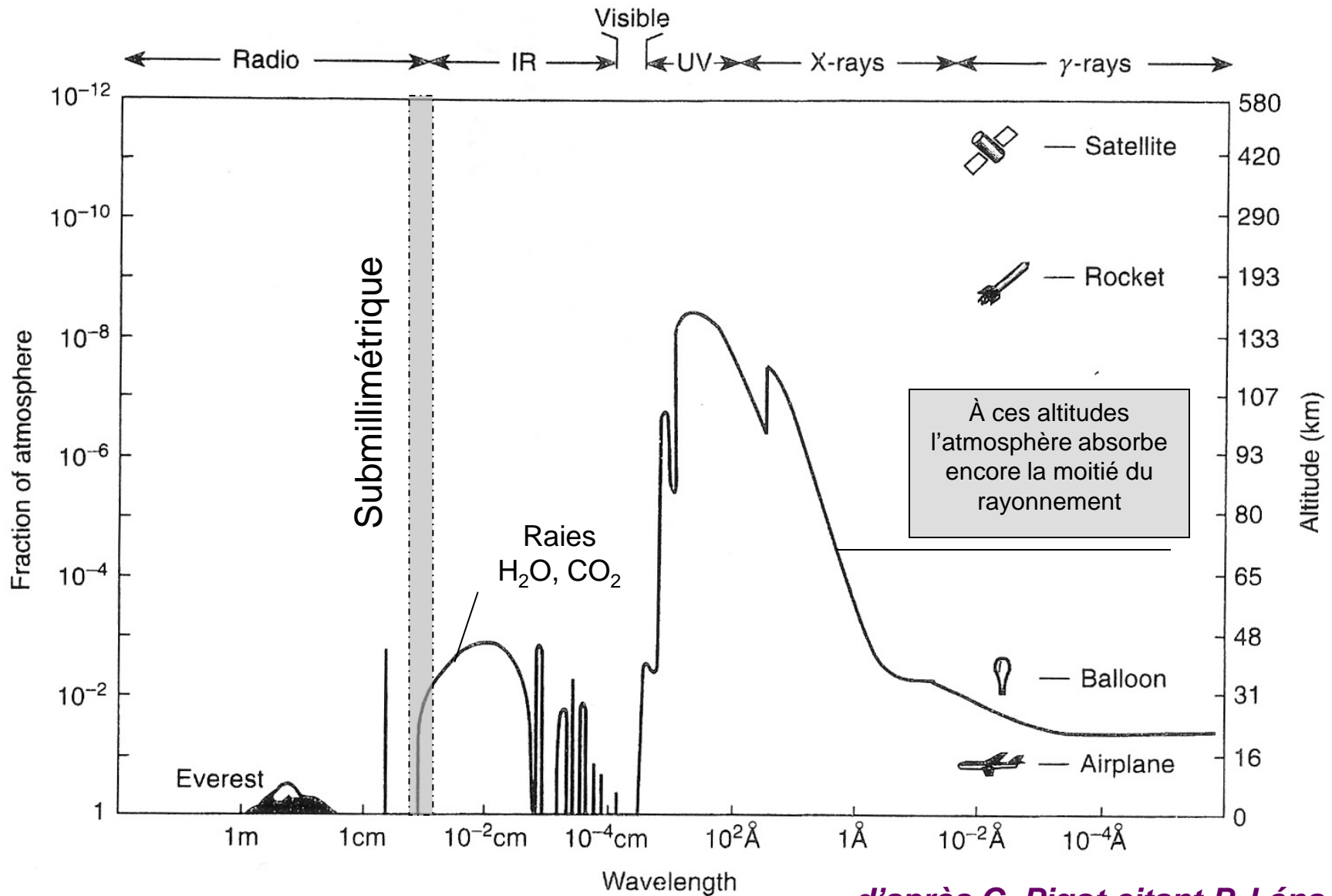


Figure 1 : Graphe de la fonction de Planck (corps noir) – Angle solide =  $1^{\text{st}}$

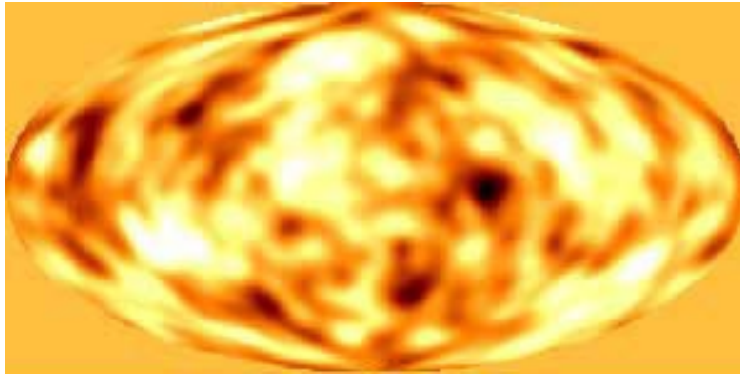
d'après Bruno Mafféi et Jacques Delabrouille (Ecoles d'automne)

# CMB: l'appel de l'espace



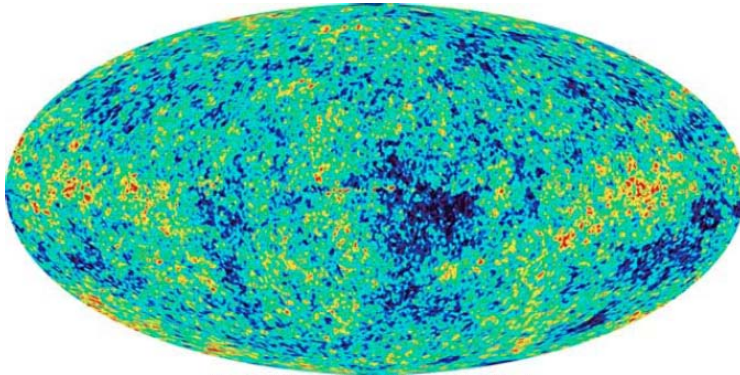
*d'après C. Pigot citant P. Léna*

# Cartes des anisotropies du CMB



COBE (1989)

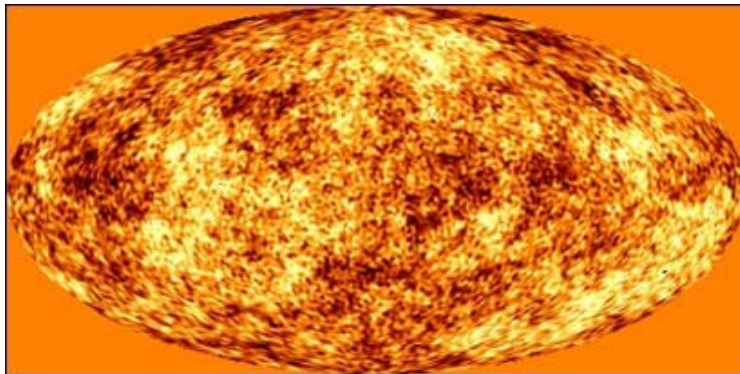
7°



WMAP (2001)

12'

Avènement de la cosmologie de précision...



Planck (2009)

5'

Planck-LFI

Planck-HFI

Détecteurs

radiomètres

**bolomètres**

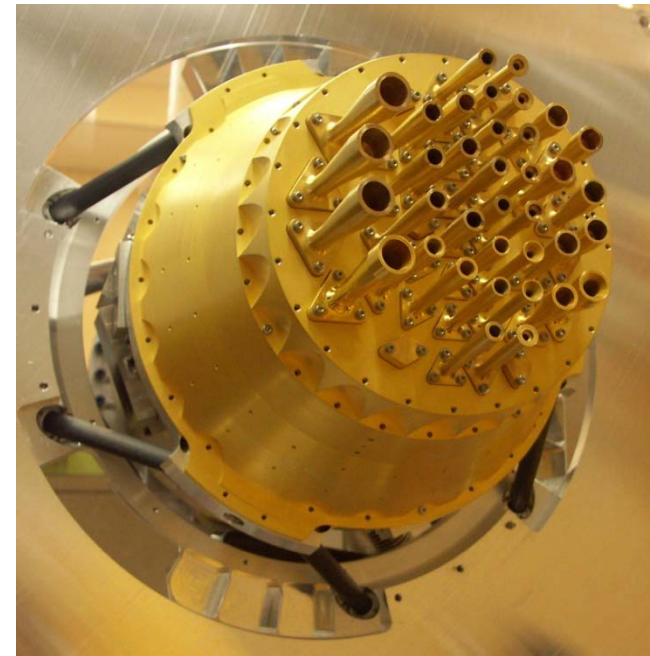
simulation

## ✓ Performances des détecteurs de Planck-HFI

- Sensibilité dominée par le bruit de photon du CMB
- $\approx 1000$  fois plus sensible que COBE
- $\approx 20$  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)

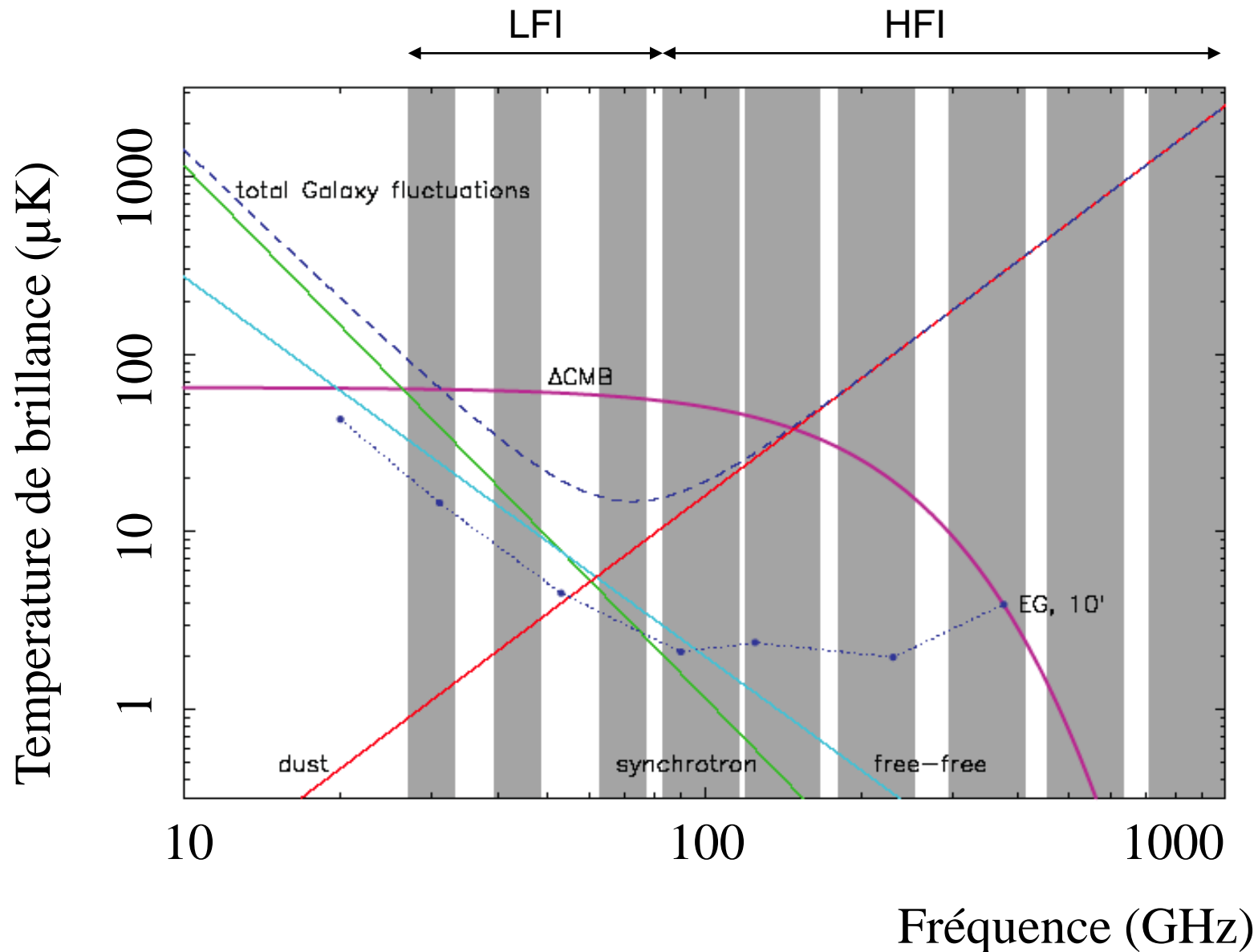
SUMMARY OF PLANCK INSTRUMENT CHARACTERISTICS

INSTRUMENT CHARACTERISTIC	LFI			HFI					
	HEMT arrays			Bolometer arrays					
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 $I$ ) <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

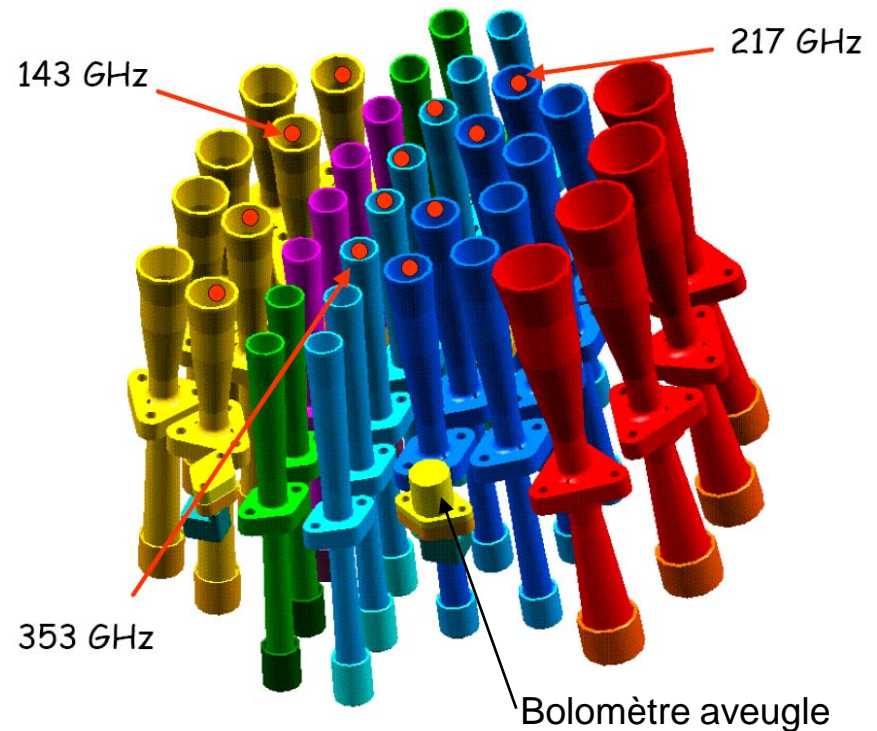
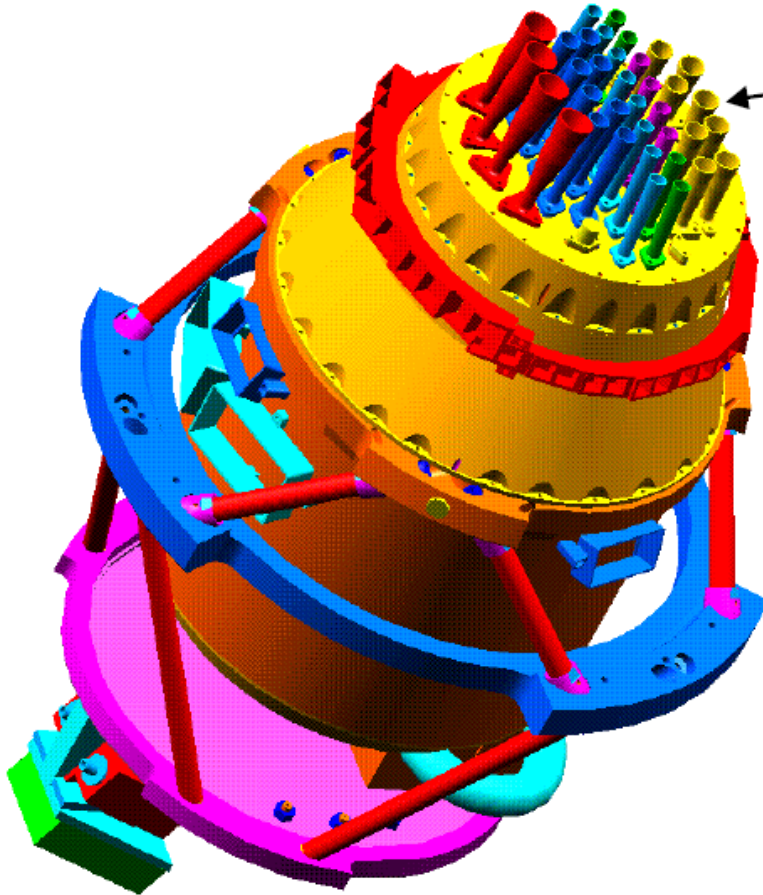


# L'instrument Planck-HFI

36 cônes concentrateurs

48 détecteurs; 6 bandes

Plan Focal



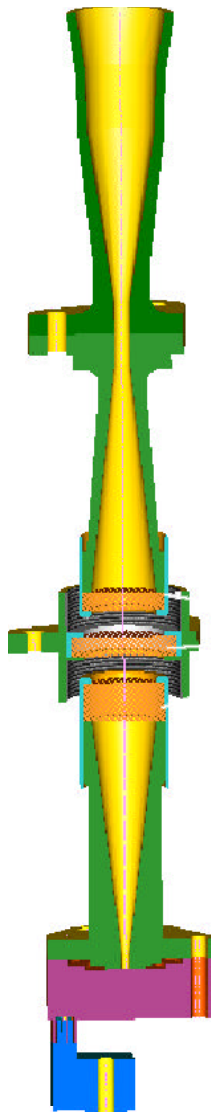
Canaux sensibles à la polarisation  
(12 « PSB »)

d'après Jacques Delabrouille (Moriond 2002)

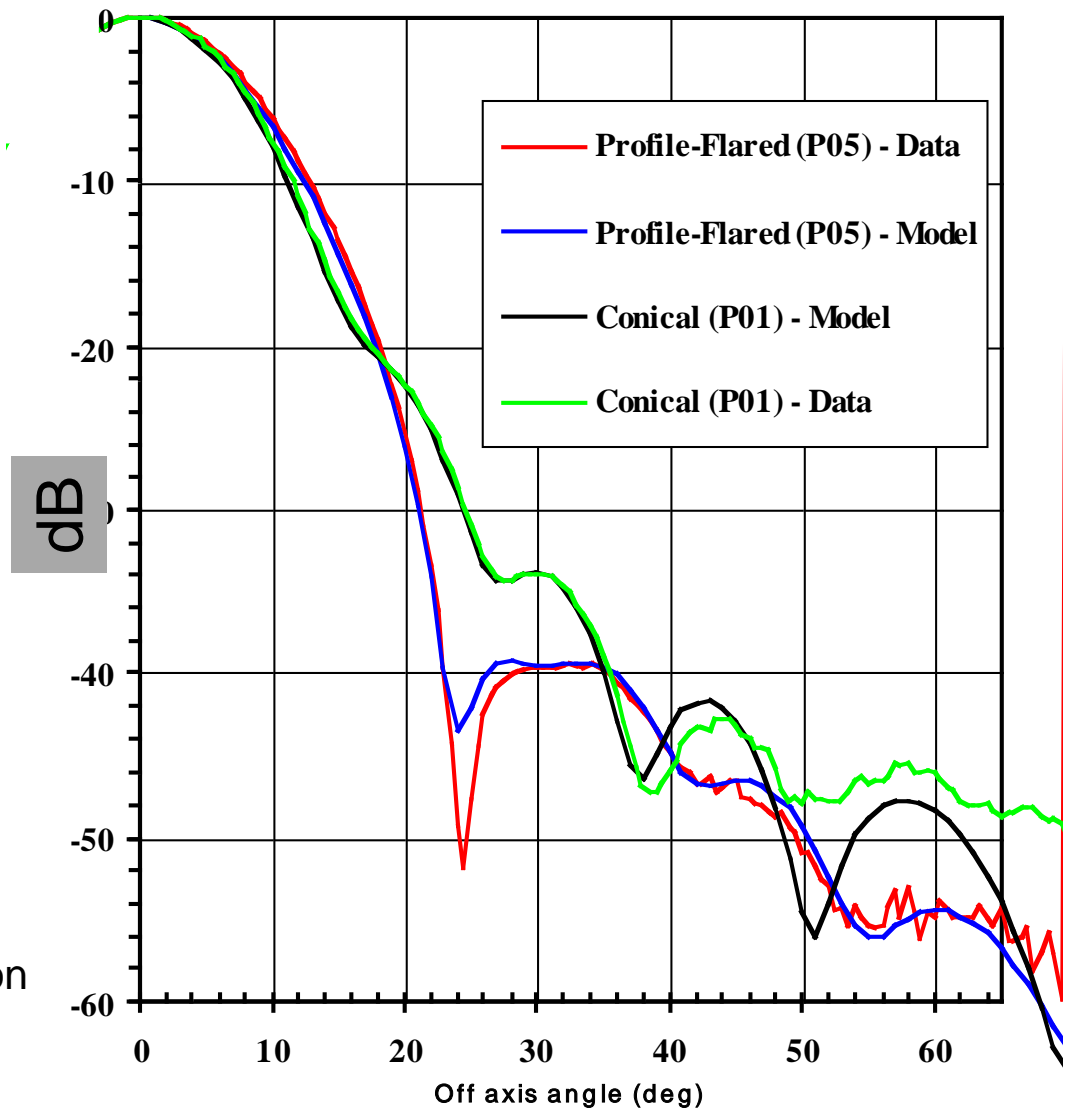
# Couplage optique et définition angulaire

« Flared horn »  
(cône évasé)

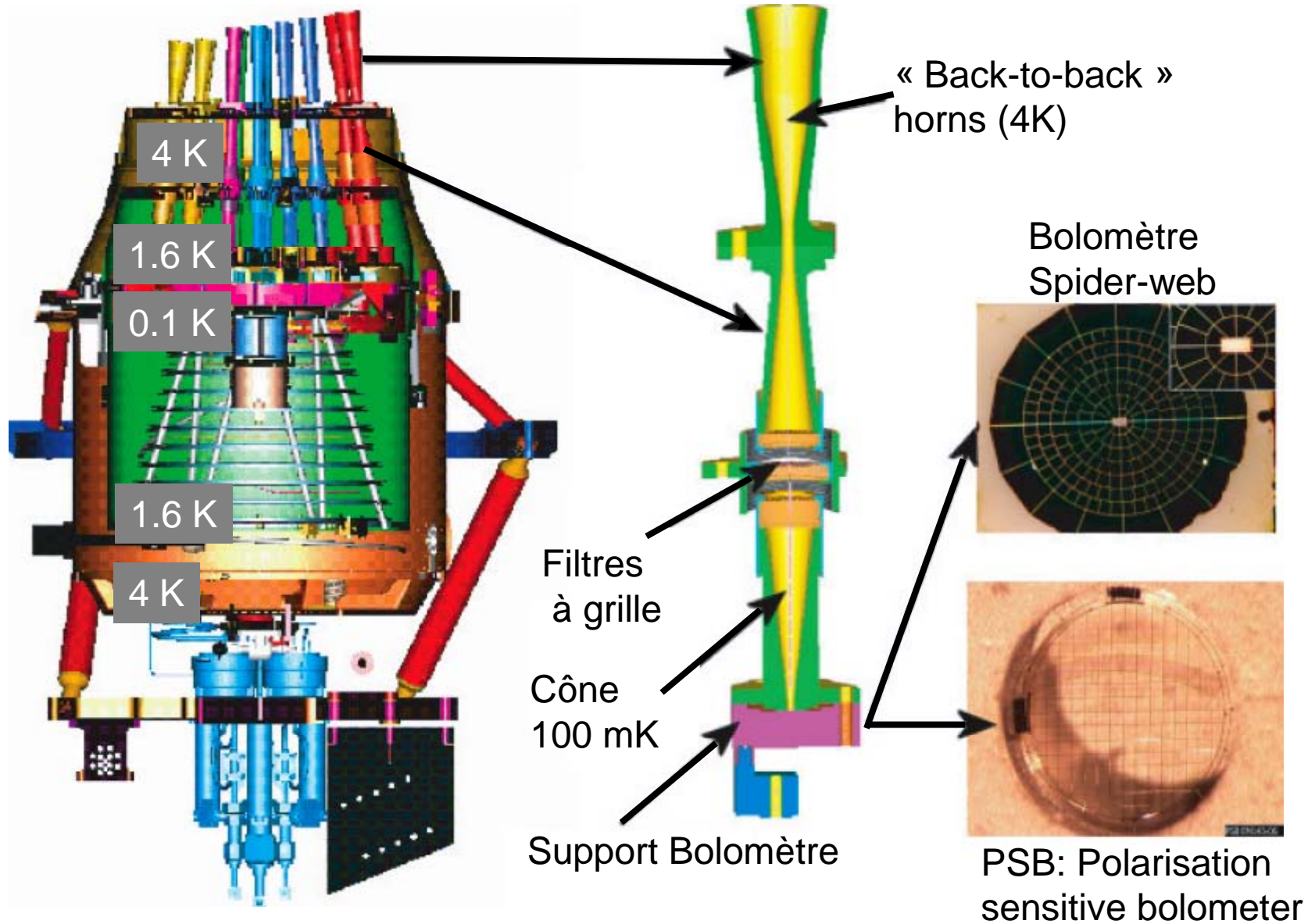
Made in  
Cardiff  
(UK)



