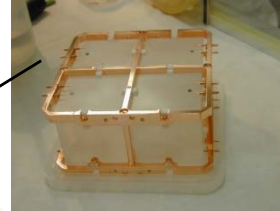


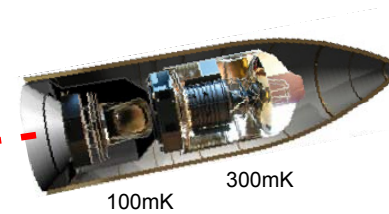
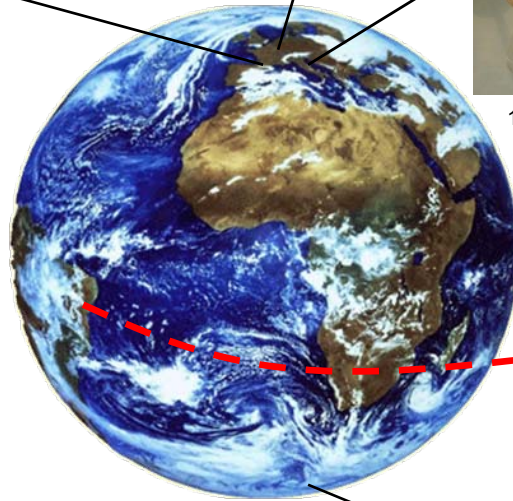
20mK



18mK



10mK



100mK 300mK

Détecteurs bolométriques refroidis

2. Applications

300mK



??

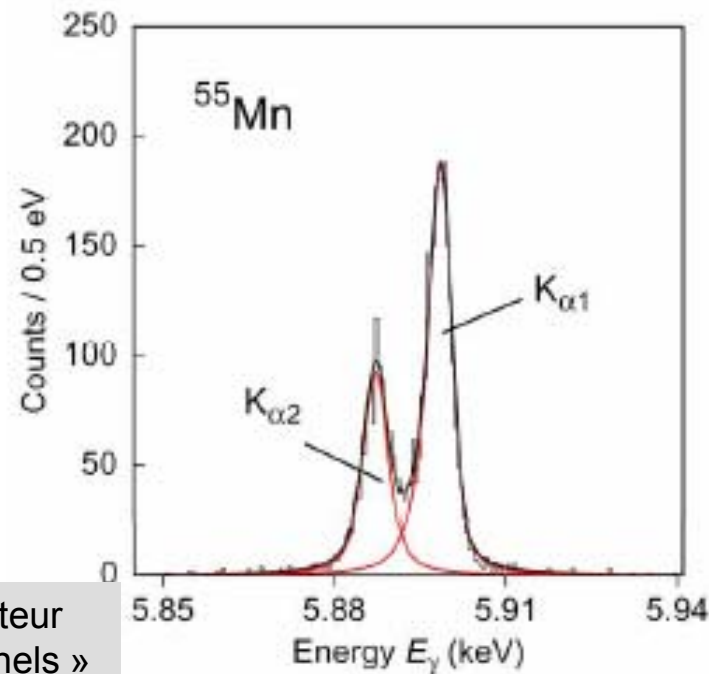
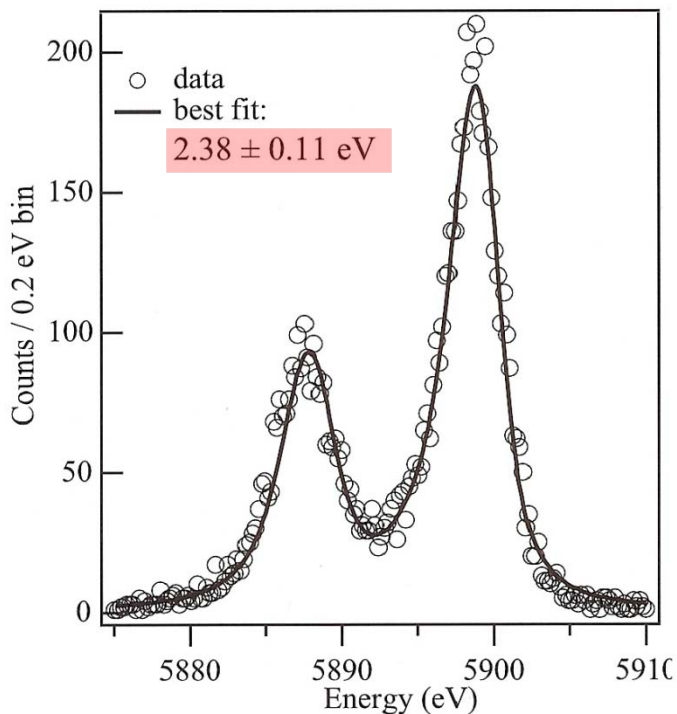


Applications des bolomètres:

- En spectroscopie
 - X, γ
 - α
 - 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, γ

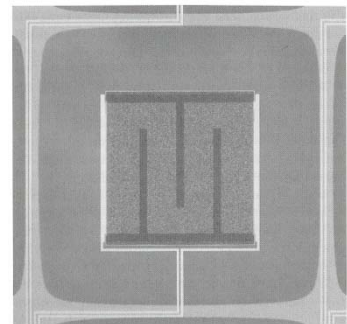
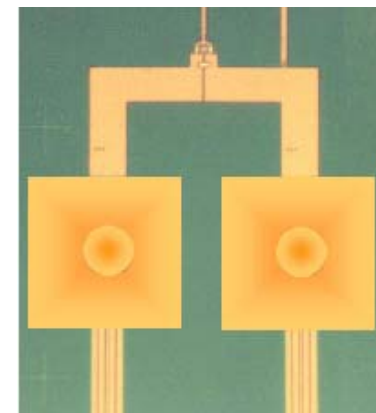
Spectroscopie X très haute résolution...monopixels



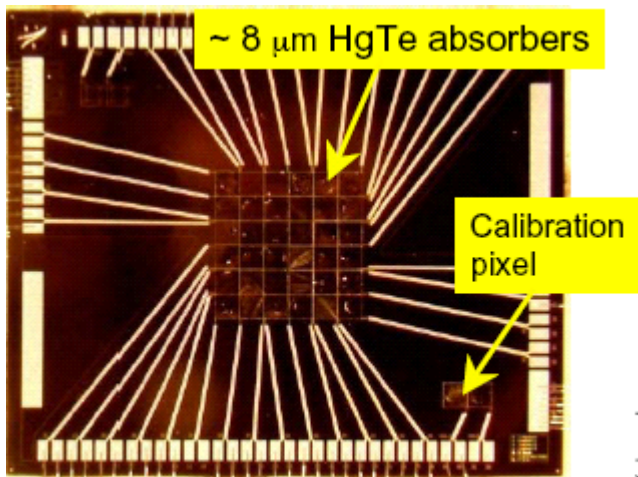
Rappel: les détecteur Si(Li) « conventionnels » plafonnent à 110eV !

- 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



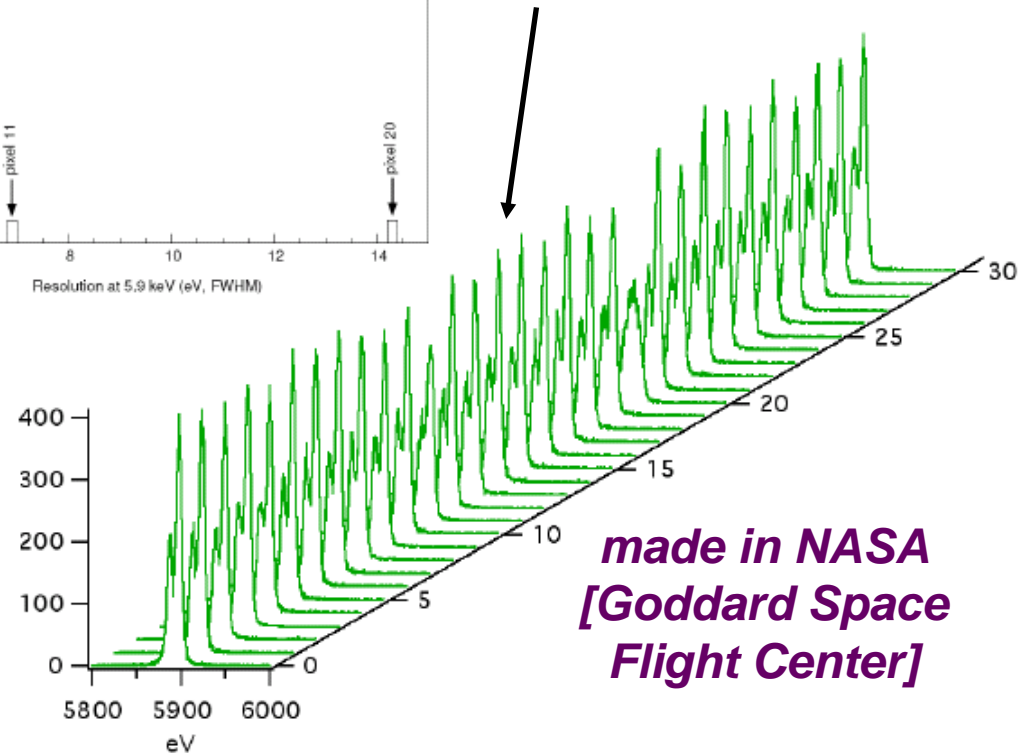
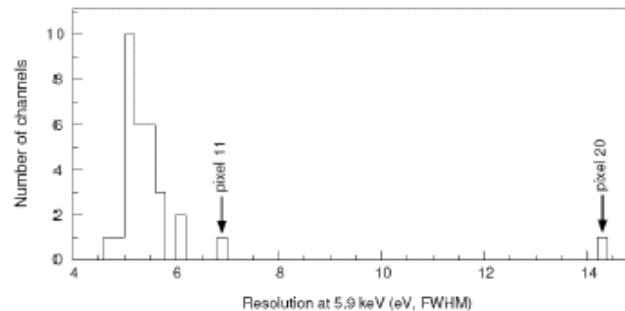
Spectroscopie X: matrice 6 x 6 de l'instrument XRS



Pixels are 625 μm 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 !

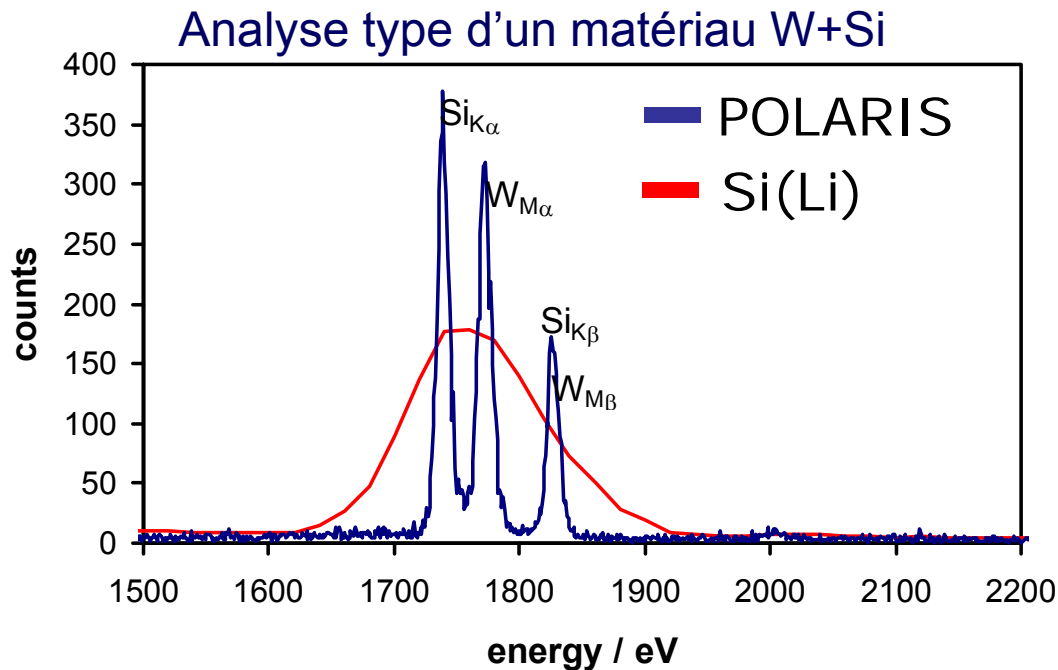
- matrice 6×6 à bord de Suzaku (ex Astro-E2)
- télescope: miroir en incidence rasante
- thermométrie Si implanté; $T=60\text{mK}$
- résolution moyenne: $\Delta E=5.5\text{ eV FWHM @ }5.9\text{ keV}$



→ Successeur: projet IXO (Intern. X-ray Observ. @ 50mK; 2020; NASA, ESA)

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

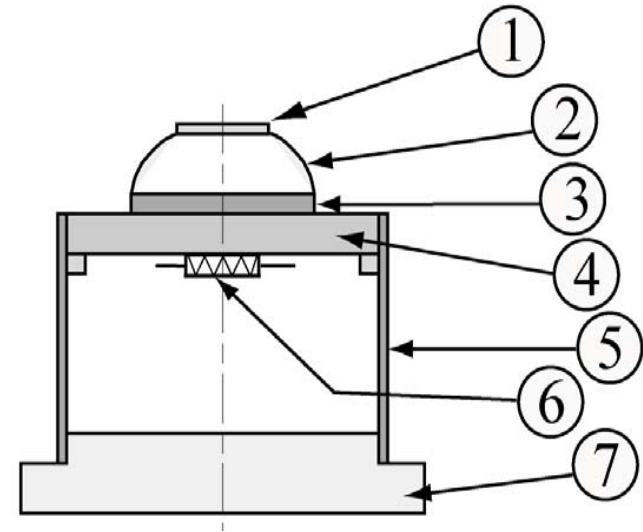
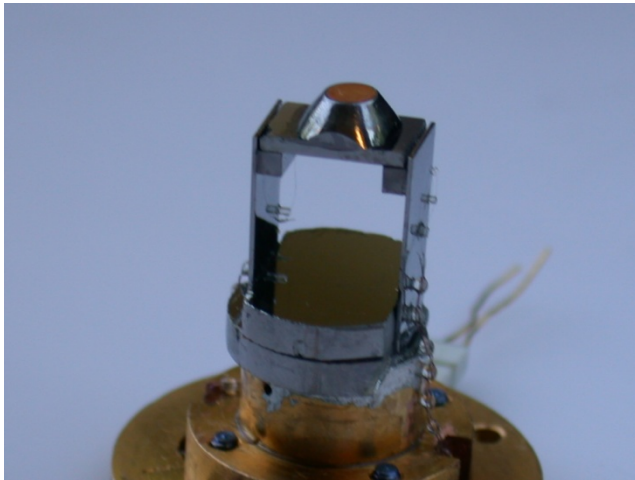


Coût ≈ 500 k€

□ spectroscopie α

Collaboration IAS & CEA/ LNE-LNHB
(Lab. Nat. Henri Becquerel)

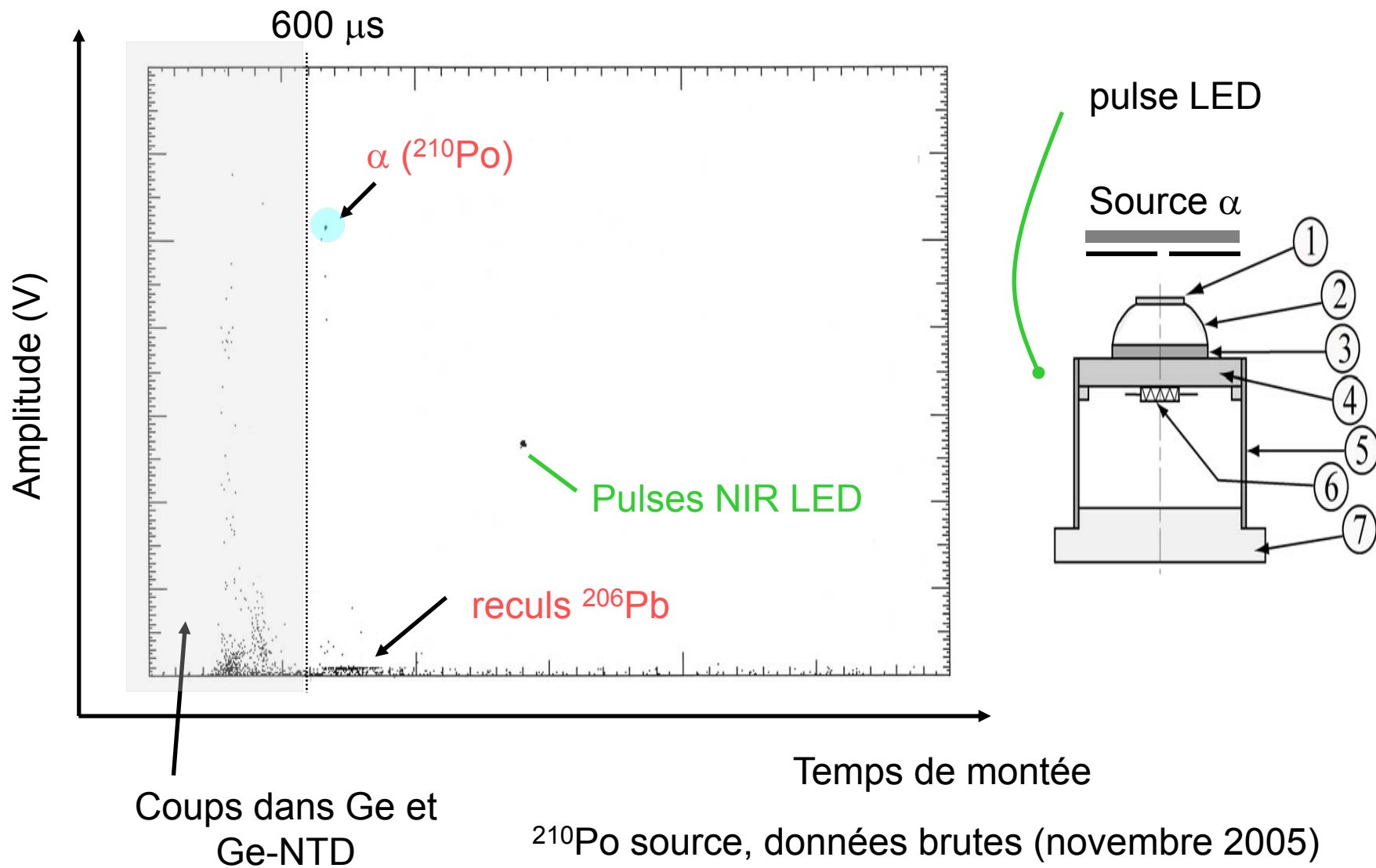
Bol#300 : cible Cu



- ✓ Dynamique élevée
500 eV-10MeV
- ✓ $T_{\text{bolo}} \approx 50\text{mK}$; $R_{\text{bolo}} \approx 50\text{k}\Omega$
- ✓ cible démontable

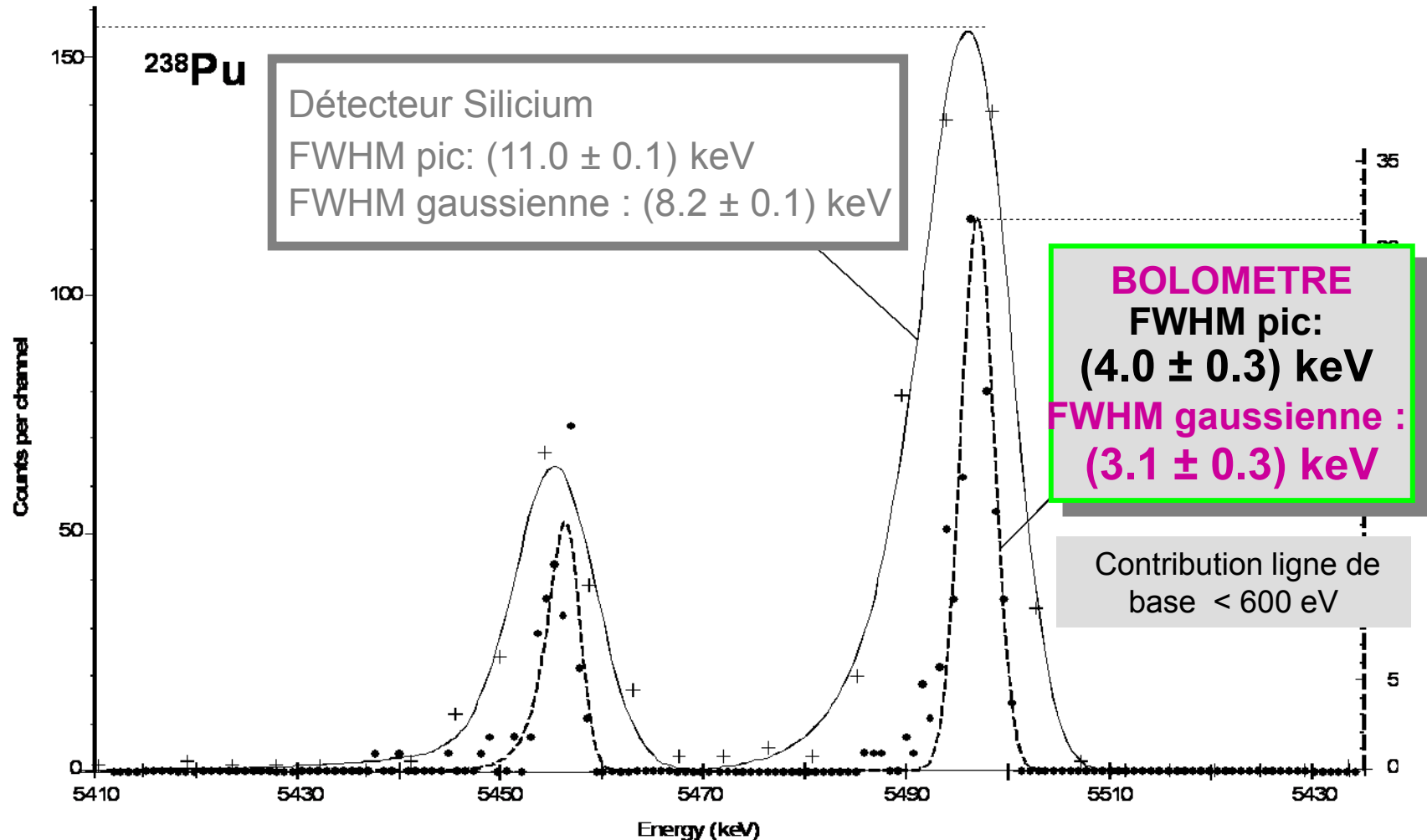
1. Cu (\varnothing 2,6 mm ; épaisseur 22 microns)
2. Ge
3. Cire
4. Ge-NTD ($8 \times 5 \times 0,9\text{mm}^3$)
5. Ge (fuite thermique)
6. Résistance chauffante
7. Support Ge

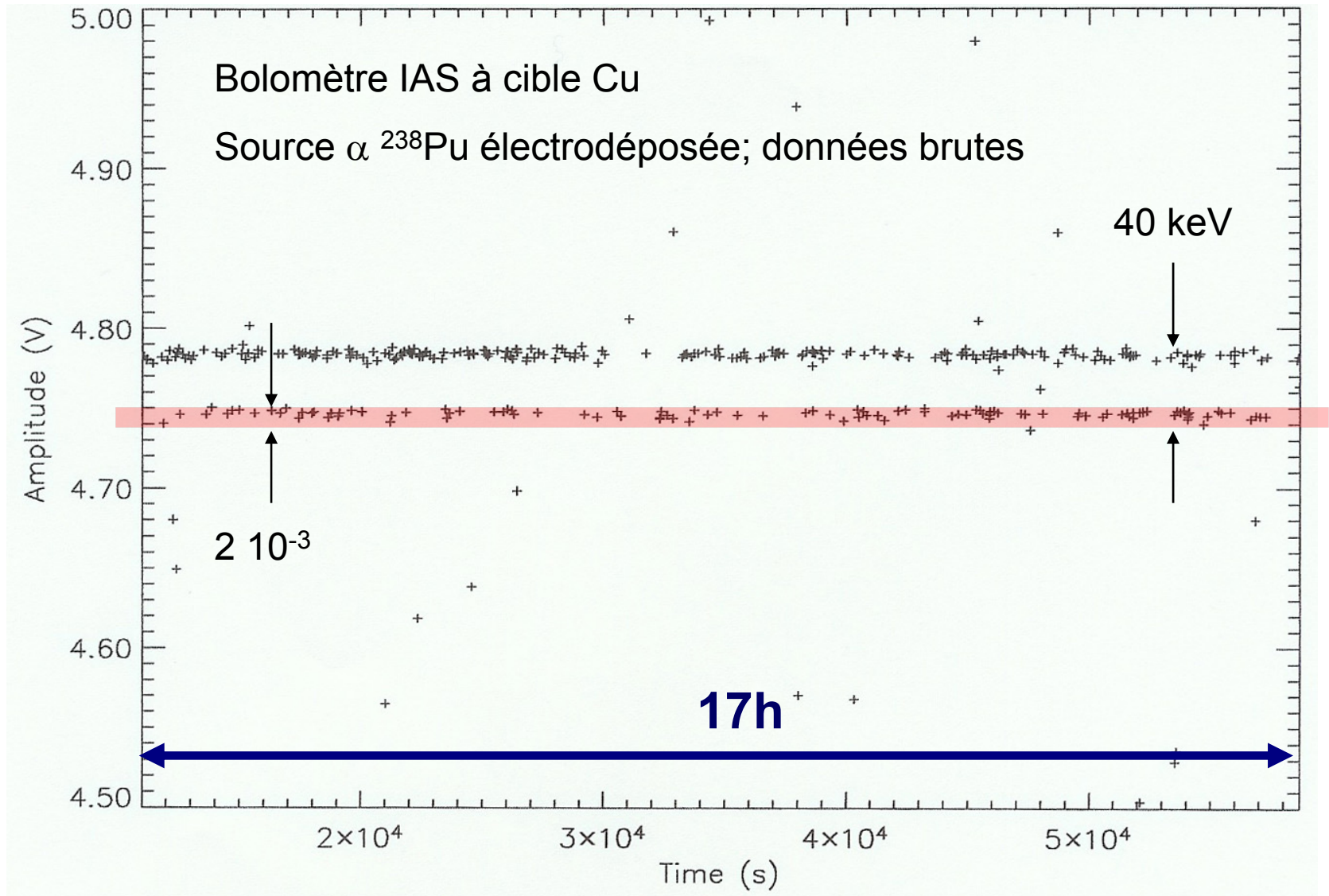
spectroscopie α 2. temps de montée du bolomètre Cu



spectroscopie α 3. source ^{238}Pu électrodéposée

Meilleur spectre alpha jamais obtenu avec une source externe et un détecteur solide !
(\rightarrow *Elvire Leblanc et al.; CR de ICRM 2005, 5-9 sept. 2005*)





