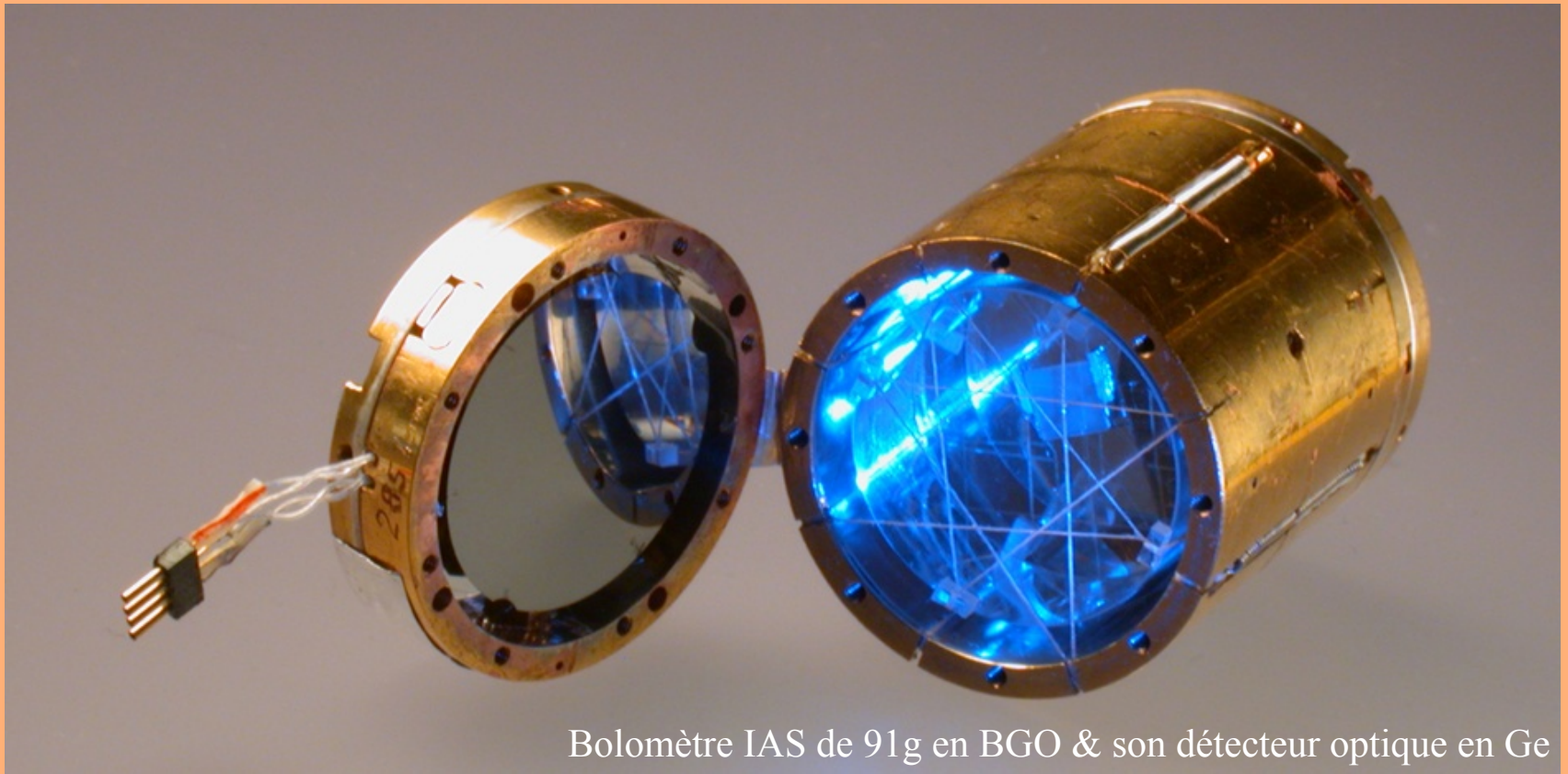


Des bolomètres scintillants pour la détection des événements rares



Séminaire d'instrumentation, le 4 Juin 2013. SEDI / CEA
Lidia Torres SAp / CEA

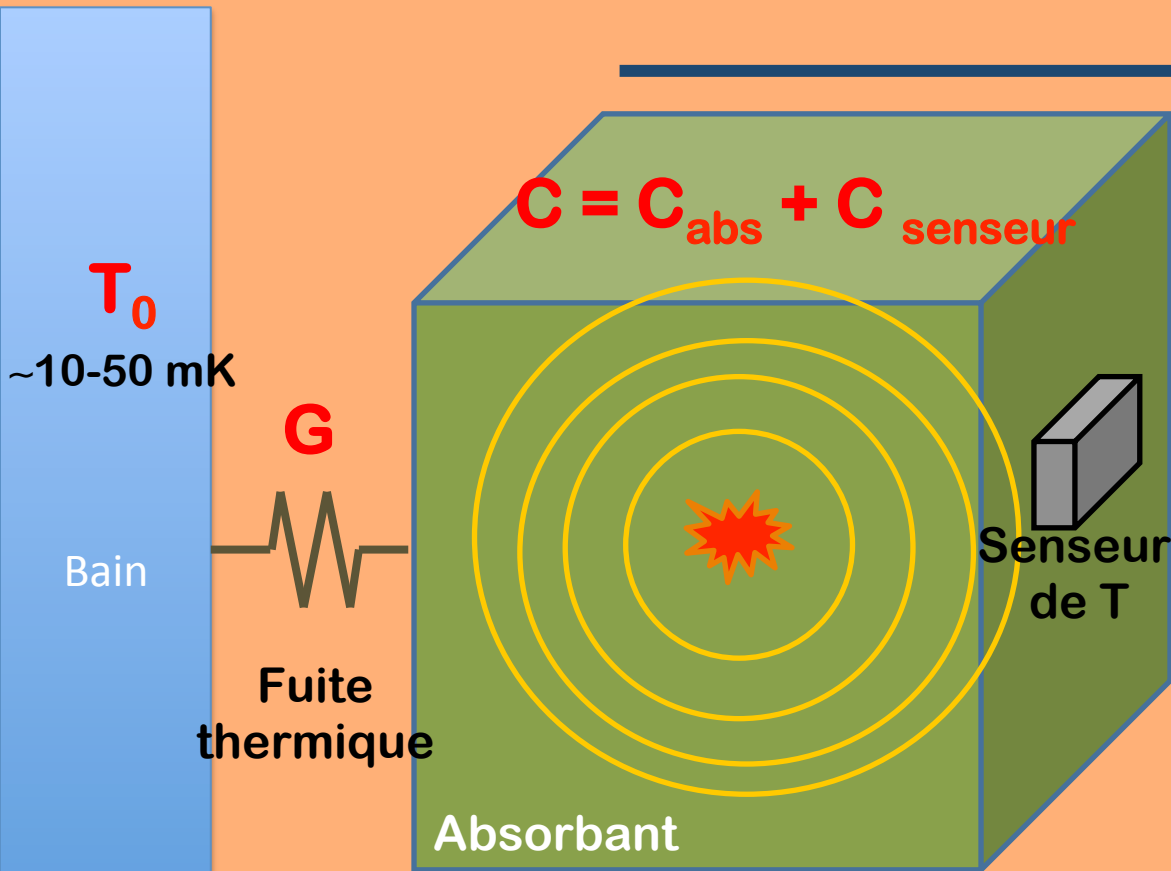
I. L'instrument

- ① Qu'est-ce que c'est un bolomètre? (détecteur de particules)
- ② Le bolomètre scintillant en configuration de bolomètre double
- ③ La voie de la lumière (le vrai défi technologique)
 - a) Le bolomètre optique. Optimisation
 - b) Luminescence à basse température. Optimisation