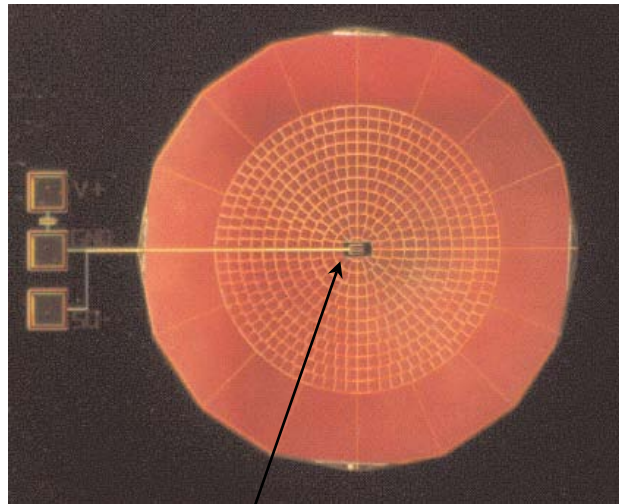
Atténuation  
1/1000



# 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  $4.9 \times 10^{-16}/\text{cc}^2$ ).

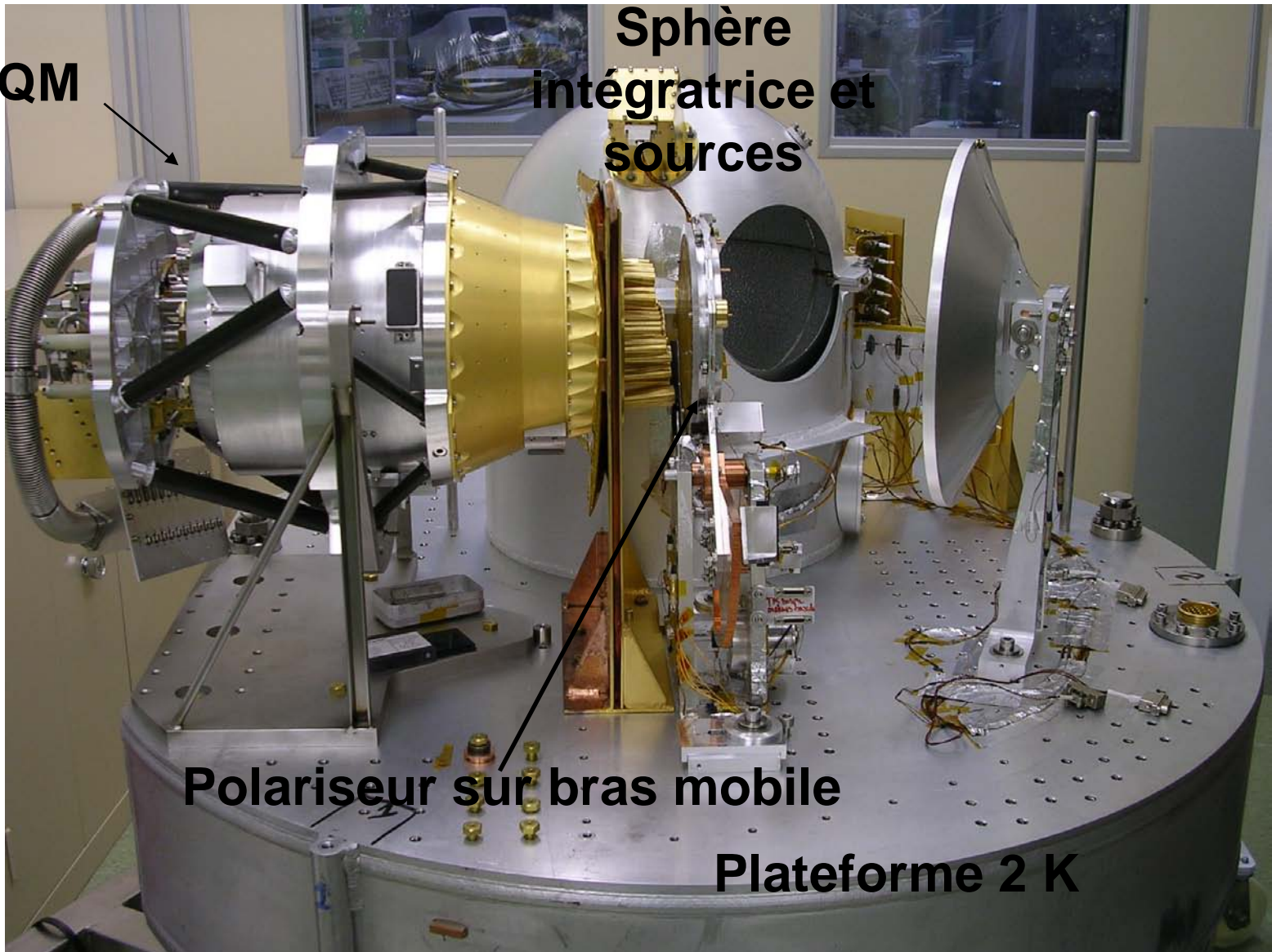
<sup>b</sup>Ref. 18.

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

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

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

**HFI CQM**



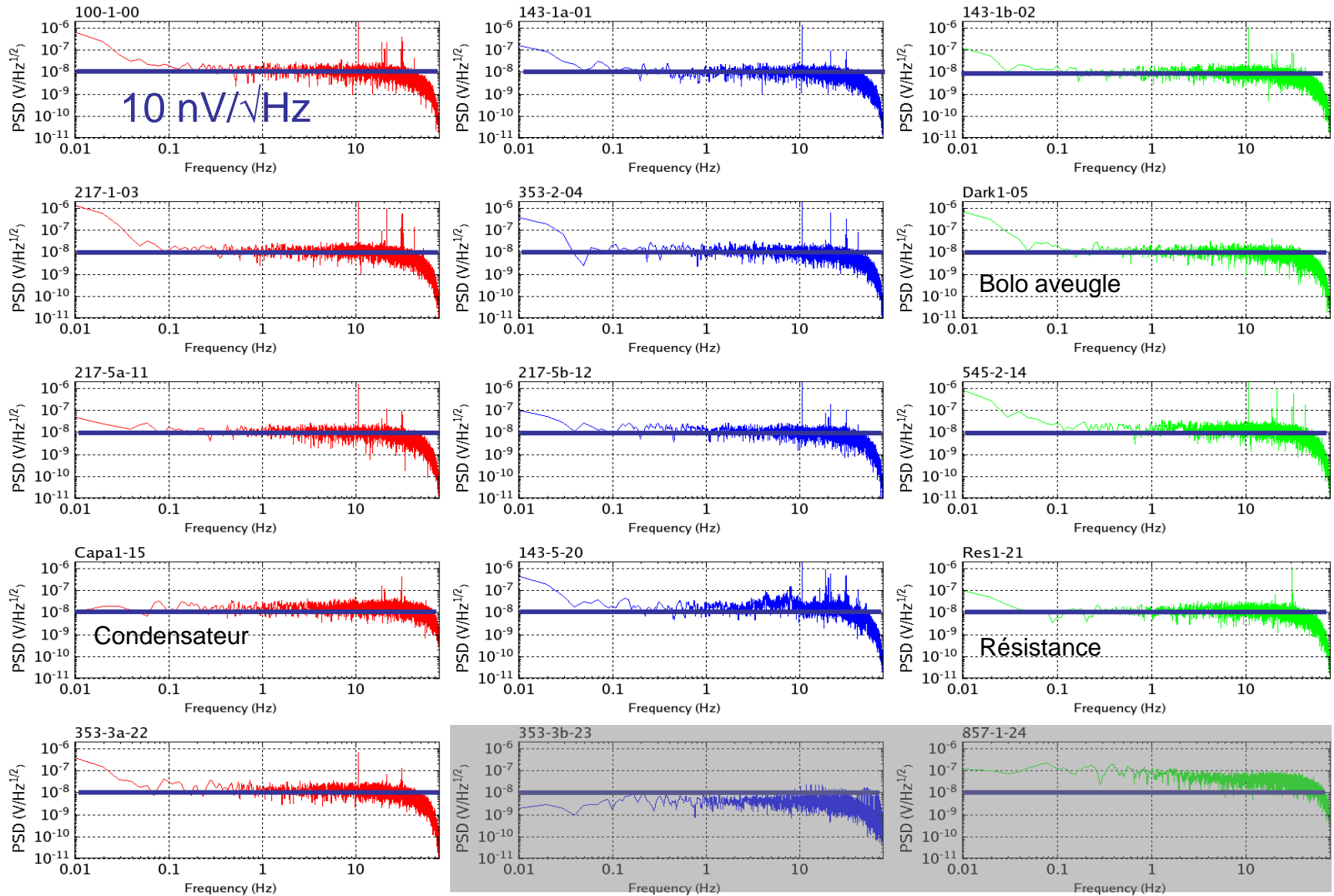
**Sphère  
intégratrice et  
sources**

**Polariseur sur bras mobile**

**Plateforme 2 K**

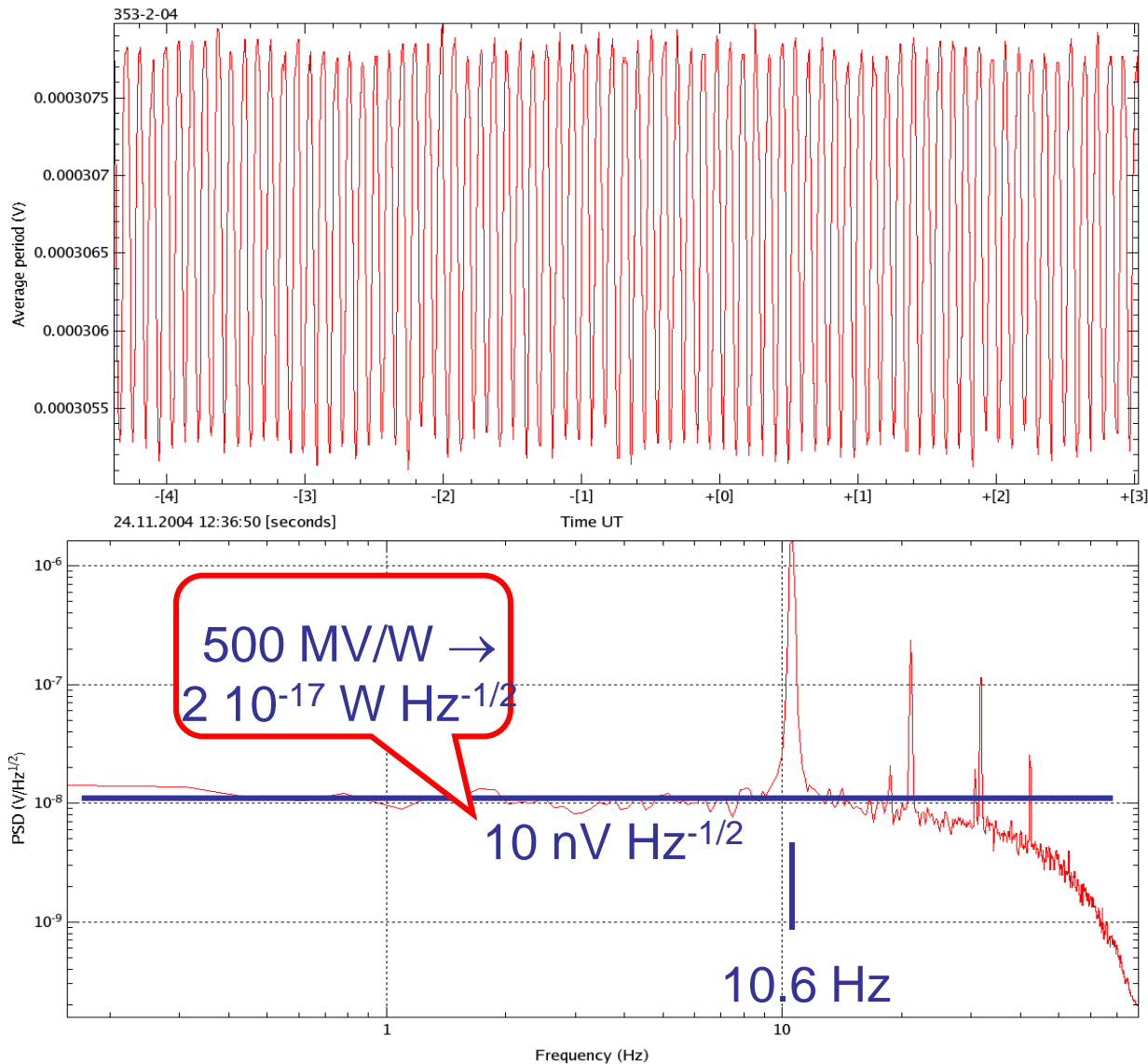


## 2. Mesures dans les six bandes du corps noir modulé @ 10Hz



# Calibration Planck-HFI

## Modèle CQM: un NEP dans les spécifications !



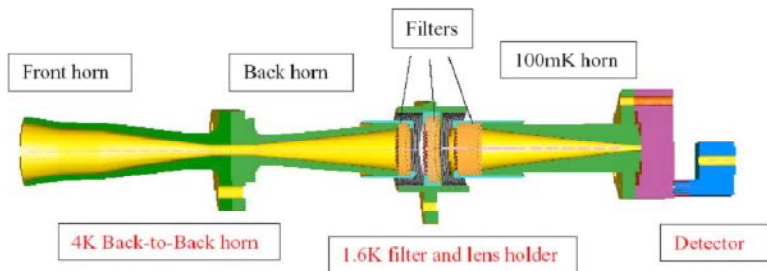
Source CS2 (corps noir  
modulé par un diapason  
à 10.6Hz),  
vue par un bolomètre du  
canal 353 GHz ( $\approx 7$ sec)



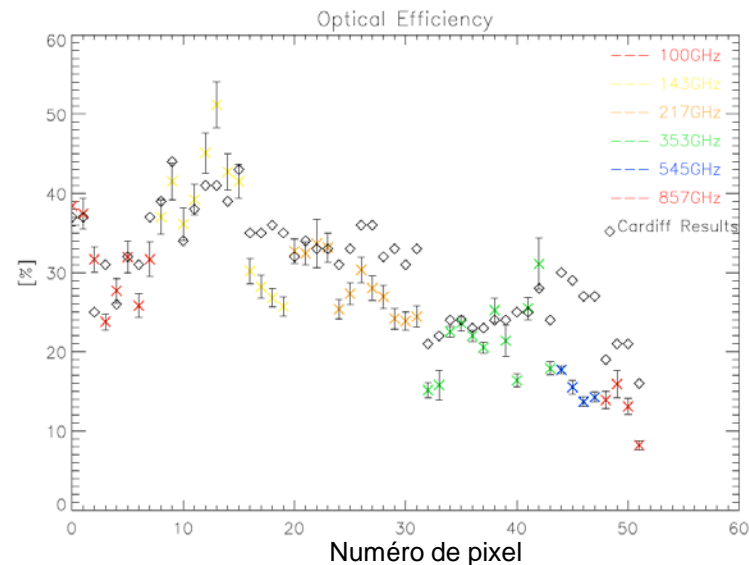
Prochaine étape:  
calibration du modèle  
de vol en 2006 pour  
un tir en 2007-2008