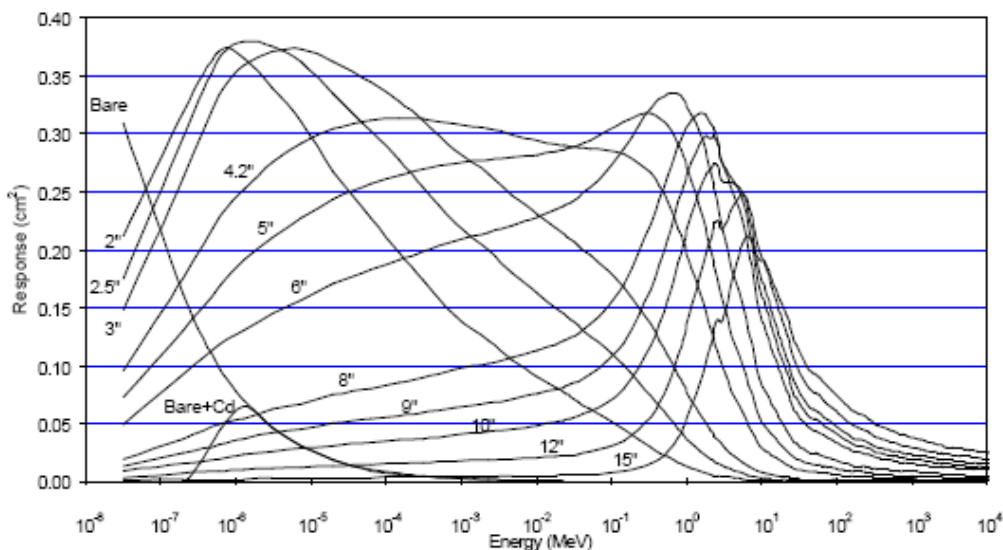
Spectroscopie « traditionnelle » des neutrons rapides



Sphères de Bonner
(polyéthylène)

détecteur ^3He

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



Matrice de réponse des sphères

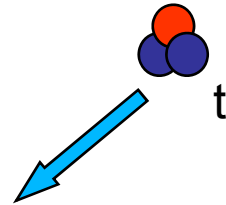
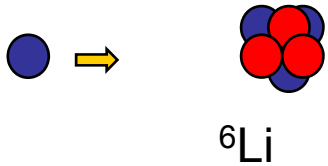
Une mesure au PSI (Suisse)



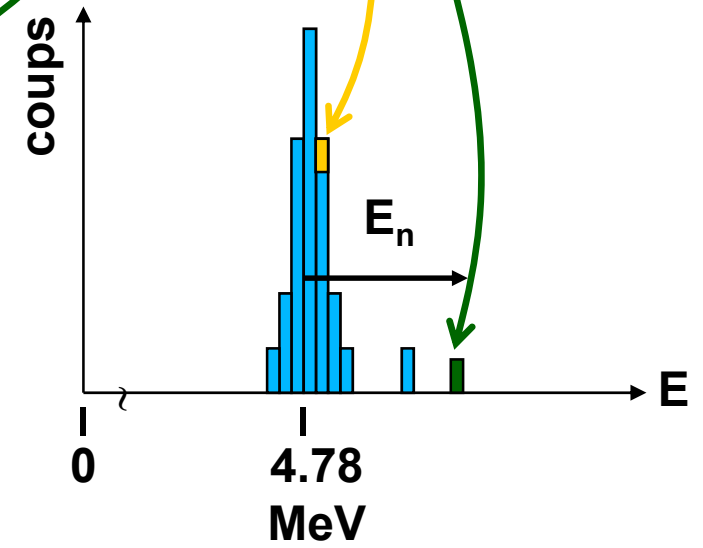
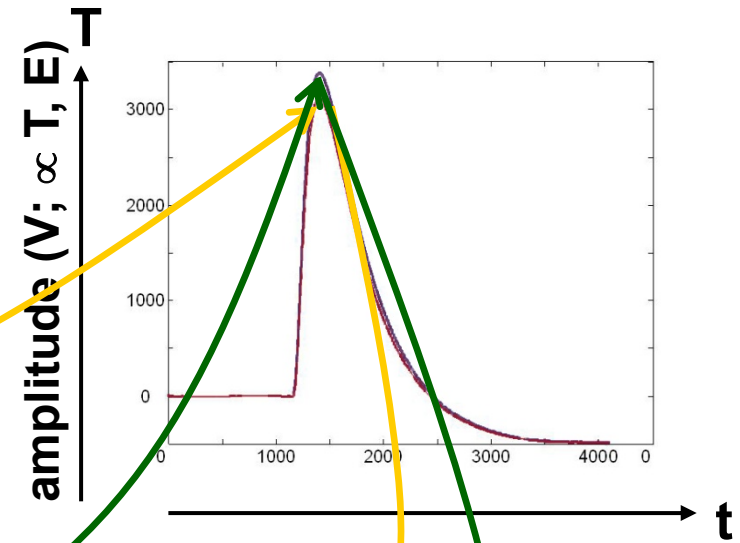
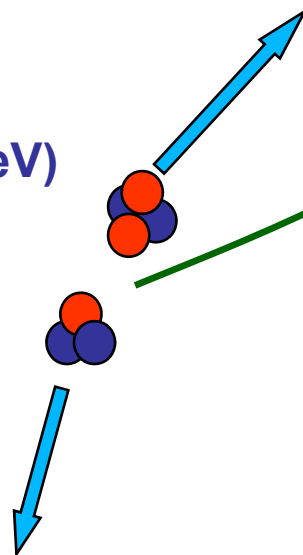
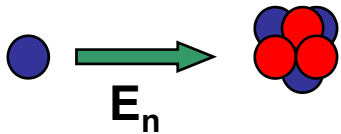
Réaction de capture: $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ $E = 4.78 \text{ MeV} + E_{\text{neutron}}$

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

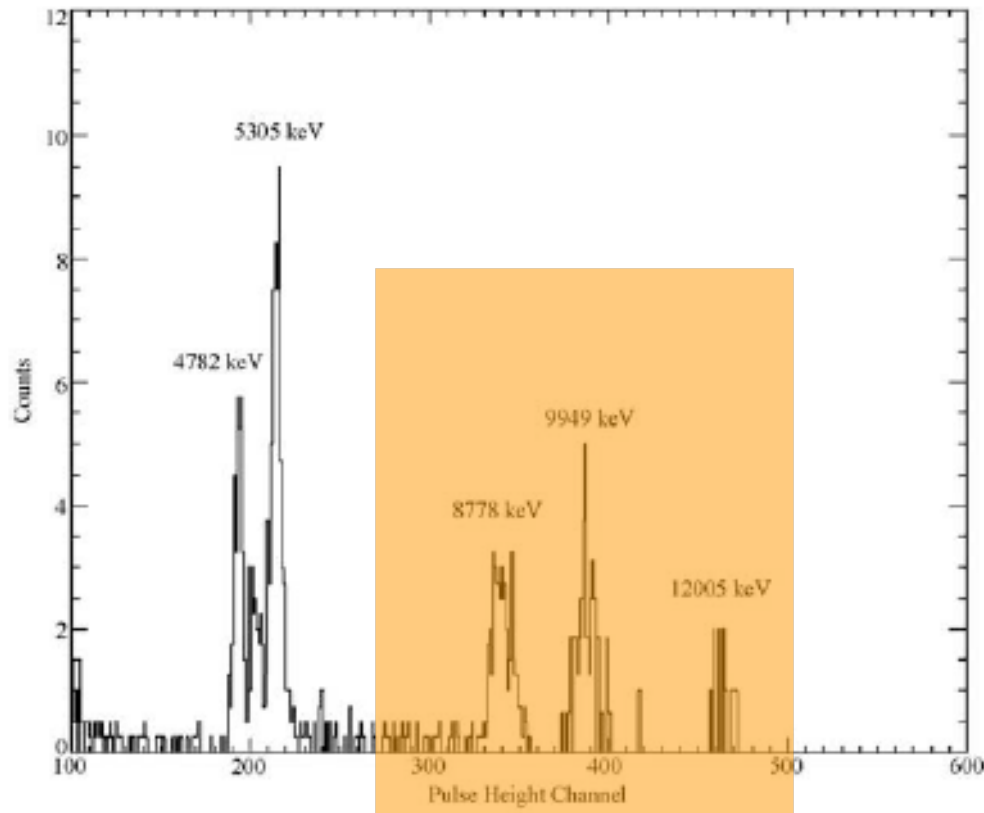
Neutron thermique (25 meV)



Neutron rapide (1keV-10MeV)



La spectroscopie des neutrons rapides: ça marche !



Silver et al, 2002 @ 330 mK

Bolo 0.5g ${}^6\text{LiF}$ de l'IAS (@300mK)
Thèse Johann Gironnet (en cours)

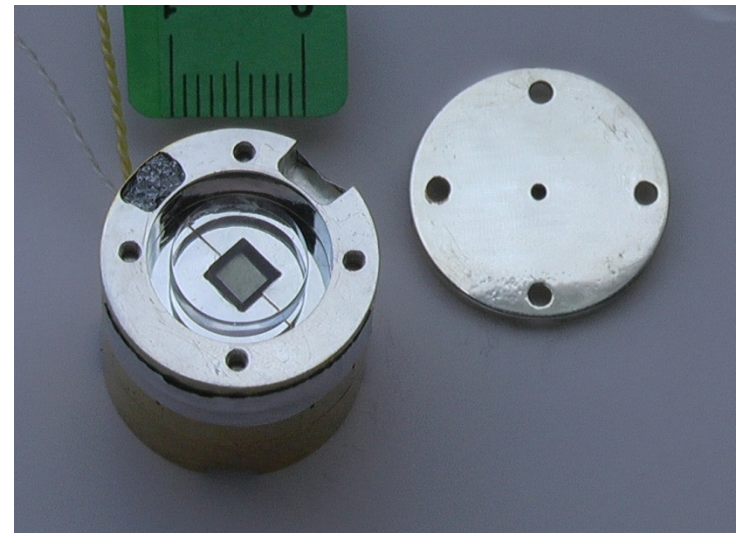
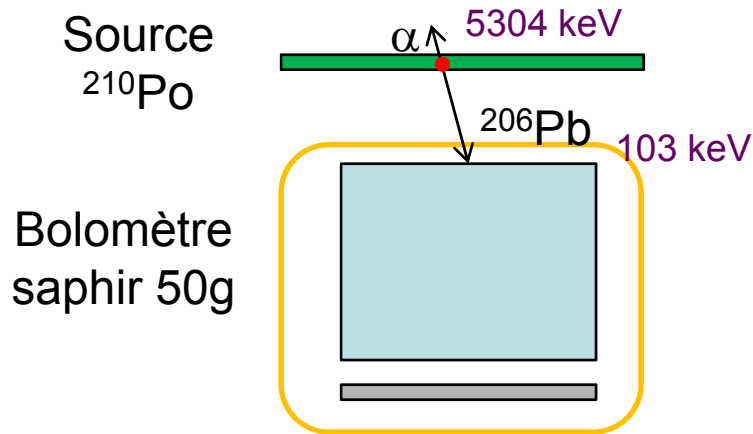
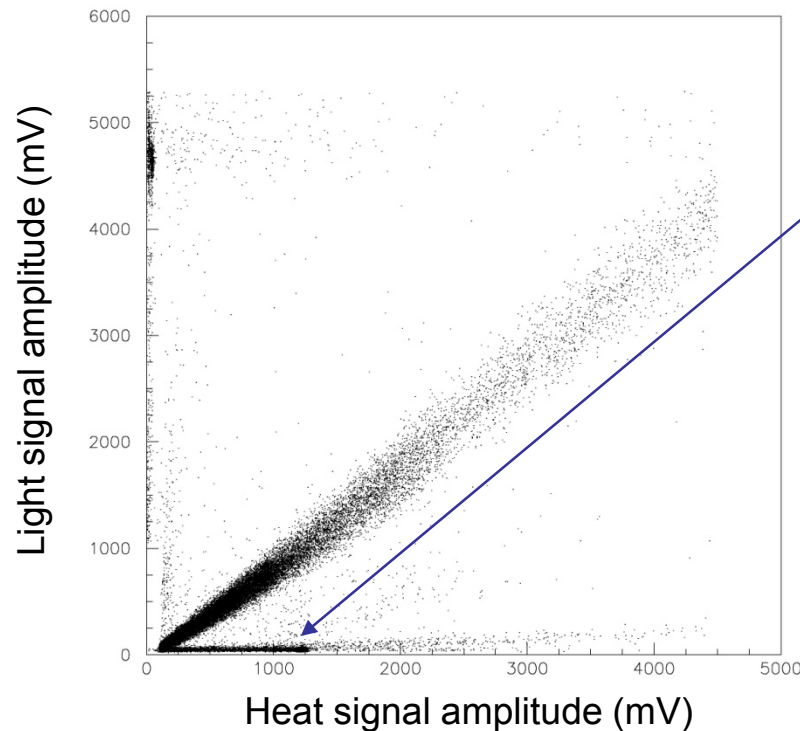


Fig. 2. Superimposed pulse height spectra of thermal neutrons, 5305 keV alpha particles, and monoenergetic fast neutrons at 3996, 5167, and 7223 keV. The labeled energies are the total energy deposited in the bolometer. Each spectrum is normalized to the exposure time of the 7223 keV neutrons.

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

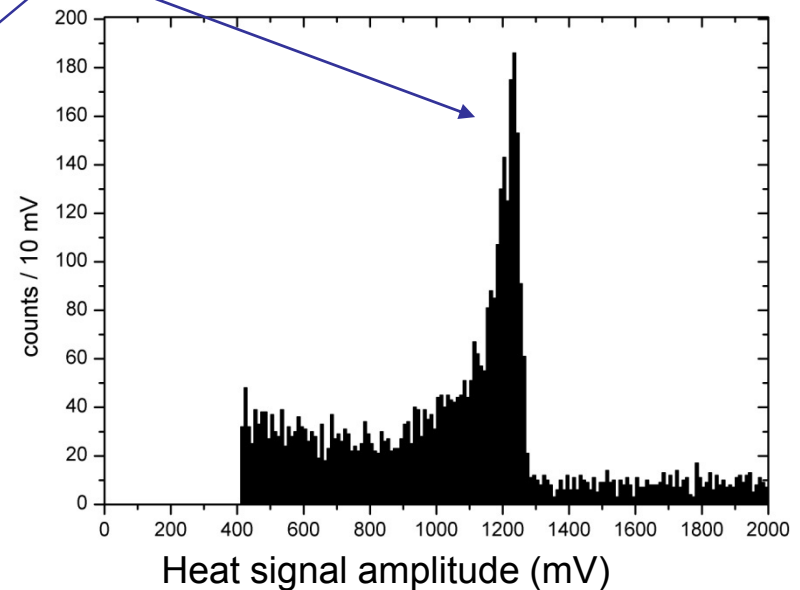


- Spectre des reculs très sensible à l'état de surface de la source → **test de sources α**
- Calibration de matrices de bolomètres, implantation $\sim 100 \text{ \AA}$ → **qualifications de micro-structures (membranes $\text{Si}_3\text{N}_4, \dots$)**



Recul ^{206}Pb

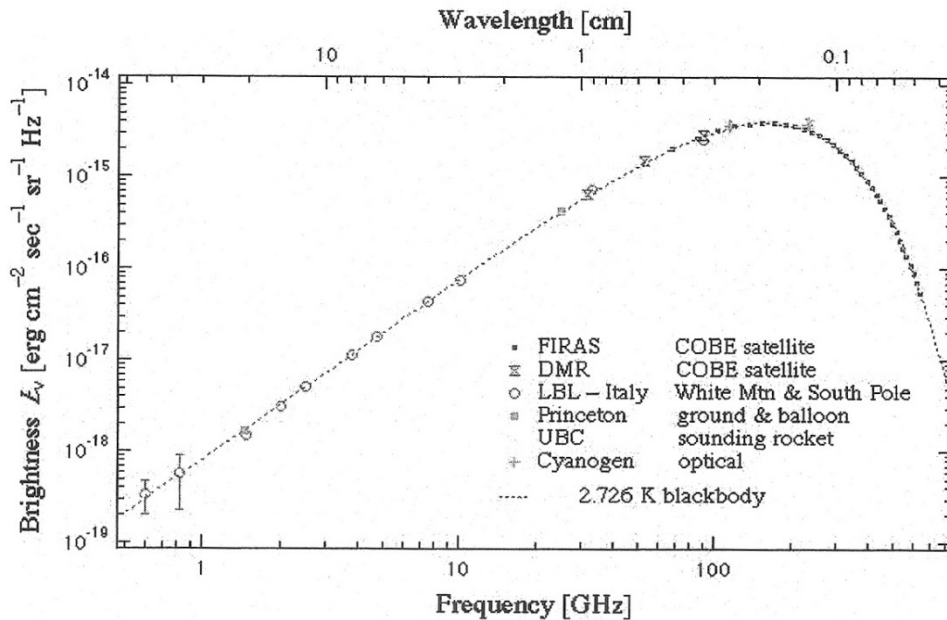
Spectre des événements de la bande des reculs



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

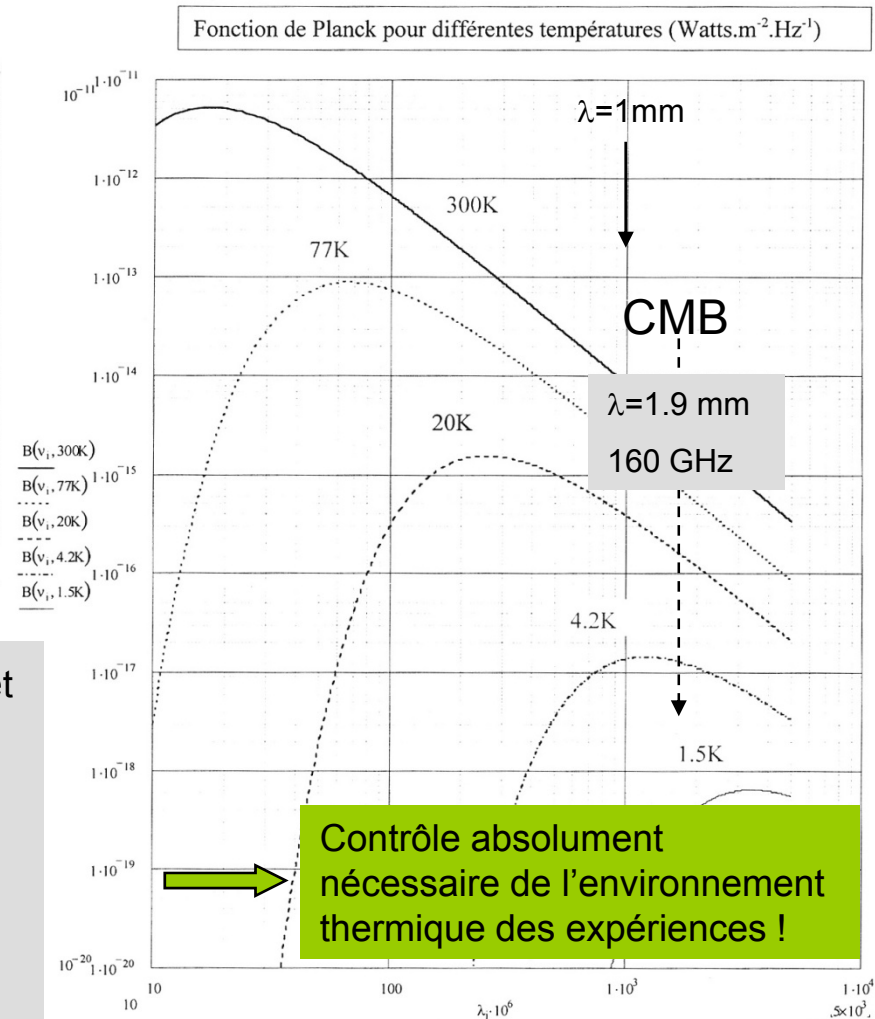
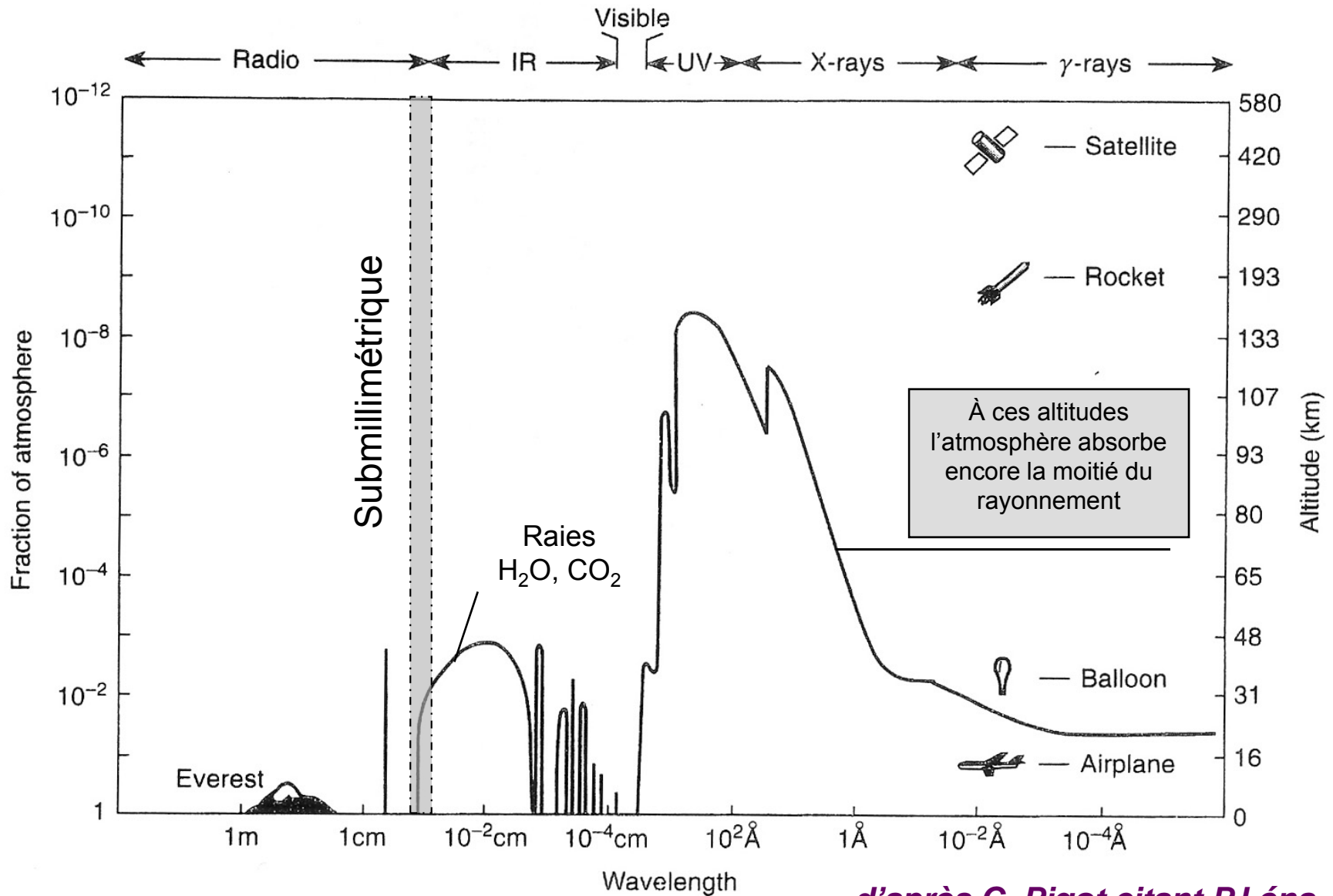


Figure 1 : Graphe de la fonction de Planck (corps noir) – Angle solide = 1^{st}

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

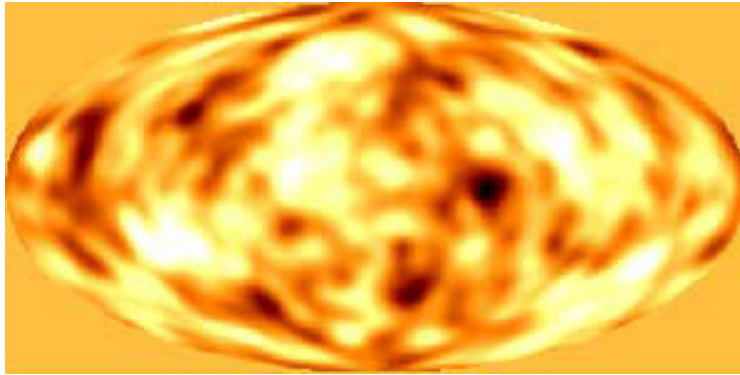
CMB: l'appel de l'espace



d'après C. Pigot citant P.Léna

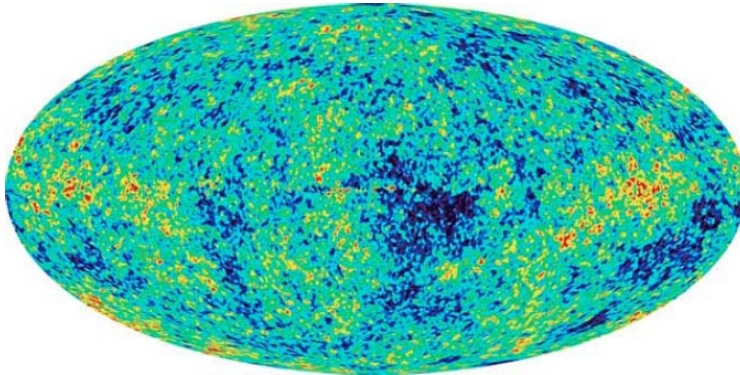


Cartes des anisotropies du CMB



COBE (1989)

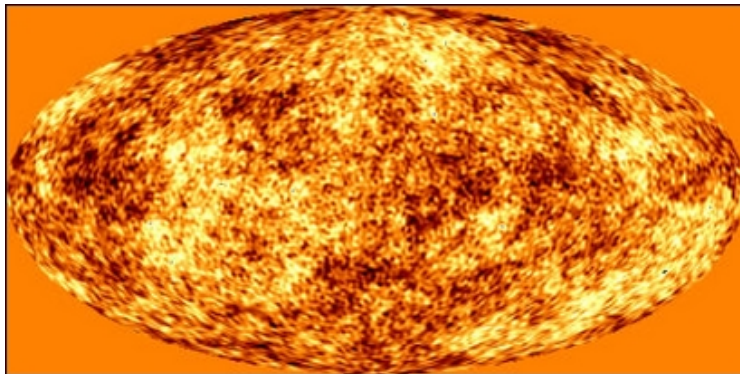
7°



WMAP (2001)

12'

Avènement de la cosmologie de précision...



Planck (2008 ?)