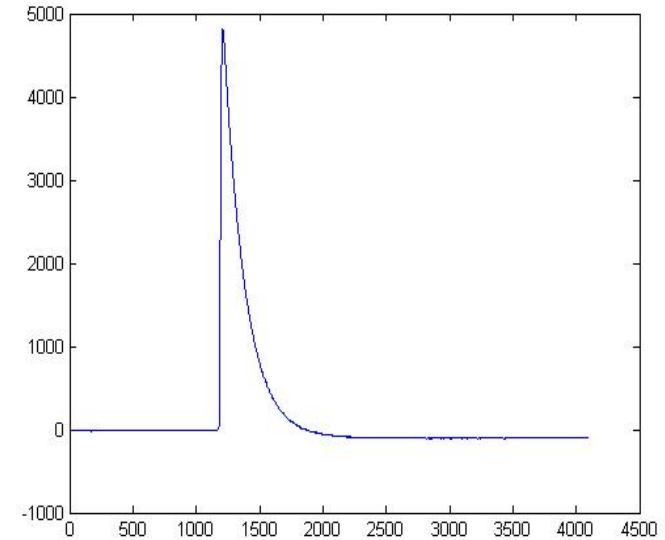
II. Les applications

- ① Détection des événements rares
 - Désintégrations alpha rarissimes
 - Double désintégration beta sans neutrinos
 - Détection de la matière noire (WIMPs)
- ② Spectroscopie des neutrons rapides

Tout d'abord: qu'est-ce que c'est un bolomètre?



Courbe thermique



$\Delta T \propto E$: Thermométrie \rightarrow spectroscopie
(c'est la vraie calorimétrie: mesure de la
variation de U par la variation de T)

$$T(t) - T_0 = \frac{E}{C} \cdot e^{-\frac{t}{C/G}}$$

Quelques mots sur chaque élément

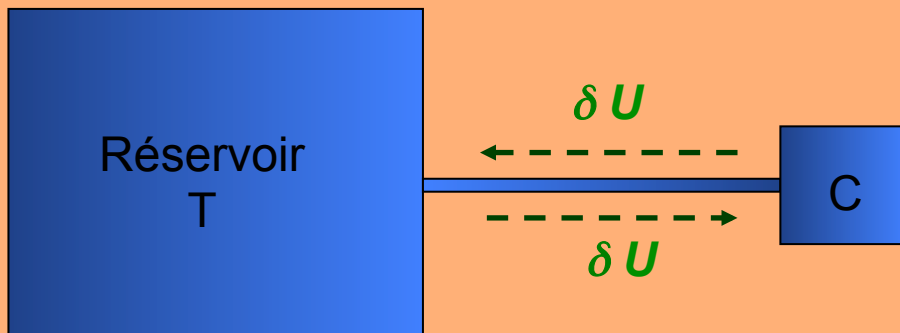
1. Absorbeur, bain et lien thermique

• **C** : $\Delta T = \frac{E}{C_{(T)}} = \frac{E}{m \times c_{(T)}} \quad \lim_{T \rightarrow 0} c_{(T)} = 0$

Il faut réduire C pour augmenter la réponse

Possibilité de cibles massives si

- $T \downarrow$
- $c \downarrow$: **matériaux diélectriques et diamagnétiques** (seule contribution à c vient du réseau)
- T_0 : ~10-50 mK atteintes en continue grâce aux **réfrigérateurs à dilution**



$T \downarrow$ {
 ✓ augmente réponse
 ✓ diminue le bruit intrinsèque thermodynamique

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

- **G** : ✓ Suffisamment petit pour empêcher que l'énergie s'échappe au bain avant d'être mesurée
 ✓ Suffisamment grand pour évacuer le surplus d'énergie et empêcher les empilements

et 2. Le thermomètre

Thermométries utilisées en bolométrie

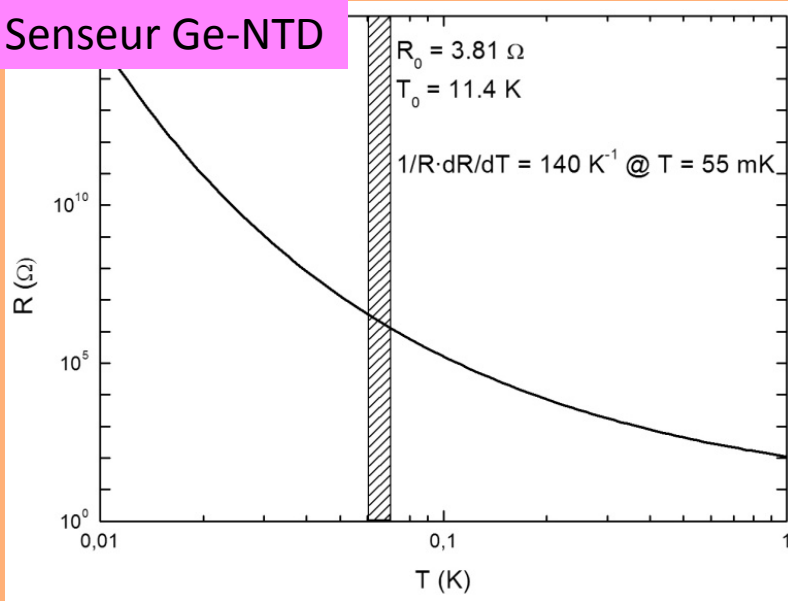
- **Résistive (thermistors) $R(T)$**
 - Haute impédance ($100\text{k}\Omega \rightarrow 10\text{M}\Omega$)
 - Ge-NTD (Neutron Transmuted Doped)
 - Si implanté
 - $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$
 - Basse impédance ($10\text{m}\Omega \rightarrow 100\text{m}\Omega$)
 - TES (Transition Edge Sensor)
- **Magnétique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

Chaque thermomètre:

- ajoute sa propre capacité calorifique
- ajoute son propre bruit et celui de son électronique de lecture