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

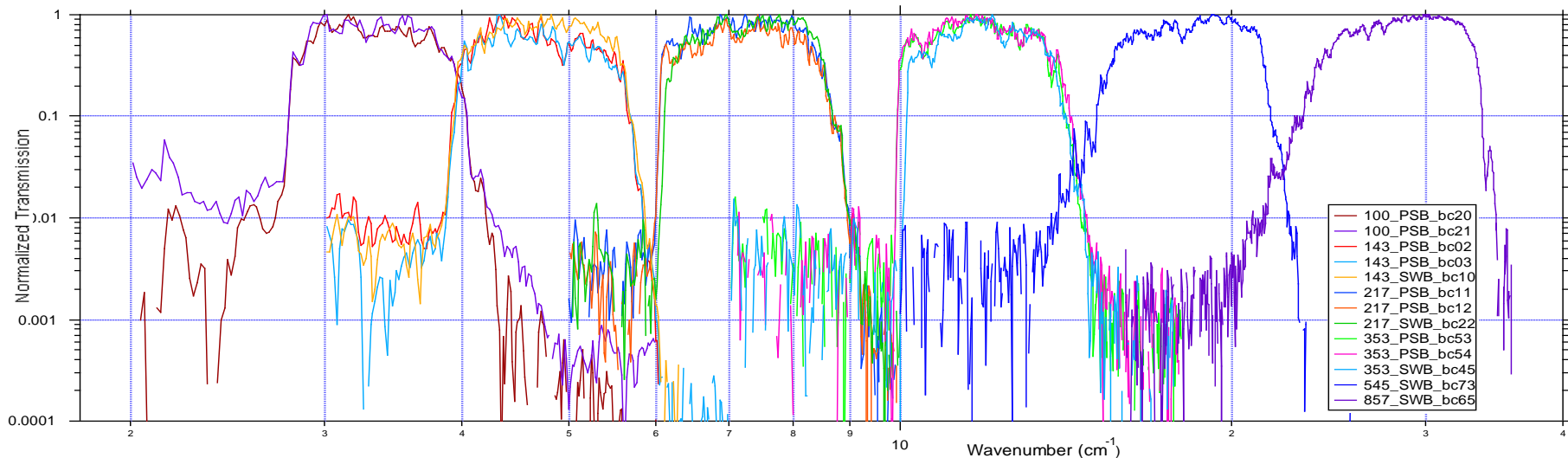
## Chaîne optique



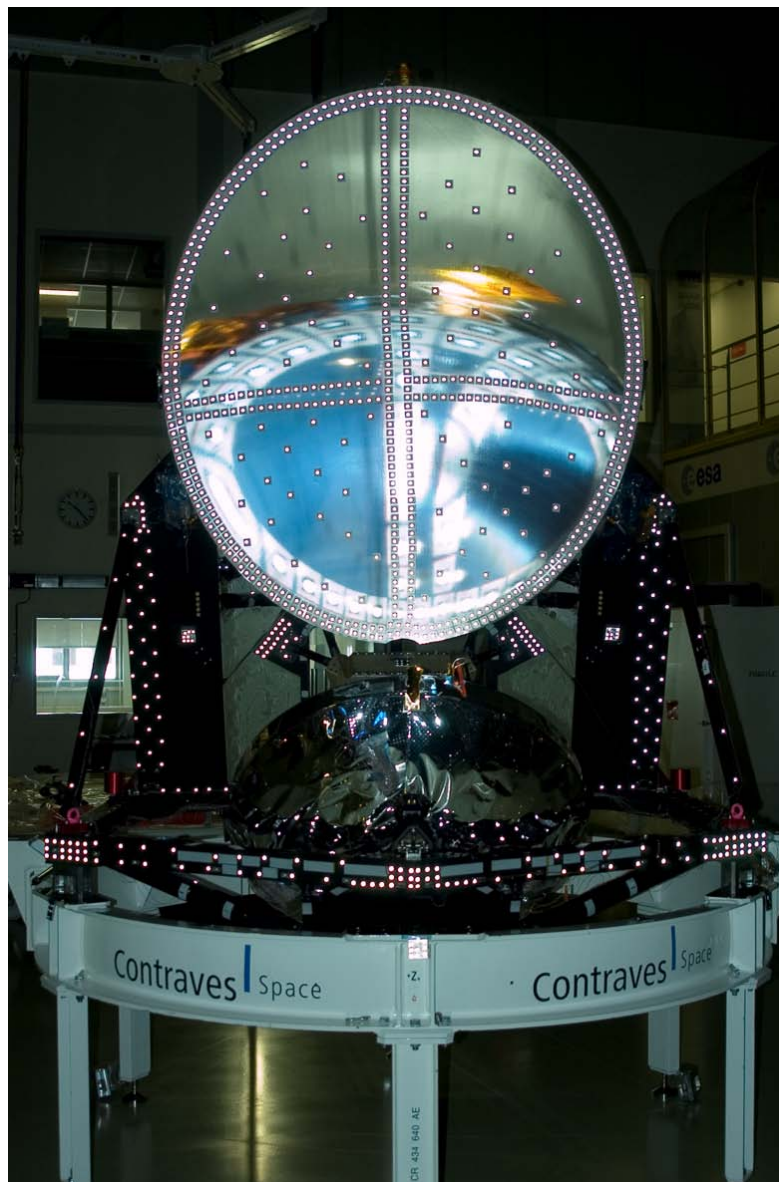
## Efficacité optique



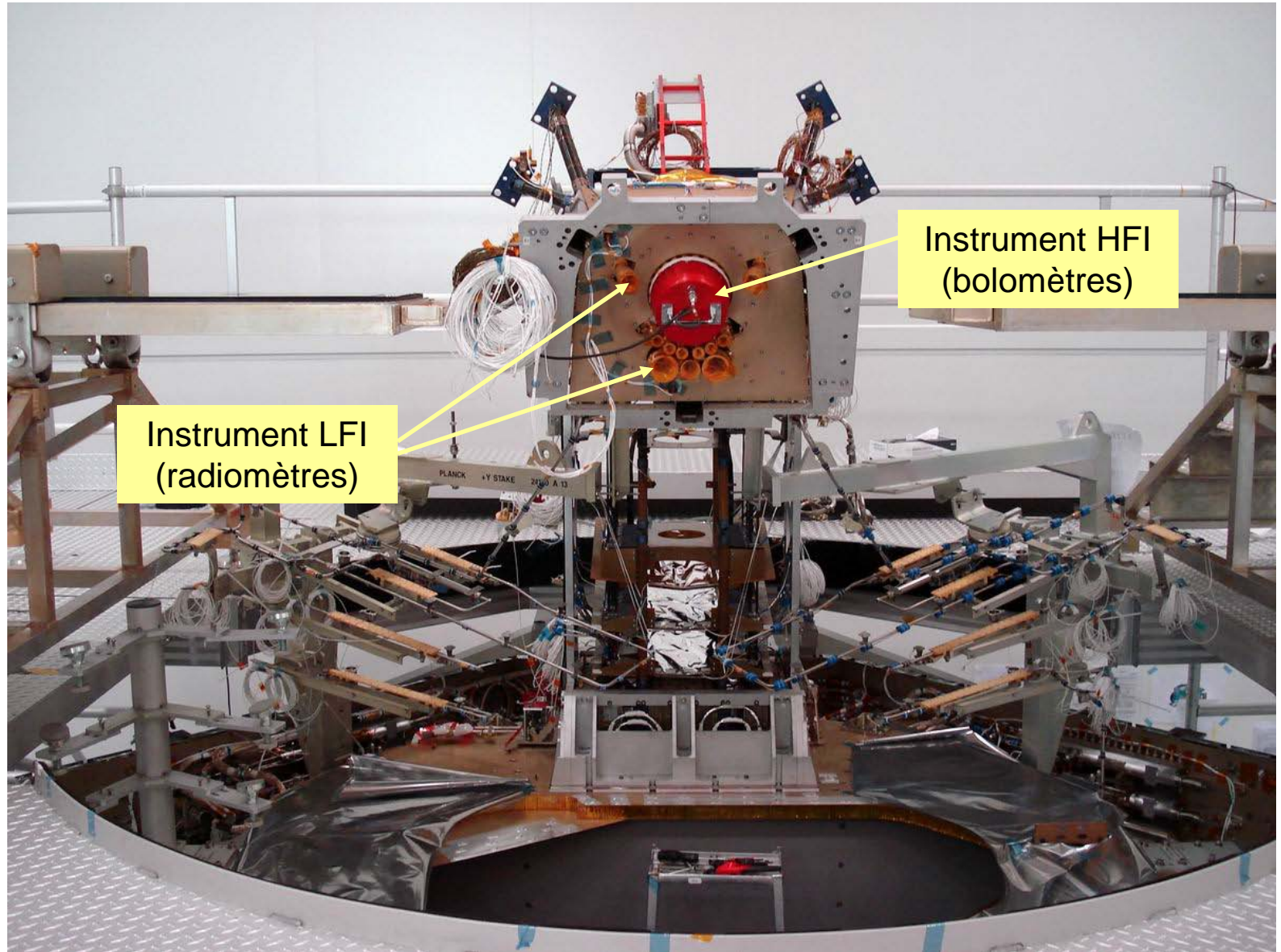
## Transmission spectrale



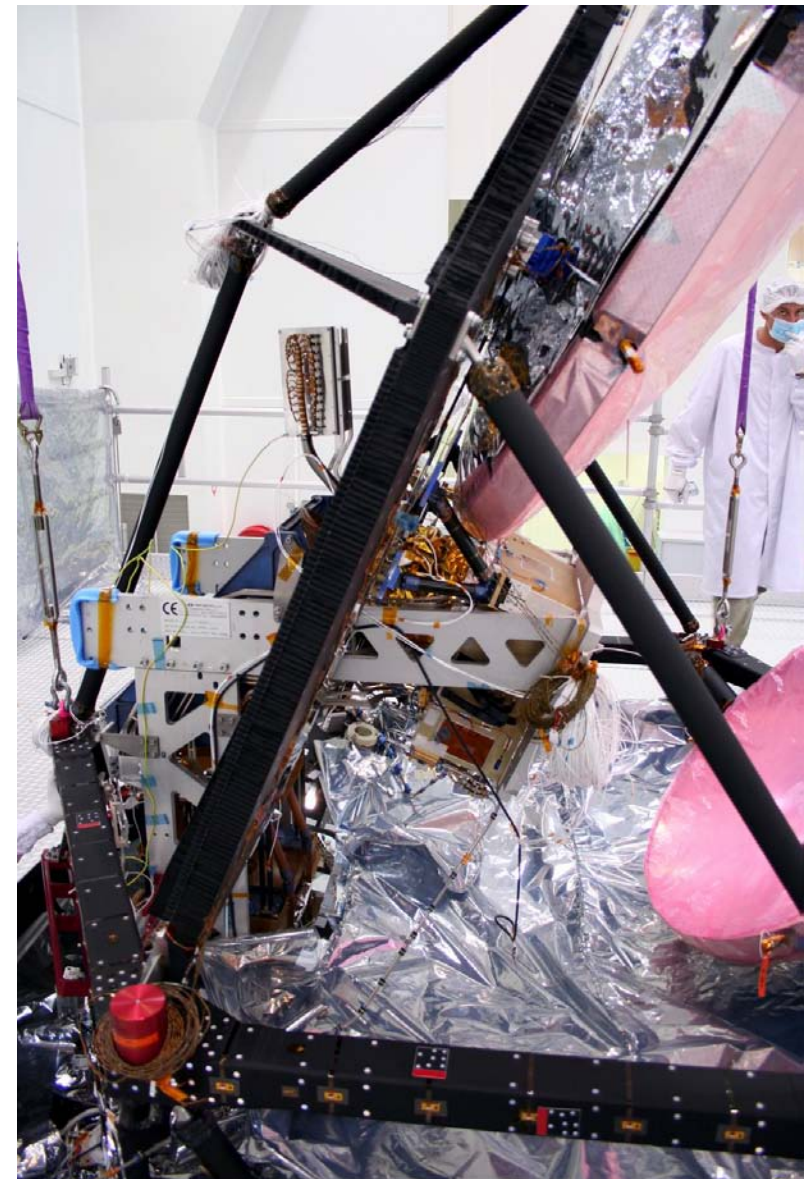
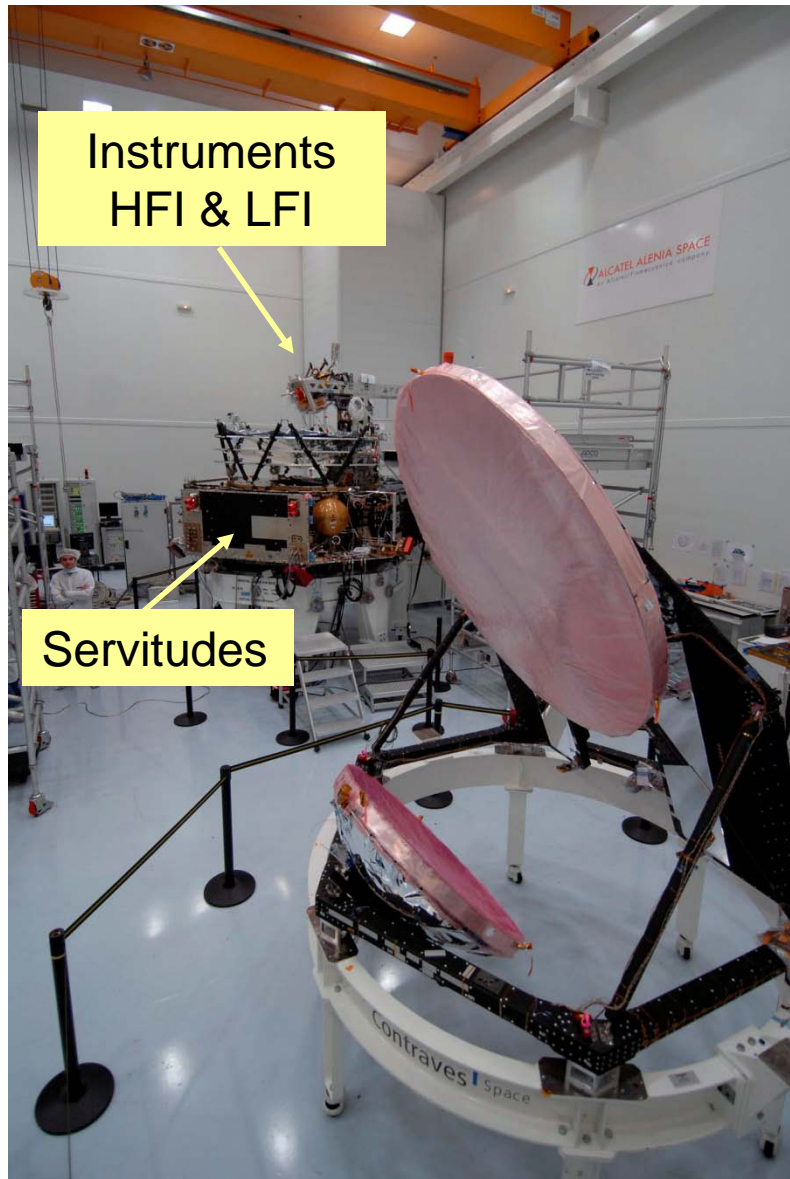
# Planck-HFI: test des déformations du télescope à froid



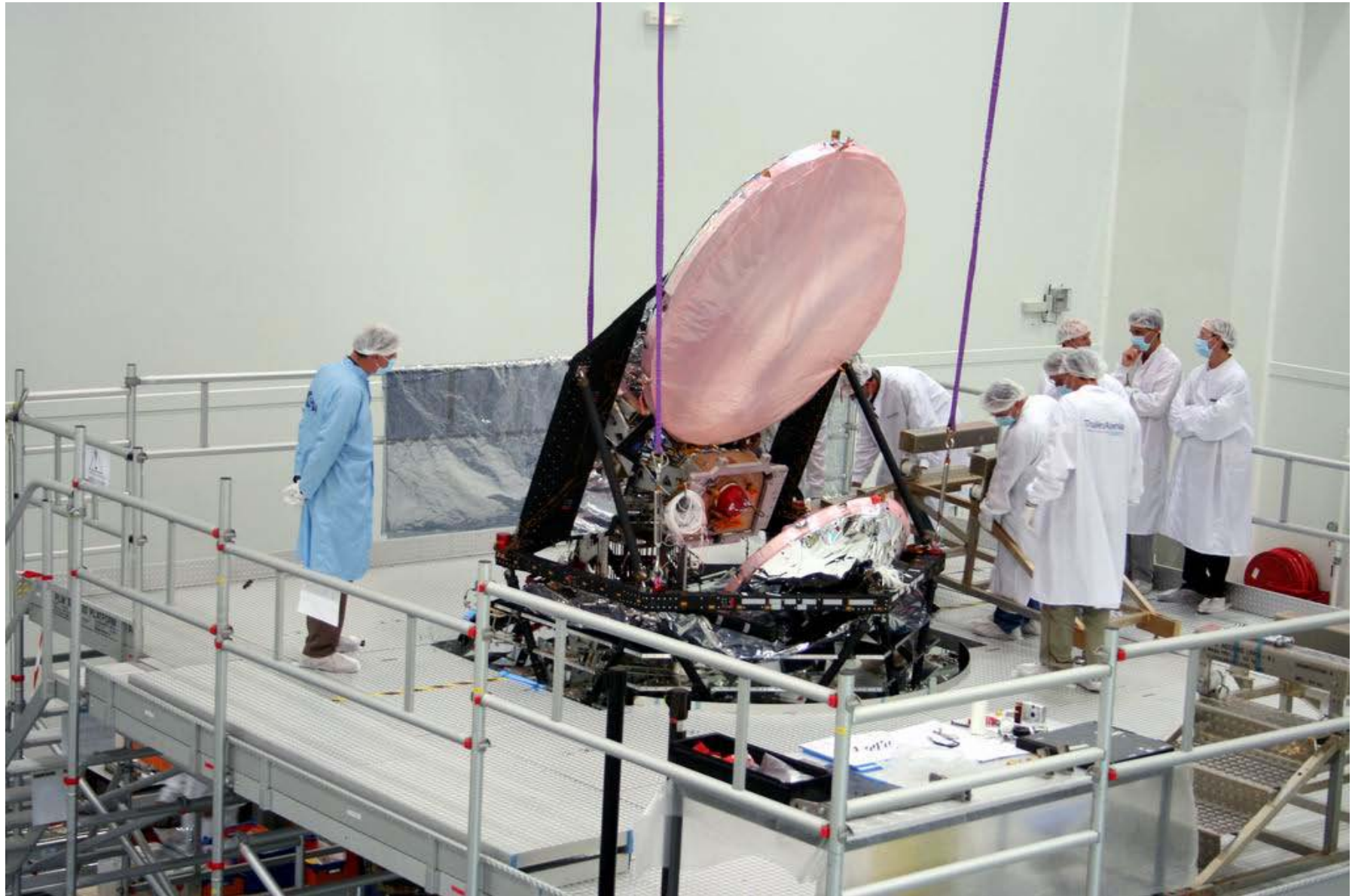
# Intégration de Planck HFI, LFI et d'un refroidisseur à sorption



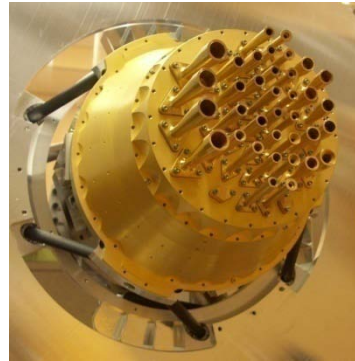
# Intégration du télescope et des instruments



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



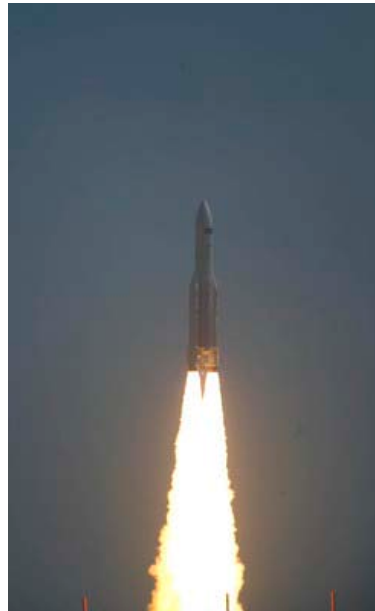
# Planck-HFI: c'est parti !



Planck-HFI  
(CQM)  
@ 100mK



Kourou, le 14 Mai 2009



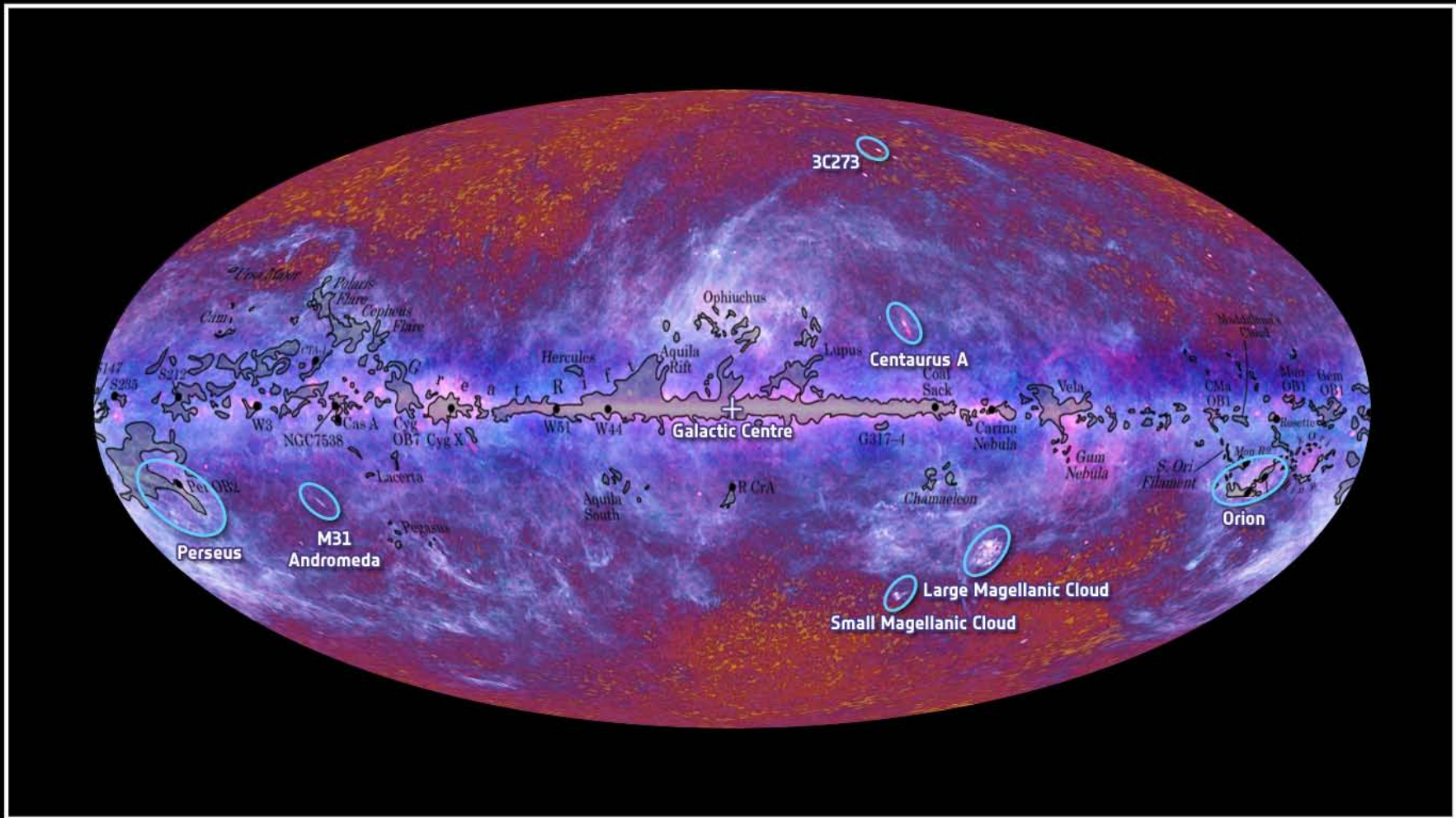
"Du détecteur à la mesure"



Herschel  
@ 300mK



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



The Planck one-year all-sky survey

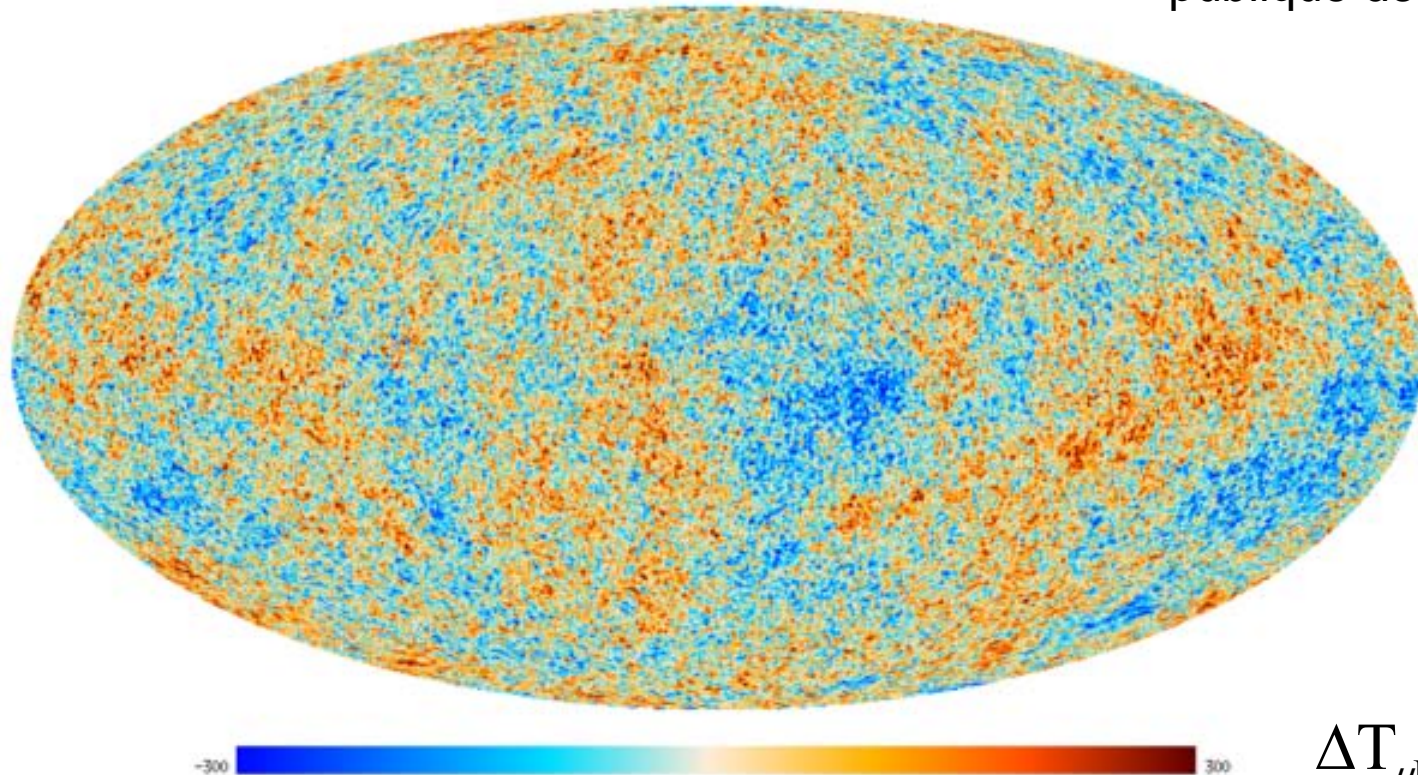


(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

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

LE RAYONNEMENT FOSSILE par PLANCK

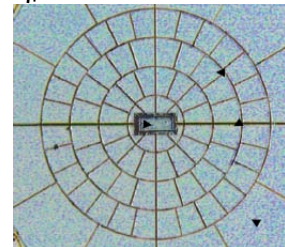
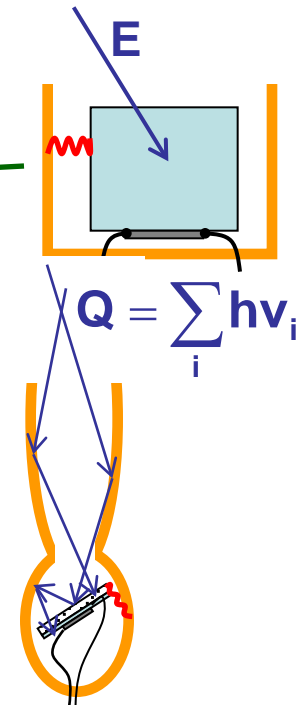
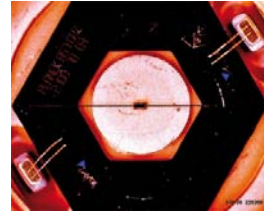
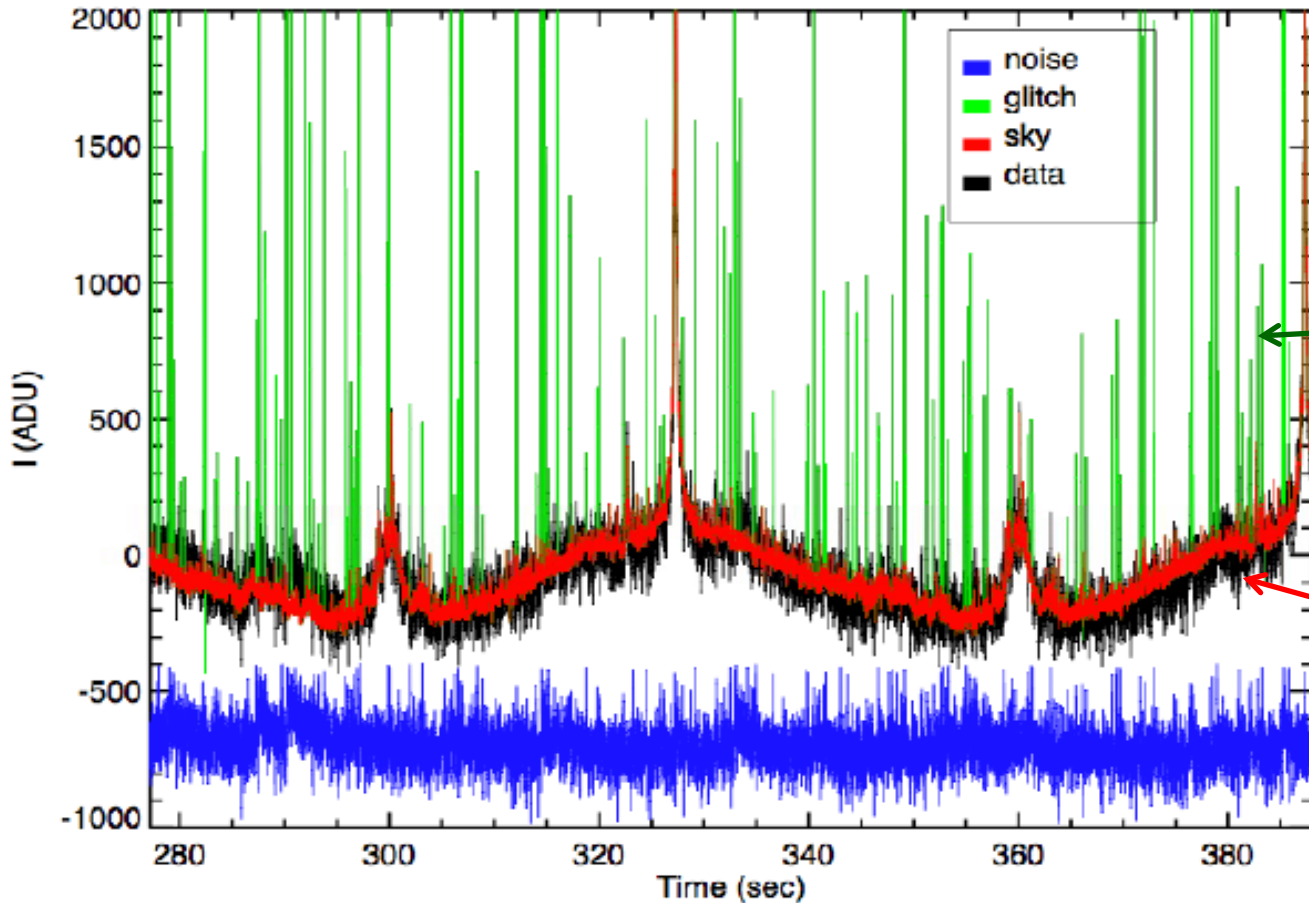
publique depuis le 21 Mars 2013



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

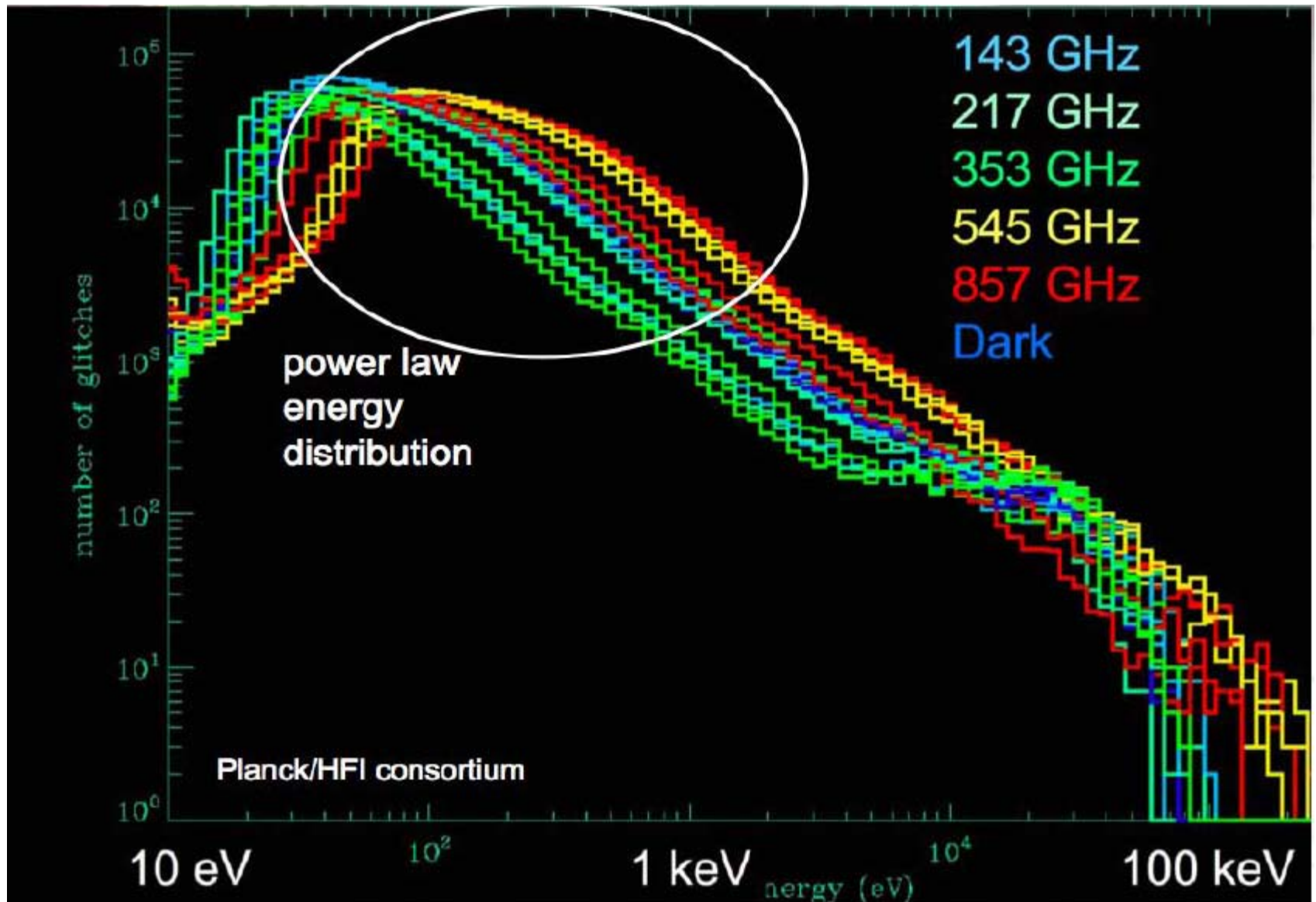
- ✓ une carte de référence pour des années de recherche en cosmologie !
- ✓ un succès de l'ESA...avec une forte contribution NASA ("mission enabling technology")

# 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

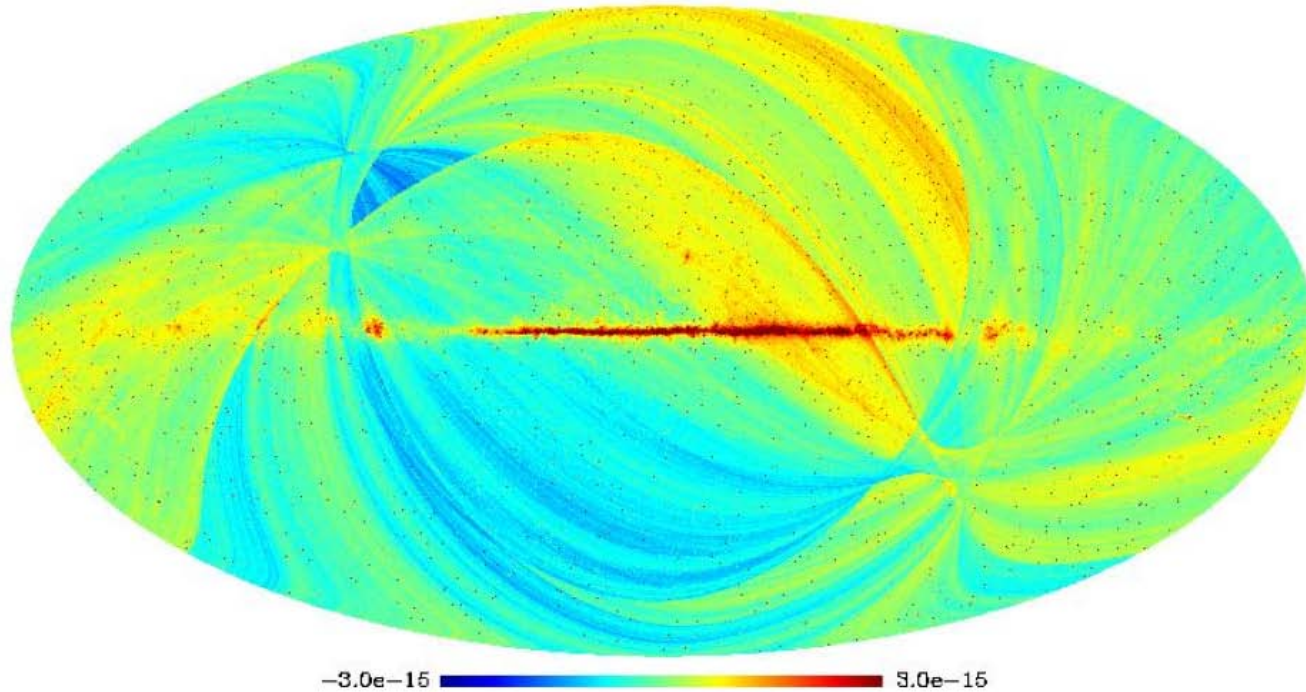


FIGURE 10.2 – Carte obtenue en projetant le signal non *déglitché* du détecteur 04\_217\_1 de HFI. On voit clairement les effets systématiques dominants : les rayons cosmiques (ponctuels et de grande intensité) et les stries dues aux fluctuations de la ligne de base des données entre les différents passages 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 !