5'

Planck-LFI

Planck-HFI

Détecteurs

radiomètres

bolomètres

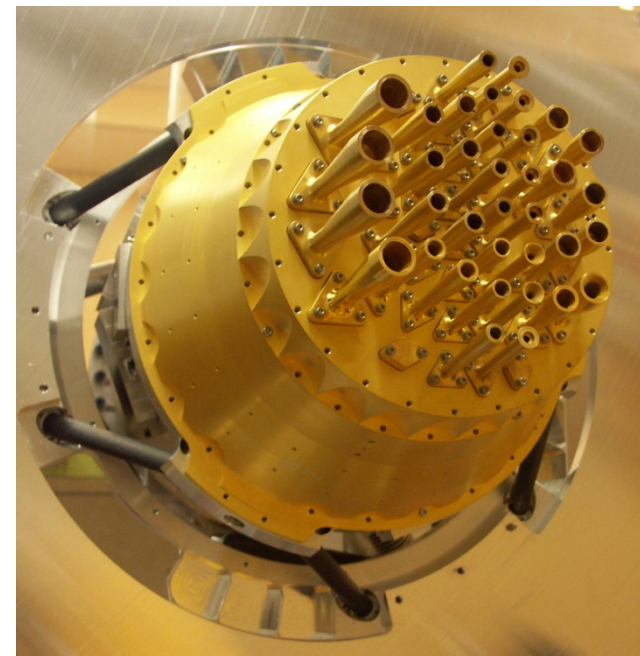
simulation !

✓ 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)

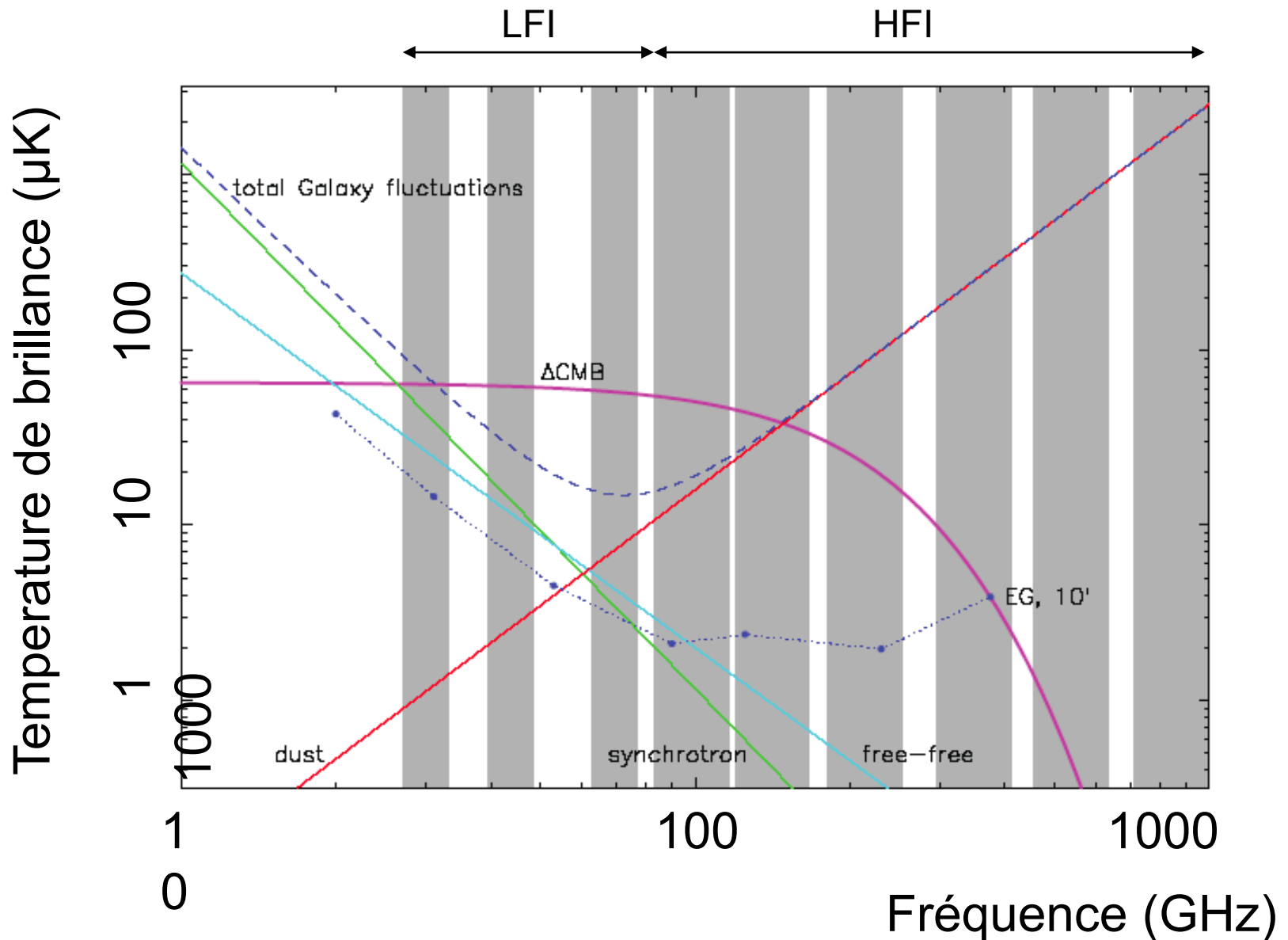
SUMMARY OF PLANCK INSTRUMENT CHARACTERISTICS

INSTRUMENT CHARACTERISTIC	LFI			HFI					
	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) ^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 $\mu\text{K}/\text{K}$) 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

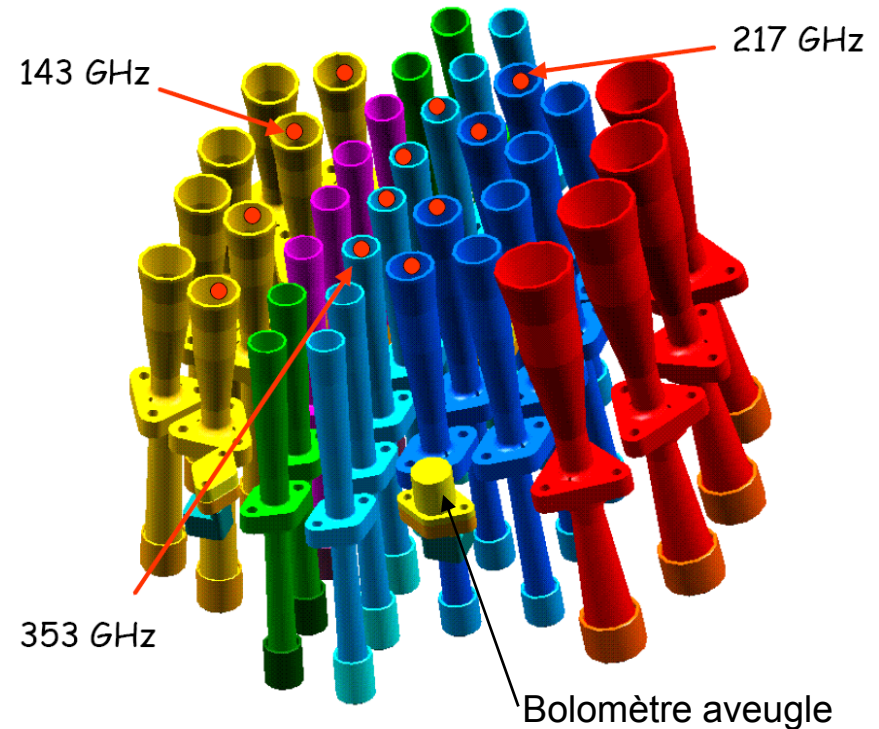
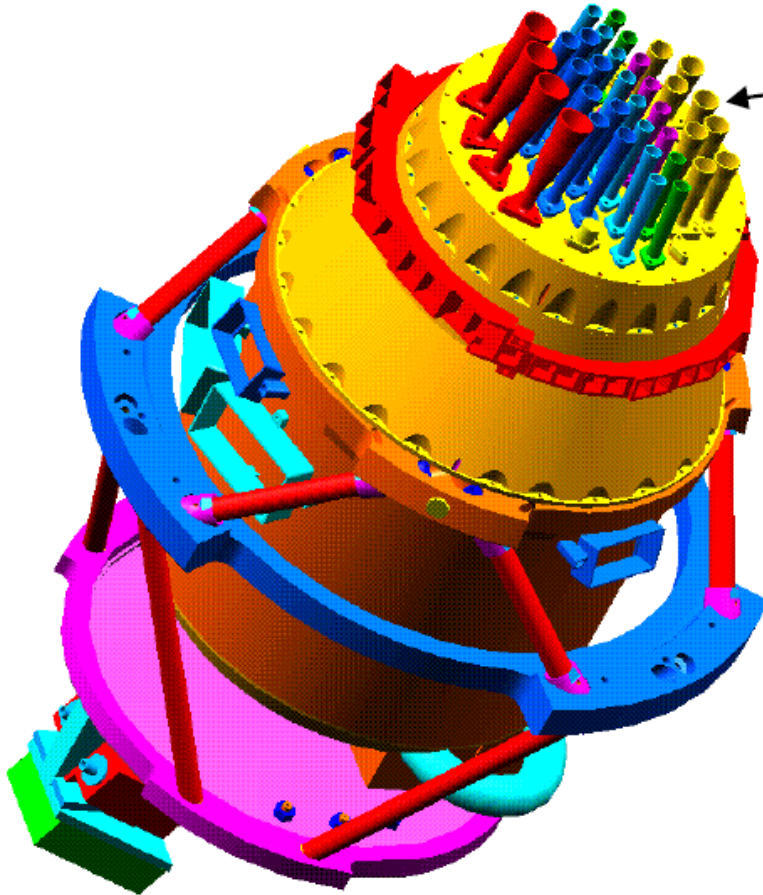


L'instrument Planck-HFI

36 cônes concentrateurs

48 détecteurs; 6 bandes

Plan Focal



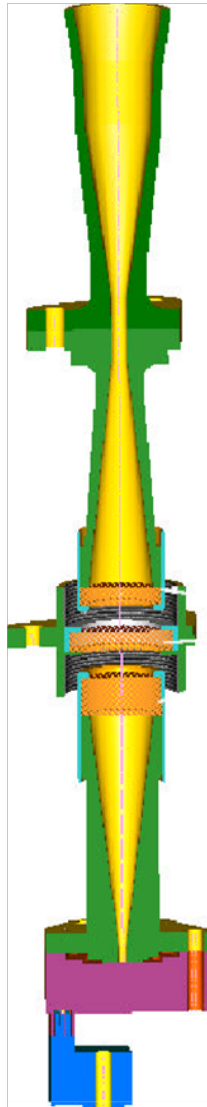
Canaux sensibles à la polarisation
(12 « PSB »)

d'après Jacques Delabrouille (Moriond 2002)

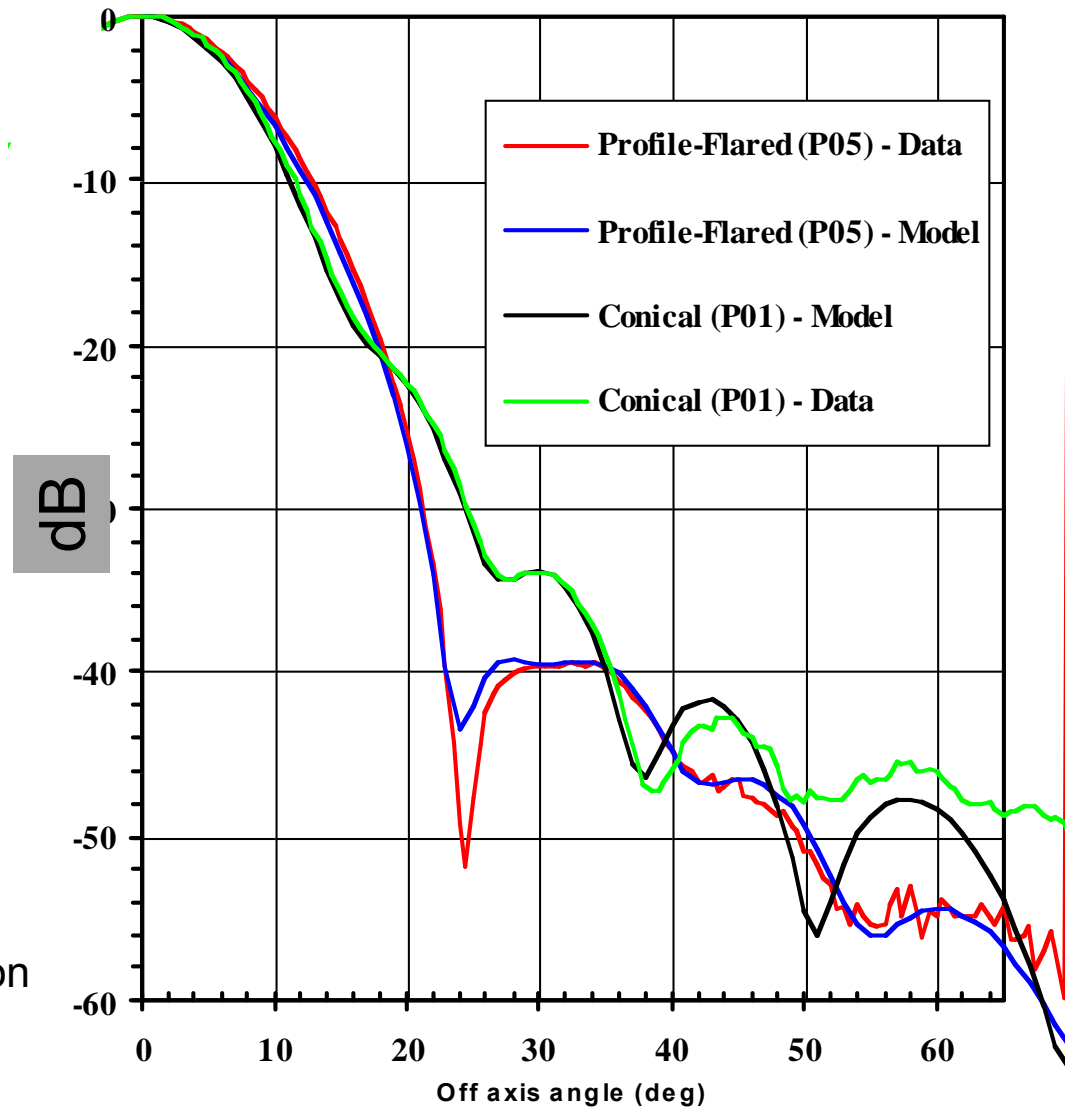
Couplage optique et définition angulaire

« Flared horn »
(cône évasé)

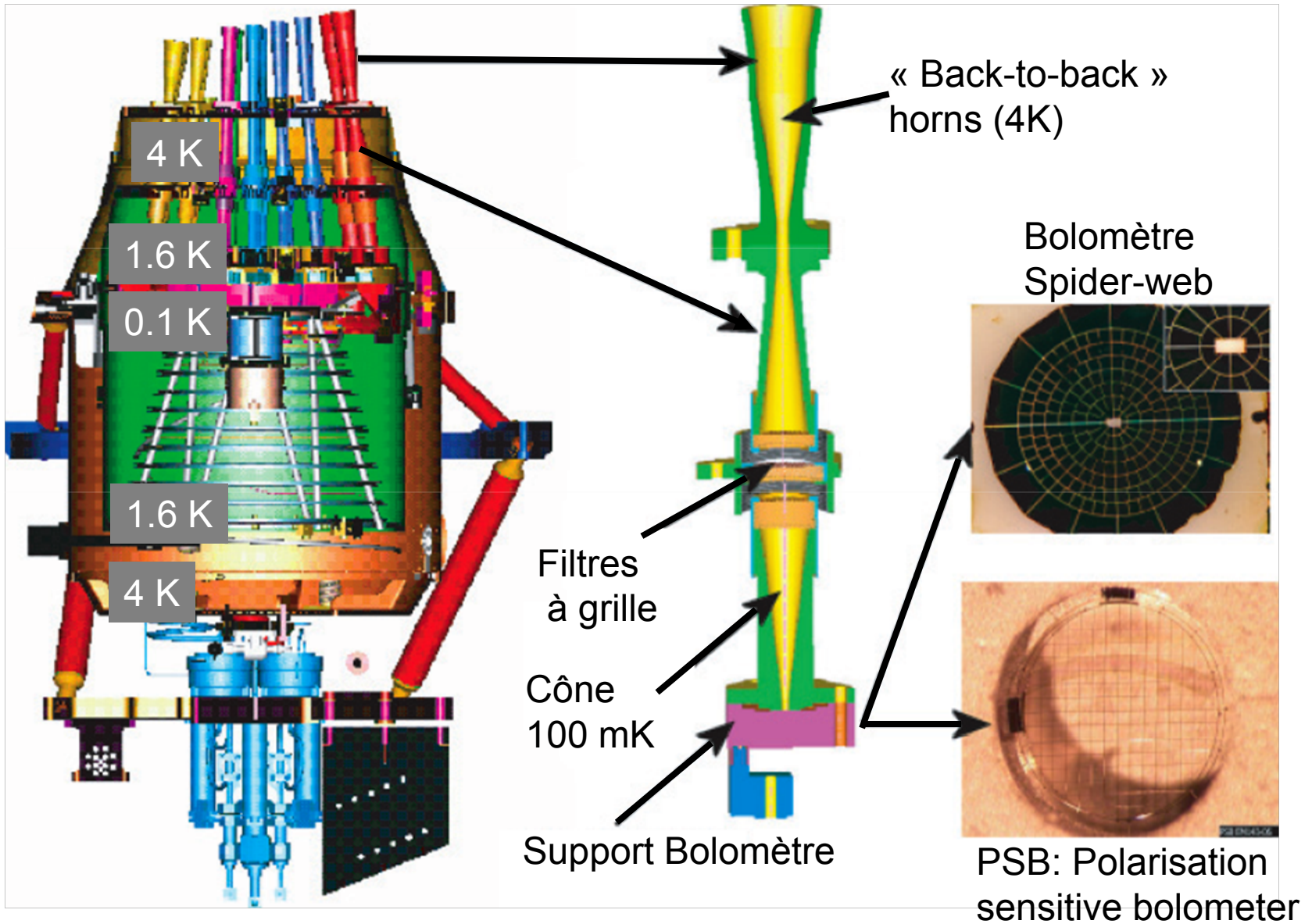
Made in
Cardiff
(UK)



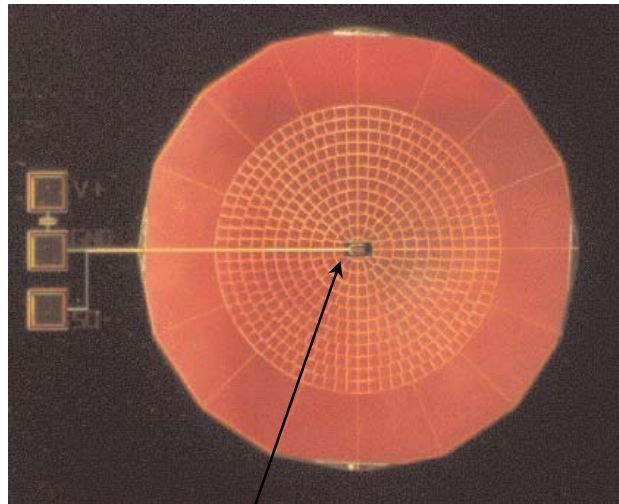
Atténuation
1/1000



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

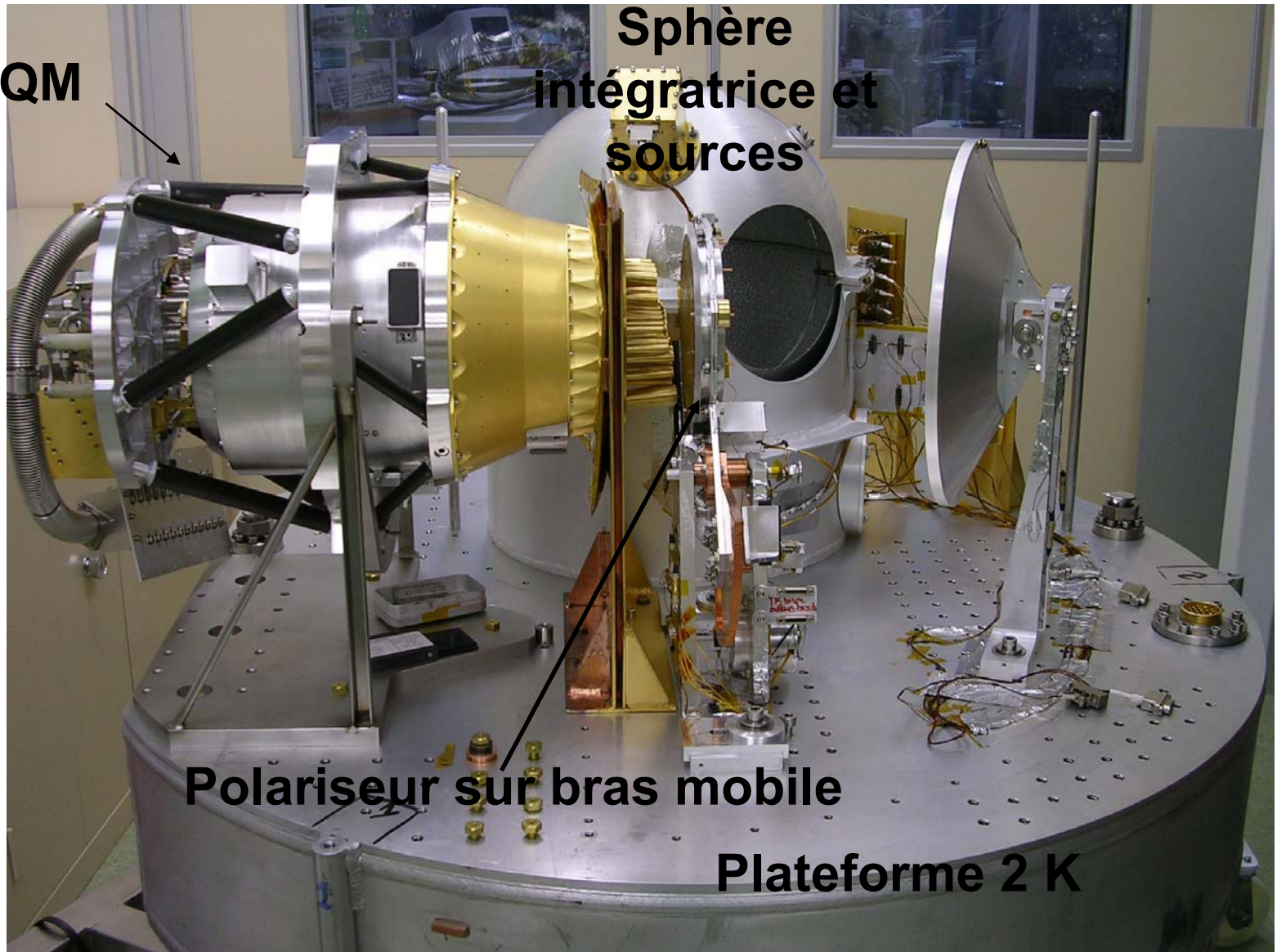
^bRef. 18.

^cRef. 19.

in P.D. Mauskopf et al., 1997

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

HFI CQM

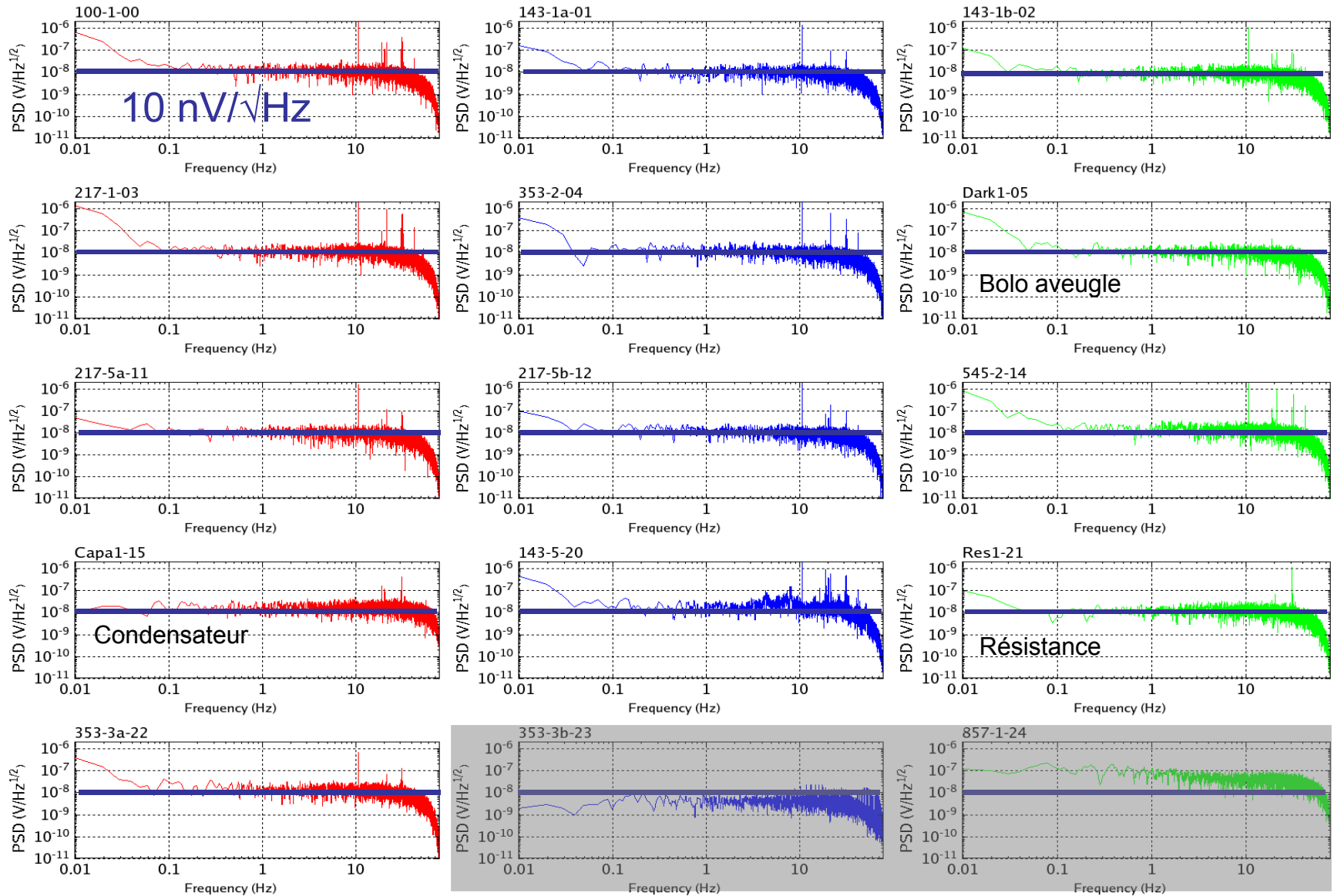


**Sphère
intégratrice et
sources**

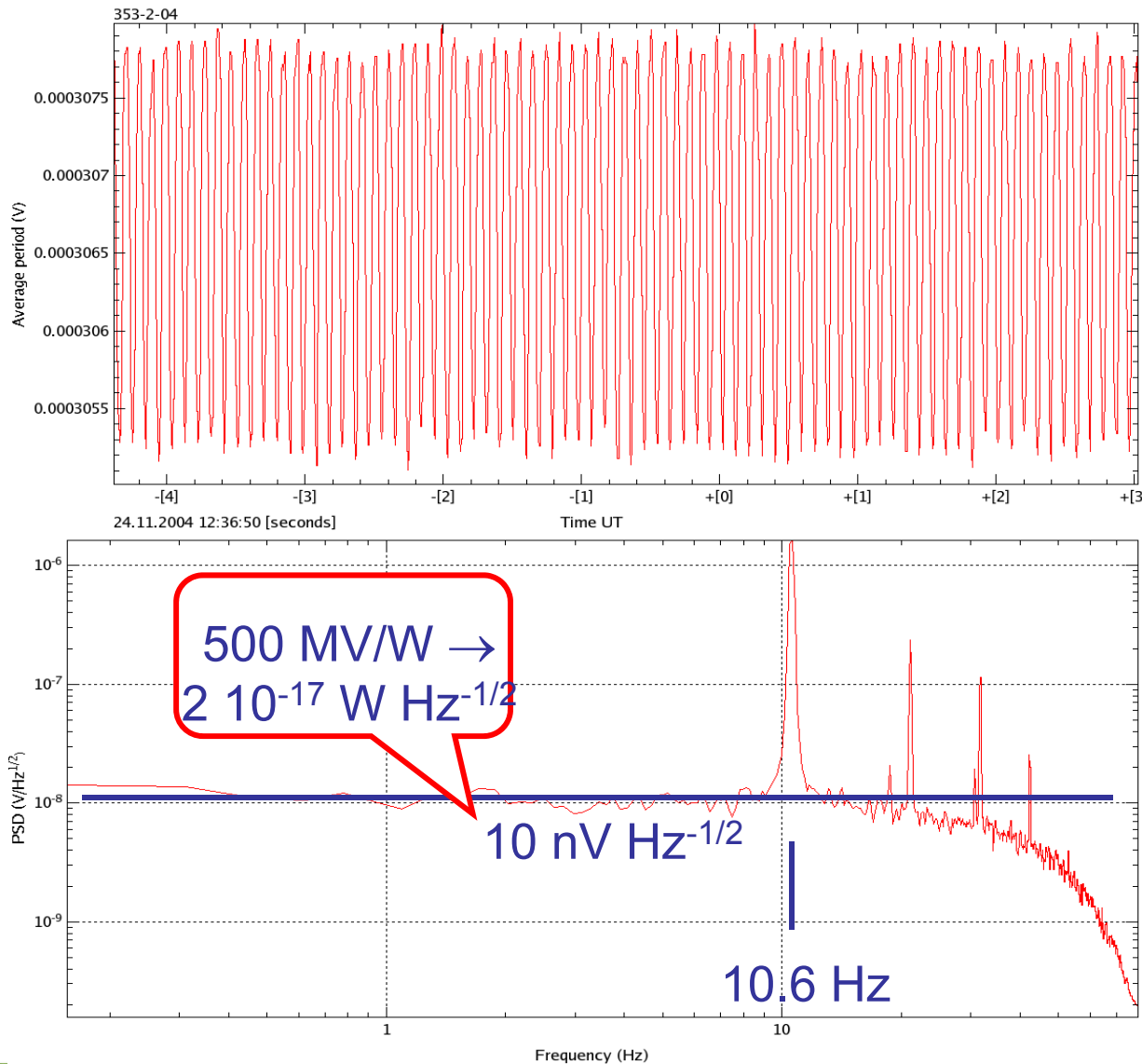
Polariseur sur bras mobile

Plateforme 2 K

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



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)



