

Roscoff; 13-21 juin 2007



Détecteurs bolométriques refroidis: 2. Applications

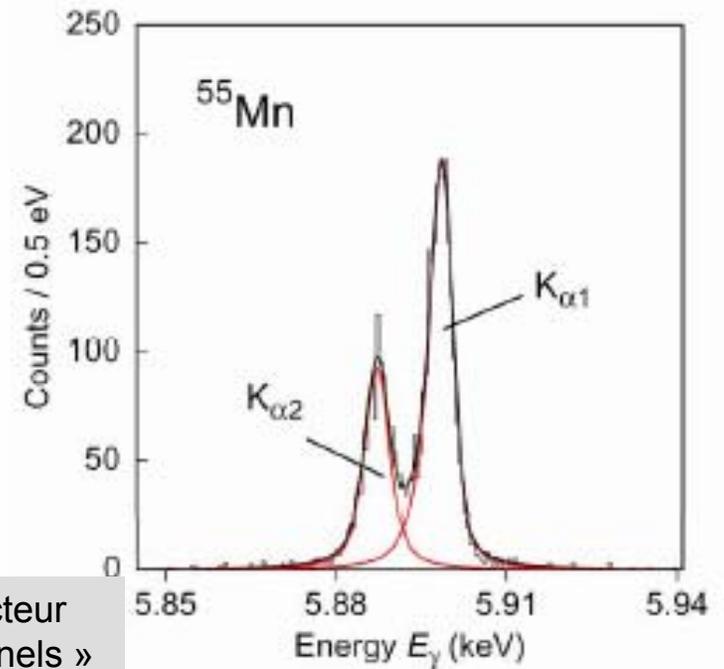
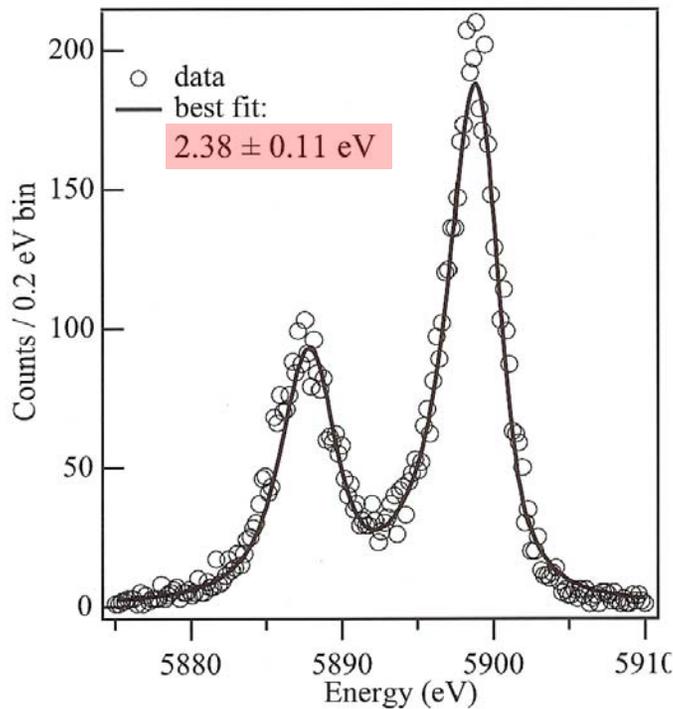
Applications des bolomètres:

- En spectroscopie
 - X
 - γ
 - α
 - 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



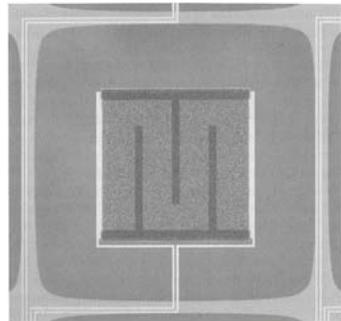
Spectroscopie X très haute résolution...monopixels



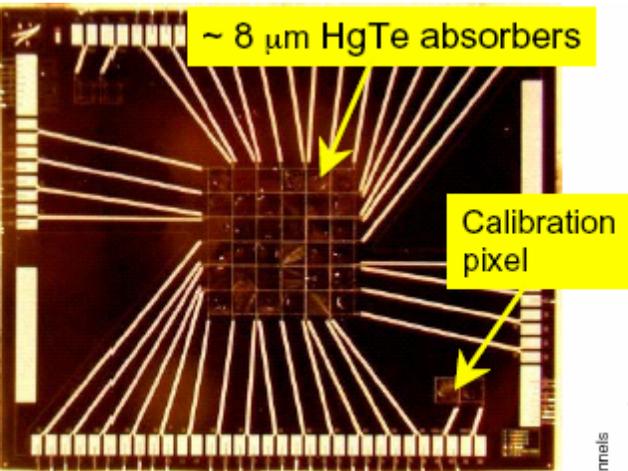
Rappel: les détecteur Si(Li) « conventionnels » plafonnent à 110eV !

- 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

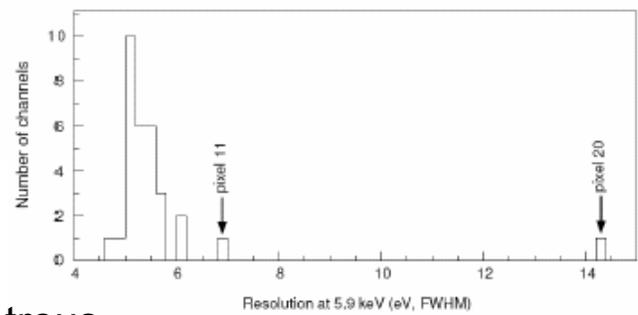
- bolomètre métallique à lecture magnétique (Au:Er); T=35mK
- Cible Au $160 \times 160 \times 5 \mu\text{m}^3$
- $3.4 \text{ eV @ } 6 \text{ keV}$
- $\tau \approx \text{ms}$; efficacité >98 %
- KIP Heidelberg



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



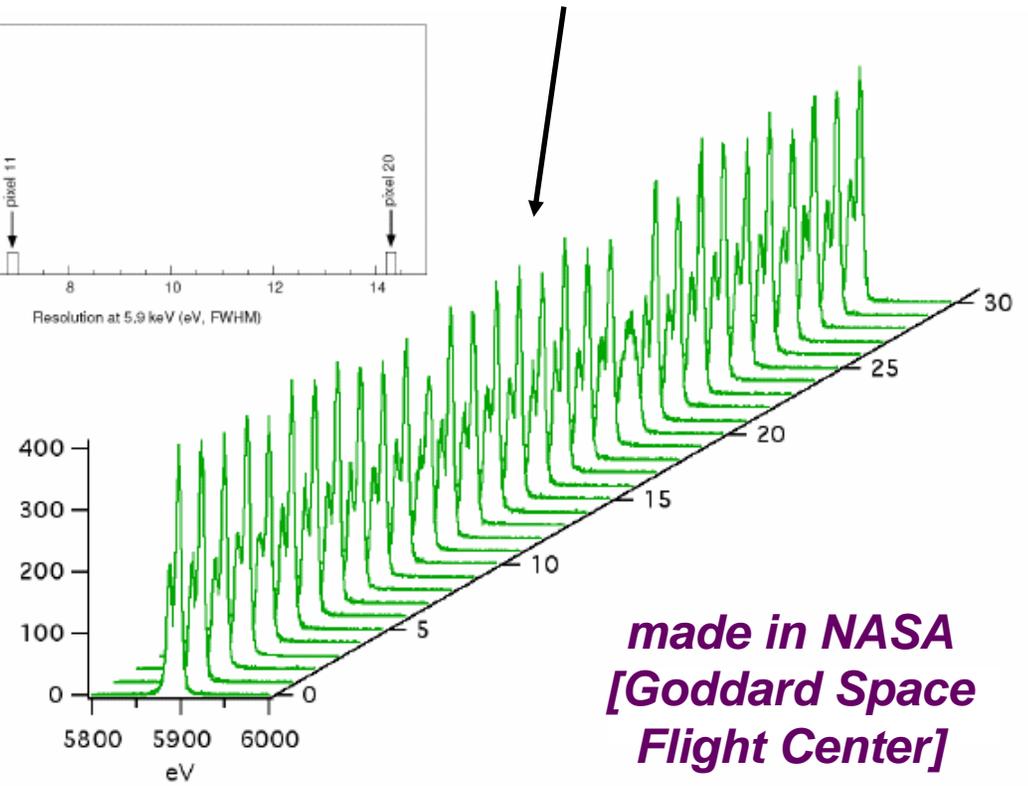
- matrice 6x6 à bord de Suzaku (ex Astro-E2)
- télescope: miroir en incidence rasante
- thermométrie Si implanté; T=60mK
- résolution moyenne: $\Delta E=5.5$ eV FWHM @ 5.9 keV



Pixels are 625 μm square, or 30"

- 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 !

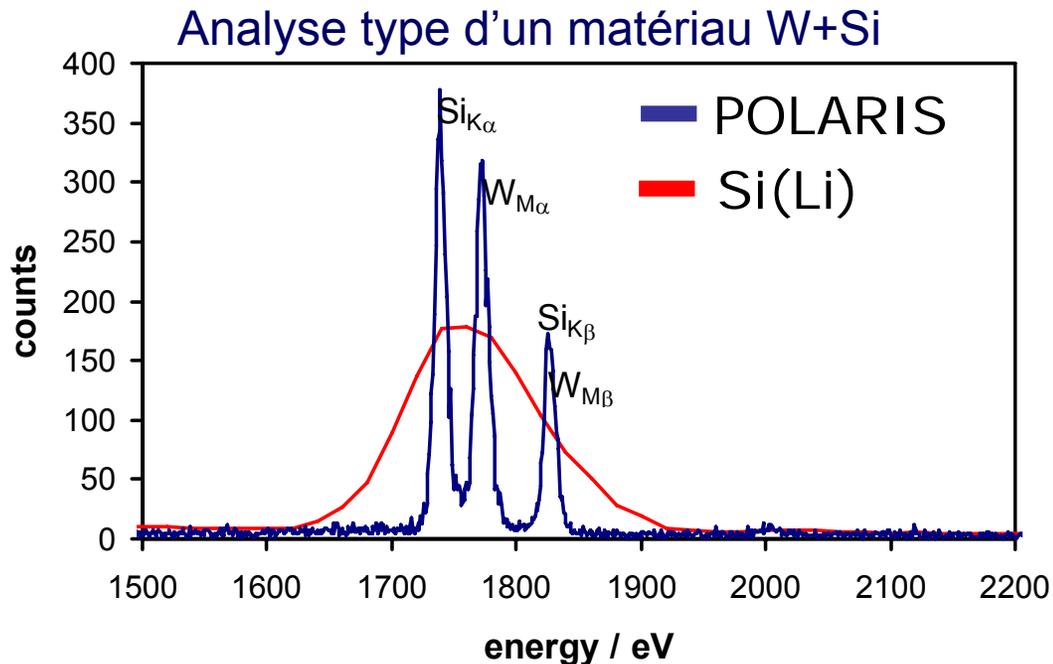


*made in NASA
[Goddard Space
Flight Center]*



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



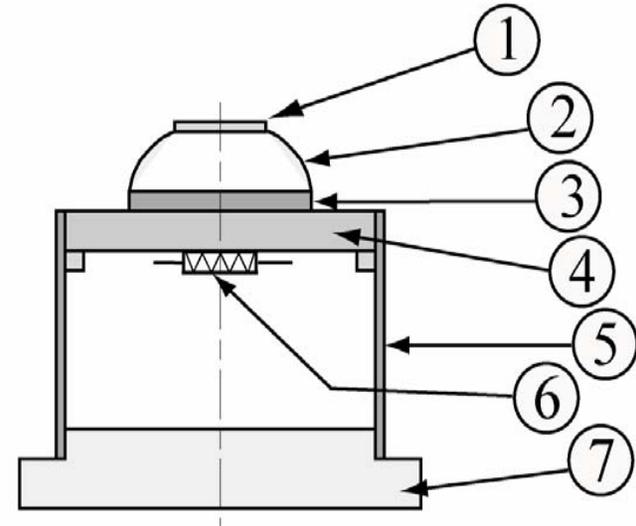
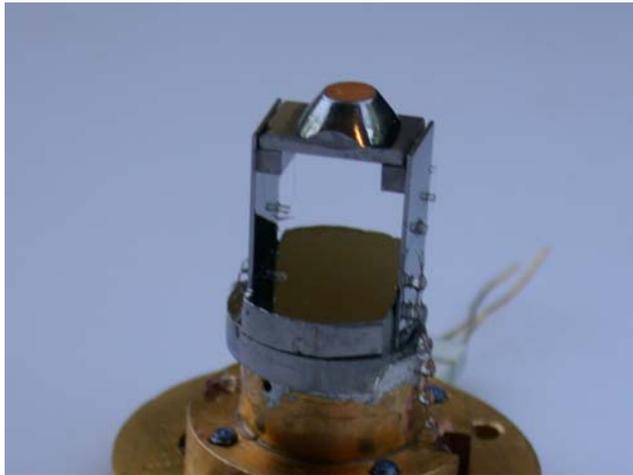
Coût ≈ 500 k€

□ spectroscopie α

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



Bol#300 : cible Cu



✓ Dynamique élevée

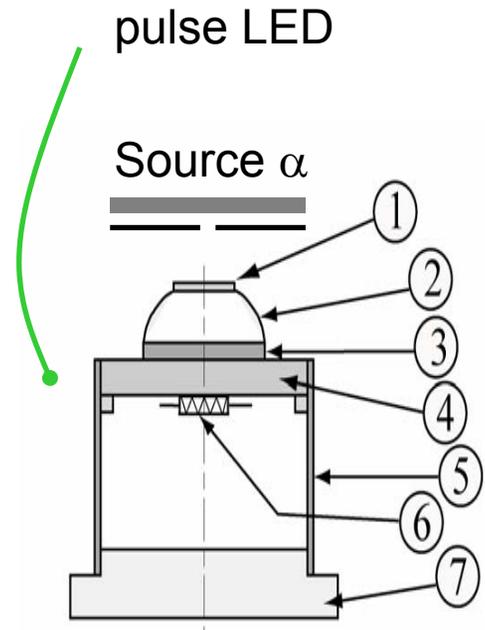
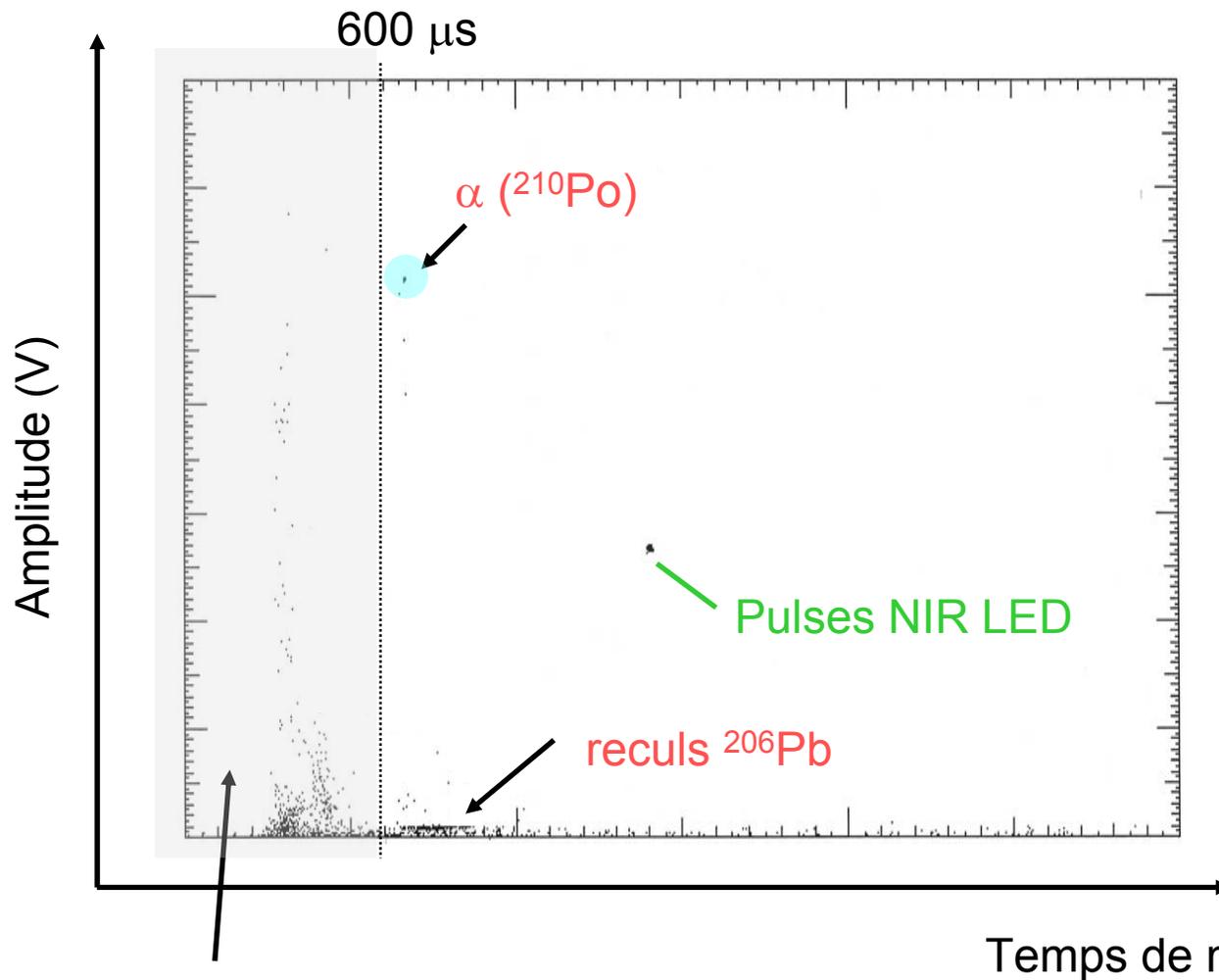
500 eV-10MeV

✓ $T_{\text{bolo}} \approx 50\text{mK}$; $R_{\text{bolo}} \approx 50\text{k}\Omega$

✓ 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

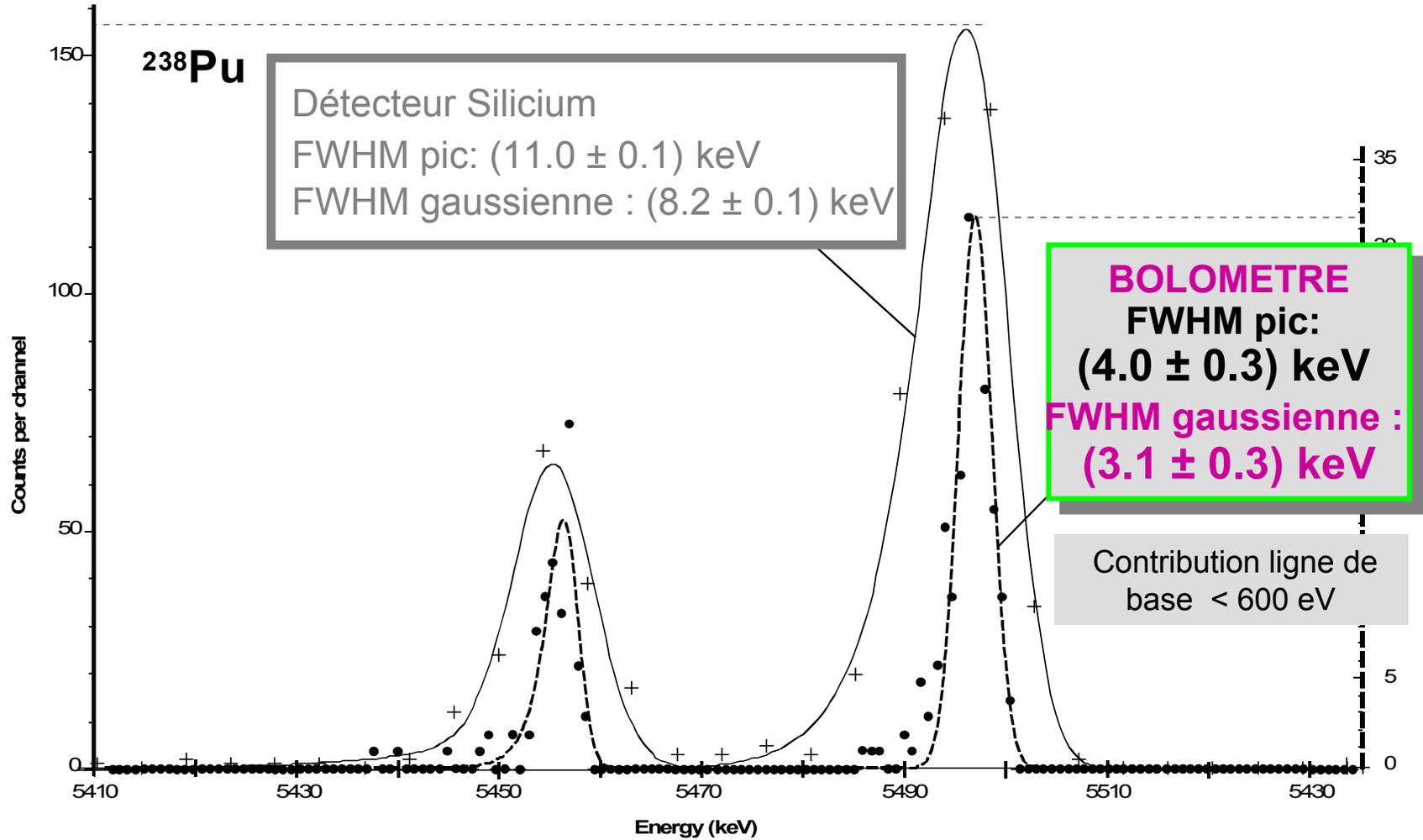
spectroscopie α 2. temps de montée du bolomètre Cu