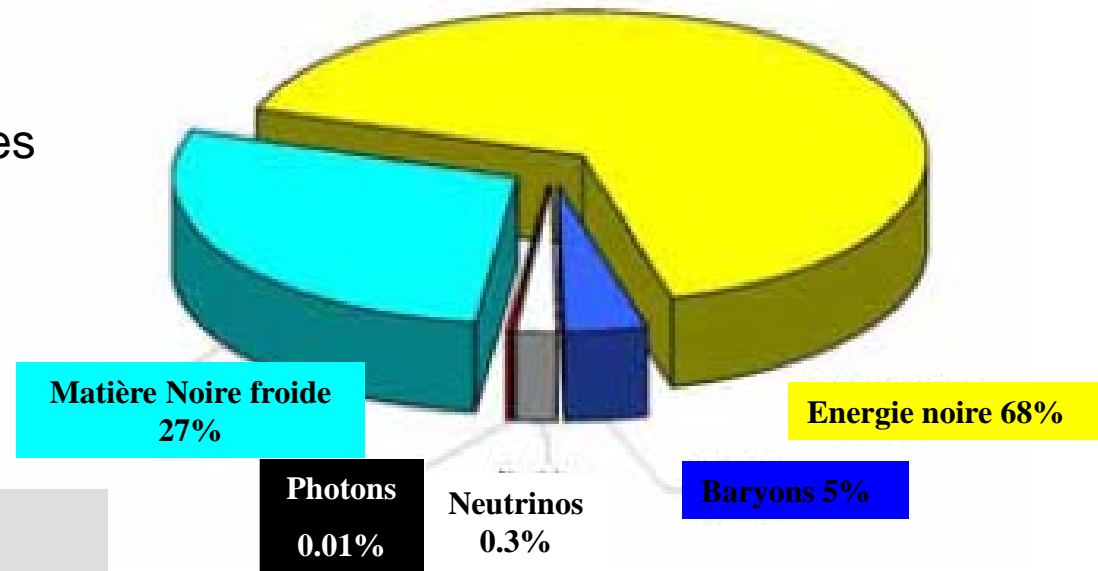
## □ Détection de la Matière noire

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

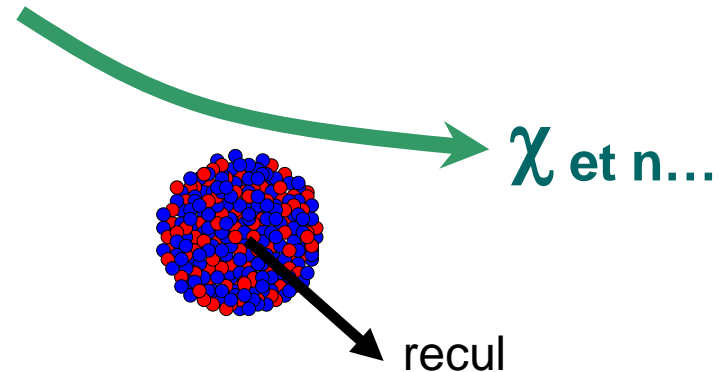
## Contenu énergétique de l'Univers



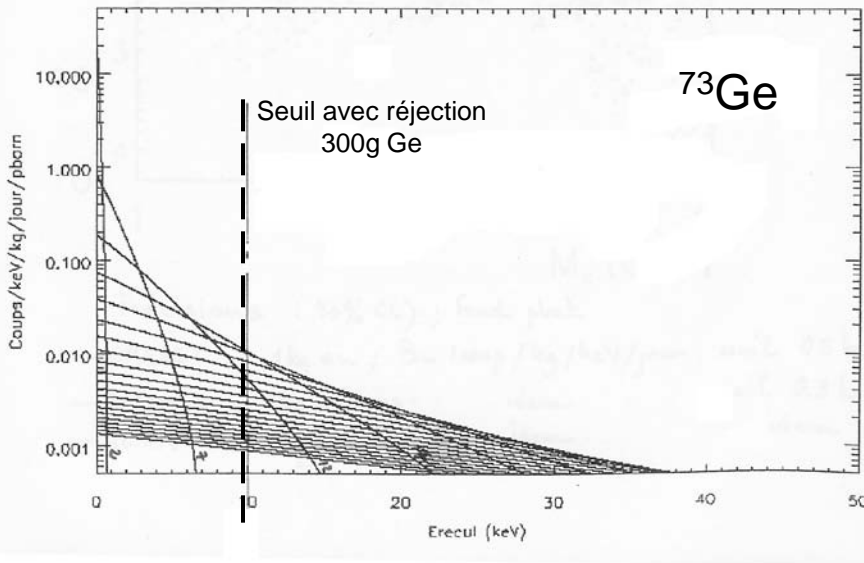
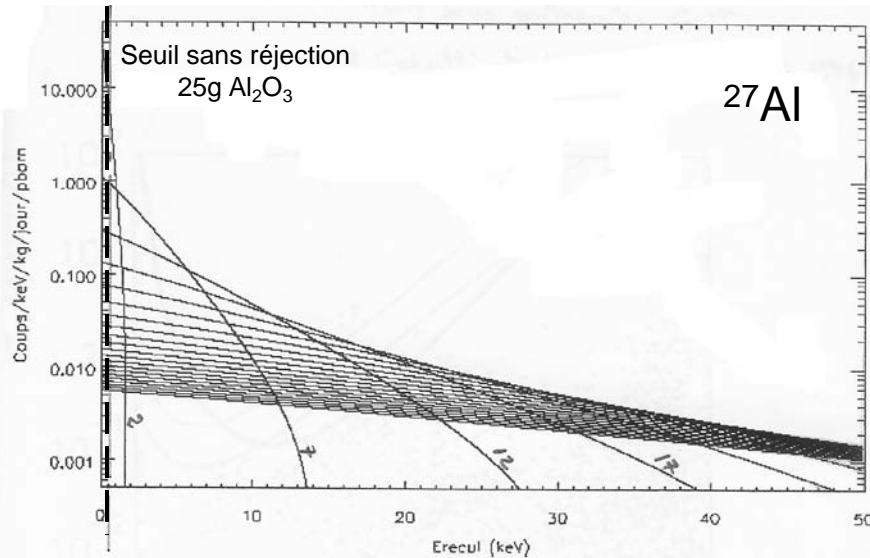
Une des candidats le mieux motivé:

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

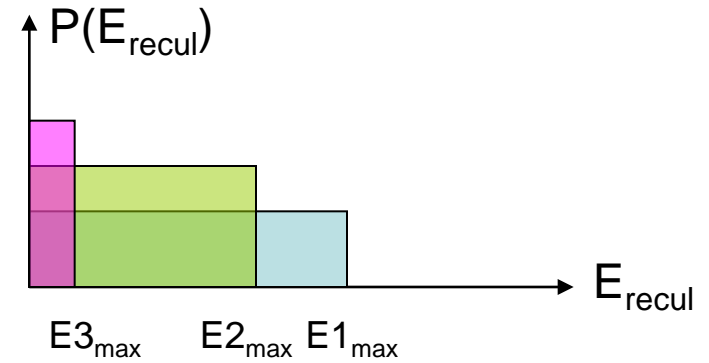
$\curvearrowright$  **Weakly Interactive Massive Particles**



# 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



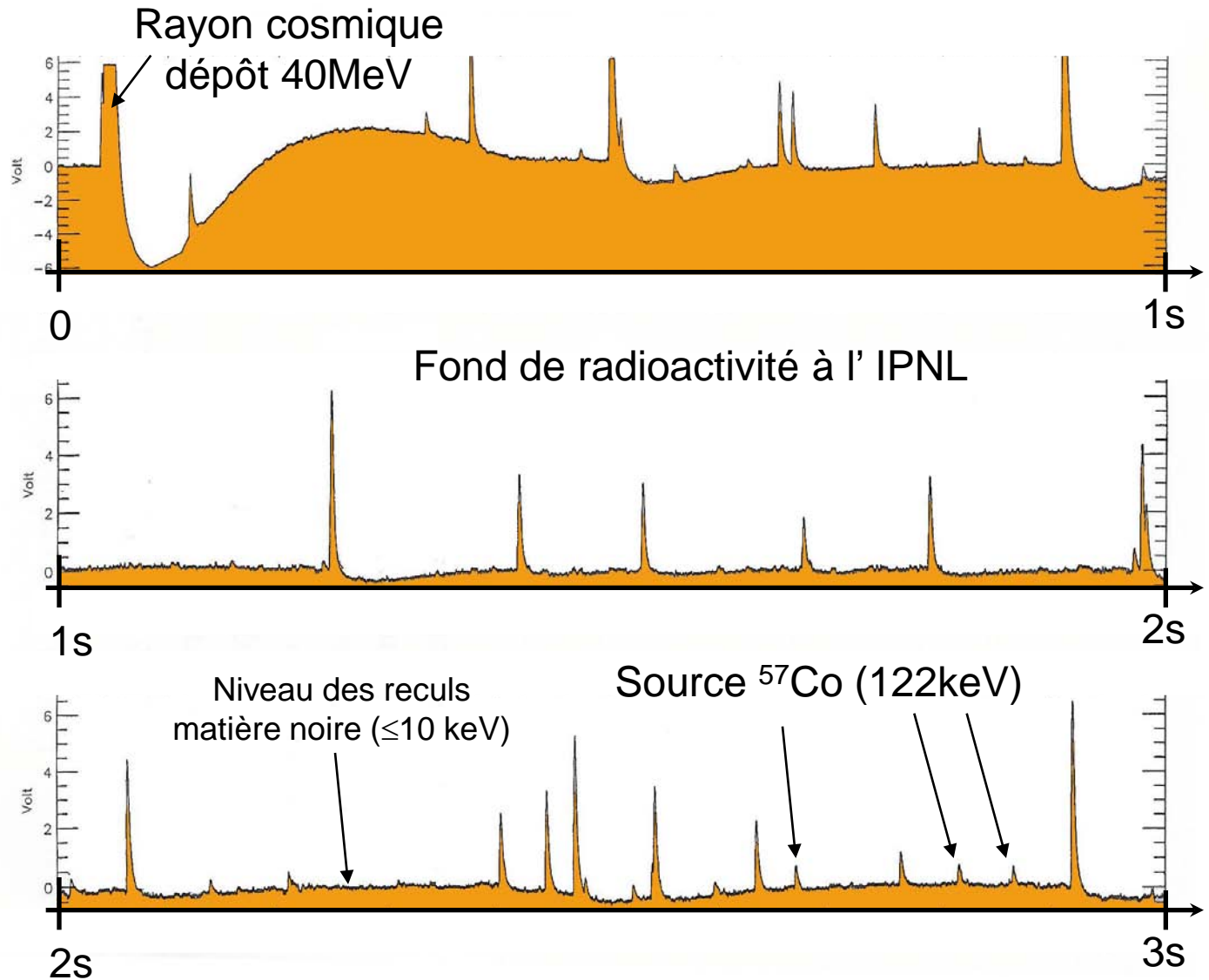
- Cinématique élémentaire  $\rightarrow E_{\text{max}}$   
(adaptation des masses: de la pétanque en labo !)
- Les faibles énergies de recul sont toujours « peuplées »  $\rightarrow$  spectres piqués à basse énergie: **on recherche le meilleur seuil  $\rightarrow$  bolomètres !**



# 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: bref état des lieux

---

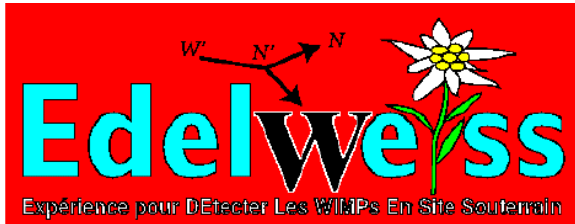
- **1985: principes** (Goodman & Witten)
- **1990: faisabilité de seuils  $\approx$  keV** démontrée dans bolomètres à cibles massives (plusieurs centaines de grammes) Ge, Si,  $Al_2O_3$ 
  - manips en souterrain: **bruit de fond élevé (radioactivité !)**
- **2000: annonce d'une détection positive** (expérience DAMA au GranSasso) *scintillateurs NaI à 300K; détection par la signature attendue matière noire [« modulation annuelle »: la composition des vitesses terre/soleil induit une modulation de l'énergie et du flux des WIMPs]. Résultats très controversés, non vérifiés par les expériences postérieures, dans le cadre des modèles standards des WIMPs: mais motivation puissante pour les expérimentateurs !*
- 1990→2005: **R&D discrimination par techniques mixtes (et son application en souterrain)**
  - **charges & chaleur:** sur Ge (CDMS, EDELWEISS) & Si (CDMS)
  - **lumières & chaleur** (CRESST, ROSEBUD)
- 2007: un sérieux compétiteur : **Xe liquide scintillant** (XENON)
- 2010: une autre détection positive dans une diode Ge à bas seuil: CoGENT
- mai 2011: annonce des premiers indices d'une modulation par CoGENT !

## □ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Charges & Chaleur »

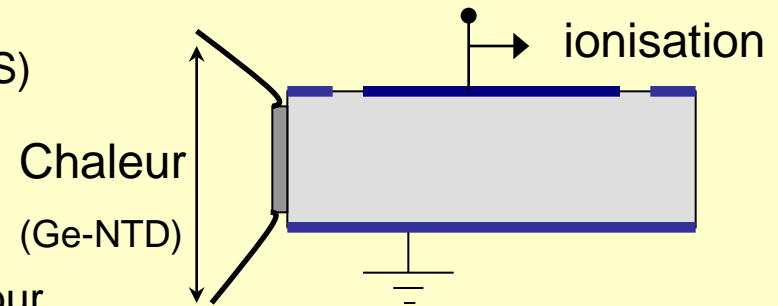
CDMS (US), EDELWEISS (France)\*

\*remerciements à Alex Juillard (CSNSM, IPNL)

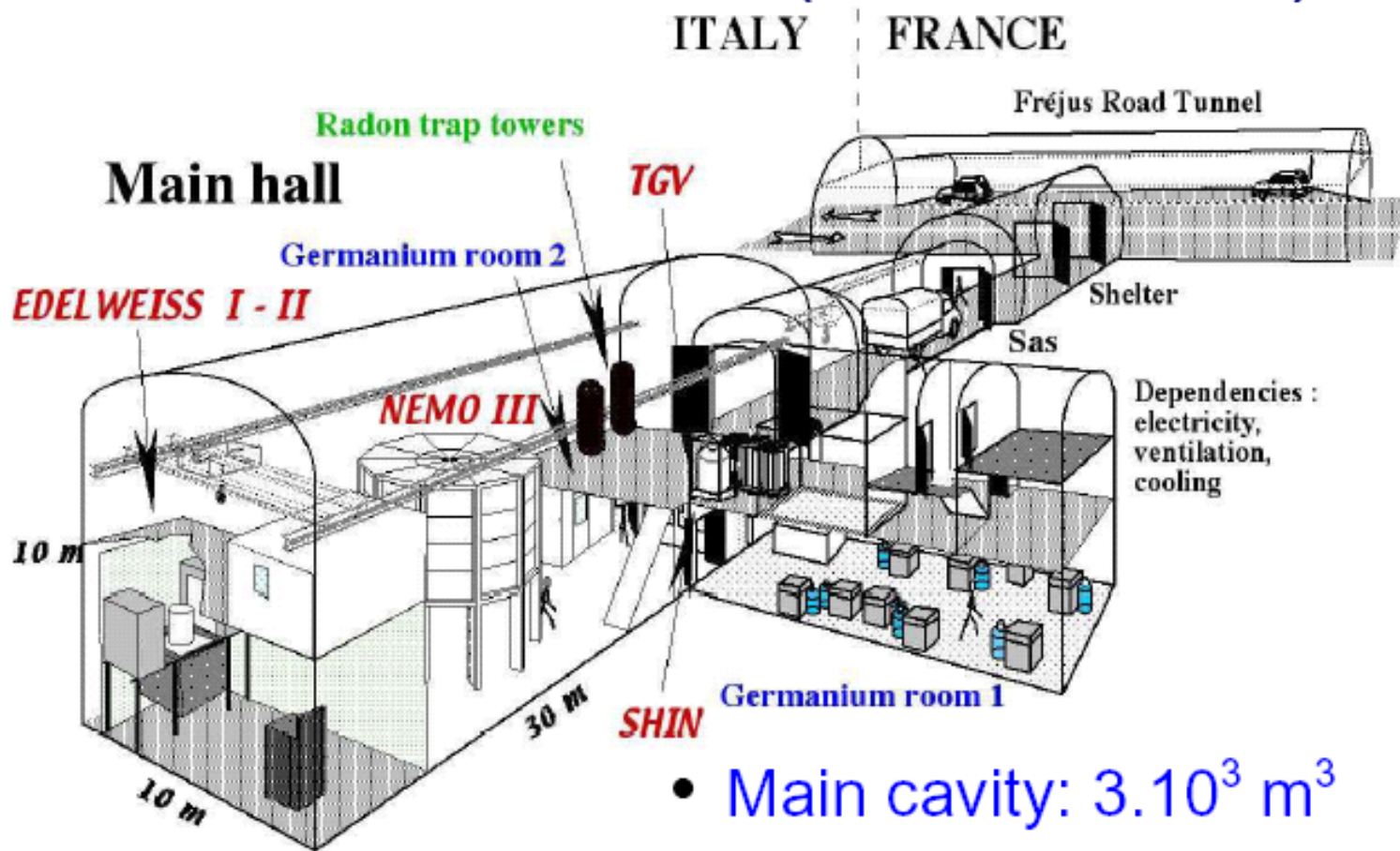


## Expérience pour DÉtecter Les Wimps En Site Souterrain

- ✓ tunnel du Fréjus (Laboratoire Souterrain de Modane; 4500mwe; 1990→)
- ✓ collaboration **CNRS IN2P3 (CSNSM, IPNL), INSU (IAP), SPM (CRTBT)** & CEA (DAPNIA, DRECAM) + Univ. Karlsruhe; JINR Dubna ( $\approx 50$  chercheurs)
- ✓ technique mixte « charges / chaleur » sur Ge;
- ✓ thermométrie EDELWEISS-I:Ge-NTD ( $\neq$  CDMS: TES)
- ✓ meilleurs résultats mondiaux en 2003
- ✓ Edelweiss-I
  - 3 x 320g Ge; exposition « fiducielle » de 62kg. jour
  - évts dans la zone des reculs (probablement des évts de surface mal collectés)
- Edelweiss-II (démarre en 2006 au LSM)
  - 10 à 40 kg de détecteurs à terme
  - techniques de discrimination des évts de surface (suite aux R&D CSNSM en cours)

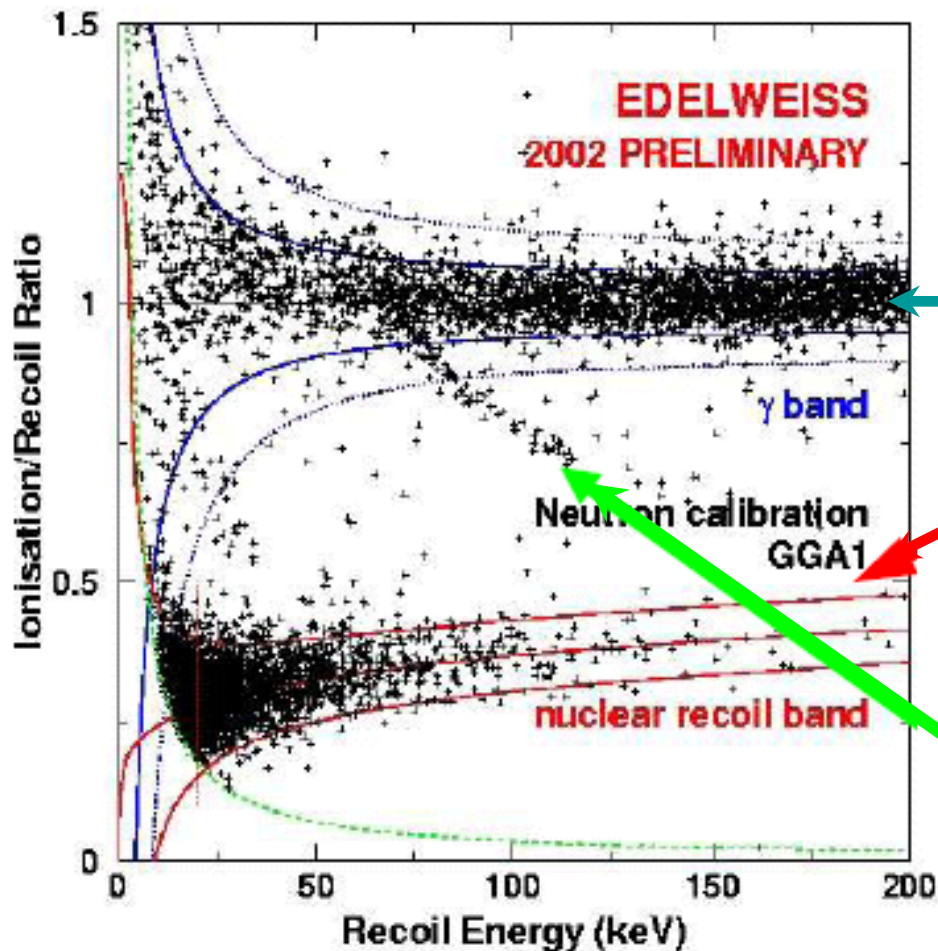


## Inside the LSM (CNRS-CEA)



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

# Détecteurs Edelweiss: discrimination gammas/reculs

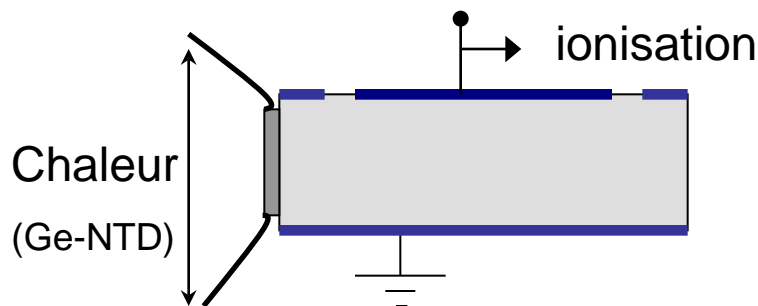


Irradiation  $^{252}\text{Cf}$

gammas

reculs

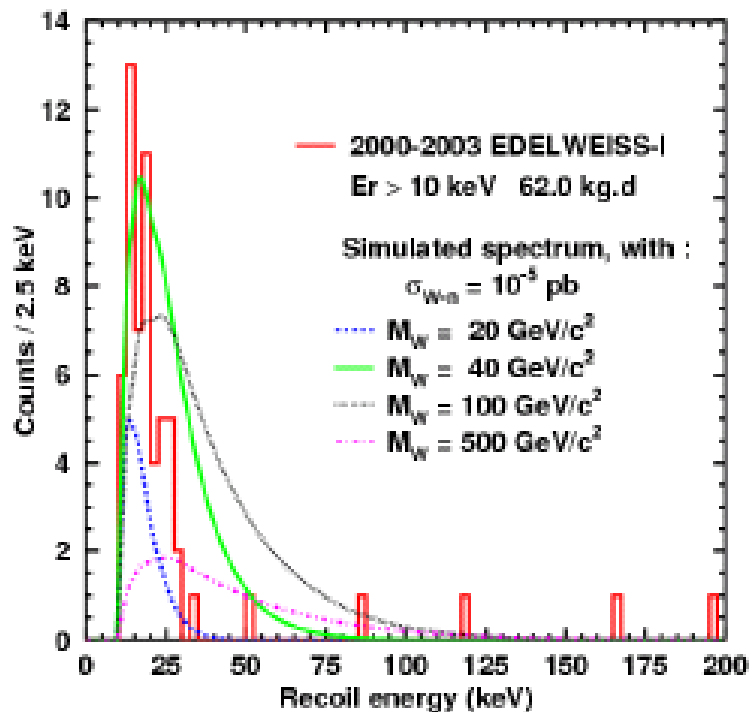
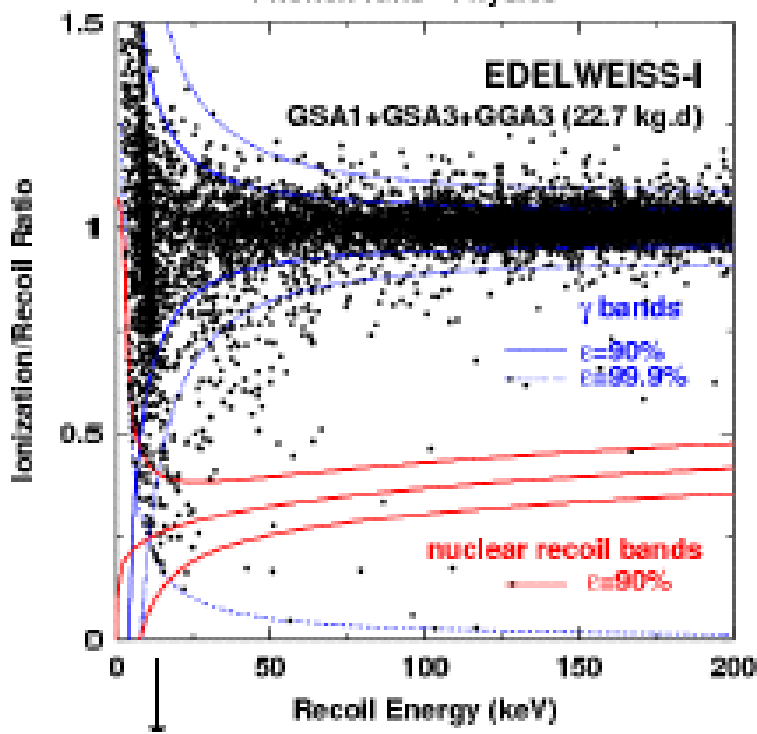
Diffusion inélastique sur  $^{73}\text{Ge}$