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

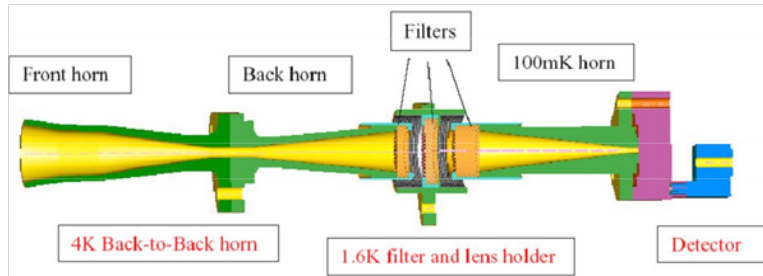
Planck-HFI: état des lieux en juin 2007

Un consortium international de 50 instituts ($\approx \text{Planck}_{2005} \times 2$)

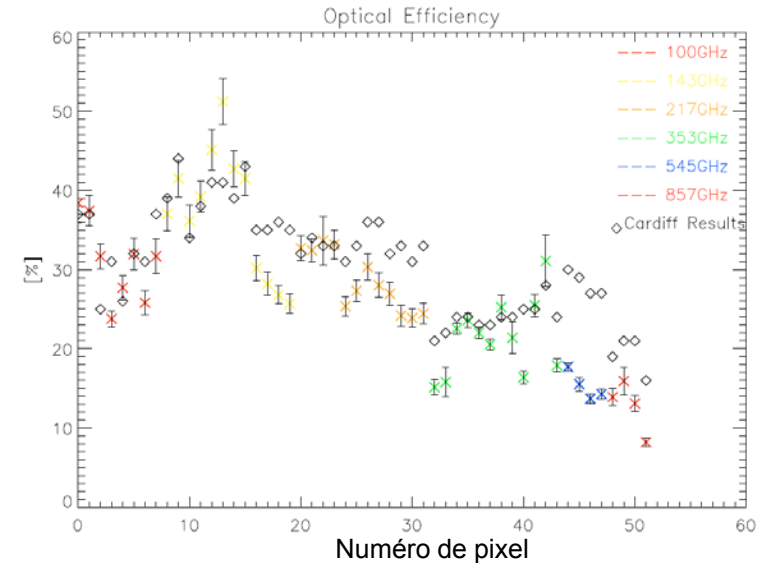
- ❑ **Juin-juillet 2006:** calibration @ l'IAS du modèle de vol de Planck HFI
- ❑ **Novembre 2006:** livraison à l'industriel (Alcatel-Alenia-Space à Cannes) des modèles de vol
- ❑ **Juin 2007:** intégration du télescope avec la charge utile
- ❑ **Prochaines étapes:**
 - ❑ **CSL** (Centre Spatial de Liège) intégration complète du satellite
 - ❑ **fin juillet 2008:** date officielle de lancement (Ariane 5)

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

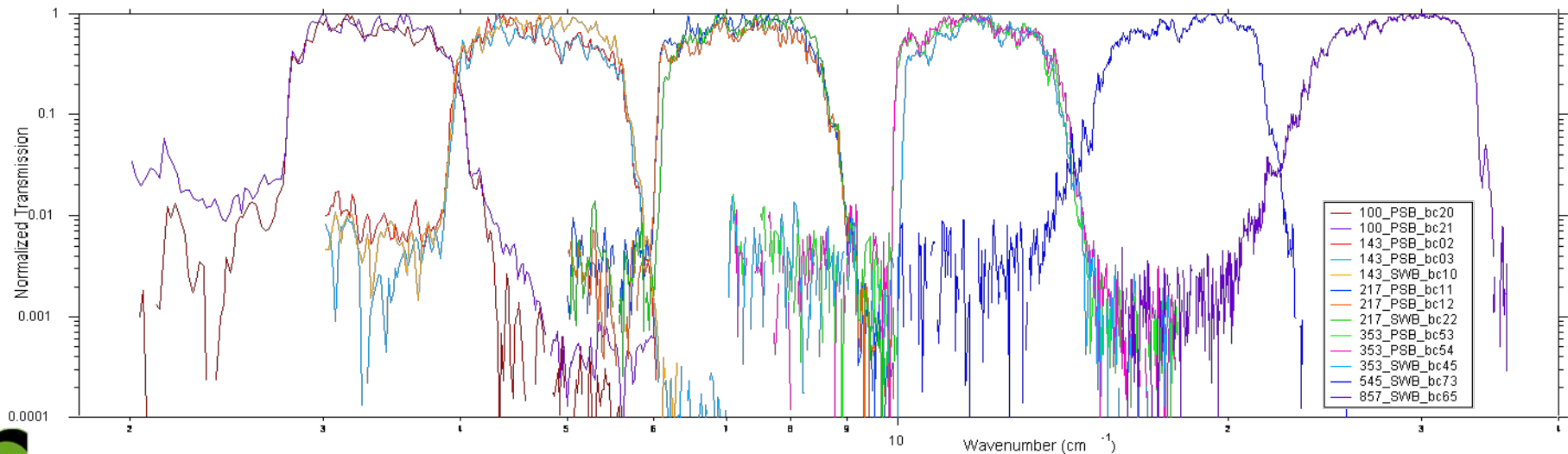
Chaîne optique



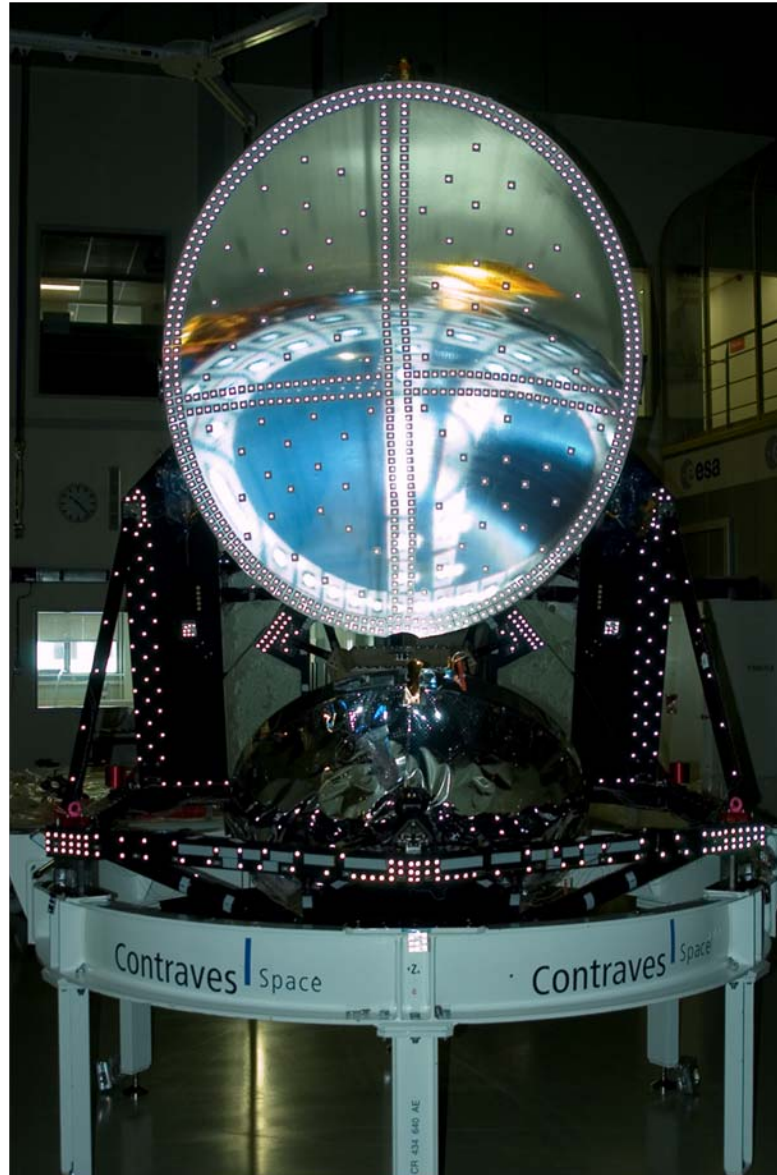
Efficacité optique



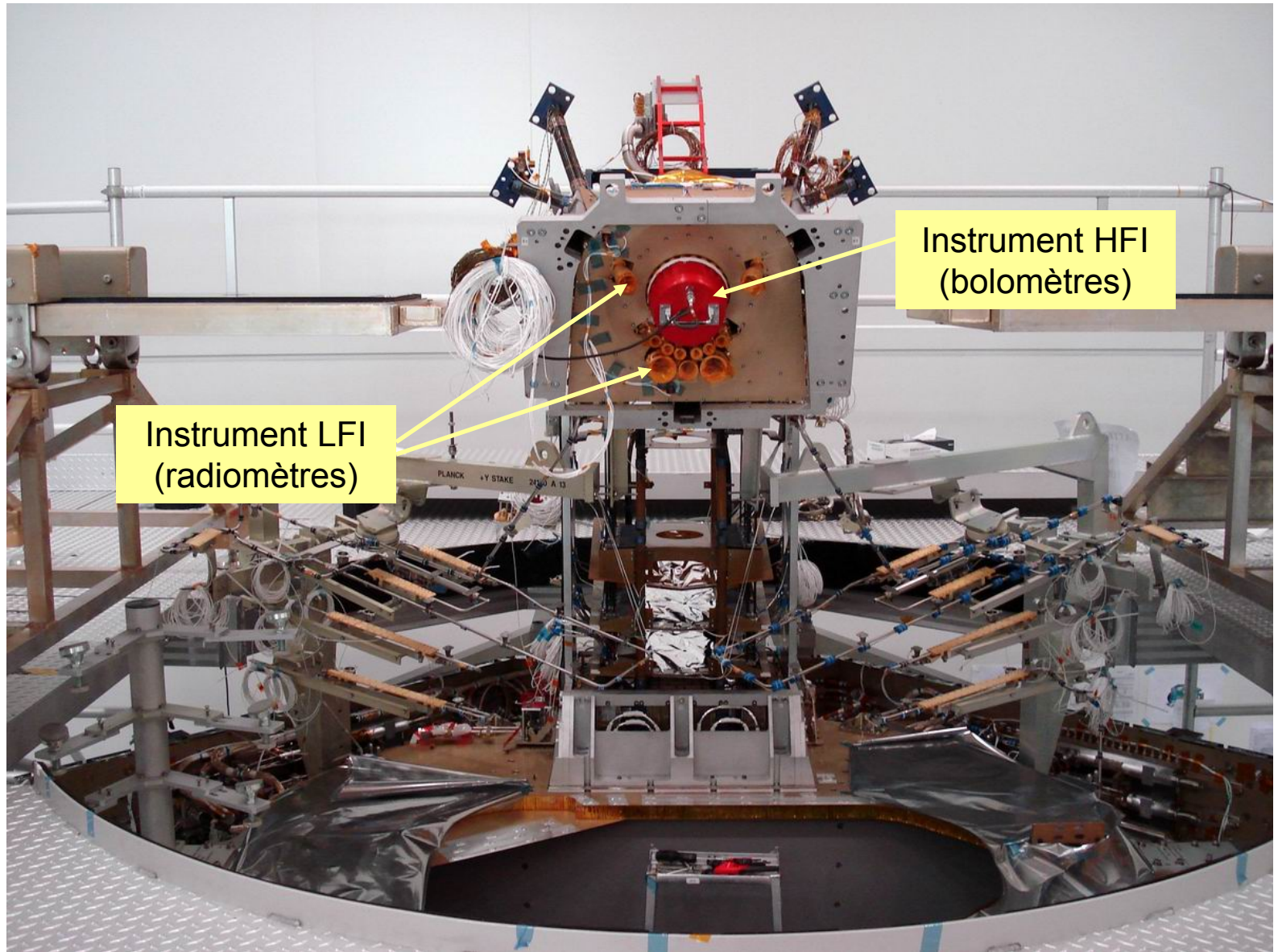
Transmission spectrale



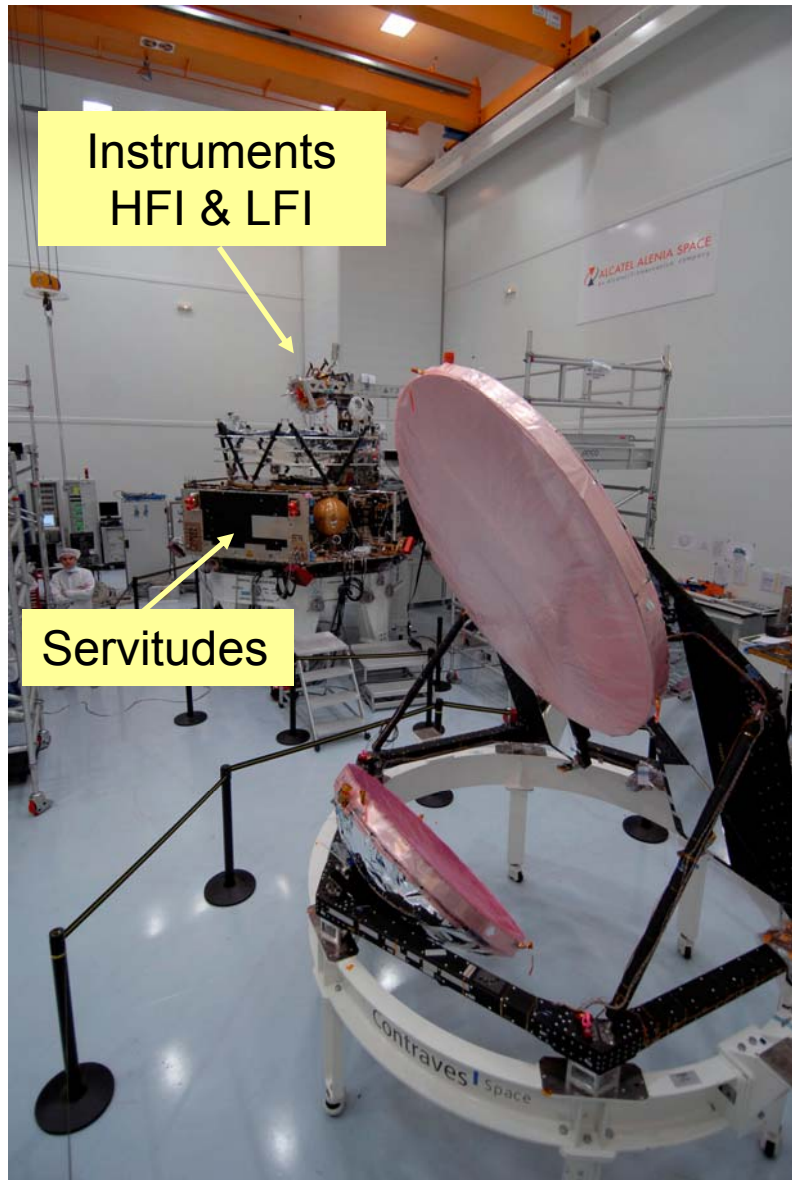
Planck-HFI: test des déformations du télescope à froid



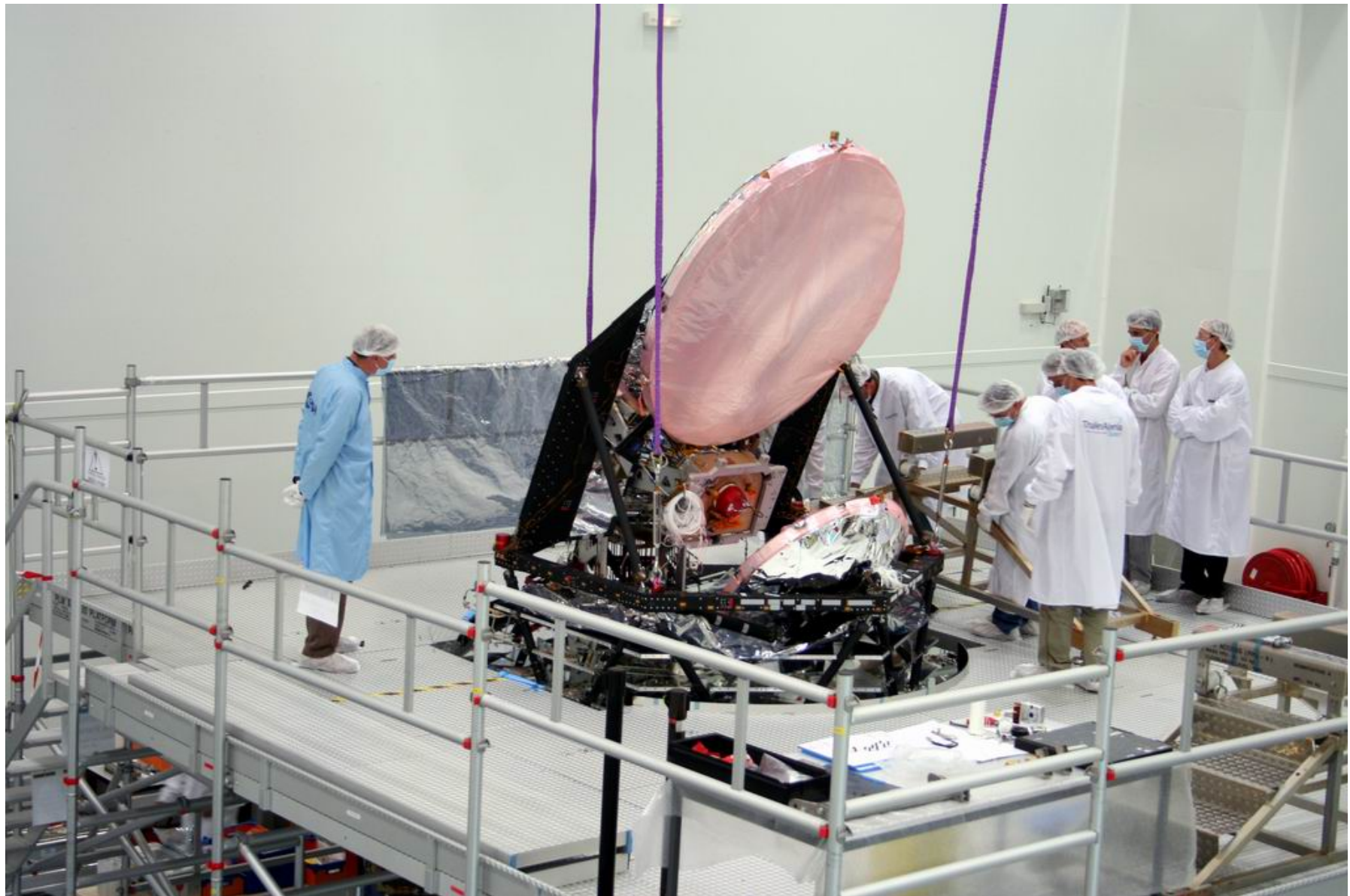
Intégration de Planck HFI, LFI et d'un refroidisseur à sorption



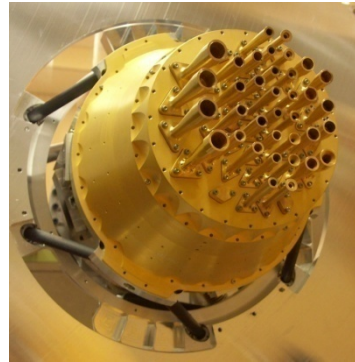
Intégration du télescope et des instruments



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

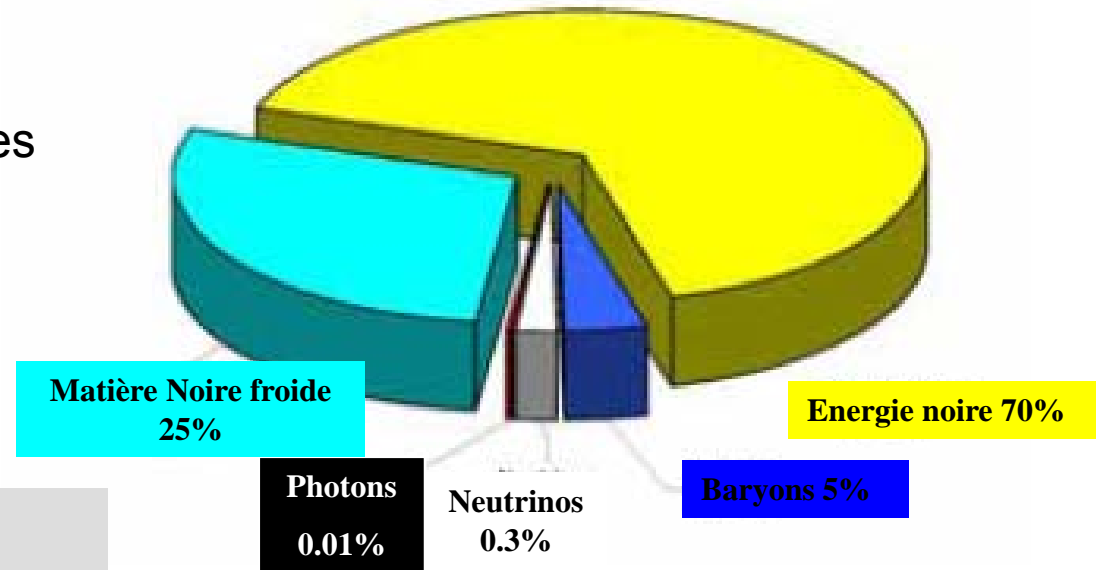
Let's wait and see...

