

# Détection de Rayonnement à Très Basse Température

## Introduction Générale

# Détecteurs de rayonnement refroidis à TBT

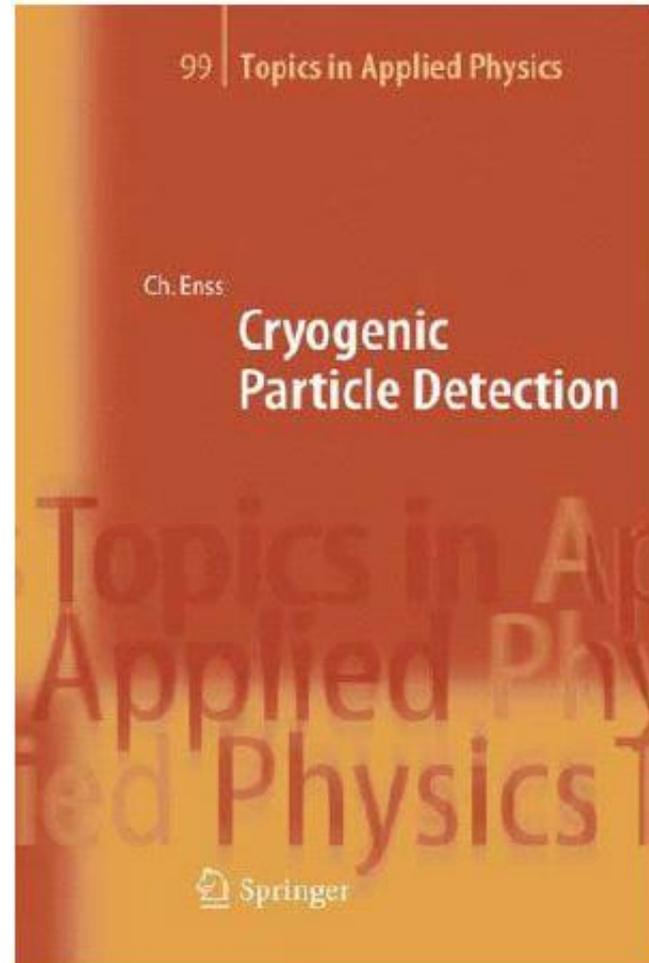
- **Masse ?**  $\mu\text{g} \rightarrow \text{kg}$ : **9 ordres de grandeur !**
- **Constitution cible ?** métaux, semi-métaux, isolants, semi-conducteurs, supraconducteurs...
- **Mesure ?** **de l'eV à 100 GeV; de  $10^{-18}$  W au  $\mu\text{W}$  à mieux que 1%**
- **Rayonnement ?** particules ionisantes, non-ionisantes, photons submm $\rightarrow$ gamma...
- **Sensibilité ?** extrême à froid
- **Âge ?** 125 ans (bolomètres IR), 20 ans (particules), 3 ans (KIDs)
- **Habitât ?** colonise tunnels, labos, montagnes, satellites...
- **Distinctions ?** capables de  
**pouvoirs de résolutions  $> 1000$  en spectroscopie X, alpha**  
**mesurer des  $\mu\text{K}$**  (corps noir cosmologique) et demain des fractions de  $\mu\text{K}$ ...  
mesurer des **durée de vie rarissimes de radioisotopes de  $10^{19}$  à  $10^{26}$  ans**

Compte-rendus LTD 12 (2007)



1.6kg...

La première monographie (2005)



+ 850g

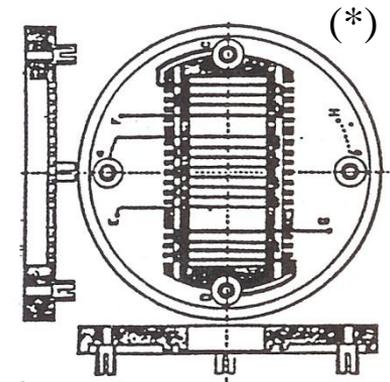
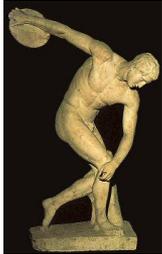
- ❑ Historique
  
- ❑ Principes fondamentaux de la détection à TBT
  - pourquoi refroidir ?
    - ❑ Techniques cryogéniques courantes
    - ❑ Sélection des matériaux des détecteurs
      - ❑ par leurs propriétés à très basse température
    - ❑ Suivi thermométrique
  
- ❑ Applications
  - ❑ Spectroscopies  $X$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ , ions lourds (& reculs), neutrons
  - ❑ 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
    - ❑ Désintégrations rarissimes
  - ❑ Tendances: polarisation du CMB, matrices
  - ❑ ...

## □ Historique

- Le premier bolomètre: Samuel Langley (1881)

- Étymologie:

- bolè=radiation, trait, trajectoire  
cf. discobole, bolide, parabole, balistique
- Metron=mesure



« *J'ai essayé d'inventer quelque chose de plus sensible que la thermopile, qui soit en même temps aussi précis, et qui soit essentiellement un « mètre » et non un simple indicateur de la présence d'une faible radiation. Cette distinction est importante.* »

- Vise le proche infrarouge & le spectre solaire à ses débuts
- Autres appellations (prêtant à confusion !):  
*balance actinique (très désuet), radiomètre, (vrai)calorimètre*
- « Magnitude bolométrique » → absence de sélectivité spectrale

Le bolomètre réalise la **conversion d'énergie incidente en agitation thermique** et la **mesure électrique de l'élévation de température** associée.

(\*) Absorbteur: Ruban de Pt (4 $\mu$ m), noirci; Lecture: R(T) dans un pont de Wheatstone

- 1881: 1<sup>er</sup> bolomètre (S. Langley)
- 1903: Radioactivité & chaleur (P. Curie et André Laborde)
  - P limite mesurable  $\approx 10^{-4}$  W
- 1908: Liquéfaction de l' hélium (K. Omnes)
- 1912: Théorie de la chaleur spécifique (Debye, complétant Einstein)
- 1935: sensibilité  $\uparrow$  quand T  $\downarrow$  (F. Simon)
- 1947: théorie du bolomètre (R. C. Jones)
- 1951: réfrigérateur à dilution (Fritz London)
- 1961: 1<sup>er</sup> bolomètre Ge à 1.2K (F. Low)
  - essor de l' astronomie IR
- 1974: saut de T à 15mK sur cosmiques (T. Niinikosky)
- 1984: premier spectre X à 1.2K (D. McCammon et al.)
- 1985: premier spectre alpha à 1.2K (N. Coron et al.)

# Radioactivité & calorimétrie: une association centenaire

Pierre Curie et André Laborde  
CR Acad. Sciences, mars 1903

SUR LA  
CHALEUR DÉGAGÉE SPONTANÉMENT

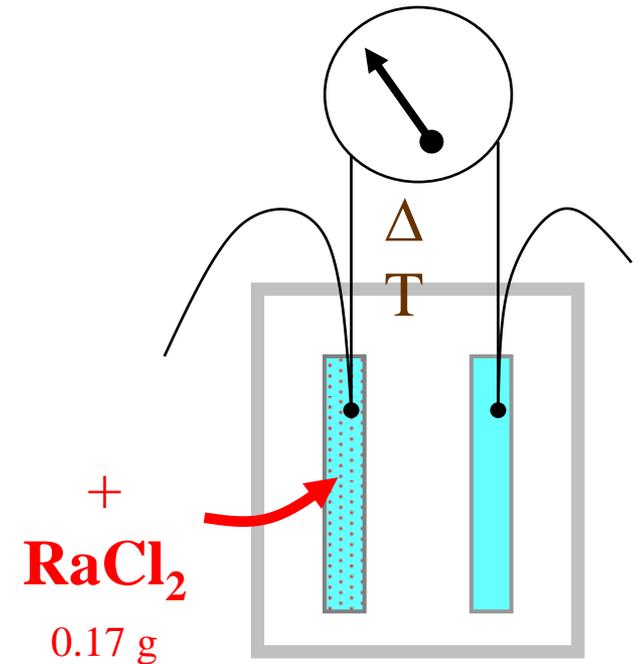
PAR LES SELS DE RADIUM.

En commun avec A. LABORDE.

Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CXXXVI, p. 673,  
séance du 16 mars 1903.

Nous avons constaté que les sels de radium dégagent de la chaleur d'une manière continue.

Un couple thermo-électrique, fer-constantan, dont une des soudures est entourée de chlorure de baryum radifère, et dont l'autre est entourée de chlorure de baryum pur, accuse en effet une différence de température entre les deux corps.



Sensibilités :

- ✓ en 1903:  $10^{-4}$  W (100  $\mu$ W)
- ✓ en 2003:  $10^{-18}$  W (en 1 s)

Bolomètres → gain de 14 ordres de grandeur en 100 ans !

## Application of Low Temperature Calorimetry to Radioactive Measurements

It is often of importance to determine in absolute measure energy changes connected with radioactive transformations, but only in a few cases has it been possible to employ calorimetric methods for this purpose, since in general the amounts of energy liberated in unit time are too small. The sensitivity of calorimetric measurement can be increased, however, by many orders of magnitude by working at very low temperatures, and it may be worth while to point this out, as low temperature technique is now within the reach of non-specialised laboratories.

With such increased sensitivity, various problems can be attacked, and experiments in this direction are in progress at the Clarendon Laboratory.

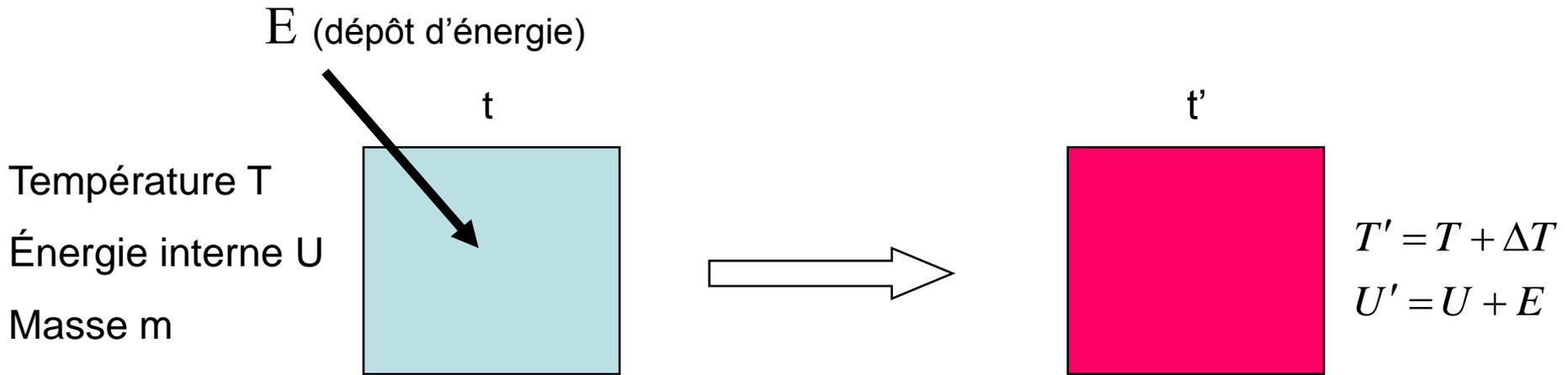
F. SIMON.

Clarendon Laboratory,  
Oxford.  
March 28.

# □ Principes fondamentaux de la détection

- pourquoi refroidir ?

# Principe de la détection



$$\Delta T = \frac{E}{C_{(T)}} = \frac{E}{m \times c_{(T)}}$$

Thermodynamique

$$E = \Delta U = C_{(T)} \Delta T$$

Capacité calorifique ( $\text{J.K}^{-1}$ )

Chaleur spécifique

$$C_{(T)} = m \times c_{(T)}$$
$$\lim_{T \rightarrow 0} c_{(T)} = 0$$

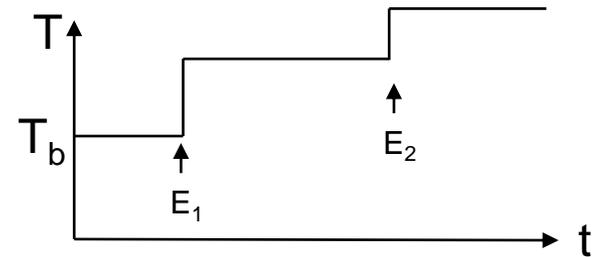
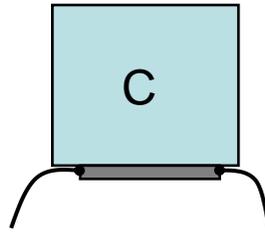
Thermométrie :

- proportionnalité directe  $\Delta T$  &  $E$  ( $\ll U$ )
- intérêt à refroidir:
  - sensibilité
  - compense l'utilisation de cibles massives (recherches d'événements très rares)

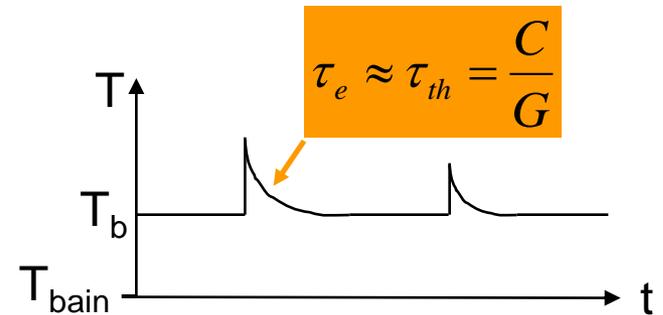
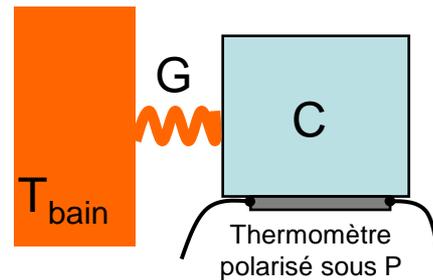
# Principe de la détection

## Détecteur isolé

(ce qui n'arrive jamais !)



## Détecteur couplé



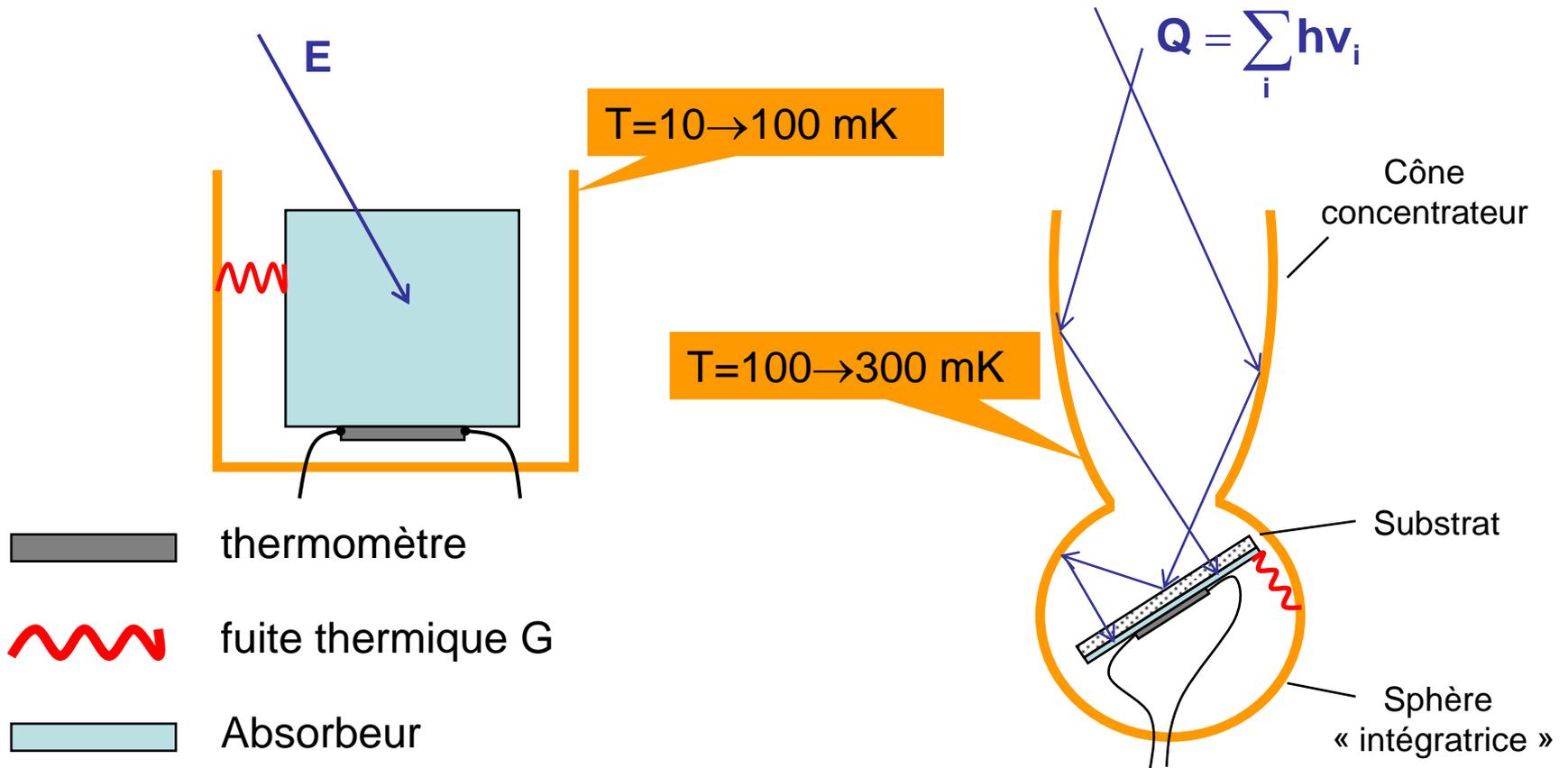
- ❑  $G$  = conductance thermique (« fuite » thermique)
- ❑ « encaisse » le gradient thermique  $T_b - T_{bain}$  lié à la puissance de polarisation  $P$

$$P = G \times (T_b - T_{bain})$$

→ couplage du détecteur à la référence  $T_{bain}$  (platine réfrigérateur)

- ❑ évacue le surplus d'énergie (reset thermique) avec la constante de temps  $\approx \tau_{th}$

# Détection de particules ou de photons: un $\approx$ même détecteur !



- détection de photons  $\rightarrow$  film résistif sur un substrat
- détection de particules:  $\approx$  tout est permis !

+ système de suspension (non représenté)

# Palette de bolomètres (IAS)

Détection de photons  
sub-mm

Détection de particules



- Bruit thermodynamique

Fluctuations de l'énergie interne du détecteur

$$\Delta U_{rms} = \sqrt{k_B T^2 C}$$

- Bruit Johnson aux bornes des résistances

Densité spectrale

$$S_V = \sqrt{4k_B TR} \quad (nV/\sqrt{Hz})$$

→ Sensibilité, résolution  $\propto \sqrt{k_B T^2 C_{cible}}$

- 1) Absence de fenêtre → pas de « straggling »
- 2) Choix de la cible
- 3) Récupération de la majeure partie de l'énergie
- 4) Résolution en énergie
- 5) Sensibilité
- 6) Linéarité
- 7) Pas (ou très peu) de sélectivité de la réponse
  - sur particules
    - Particules non ionisantes (reculs, ions lourds, molécules) !
  - spectrale (détection de photons)
- 8) Calorimétrie absolue possible sur faisceau
  - Intégration
- 9) Peu sensibles aux dommages sous irradiations

## 1) Lenteur

$$\tau \approx \text{qq. } 10\mu\text{s} \rightarrow \text{qq. } 100\text{ms}$$

c'est intrinsèque !