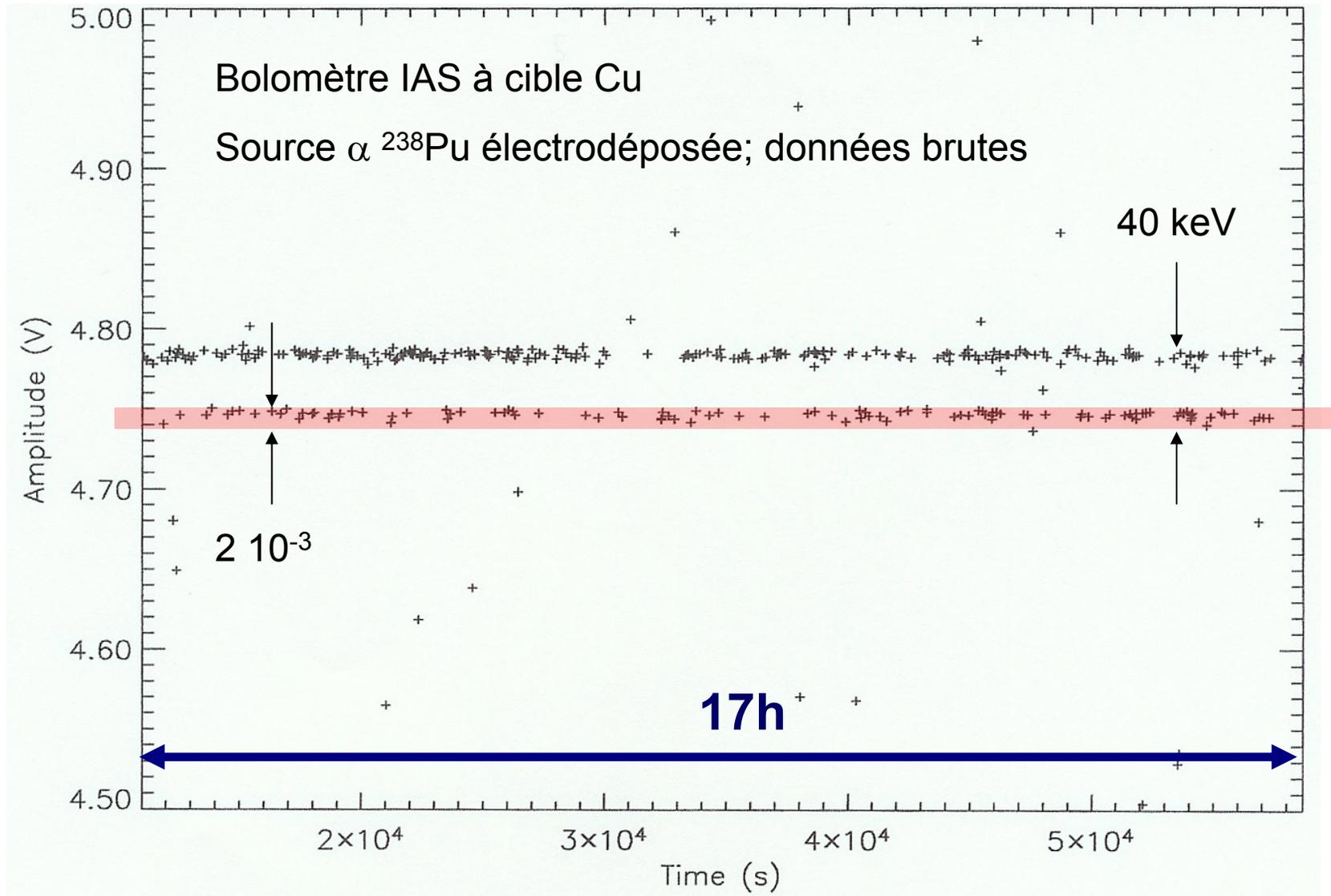


^{210}Po source, données brutes (novembre 2005)

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*)

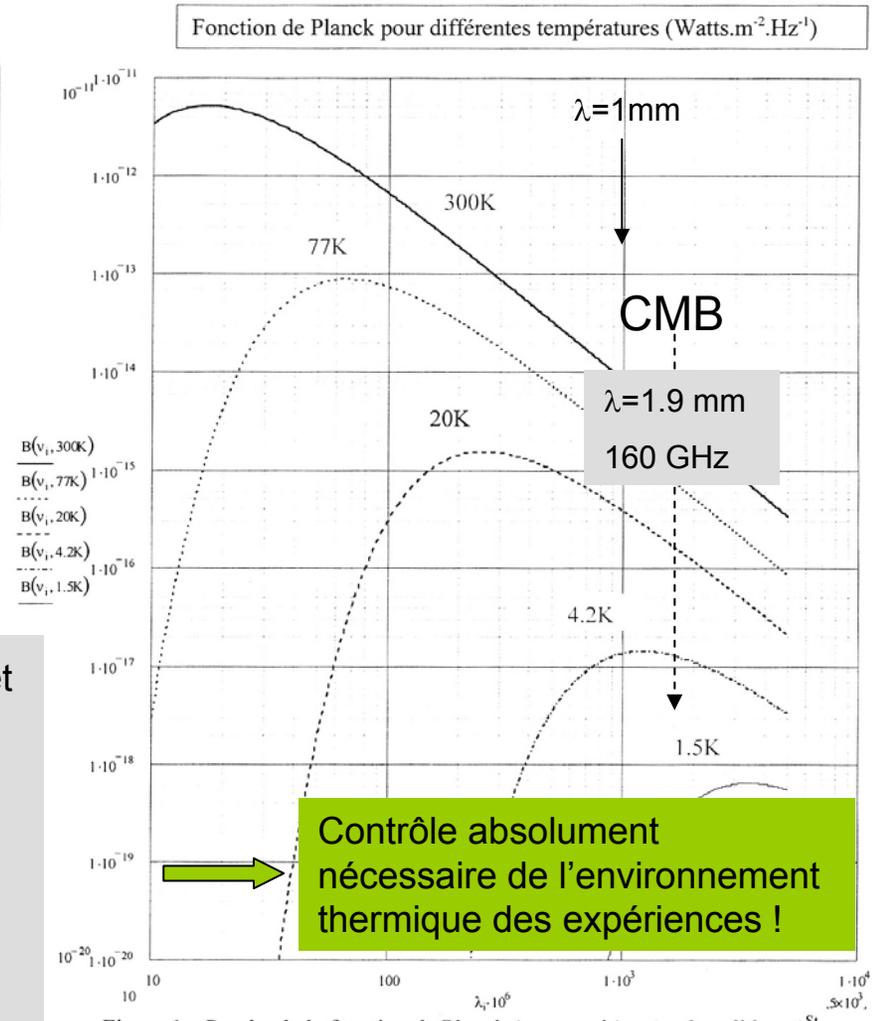
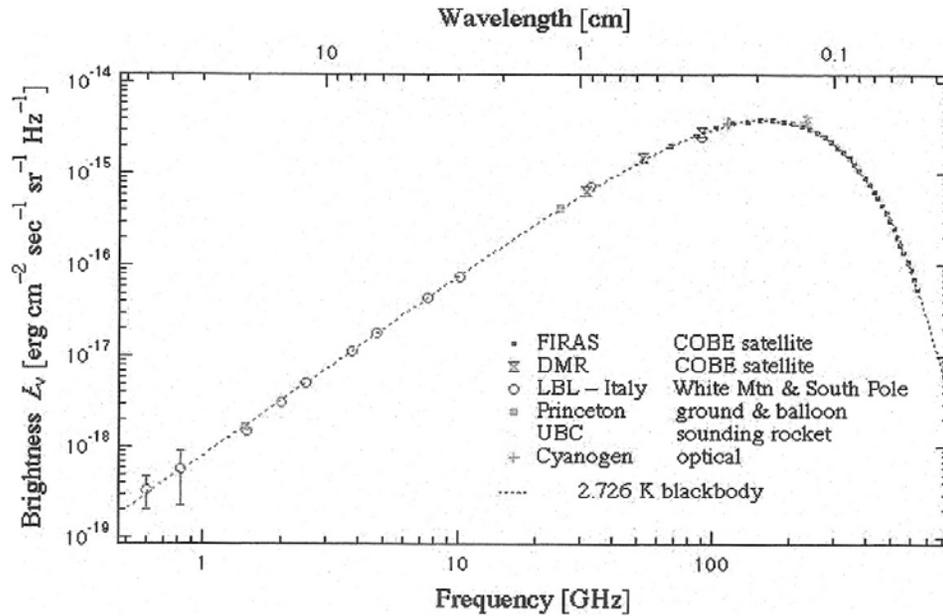




□ Rayonnement fossile cosmologique (CMB)



CMB: le corps noir était presque parfait



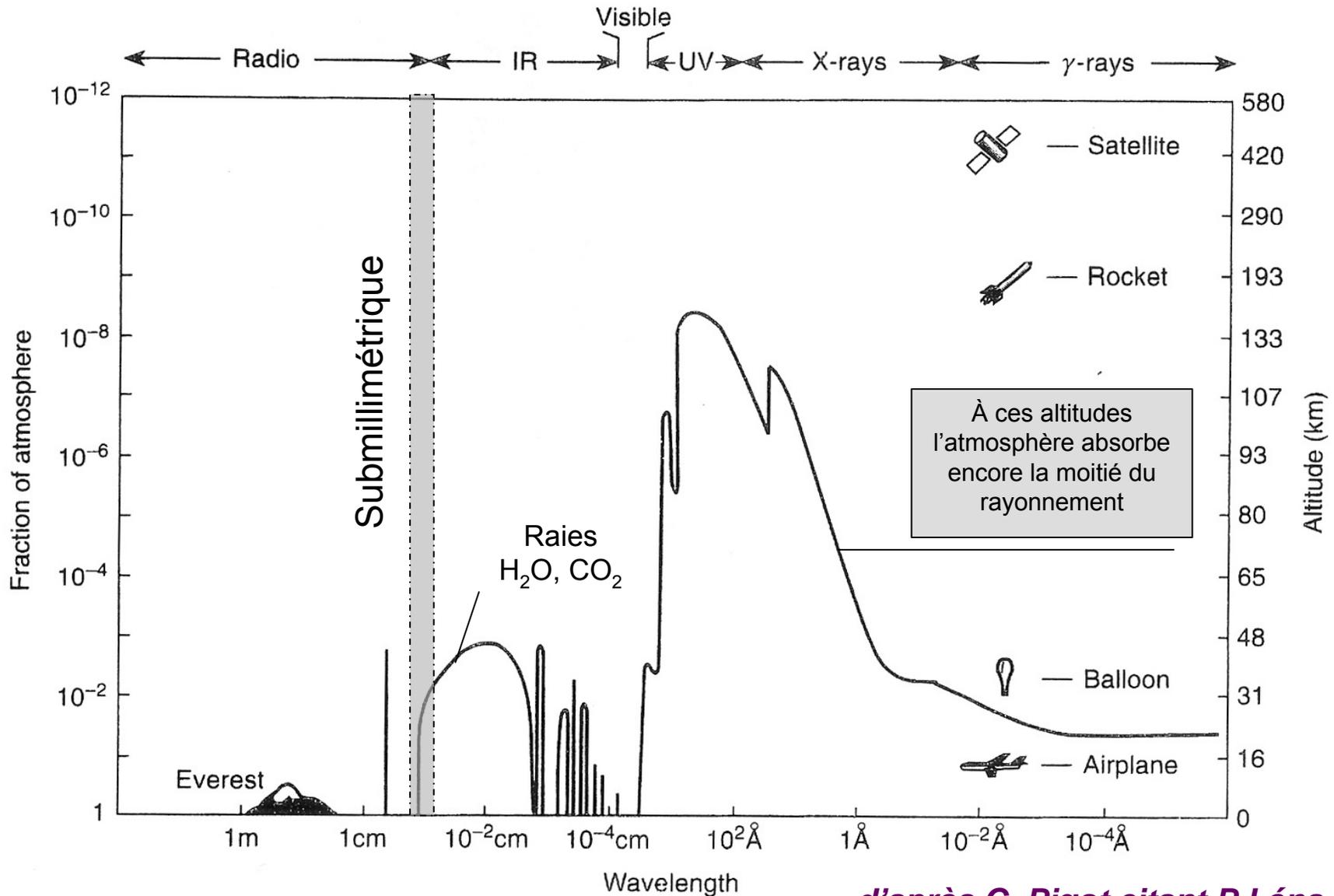
- Corps noir à 2.726K; un des piliers du Big-Bang & objet d'étude essentiel pour la cosmologie
- Extrêmement homogène !
- produit à un redshift $Z=1000$ quand l'Univers était âgé de $\approx 380\,000$ ans (découplage matière-rayonnement)
- Anisotropies détectées $\Delta T/T \approx 10^{-5}$: leur croissance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



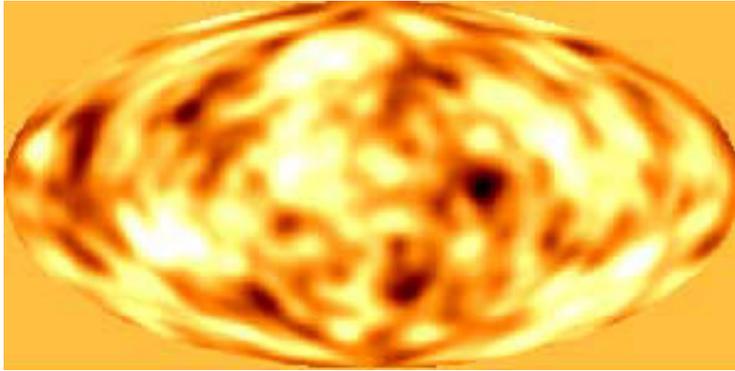
CMB: l'appel de l'espace



d'après C. Pigot citant P.Léna

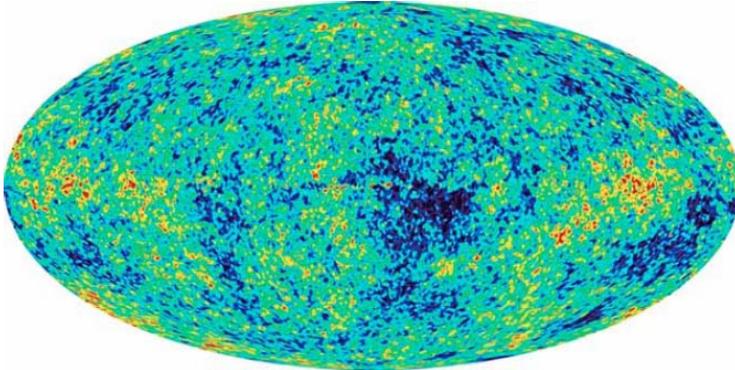


Cartes des anisotropies du CMB



COBE (1989)

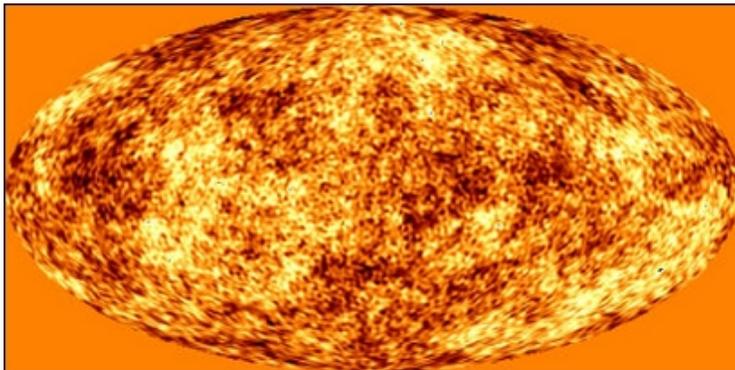
7°



WMAP (2001)

12'

Avènement de la cosmologie de précision...



Planck (2008 ?)

5'

Planck-LFI

Planck-HFI

Détecteurs

radiomètres

bolomètres

simulation !

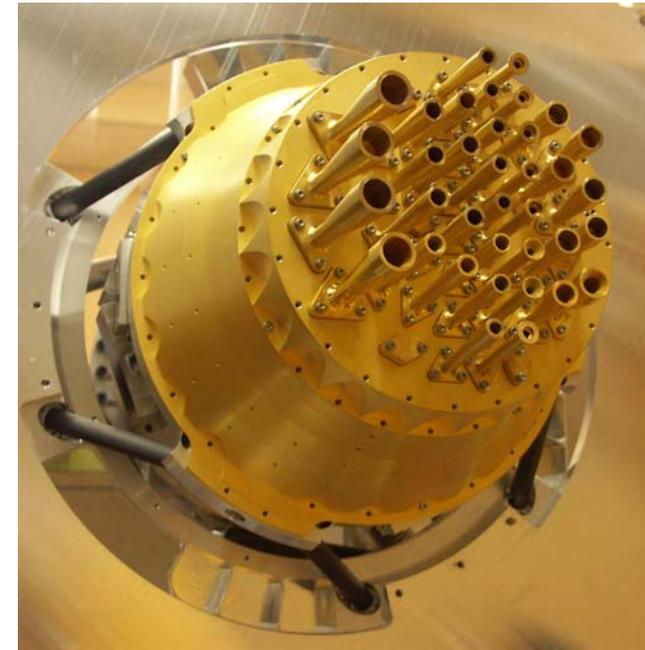


✓ Performances des détecteurs de Planck-HFI

- 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

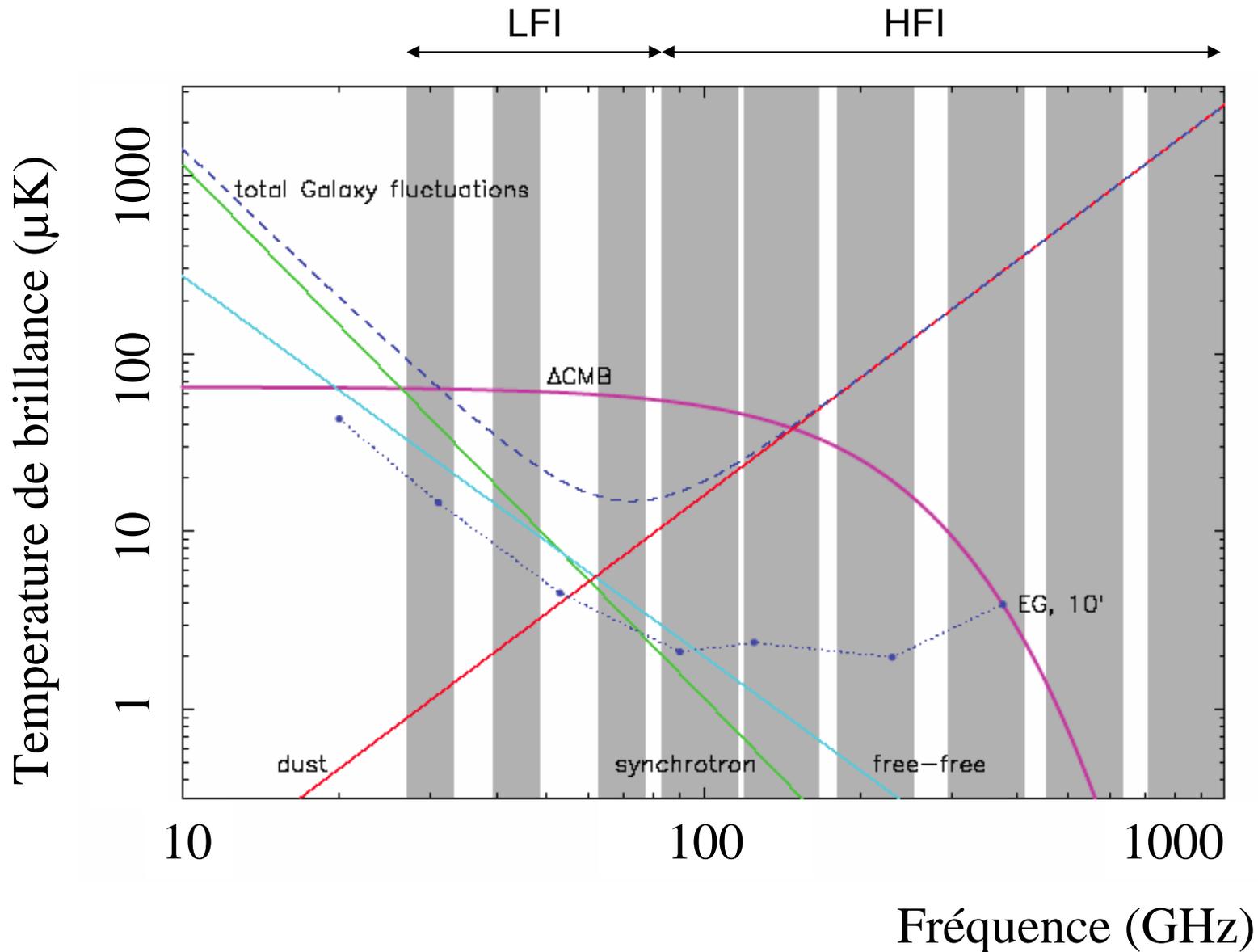
INSTRUMENT CHARACTERISTIC	LFI			HFI					
	HEMT arrays			Bolometer arrays					
Detector Technology	HEMT arrays			Bolometer arrays					
Center Frequency [GHz]	30	44	70	100	143	217	353	545	857
Bandwidth ($\Delta\nu/\nu$)	0.2	0.2	0.2	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Angular Resolution (arcmin)	33	24	14	10	7.1	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

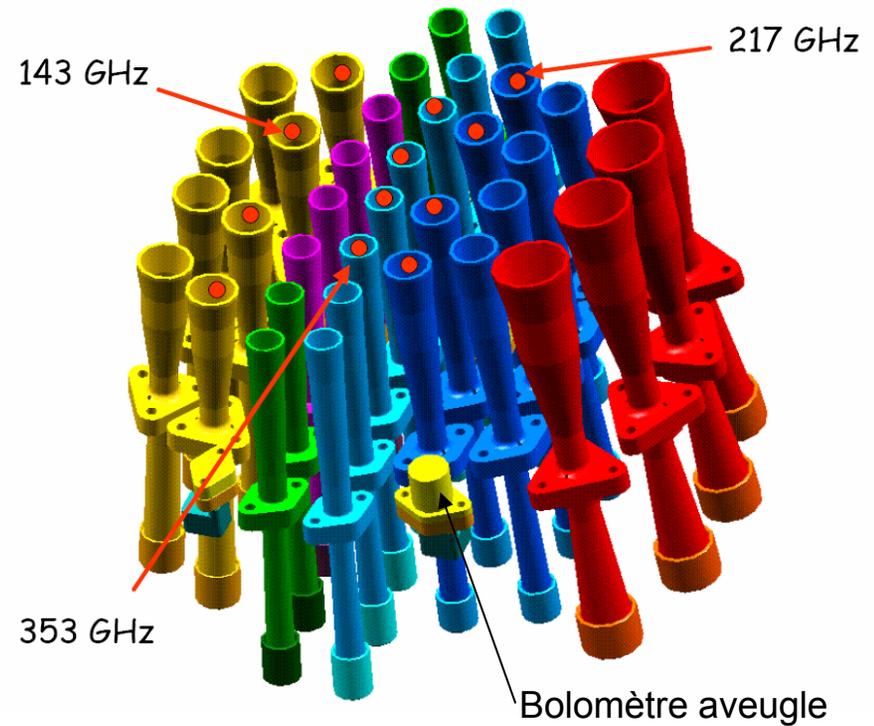
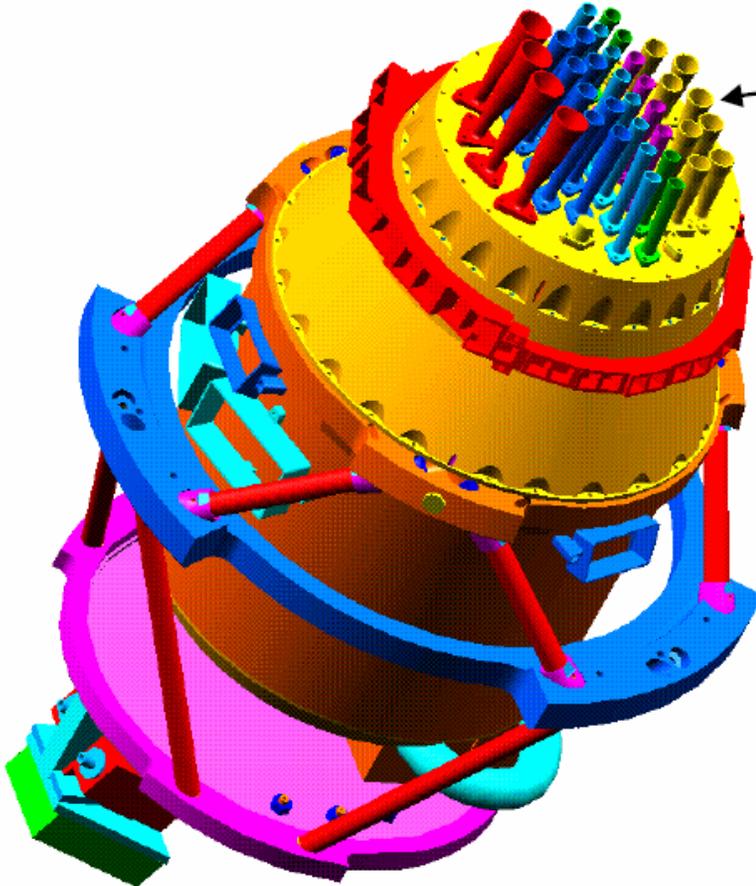