Thermisteurs R(T): Ge-NTD vs. TES

Senseur Ge-NTD

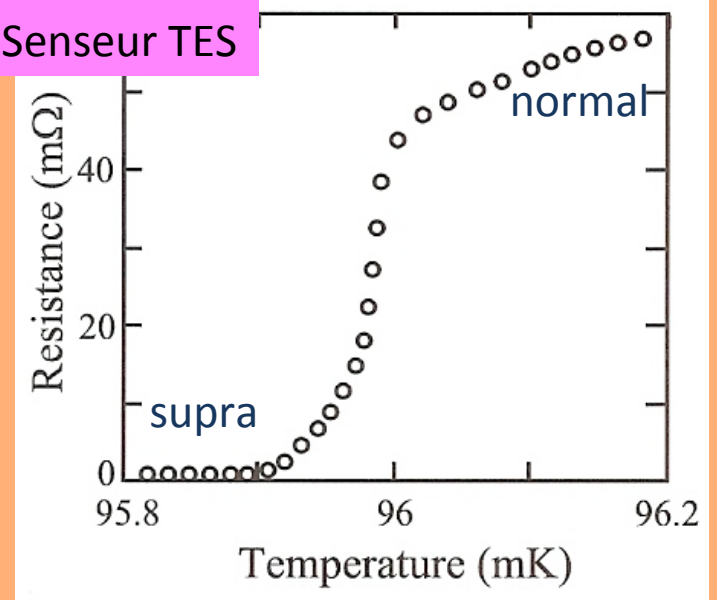


Semi-conducteur dopé au niveau de la transition métal-isolant

- ✓ VRH (conduction assistée par des phonons).
- ✓ Loi d'Efros-Shklovskii

$$R(T) = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T}}\right)$$

Senseur TES

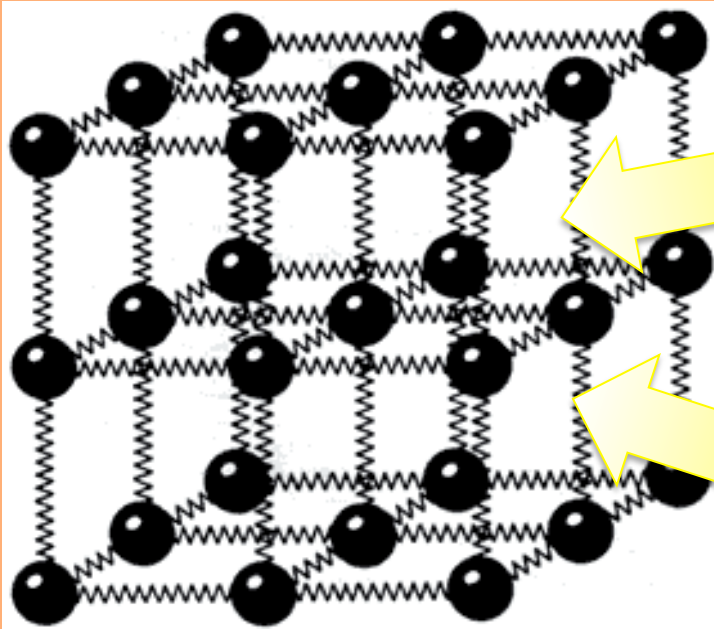


Transition supra-métal

	Ge-NTD	TES
Sensibilité	-	+
dynamique	+	-
Lus par	J-FETs, HEMTs	SQUIDs

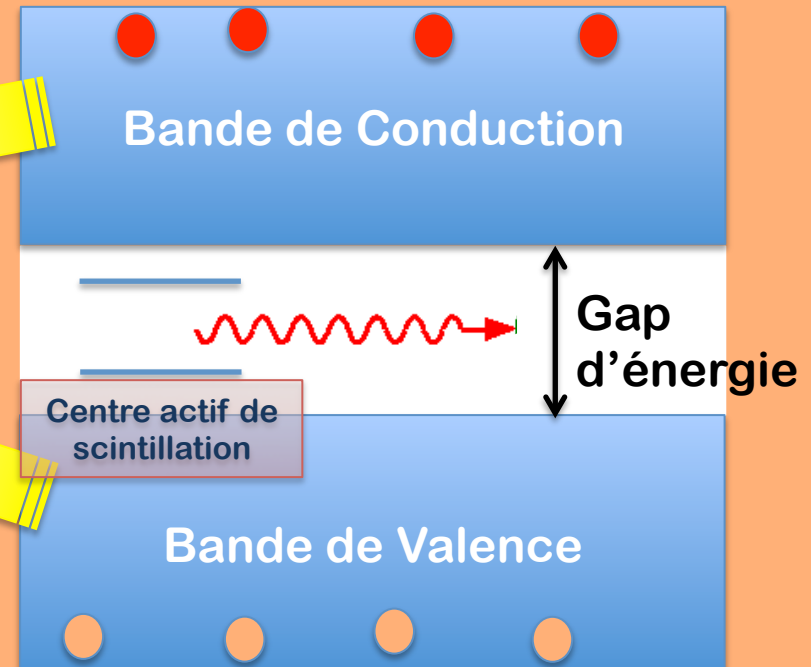
Interaction des particules dans un cristal isolant

Avec le réseau d'ions: vibrations



Phonons:
modes de vibration propres du
réseau

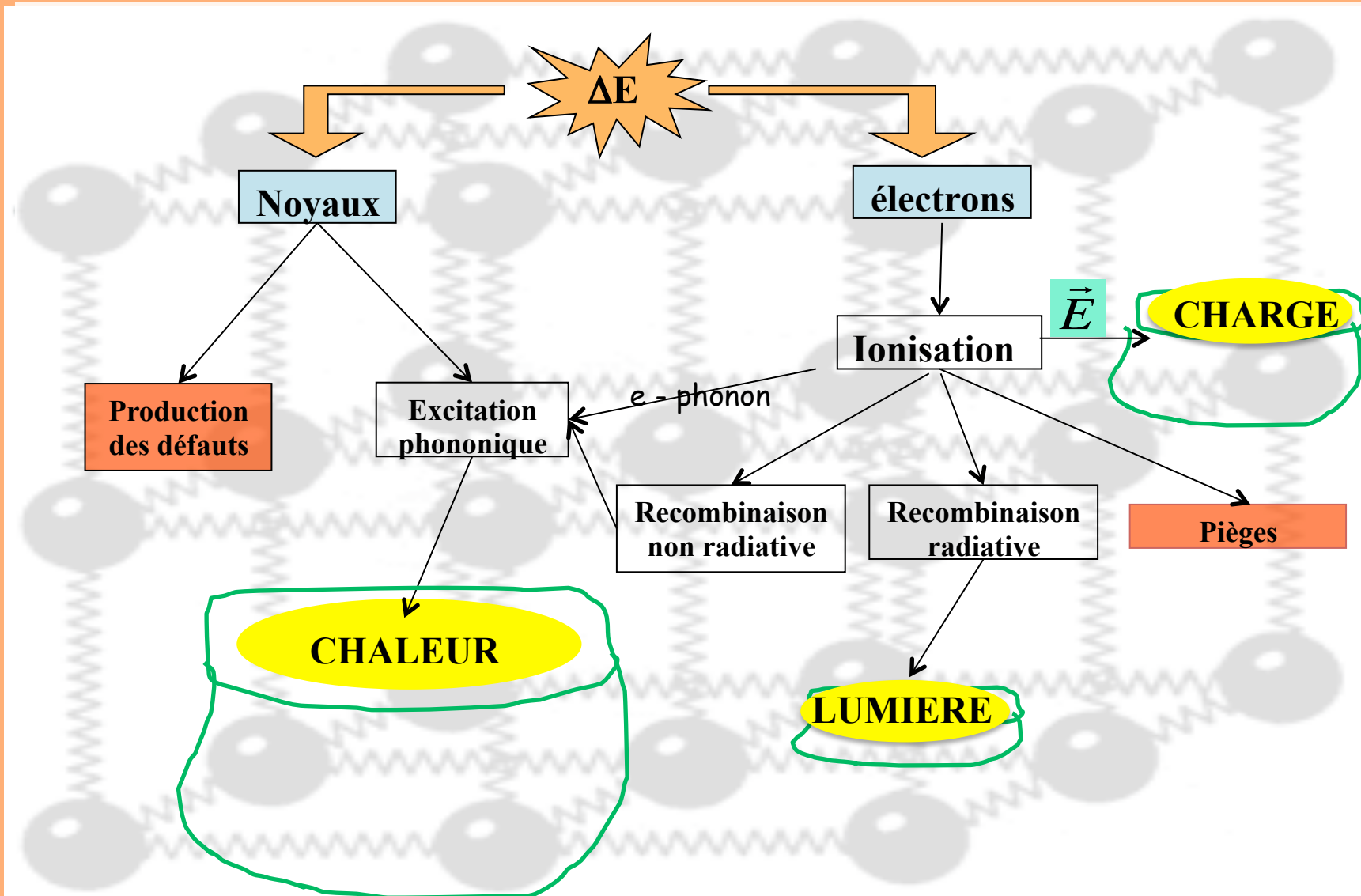
Avec les électrons: ionisation



Les bolomètres sont les seuls détecteurs de particules qui récupèrent l'énergie absorbée par le réseau.