Taux de comptage max  $\approx$  qq. 10kHz au grand maximum\*

\* au détriment de la résolution

Raison:

**la chaleur ne peut pas se propager plus vite que la vitesse du son dans le milieu (qq. Km/sec)  $\propto$**

$\propto$  les bolomètres métalliques (encore émergents en 2005) seront sans doute les plus rapides (vitesse des porteurs  $\gg$  vitesse du son)

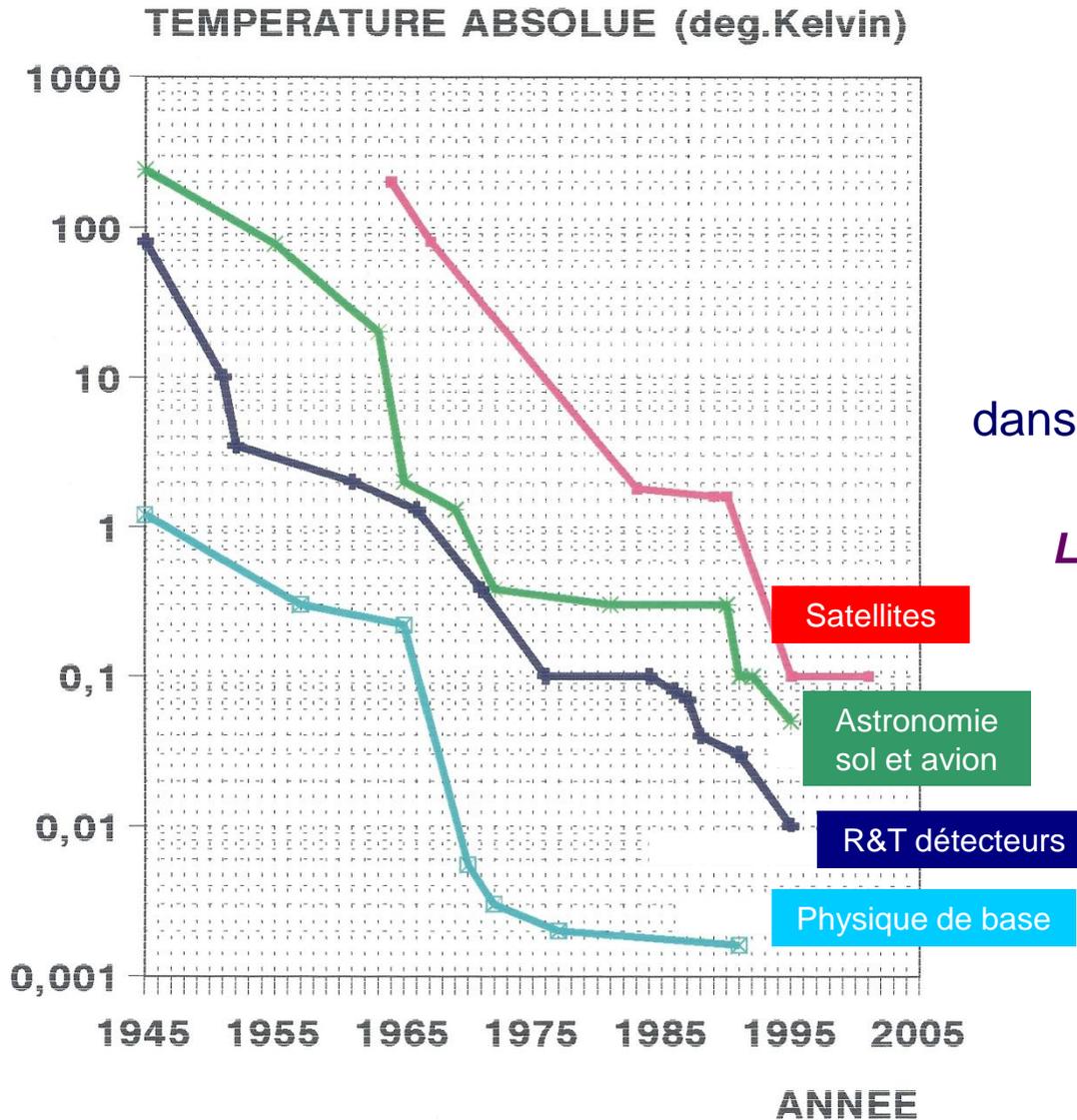
## 2) Cryogénie indispensable

→ Maîtrise des techniques de réfrigération

→ Des solutions «pousse bouton » arrivent sur le marché !

□ Techniques cryogéniques courantes en bolométrie

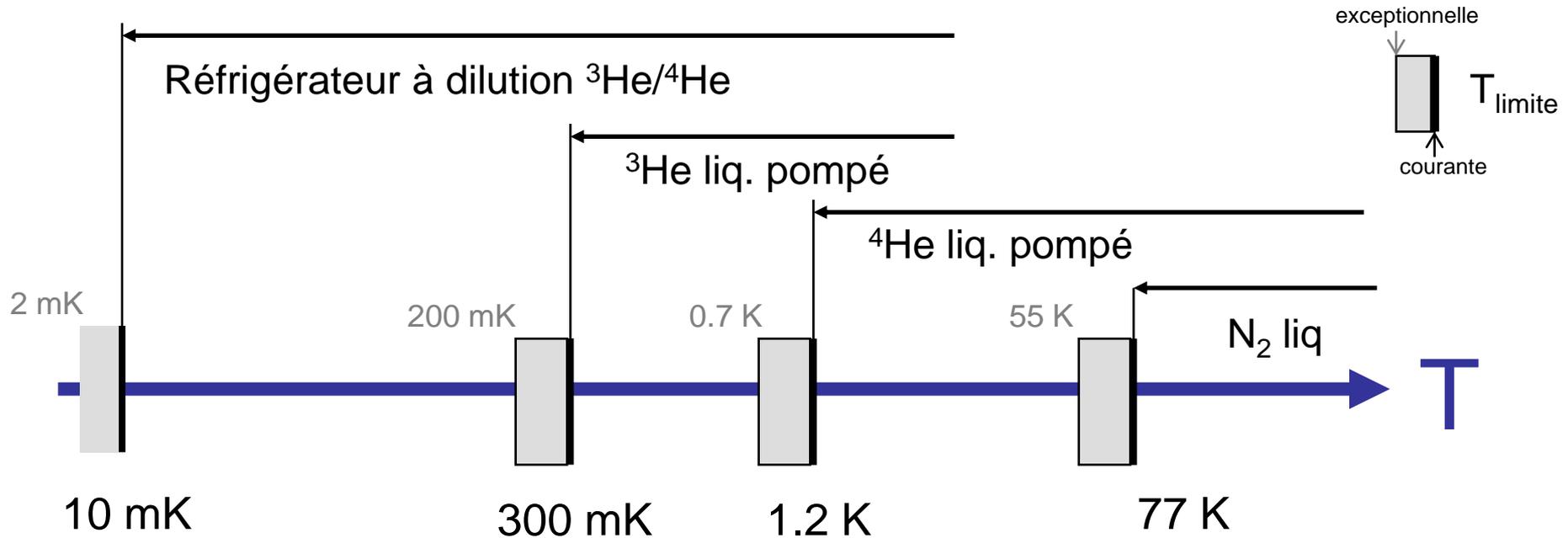
# La course aux basses températures...



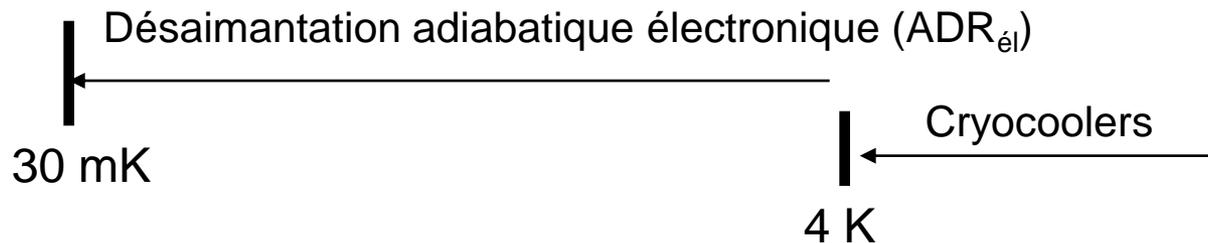
Températures minimum  
obtenues en continu  
dans différents secteurs de recherche

*Noël Coron & PM (1991)  
Lettre d'Ultimatech (CNRS) n°3*

# Techniques de réfrigération en continu



❑ des solutions « tout électrique » commencent à exister (adaptées pour tous bolomètres ?)



## ❑ Sélection des matériaux du bolomètre

- par leurs propriétés à très basse température

# Chaleurs spécifiques $C(T)$ aux basses températures

---

## □ Diélectriques (isolants) et semi- conducteurs intrinsèques

$$C(T) = C_{\text{réseau cristallin}} = aT^3$$

## □ Métaux

$$C(T) = C_{\text{réseau cristallin}} + C_{\text{électrons}} = aT^3 + \gamma T$$

## □ Supraconducteurs

$$T > T_c$$

$$T < T_c \quad C(T) = aT^3 + 8.5 \gamma T_c \exp\left(-1.44 \frac{T_c}{T}\right)$$

## □ Colles, plastiques, verres, alliages...

$$C(T) = c_1 T + c_3 T^3$$

# Le succès des bolomètres, une histoire de quanta

Détecteur	Produits de l'interaction	Dépense énergétique par quantum d'information (QE).
Scintillateur	Photons visibles	<b>100 eV → 1 keV</b>
Compteur proportionnel	Ions	<b>10 eV → 30 eV</b>
Semi-conducteur	Paires électrons-trous	<b>3 eV - 4 eV</b>
<b>STJ : Jonction tunnel supra</b>	<b>Quasi-particules (« paires de Cooper » brisées)</b>	<b><math>10^{-3}</math> eV</b>
<b>Bolomètre à cible isolante</b>	<b>Phonons</b>	<b><math>10^{-5}</math> eV à <math>10^{-4}</math> eV</b>
<b>Bolomètre à cible métallique</b>	<b>Excitation d'électrons de conduction</b>	<b><math>\ll 10^{-5}</math> eV</b>



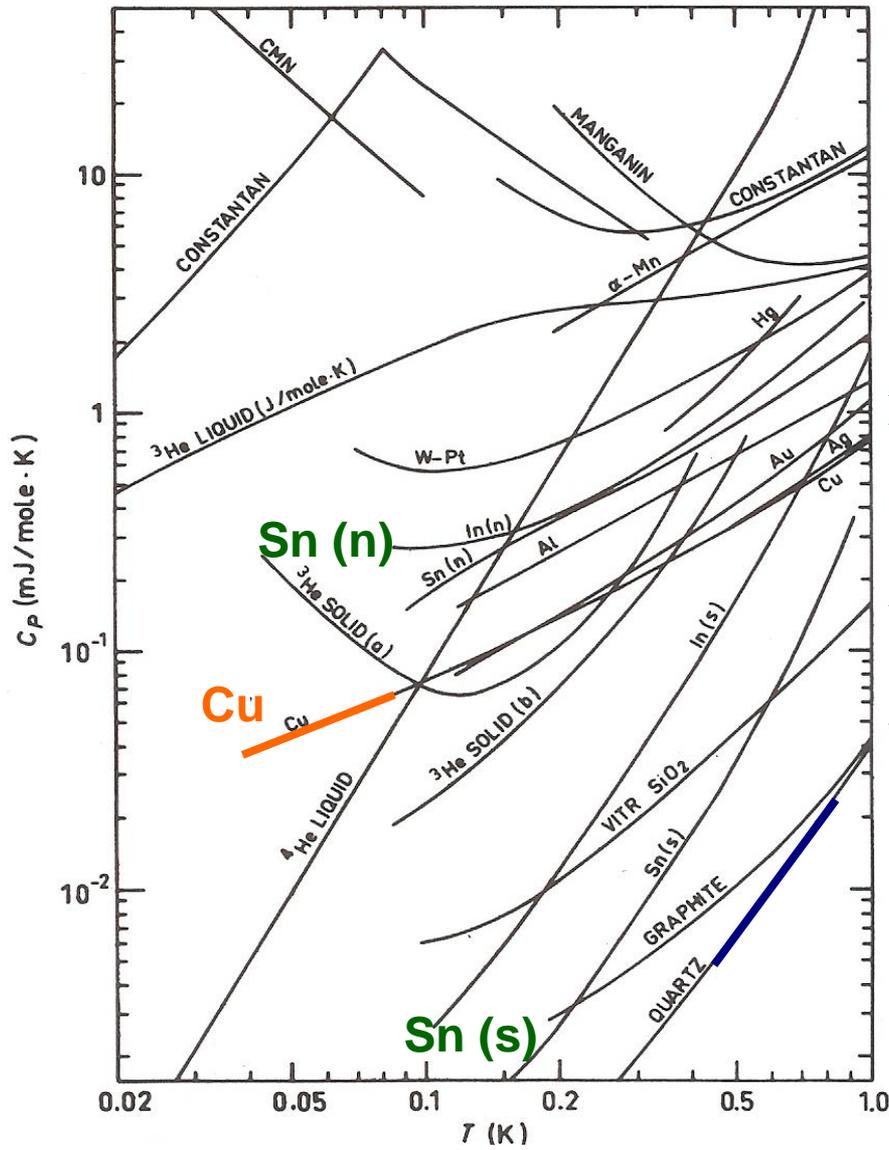
Détecteurs refroidis

Rappel: contribution statistique au pouvoir ultime de résolution :

$$E/\Delta E \approx \sqrt{n} \quad \text{avec} \quad n = E/QE$$

*Elvire Leblanc (2003)*

# Chaleur spécifique des matériaux de 20mK à 1K



Alliages

métaux: Cu, Ag, Au, Sn & In (normal)

Note:  $C_{supra} \ll C_{normal}$  !

Différence état vitreux (silice)/cristallin (quartz)

métaux

isolants

Lähtenmäki (1973)

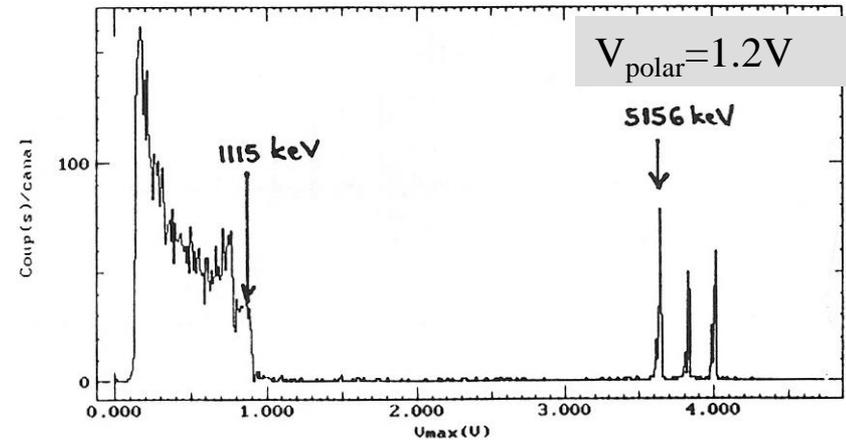
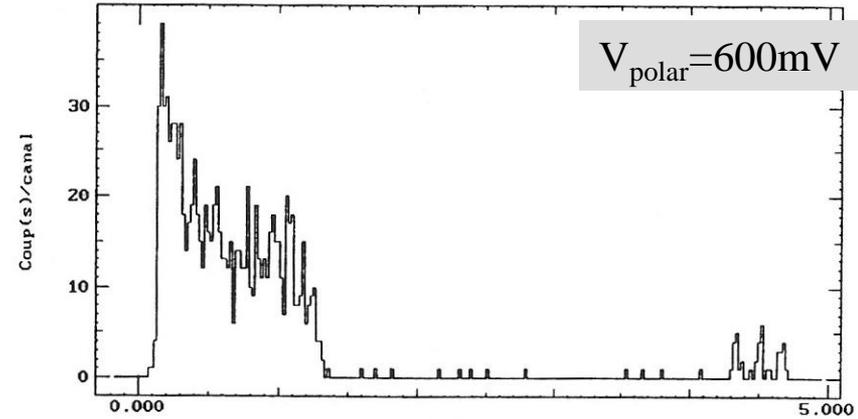
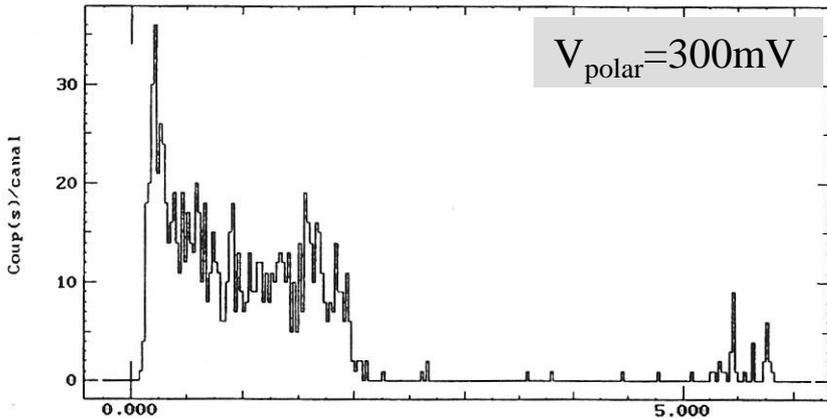
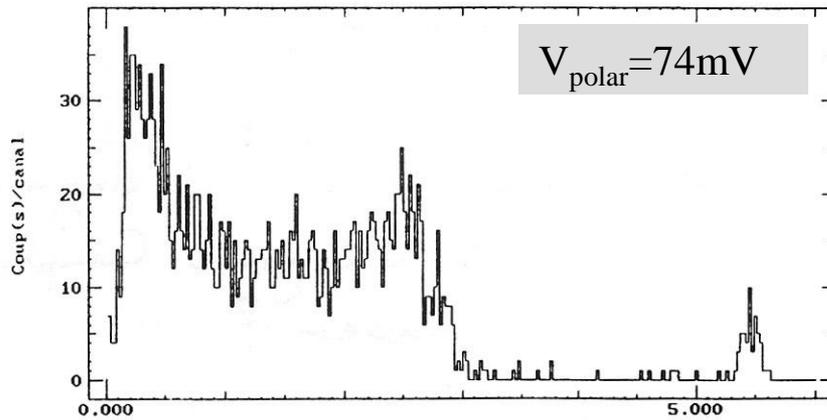


# Une comparaison instructive: cibles saphir & cuivre

	Capacité calorifique J. K <sup>-1</sup>	Résolution ultime thermodynamique	Énergie interne U $\int_0^T C dT$	Linéarité $\frac{\Delta T}{T}$	& signal !
1.2 kg saphir (monocristal Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ); A≈10 <sup>-4</sup> J. K <sup>-4</sup>					
T	$C(T) = AT^3$	$\Delta U_{rms}^{th} = \sqrt{kT^2 C}$	$U = AT^4/4$	$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta E}{4U}$ pour ΔE=10 keV	
10 mK	10 <sup>-10</sup>	2.4 eV	1.5 MeV	0.3 %	
100 mK	10 <sup>-7</sup>	740 eV	15 GeV	3 10 <sup>-7</sup>	
300 mK	3 10 <sup>-6</sup>	12 keV	1.2 TeV	2.1 10 <sup>-9</sup>	
1 K	10 <sup>-4</sup>	240 keV	15 TeV	3 10 <sup>-11</sup>	
1mg Cu (pastille Ø=2.2 mm ; e=30µm); γ≈10 <sup>-8</sup> J. K <sup>-2</sup>					
T	$C(T) = \gamma T$	$\Delta U_{rms}^{th} = \sqrt{kT^2 C}$	$U = \gamma \frac{T^2}{2}$	$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta E}{2U}$ pour ΔE=5 MeV	
10 mK	10 <sup>-10</sup>	2.3 eV	3.13 MeV	80 %	
100 mK	10 <sup>-9</sup>	73.4 eV	313 MeV	0.8 %	
300 mK	3. 10 <sup>-9</sup>	382 eV	2.8 GeV	9 10 <sup>-4</sup>	
1 K	10 <sup>-8</sup>	2.32 keV	31.3 GeV	8 10 <sup>-5</sup>	