□ Détection de la Matière noire

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

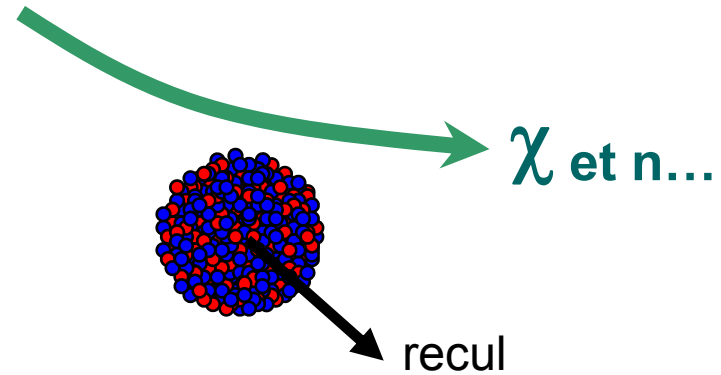
Contenu énergétique de l'Univers



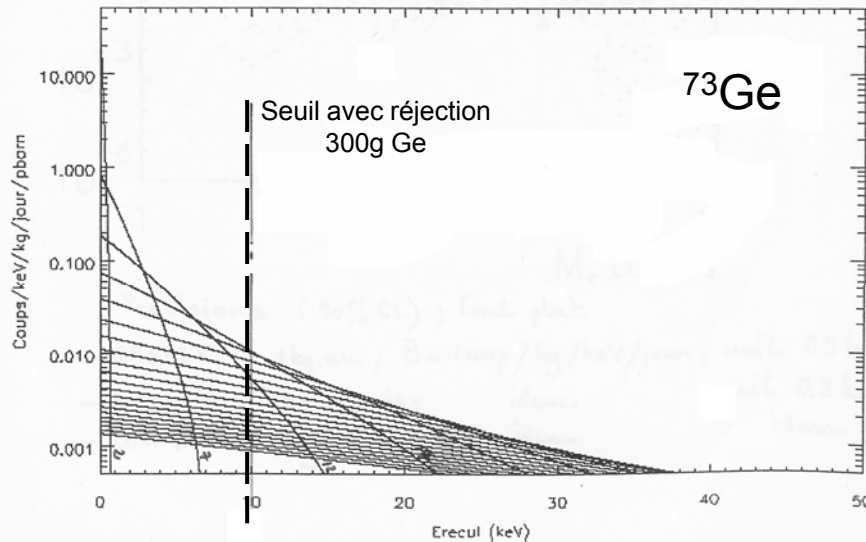
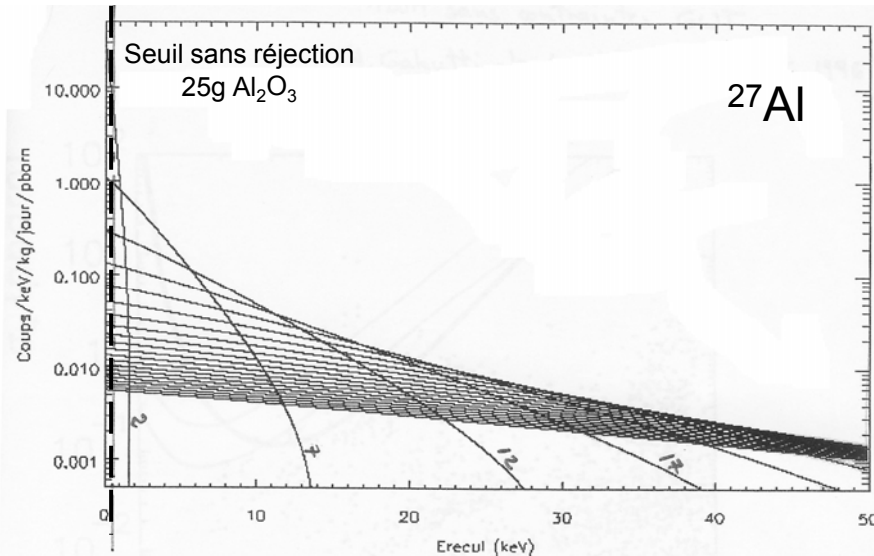
Une des candidats le mieux motivé:

- **Neutralino** χ (la plus légère des Particules **SuperSymétriques**; LSP) \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

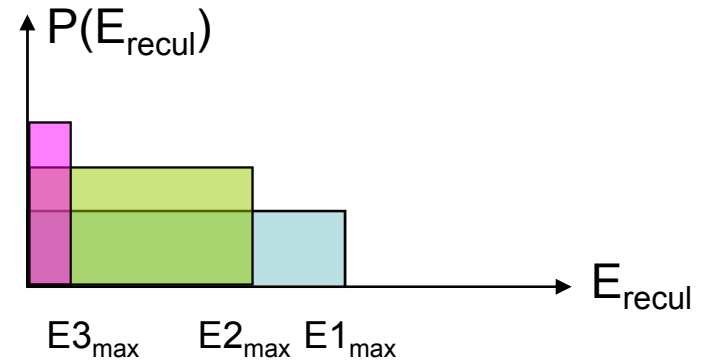
\curvearrowright **Weakly Interactive Massive Particles**



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

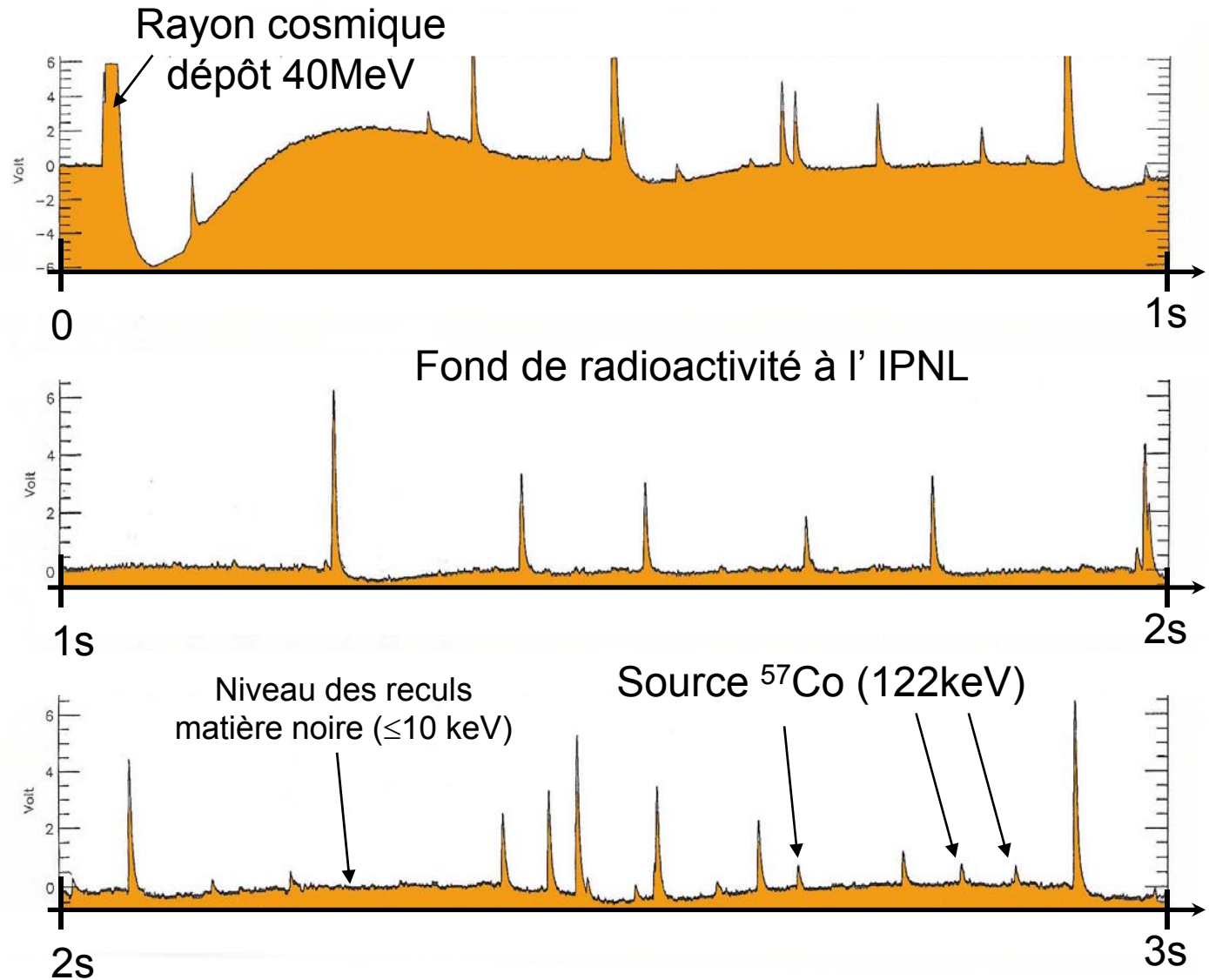


- Cinématique élémentaire $\rightarrow E_{\text{max}}$
(adaptation des masses: de la pétanque en labo !)
- Les faibles énergies de recul sont toujours « peuplées » \rightarrow spectres piqués à basse énergie: **on recherche le meilleur seuil \rightarrow bolomètres !**

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→2000: **R&D discriminations par techniques mixtes**
 - **charges & chaleur:** sur Ge (CDMS, EDELWEISS) & Si (CDMS)
 - **lumières & chaleur** (CRESST, ROSEBUD)
- 2000→2005
 - **retour en souterrains:** espace des phases du MSSM à portée de main des détecteurs cryogéniques
- 2007: un sérieux compétiteur : **Xe liquide scintillant**

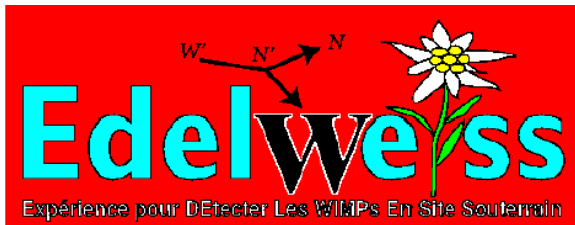
□ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Charges & Chaleur »

CDMS (US), EDELWEISS (France)*

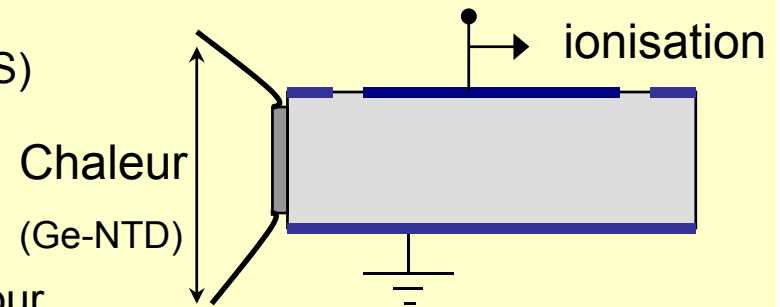
*remerciements à Alex Juillard (CSNSM, IPNL)



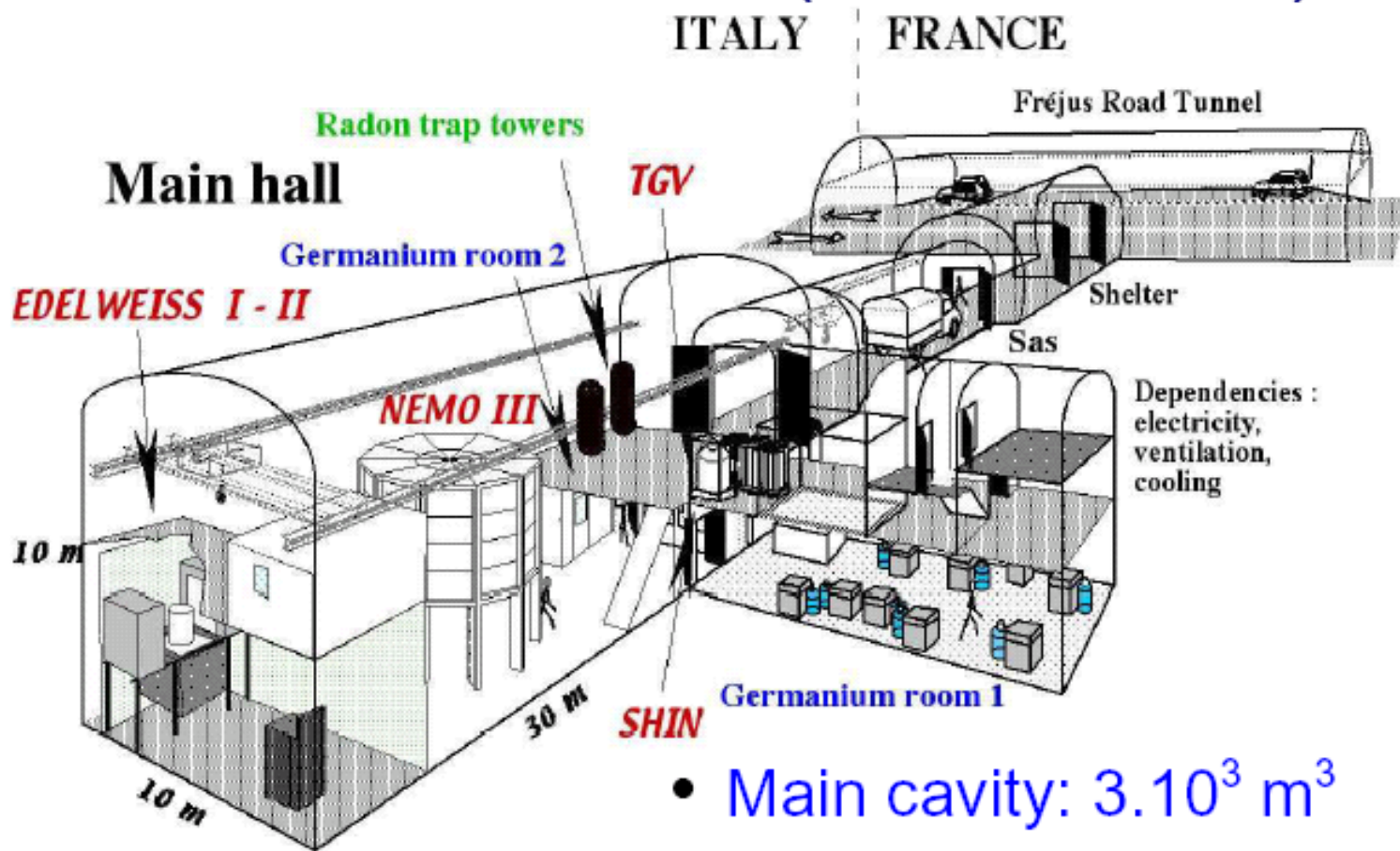


Expérience pour DÉtecter Les Wimps En Site Souterrain

- ✓ 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 (≈ 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 (démarré 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)

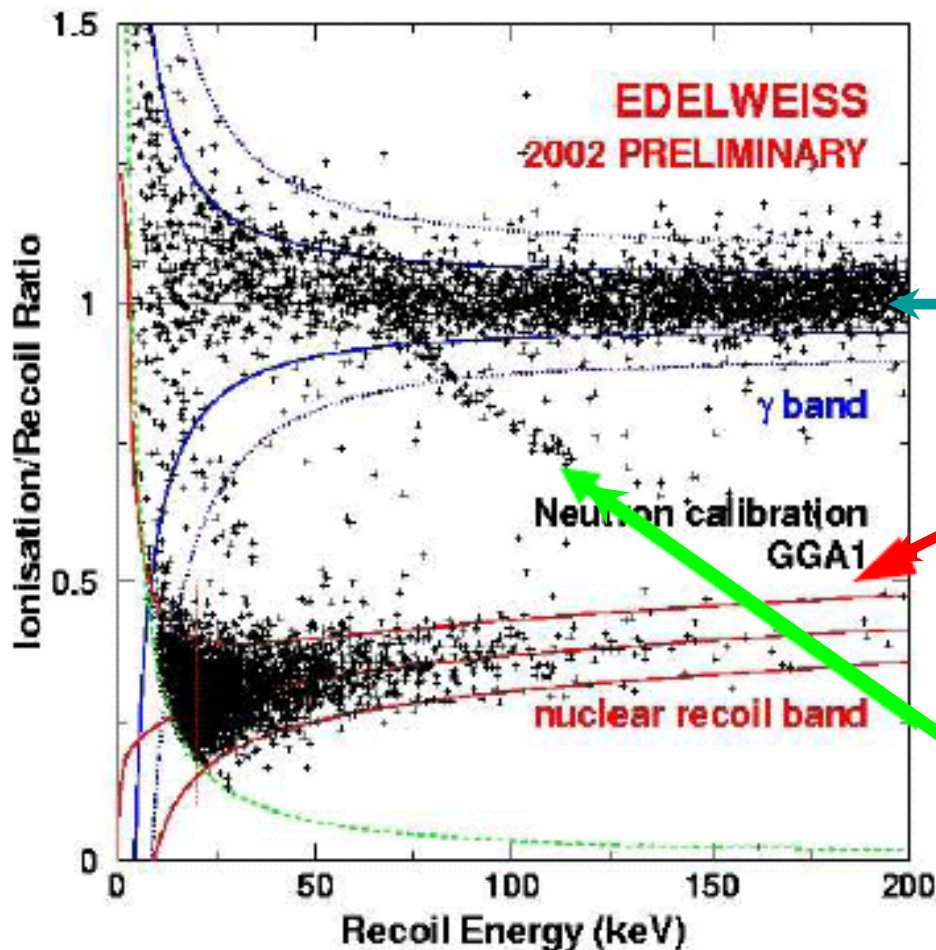


Inside the LSM (CNRS-CEA)



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

Détecteurs Edelweiss: discrimination gammas/reculs

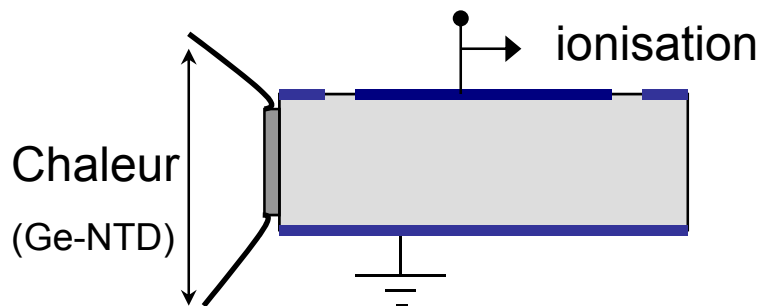


Irradiation ^{252}Cf

gammas

reculs

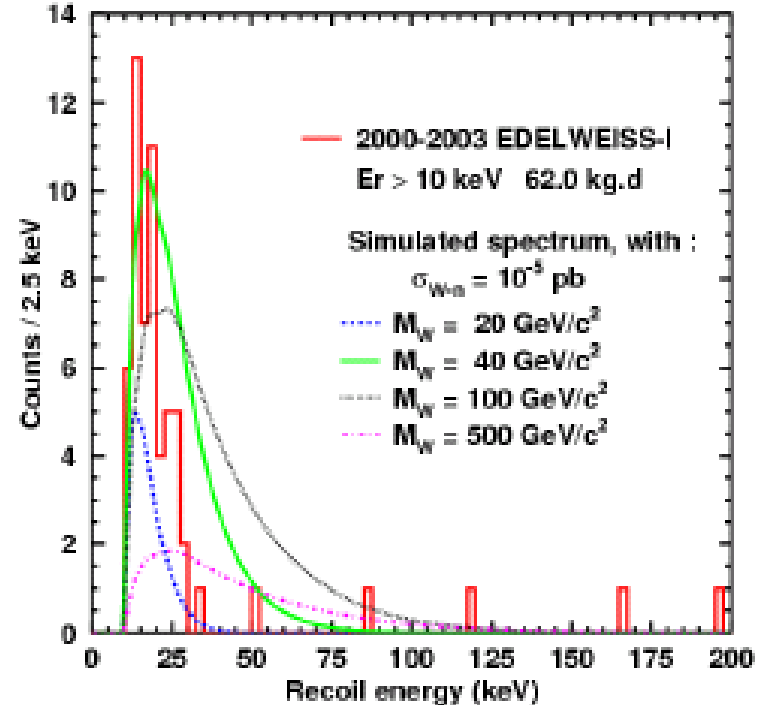
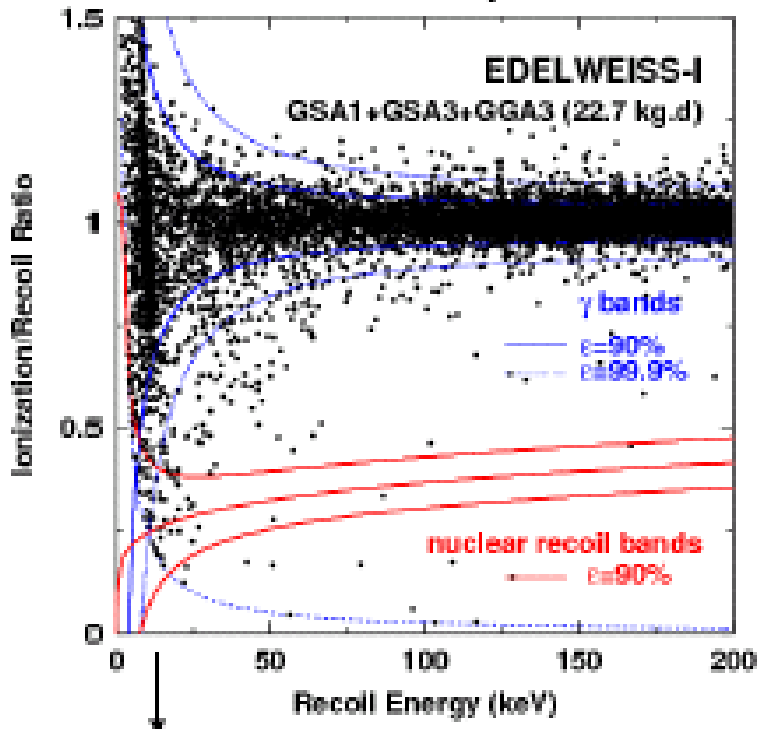
Diffusion inélastique sur ^{73}Ge



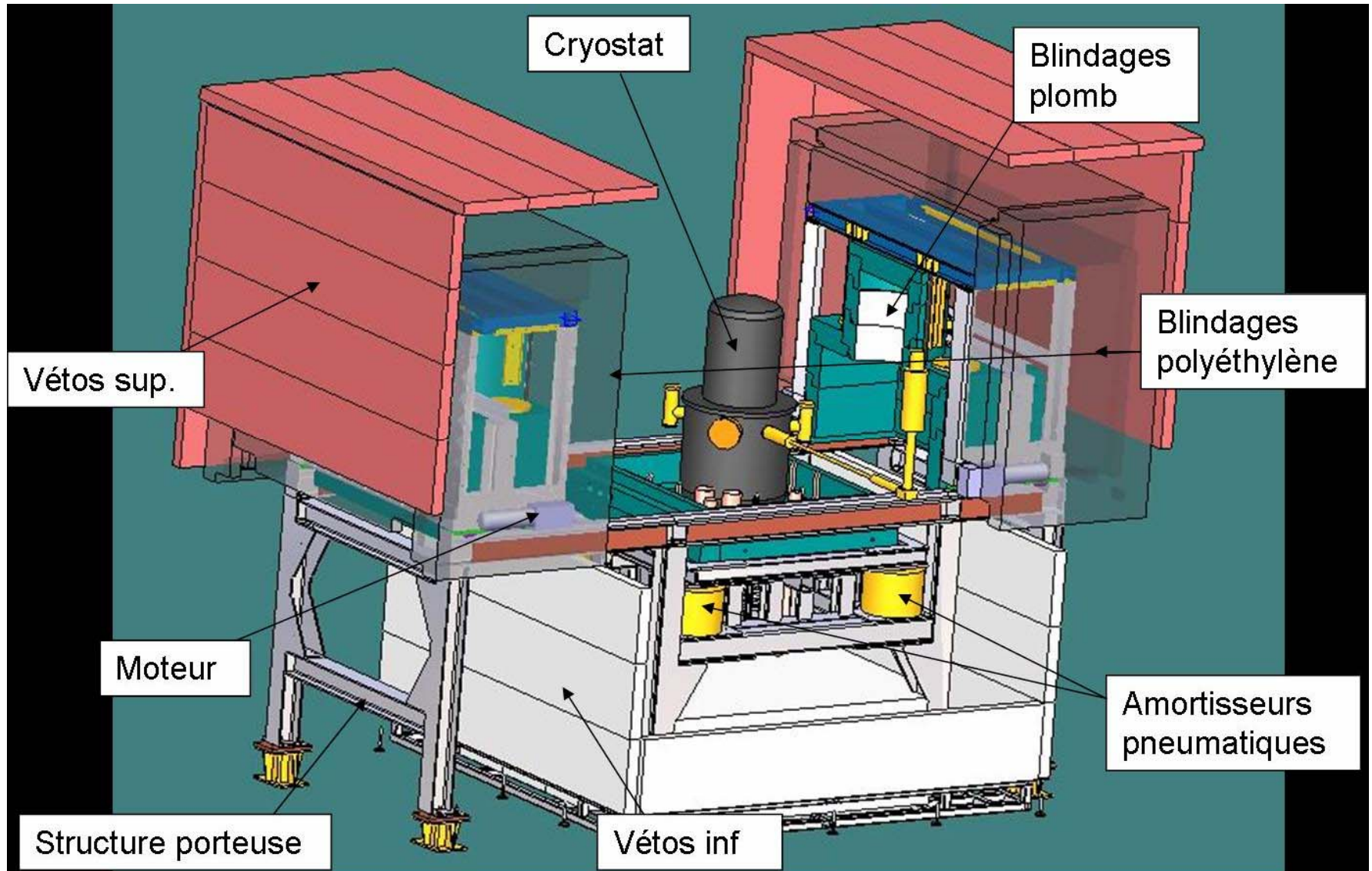
P. Di Stefano, IPN Lyon

Runs de fond Edelweiss-I (2000→2003):

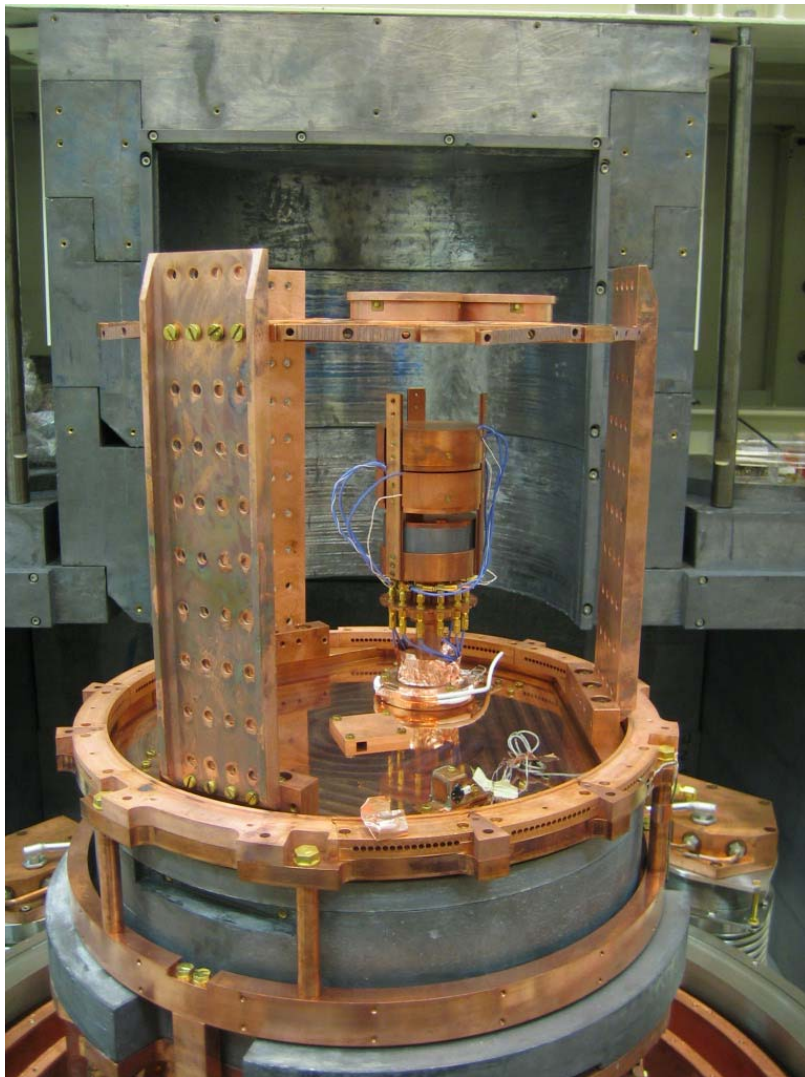
- exposition 62 kg.jour
 - 59 événements, concentrés à basse E, probablement des **événements de surface mal collectés** sous les électrodes...
- **R&D (CSNSM) sur la localisation**: (1) analyse en temps résolu du signal de charge (2) films NbSi sensibles à la composante athermique des phonons issue 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 μ** (>98% couverture)