Le reste des détecteurs mesure l'ionisation produite

Partition de l'énergie après un dépôt d'énergie

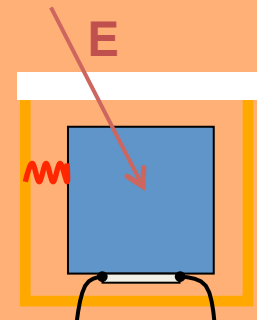


Les atouts des bolomètres

- La plupart de l'énergie est absorbée comme chaleur (excitation des phonons) **pour tous les types de particules** (chargées ou neutres)
- Le quantum d'excitation est petit:
 - Energie d'un phonon **thermique** $\sim 10^{-5}$ eV
- **Large éventail de cibles: grande applicabilité**
- **Pas (ou très peu) de sélectivité de la réponse sur particules**
 - Particules non ionisantes (reculs, ions lourds, molécules) !
- Absence de fenêtre → **pas de « stragging »**

Très bon
seuil de
détection

Résolution
énergétique
excellente
(de 1 à 0.1%)

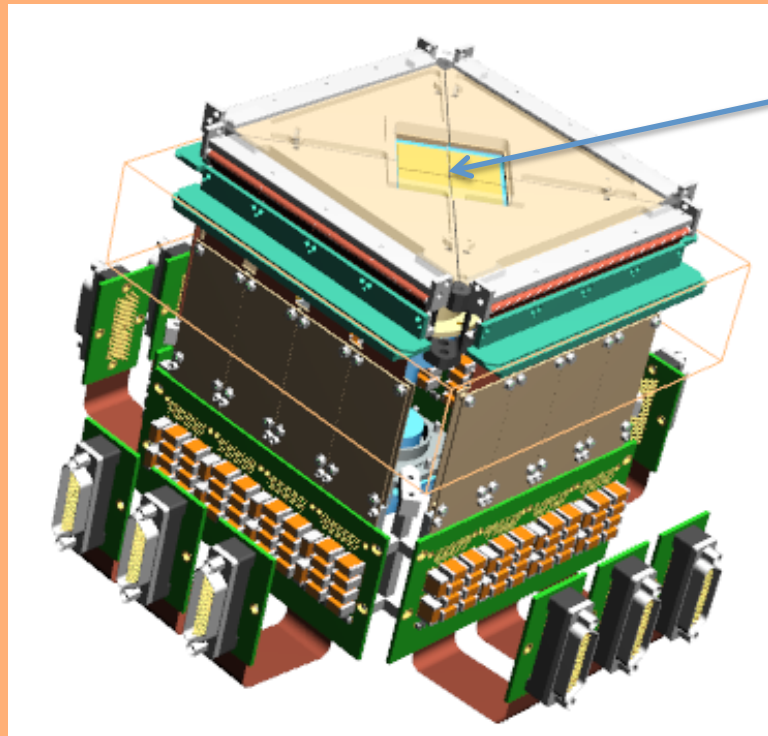


...et leur faiblesses

- Ils sont des détecteurs d' **équilibre**: les meilleures performances sont atteintes lors que l'équilibre thermodynamique s'installe
 - Le temps de thermalisation peut être **long** à basse température (recombinaison finale à travers du gap)
- **Lenteur**
(Taux max \approx qq.10kHz*)
- **Pas d'information topologique**
- **Travail à basse température (10-50 mK)**
(réfrigérateur à dilution)
- **Sensibles à toute sorte de particule...mais aussi à des vibrations!** => environnement calme

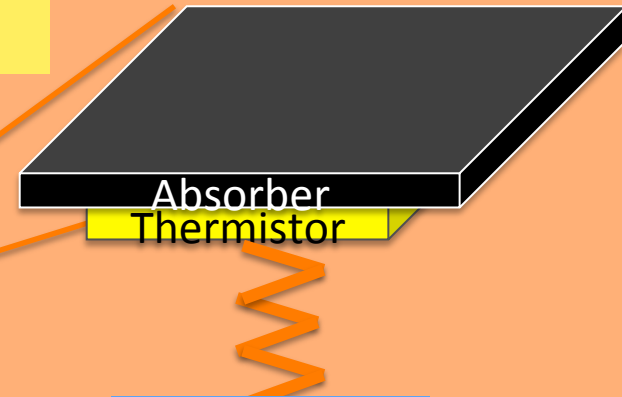
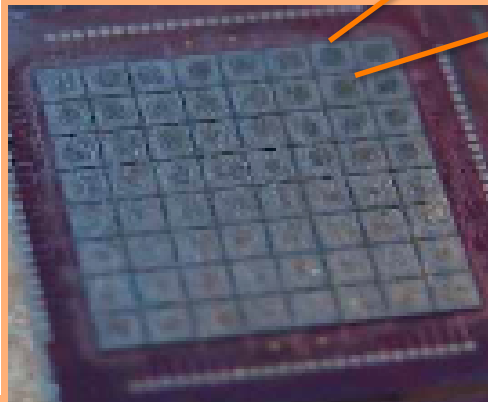
Appelés là où la très haute résolution est nécessaire

- Exemple: spectroscopie X pour l'Astronomie (détection photon par photon)
 - Les prochains observatoires spatiaux en X seront à base de matrices de μ calorimètres (ATHENA +)
 - Au SAp/CEA: Conception d'une camera à base de μ calorimètres pour la détection de rayonnement X



Plan focal:
~4000 détecteurs à 50mK
(aire de $3.2 \times 3.2 \text{ cm}^2$)

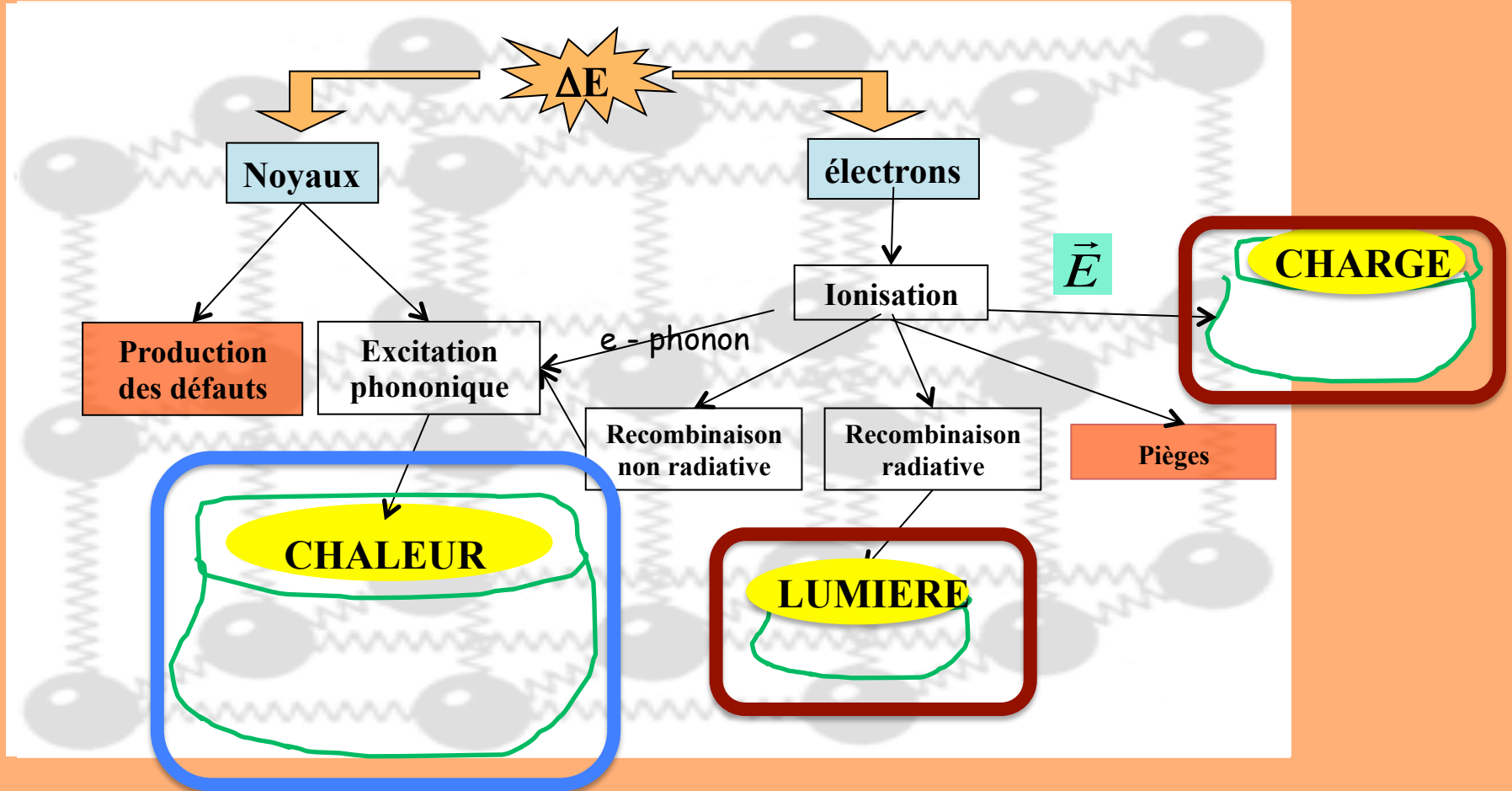
Prototype matrice 8x8
Ta (abs) + Si (senseur)



$T = 50 \text{ mK}$

Résolution attendue:
2-3 eV à 6keV (^{55}Fe)

La détection hybride bolométrique



Calibration énergétique
Bonne résolution pour toutes les particules

+

Canal qui dépend de l'ionisation
Discrimination des particules
rejet du fond radioactif

Pourquoi peut-on discriminer les particules?