# Linéarité (par l'exemple)



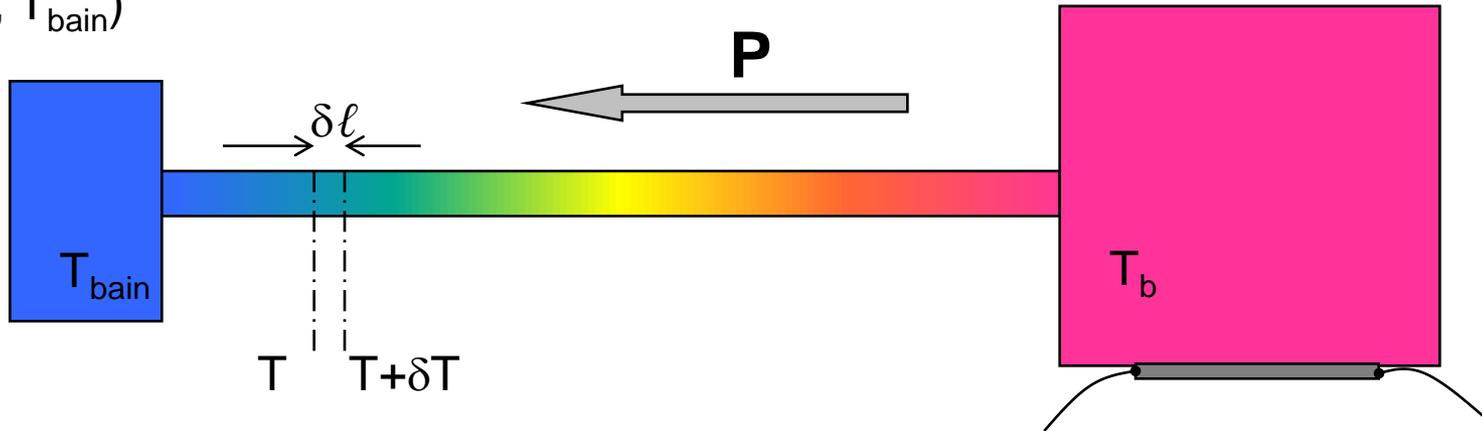
## Bolomètre 2g LiF/Ge-NTD à 30mK sous irradiation $^{60}\text{Co}$ et source triple $\alpha$ (mesures IAS)

en augmentant la tension de polarisation (donc le courant, donc sa température) le bolomètre récupère en linéarité. Dans les configurations « non-linéaires », on observe une forte distortion des constantes de temps (l'aire est alors le bon estimateur de l'énergie: c'est une propriété de l'équation du bilan énergétique)

# Conductance thermique G: plus précisément...

La relation  $P = G \times (T_b - T_{bain})$

définit G (en W. K<sup>-1</sup>) comme une fonction de T<sub>b</sub> et T<sub>bain</sub> : en toute rigueur  
G (T<sub>b</sub>, T<sub>bain</sub>)

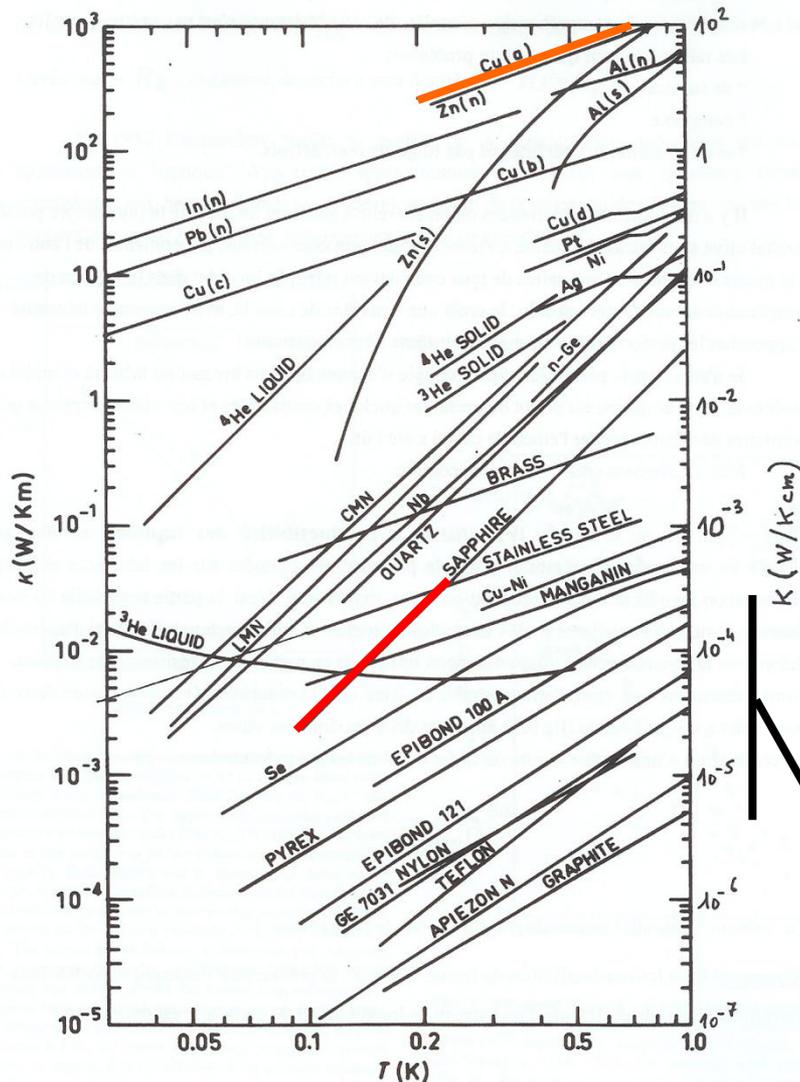


$$\delta T = \frac{P}{A\kappa(T)} \delta l$$

- segment  $\delta l$  de fuite (section A constante, longueur totale L)
- $\kappa(T)$  conductivité thermique (en W. K<sup>-1</sup>. m<sup>-1</sup>)
- cas (très fréquent):  $k(T) = k_0 T^\beta$

$$P = G \times (T_b - T_{bain}) = g_0 (T_b^{\beta+1} - T_{bain}^{\beta+1}) \quad \text{avec} \quad g_0 = \frac{A\kappa_0}{L} \times \frac{1}{\beta+1}$$

# Conductivité thermique des matériaux de 30mK à 1K



Lien avec chaleur spécifique (volumique) :

$$\kappa(T) = \frac{1}{3} C_v v_{\text{porteurs}} \ell \cdot p.m.$$

A très basse T,

▪ Isolants:

- $\ell \cdot p.m. \approx$  taille échantillon
- $V_{\text{porteurs}} = V_{\text{son}}$

▪ Métaux

- $\ell \cdot p.m. \approx$  cste (impuretés)
- $\kappa \propto \sigma$  (loi de Wiedemann-Franz)
- $V_{\text{porteurs}} = V_{\text{Fermi}} \gg V_{\text{son}}$

→  $\kappa \propto C$

Plastiques, colles  
alliages, verres

Lähteenmäki (1973)

# Autres grandeurs thermodynamiques importantes...

- Diffusivité thermique  $\mathcal{D}$  (en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )

- Intervient dans l'équation de diffusion de la chaleur

$$\mathcal{D} = \frac{\mathcal{K}}{C_v}$$

- Faible dépendance en T

- Temps de thermalisation d'un échantillon homogène de taille L

$$\tau \approx \frac{L^2}{\mathcal{D}}$$

- Résistance de Kapitza  $R_K$  (en  $\text{K.W}^{-1}$ )

- Gradient de T aux interfaces (surface  $\Sigma$ )

- liquide-solide
- solide-solide

- Description complexe

- Théorie (dés)adaptation acoustique,...

$$R_K = \frac{\Delta T}{P} \propto \frac{1}{\Sigma T^3}$$

- Coefficients de dilatations thermiques  $\Delta L/L$

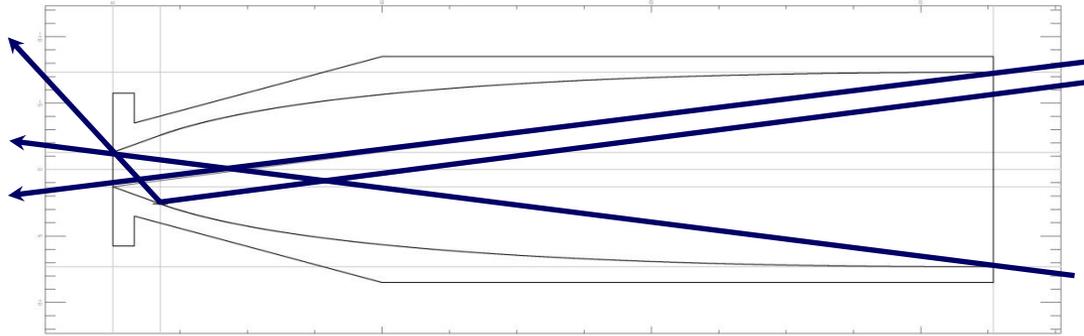
- Quelques % ; peut dépendre de l'orientation cristalline

- Contraintes différentielles  $\rightarrow$  casse !

- Éviter absolument les chocs thermiques  $\rightarrow \pm 1 \text{ K / mn}$  préconisé

□ il y a aussi de l'optique...

Collecteur IAS ( $S\Omega=9\text{mm}^2.\text{sr}$ ; acceptance  $\Theta=15^\circ$ )

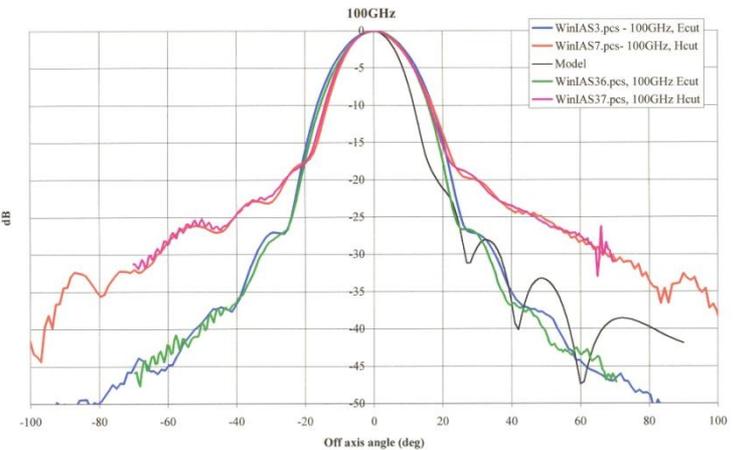


Réalisations bolomètres IAS/collecteurs IR-Lab  
(calibration Planck-HFI)



- optique « non-imageante »
- concentrateurs paraboliques (Winston), cône-paraboliques, « flared »...
- maximise l'étendue de faisceau  $S\Omega$ / taille du bolomètre (tenir C↓)

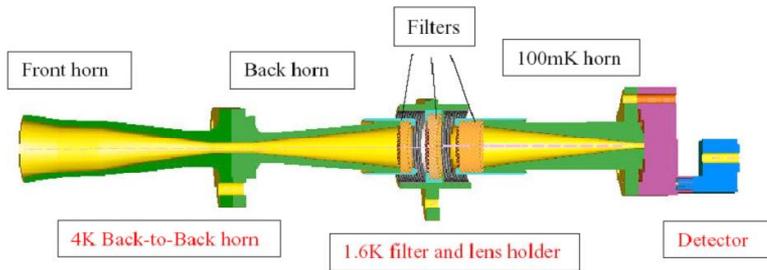
Mesures à Cardiff à 100GHz ( $\lambda=3\text{mm}$ )



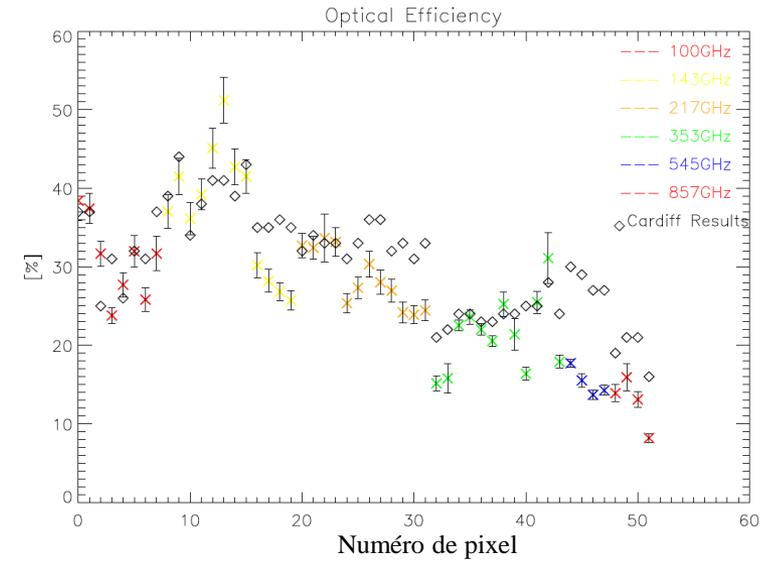
**Profil de deux cones IAS/IR\_lab (B. Mafféi)**  
(avec simulation)

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

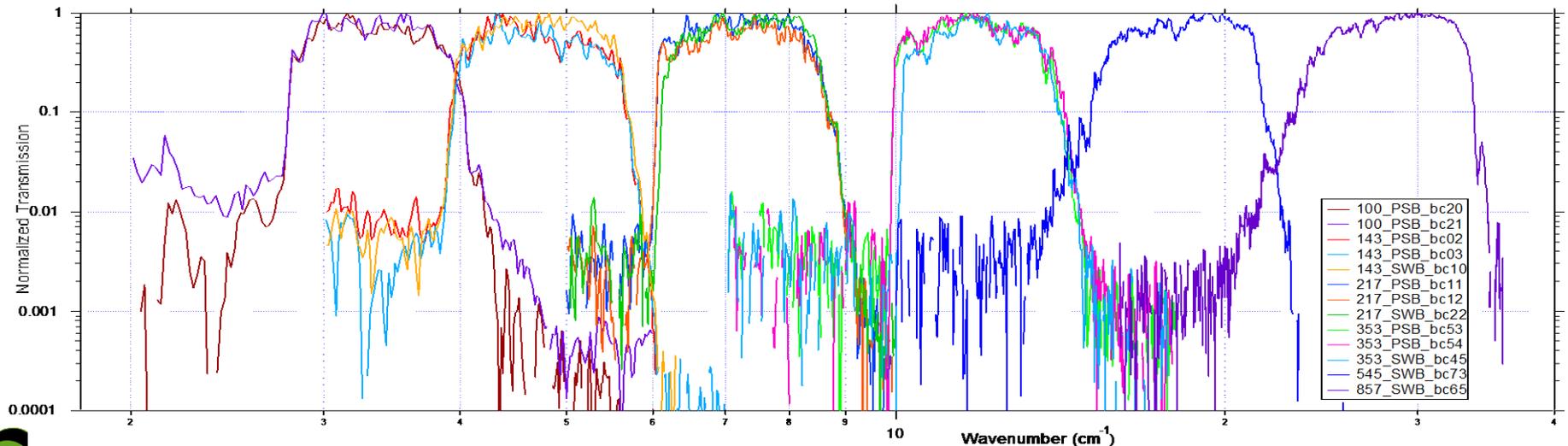
## Chaîne optique



## Efficacité optique



## Transmission spectrale



## □ Suivi thermométrique du bolomètre

- Techniques, principes de lecture

## Thermométrie

- Résistive (thermistors)
  - Haute impédance ( $100\text{k}\Omega \rightarrow 10\text{M}\Omega$ )
    - Ge-NTD ( Neutron Transmuted Dopped)
    - Si implanté
    - $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$
  - Basse impédance ( $10\text{m}\Omega \rightarrow 100\text{m}\Omega$ )
    - TES (Transition Edge Sensor)
- Magnétique
  - Ions magnétiques dans matrice métallique (système Au:Er)

La technologie associée au thermomètre est souvent le point le plus difficile à maîtriser au cours de la conception d'une chaîne de détection bolométrique.

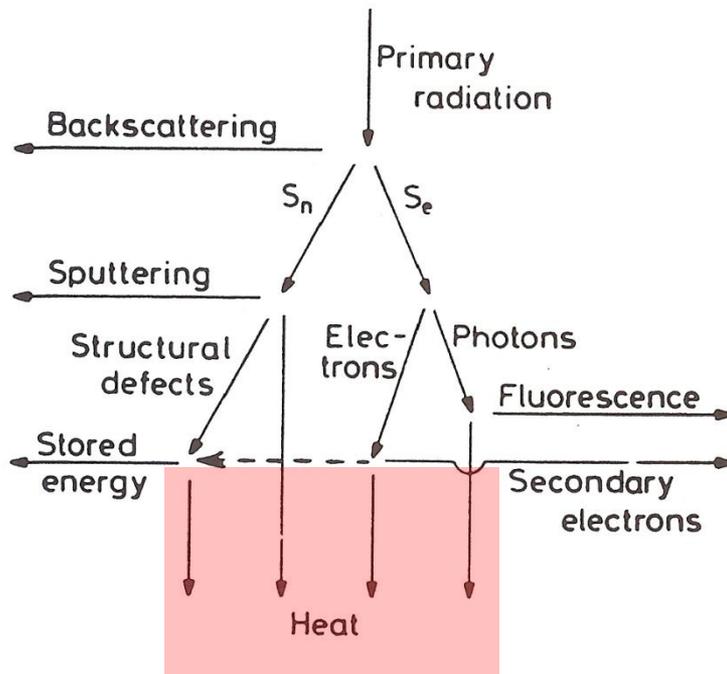
Par rapport à la description du bolomètre idéal (et non lu !), limité au bruit thermodynamique chaque thermomètre va:

- ajouter sa propre capacité calorifique
- ajouter son propre bruit et celui de son électronique de lecture
- changer la constante de temps du détecteur (en plus rapide)

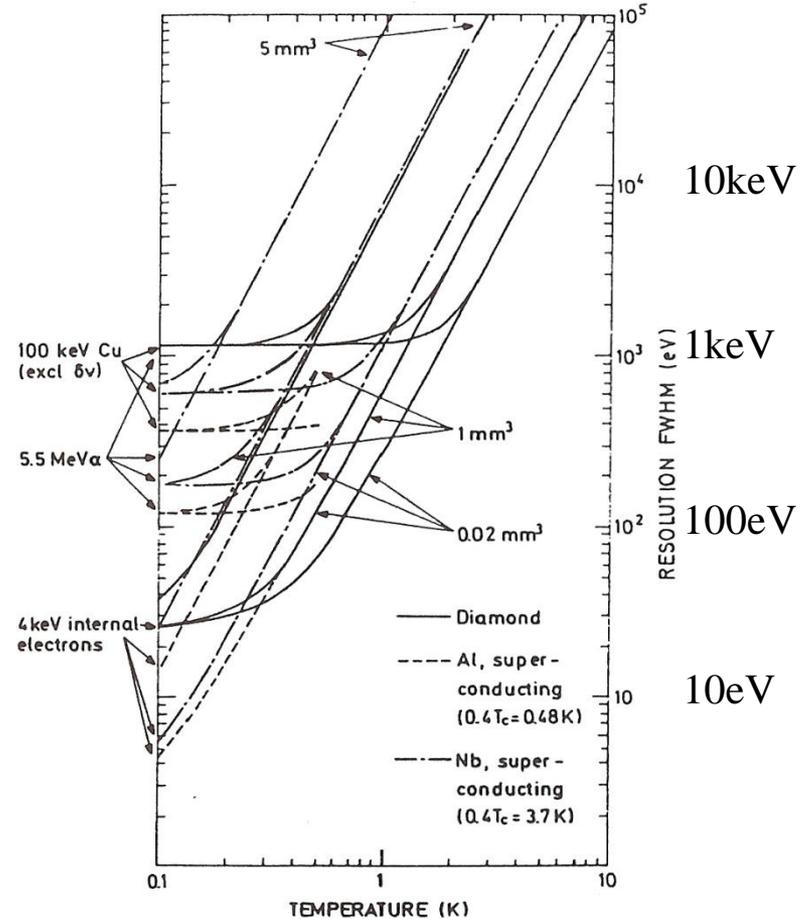
$$\Delta E_{rms} > \sqrt{k_B T^2 C_{cible\ seule}}$$

en général...