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

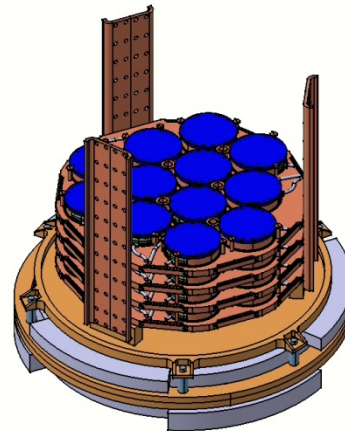
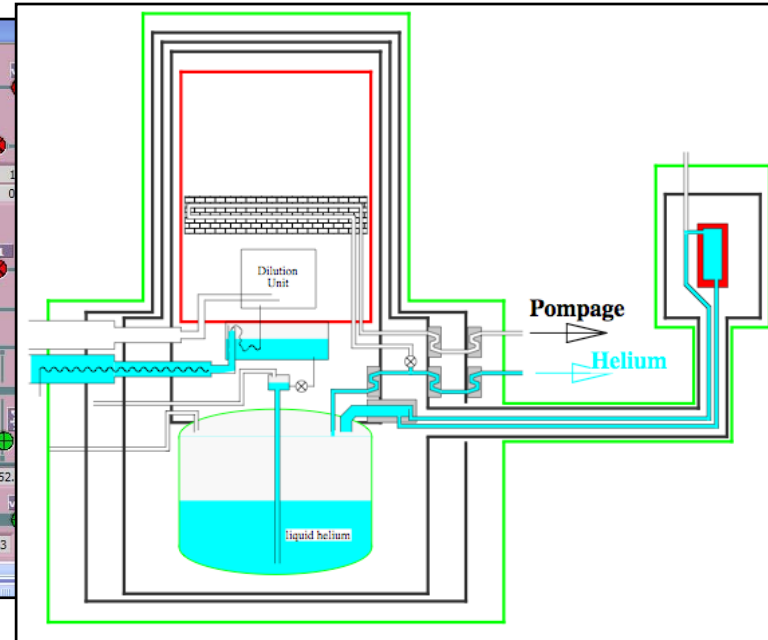
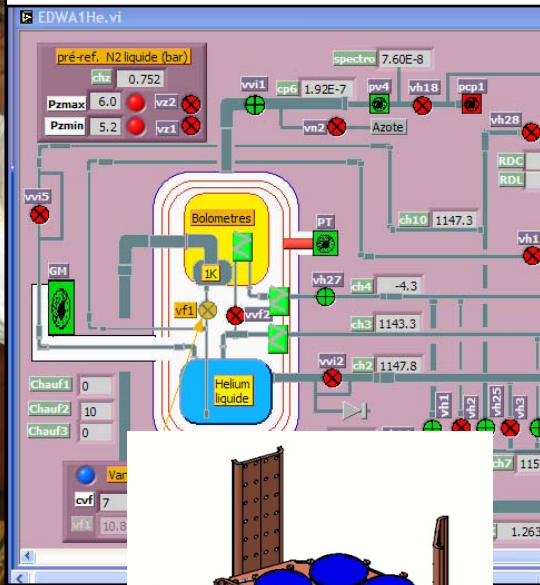
- ◆ **Sensibilité attendue (EDW-I * 100)**

$\sigma_{w-n} \approx 10^{-8}$ pb (phase 100 détecteurs)

0.002 évt./kg/jour (Erecul>10keV)

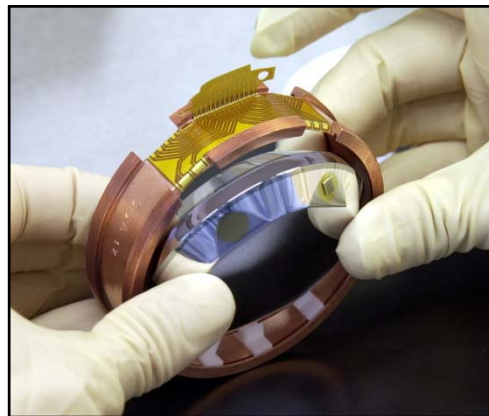
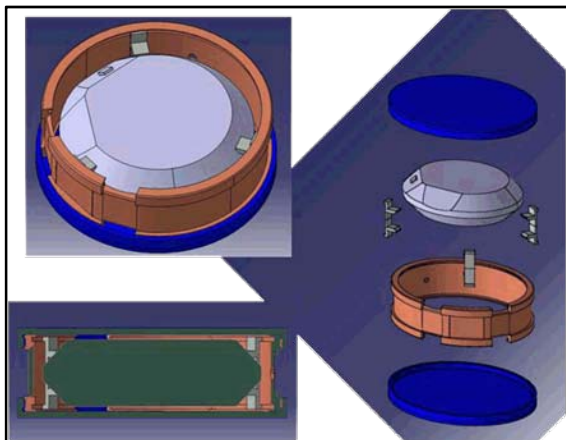
= neutrons venant des μ de haute énergie interagissant dans la roche

Edelweiss-II: amélioration des cryostats



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

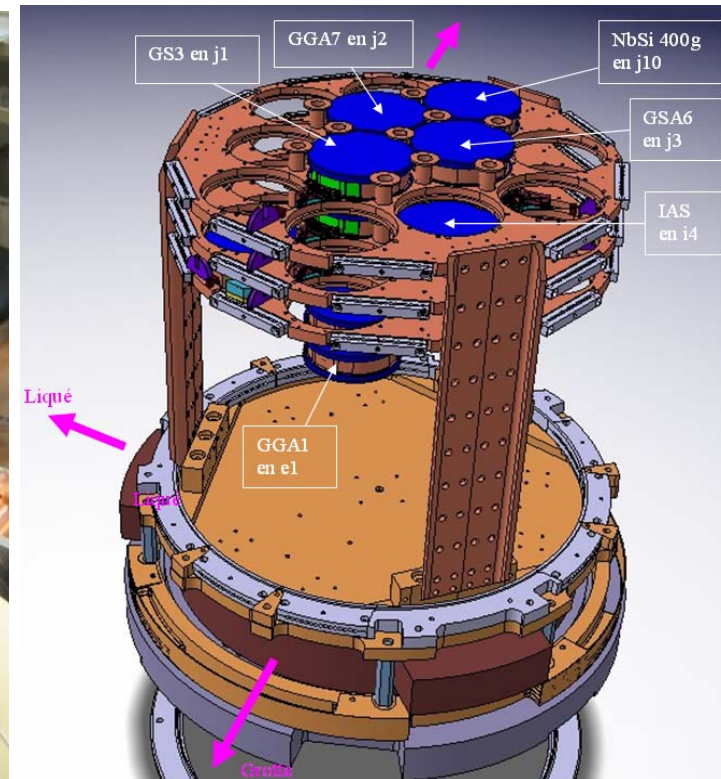
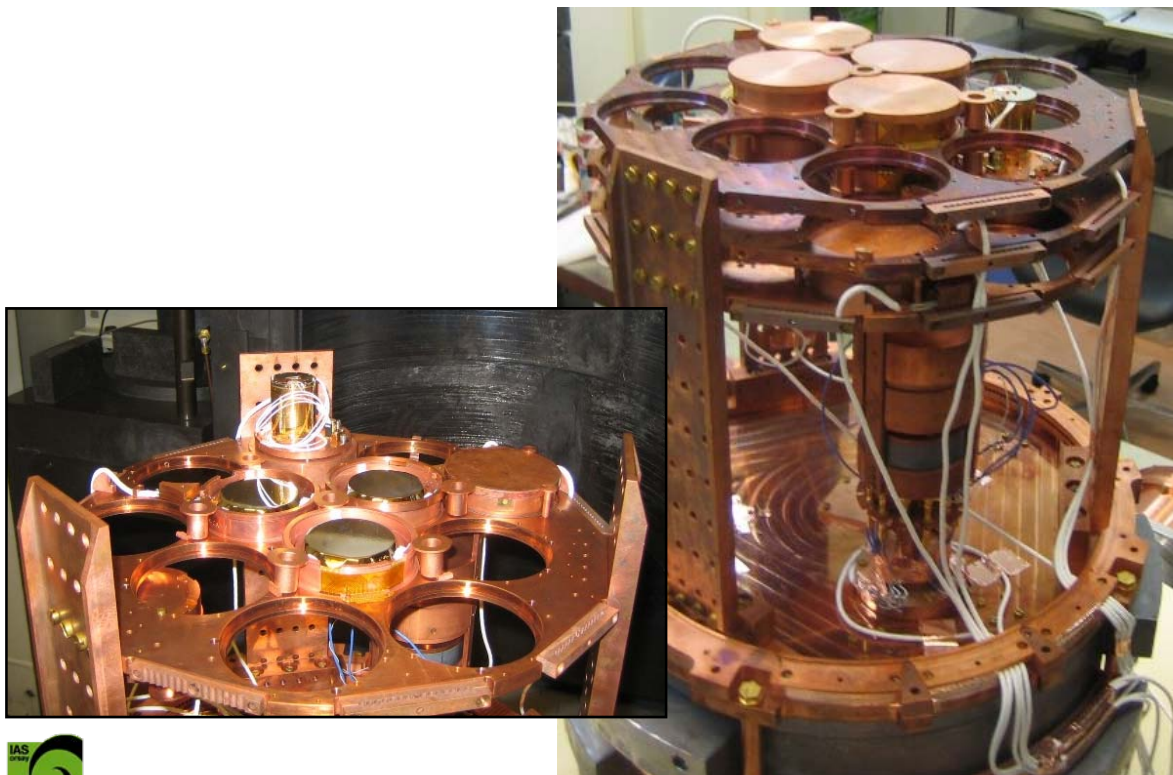
- ◆ Développés au CSNSM Orsay
- ◆ 2 NbSi thermomètres à films minces NbSi pour la réjection active des **événements de surface**
- ◆ R&D en cours avec détecteurs de 200g en labos.

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; Al₂O₃)



- ✓ 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 Al₂O₃ IAS
 - Premiers tests de fond : Fond γ = 1/2 EDW-I
 - Fond α = 1/2 EDW-I (dans détecteurs Ge)
 - 21 Ge/NTD + x Ge/NbSi détecteurs prochainement

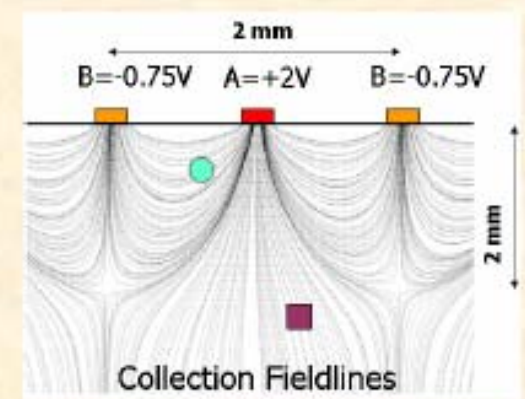
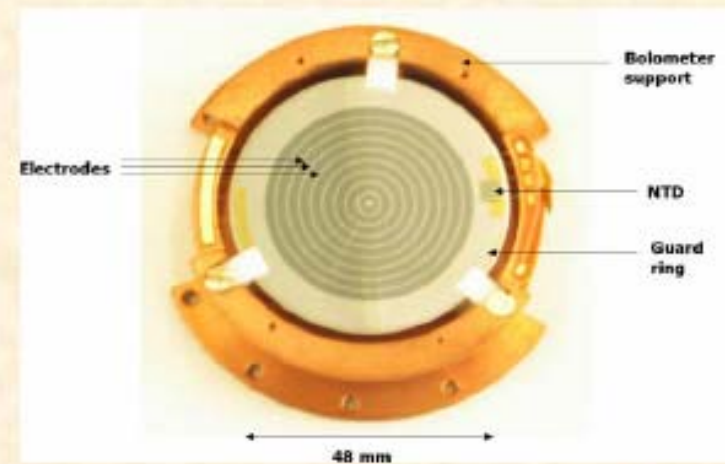
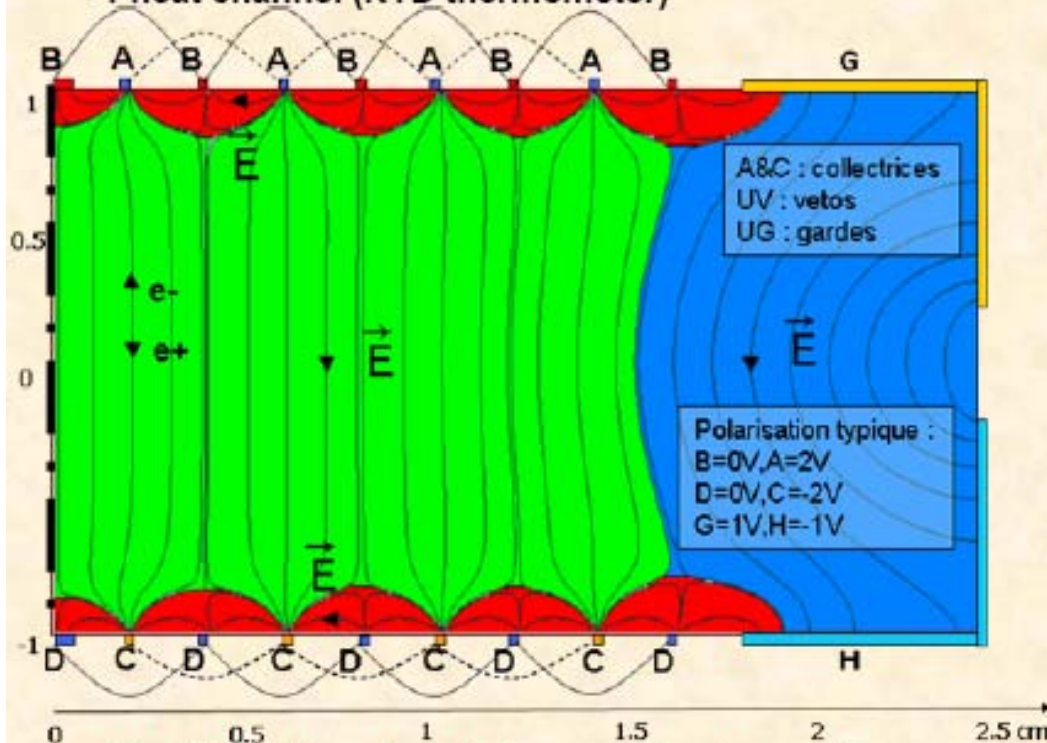
✓ EDW-II pourrait disposer de 30 kg de Ge en 2009
(son concurrent direct CDMS aura “seulement” 5 kg à la même date)

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

R&D bolomètres Germanium à électrodes Inter-Digitées

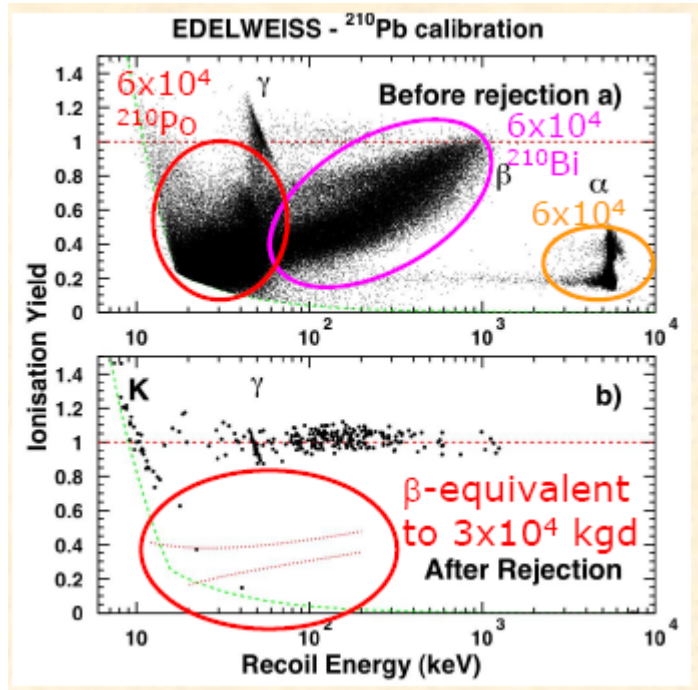
1^{er} Proto ID201 (juin 2007):

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



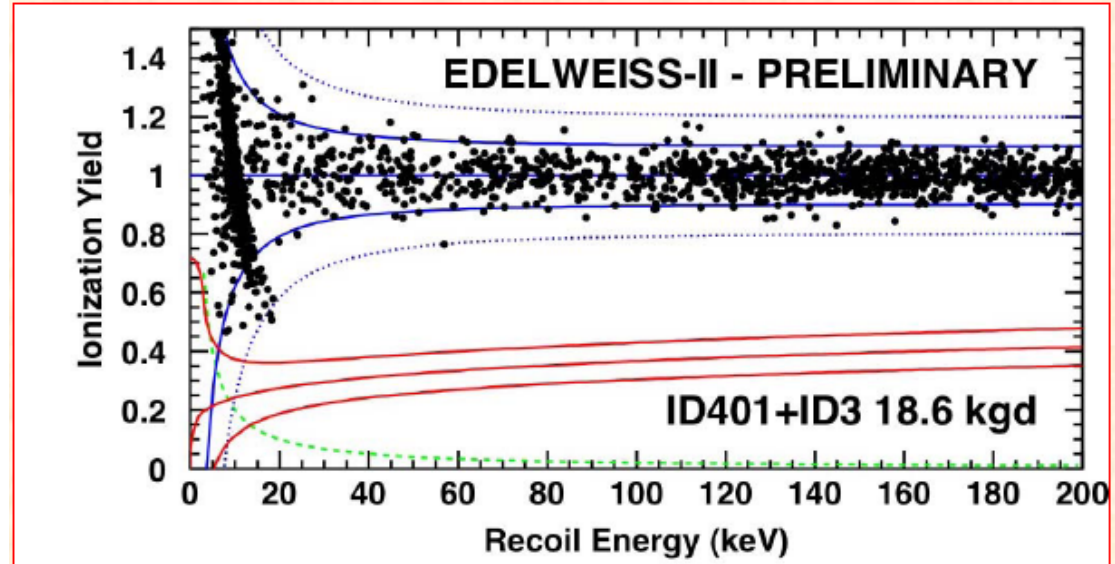
- Identification des événements de surface par utilisation des voies ionisation
- Application de champs électriques verticaux dans le volume et horizontaux en surface
- Toute collecte sur B ou D signe un evt de surface

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



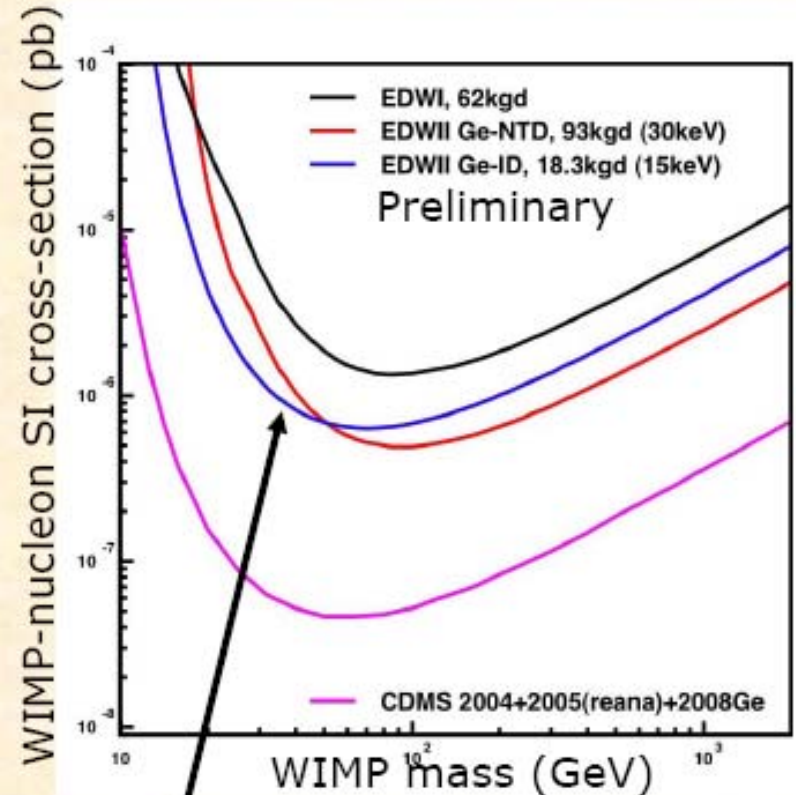
Calibration en surface par une source β

Premiers résultats d'une pose « longue » au LSM



EDELWEISS-II en 2009: résultats préliminaires

- 93.5 kgd GeNTD
 - 11 detectors x 4 months
 - 30 keV threshold
 - 3 events observed in nuclear recoil band
- 18.6 kgd ID
 - 2 detectors x 4 months
 - 15 keV threshold
 - No nuclear recoils
 - No evts outside γ band
- **Jan. 2009: 10 ID detectors**
 - x 20 improvement in 6-8 months:
 4×10^{-8} pb
 - **More detectors build in 2009**



On gagne à basse M_W
avec le seuil plus bas

□ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Lumière & chaleur »

- ROSEBUD (Ge-NTD; tunnel du Canfranc)

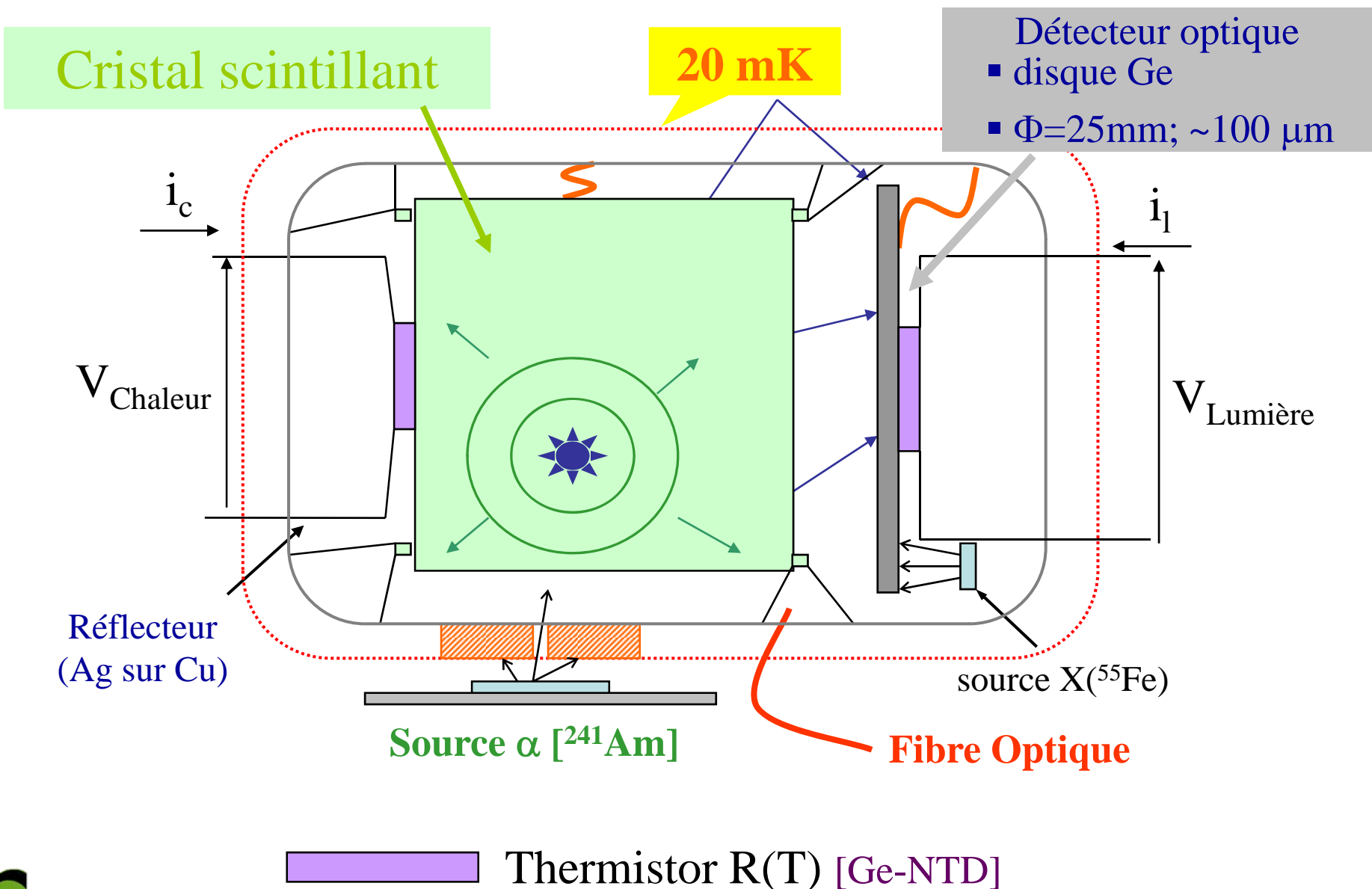
Collaboration IAS / Univ de Saragosse

- CRESST (TES; tunnel du GranSasso)

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

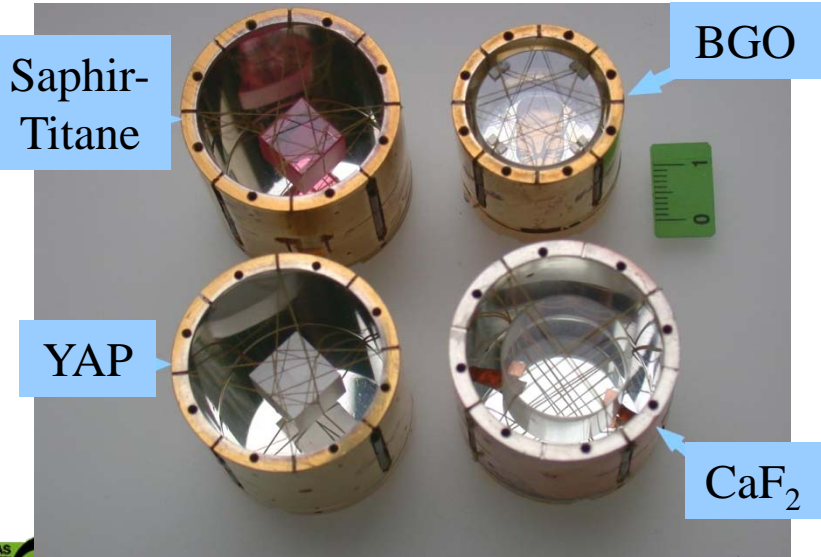
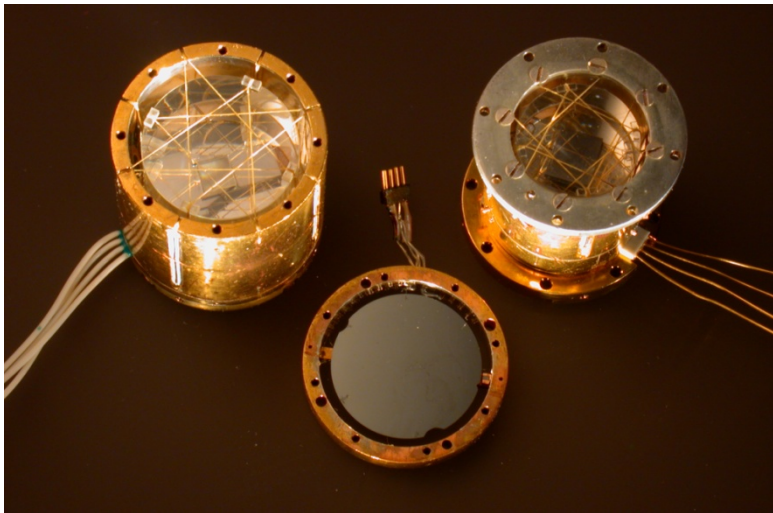


Bolomètres massifs scintillants



Bolomètres scintillants: R&D et réalisations IAS

BGO 91g & 46g; disque Ge Ø25mm



Tests à 20mK de cristaux

- **scintillants à 300K:**
CaWO₄, BGO, GSO, YAP, SrF₂,...
- **non « scintillants » à 300K** mais « d'intérêt »
Saphir (Al₂O₃), TeO₂, LiF,...