Facteurs de *quenching* de la lumière

(quenching = extinction)

La lumière produite dépend fortement de la particule

- Lumière de scintillation: due à la désexcitation radiative des centres luminescents
 1. Répartition primaire de l'énergie entre le système électronique et atomique du cristal (**calcul de Lindhard 1963**)
 2. Phénomène de saturation de centres de scintillation

Phénomène de saturation de centres de scintillation



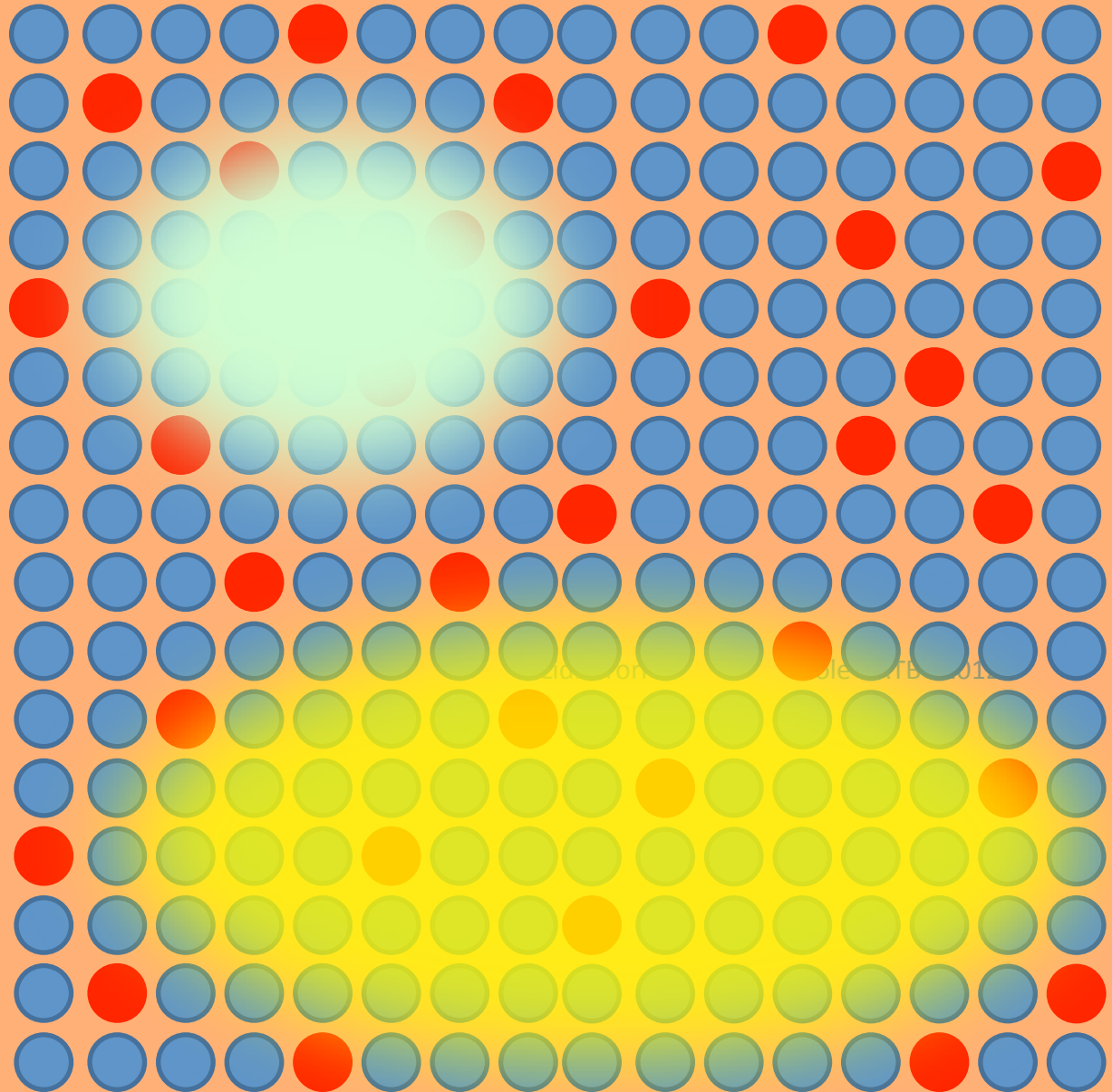
Centre radiatif
producteur de
la lumière

Particule A

Particule B

$$E_A = E_B$$

Le dépôt d'énergie de
moindre densité (dE/dr ↓)
a accès à plus de
centres actifs



Pourquoi peut-on discriminer les particules?

Facteurs de *quenching* de la lumière

(quenching = extinction)

La lumière produite dépend fortement de la particule

- Lumière de scintillation: due à la désexcitation radiative des centres luminescents
 1. Répartition primaire de l'énergie entre le système électronique et atomique du cristal (**calcul de Lindhard 1963**)
 2. Phénomène de saturation de centres de scintillation
- Lumière Cherenkov:

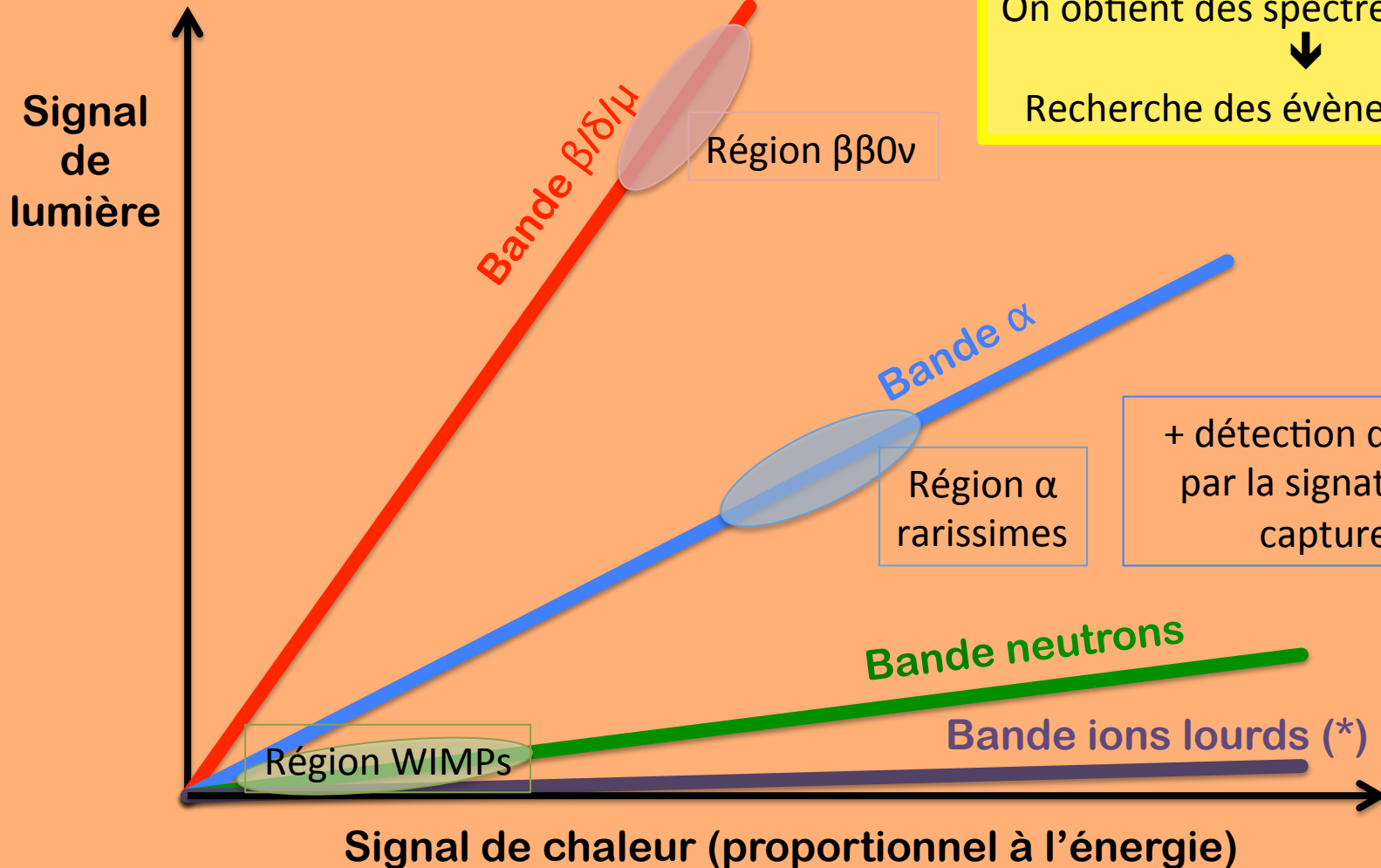
particules chargées. $v_{\text{particle}} > c / n$ n: indice de réfraction du cristal