L'agitation thermique récupère la plus grande partie de l'énergie incidente



Résolution ultime anticipée sur  $\neq$  particules,  $\neq$  cibles,  $\neq$  tailles

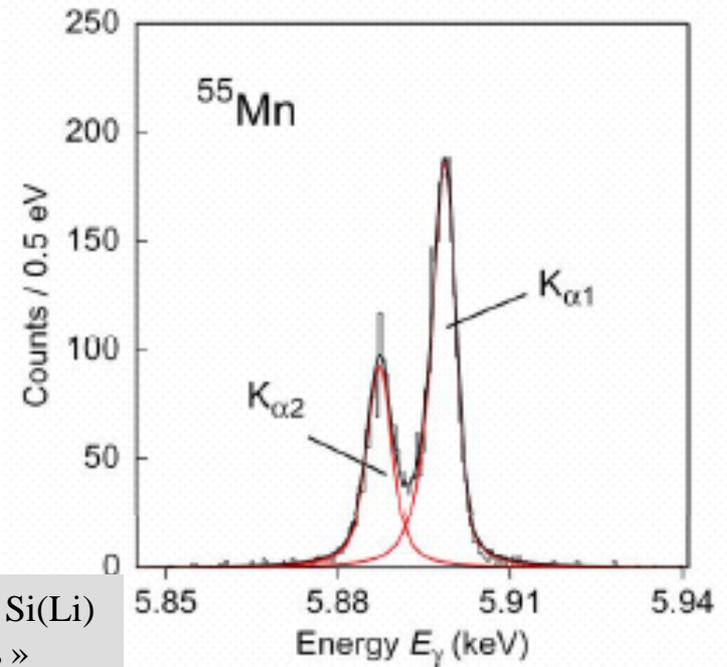
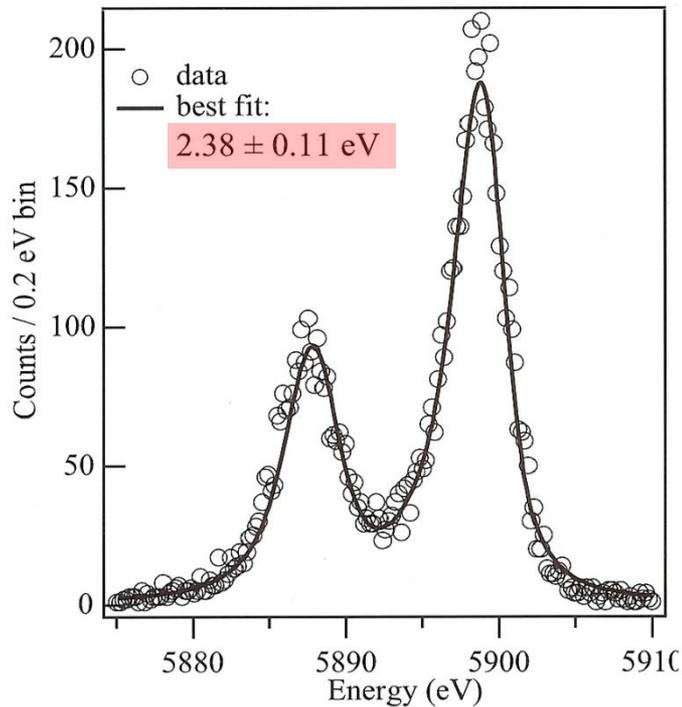


in H.H. Andersen (1986), cité par D. L'Hôte

- très peu d'études systématiques à ce jour du partitionnement, ni de mesures fines
  - **les détecteurs sont calibrés avec le type de particules étudiées**  
[ex: l'équipe STAP/IAS a observé une réponse thermique supérieure  $\alpha / \gamma$  dans  $\text{CaWO}_4$  et BGO (de l'ordre de 7%) ]
- même s'il n'y a pas de recombinaison des paires électrons-trous, on attend une **meilleure résolution dans les bolomètres à cibles semi-conductrices /détecteurs Si & Ge conventionnels** (avec une répartition de l'énergie pour  $\approx 2/3$  en chaleur,  $1/3$  en création de paires, la résolution limite calculable est **au moins 0.55 meilleure**)
- les cibles métalliques ou semi-métalliques (ex. Bi) ont à priori moins de branchements → à privilégier pour la haute résolution
- nouveau champ d'études, abordable probablement par **calorimétrie absolue** (effet Joule)
  - intérêt pour les physiciens des solides (combien d'énergie stockée dans les défauts sous implantation ?)

□ spectroscopie X

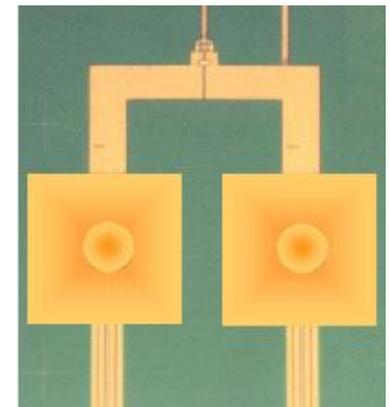
# Spectroscopie X très haute résolution...monopixels



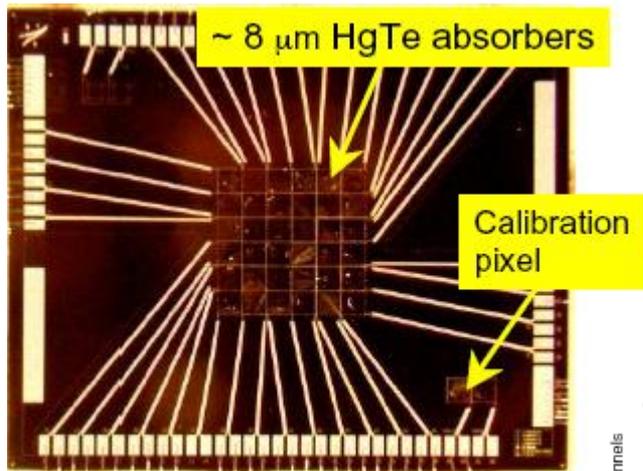
Rappel: les détecteur Si(Li)  
« conventionnels »  
plafonnent à 110eV !

- 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);  $T=35\text{mK}$
- 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

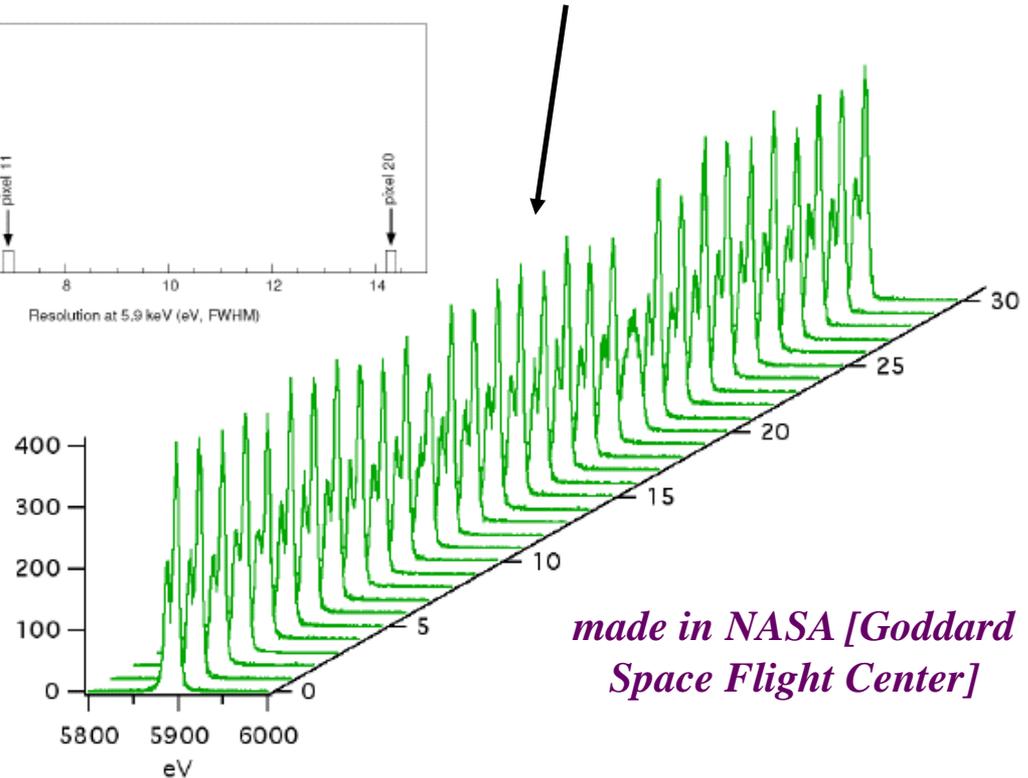
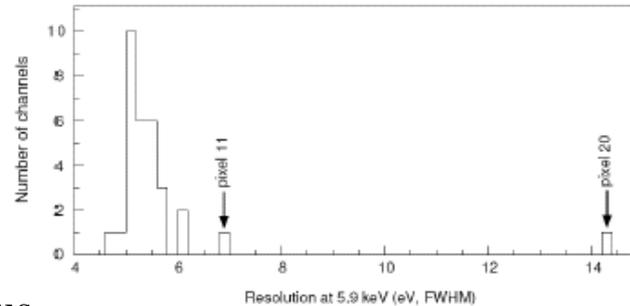


Pixels are 625  $\mu\text{m}$  square, or 30"

- 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) !

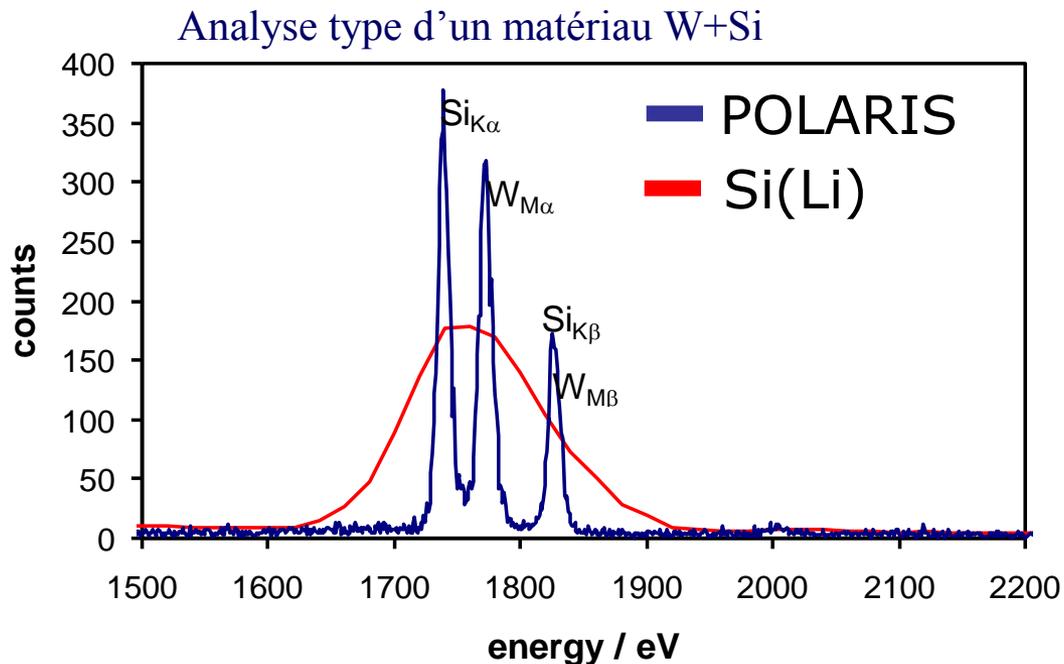
Note: pb. cryogénique  
3 semaines après le lancement  
→ XRS s'est réchauffé !

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



# 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  $\gamma$

# Spectroscopie gamma: meilleurs résultats en résolution

Détecteur	Institut	Résolution
Cible Sn senseur NTD-Ge	SAO, Cambridge, USA LNBL, Berkeley, USA O.A.Vaiana, Palerme, Italie	52 eV @ 60 keV (4.8 eV @ 6 keV)
Cible Pb Senseur Si implanté	Univ. de Mainz & GSI, Allemagne Univ. Wisconsin, USA NASA, Greenbelt, USA	65 eV @ 60 keV
Cible Sn Senseur TES Mo/Cu Cible HgTe 24 $\mu$ m	LLNL, Livermore, & NASA, GSFC USA	60 eV @ 60 keV 32 eV @ 60keV

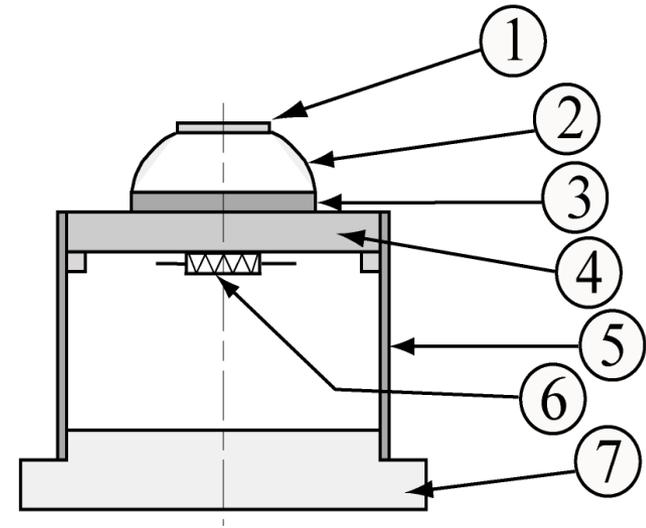
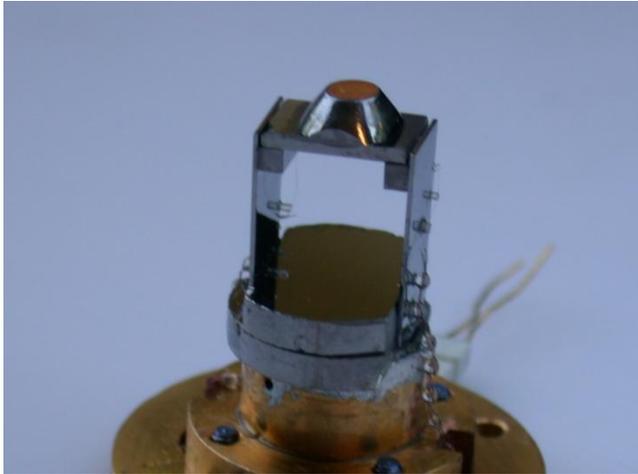
*d'après inventaires Elvire Leblanc (2004 & 2005)*

□ spectroscopie  $\alpha$

Collaboration IAS & CEA/ LNE-LNHB

(Lab. Nat. Henri Becquerel)

Bol#300 : cible Cu



✓ Dynamique élevée

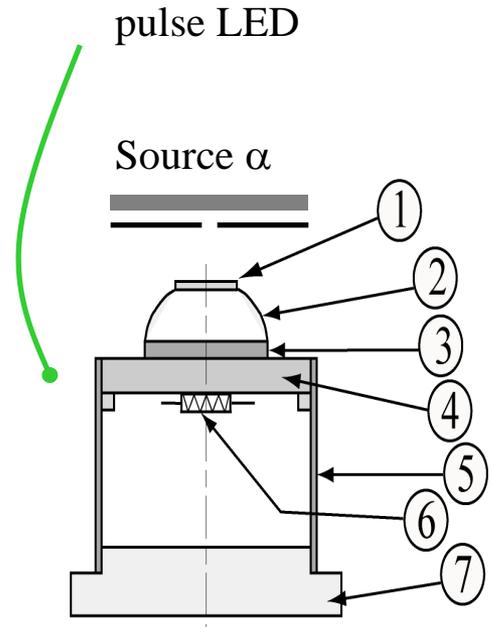
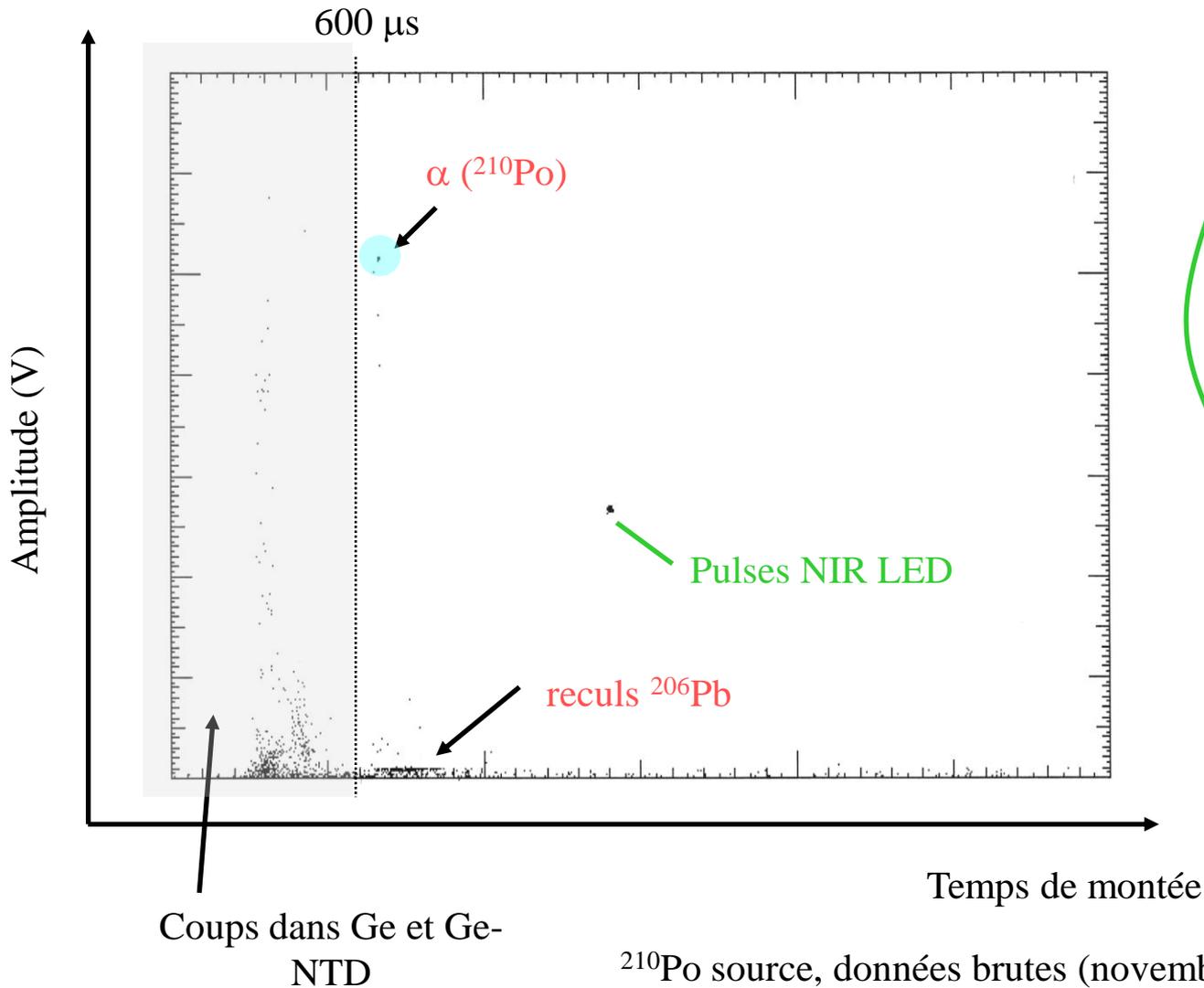
500 eV-10MeV