L'instrument Planck-HFI

36 cônes concentrateurs

48 détecteurs; 6 bandes

Plan Focal



Canaux sensibles à la polarisation
(12 « PSB »)

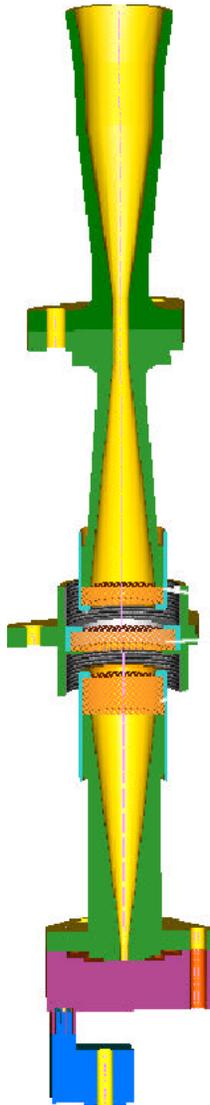
d'après Jacques Delabrouille (Moriond 2002)



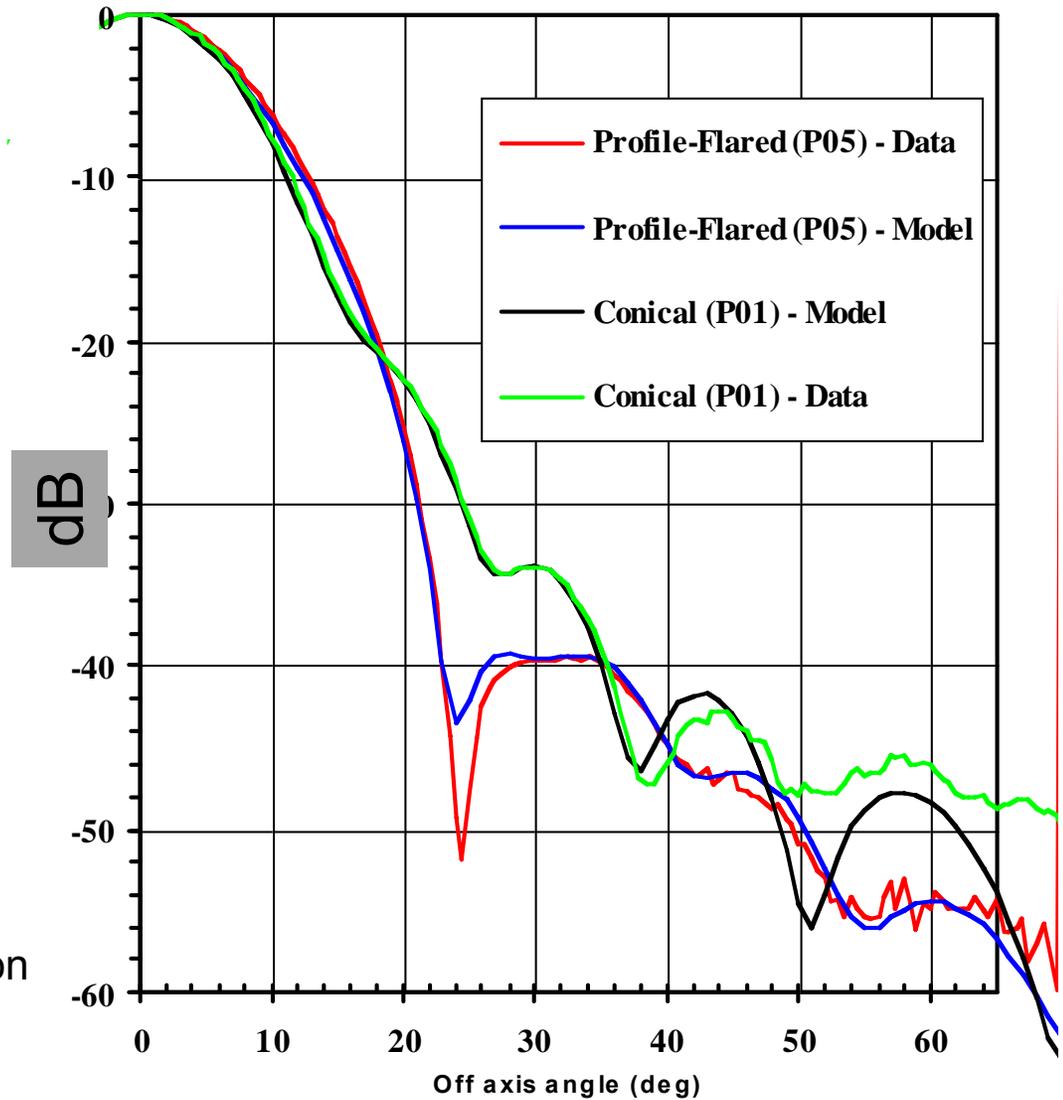
Couplage optique et définition angulaire

« Flared horn »
(cône évasé)

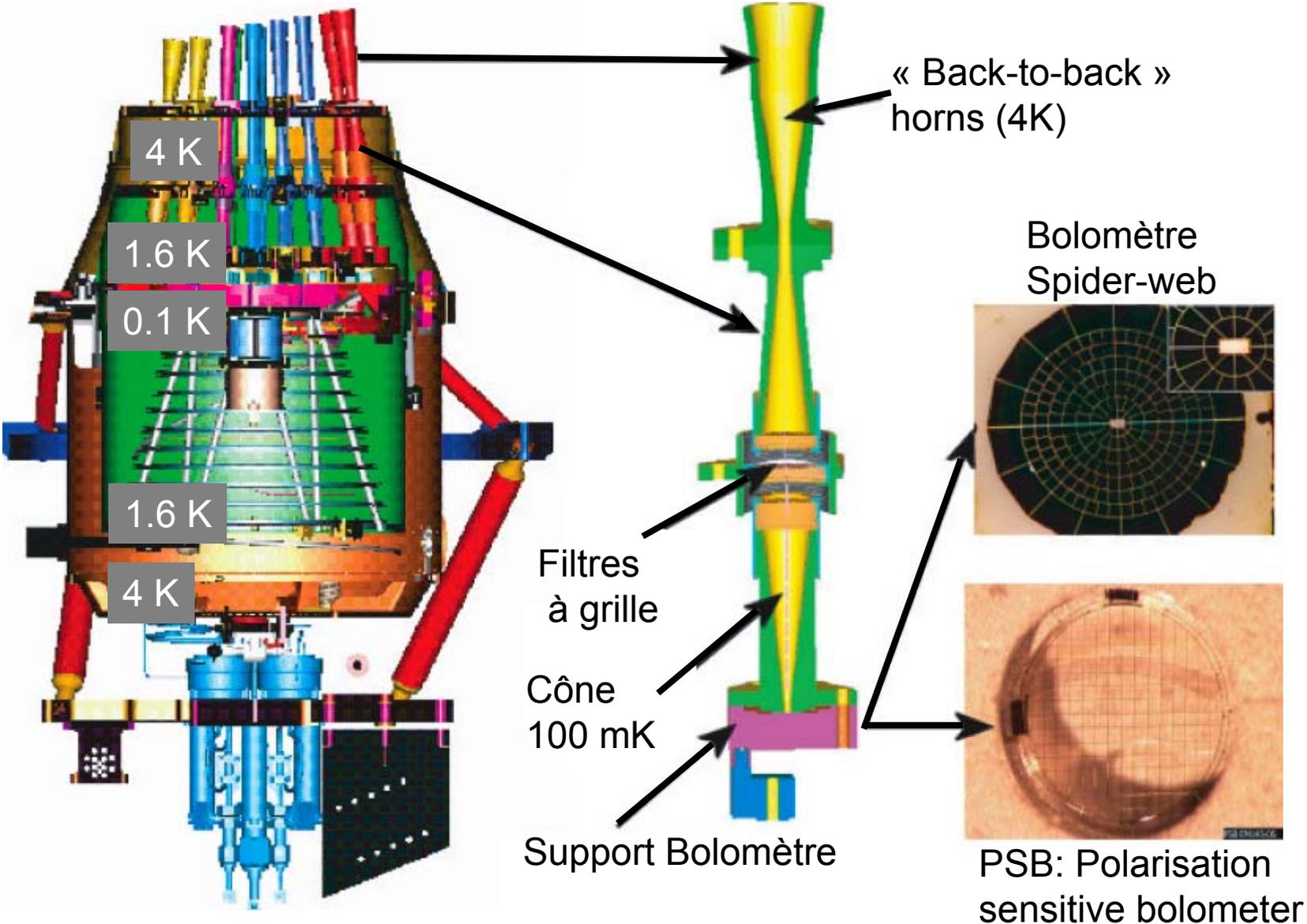
Made in
Cardiff
(UK)



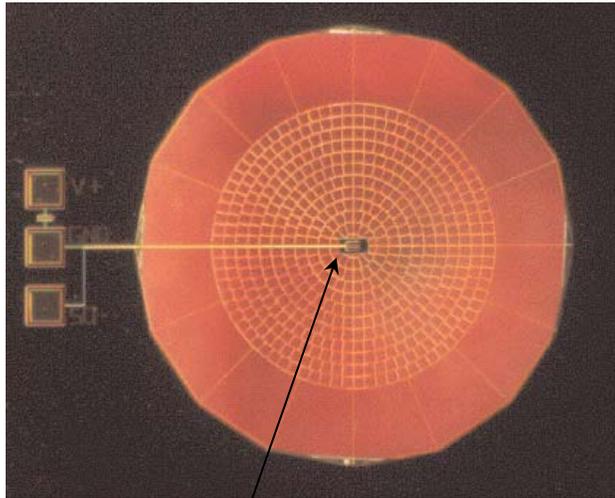
Atténuation
1/1000



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.

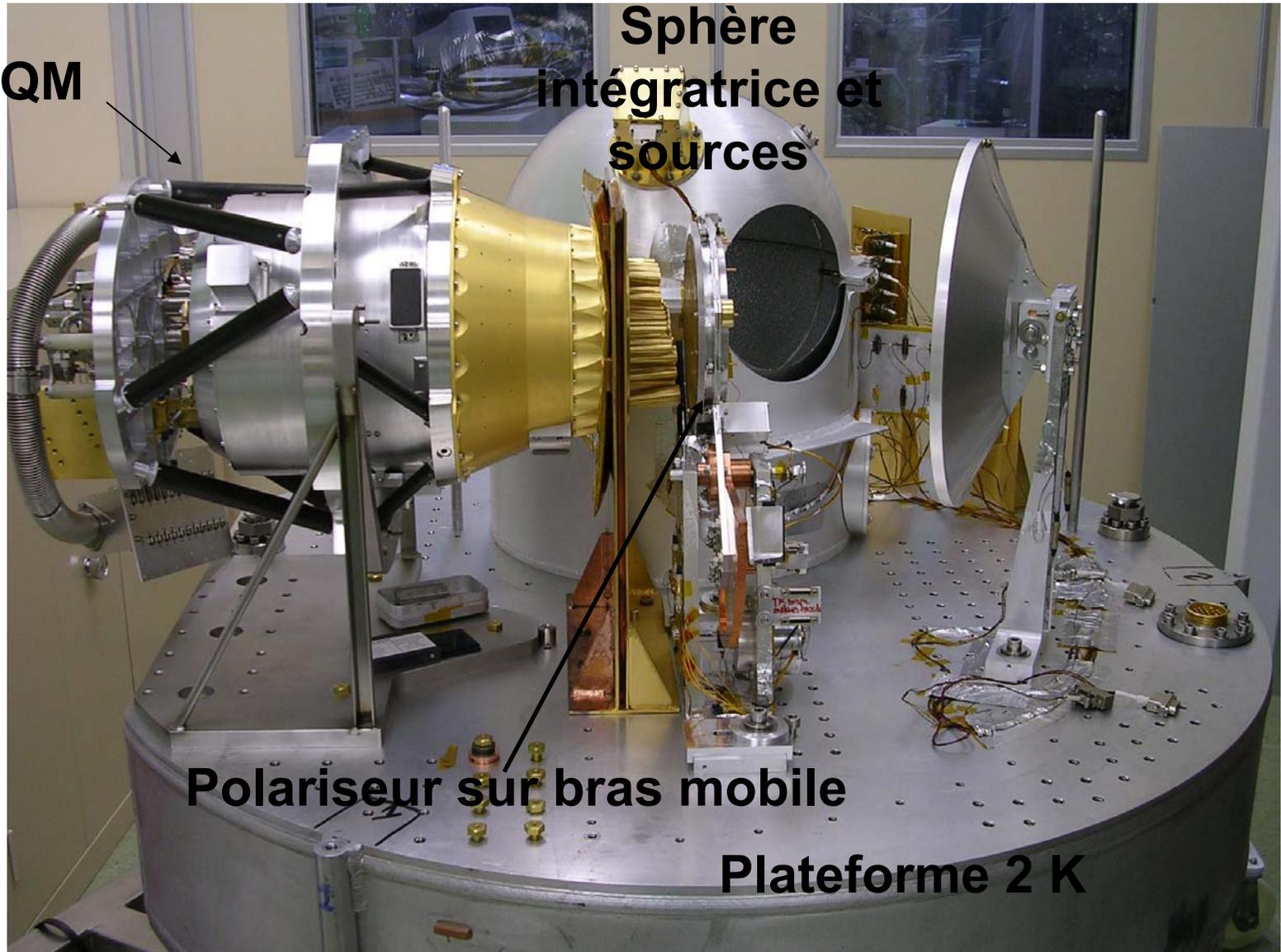
^cRef. 19.

in P.D. Mauskopf et al., 1997



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

HFI CQM

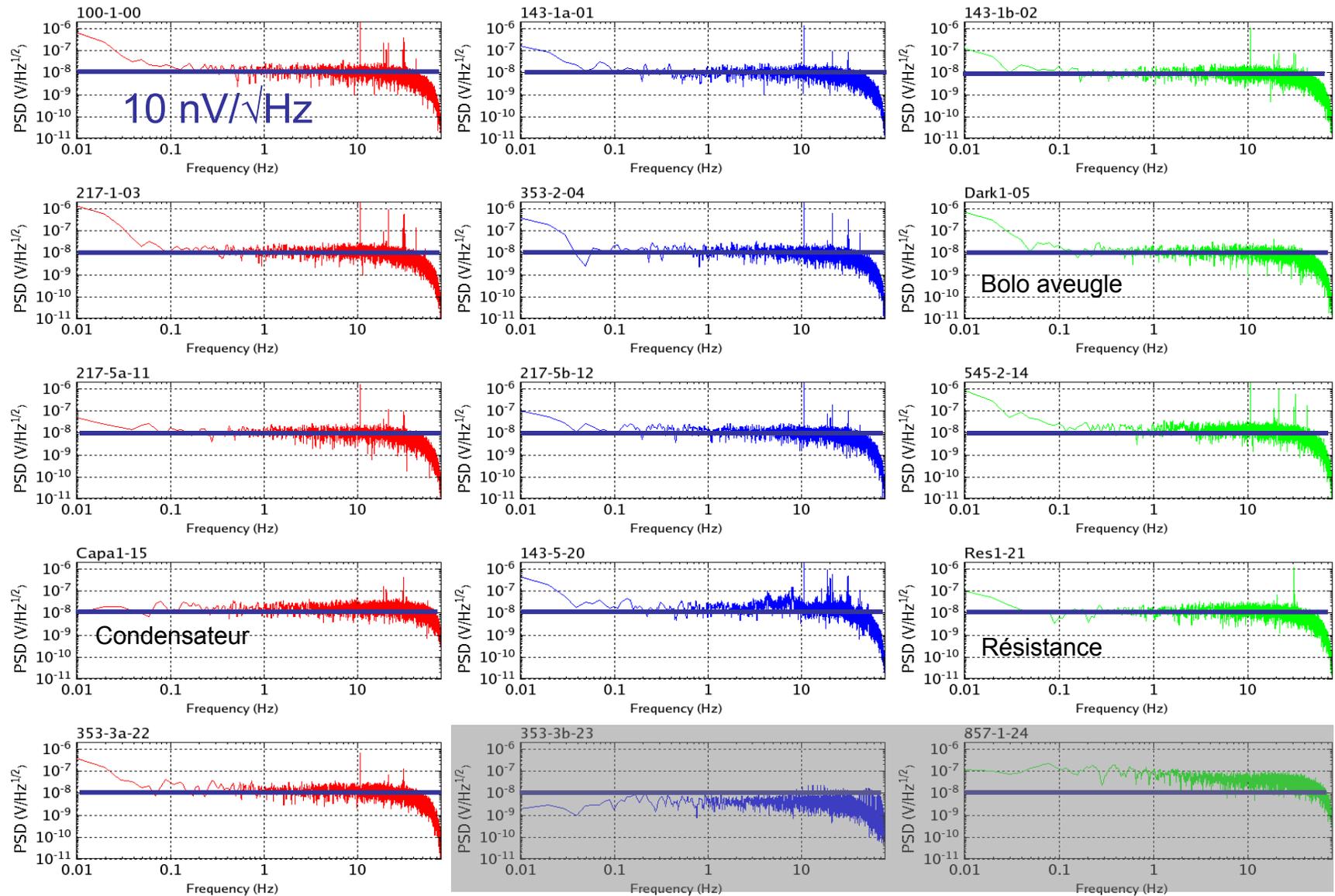


Sphère
intégratrice et
sources

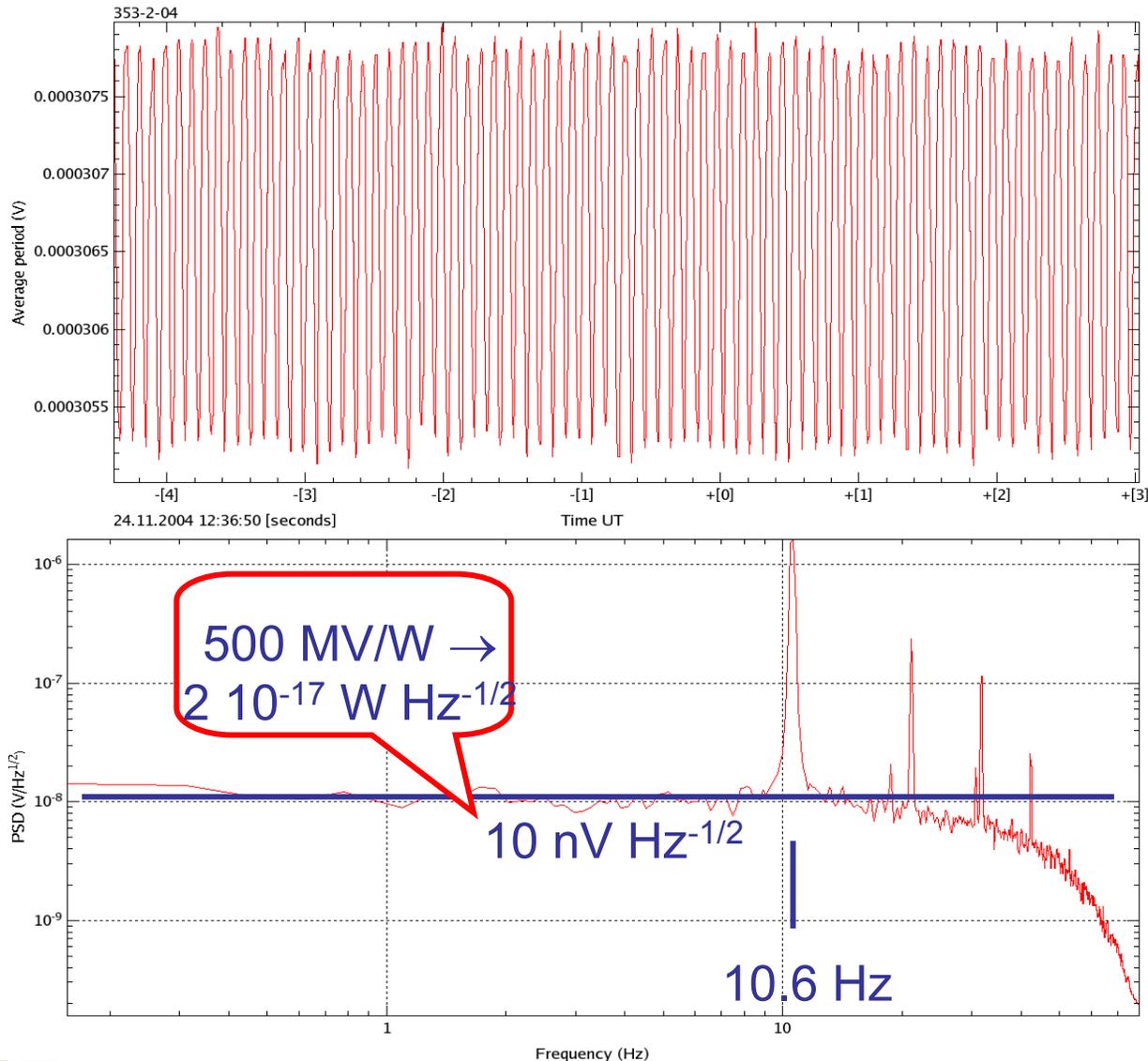
Polariseur sur bras mobile

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)



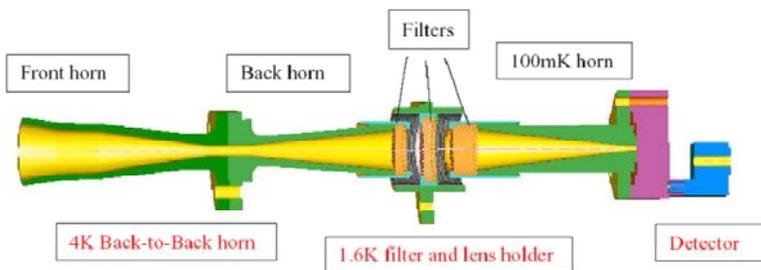
Prochaine étape:
calibration du modèle
de vol en 2006 pour
un tir en 2007-2008