Calcul pour TeO_2 : [T. Tabarelli de Fatis, *Eur. Phys. J. C* 65 (2010) 359].

- $n = 2.4$
- seuil de lumière pour e \Rightarrow 50 keV
- seuil de lumière pour α \Rightarrow 400 MeV

À tenir en compte pour le rejet de fond à haute énergie ($\beta\beta 0\nu$)

Bandes dans un plot lumière-chaleur



On obtient des spectres « propres »



Recherche des évènements rares

+ détection des neutrons
par la signature de leur
capture en ${}^6\text{Li}$

(*) une bande pour chaque ion

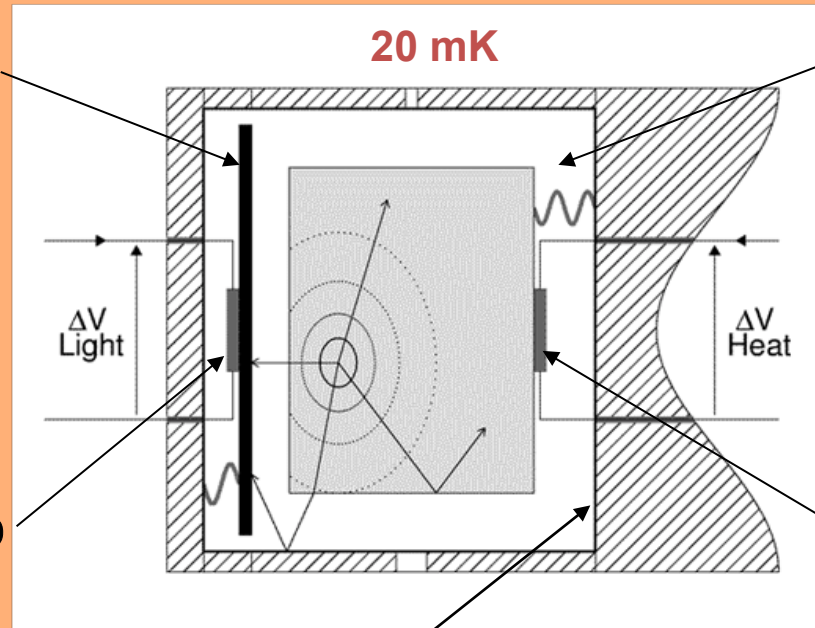