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

✓ 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

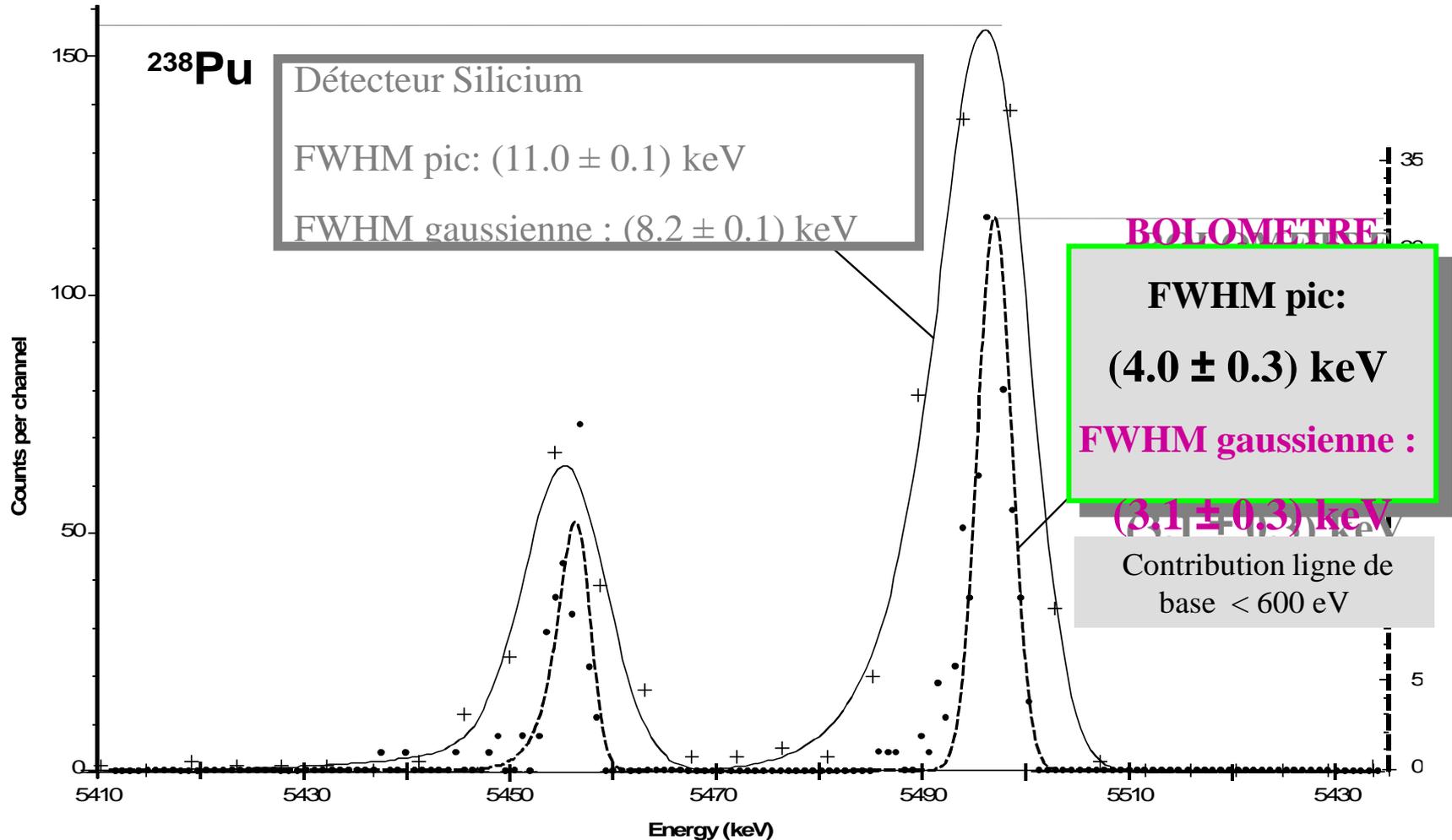
# spectroscopie $\alpha$ 2. temps de montée du bolomètre Cu

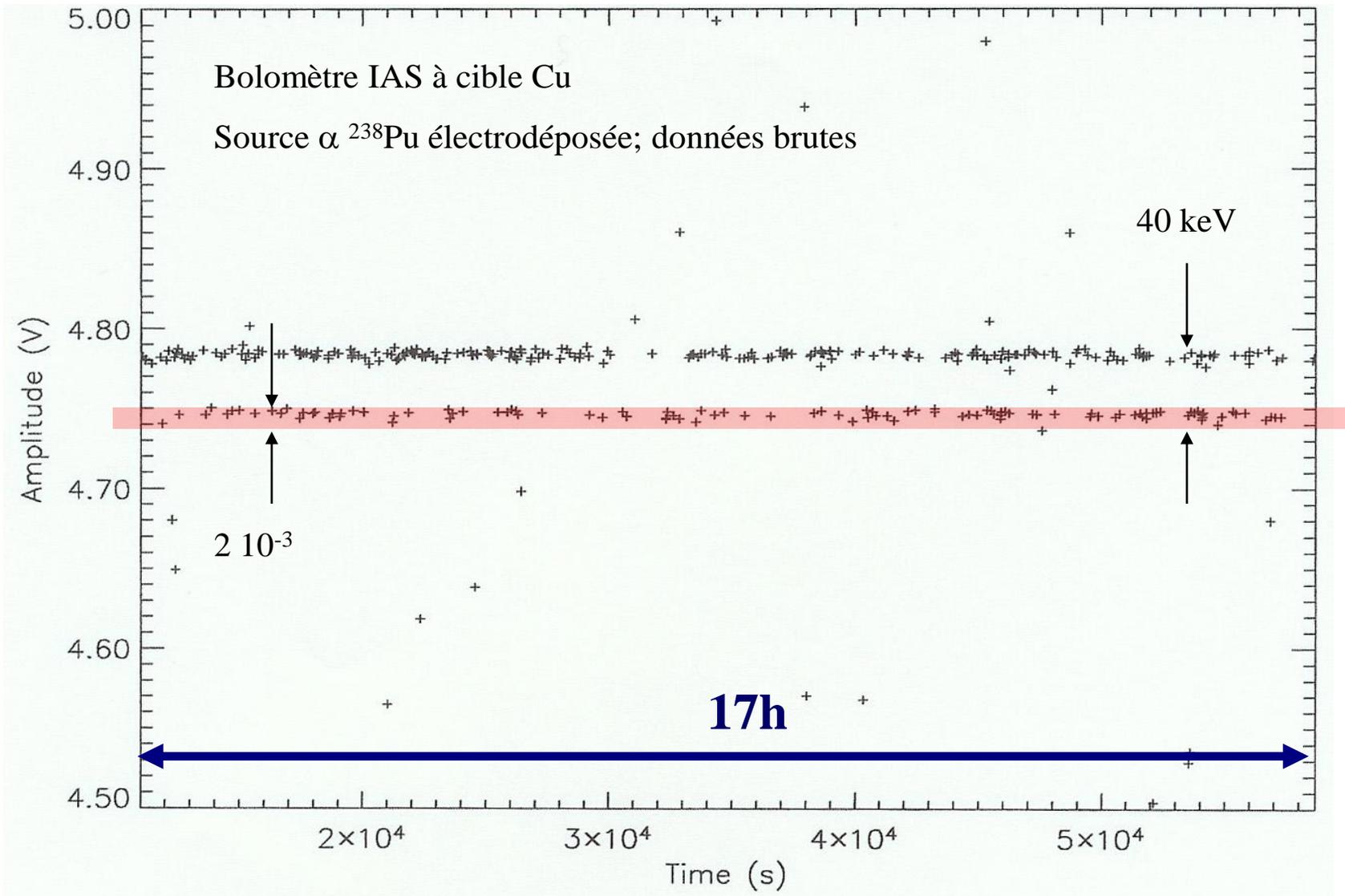


$^{210}\text{Po}$  source, données brutes (novembre 2005)

# spectroscopie $\alpha$ 3. source $^{238}\text{Pu}$ électrodéposée

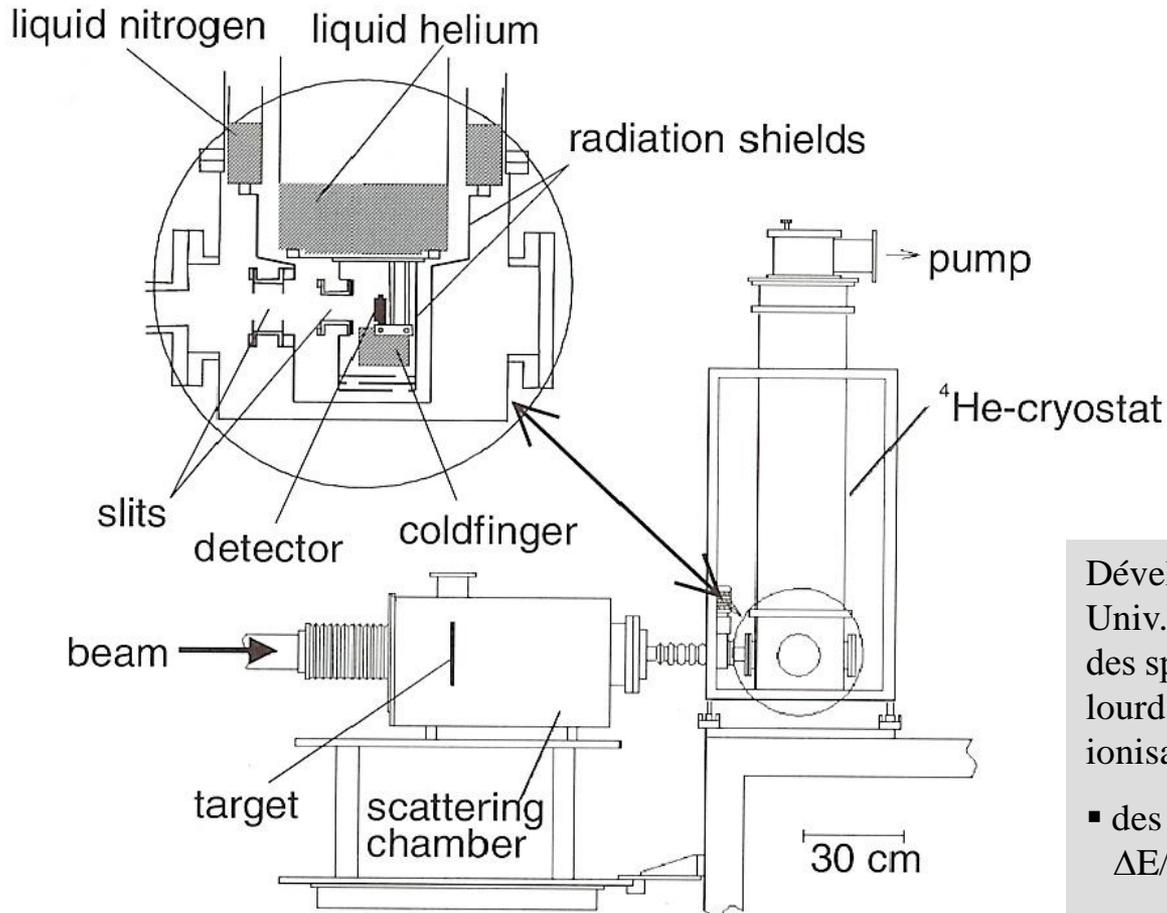
Meilleur spectre alpha jamais obtenu avec une source externe et un détecteur solide ! (  $\rightarrow$  *Elvire Leblanc et al.; CR de ICRM 2005, 5-9 sept. 2005* )





□ spectroscopie d'ions lourds

# Spectroscopie d'ions lourds: un exemple de montage



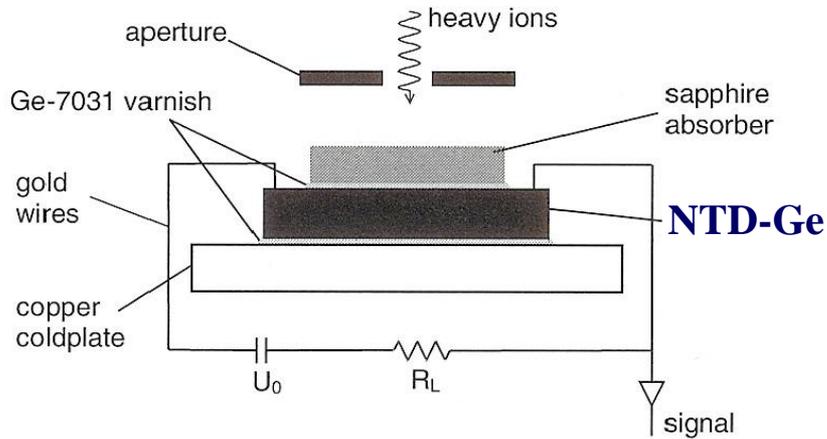
- installation VERA  
Univ. Vienne
- cryostat pompé <sup>4</sup>He
- stabilité de  $T < 1 \mu\text{K}$   
après régulation

Développés depuis 15 ans, les bolomètres GSI / Univ. Mainz ont pu surmonter les inconvénients des spectroscopies conventionnelles d'ions lourds (semi-conducteurs, chambres à ionisation), i.e:

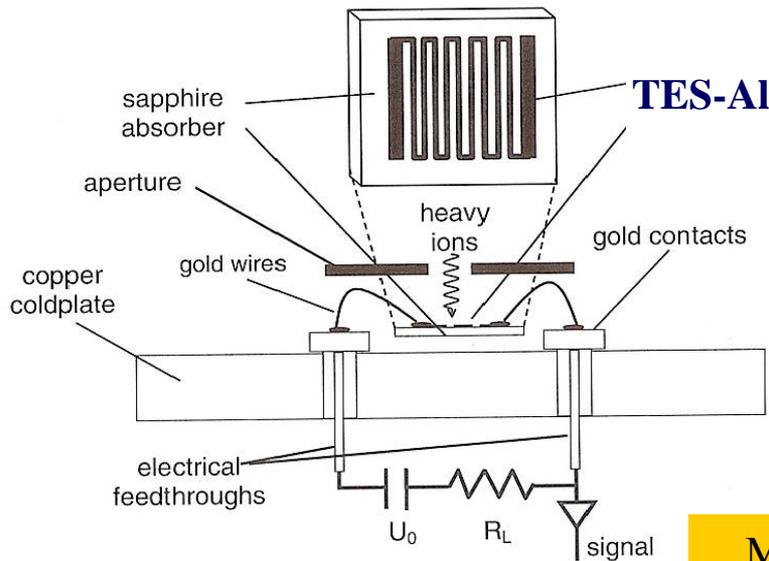
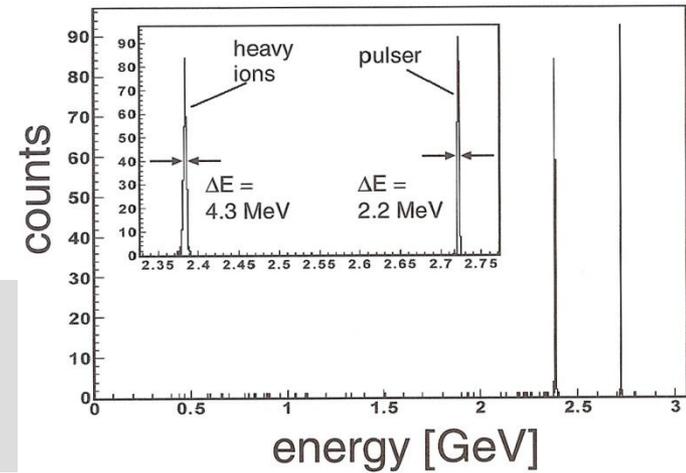
- des résolutions limitées à  $\Delta E/E = (1 \rightarrow 5) \cdot 10^{-2}$
- des seuils élevés aux faibles  $E/\text{amu}$

*P. Egelof & S. Kraft-Bermuth in Ch.Enss (2004)*

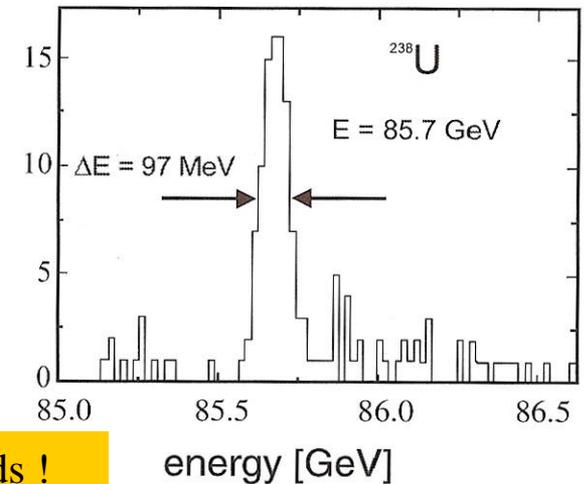
# Spectroscopie d'ions lourds: résolutions au GSI