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

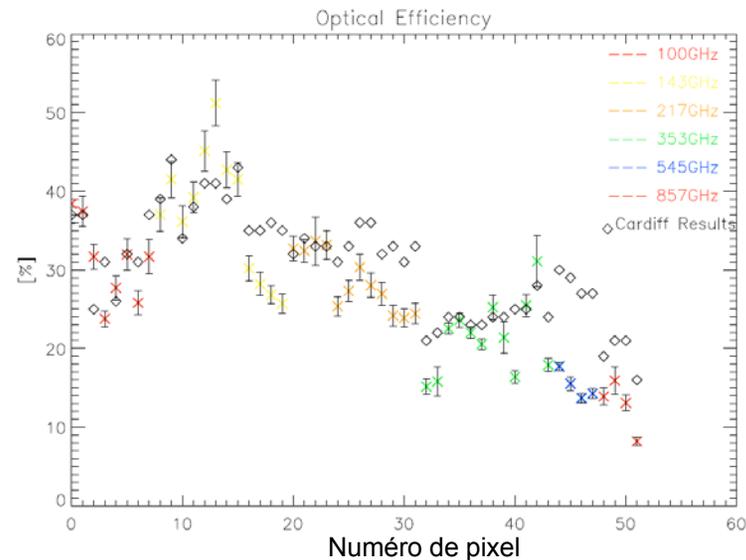
- ❑ **Juin-juillet 2006:** calibration @ l'IAS du modèle de vol de Planck HFI
- ❑ **Novembre 2006:** livraison à l'industriel (Alcatel-Alenia-Space à Cannes) des modèles de vol
- ❑ **Juin 2007:** intégration du télescope avec la charge utile
- ❑ **Prochaines étapes:**
 - ❑ **CSL** (Centre Spatial de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

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

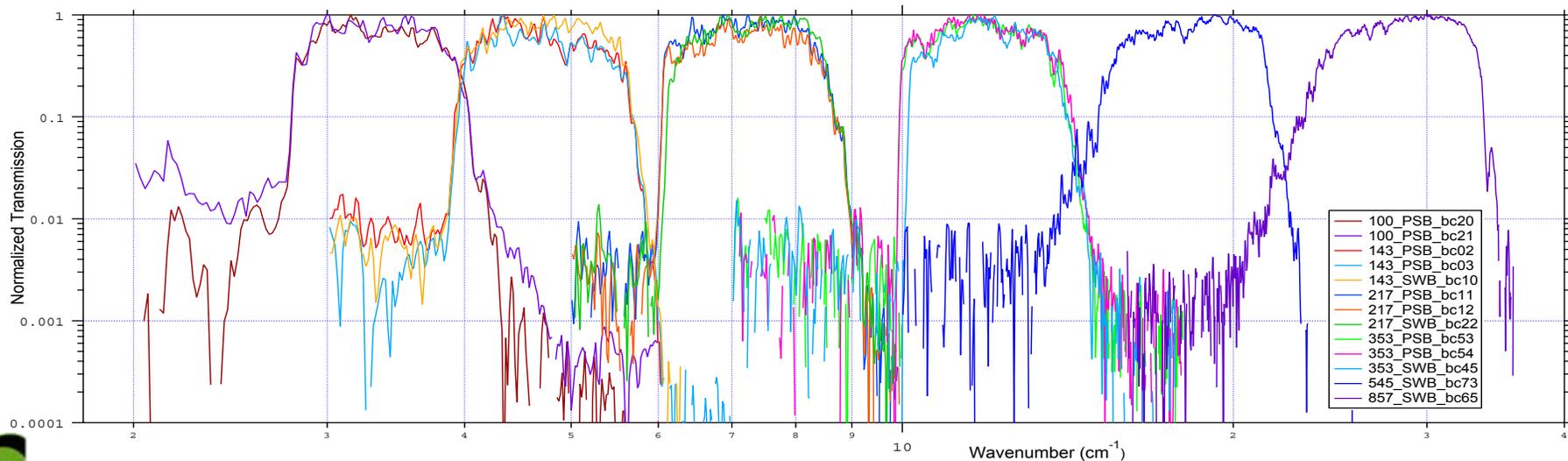
Chaîne optique



Efficacité optique



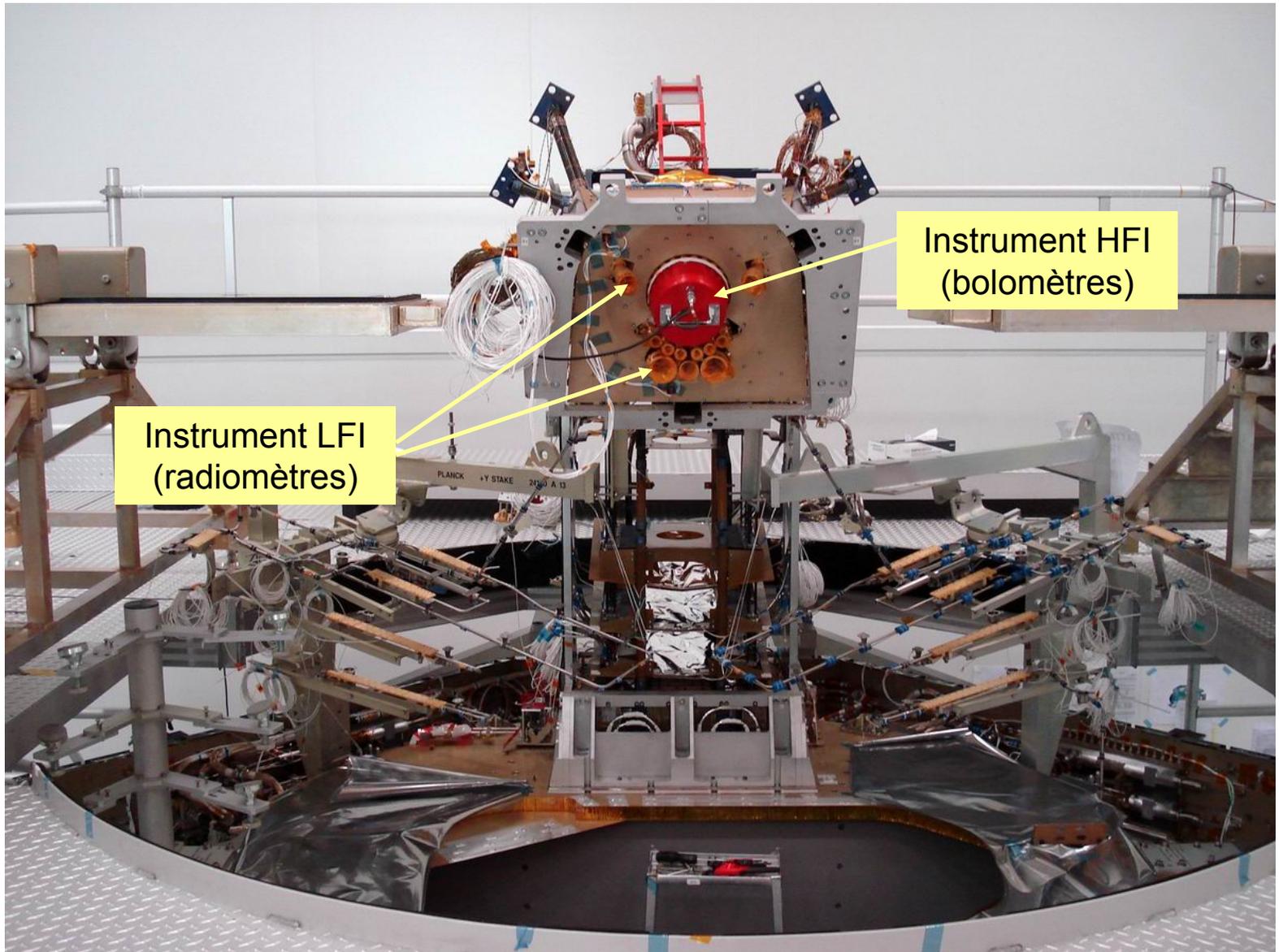
Transmission spectrale



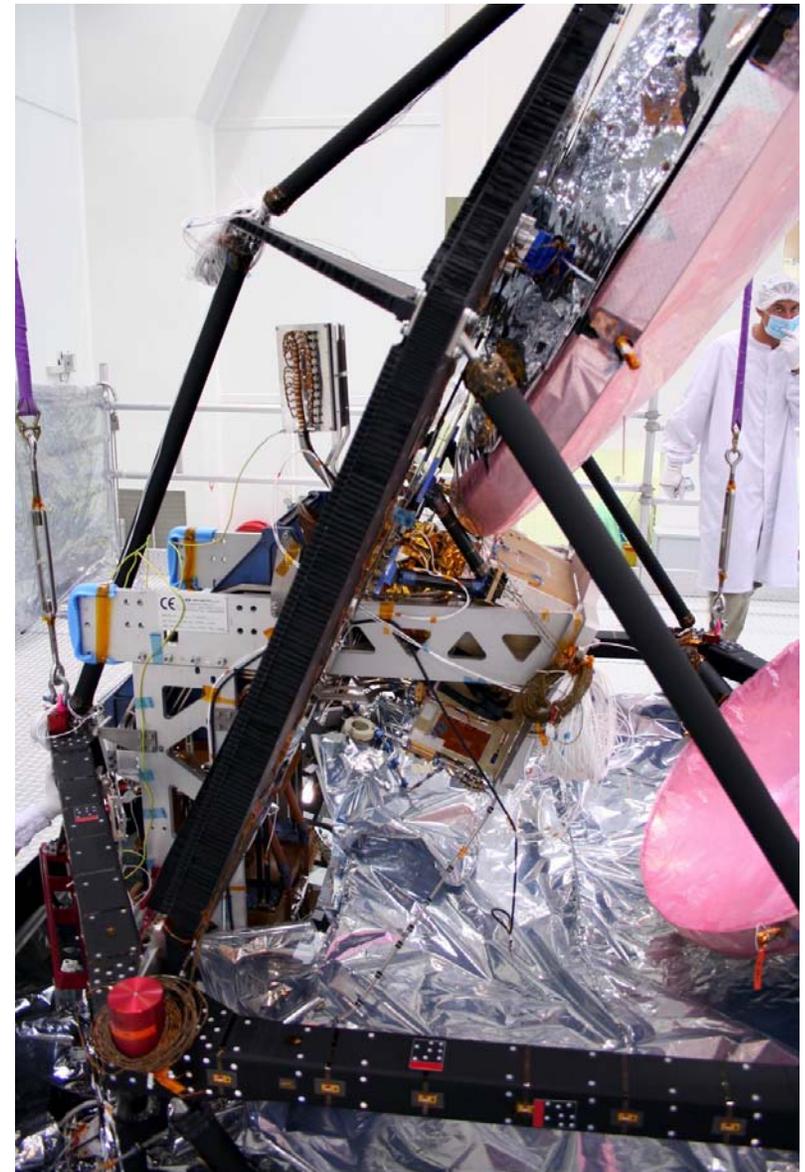
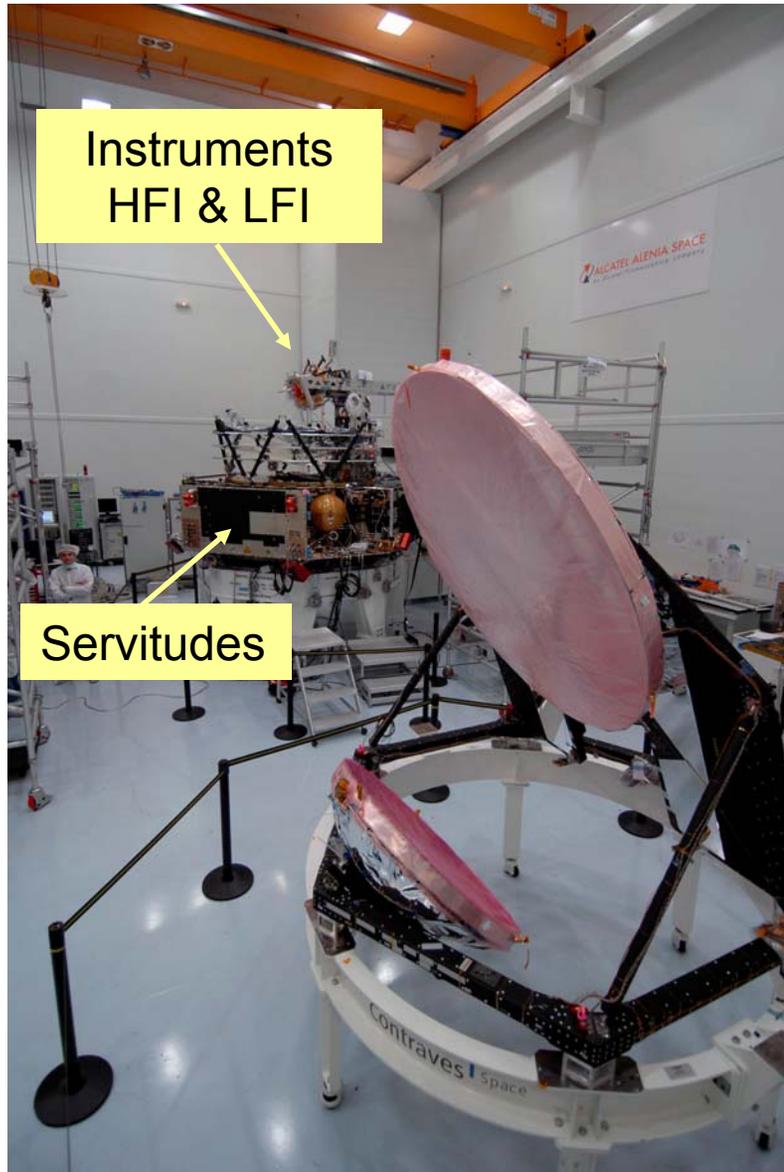
Planck-HFI: test des déformations du télescope à froid



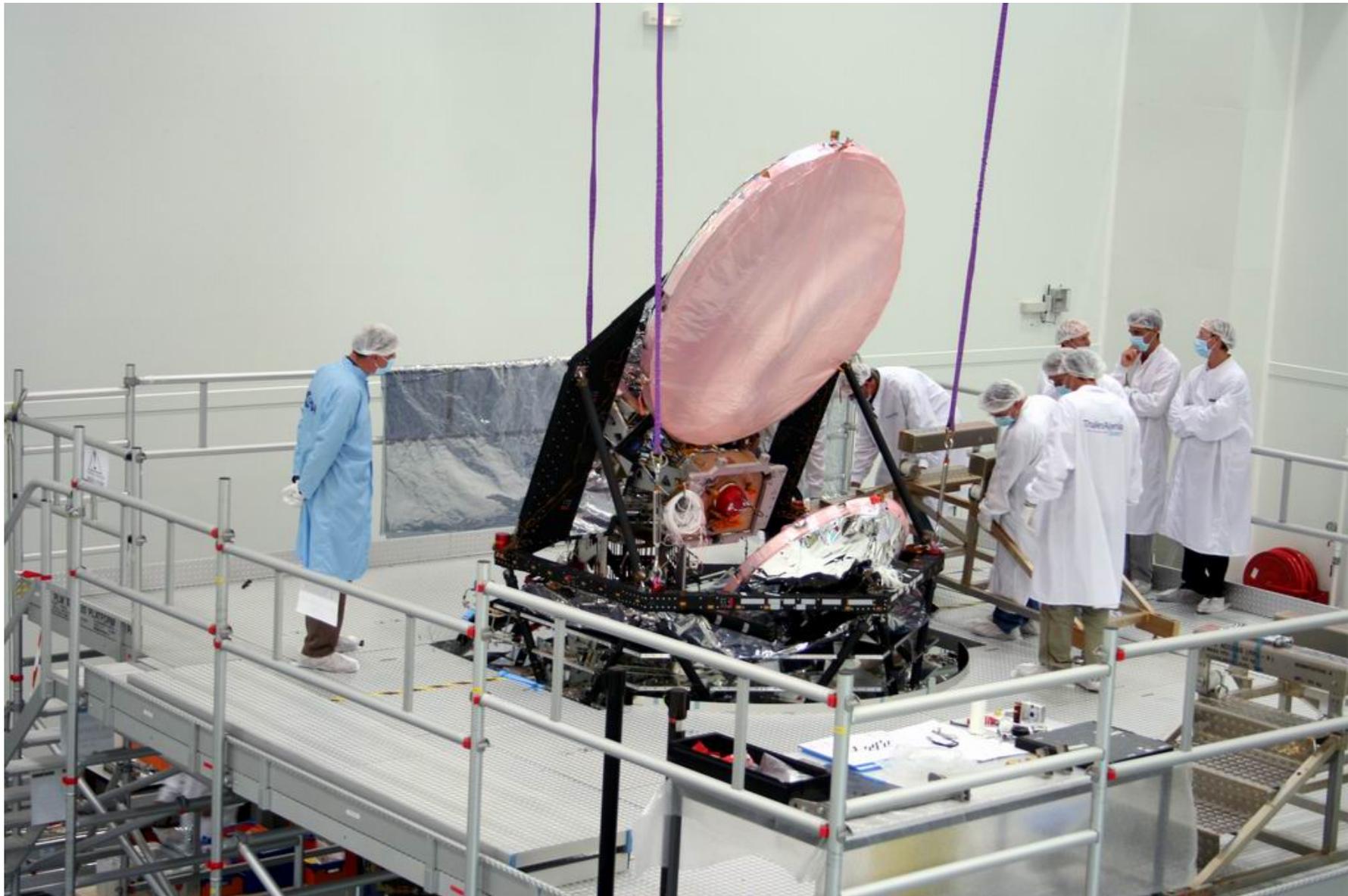
Intégration de Planck HFI, LFI et d'un refroidisseur à sorption



Intégration du télescope et des instruments



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



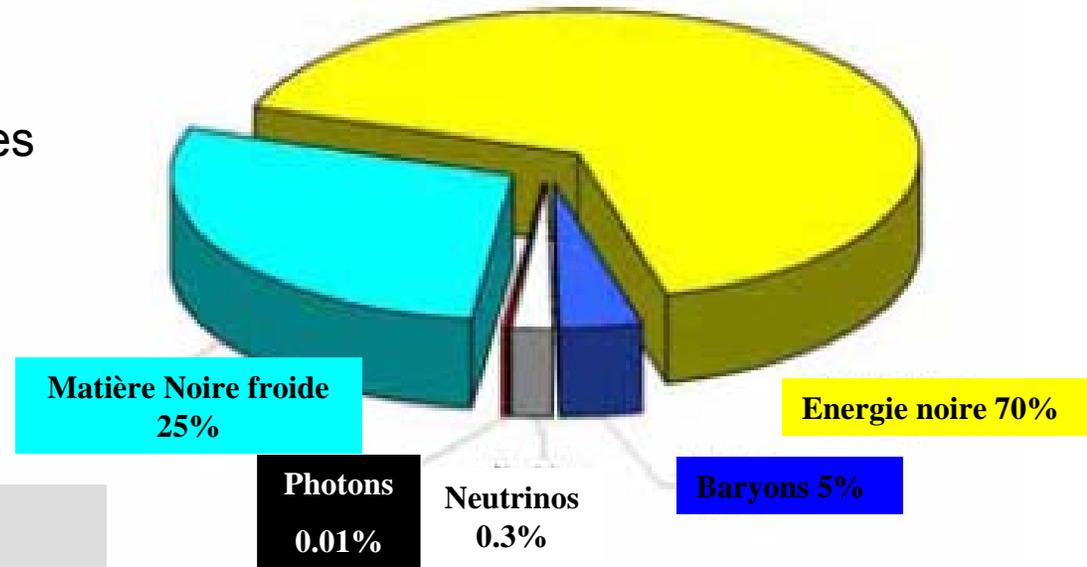
□ Détection de la Matière noire



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

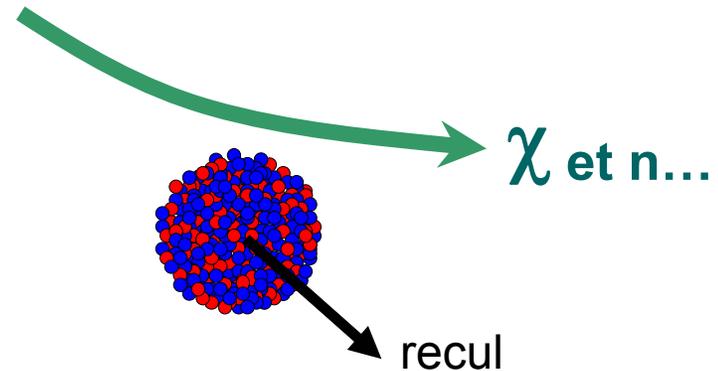
Contenu énergétique de l'Univers



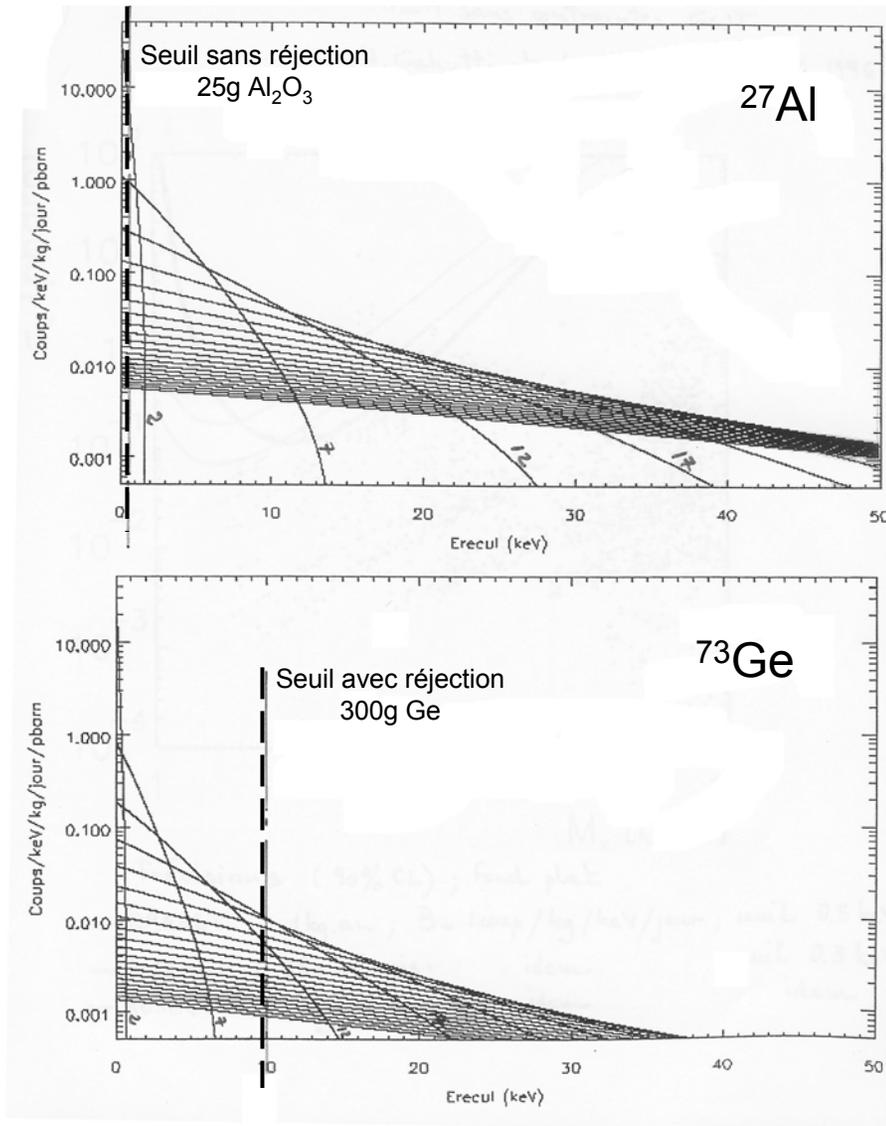
Une des candidats le mieux motivé:

- **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

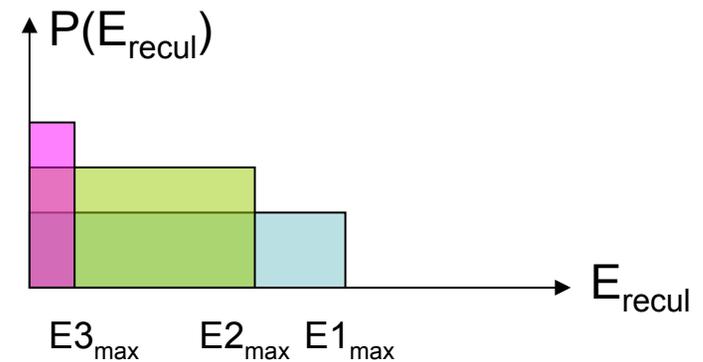
\hookrightarrow **Weakly Interactive Massive Particles**



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



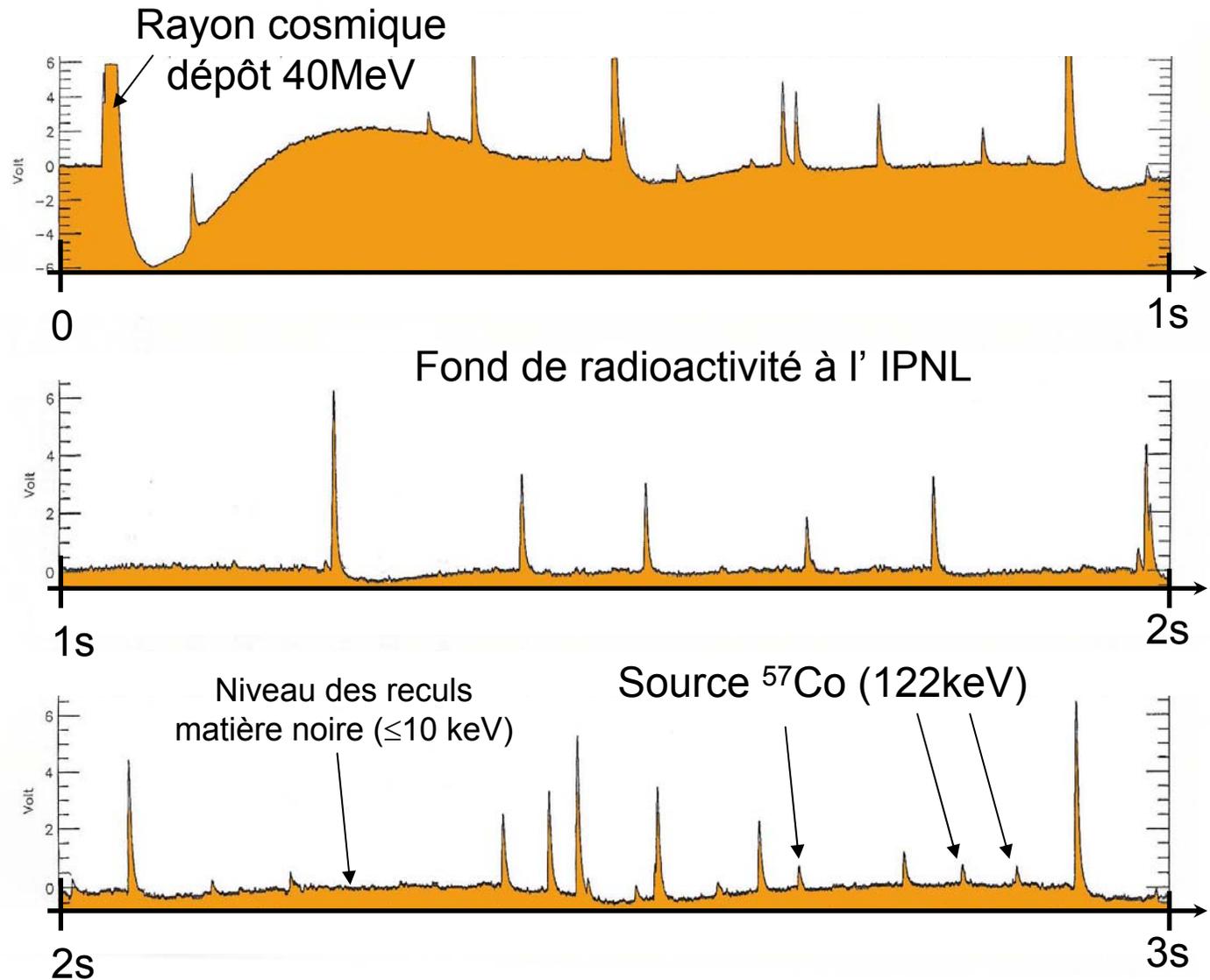
- Cinématique élémentaire $\rightarrow E_{\text{max}}$
(adaptation des masses: de la pétanque en labo !)
- Les faibles énergies de recul sont toujours « peuplées » \rightarrow spectres piqués à basse énergie: **on recherche le meilleur seuil \rightarrow bolomètres !**



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**

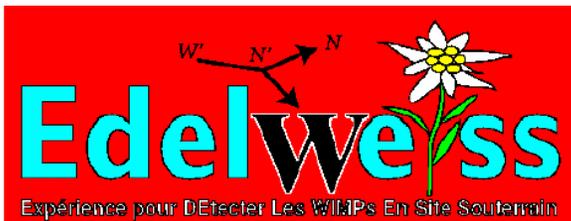


□ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Charges & chaleur »

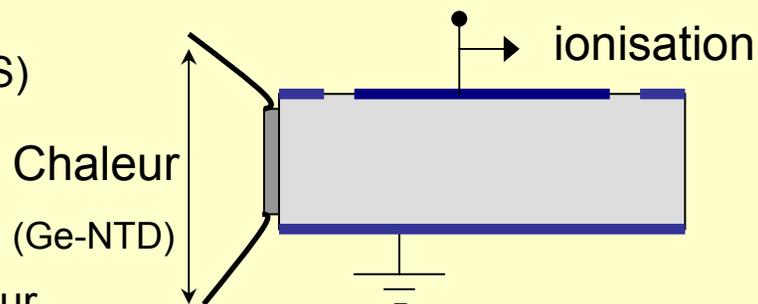
CDMS (US), EDELWEISS (France)



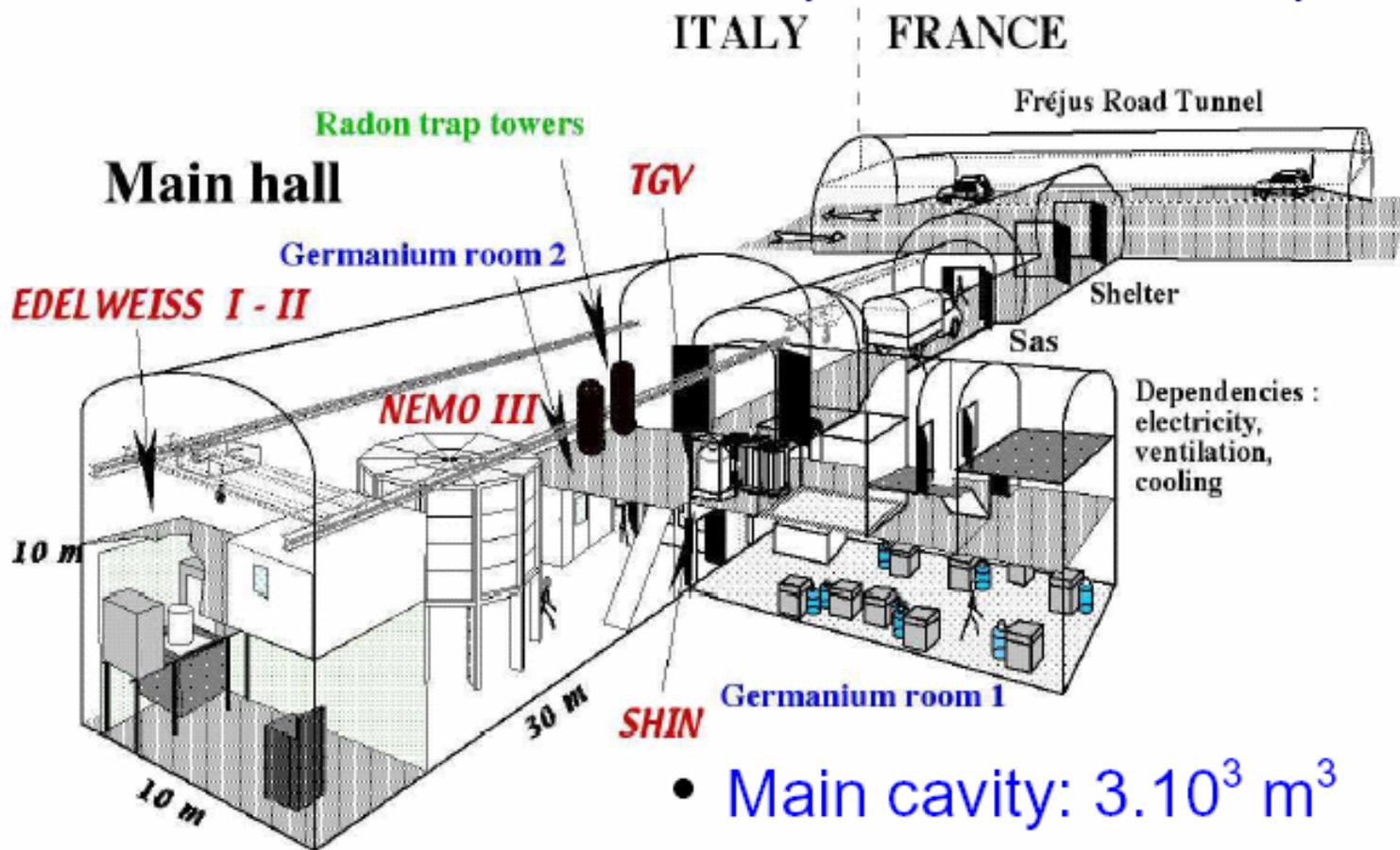


Expérience pour DÉtecter Les Wimps En Site Souterrain

- ✓ 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 (≠ 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)

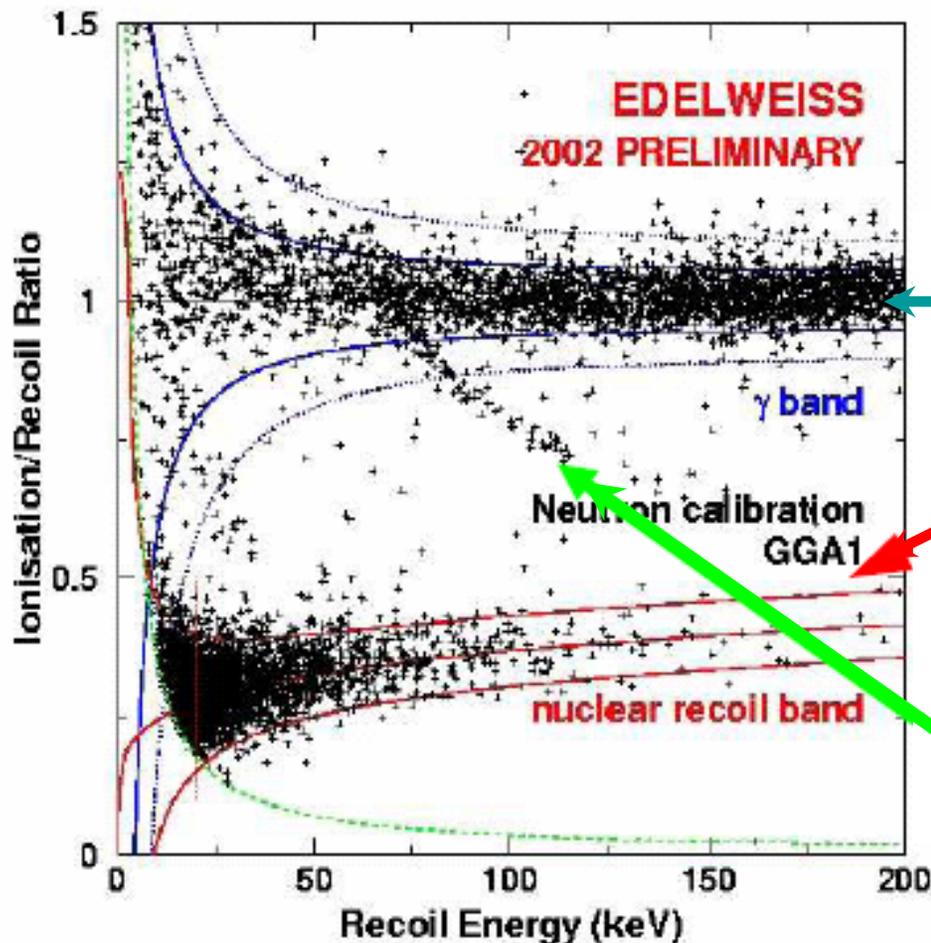


Inside the LSM (CNRS-CEA)



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

Détecteurs Edelweiss: discrimination gammas/reculs

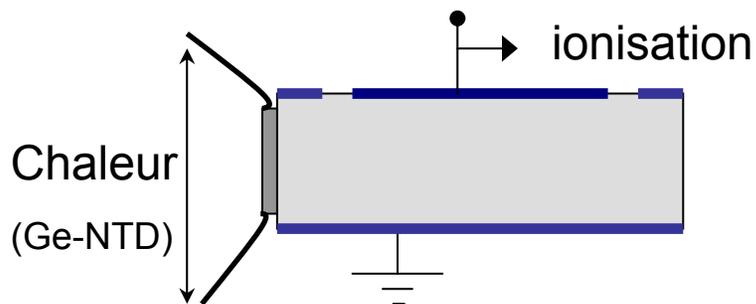


Irradiation ^{252}Cf

gammas

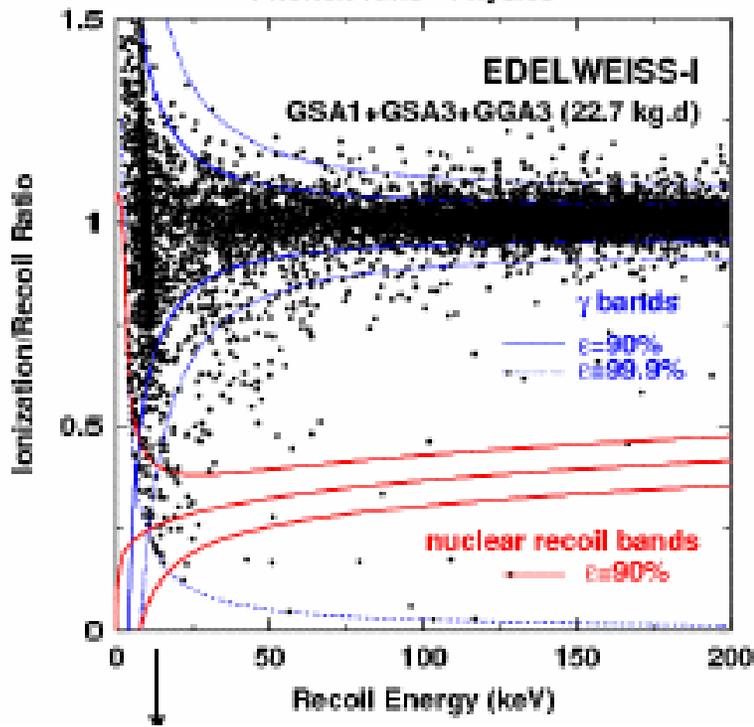
reculs

Diffusion inélastique sur ^{73}Ge

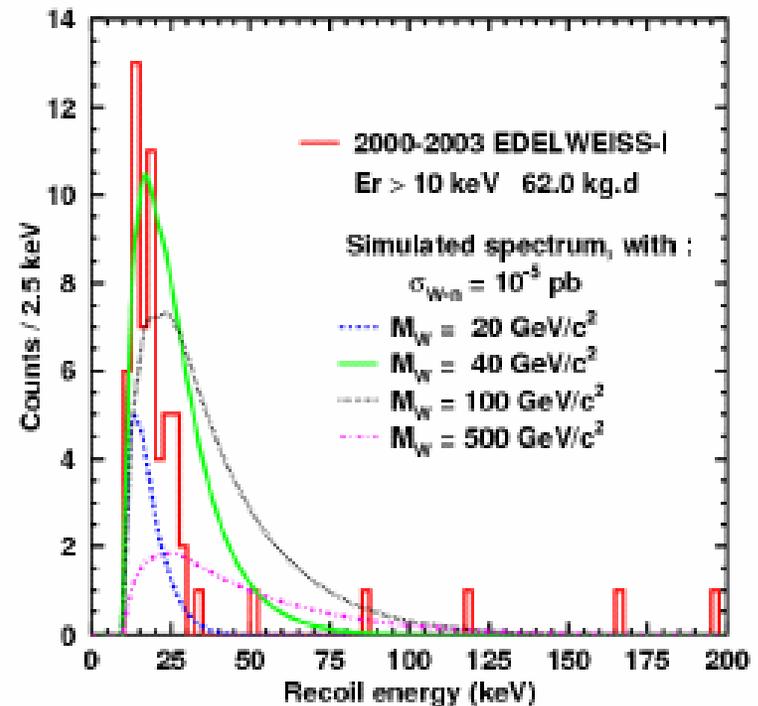


Runs de fond Edelweiss-I (2000→2003):

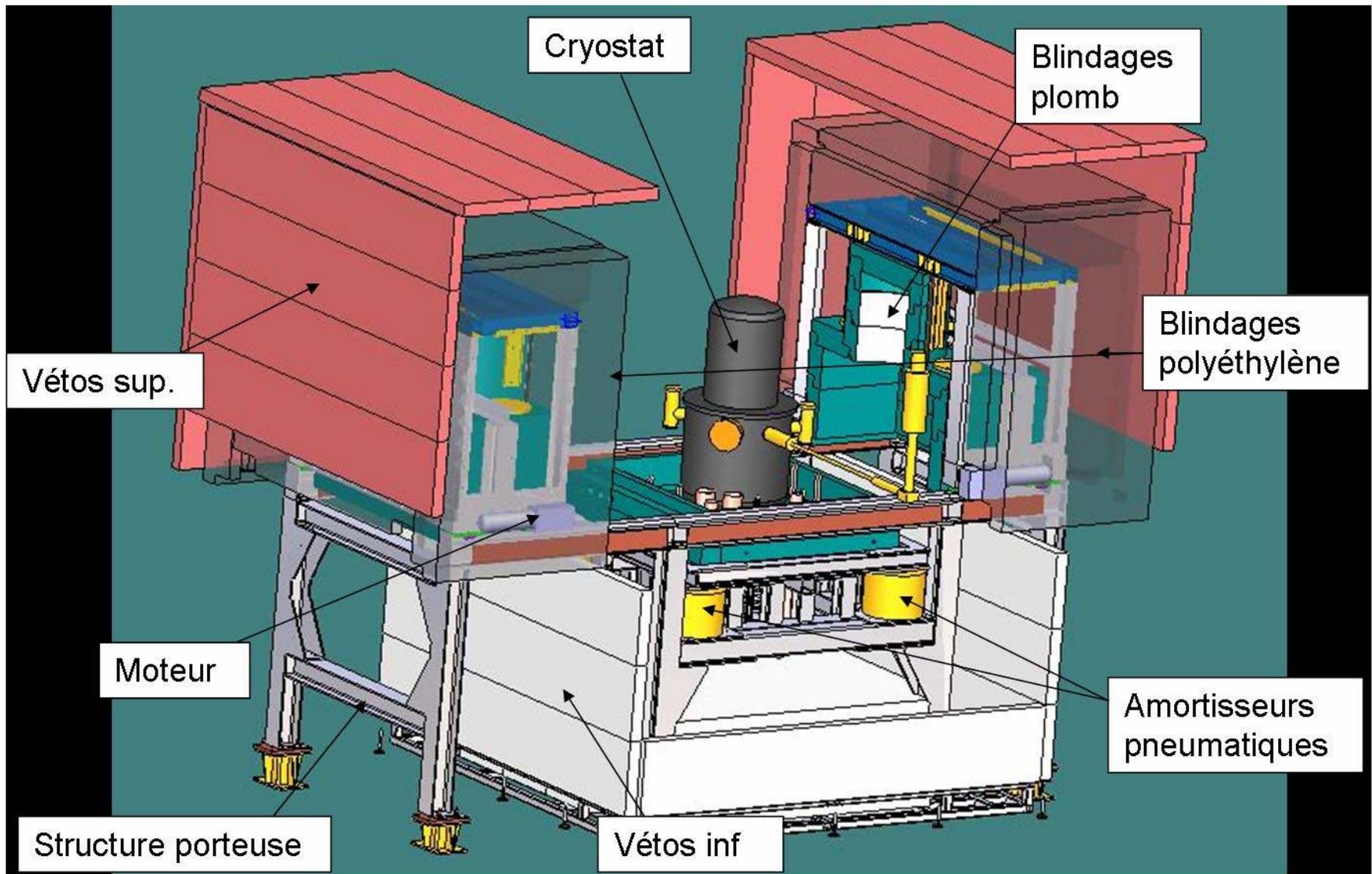
- exposition 62 kg.jour
 - 59 événements, concentrés à basse E, probablement des **événements de surface mal collectés** sous les électrodes...
- **R&D (CSNSM) sur la localisation**: (1) analyse en temps résolu du signal de charge (2) films NbSi sensibles à la composante athermique des phonons issue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