Bolomètres scintillants: principes

Détecteur optique

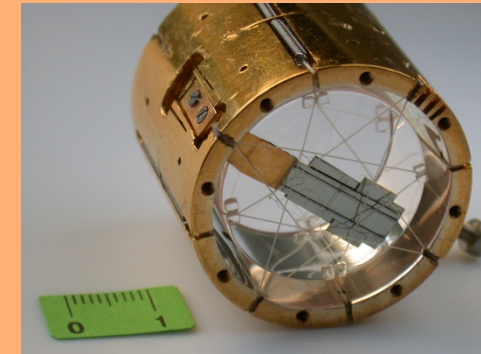


Disque en Ge

Ge-NTD



Cristal scintillant

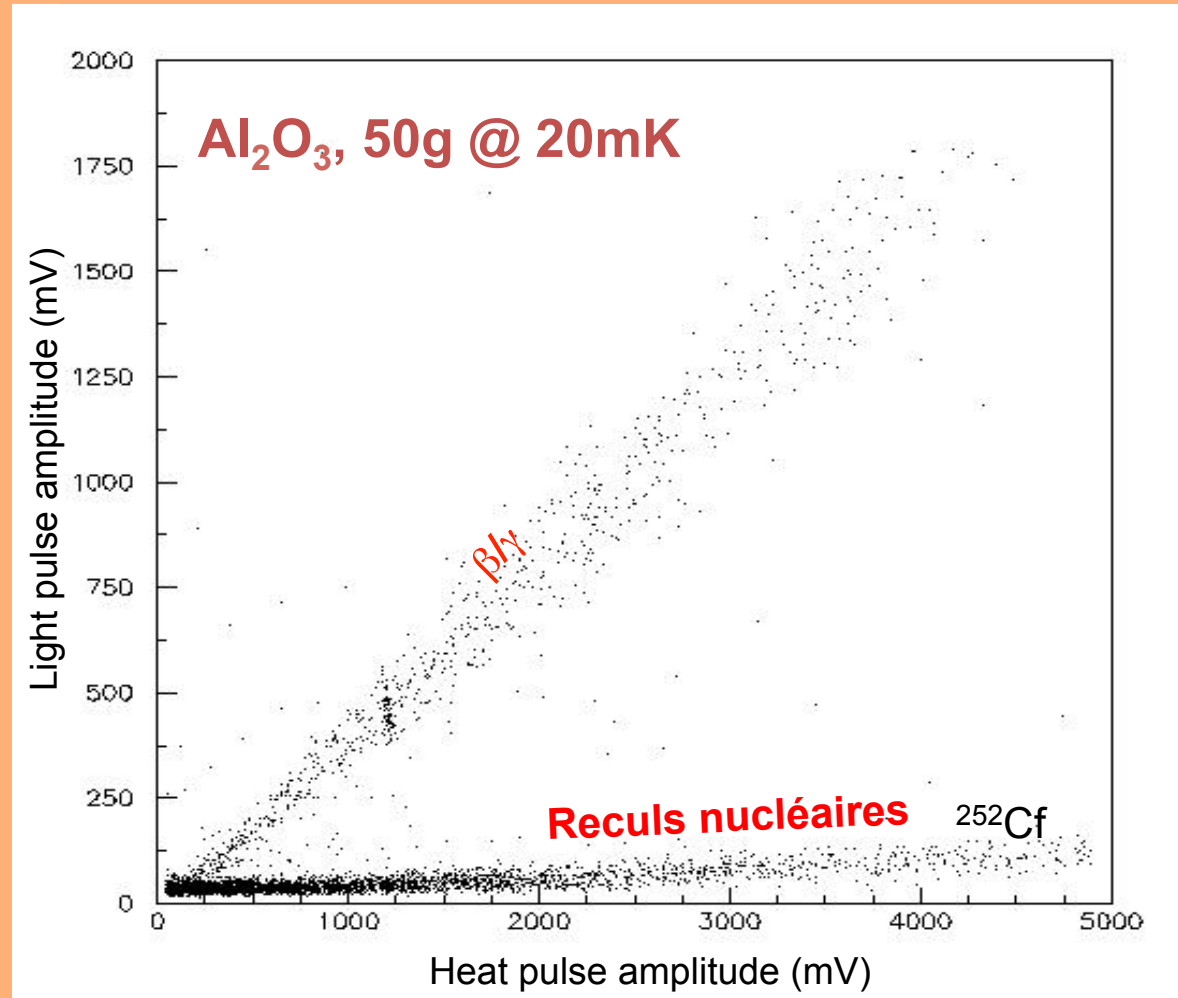
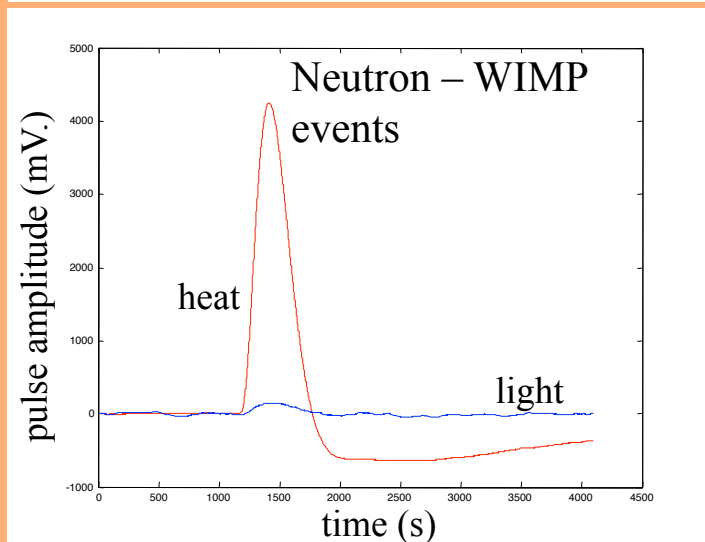
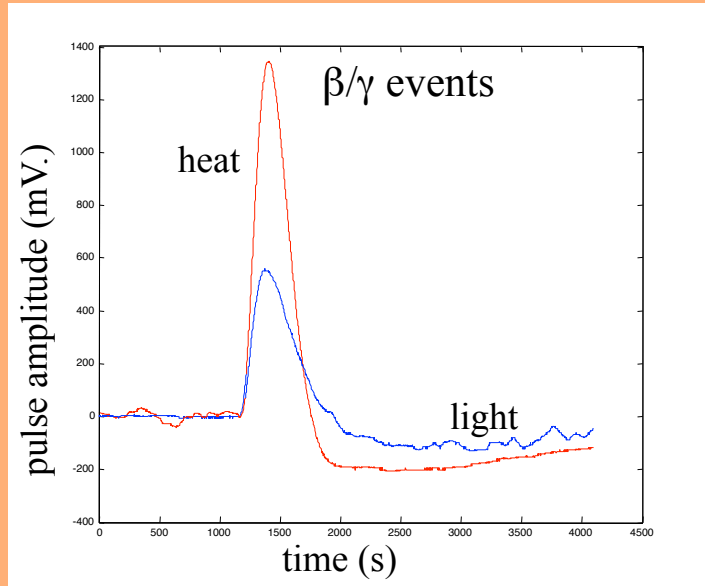


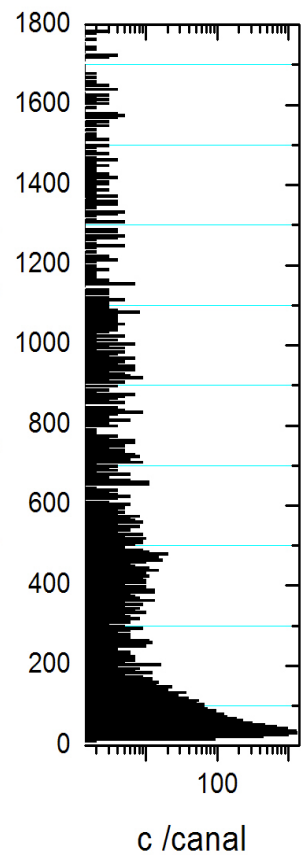
Ge-NTD

Al_2O_3 , 50g

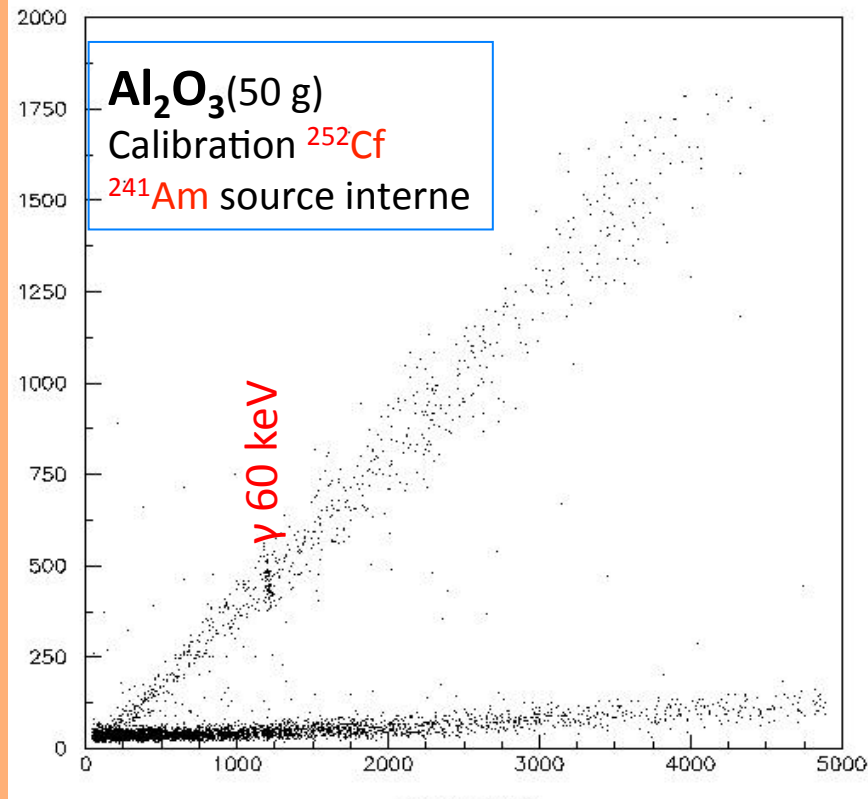
Cavité interne réfléchissante
(dépôt Ag sur Cu)

Discrimination des particules à l'œuvre

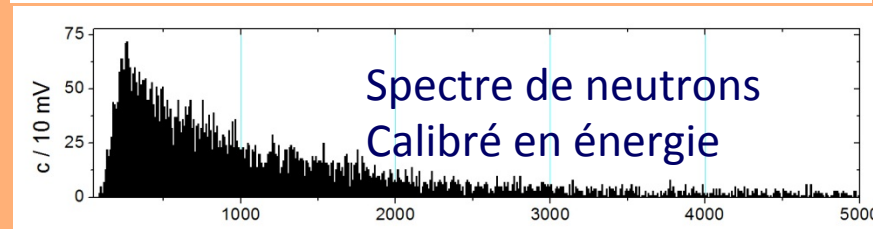
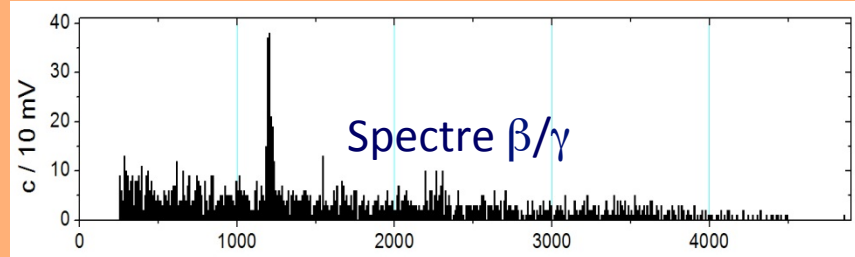