- $^{209}\text{Bi}$
- 11.6 MeV/amu
- $\Delta E/E = 1.8 \cdot 10^{-3}$



- $^{238}\text{U}$
- 360 MeV/amu
- $\Delta E/E = 1.1 \cdot 10^{-3}$

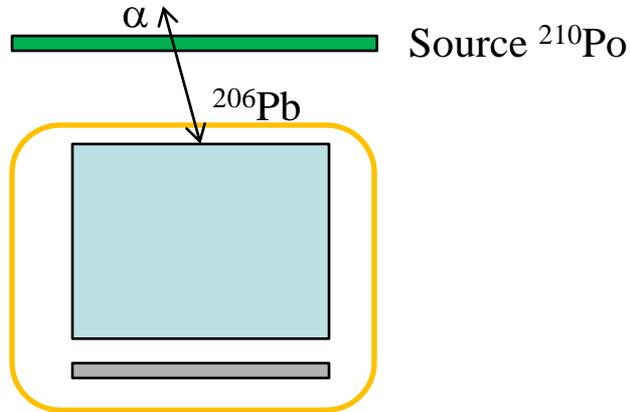


**Meilleur spectre sur ions lourds !**



□ spectroscopie de reculs

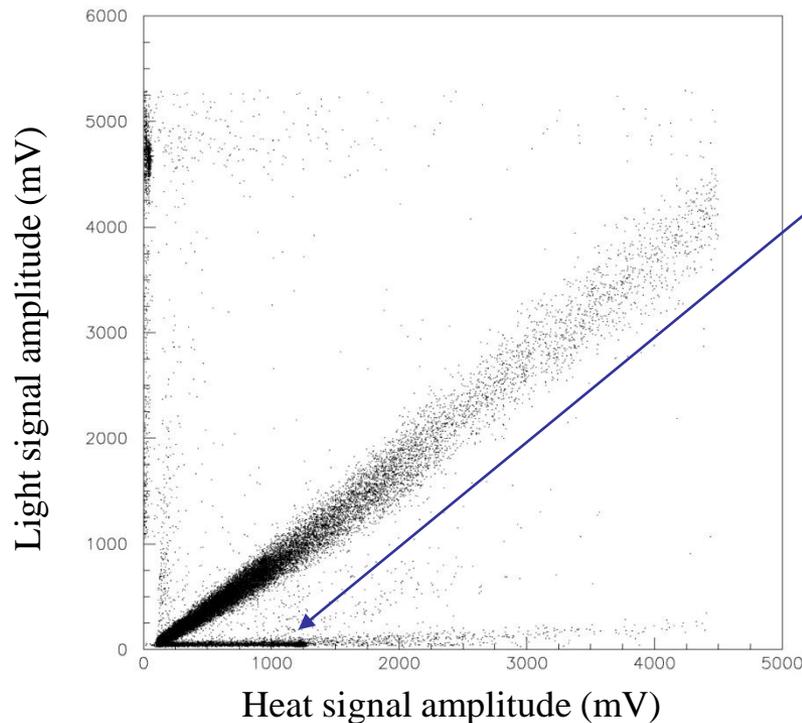
# Reculs de $^{206}\text{Pb}$ & production de sources $\alpha$ hyper fines



Spectre très sensible à la qualité de la surface

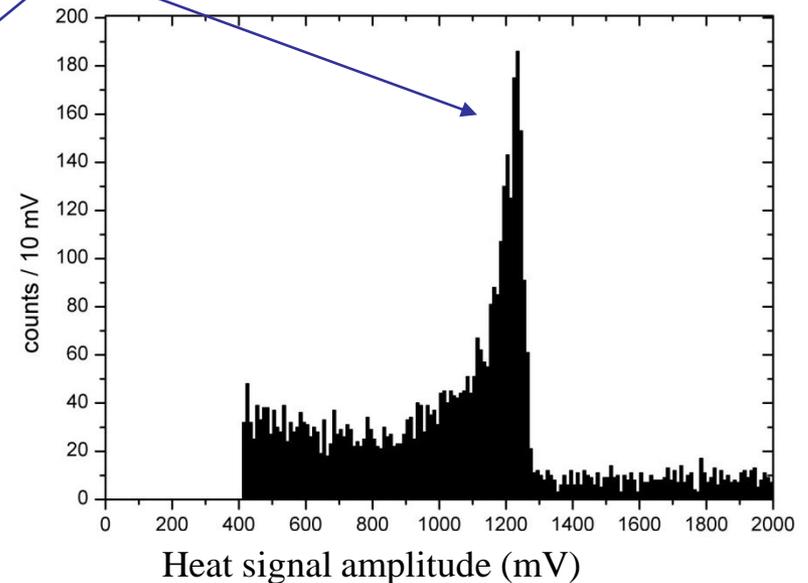
Calibration de matrices de bolomètres,  
validation de technologie

Bolomètre  
saphir 50g



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

Spectrum of the events in the  
nuclear recoil band



□ spectroscopie de neutrons rapides

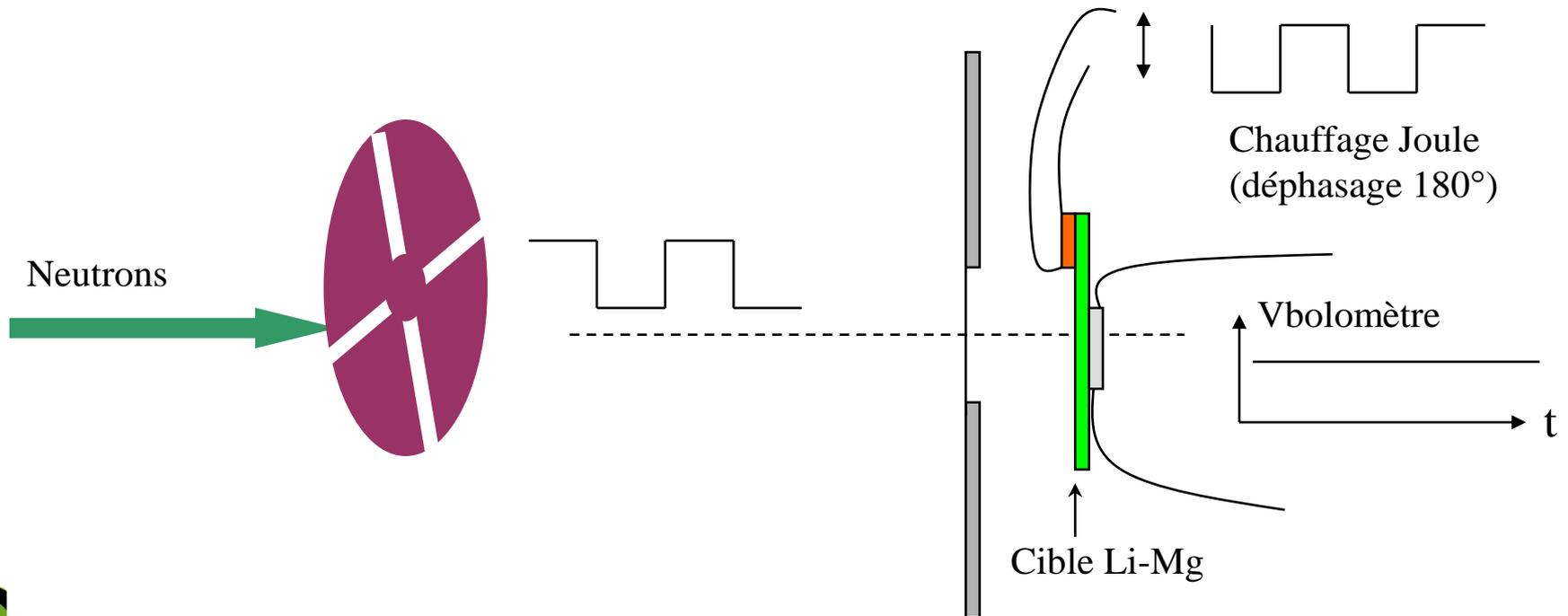
□ Autres domaines d'applications

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

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

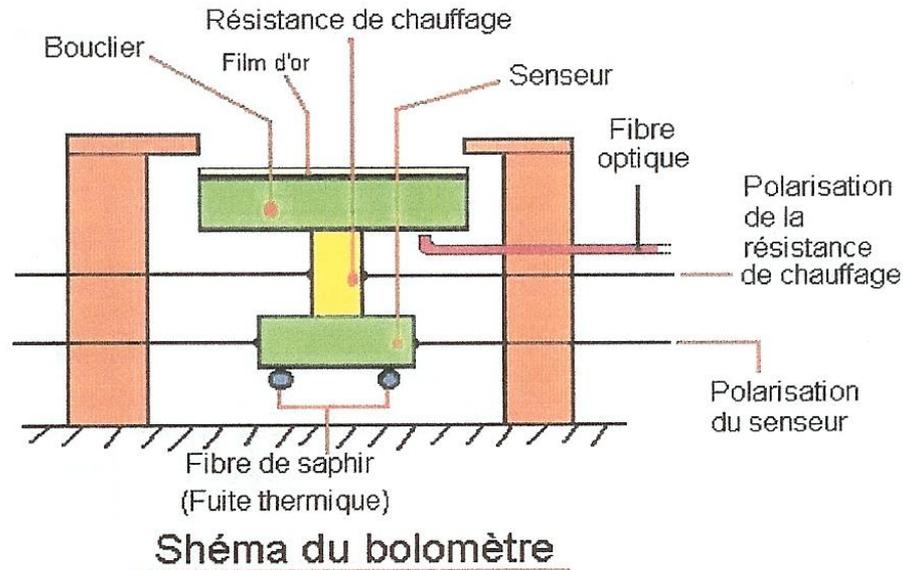
✓ **Radiomètre  $n_{th}$**  (NIST/Univ. Indiana; *Z. Chowdhuri et al., in RSI 2003*)

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



✓ BOLUX (Collaboration CEA/DAM/DE (P. Troussel), CEA/LNHB, CNRS/IAS)

détecteur de référence pour **ligne de métrologie sur Soleil**

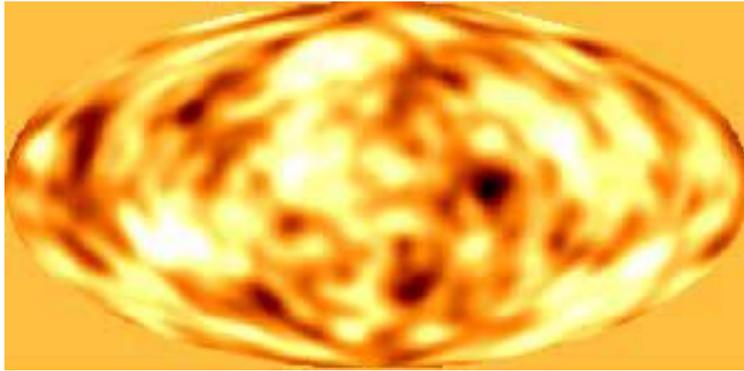


Bolomètre Ge @ 300mK

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

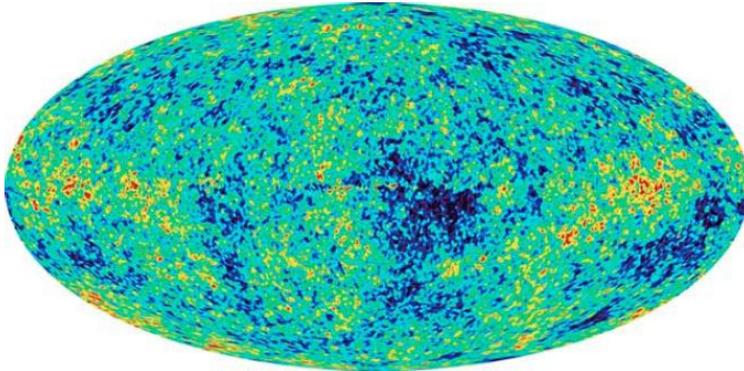
- Rayonnement fossile cosmologique (CMB)  
Archéops, Planck-HFI,...

# Cartes des anisotropies du CMB



COBE (1989)

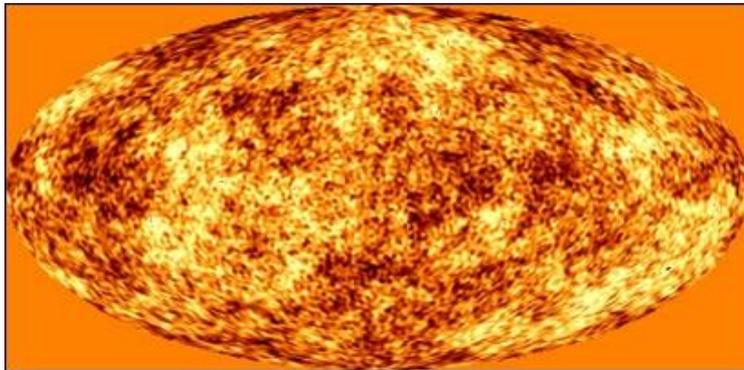
7°



WMAP (2001)

12'

Avènement de la cosmologie de précision...



Planck (2008 ?)

5'

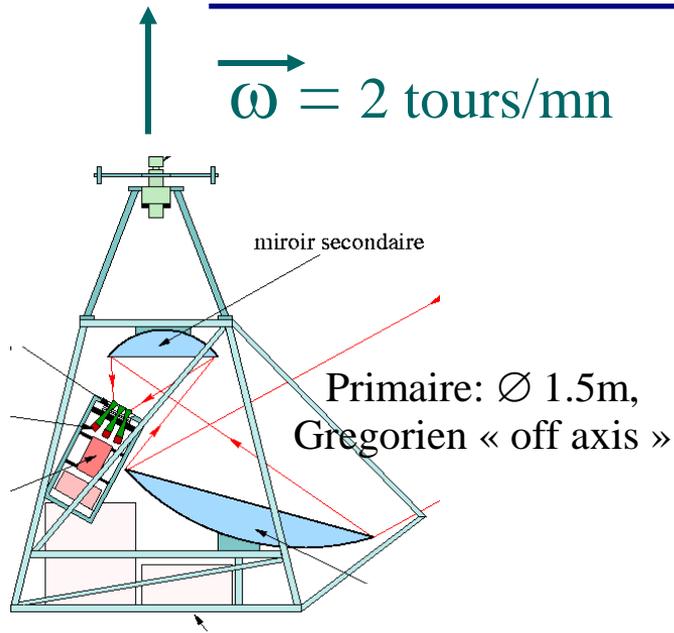
Planck-LFI  
Planck-HFI

Détecteurs

radiomètres

**bolomètres**

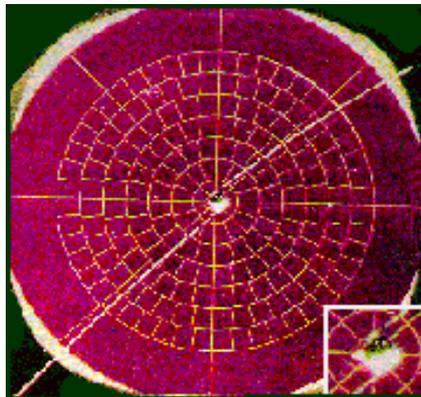
simulation !



- large couverture spatiale : 30%
- vol (Kiruna; Suède):  
19 heures durant nuit arctique
- résolution angulaire:  
10-12 arcmin
- décrit des cercles sur le ciel

22 bolomètres araignées @ 100mK

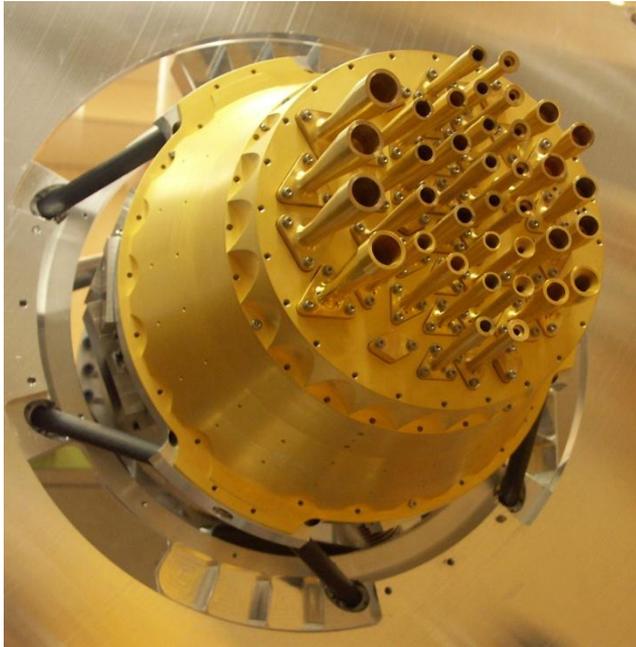
143, 217,  
353, 545  
GHz



*Extraits de transparents  
Nicolas Ponthieu*

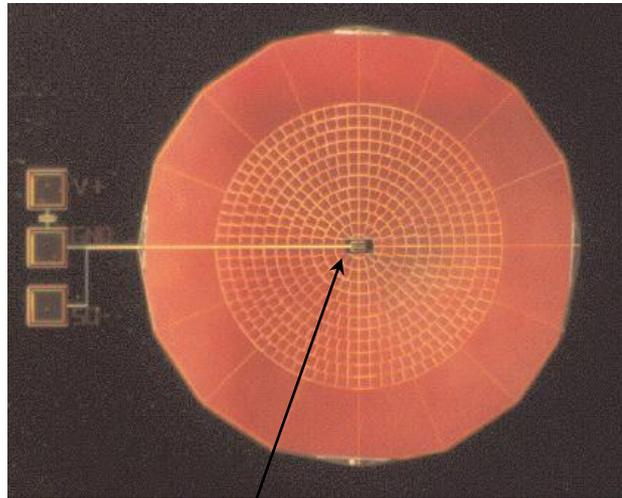


Dilution  
 $^3\text{He}/^4\text{He}$   
à cycle ouvert



Planck-HFI  
modèle de qualification « CQM »

# 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)
Thermistor				
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				$7.42 \times 10^{-12}$
Electrical Leads				
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				$4.82 \times 10^{-12}$
Absorber				
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				$5.5 \times 10^{-13}$
Heat Capacity of Thermistor + Leads				$1.3 \times 10^{-11}$

<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*

□ Désintégration Double bêta sans neutrino



Cuoricino / Cuore

Réaction recherchée  
pour les noyaux tels  
que

- ✓  $(A,Z) \rightarrow (A,Z-1) + e^- + \bar{\nu}$  est interdit énergétiquement
- ✓  $(A,Z) \rightarrow (A,Z-2) + 2e^- + 2\bar{\nu}$  possible énergétiquement ( $\beta\beta 2\nu$ )

$(A,Z) \rightarrow (A,Z-2) + 2e^-$  ? violation du nombre leptonique ( $\beta\beta 0\nu$ )

$\beta\beta 0\nu$   $\longrightarrow$   $\bar{\nu} = \bar{\bar{\nu}}$  (Neutrino de Majorana) et  $m_{\nu} \neq 0$  ( $m_{ee}$ )

▪  $Q\beta\beta 2\nu$  (continuum) a été vue dans  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{238}\text{U}$

▪ signature de  $Q\beta\beta 0\nu$ :  $2e^-$  émis à  $180^\circ$ , se partagent l'énergie de la transition.

$\rightarrow$  on attend une raie à l'énergie  $Q\beta\beta$ .