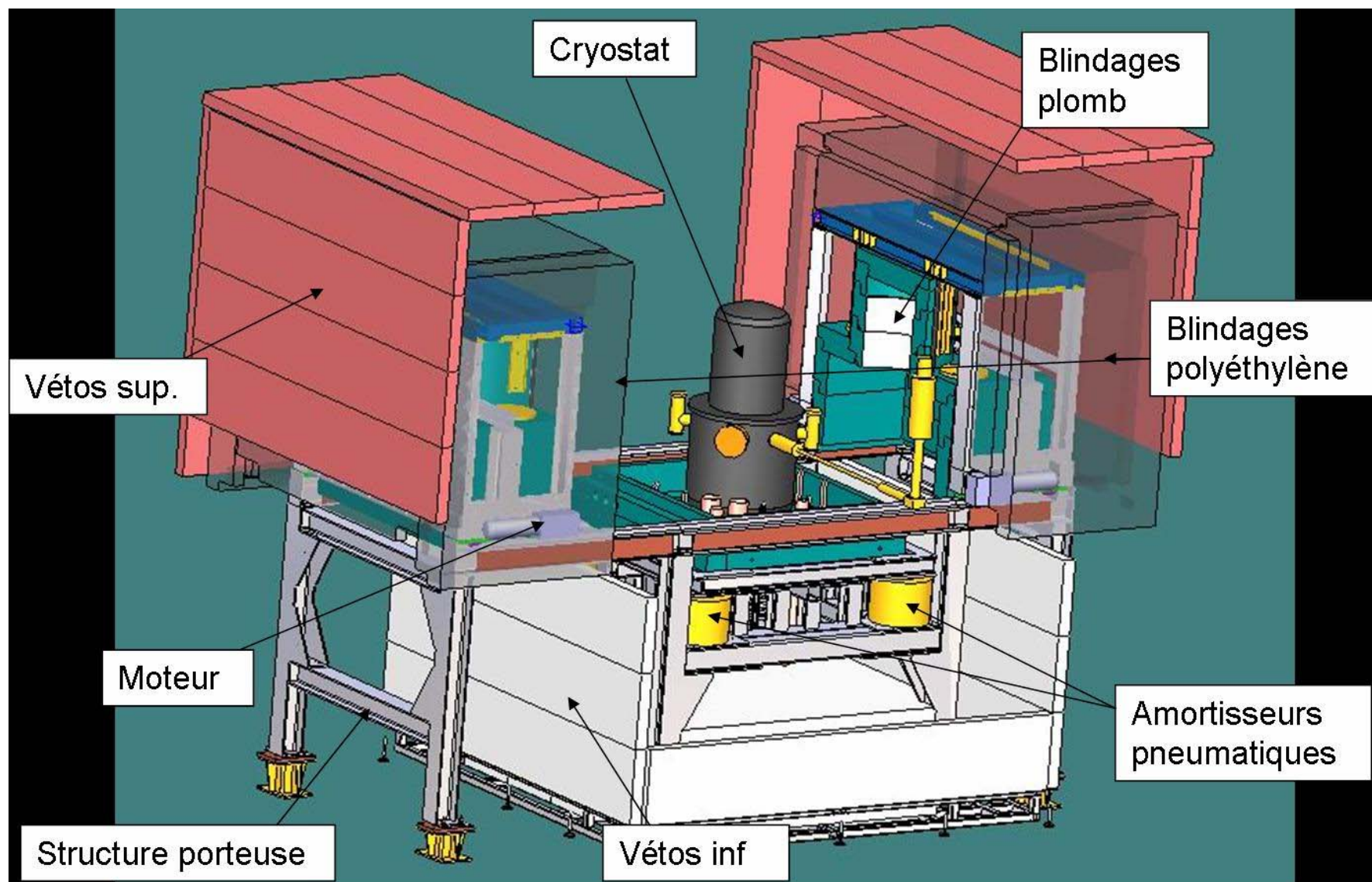
P. Di Stefano, IPN Lyon

# Runs de fond Edelweiss-I (2000→2003):

- exposition 62 kg.jour
  - 59 événements, concentrés à basse E, probablement des **événements de surface mal collectés** sous les électrodes...
- **R&D (CSNSM) sur la localisation**: (1) analyse en temps résolu du signal de charge (2) films NbSi sensibles à la composante athermique des phonons issue des interactions.

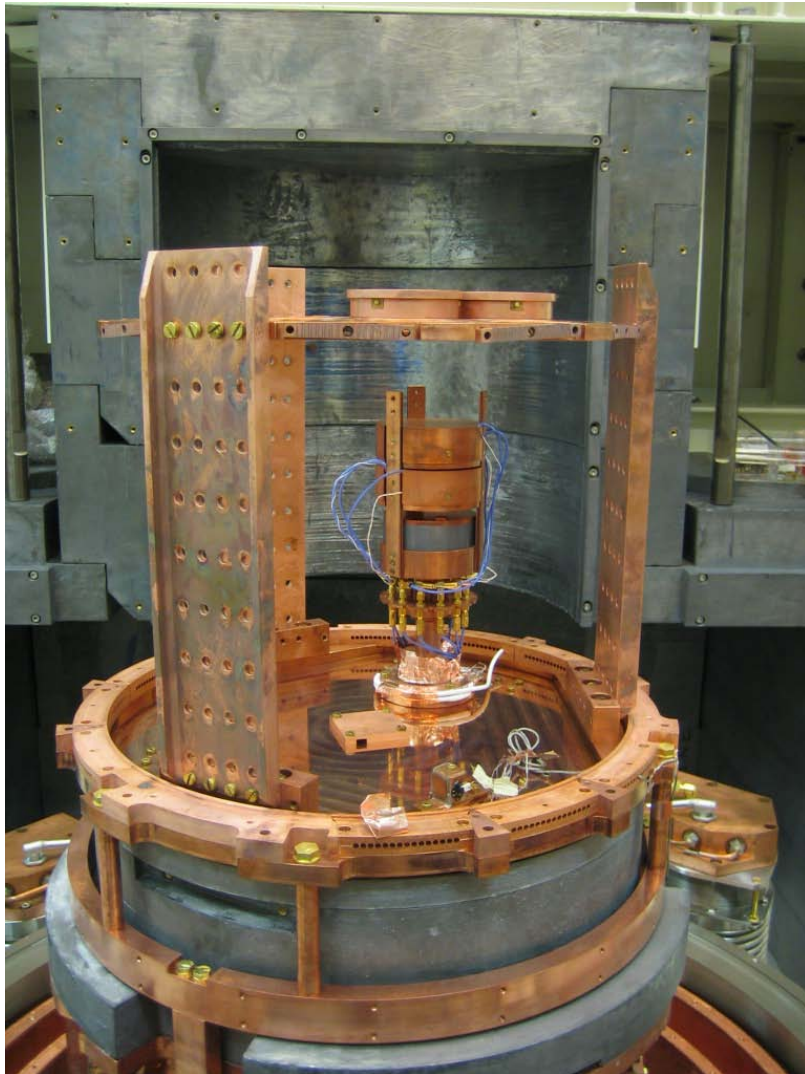


Fit fond & spectres de recul





# Edelweiss-II: amélioration des fonds



## ◆ Radiopureté

Détecteurs HPGe dédiés pour le contrôle systématique de tous ldes matériaux

## ◆ Salle blanche (classe 100 autour du cryostat, classe 10 000 pour le blindage total)

## ◆ Air déradonisé (de NEMO3)

## ◆ 20 cm Pb (blindage gamma)

## ◆ Blindage neutron

- EDW-I : 30cm paraffine
- EDW-II : **50 cm PE** et meilleure couverture

## ◆ véto $\mu$ (>98% couverture)

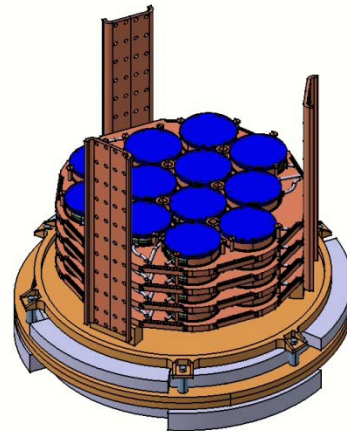
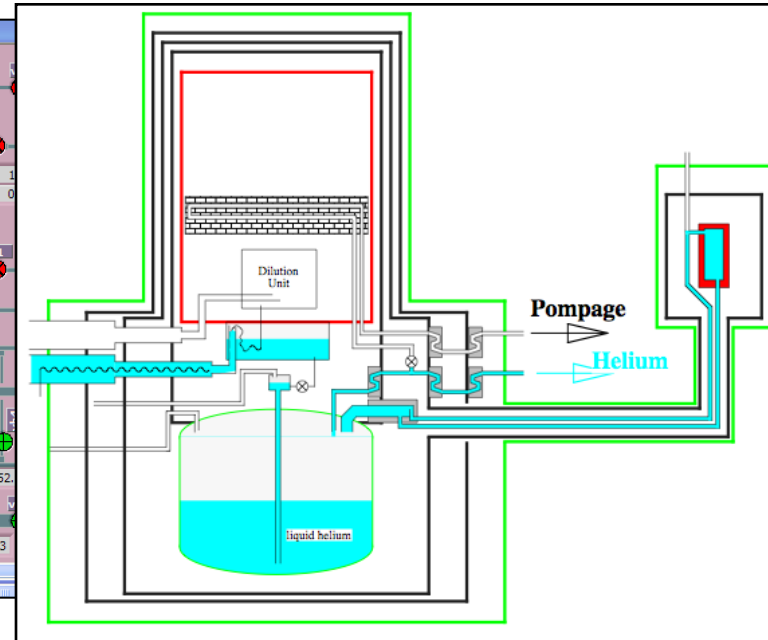
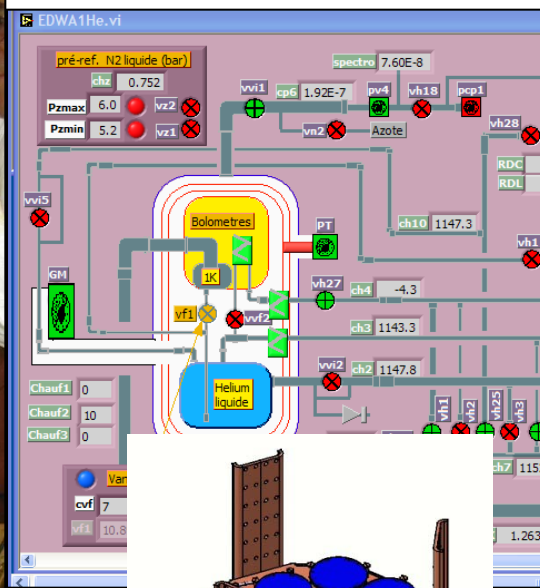
- Détecteurs de Neutrons en coïncidence avec les vétos (en cours)

## ◆ Sensibilité attendue (EDW-I \* 100)

$\sigma_{w-n} \approx 10^{-8}$  pb (phase 100 détecteurs)  
**0.002 évt./kg/jour (Erecul>10keV)**

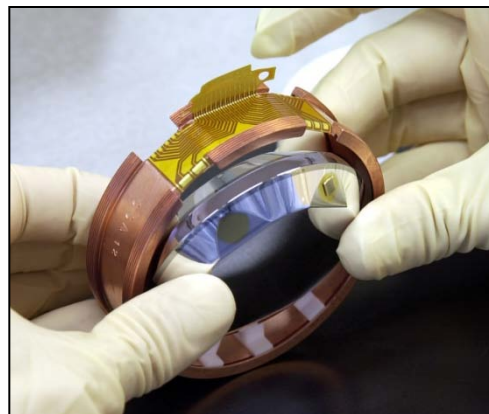
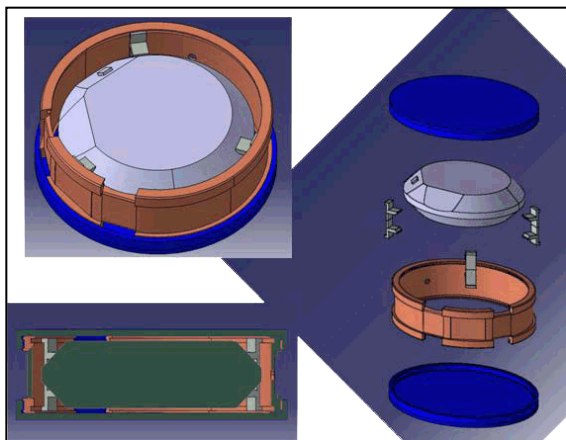
= neutrons venant des  $\mu$  de haute énergie interagissant dans la roche

# Edelweiss-II: amélioration des cryostatats



- ✓ Cryostat automatisé
  - ✓ Géométrie “renversée”
  - ✓ Sans azote: 3 “Pulse tube” (écrans 50K and 80K) and reliquéfacteur He (conso.  $\approx 0$ )
  - ✓ large volume 50 l
  - ✓ jusqu’à  $\approx 120$  détecteurs
  - ✓ disposition compacte and hexagonale
- ⇒ auto blindage  
 ⇒ statistique ++  
 ⇒ coïncidences ++ (pour fond n)

# Edelweiss-II: amélioration des détecteurs



## *23\*320g Ge/NTD :*

- ◆ Développés au CEA Saclay & par Camberra-Eurisys
  - ◆ Sous couche amorphe Ge and Si (**meilleure collection de charge pour les évts de surface**)
  - ◆ taille optimisée des NTD et meilleure homogénéité de Ttravail (16-18 mK) :
- résolution  $\approx$  keV**
- ◆ Nouveaux support & connecteurs (Téflon et cuivre seulement)

**Ils sont tous au LSM**



## *- 7\*400g détecteurs Ge/NbSi :*

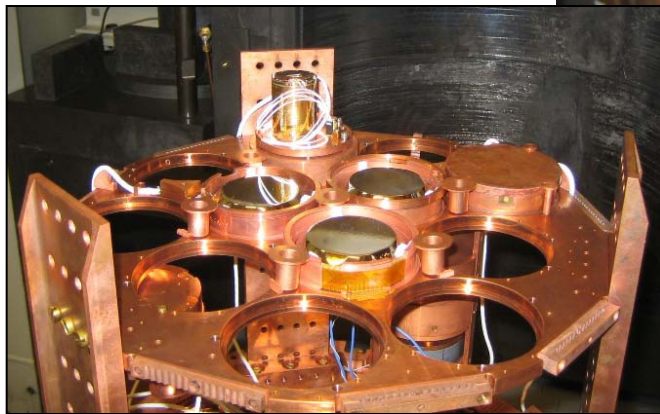
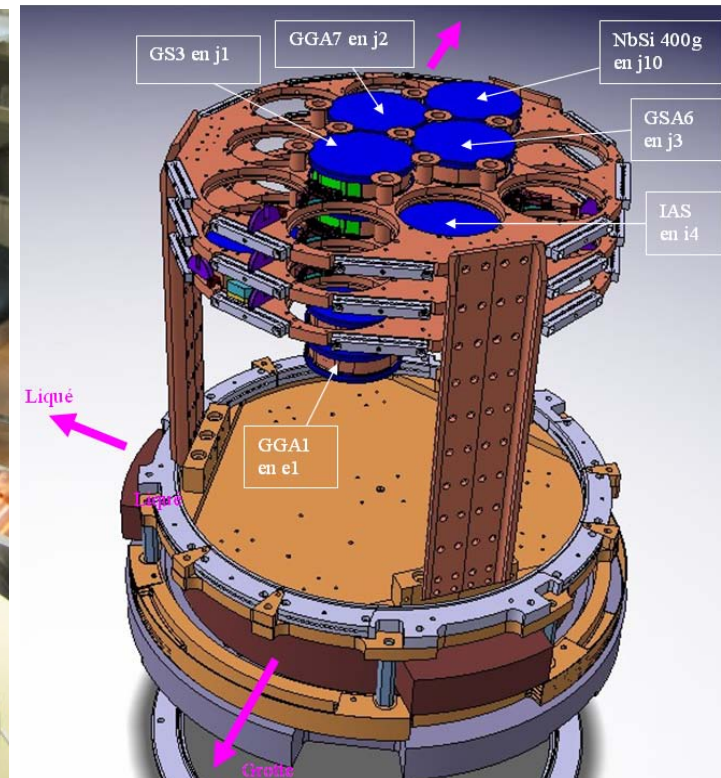
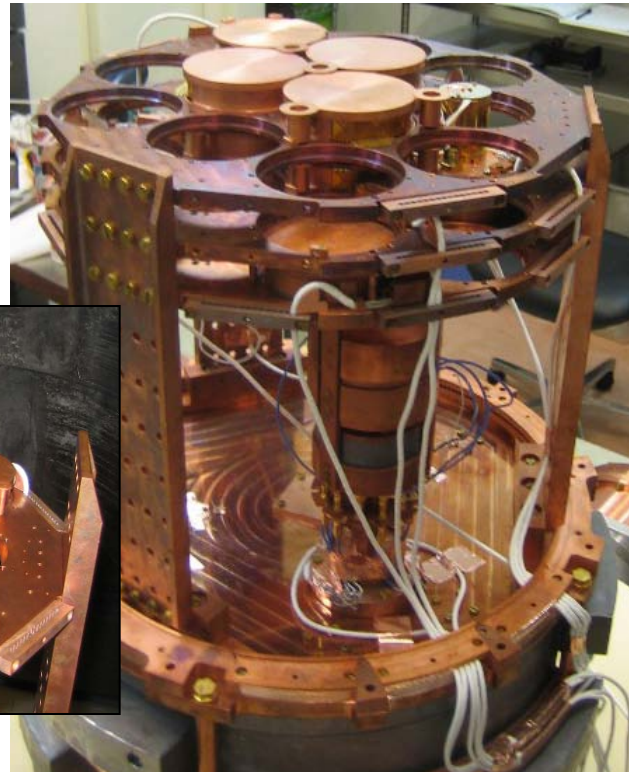
- ◆ Développés au CSNSM Orsay
- ◆ 2 NbSi thermomètres à films minces NbSi pour la réjection active des **événements de surface**
- ◆ R&D en cours avec détecteurs de 200g en labos.

**1 @ LSM**

**+ R&D...**

# Le montage d' Edelweiss-II en 2006

- ◆ **8 bolomètres actifs (/15)**
- **2 EDW-I Ge/NTD** tour à la EDW-I
- **4 EDW-I Ge/NTD** supports EDW-II :
  - 3 centraux sans écran Cu, 1 en coïncidence**
- **1 200g Ge/NbSi** testé au LSM (en 2004)
- **1 400g Ge/NbSi**
- **1 IAS 50g** “chaleur et lumière” (saphir; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



- ✓ fonctionne depuis Janvier 2006
- ✓ Cryogénie, Electronique, Acquisition OK pour runs à bas bruit de fond
- ✓ améliorations pour déclencher à basse E (microphonie !)
- ✓ détecteurs en fonction: 6 Ge/NTD, 1 400g Ge/NbSi et 1 50g Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> IAS
  - Premiers tests de fond : Fond  $\gamma = \frac{1}{2}$  EDW-I
  - Fond  $\alpha = \frac{1}{2}$  EDW-I (dans détecteurs Ge)
  - 21 Ge/NTD + x Ge/NbSi détecteurs prochainement

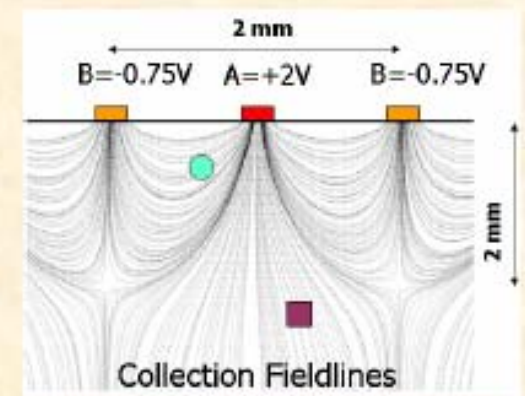
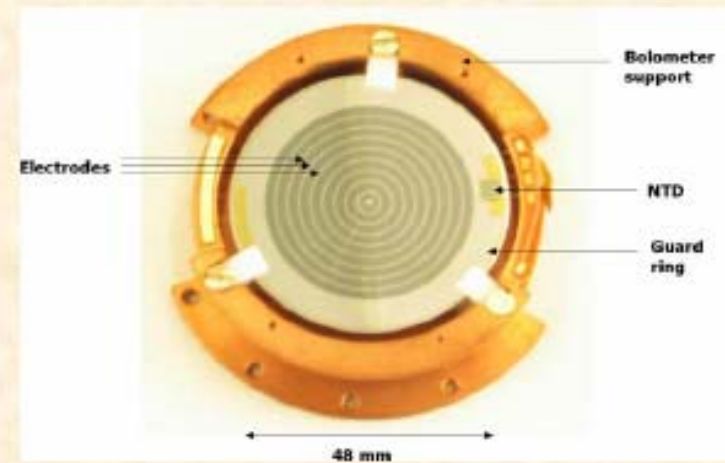
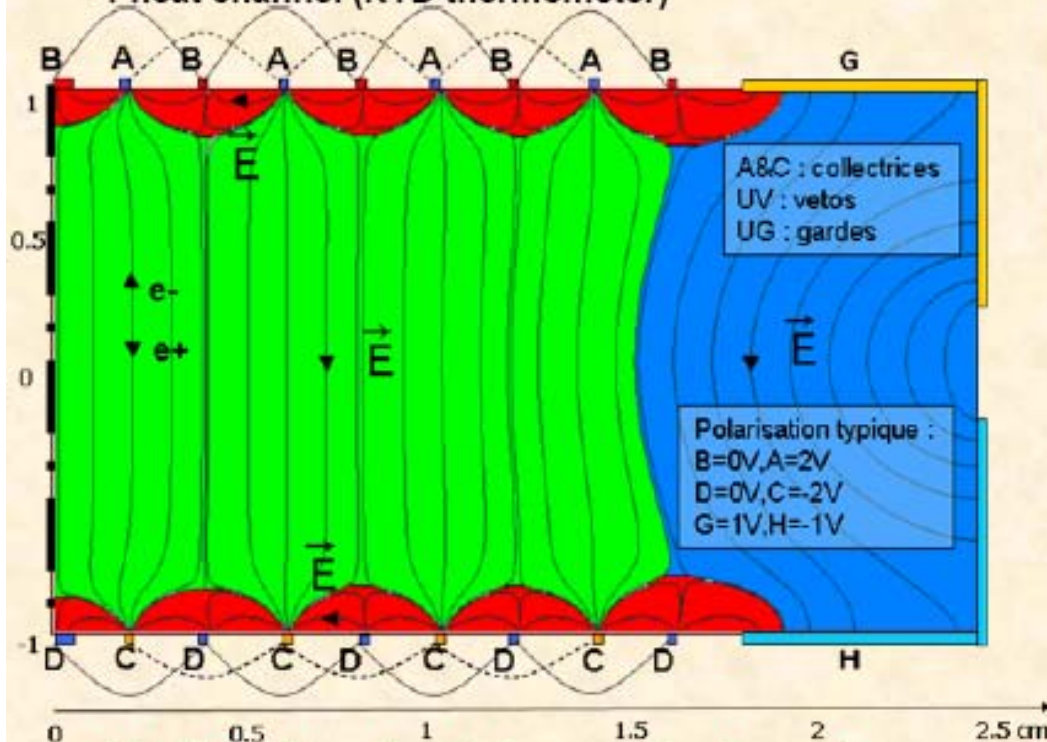
✓ EDW-II pourrait disposer de 30 kg de Ge en 2009  
(son concurrent direct CDMS aura “seulement” 5 kg à la même date)

mais toujours des événements de surface à mauvaise collecte ...qui limitent la sensibilité → R&D « InterDigit »