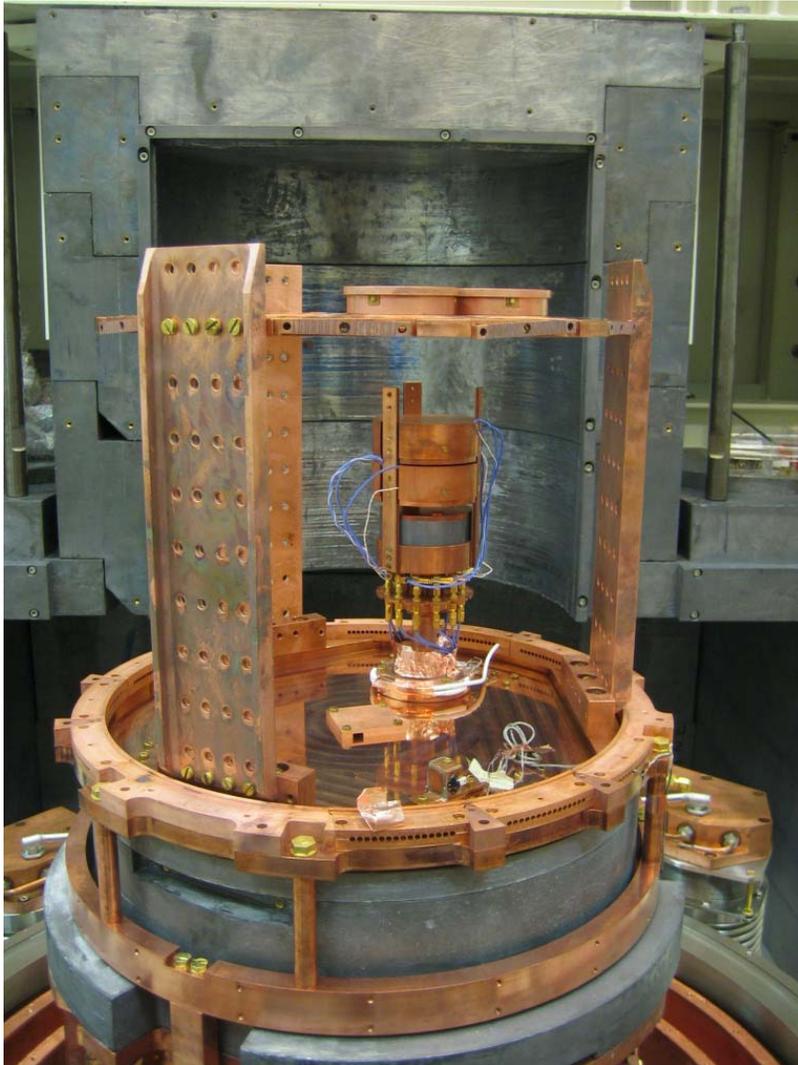
Seuil 10keV



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)

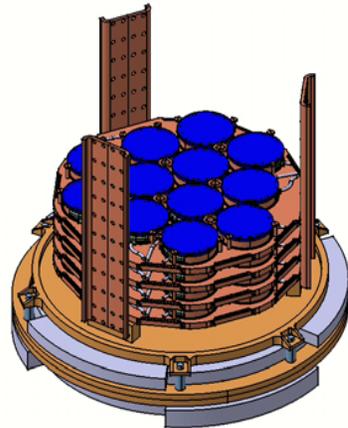
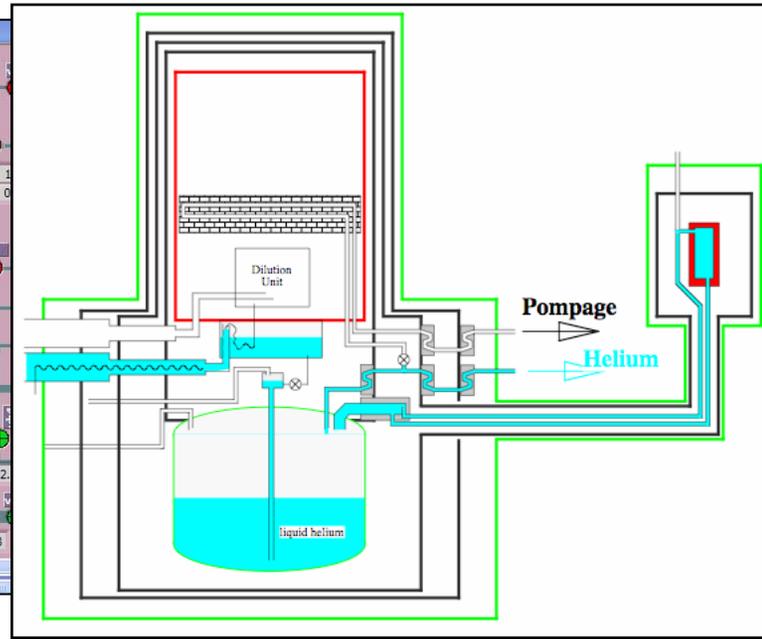
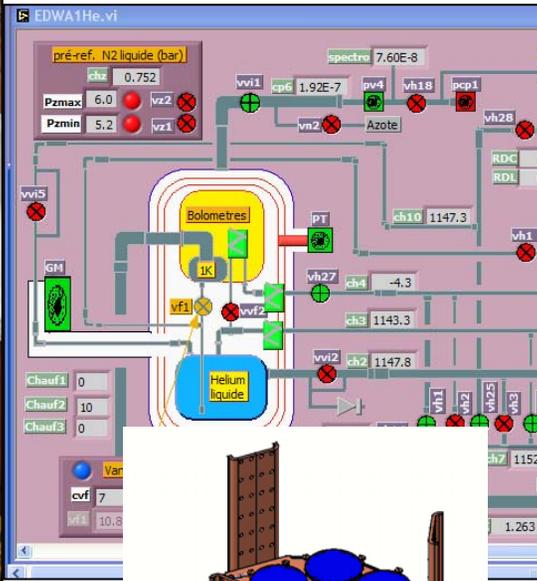
- Détecteurs de Neutrons en coïncidence avec les véto (en cours)

◆ 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

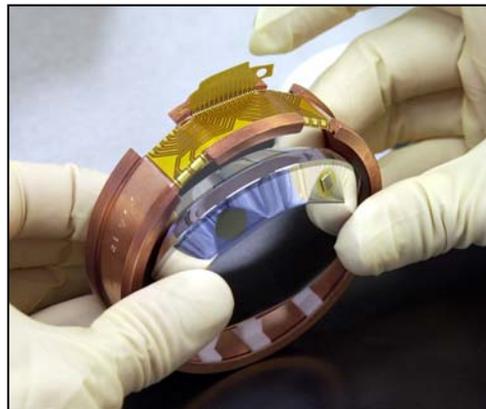
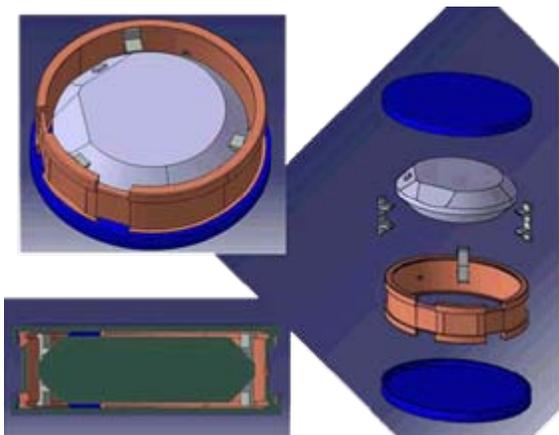
Edelweiss-II: amélioration des cryostatats



- ✓ 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.

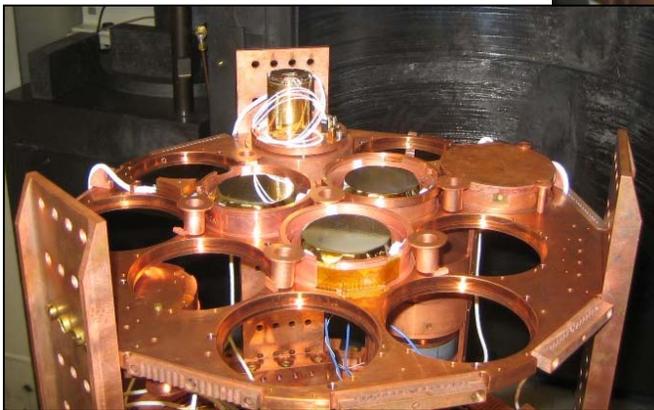
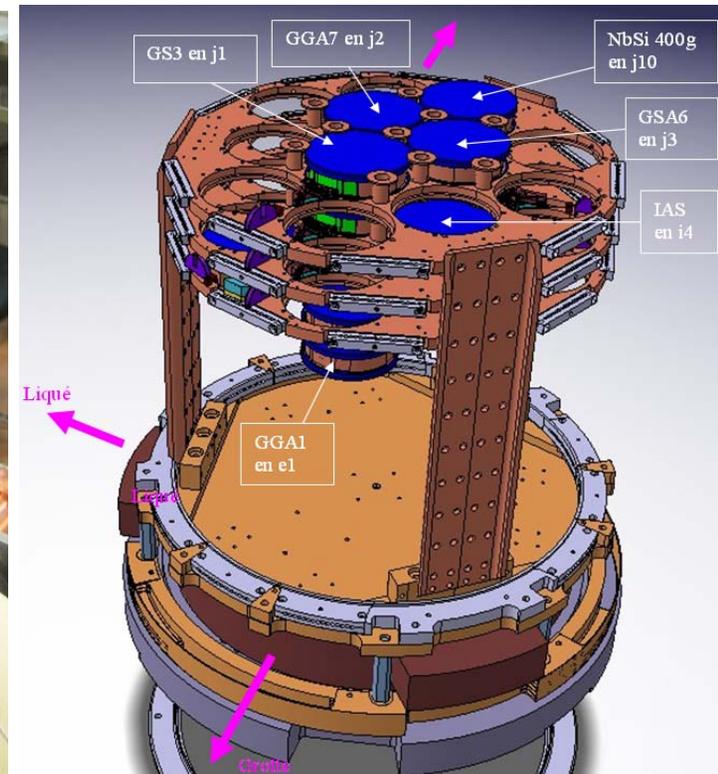
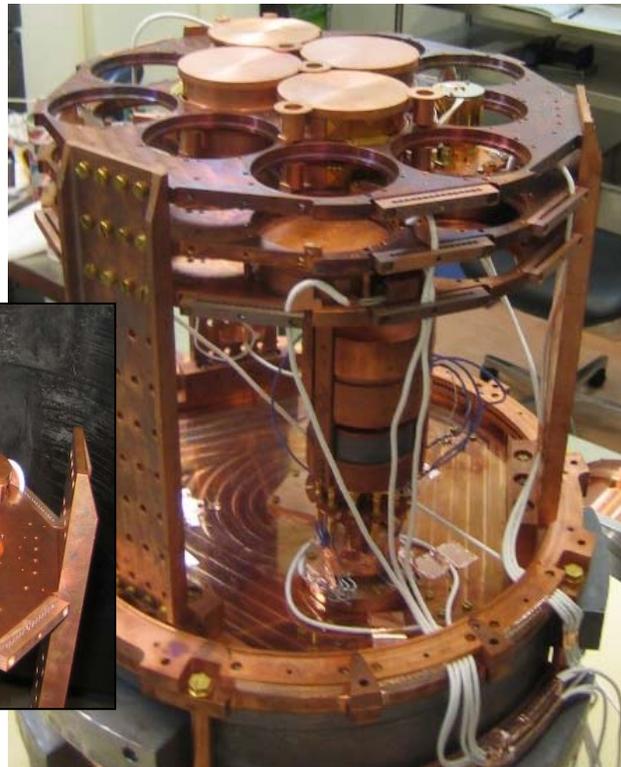
1 @ LSM

+ 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)



Edelweiss-II (au terme de 2006)

- ✓ **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)

...et des retards dûs à des problèmes de “manpower”



□ Détection de la Matière noire

Avec discrimination « Lumière & chaleur »

- ROSEBUD (Ge-NTD; tunnel du Canfranc)

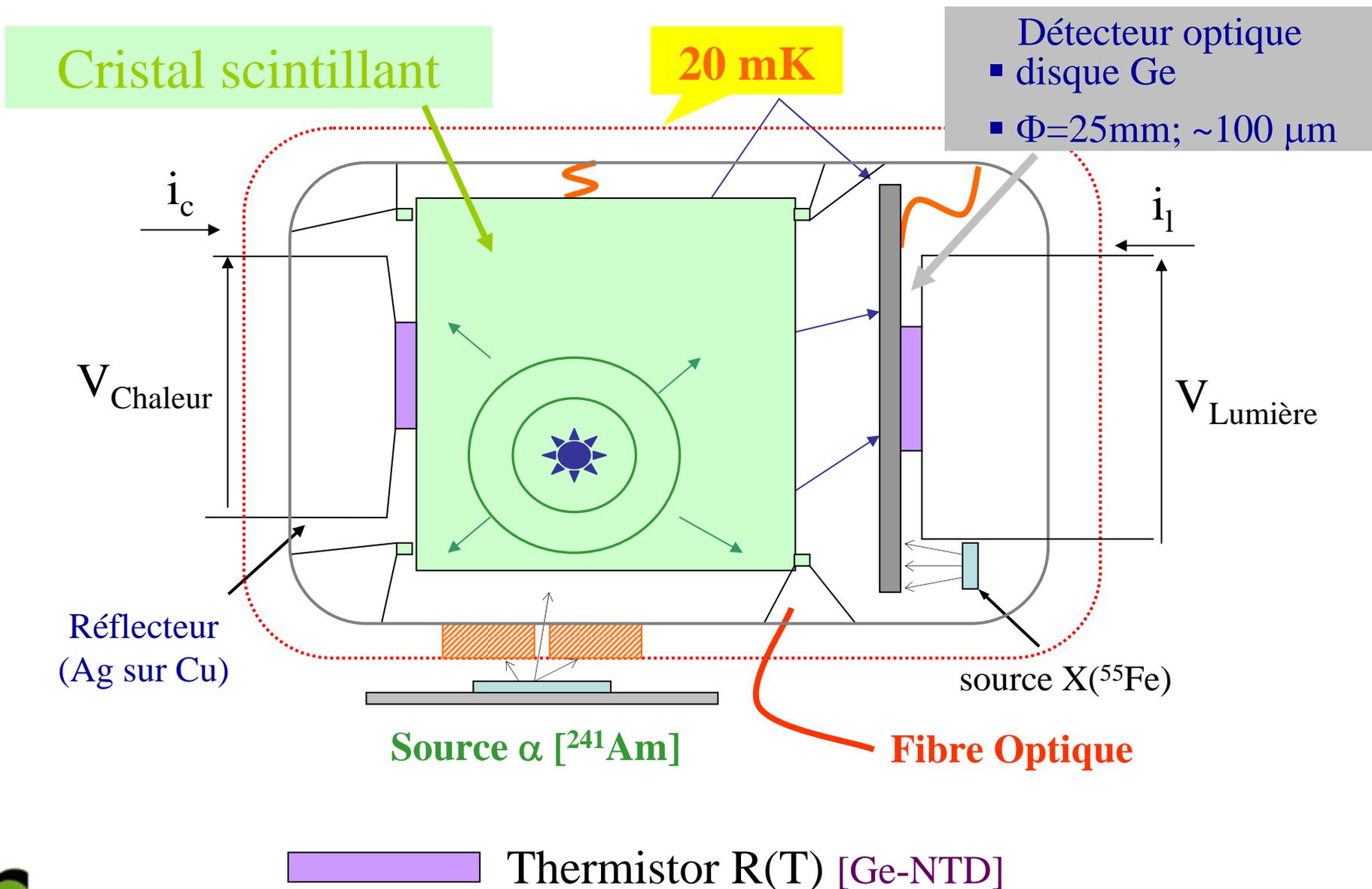
Collaboration IAS / Univ de Saragosse

- CRESST (TES; tunnel du GranSasso)

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

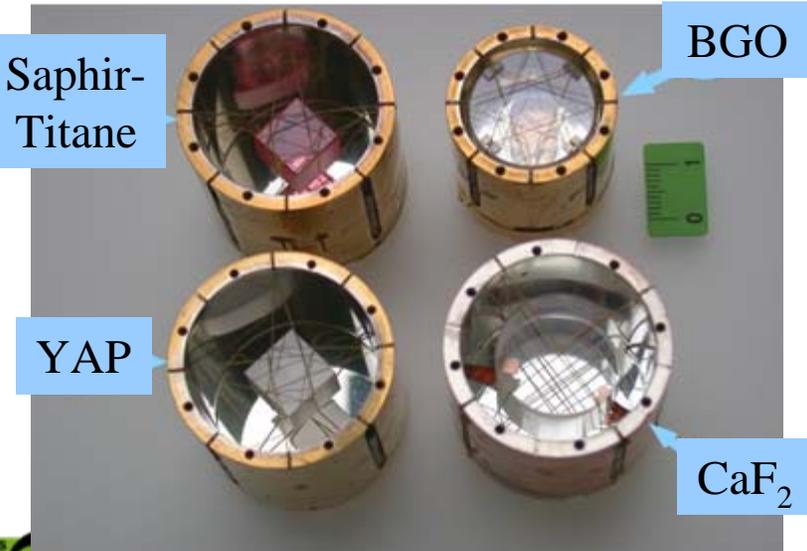
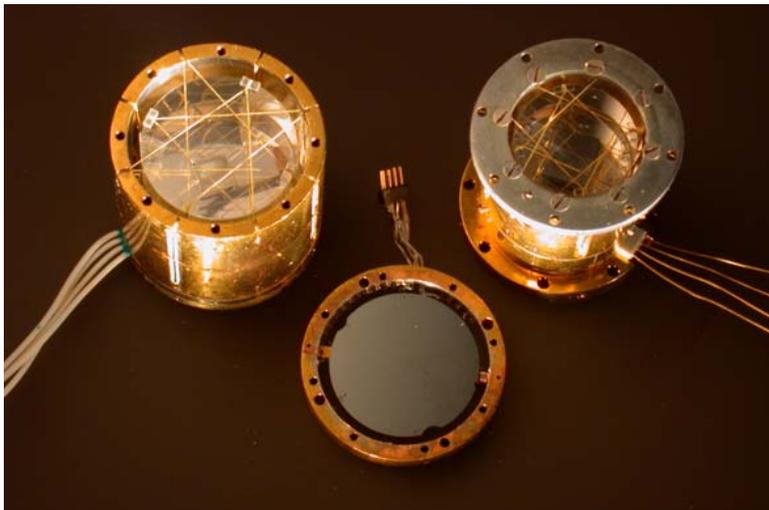


Bolomètres massifs scintillants



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 !

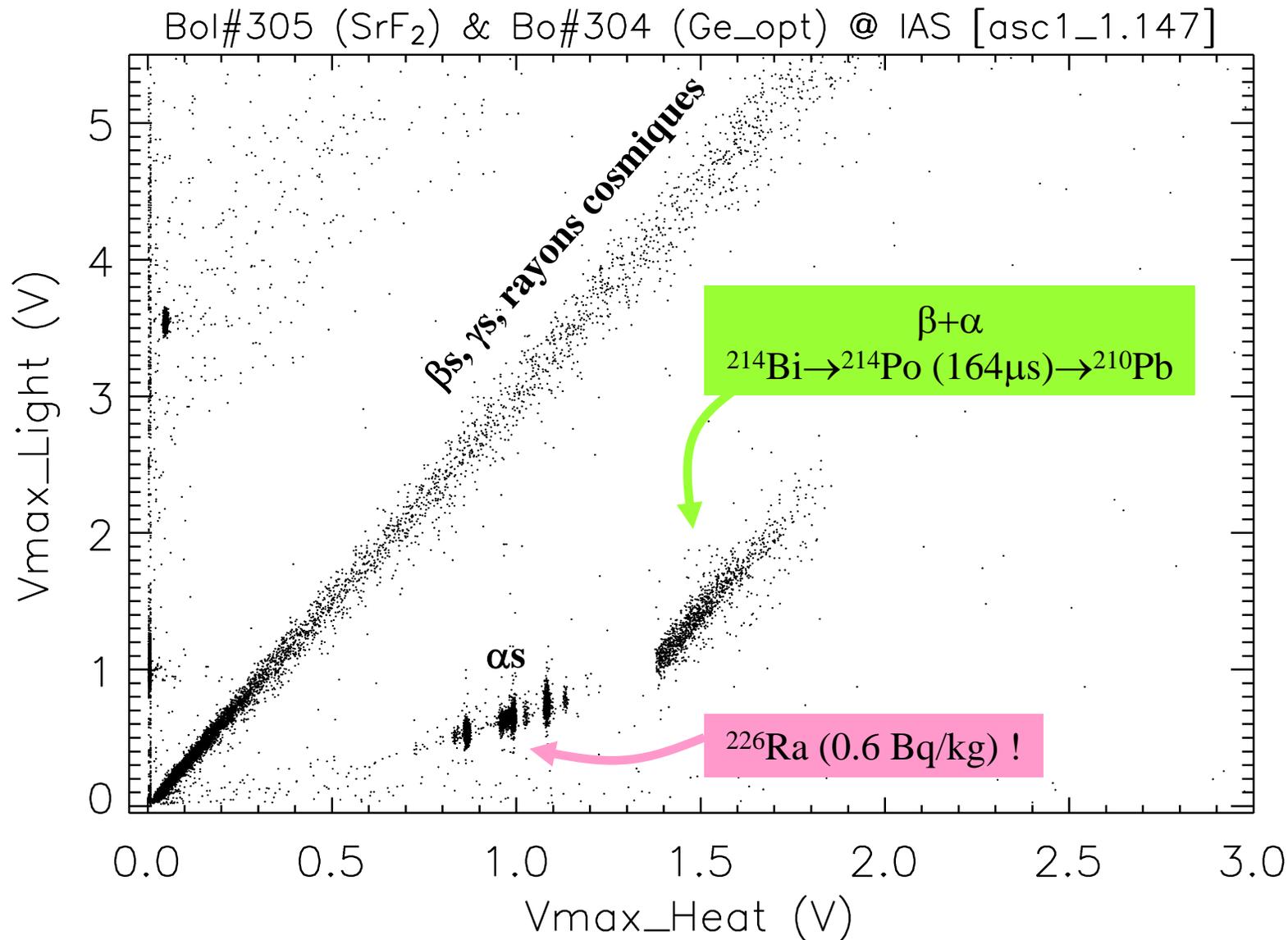
- Rendements lumineux ?
- Mécanismes d'émission ?
- Propriétés thermiques ?
- Radioactivités internes ?
- maille moléculaire !

détecteurs optiques + gros, + fins + froid

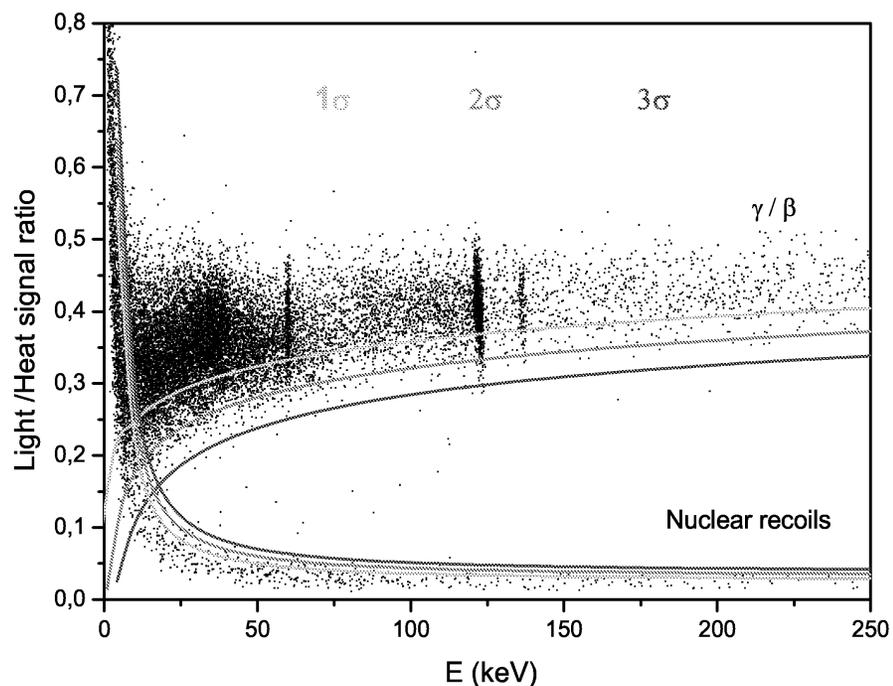
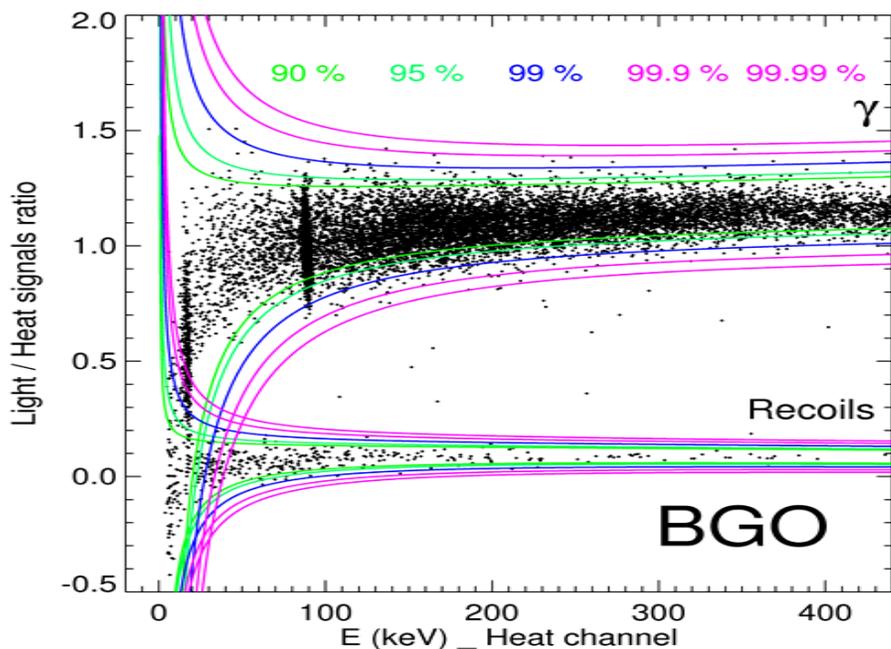
interprétation des reculs + difficile...