→ à 20mK tout scintille, tout discrimine !

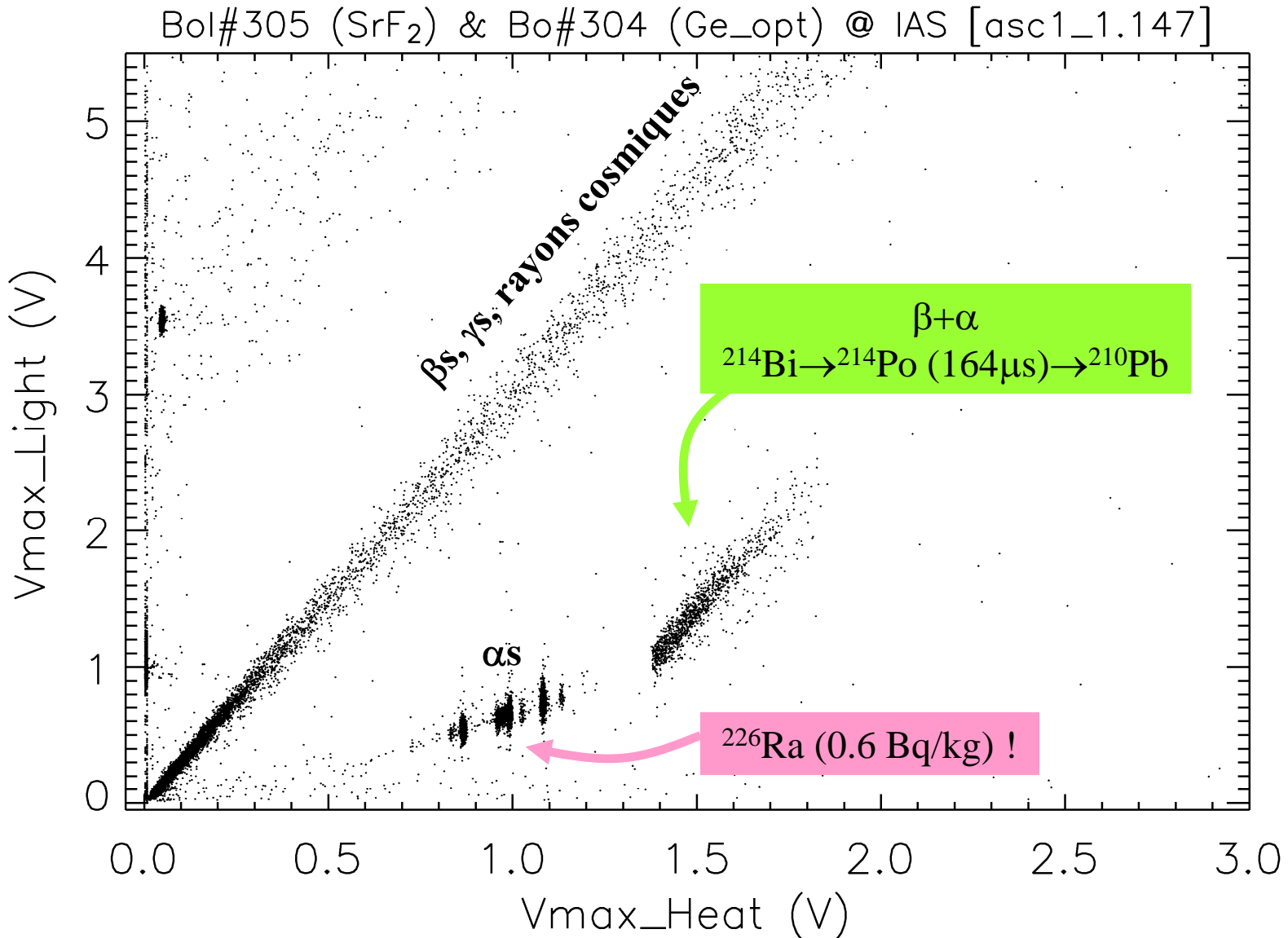
- Rendements lumineux ?
- Mécanismes d'émission ?
- Propriétés thermiques ?
- Radioactivités internes ?
- maille moléculaire !

détecteurs optiques + gros, + fins + froid

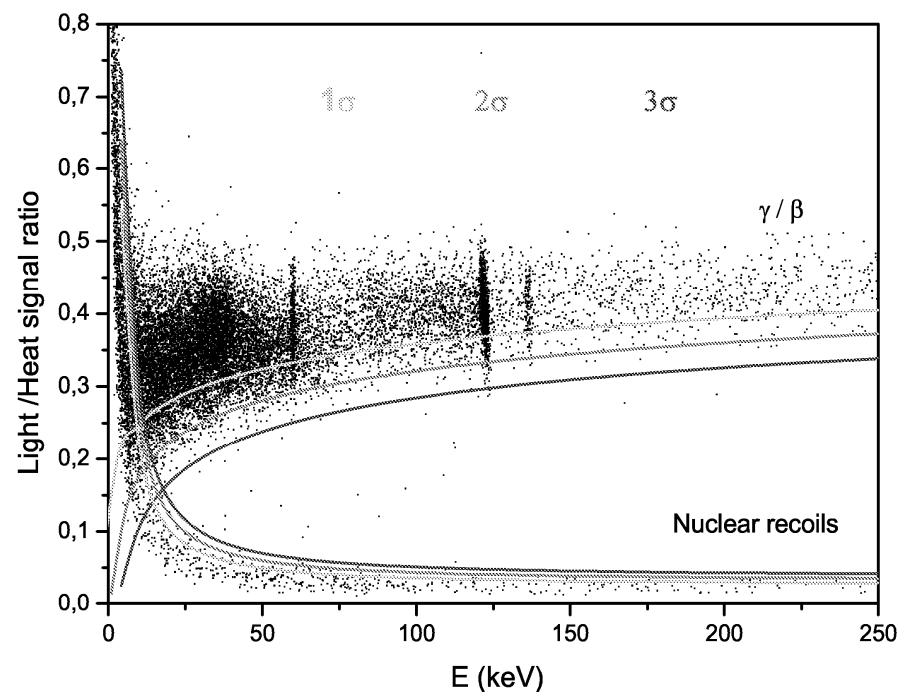
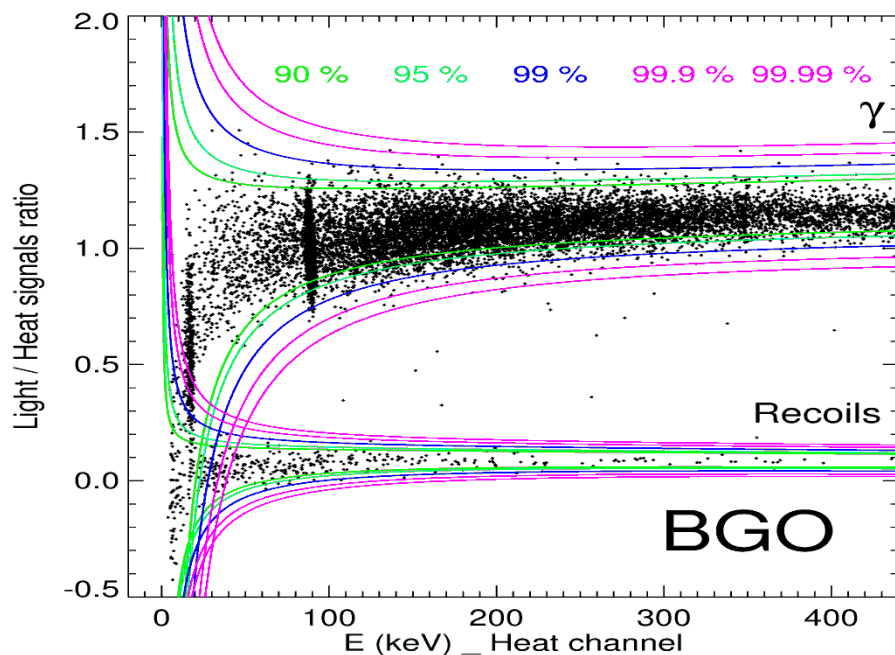
interprétation des reculs + difficile...

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

Exemple de discrimination : bolomètre de 54g en SrF₂



Au menu de ROSEBUD en 2007: BGO et saphir



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

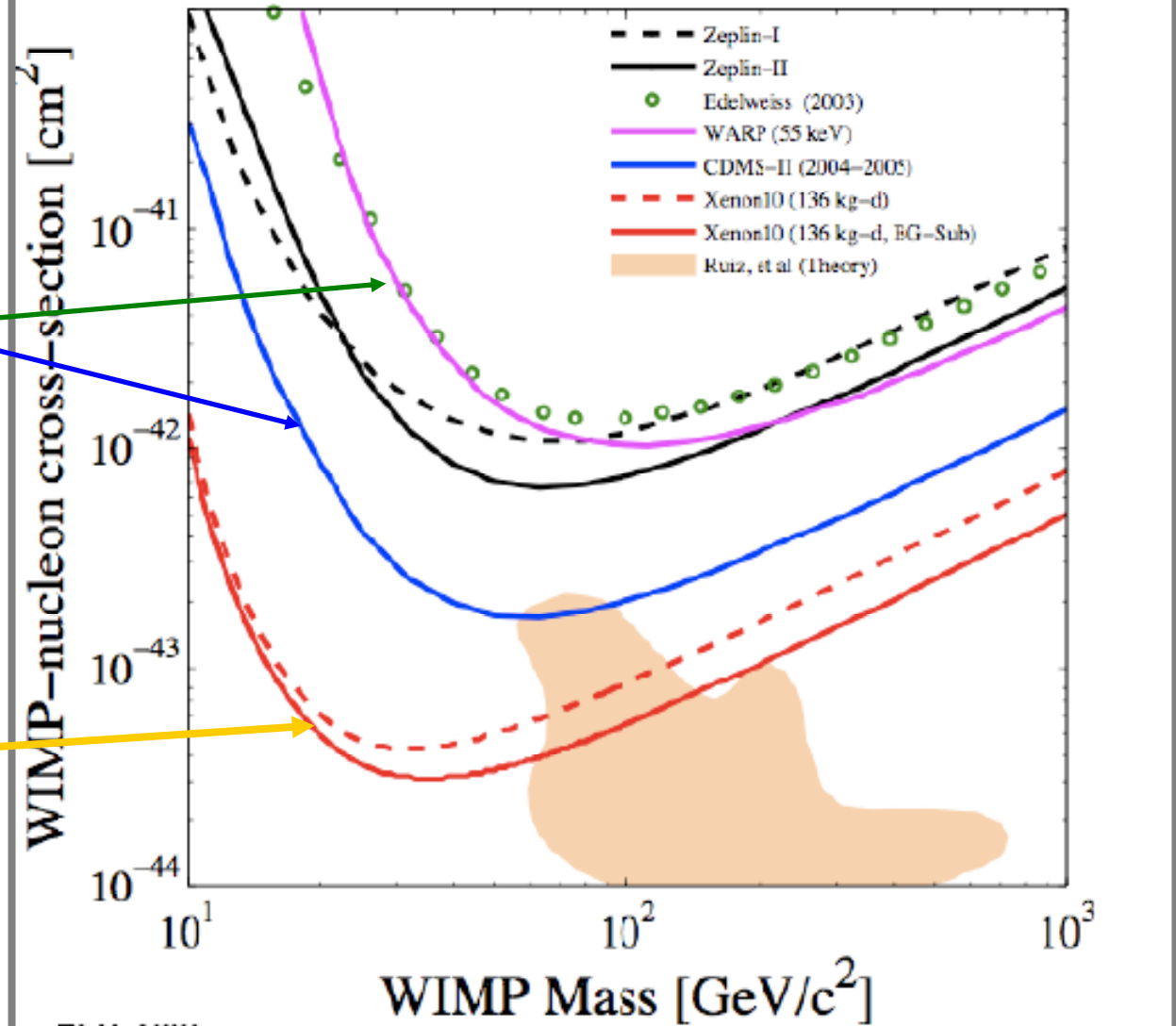
- **50g saphir**
- radioactivité ?
- seuil réjection à **90% CL: 10 keV**

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 !

Spin-Independent Exclusion Limits (90% C.L.)



Détecteurs
bolométriques
(EDELWEISS;
CDMS)

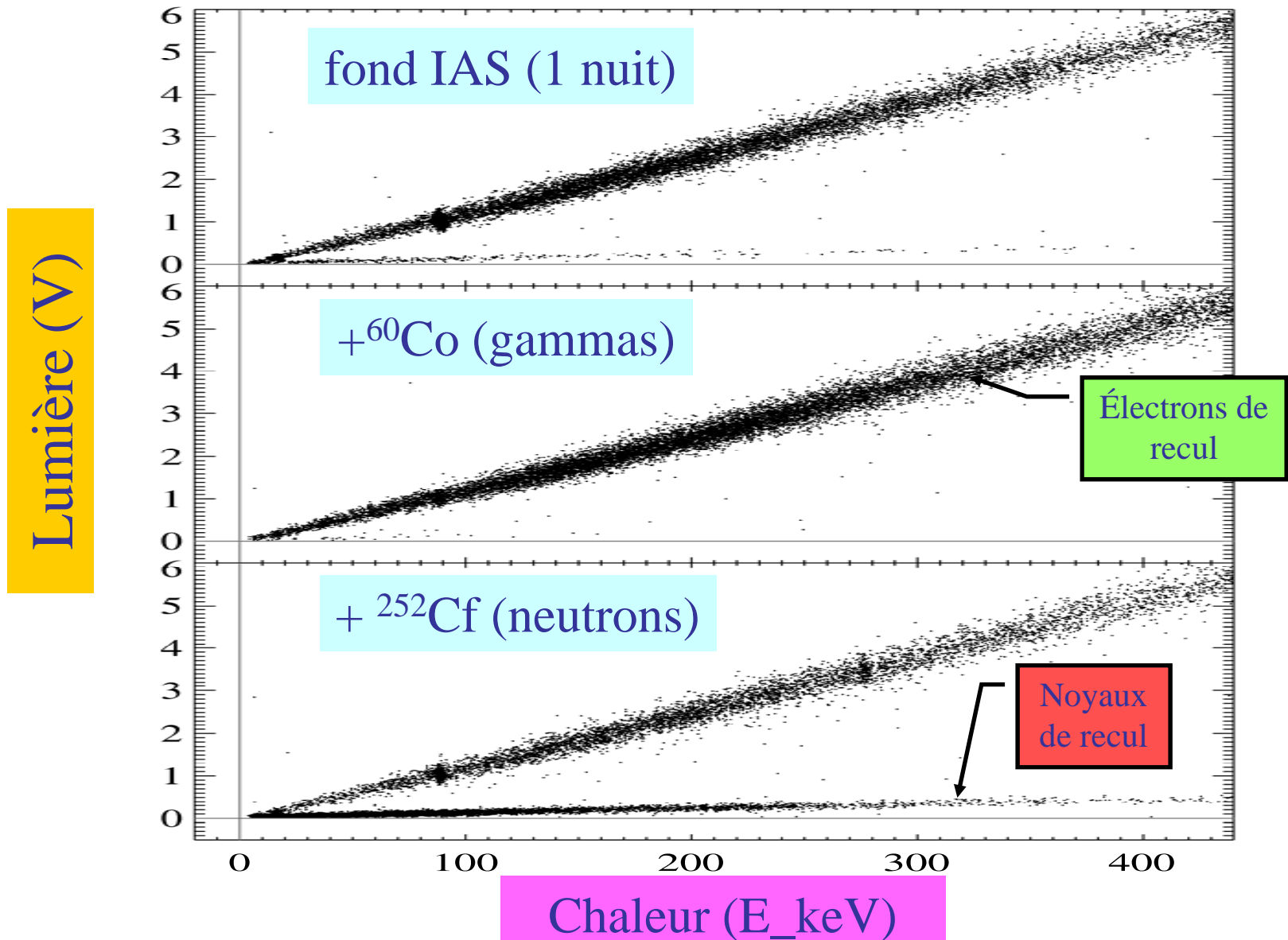
Détecteur à
Xénon liquide
(xenon10)
avril 2007

□ Désintégrations rarissimes
(par bolomètres scintillants !)

Désintégrations alpha de

- ^{209}Bi (IAS; 2002) $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{19}$ ans
- ^{180}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)!

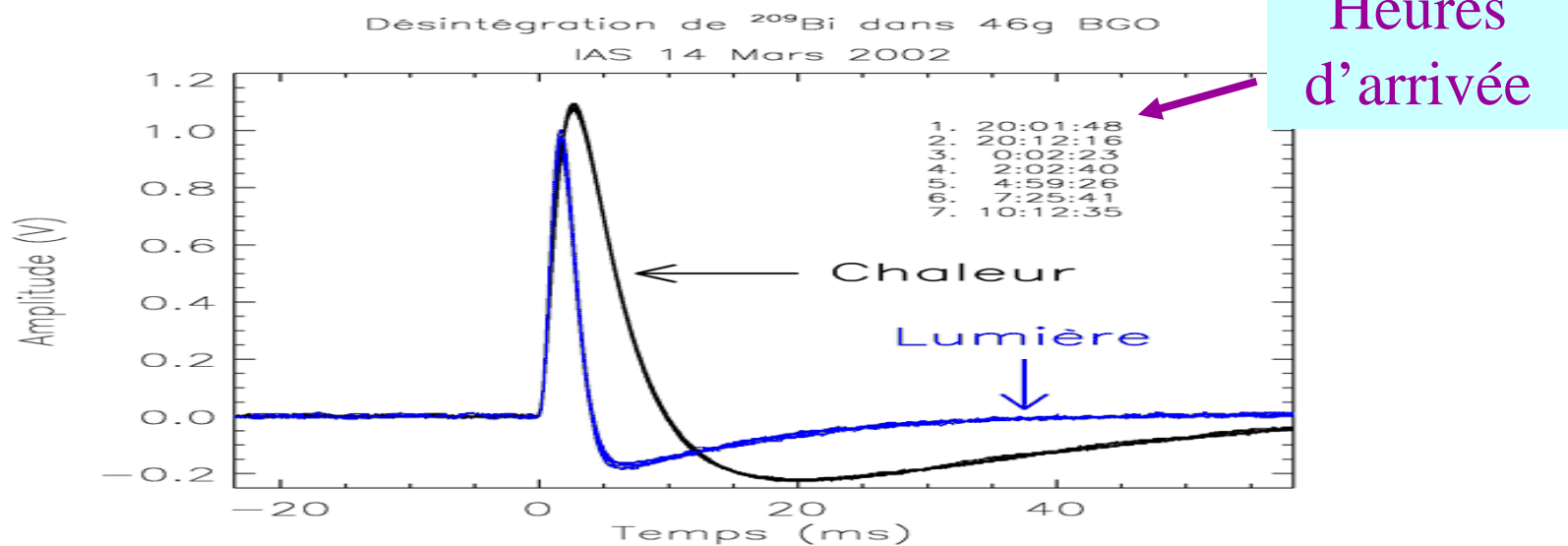
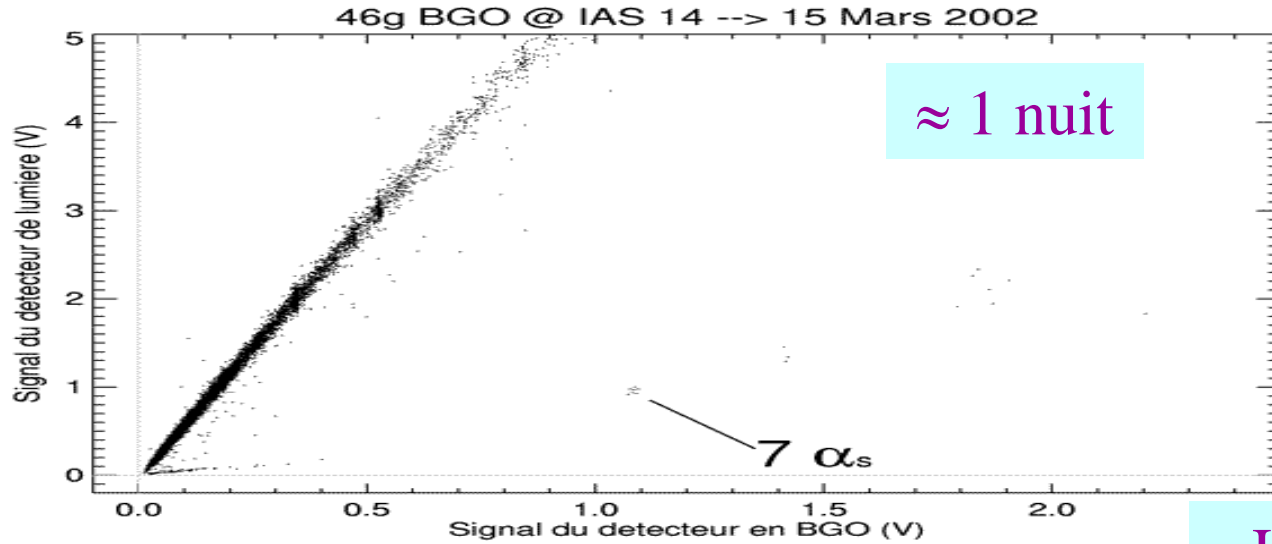
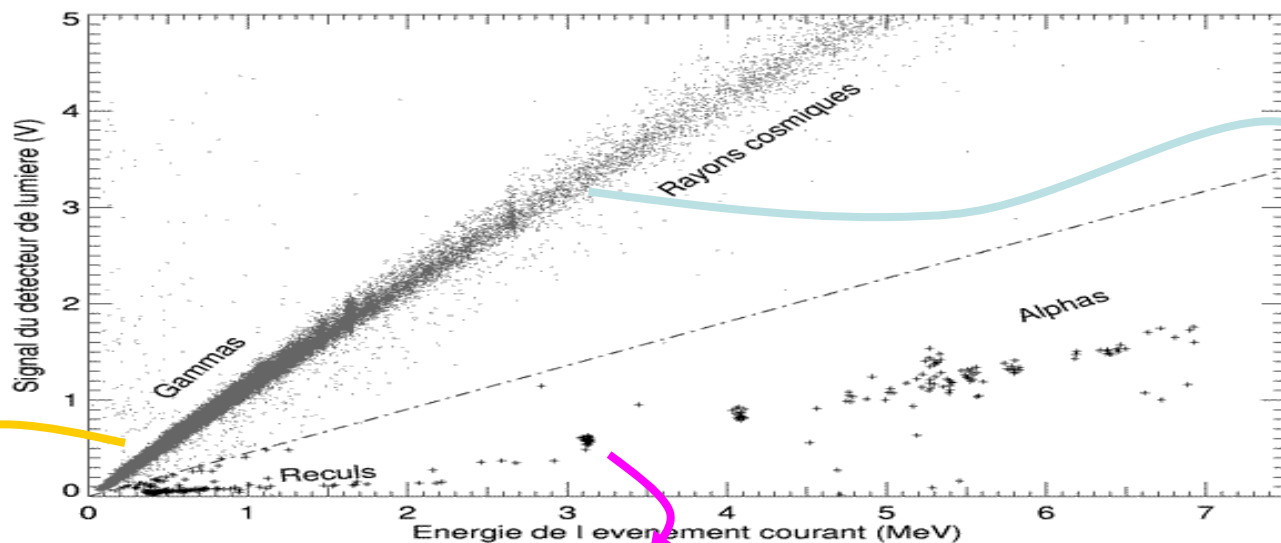


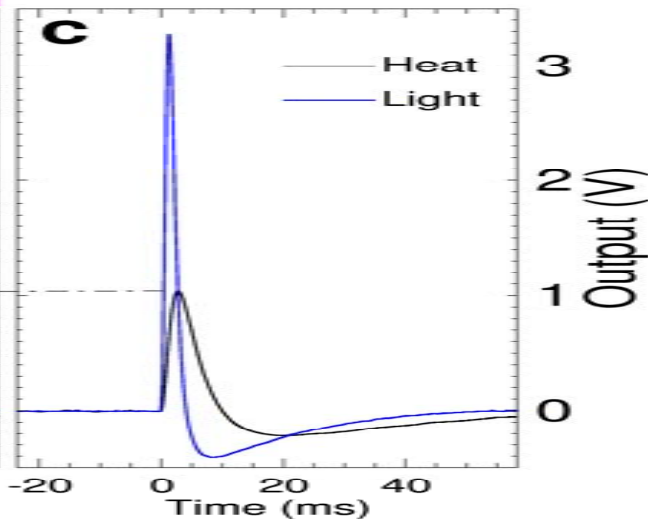
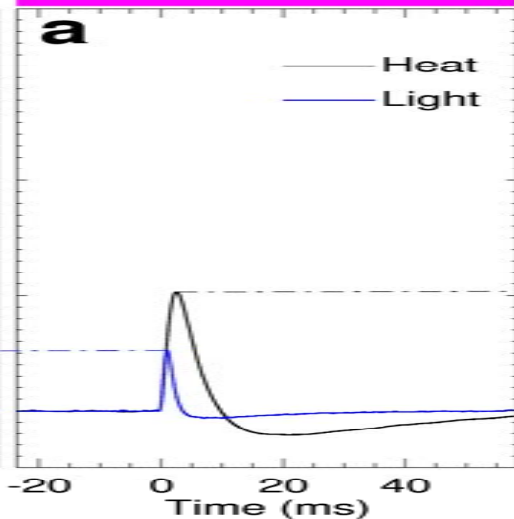
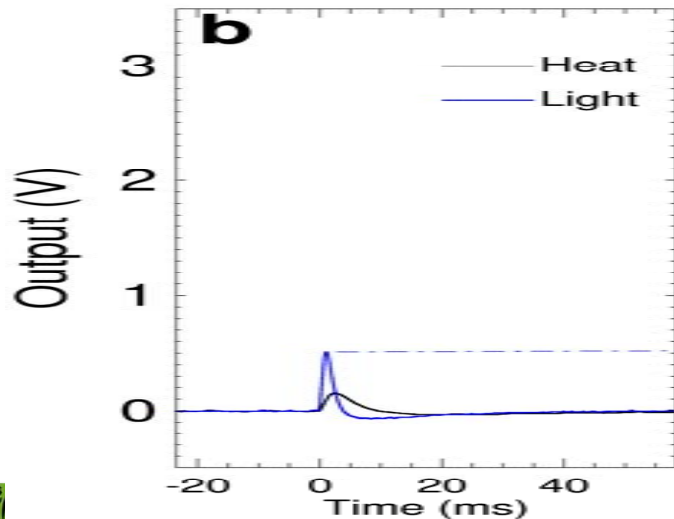
Diagramme de discrimination dans 46g BGO (5j)