## R&D bolomètres Germanium à électrodes Inter-Digitées

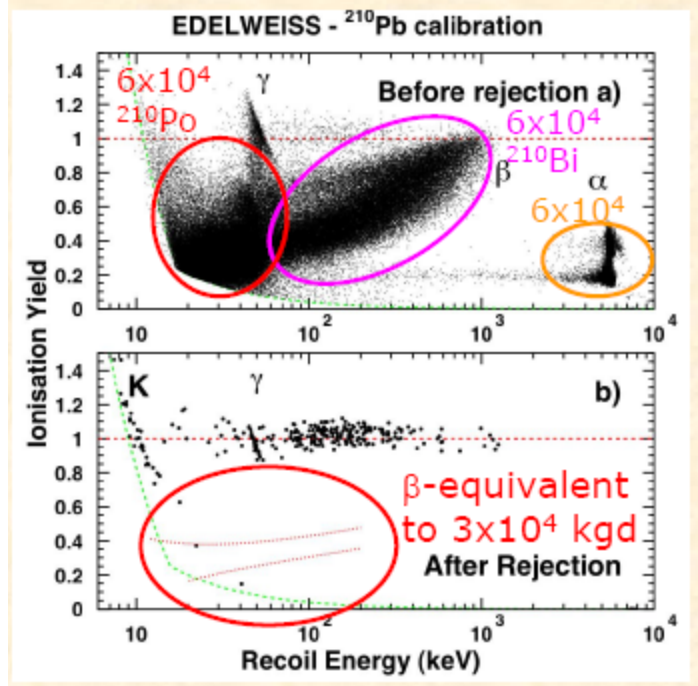
### 1<sup>er</sup> Proto ID201 (juin 2007):

- 193g crystal
- Germanium amorphous underlayer
- 6 ionisation channels
- 1 heat channel (NTD thermometer)



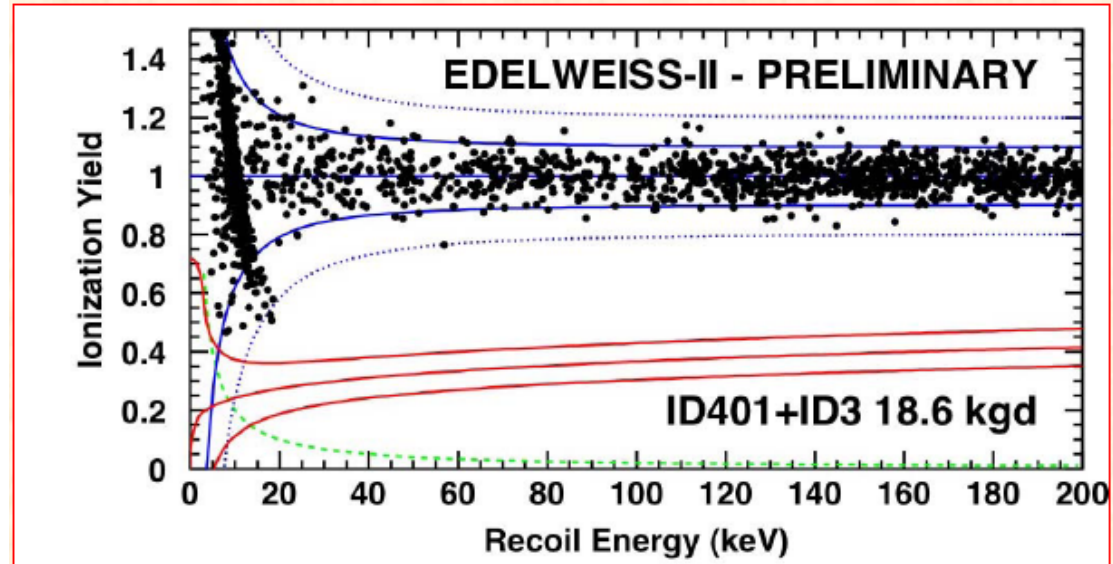
- Identification des événements de surface par utilisation des voies ionisation
- Application de champs électriques verticaux dans le volume et horizontaux en surface
- Toute collecte sur B ou D signe un evt de surface

# Résultats des 1ers bolomètres EDELWEISS Ge « Inter-Digit »



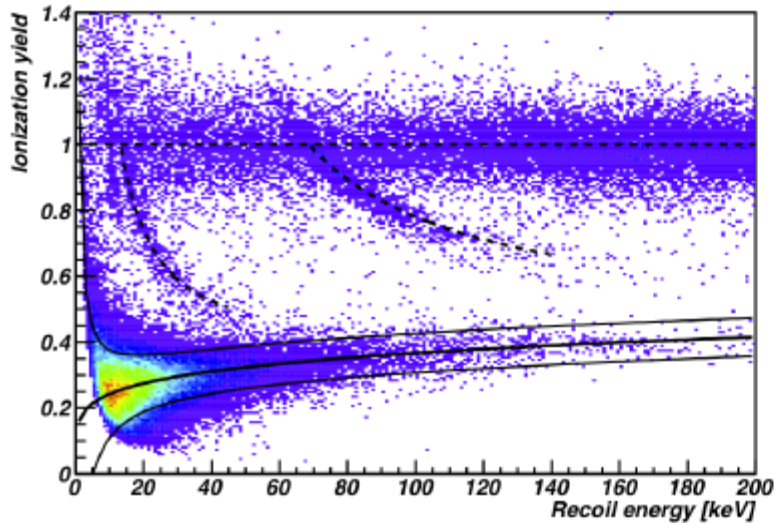
Calibration en surface par une source  $\beta$

Premiers résultats d'une pose « longue » au LSM

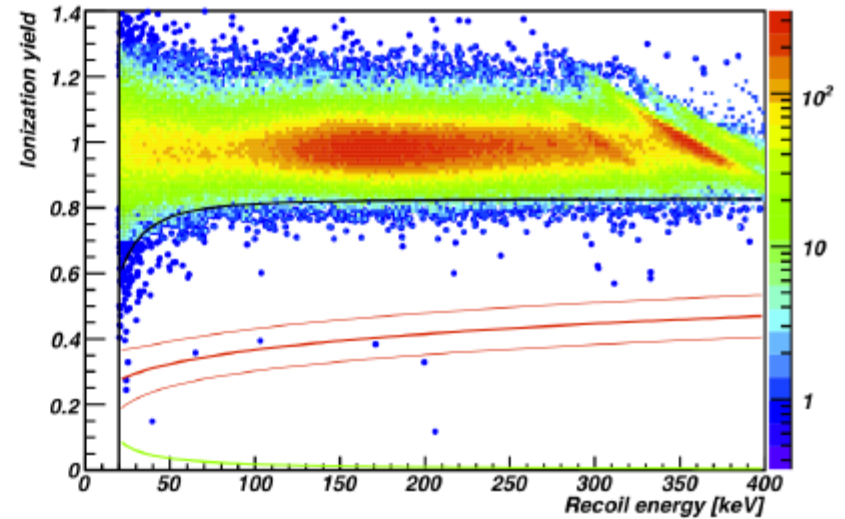


# EDELWEISS-II en 2011: résultats

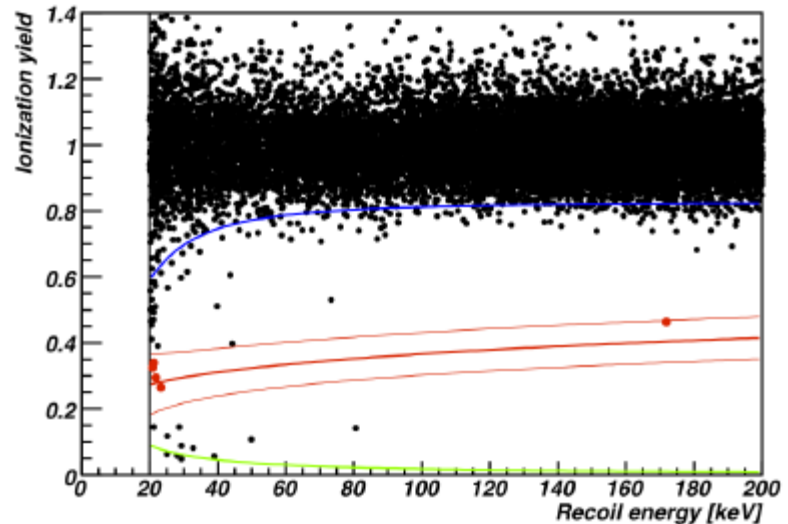
## Calibration neutrons



## Calibration gamma



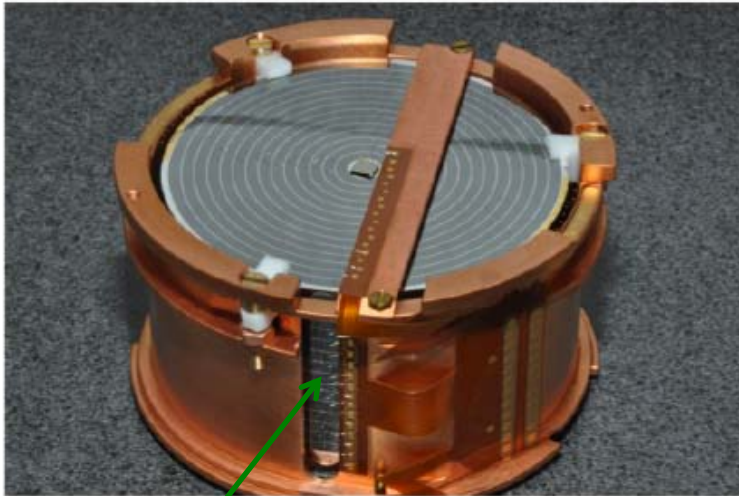
- Bolomètres « InterDigit »
- 10 cristaux de 400g en Ge
- 384 kg.jours au LSM
- 5 évts dans la zone des reculs





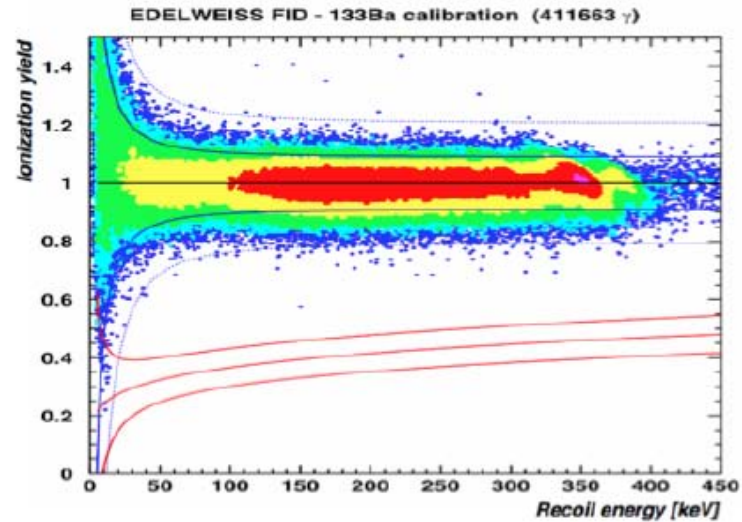
# EDELWEISS-II en 2011: le prochain pas

- Une couverture complète des électrodes: détecteurs ID→FID (**Full Inter Digit**)
- cibles 400g Ge →800g Ge
- installation en cours au LSM

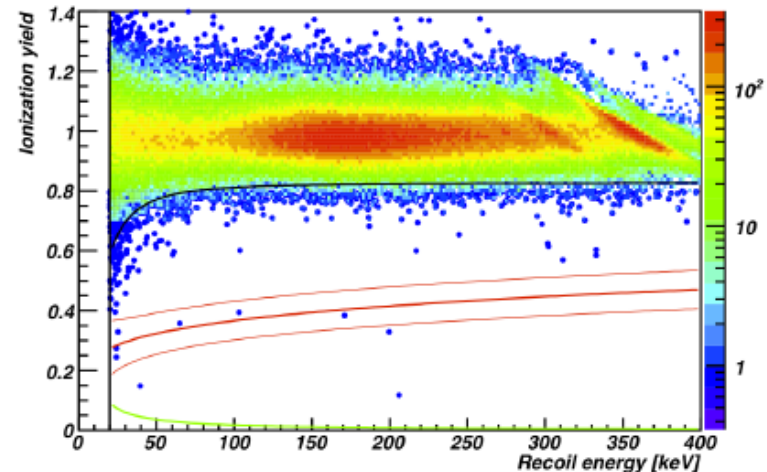


Electrodes inter-digitées également sur les chants

## Calibration gamma



FID



ID

## □ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Lumière & chaleur »

- ROSEBUD (Ge-NTD; tunnel du Canfranc)

Collaboration IAS / Univ de Saragosse

- CRESST (TES; tunnel du GranSasso)

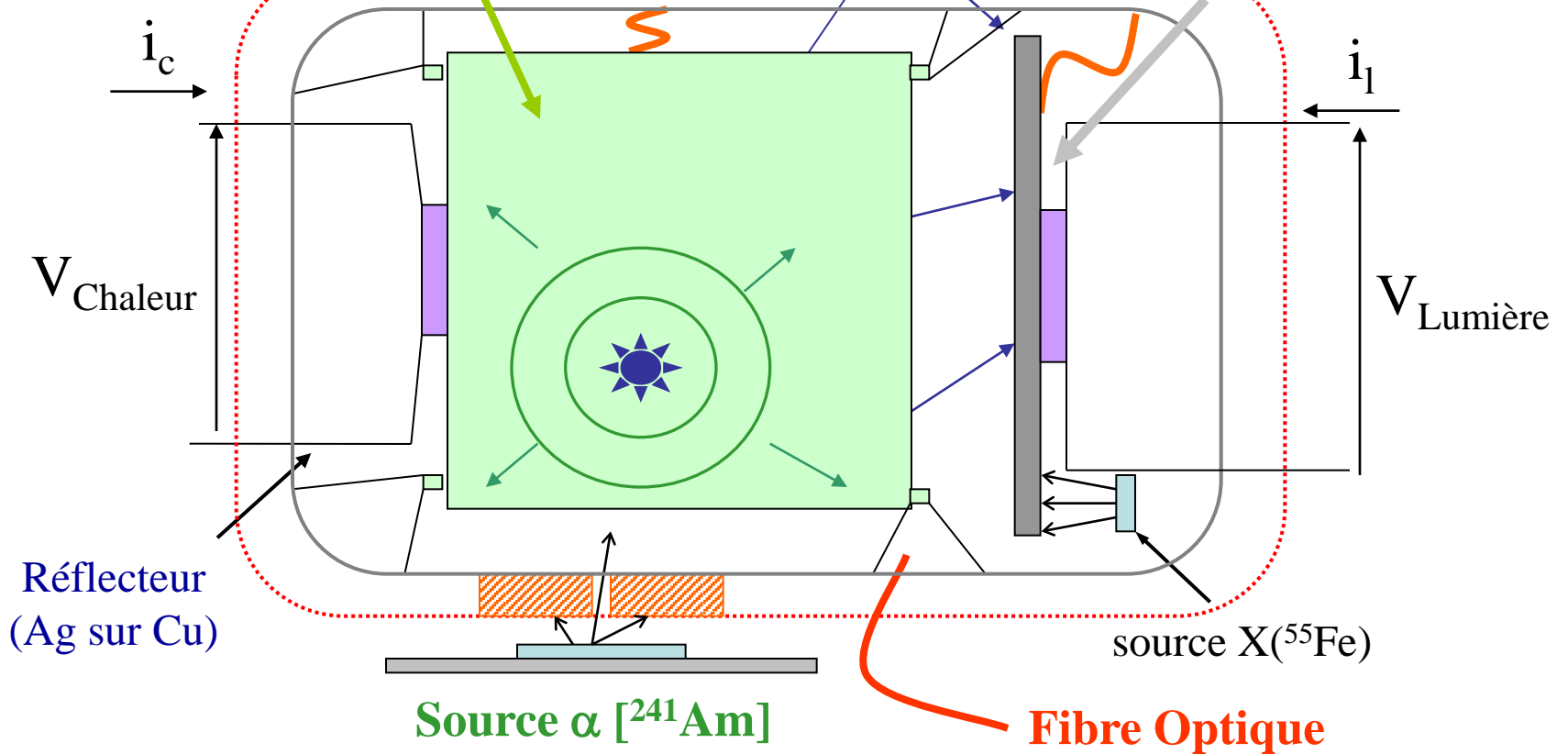
Collaboration MPI & TU München, Univ. d'Oxford, Univ. de Tübingen

# Bolomètres massifs scintillants

Cristal scintillant

20 mK

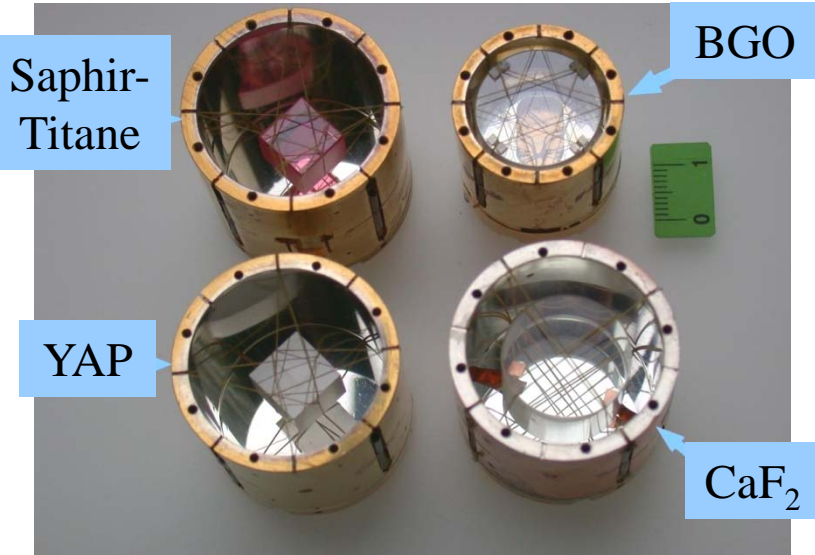
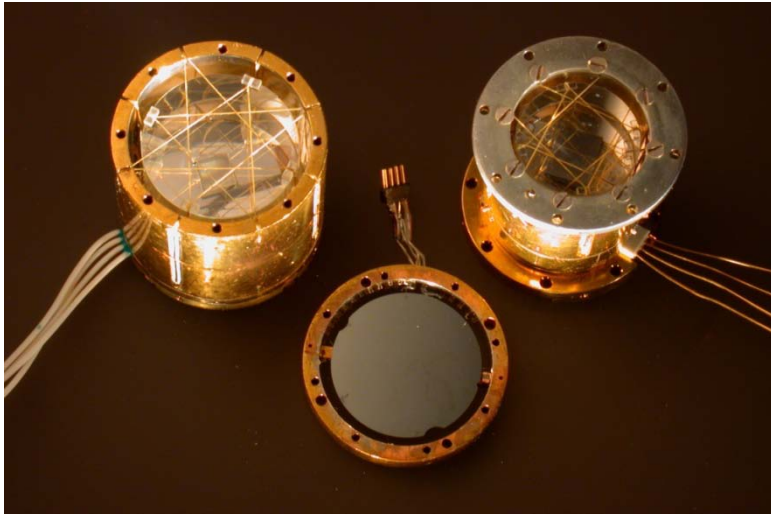
- Détecteur optique
- disque Ge
  - $\Phi=25\text{mm}$ ;  $\sim 100\ \mu\text{m}$



Thermistor R(T) [Ge-NTD]

# Bolomètres scintillants: R&D et réalisations IAS

BGO 91g & 46g; disque Ge Ø25mm



Tests à 20mK de cristaux

- **scintillants à 300K:**  
CaWO<sub>4</sub>, BGO, GSO, YAP, SrF<sub>2</sub>,...
- **non « scintillants » à 300K** mais « d'intérêt »  
Saphir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), TeO<sub>2</sub>, LiF,...

→ à 20mK tout scintille, tout discrimine !

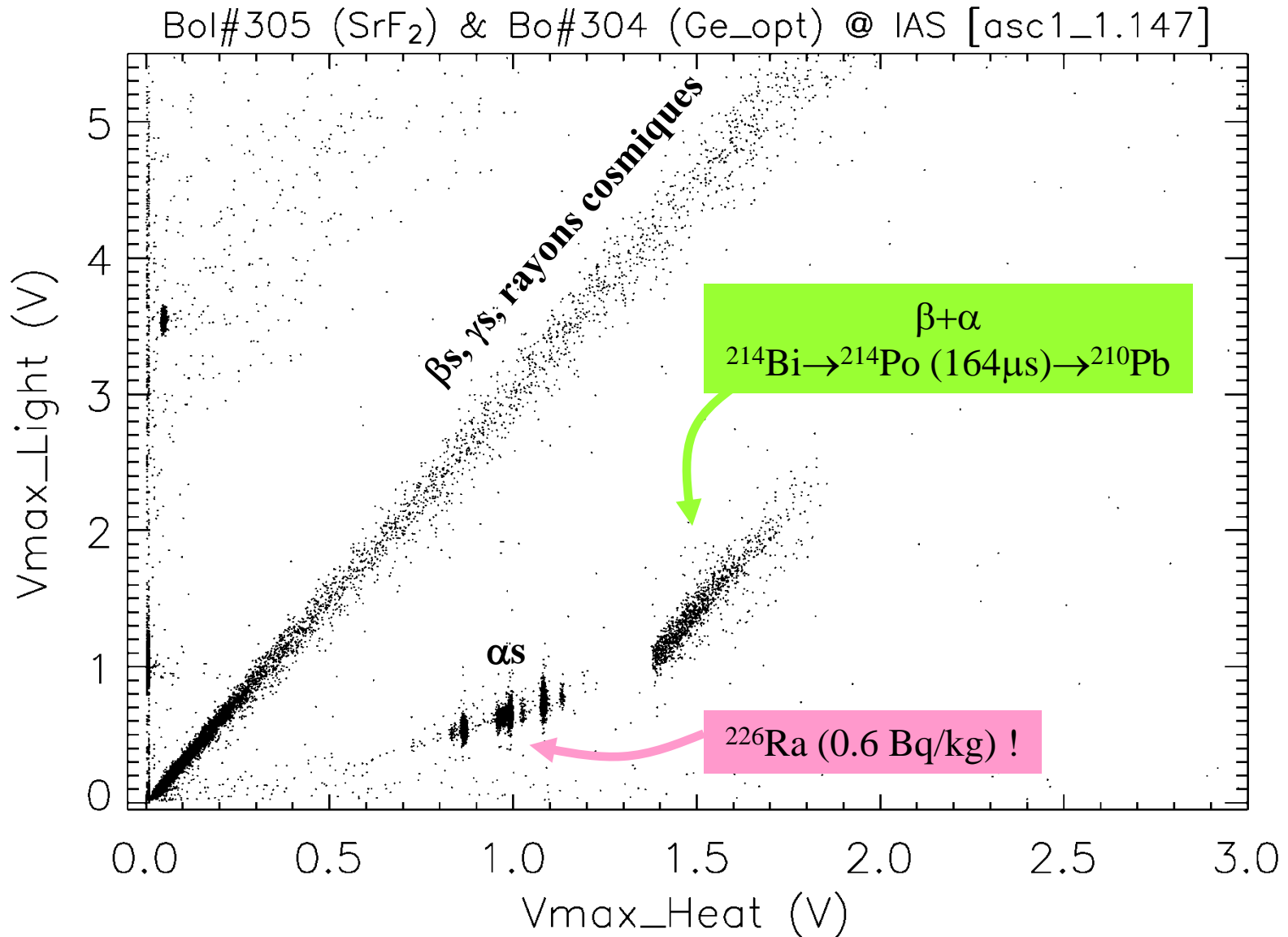
- Rendements lumineux ?
- Mécanismes d'émission ?
- Propriétés thermiques ?
- Radioactivités internes ?
- maille moléculaire !

détecteurs optiques + gros, + fins + froid

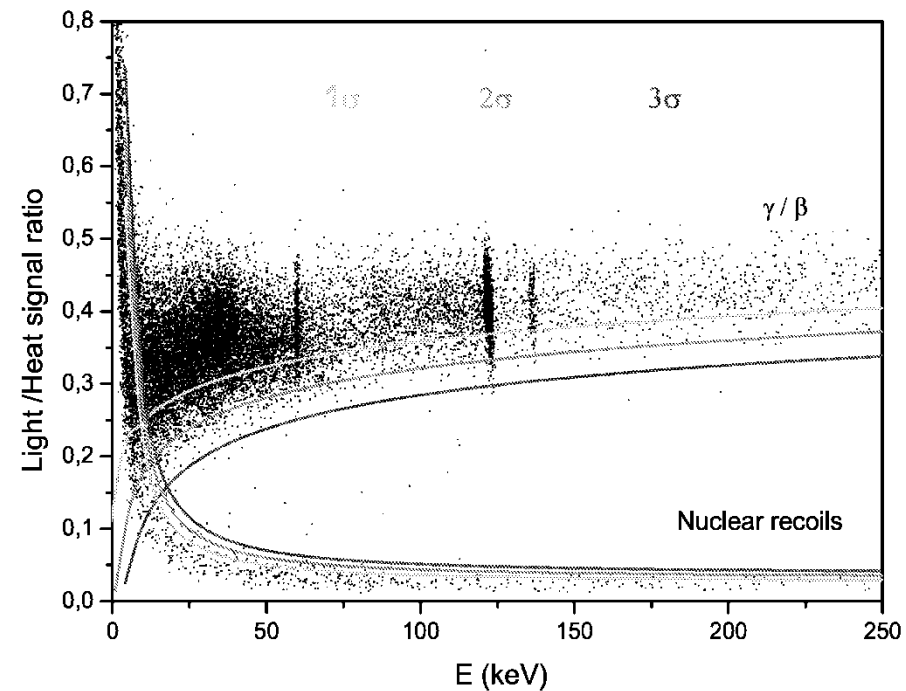
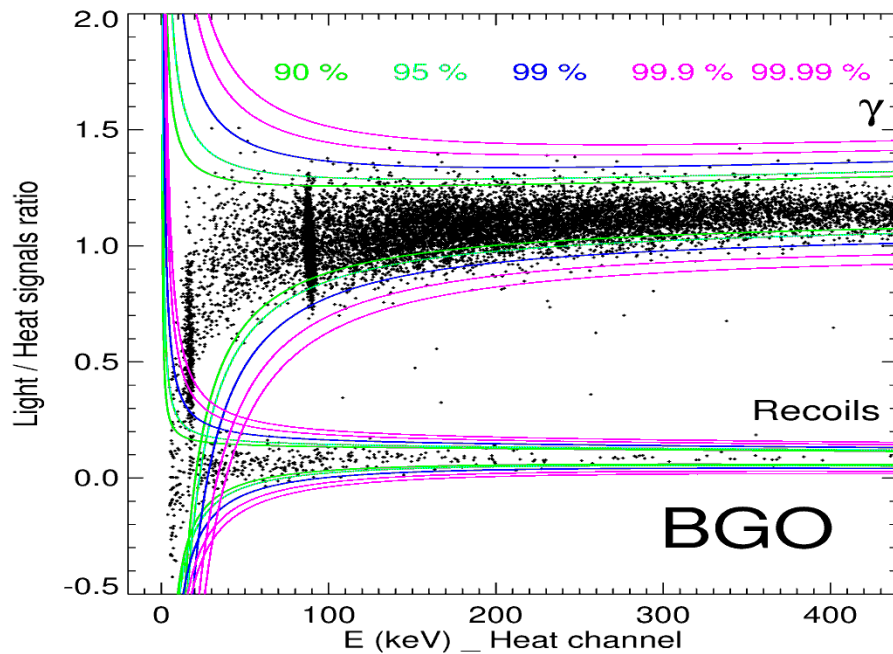
interprétation des reculs + difficile...