- **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



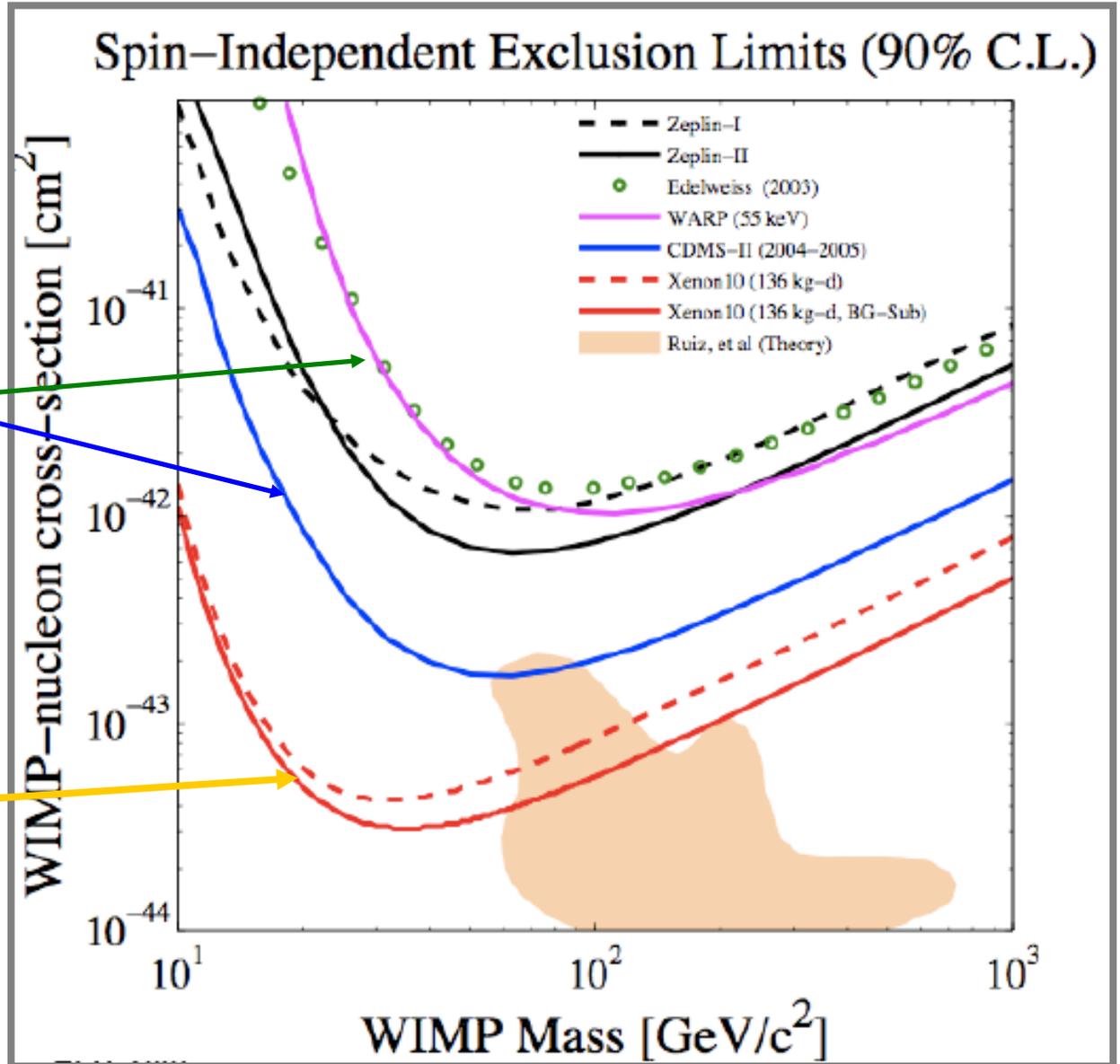
- **46g BGO**
- radioactivité: ^{207}Bi
- seuil réjection à **90% CL: 23 keV**

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

Tests au Canfranc en 2007 (neutrons ambiants & et rayons cosmiques ↓↓↓↓):

Zones mortes ? Evénements atypiques ? Radioactivités internes?

La détection directe de la matière noire: une rude compétition !



Détecteurs bolométriques (EDELWEISS; CDMS)

Détecteur à Xénon liquide (xenon10) avril 2007



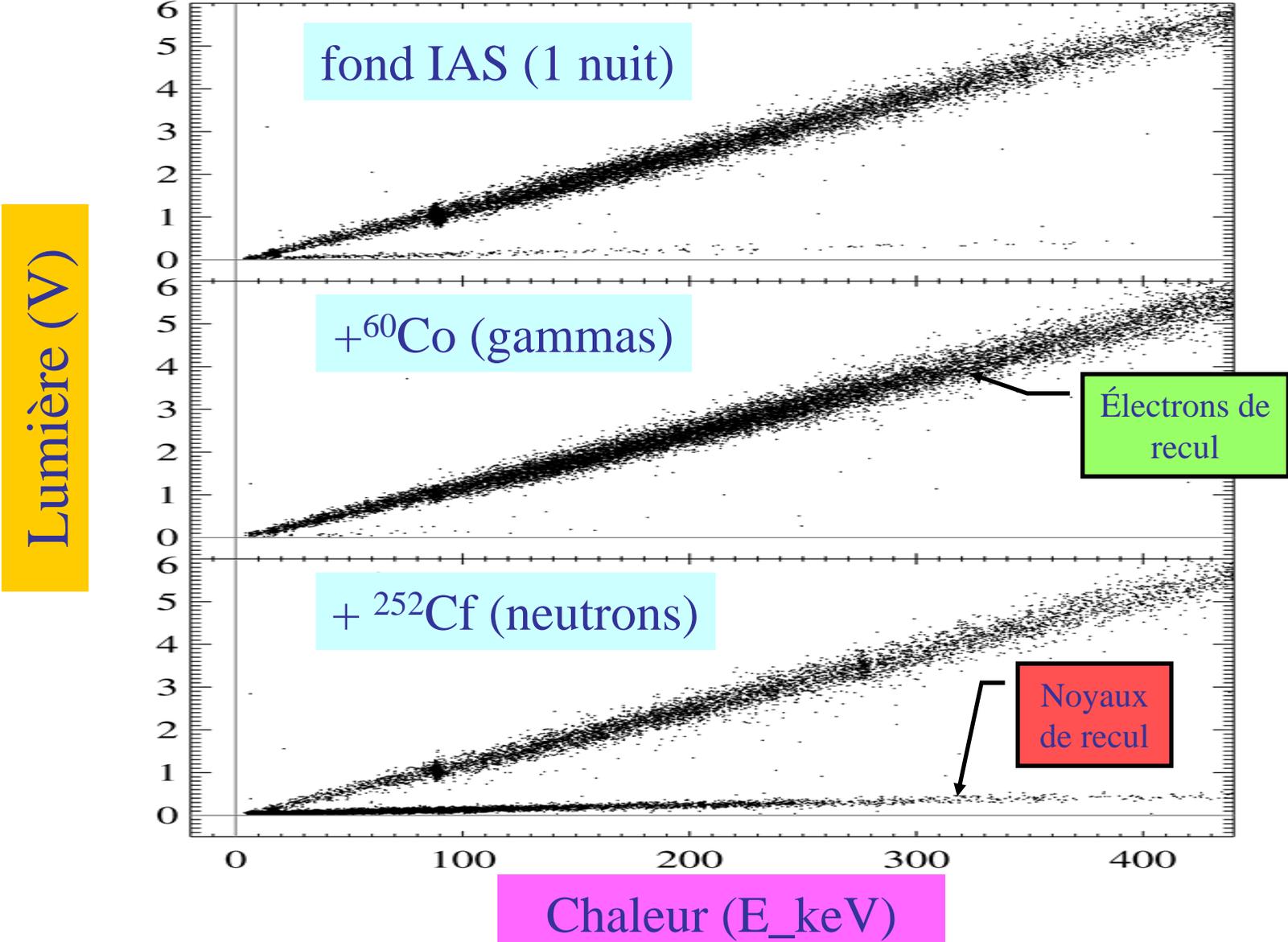
□ Désintégrations rarissimes
(par bolomètres scintillants !)

Désintégrations alpha de

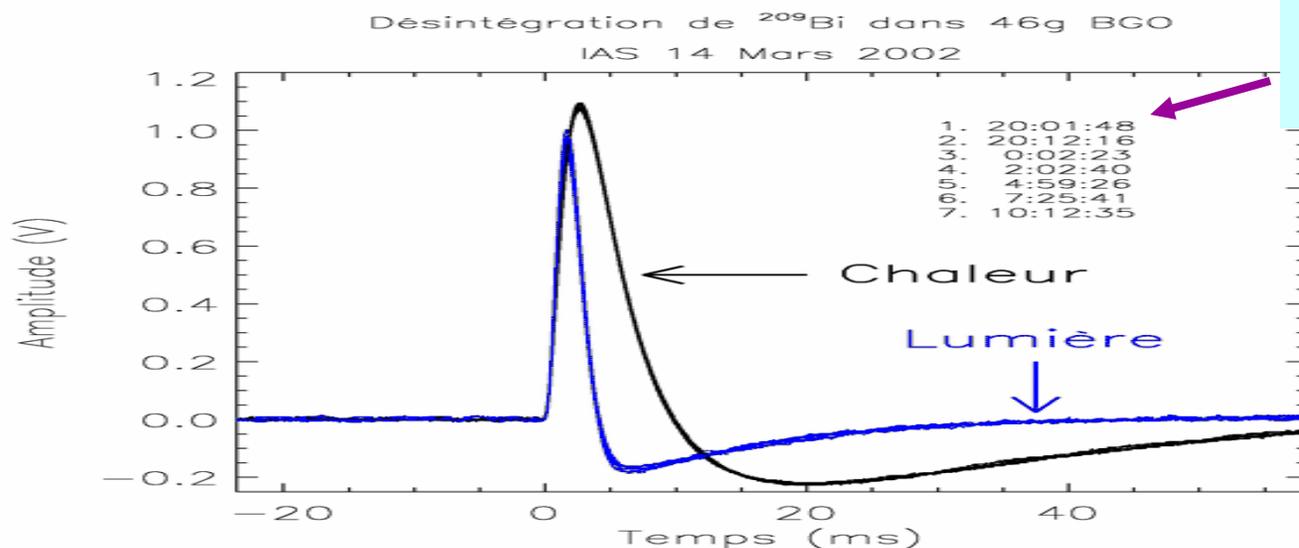
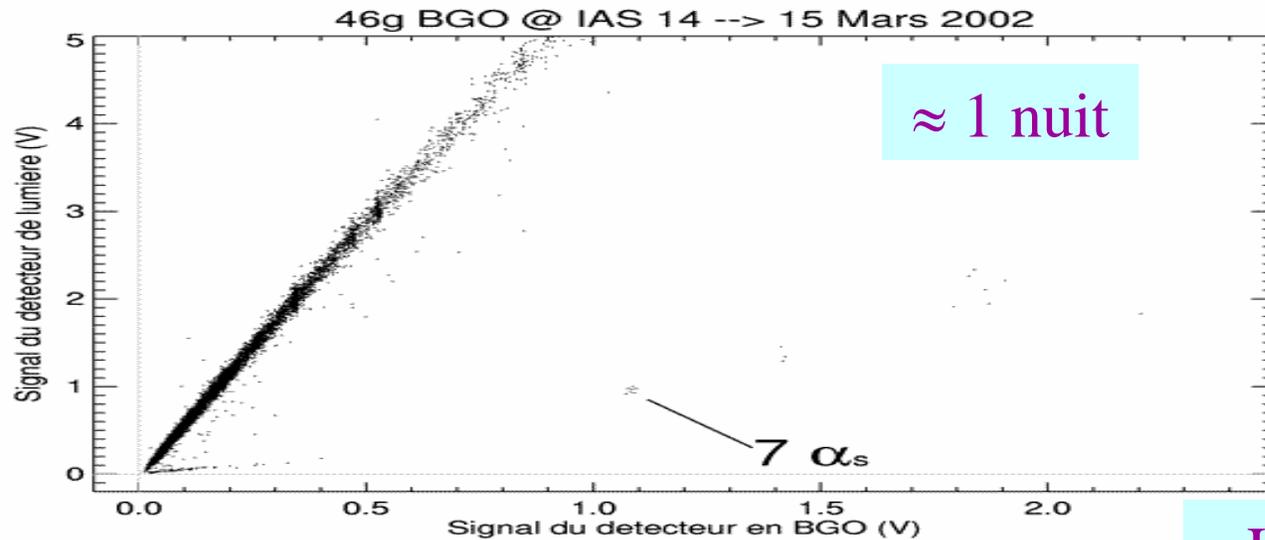
- ^{209}Bi (IAS; 2002) $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{19}$ ans
- ^{180}W (CRESST; 2004) $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{18}$ ans



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



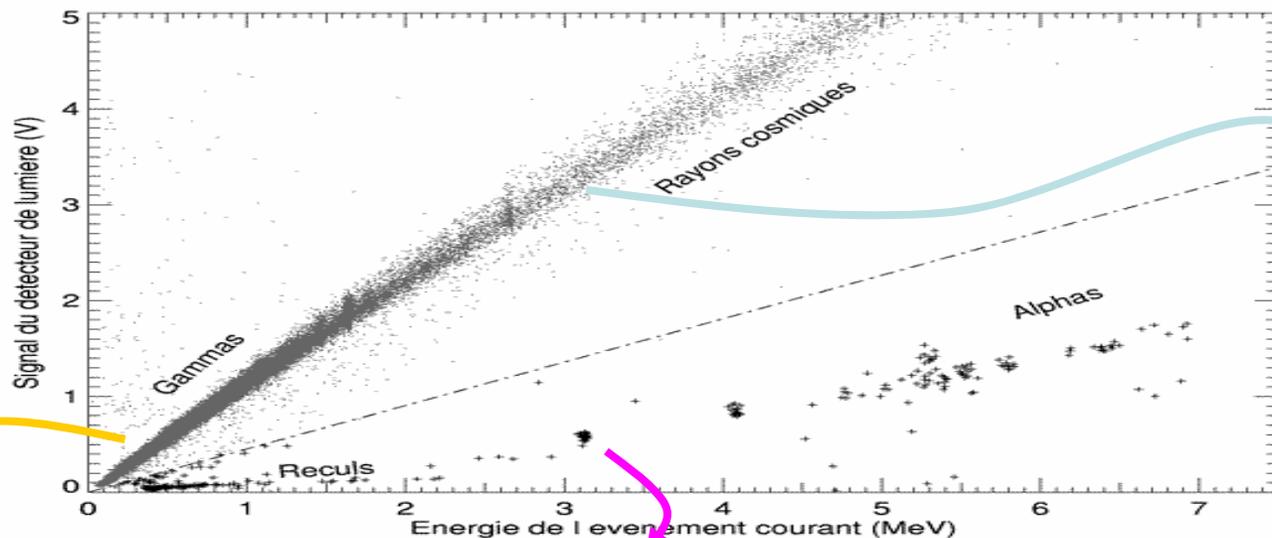
BGO à « haute » énergie: 7 (évts Bi-zarres)!



Heures
d'arrivée



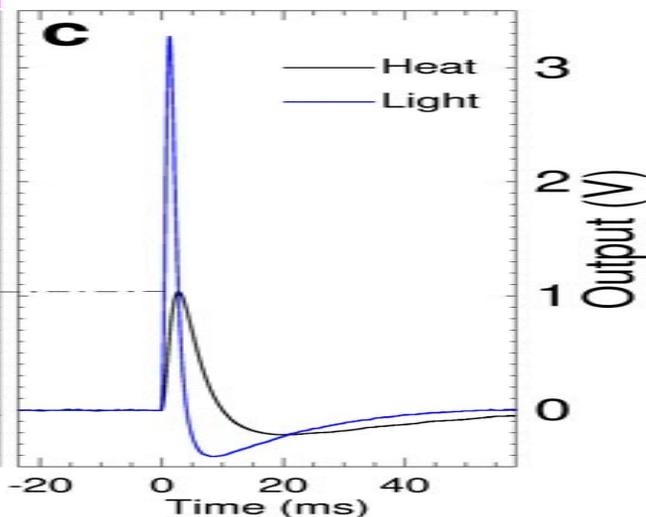
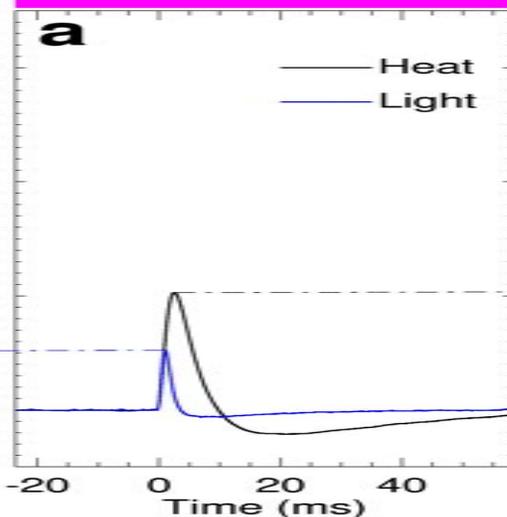
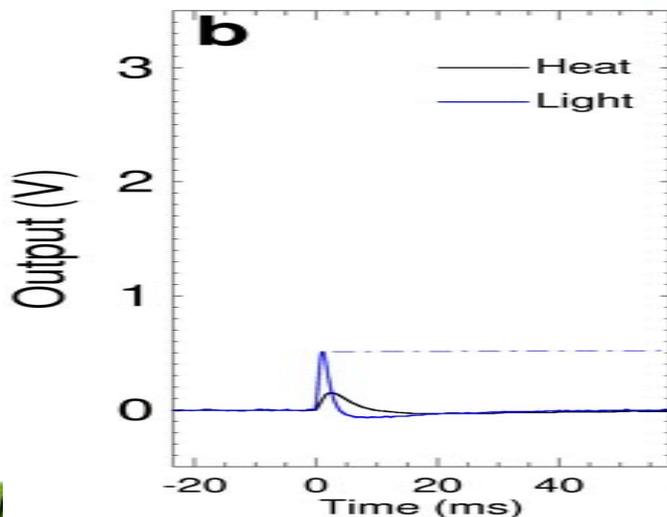
Diagramme de discrimination dans 46g BGO (5j)