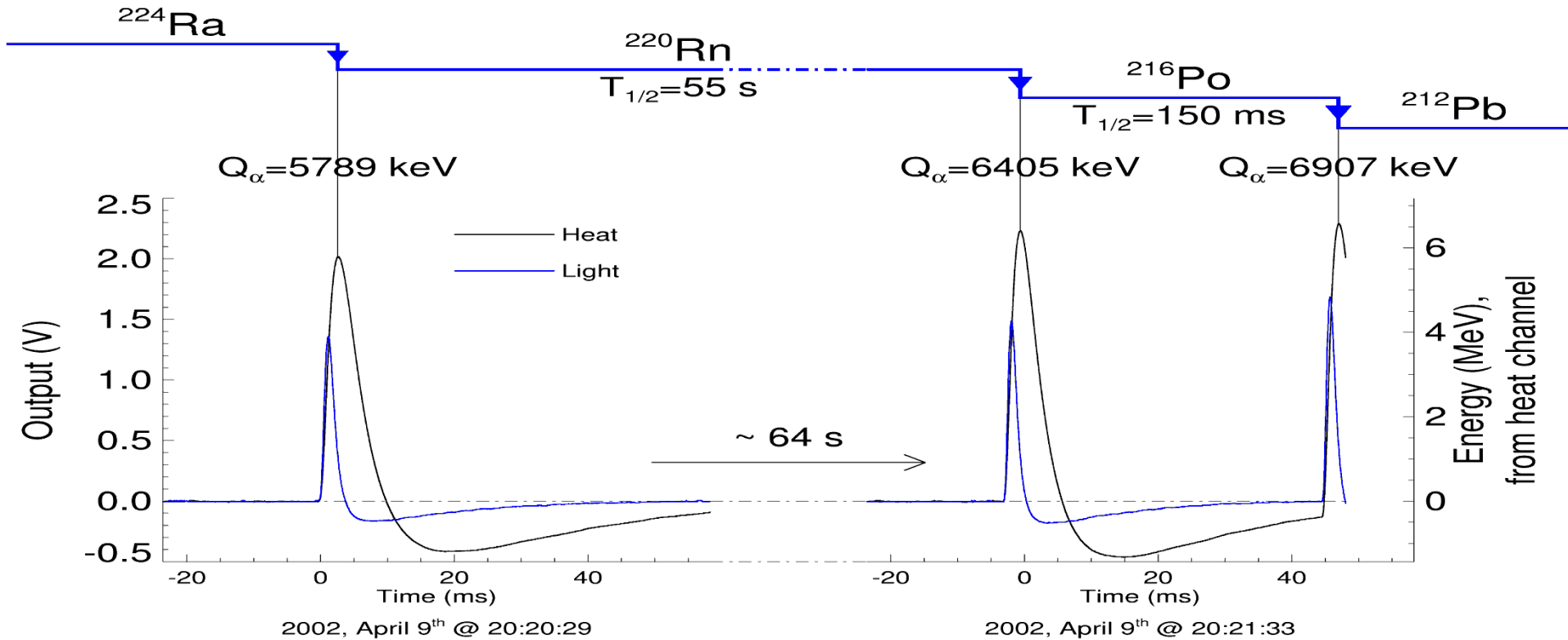
Gamma ray
E~500 keV

²⁰⁹Bi decay
E~3137 keV

Cosmic ray event
E~3.4 MeV

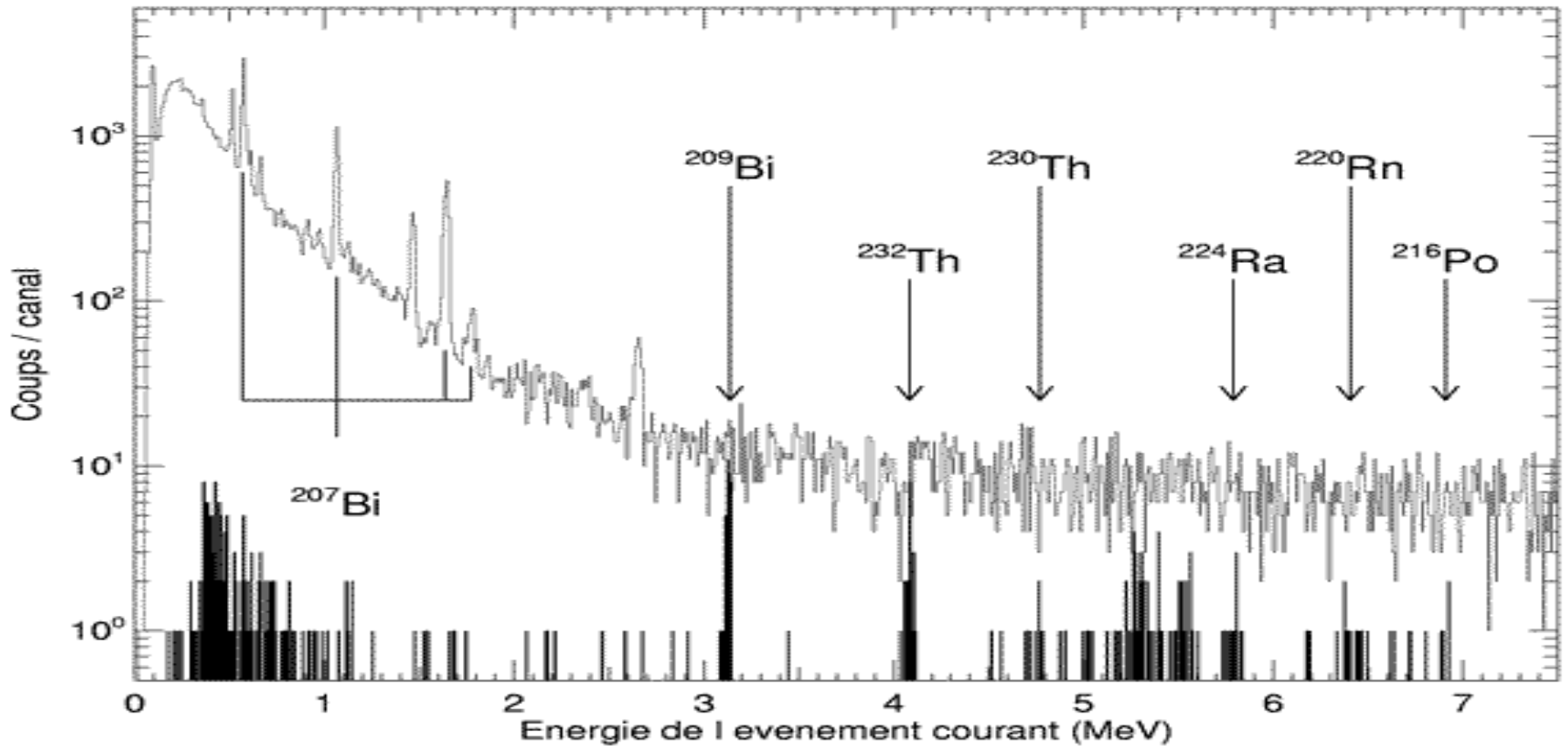


Identification par cascades α



Une triple signature unique !

Spectres dans 46g BGO



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

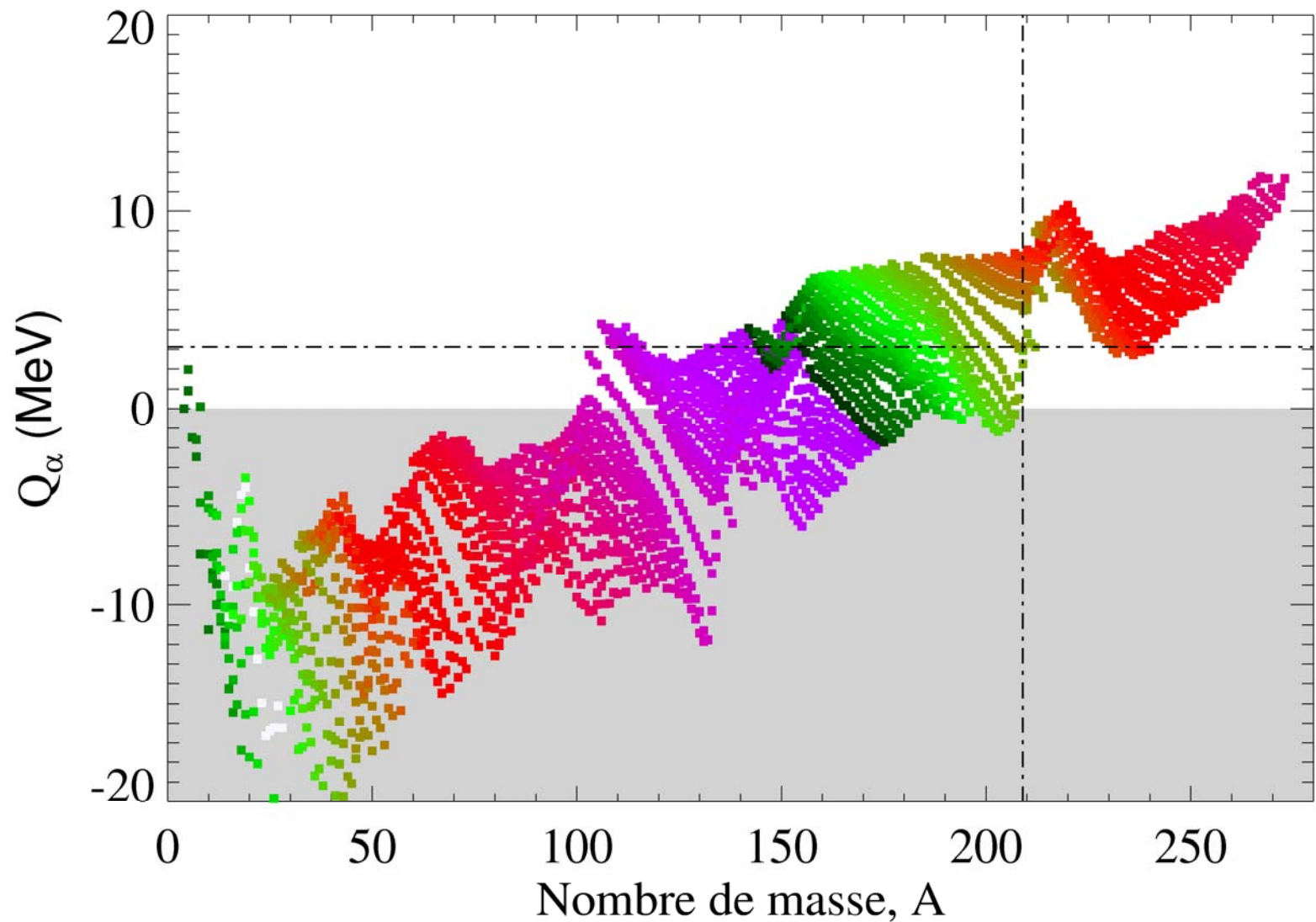
^{209}Bi



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

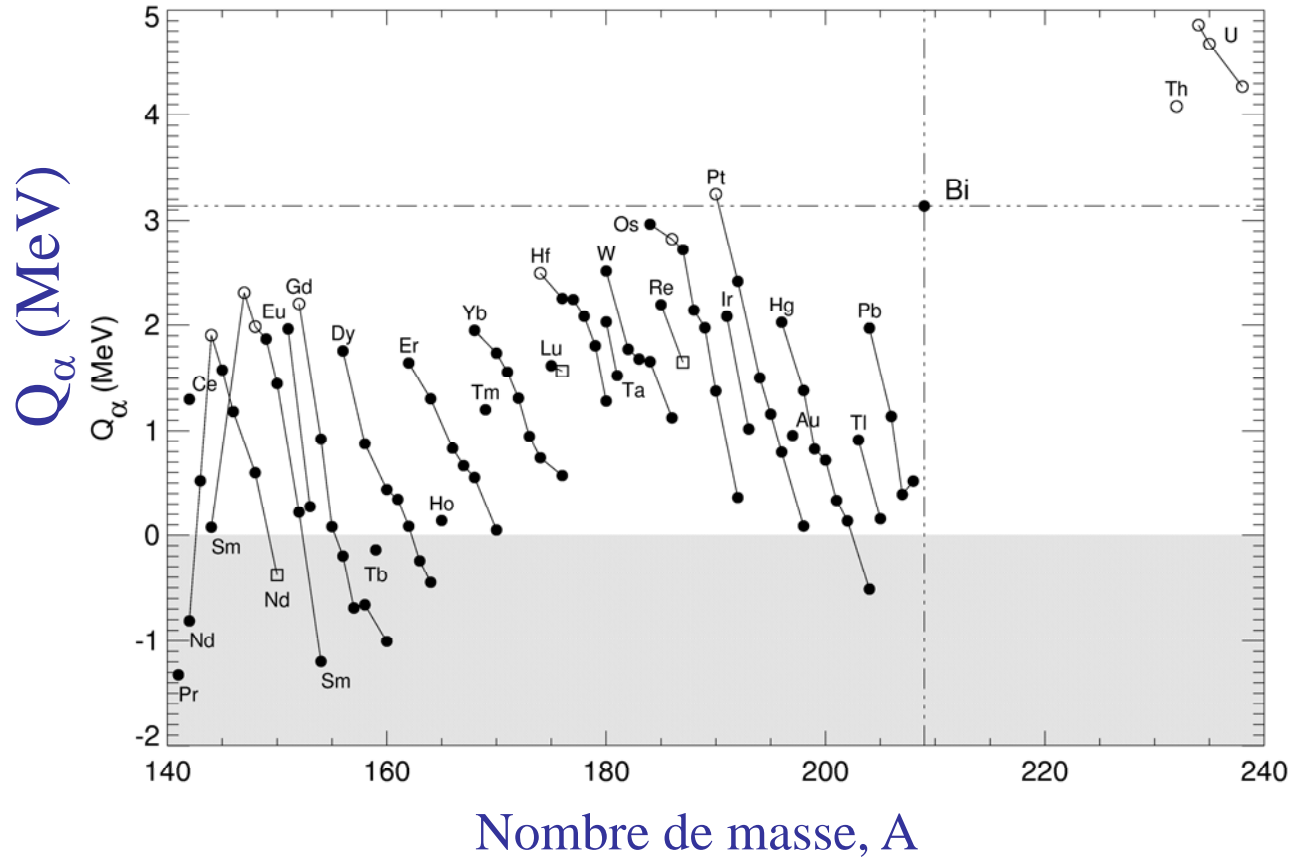
$$T_{1/2} = 1.44 - 1.95 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

Isotopes & excès de masse « α », Q_α



Isotopes lourds stables, Q_α

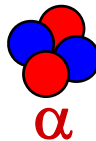
d'après Tables Audi et al. (1997)



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

3077 keV

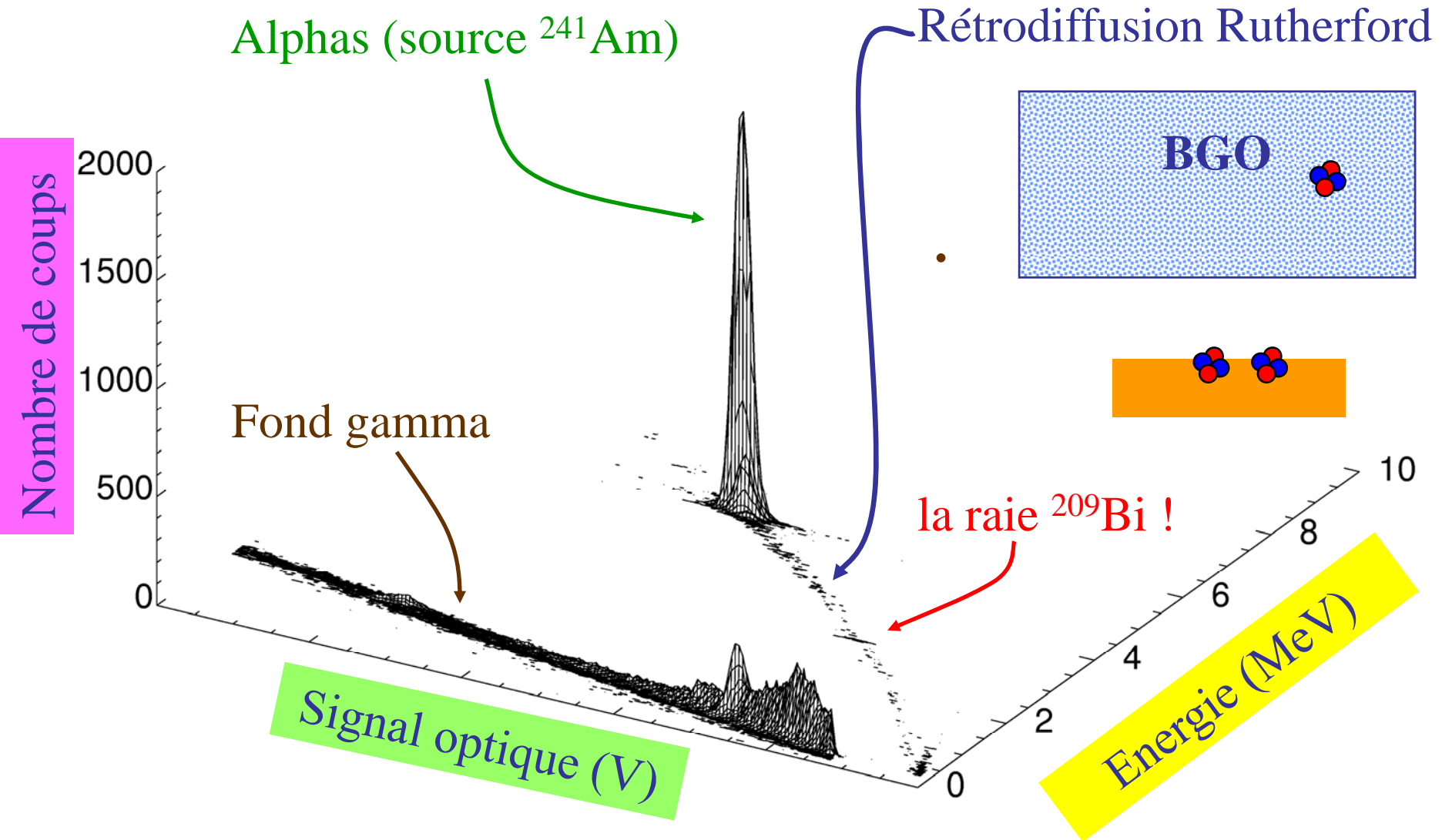
$R \approx 8 \mu\text{m}$



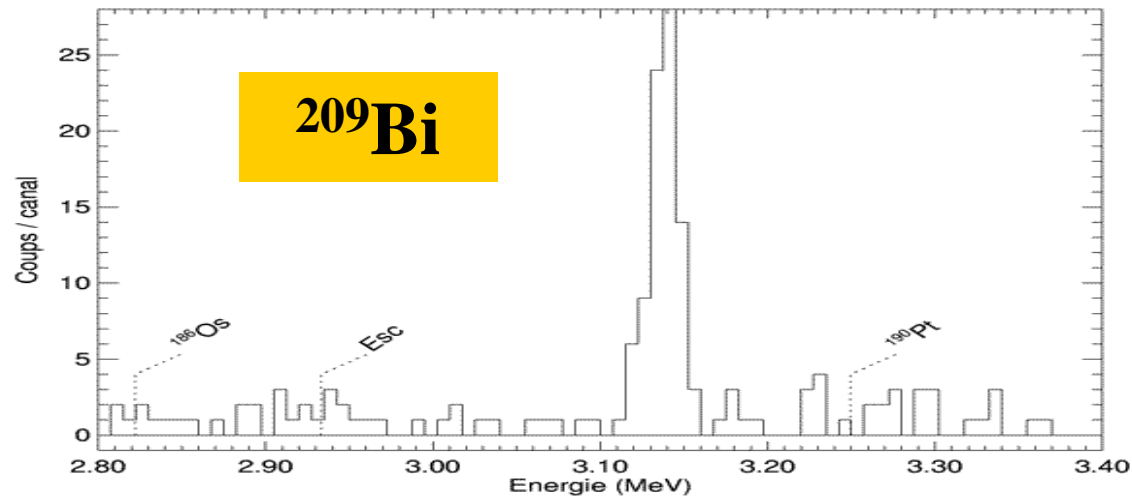
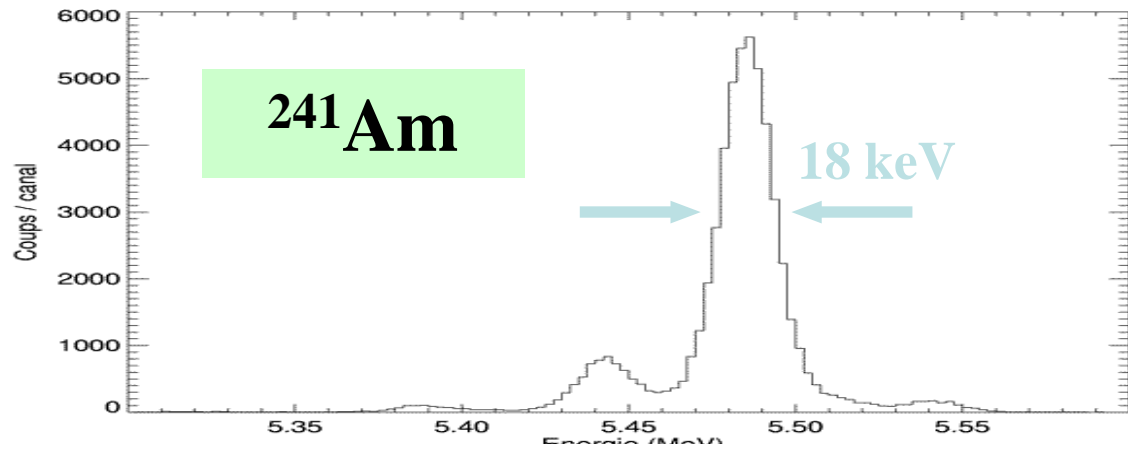
60 keV

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

Discrimination dans 91g BGO



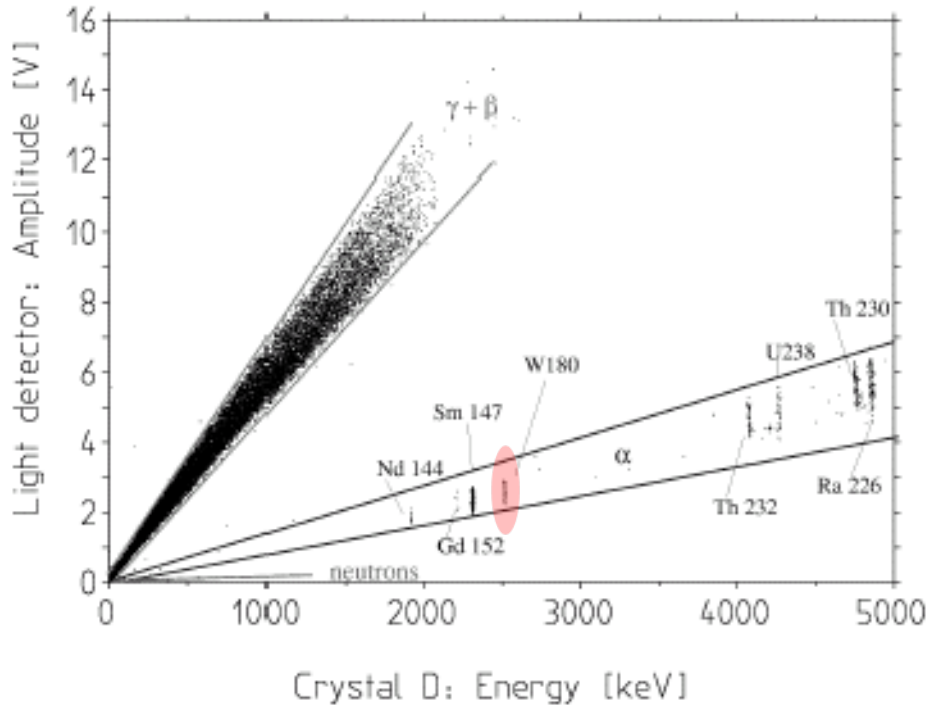
Spectres alphas finaux



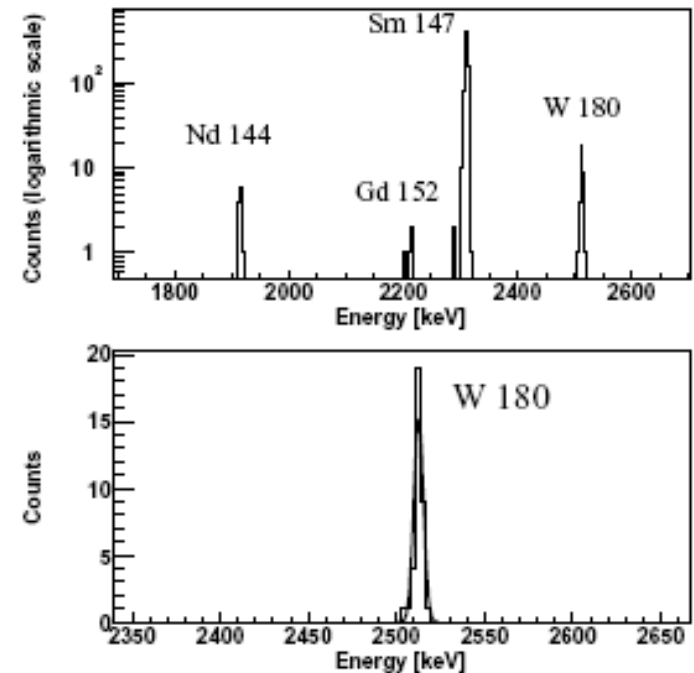
$Q_\alpha = 3137 \pm 1 \text{ (stat.)} \pm 2 \text{ (syst.) keV}$
 $T_{1/2} = 1.9 \pm 0.2 \cdot 10^{19} \text{ ans}$

Au tour de ^{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. »

Comptes-rendus des conférences

[tous les deux ans]

❑ LTD (Low Temperature Detectors)

- aspects techniques
- publiés généralement dans NIMA
- LTD-11 à Tokyo en 2005
- **LTD-12 à Paris en 2007**

❑ 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-2005 à Saragosse
- **TAUP-2007 à Sendai (Japon)**