- **déclinaison « à l'infini » des cibles !**
- pas de phénomènes de surface
- extinctions (quenching) >> Ge

# Exemple de discrimination : bolomètre de 54g en SrF<sub>2</sub>



# Au menu de ROSEBUD en 2007: BGO et saphir



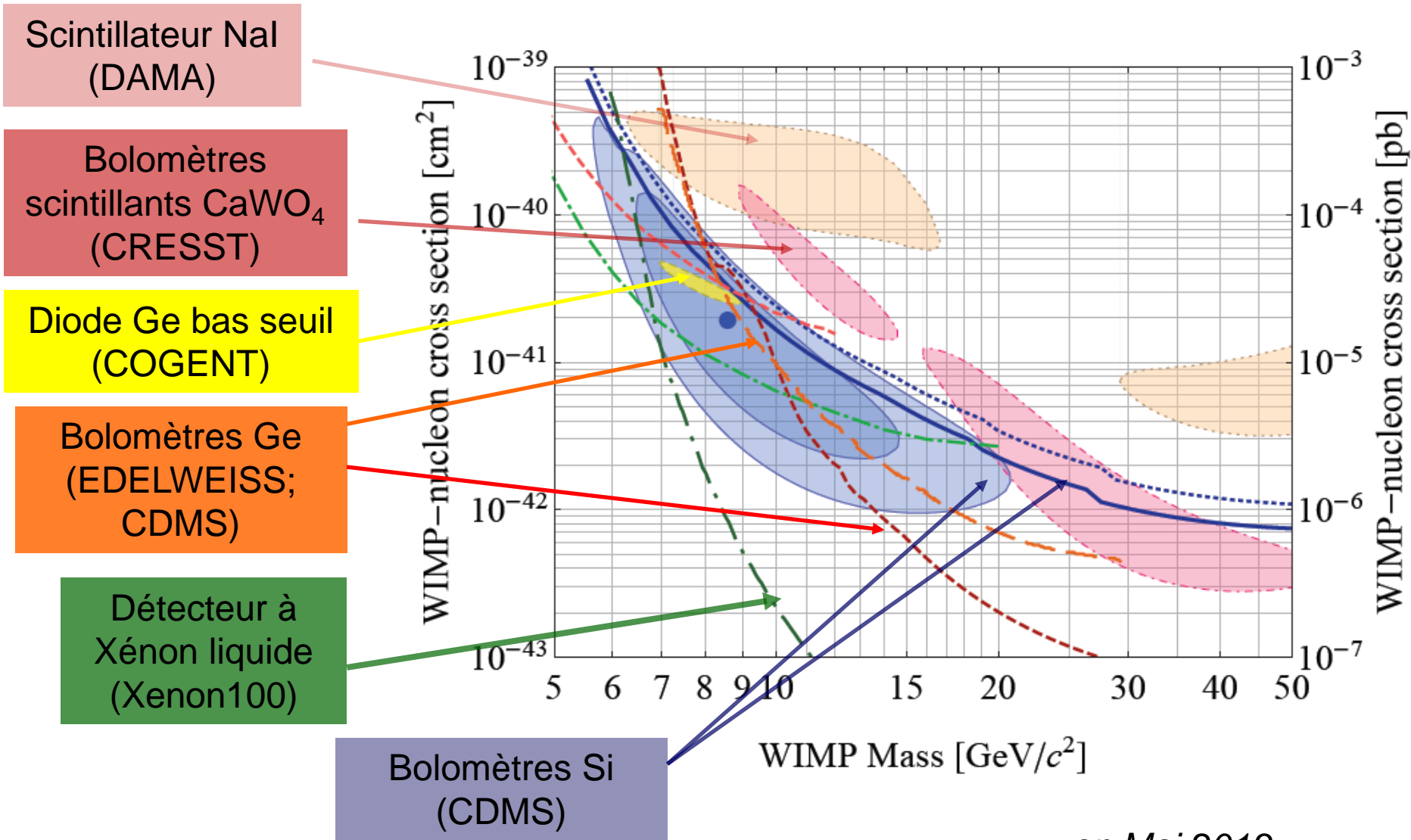
- 46g BGO
- radioactivité:  $^{207}\text{Bi}$
- seuil réjection à 90% CL: 23 keV

- 50g saphir
- radioactivité ?
- seuil réjection à 90% CL: 10 keV

Tests au Canfranc en 2007 (neutrons ambiants & et rayons cosmiques  $\downarrow\downarrow\downarrow$ ):

**Zones mortes ? Evénements atypiques ? Radioactivités internes?**

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



*en Mai 2013...*

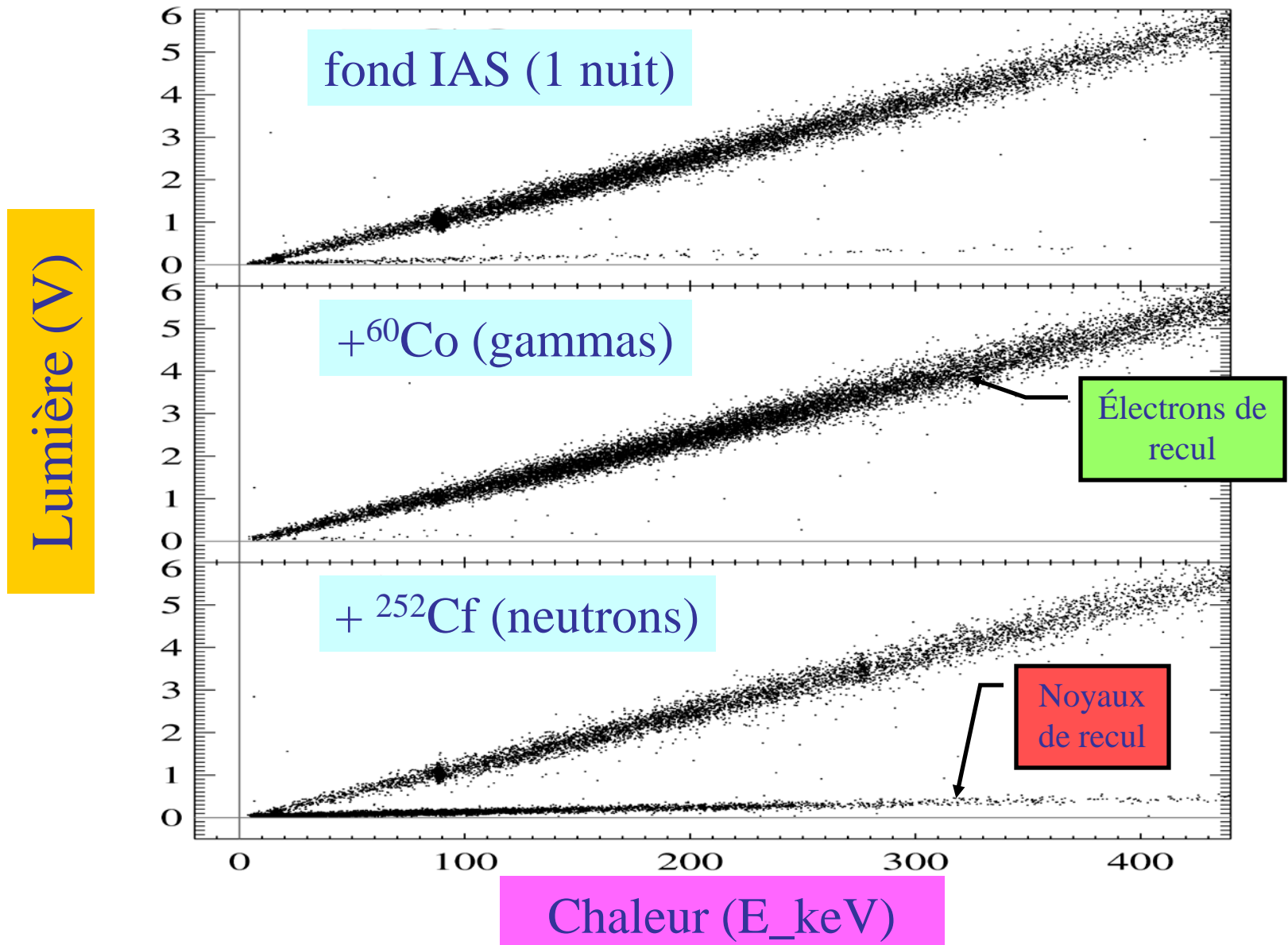
□ Désintégrations rarissimes  
(par bolomètres scintillants !)

Désintégrations alpha de

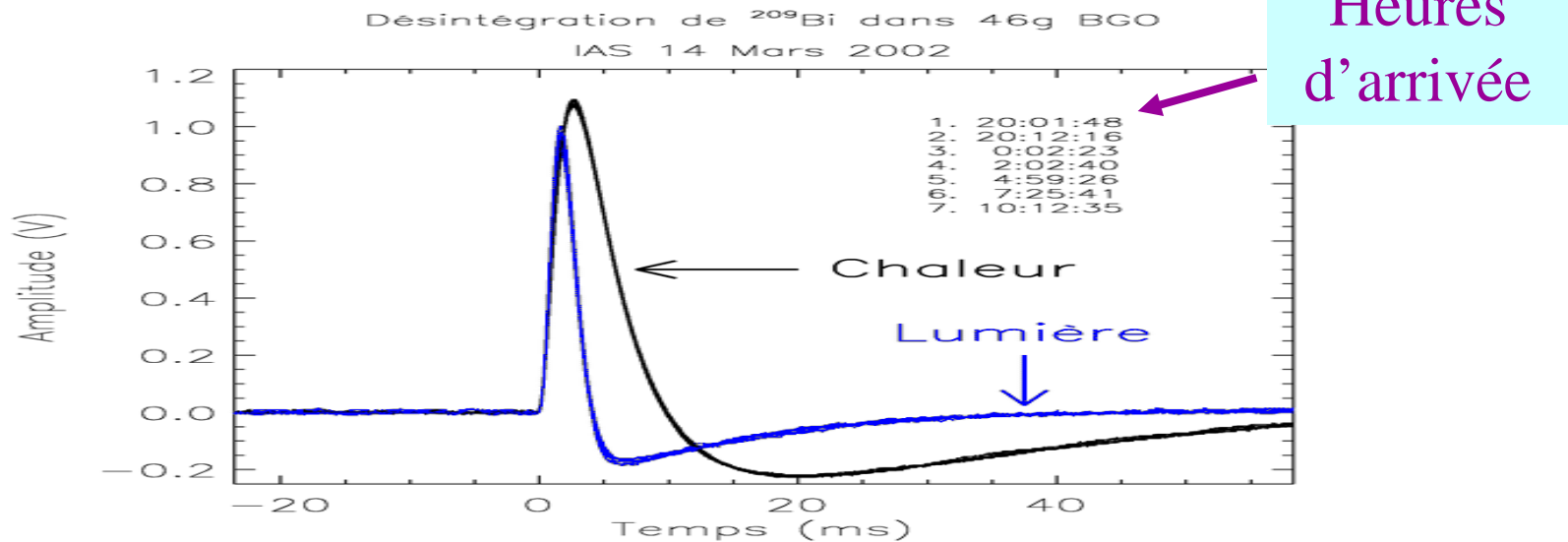
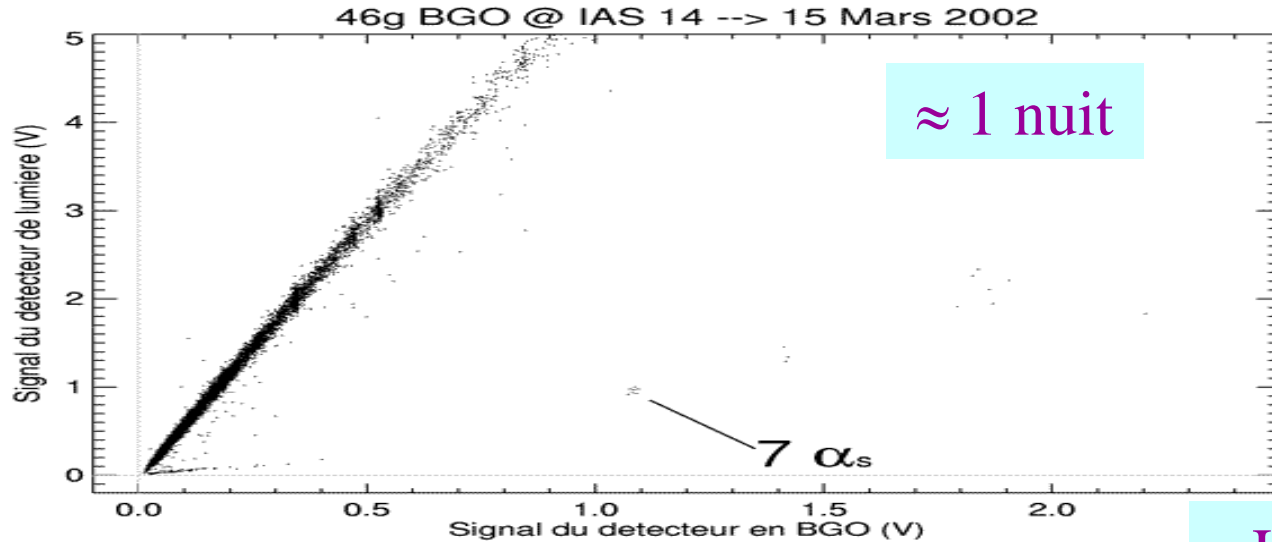
- $^{209}\text{Bi}$  (IAS; 2002 & LNGS; 2010)  $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{19}$  ans
- $^{180}\text{W}$  (CRESST; 2004)  $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{18}$  ans



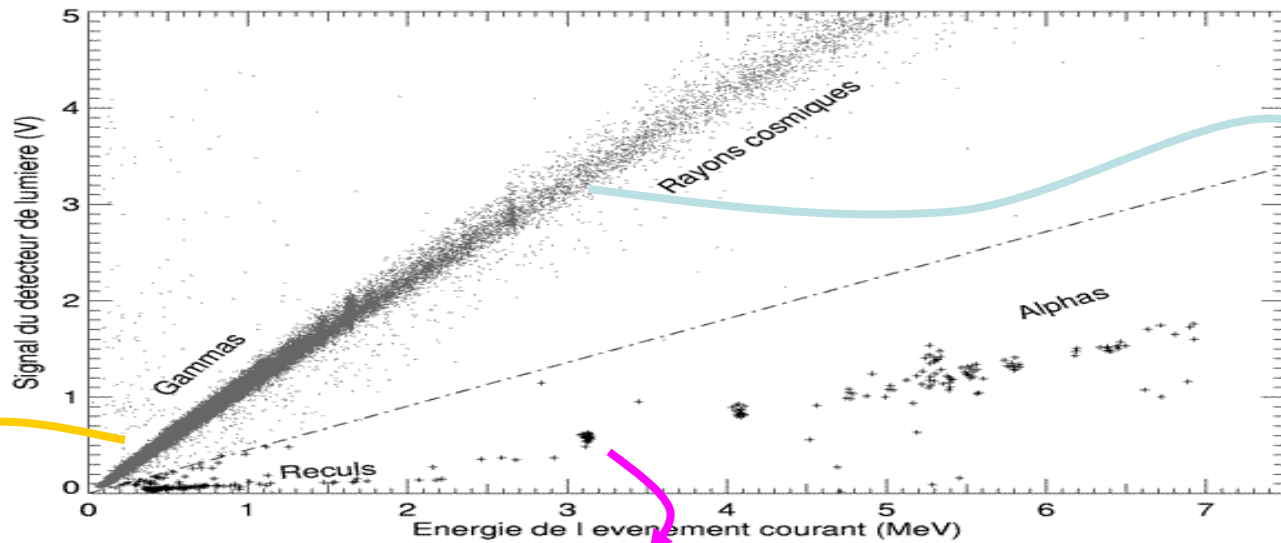
# Discrimination à l'oeuvre dans 46g BGO (basse énergie)



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



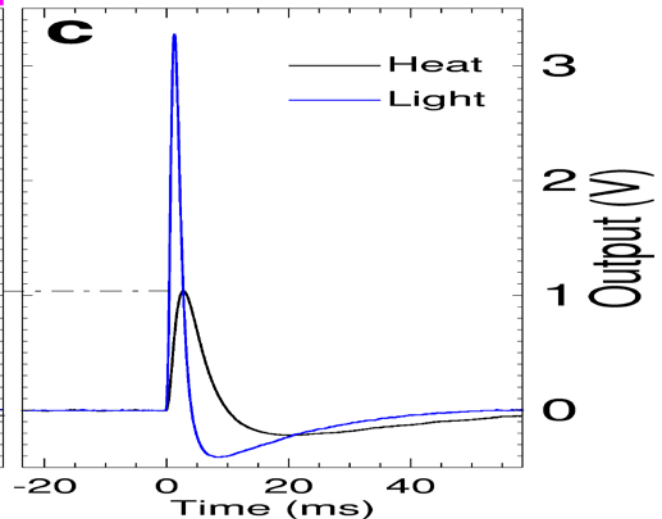
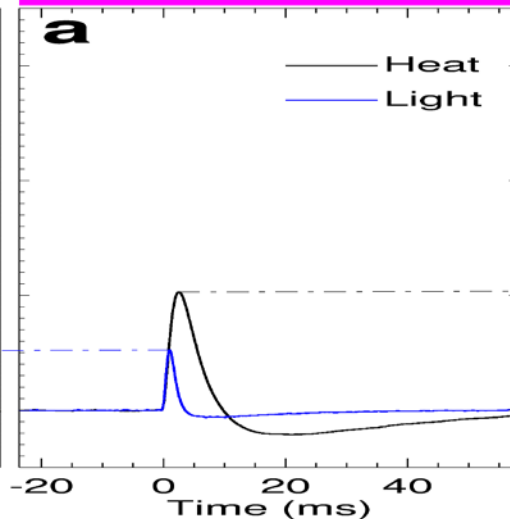
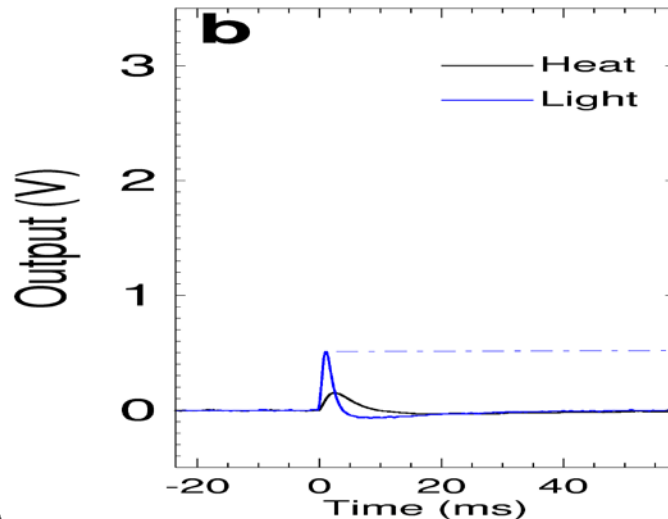
# Diagramme de discrimination dans 46g BGO (5j)



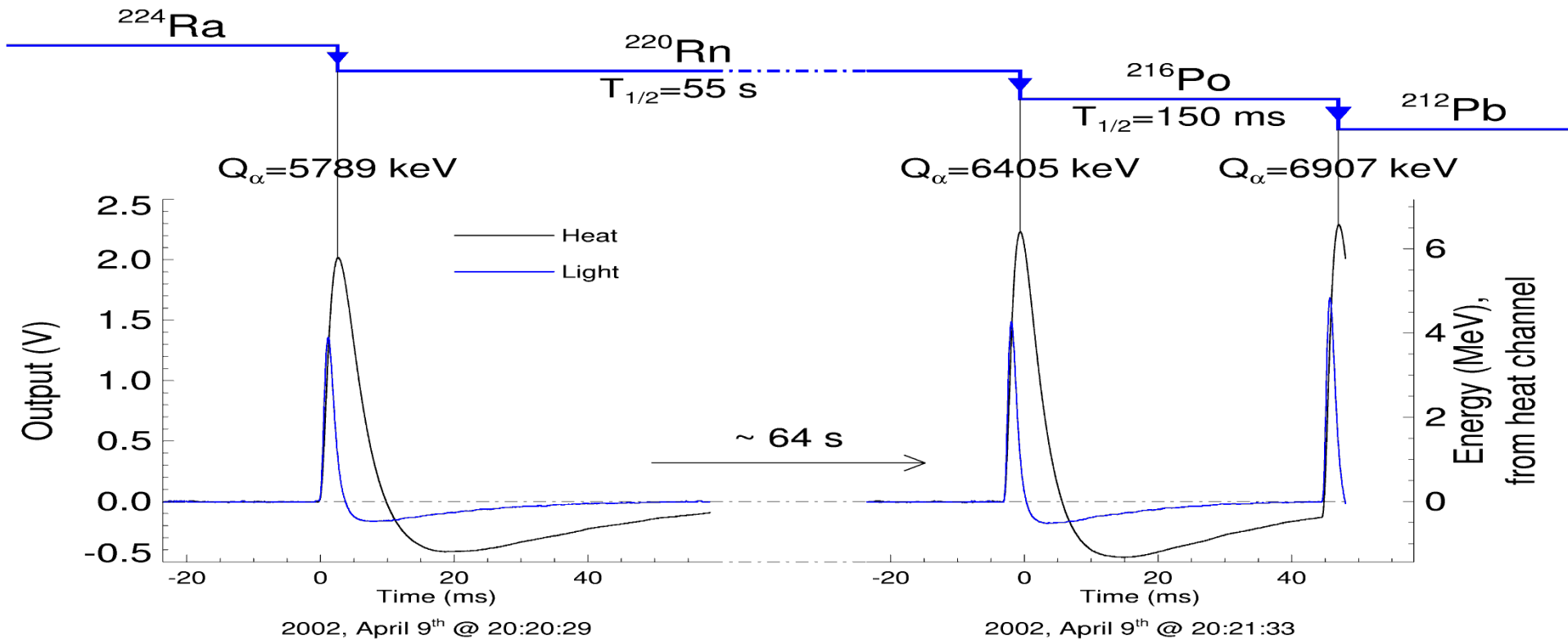
Gamma ray  
E~500 keV

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

Cosmic ray event  
E~3.4 MeV

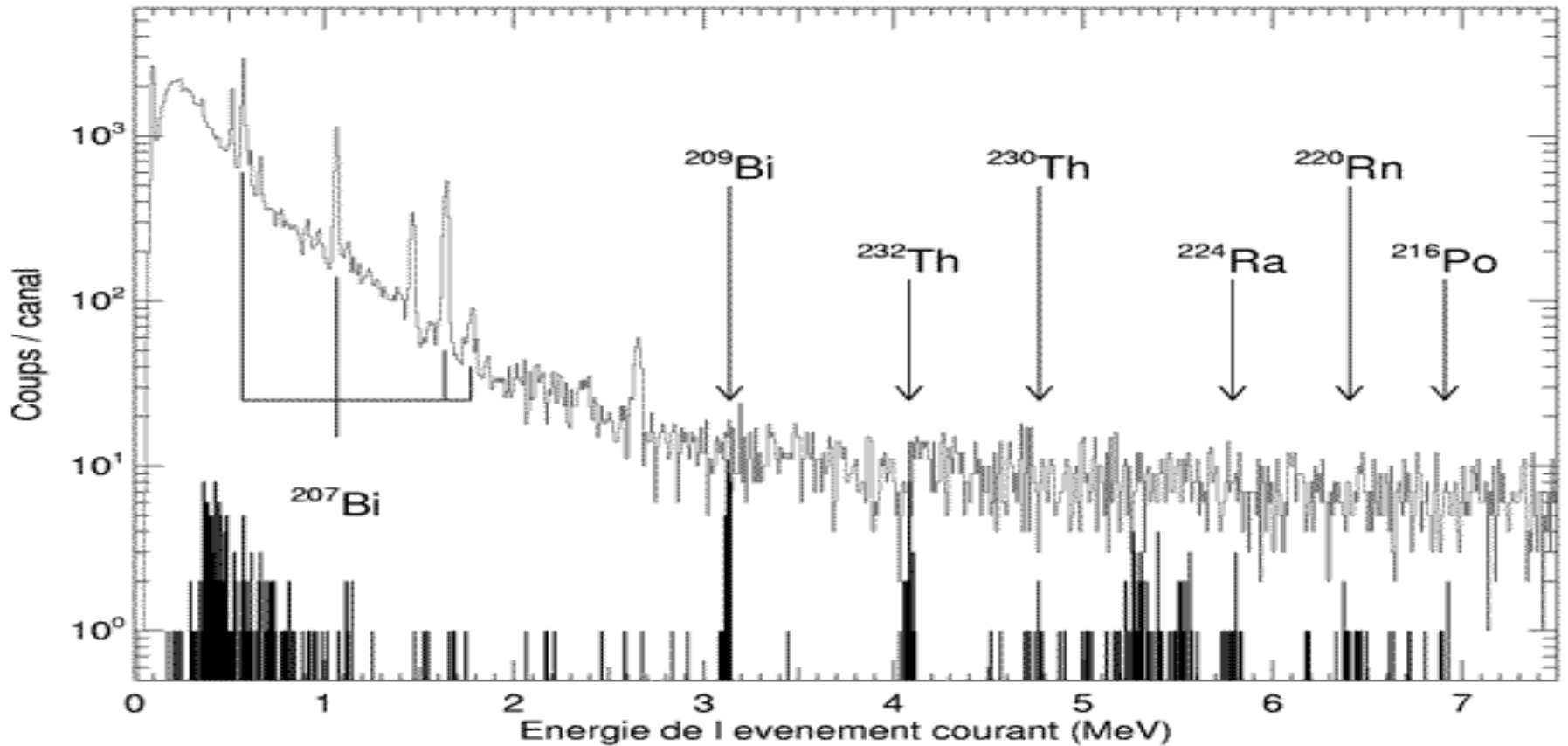


# Identification par cascades $\alpha$



Une triple signature unique !