▪ source  $\neq$  détecteur: NEMO-III ; « tracking » des  $2e^-$

▪ source = détecteur: diodes  $^{76}\text{Ge}$ , scintillateurs, TPC, mais aussi **bolomètres en  $\text{TeO}_2$**  :

▪  $Q\beta\beta(^{130}\text{Te}) = 2529 \text{ keV}$

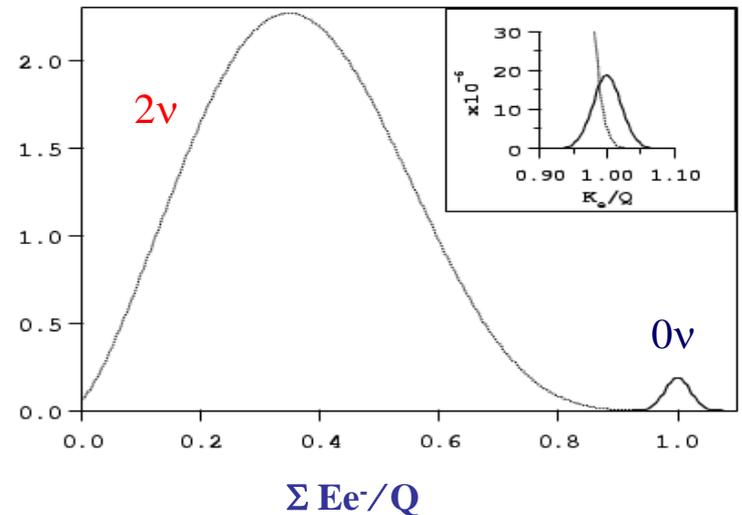
▪ Nat. Abondance = 34%

$\longrightarrow$  Bruit de fond réduit

$\longrightarrow$  Coût raisonnable



CUORICINO puis CUORE  
(au GranSasso)

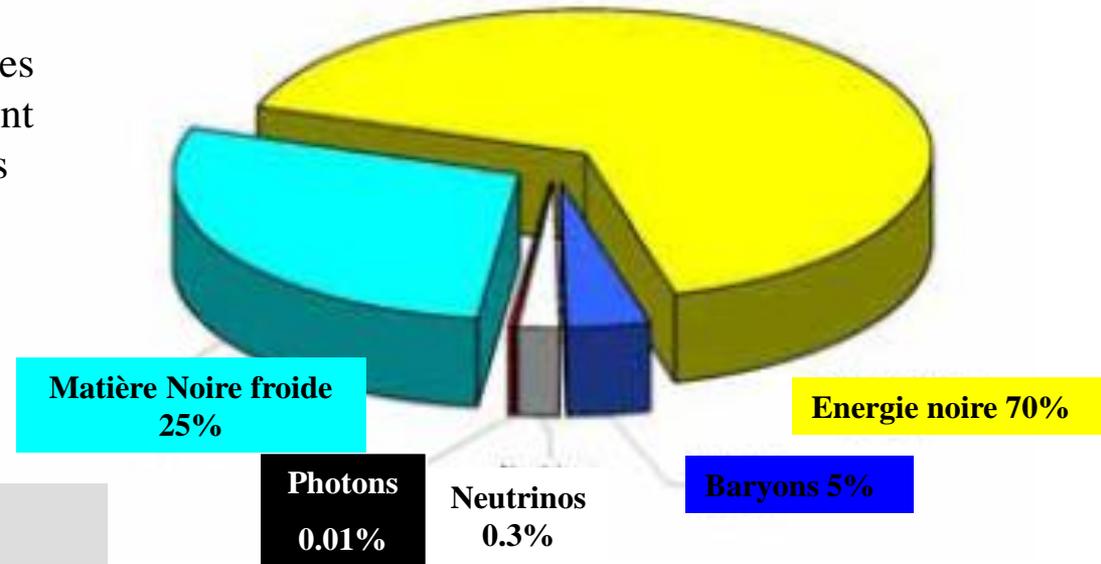


## □ Détection de la Matière noire

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

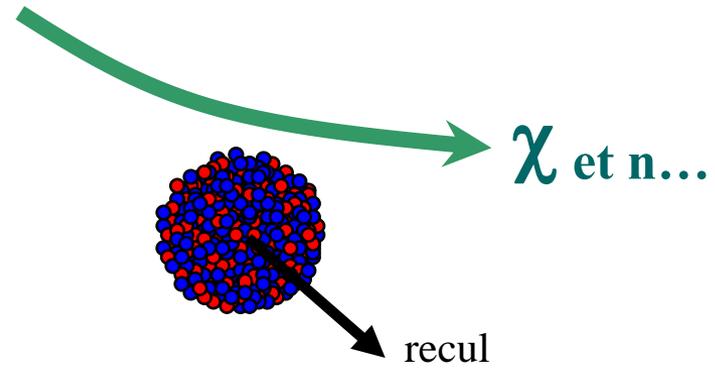
## Contenu énergétique de l'Univers



Une des candidats le mieux motivé:

- **Neutralino  $\chi$**  (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  $\approx qq \text{ keV}$
- Interaction: diffusion élastique  $\rightarrow$  **reculs**
- Description précise ? paramètres libres ++
- Sections efficaces  $\downarrow\downarrow$  (WIMPs) mais prédictibles

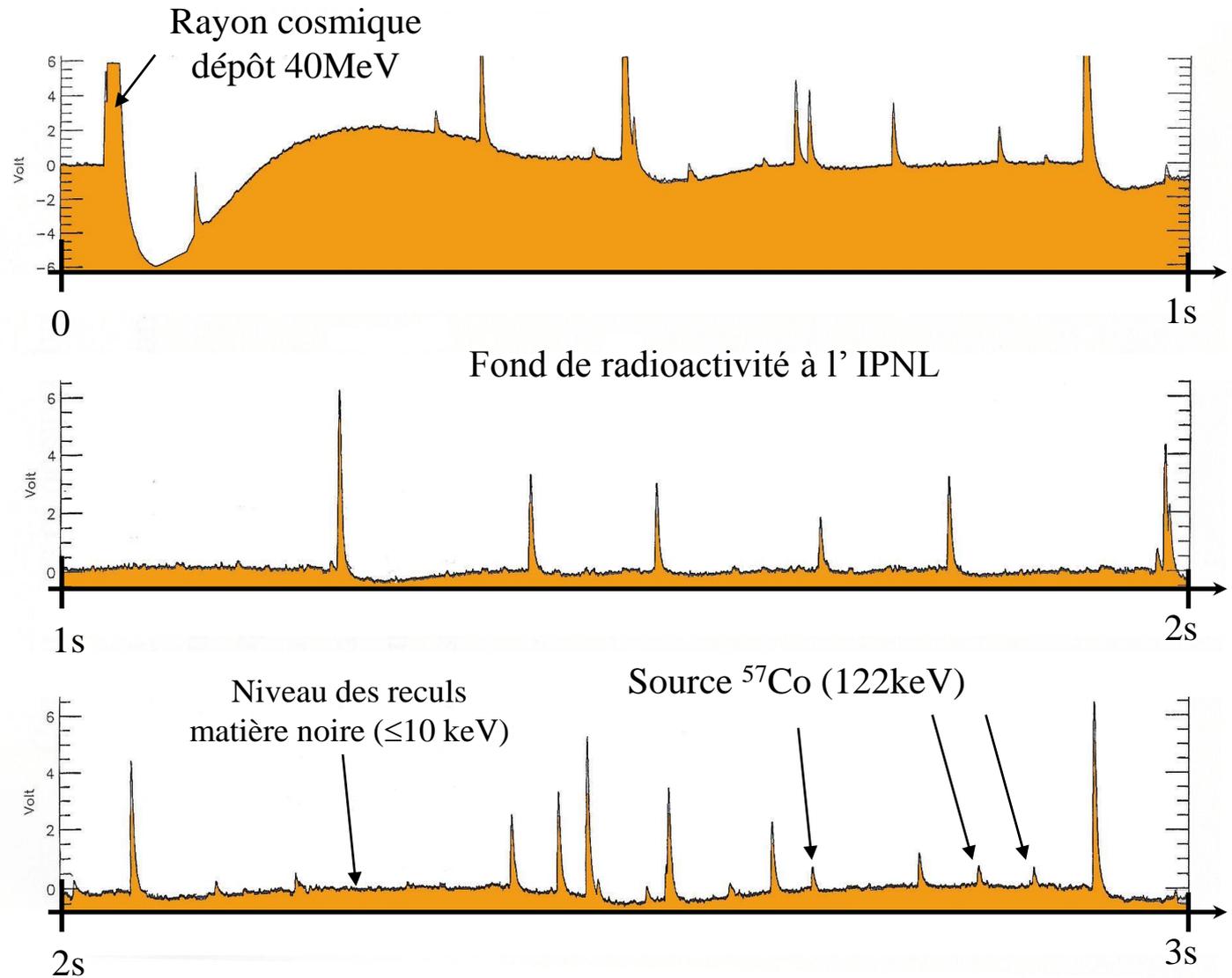
Weakly Interactive Massive Particles



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

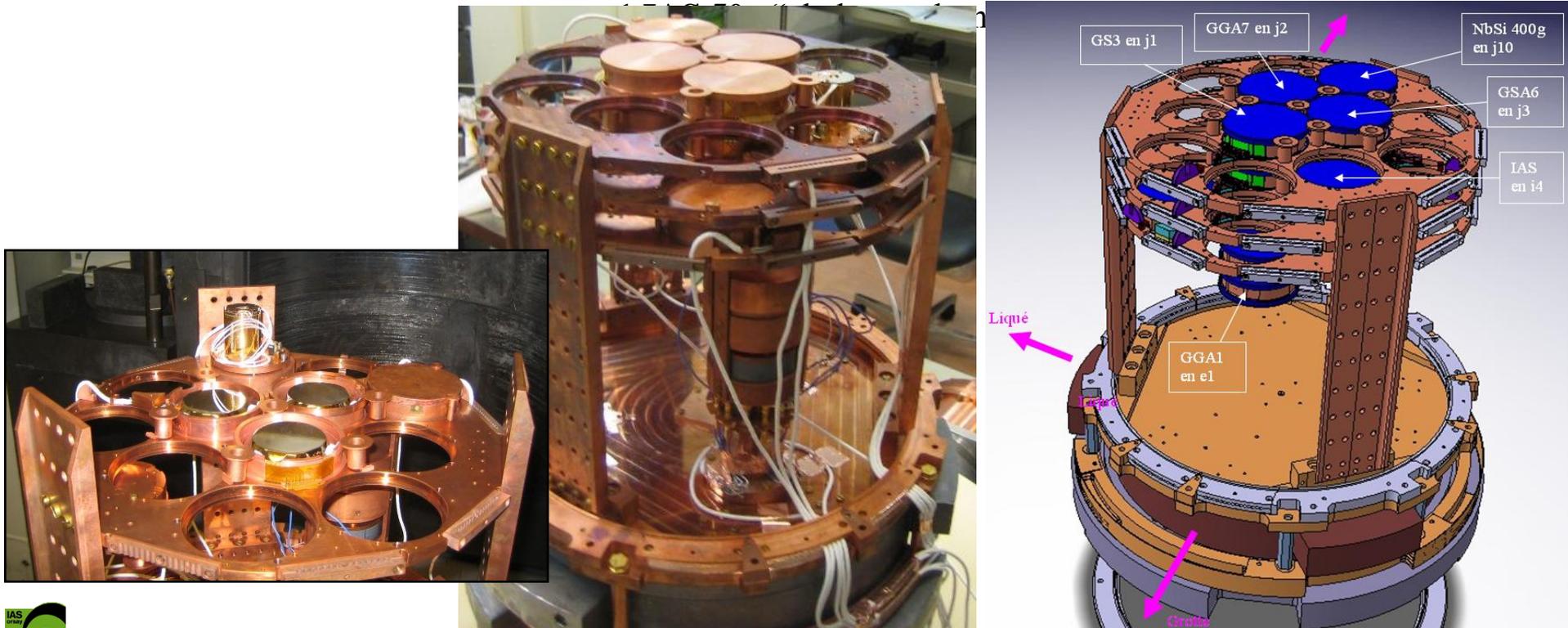
3 traces consécutives de 1s dans un bolomètre de 1.2 kg en saphir.

Mesures IAS/  
IPNL 1996



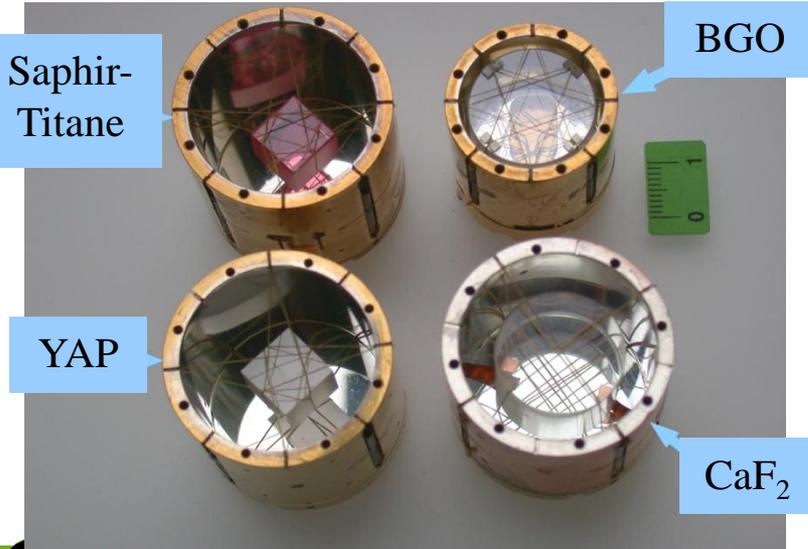
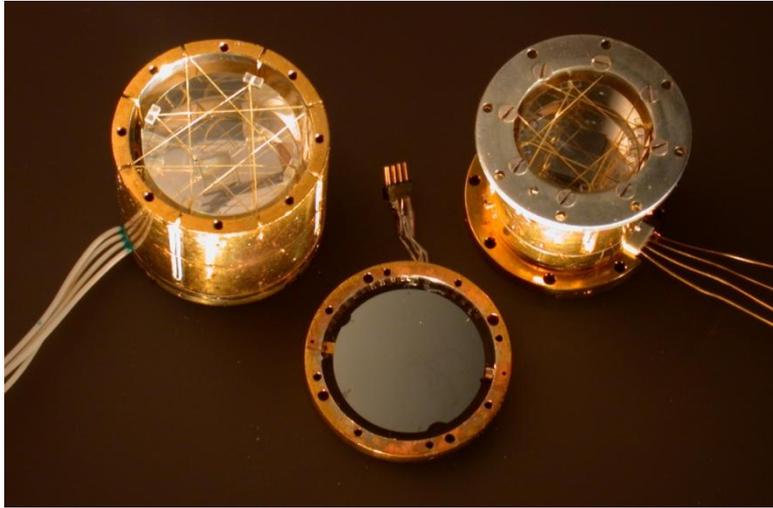
# Le montage d' Edelweiss-II en 2006

- ◆ **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**



# 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 !

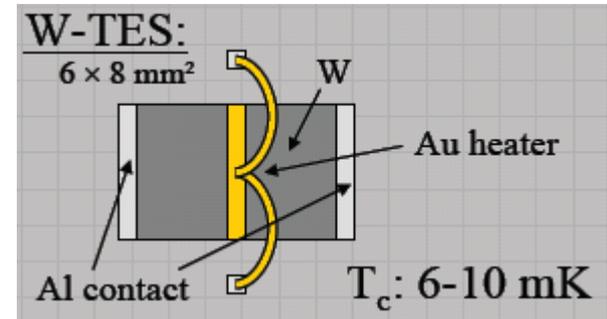
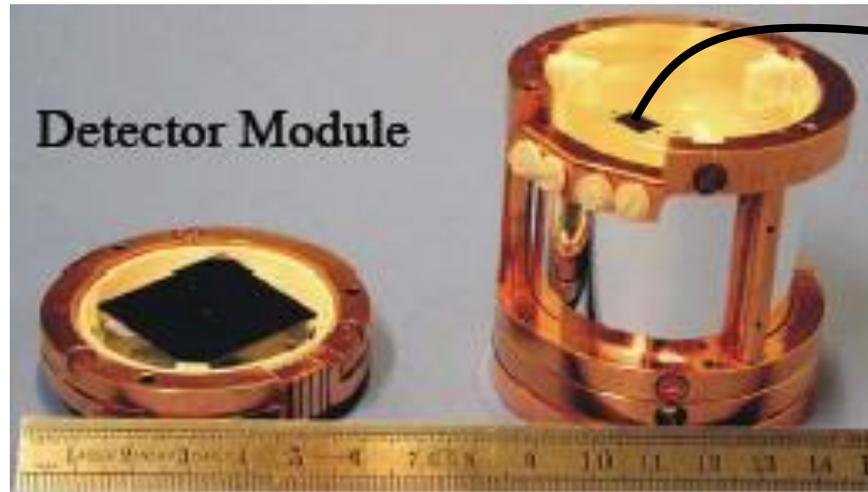
- Rendements lumineux ?
- Mécanismes d'émission ?
- Propriétés thermiques ?
- Radioactivités internes ?
- maille moléculaire !

détecteurs optiques + gros, + fins + froid

interprétation des reculs + difficile...

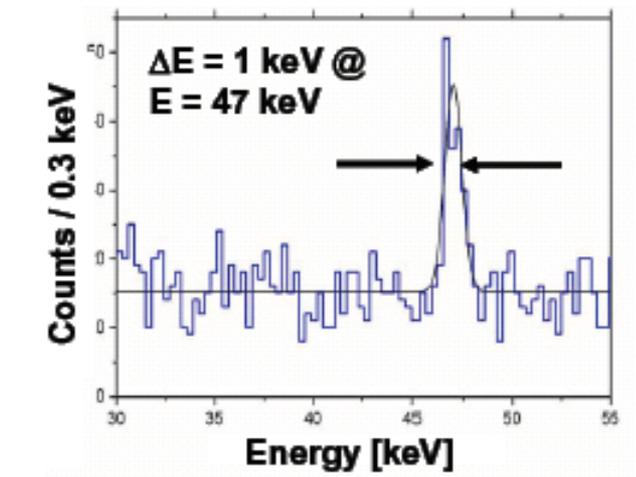
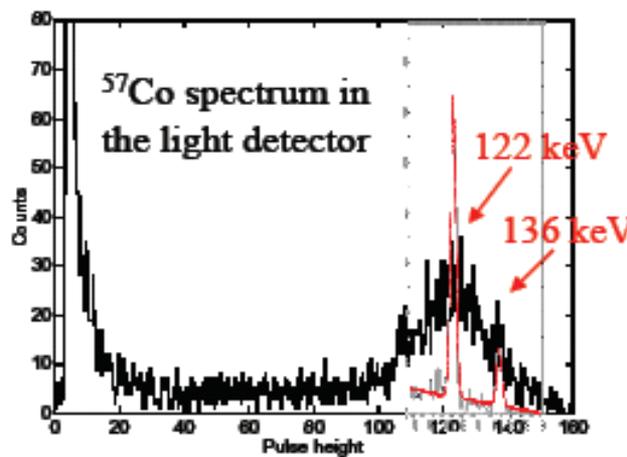
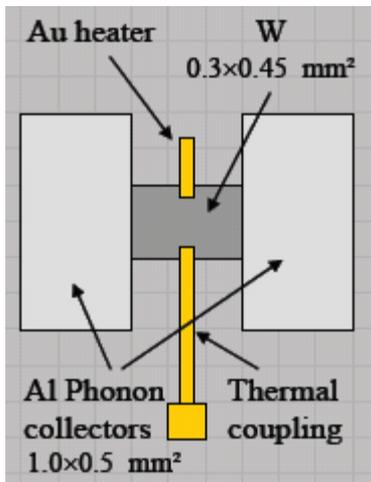
- **déclinaison « à l'infini » des cibles !**
- pas de phénomènes de surface
- extinctions (quenching) >> Ge