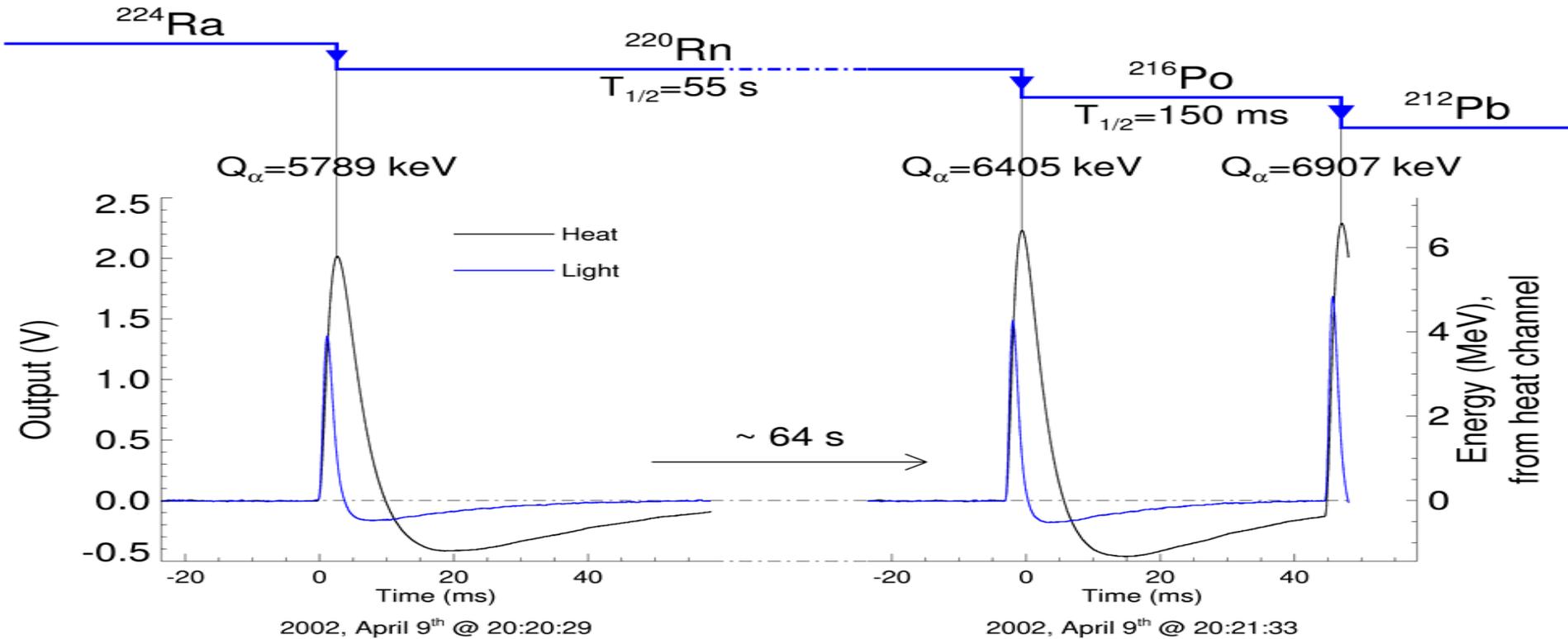
Gamma ray
E~500 keV

²⁰⁹Bi decay
E~3137 keV

Cosmic ray event
E~3.4 MeV



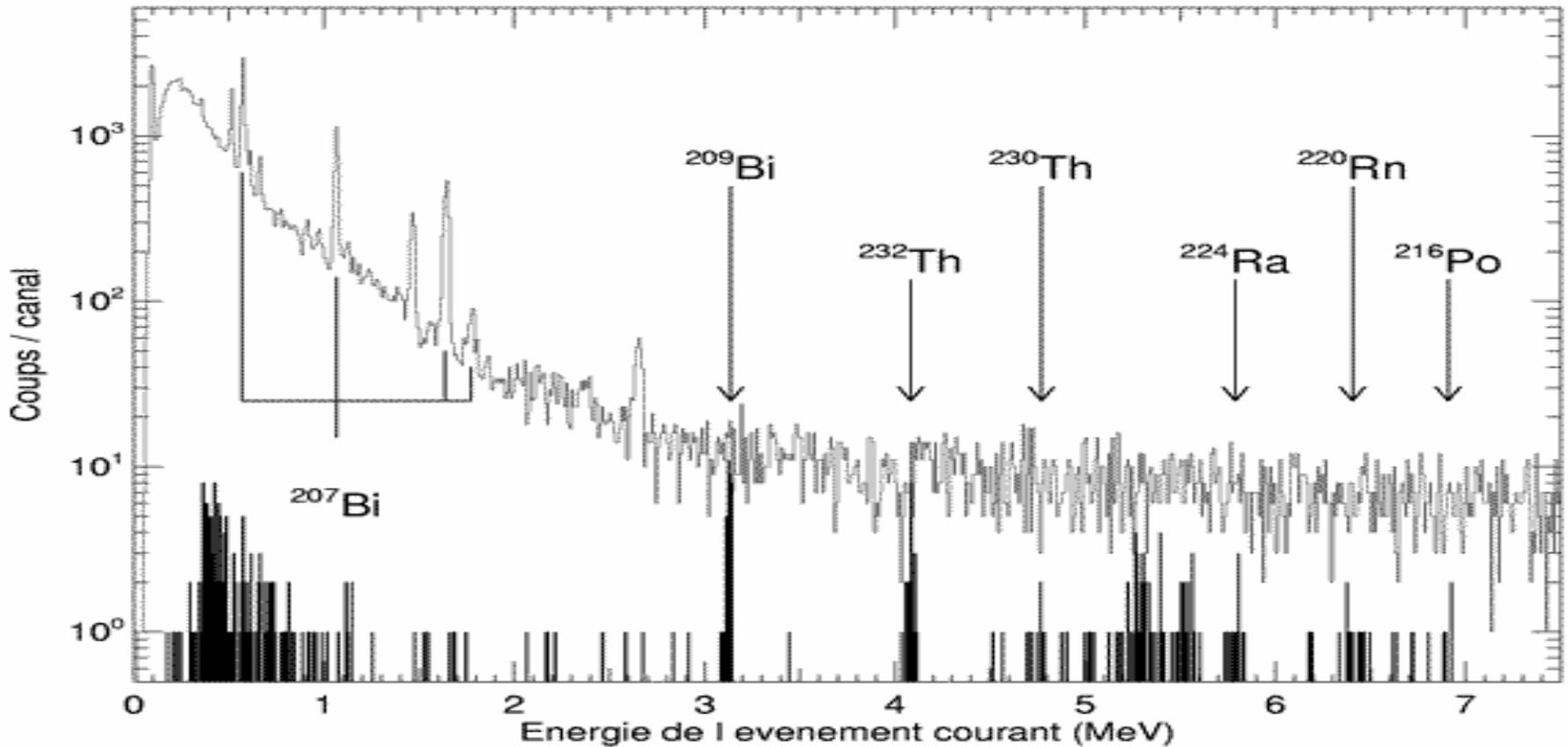
Identification par cascades α



Une triple signature unique !



Spectres dans 46g BGO



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

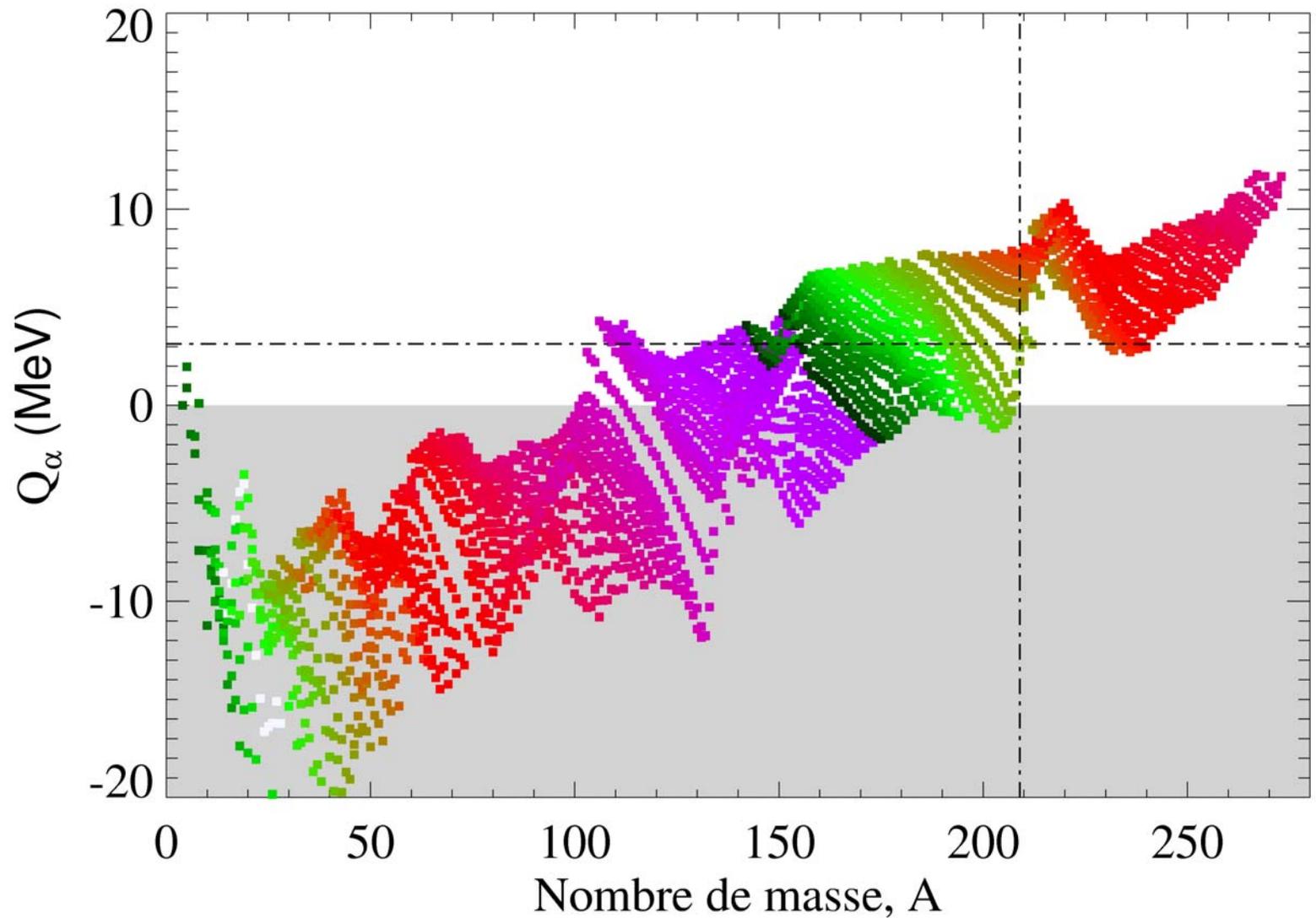
^{209}Bi



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

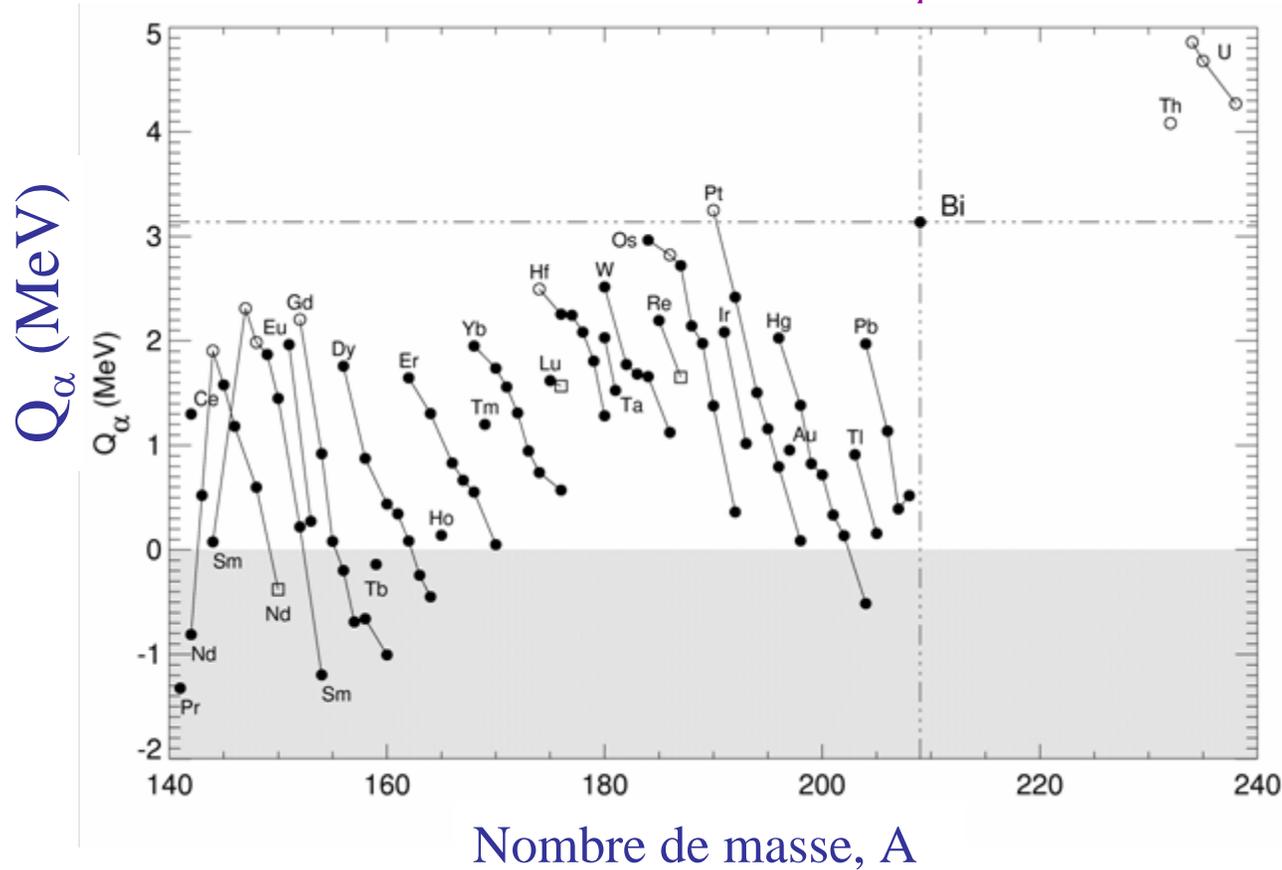
$$T_{1/2} = 1.44 - 1.95 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

Isotopes & excès de masse « α », Q_α



Isotopes lourds stables, Q_α

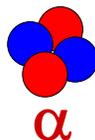
d'après Tables Audi et al. (1997)



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

3077 keV

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

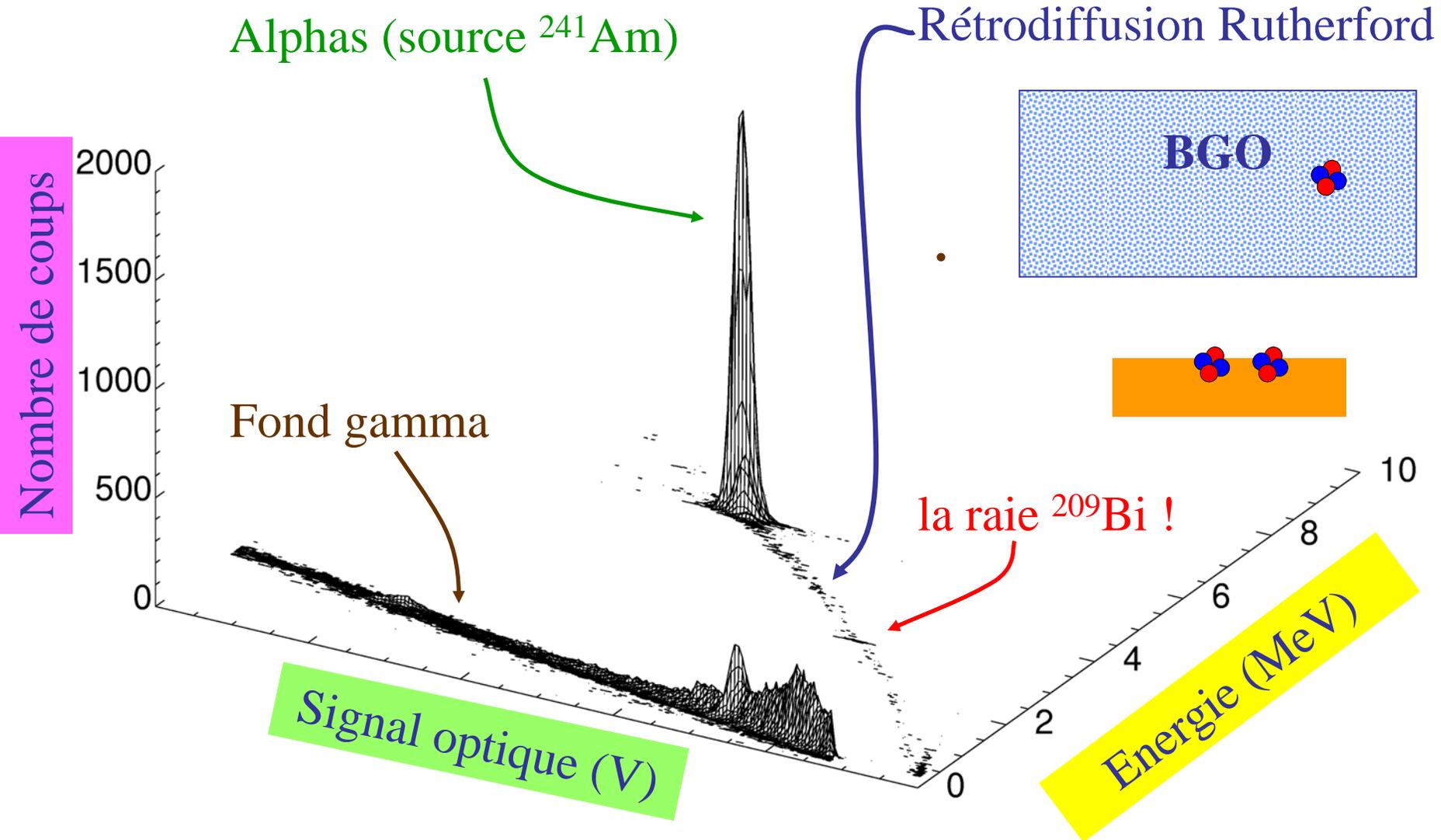


60 keV

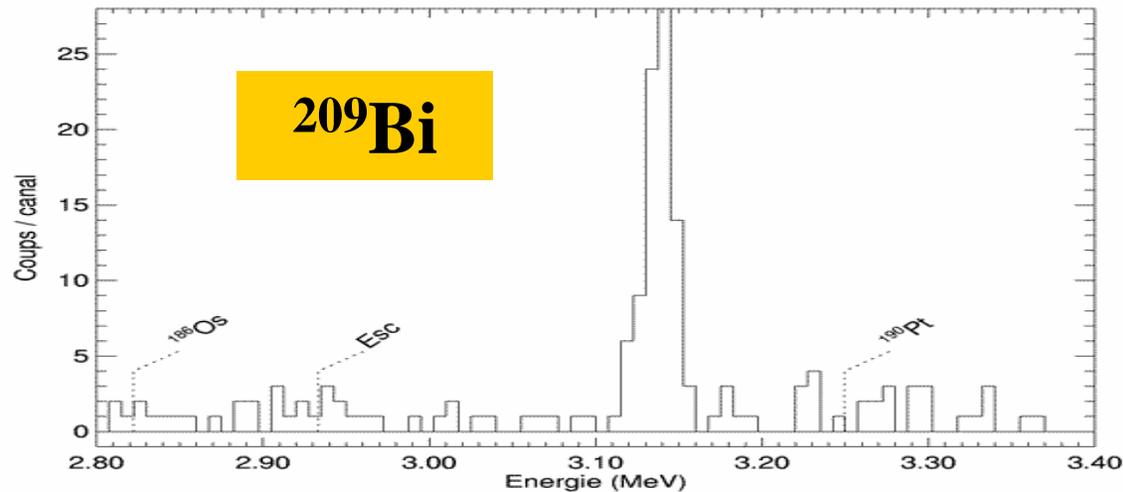
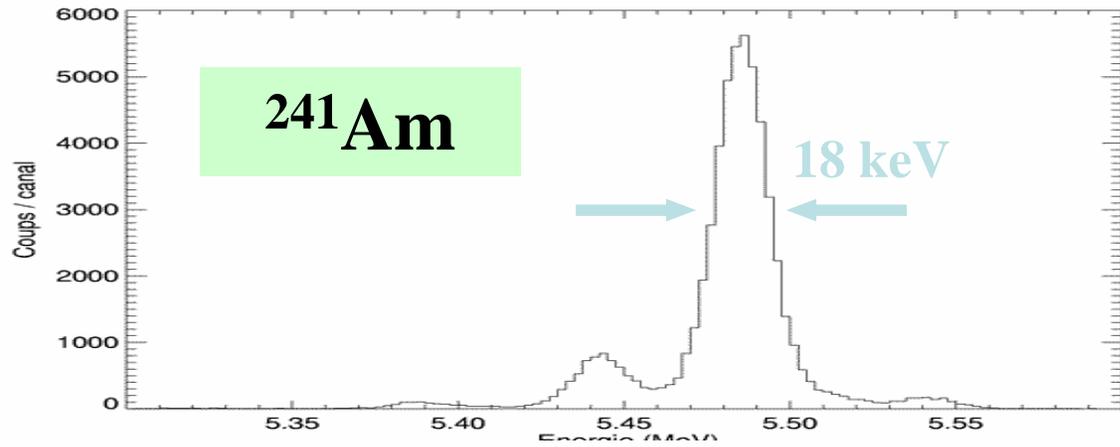
$R \approx 200 \text{ \AA}$



Discrimination dans 91g BGO



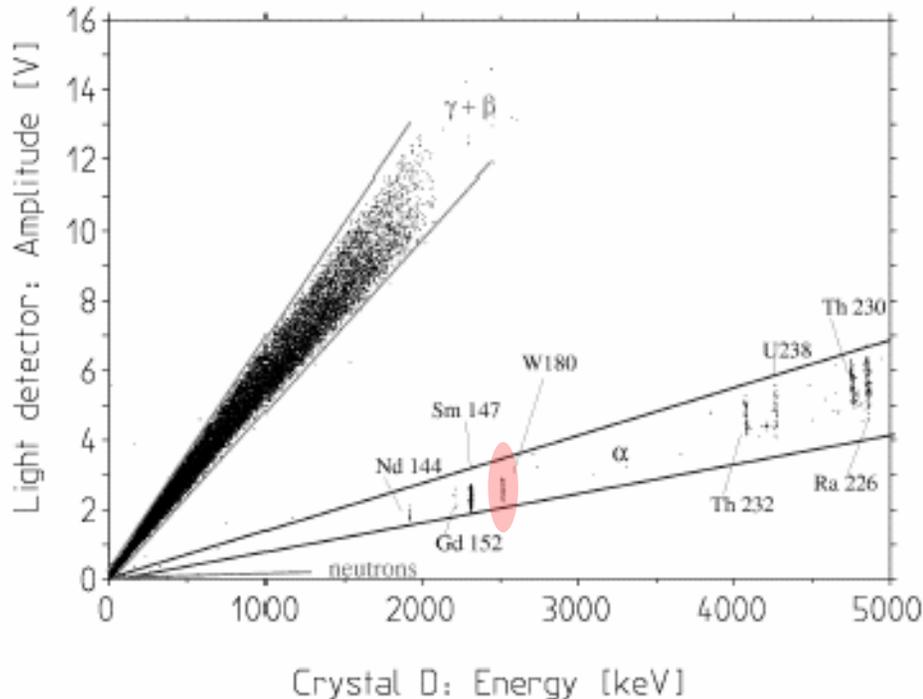
Spectres alphas finaux



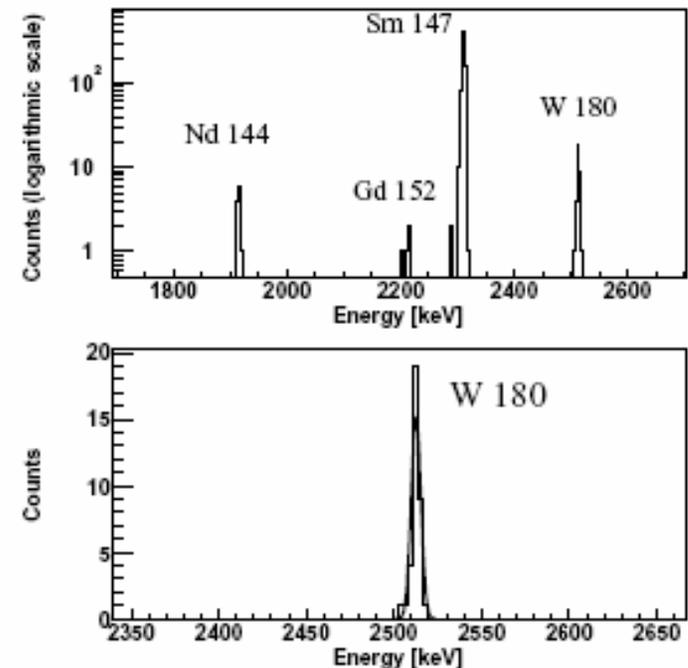
$Q_\alpha = 3137 \pm 1 \text{ (stat.)} \pm 2 \text{ (syst.) keV}$
 $T_{1/2} = 1.9 \pm 0.2 \cdot 10^{19} \text{ ans}$

Au tour de ^{180}W ... (collaboration CRESST en 2004)

Fond haute énergie dans un bolomètre CaWO_4 de CRESST



Spectres α



« The natural -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)**