# Spectres dans 46g BGO



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

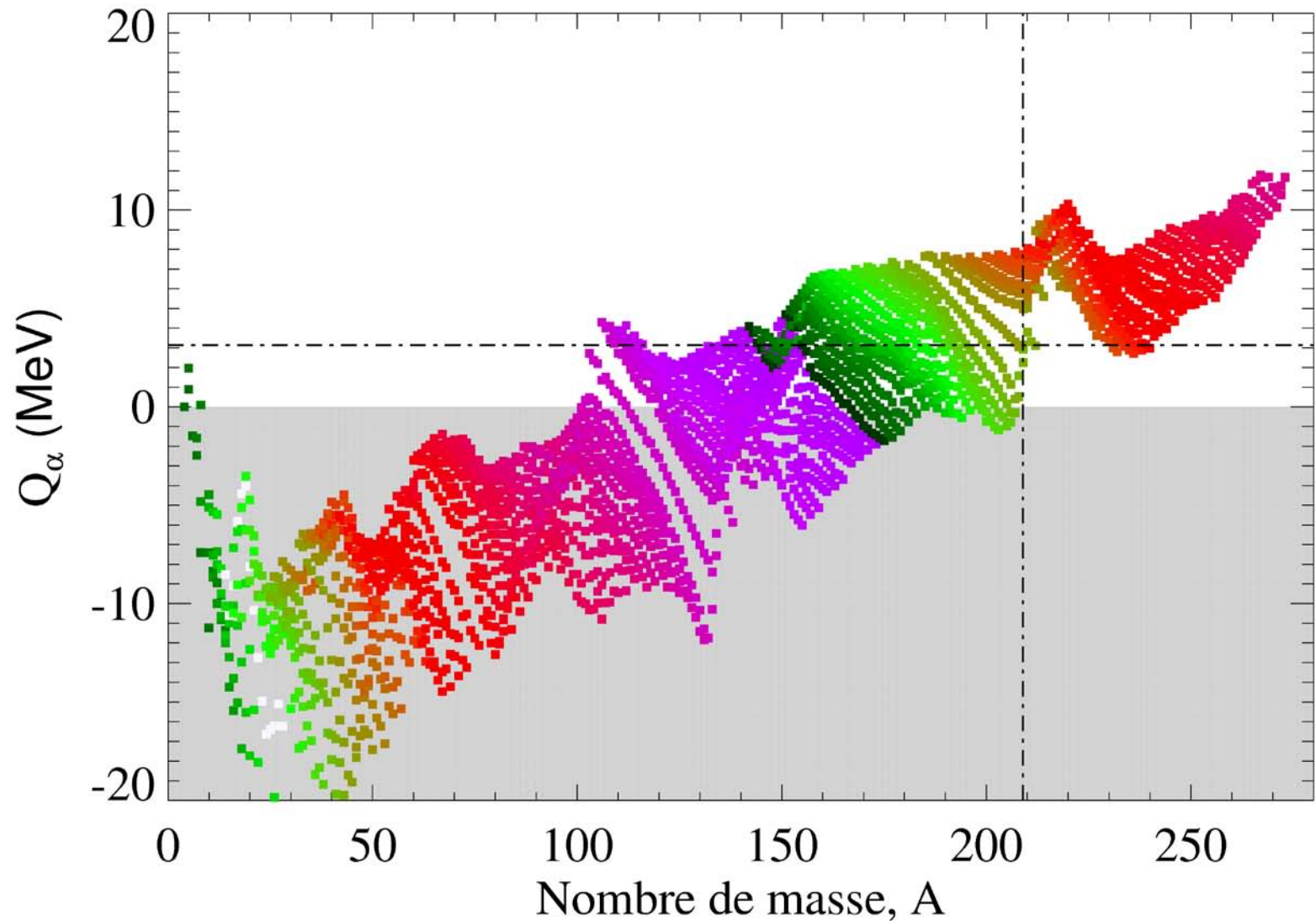
$^{209}\text{Bi}$



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

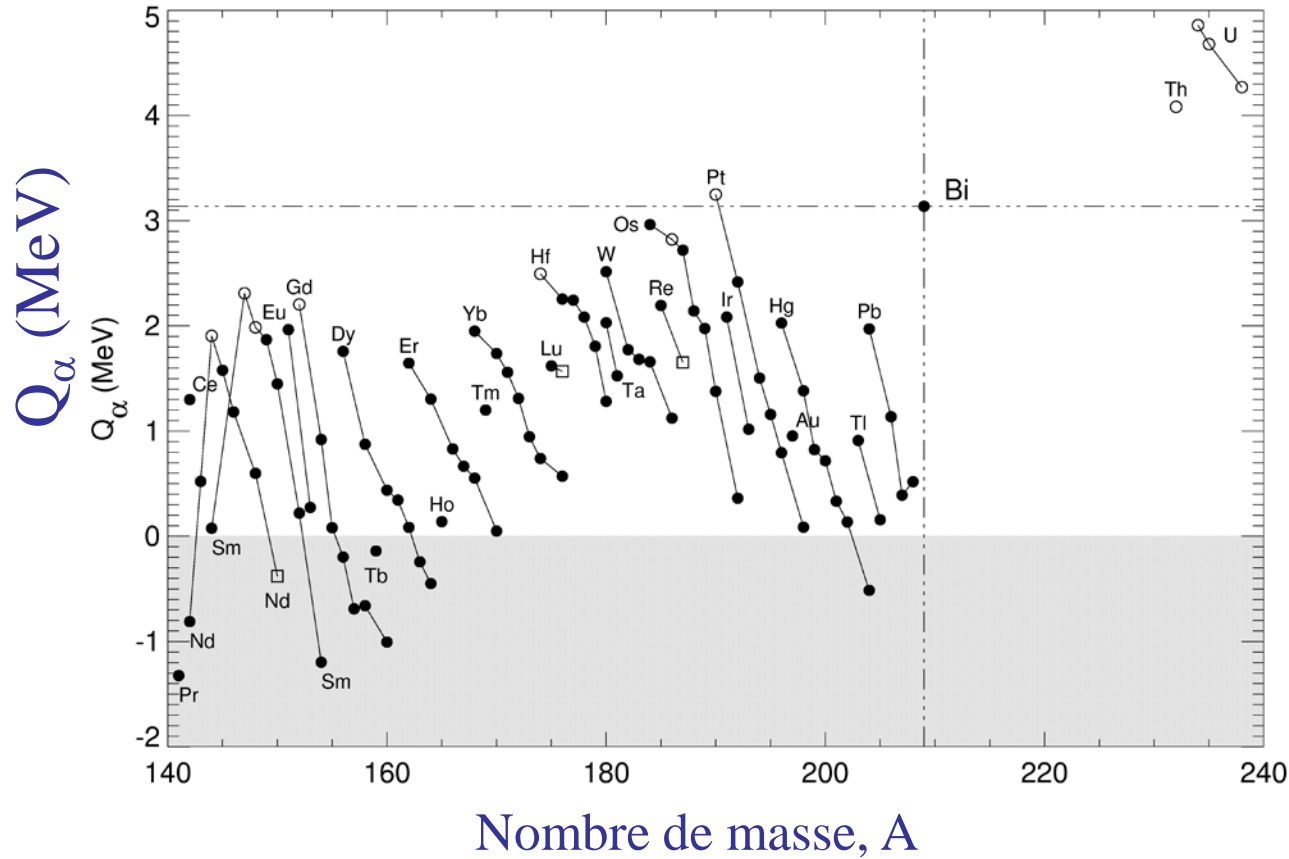
$$T_{1/2} = 1.44 - 1.95 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

# Isotopes & excès de masse « $\alpha$ », $Q_\alpha$



# Isotopes lourds stables, $Q_\alpha$

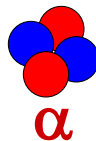
*d'après Tables Audi et al. (1997)*



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

**3077 keV**

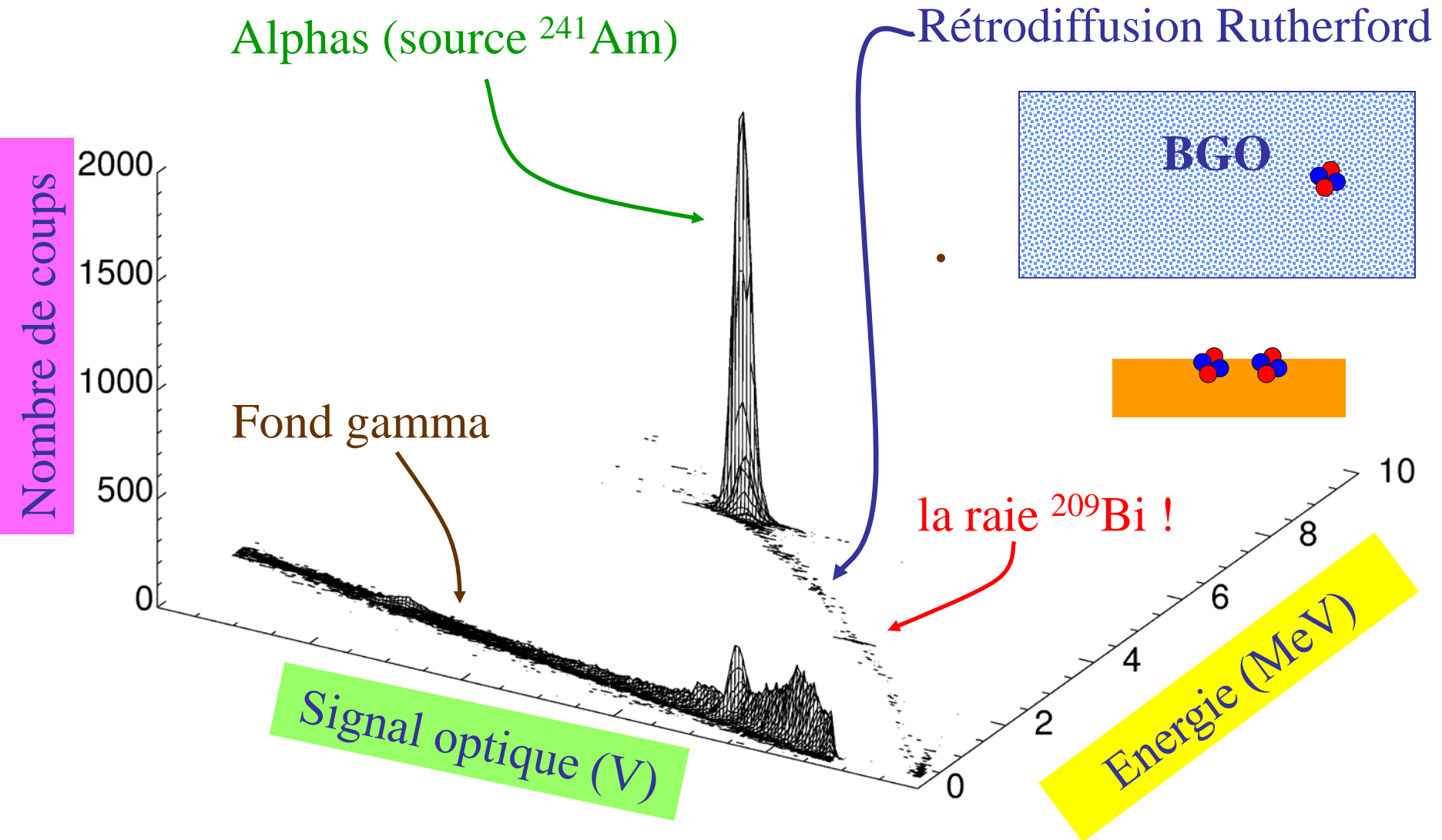
$R \approx 8 \mu\text{m}$



**60 keV**

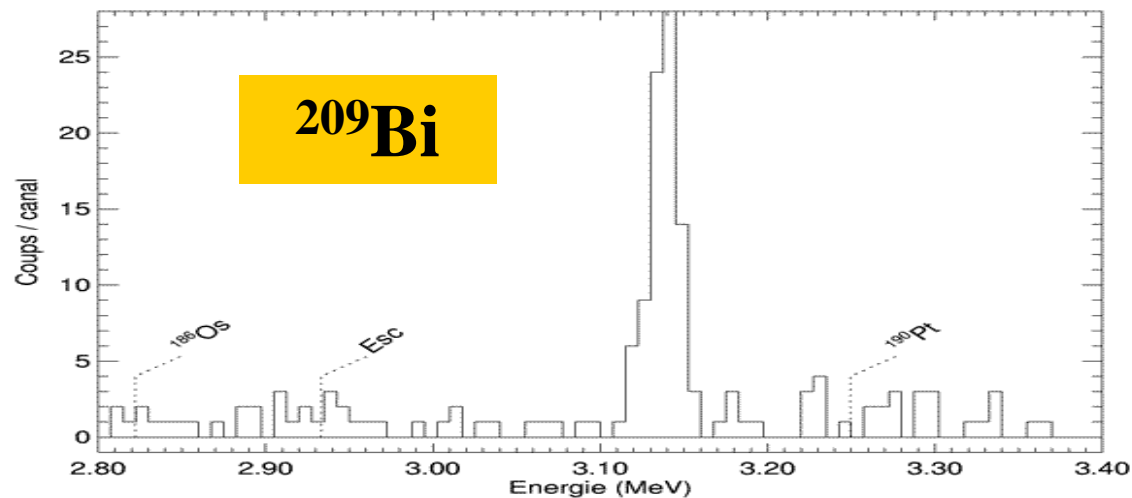
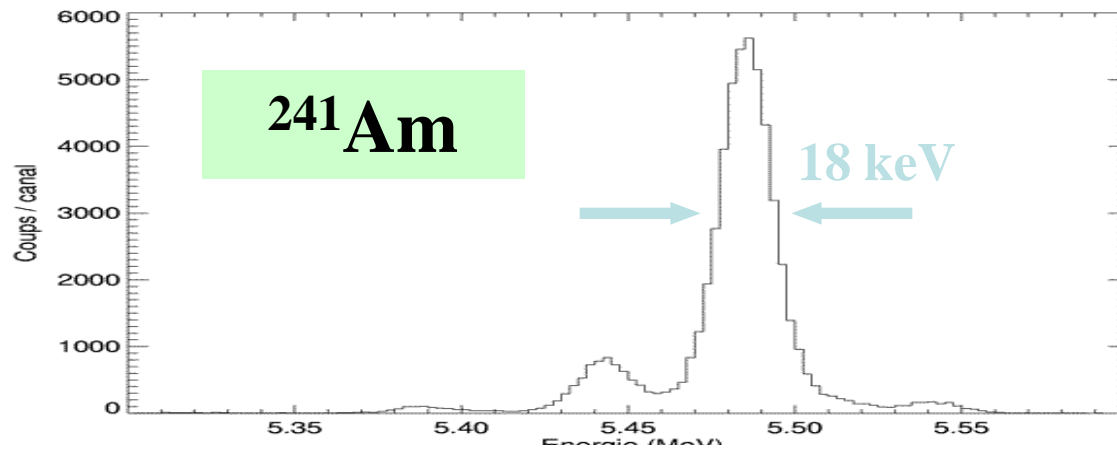
$R \approx 200 \text{ \AA}$

# Discrimination dans 91g BGO





# Spectres alphas finaux



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

# Désintégration de $^{209}\text{Bi}$ : une confirmation spectaculaire par la même technique (bolomètres scintillants)

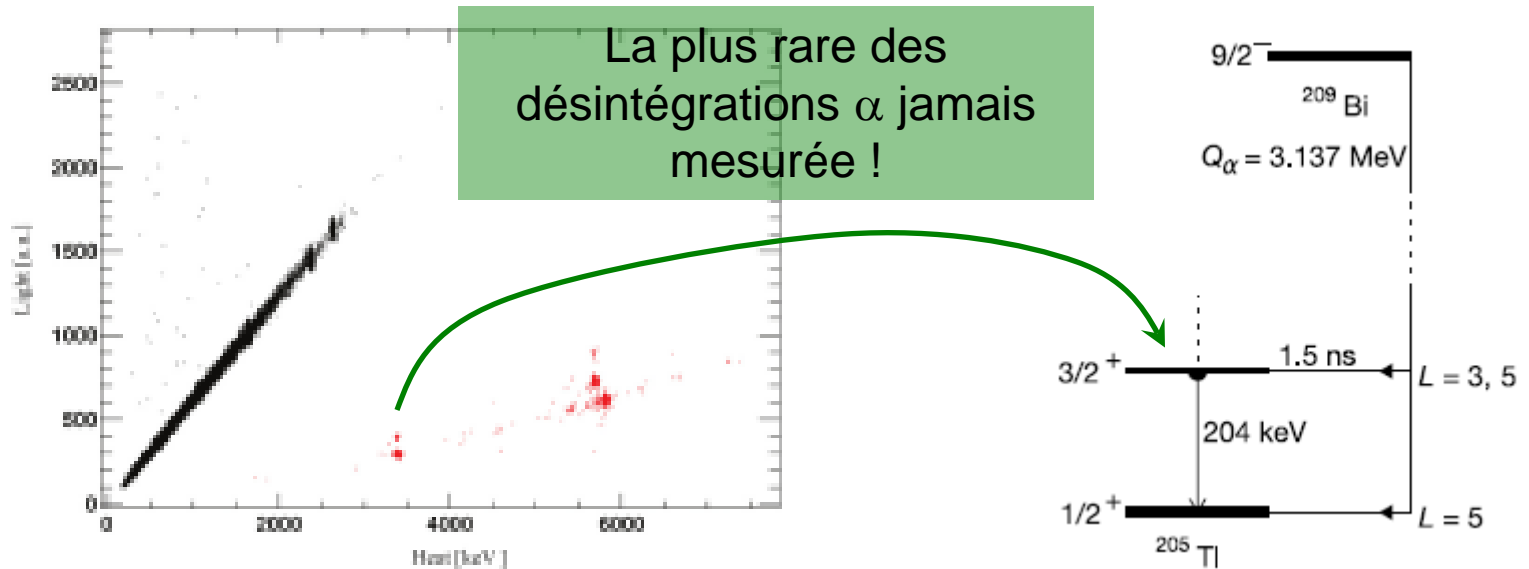
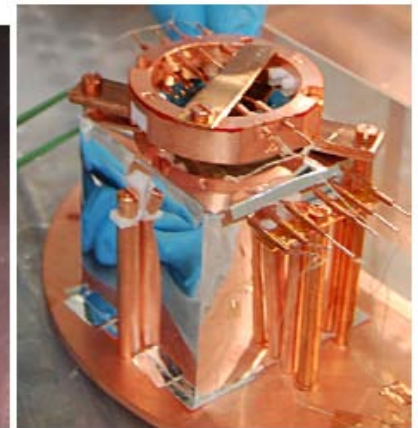


Figure 8.36: Scatter plot heat vs light of a  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  BGO crystal for a  $\sim 540$  hours background measurement.

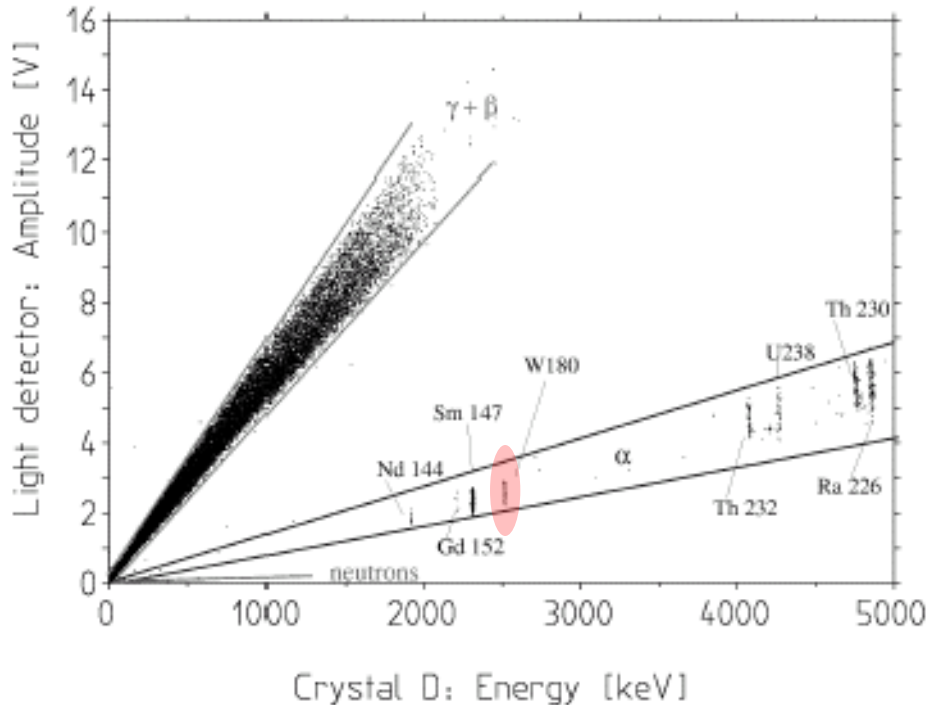
*Thèse Luca Gironi, Univ. Milan, 2010*

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

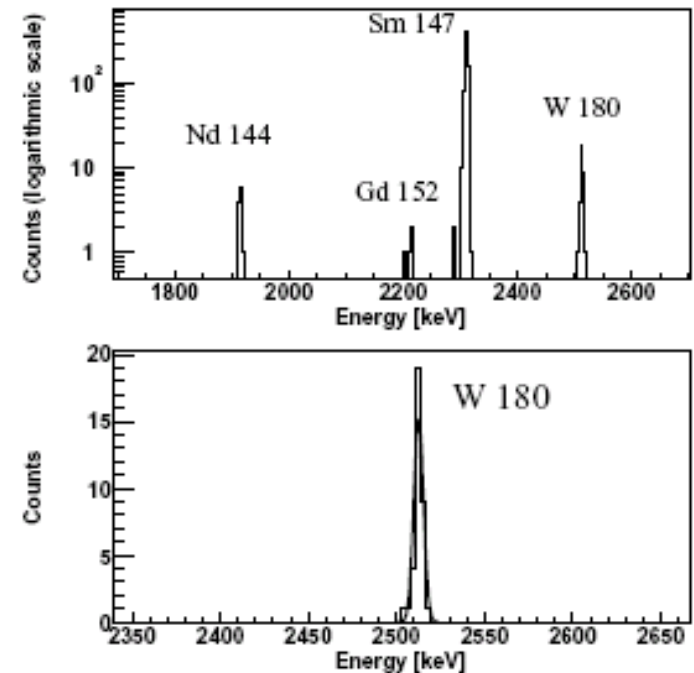


# Au tour de $^{180}\text{W}$ ... (collaboration CRESST en 2004)

Fond haute énergie dans un bolomètre  $\text{CaWO}_4$  de CRESST



Spectres  $\alpha$



« The natural  $\alpha$ -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  $T_{1/2} = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{18}$  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. »

## Comptes-rendus des conférences

[tous les deux ans]

### ❑ LTD (Low Temperature Detectors)

- aspects techniques
- publiés généralement dans NIMA
- LTD-13 à Stanford en 2009
- **LTD-14 à Heidelberg en 2011**

### ❑ 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-2009 à Rome
- **TAUP-2011 à Munich**