# Détecteurs de CRESST $\text{CaWO}_4$ & Si ; W-TES



Cible  $\text{CaWO}_4$  300g ( $\varnothing=h=4\text{cm}$ )

détecteur de lumière: Si  $30 \times 30 \times 0.4 \text{ mm}^3$



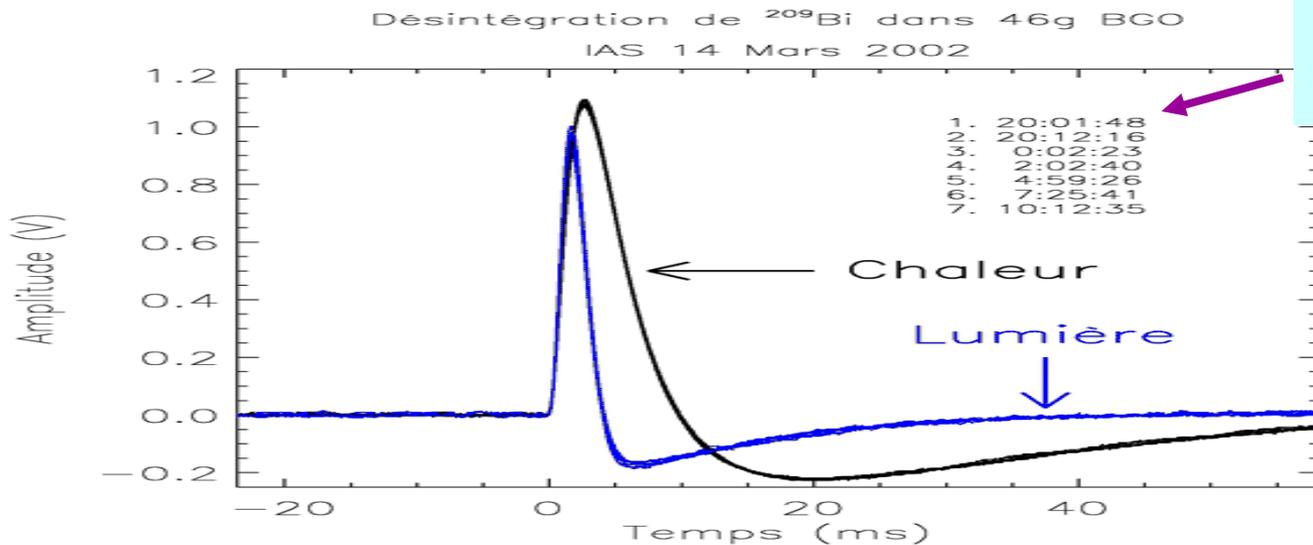
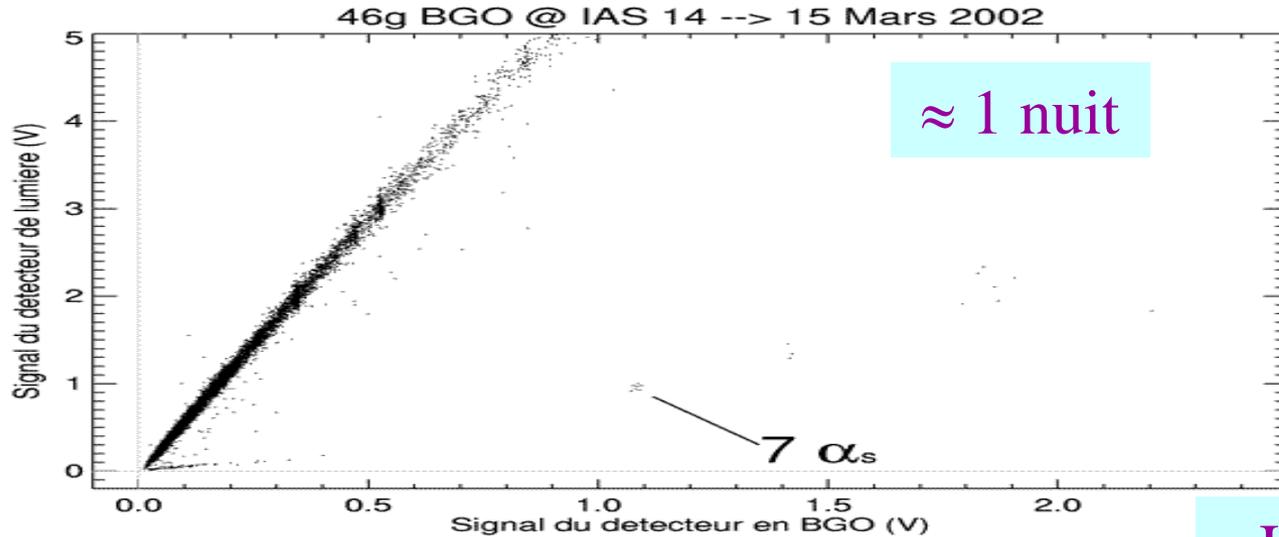
□ Désintégrations rarissimes  
(par bolomètres scintillants !)

Désintégrations alpha de

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

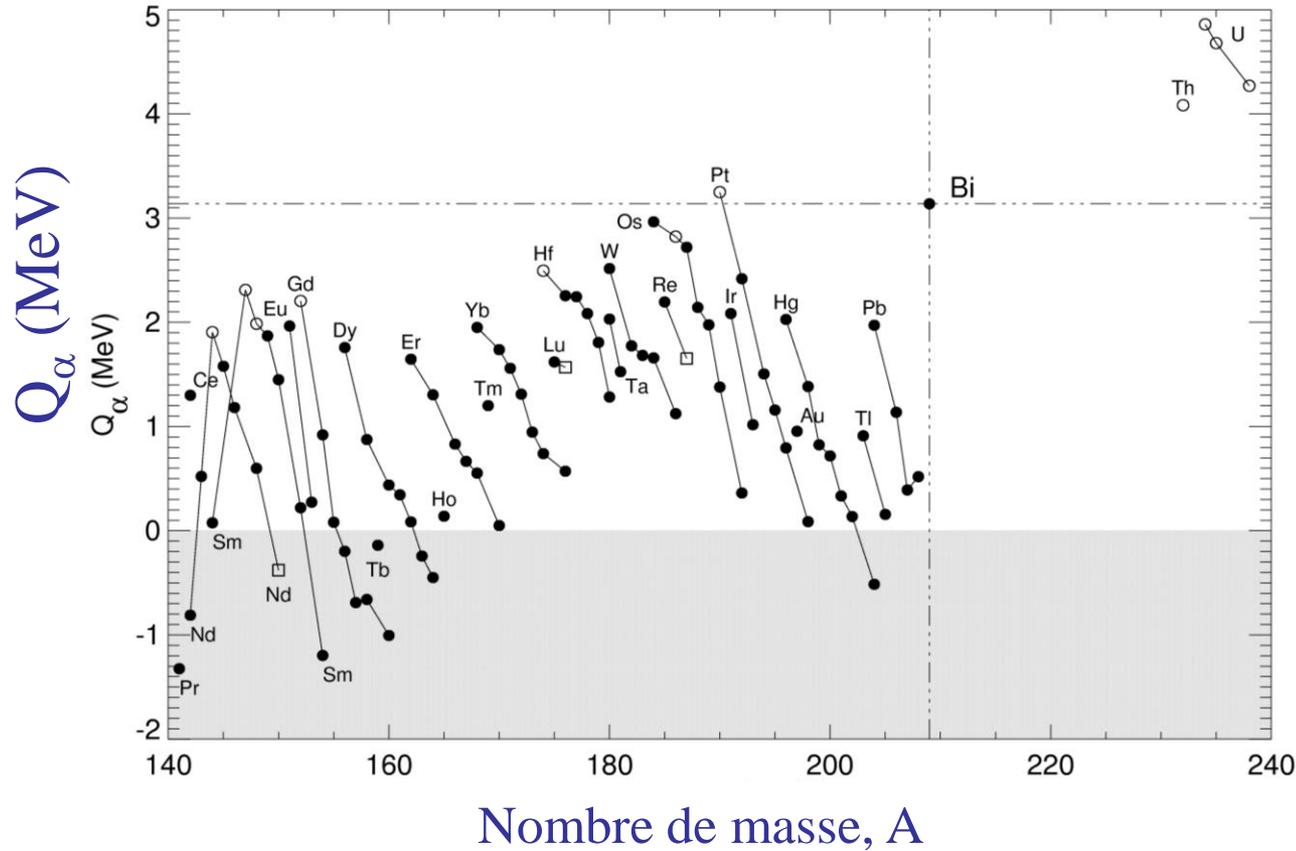
■  $^{180}\text{W}$  (CRESST; 2004)  $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{18}$  ans

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



# 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**

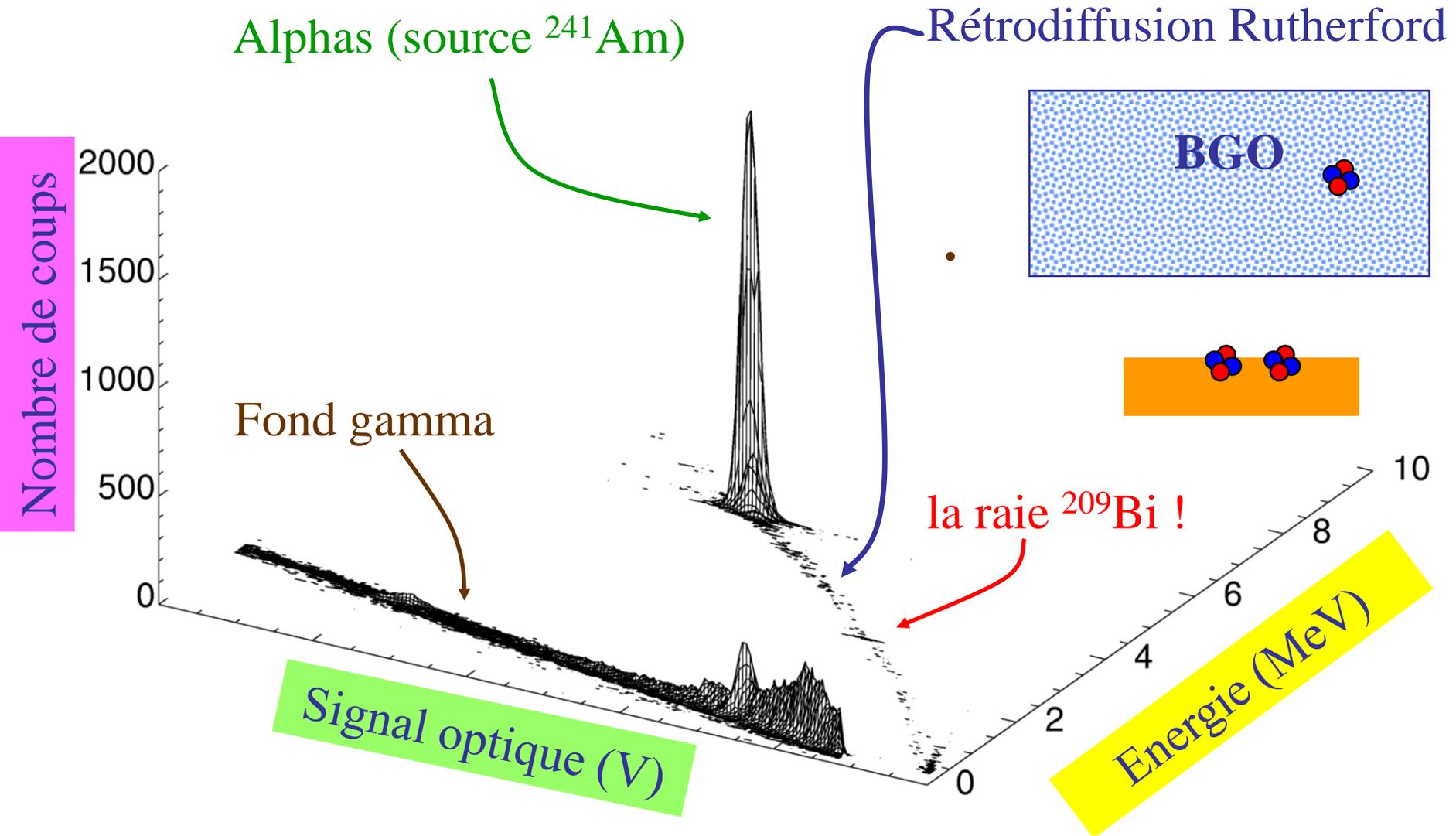
$R \approx 8 \mu\text{m}$



**60 keV**

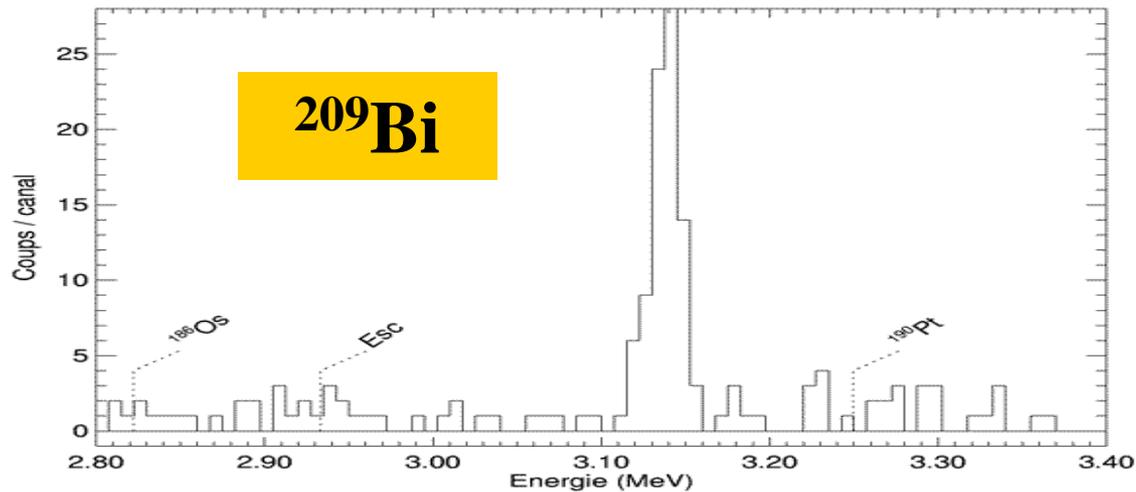
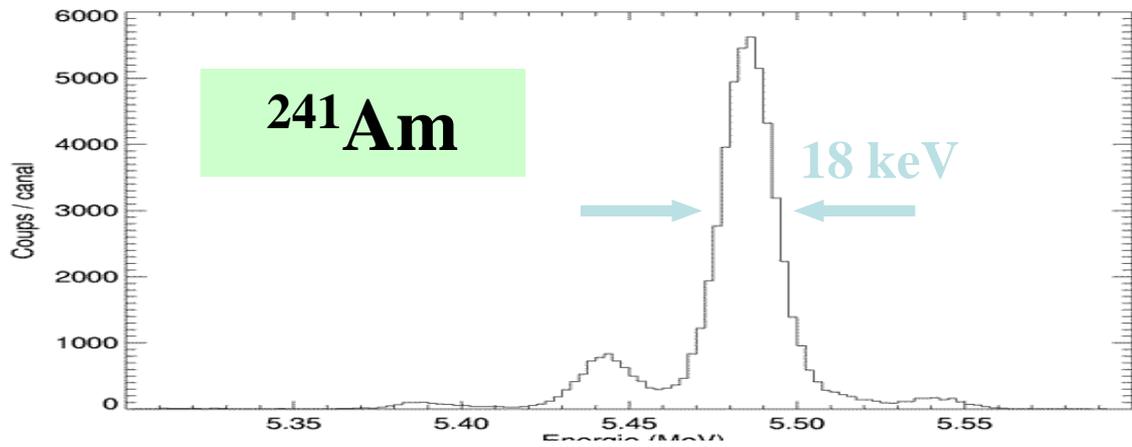
$R \approx 200 \text{ \AA}$

# Discrimination dans 91g BGO



Nombre de coups

# Spectres alphas finaux

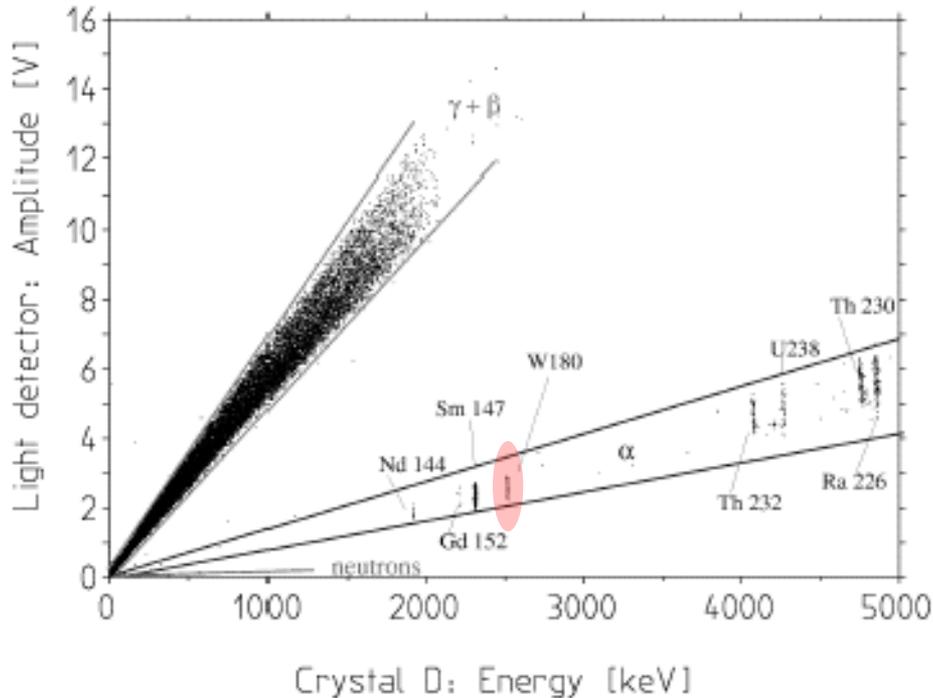


→  $Q_\alpha = 3137 \pm 1 \text{ (stat.)} \pm 2 \text{ (syst.) keV}$

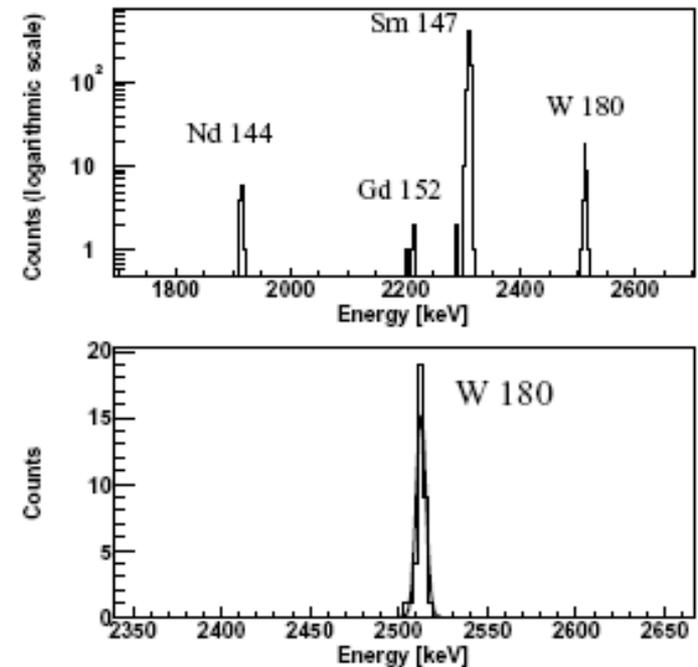
$T_{1/2} = 1.9 \pm 0.2 \cdot 10^{19} \text{ ans}$

# Au tour de $^{180}\text{W}$ ... (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  $Q = (2516.4 \pm 1.1$  (stat.)  $\pm 1.2$  (sys.)) keV have been measured. New limits are also set on the half-lives of the other naturally occurring tungsten isotopes. »

## □ Tendances 2006, en bref...

- Mesures de la polarisation du CMB  
→Polarisation Sensitive Bolometers
- Matrices de bolomètres

## 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)**