Amplitude signal lumière (mV)



Amplitude signal chaleur (mV)



Spectres purs à partir du seuil de discrimination

Discriminations de particules

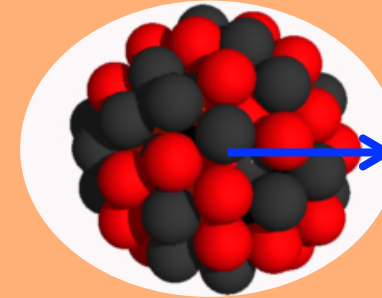
Ex: source de ^{210}Po

Un exemple: Al_2O_3 irradié avec un source de ^{210}Po

$E = 5,3 \text{ MeV}$; Range= $14\mu\text{m}$

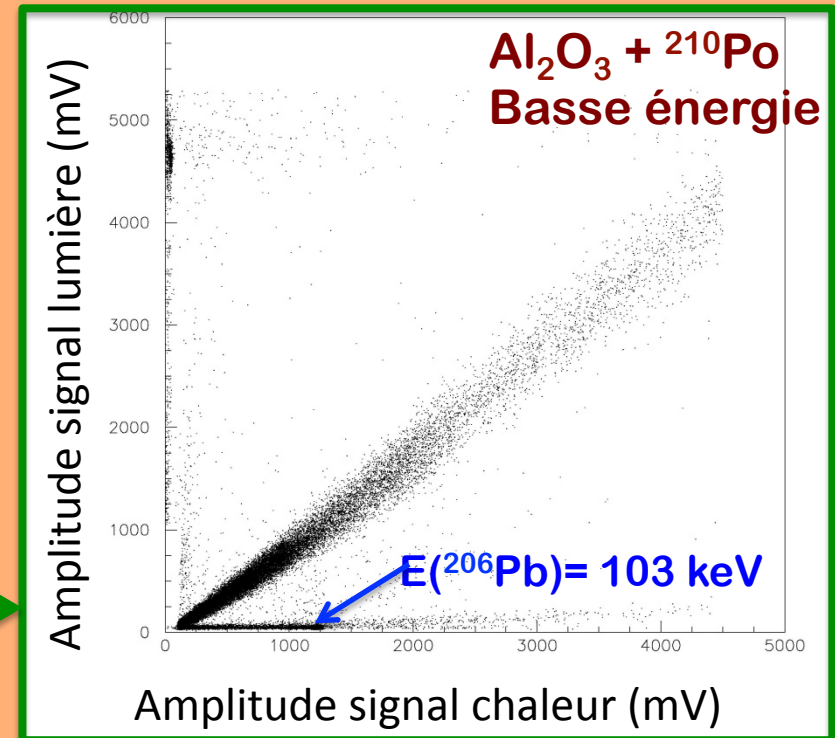
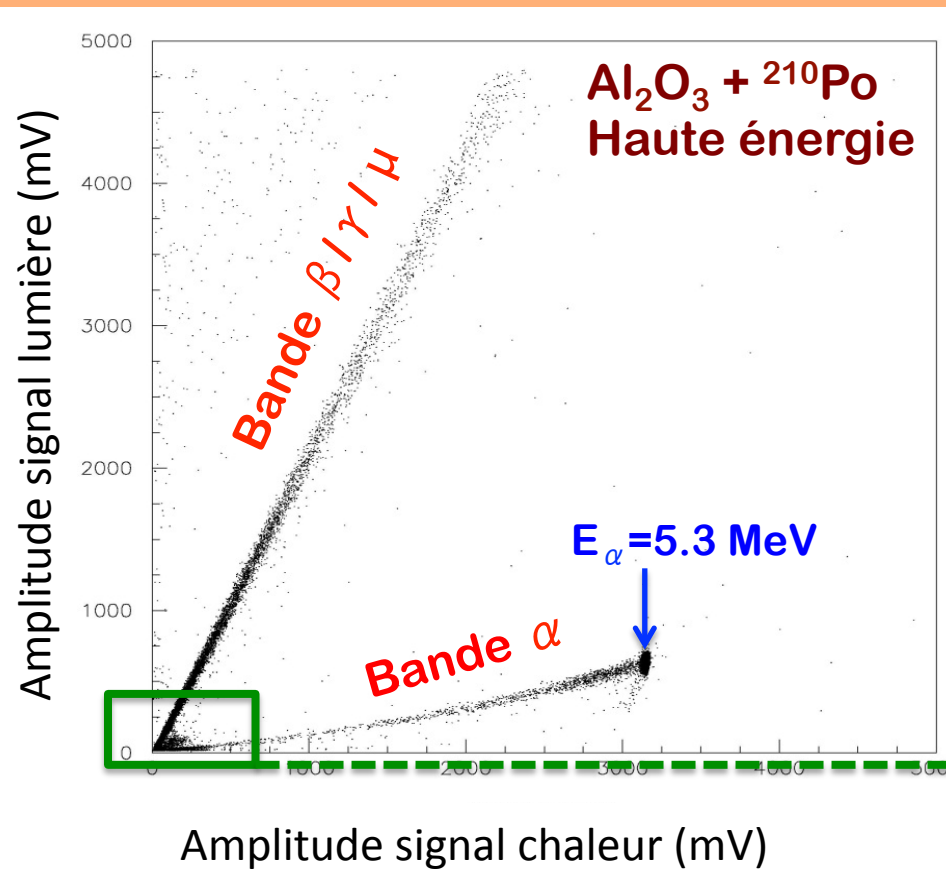


α



^{206}Pb

$E = 103 \text{ keV}$
Range= 26 nm



I. L'instrument

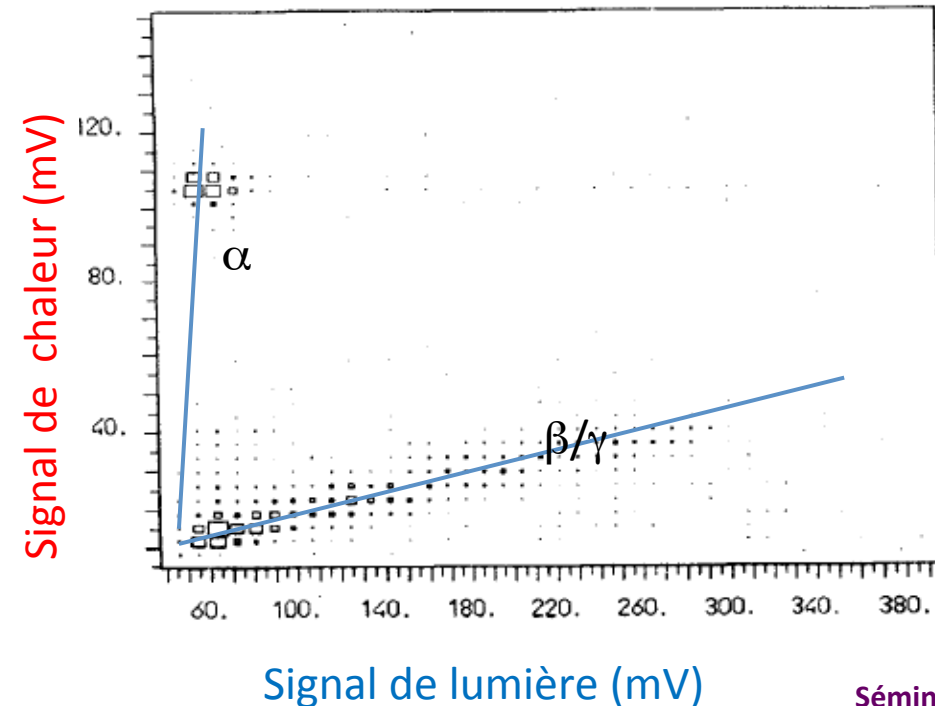
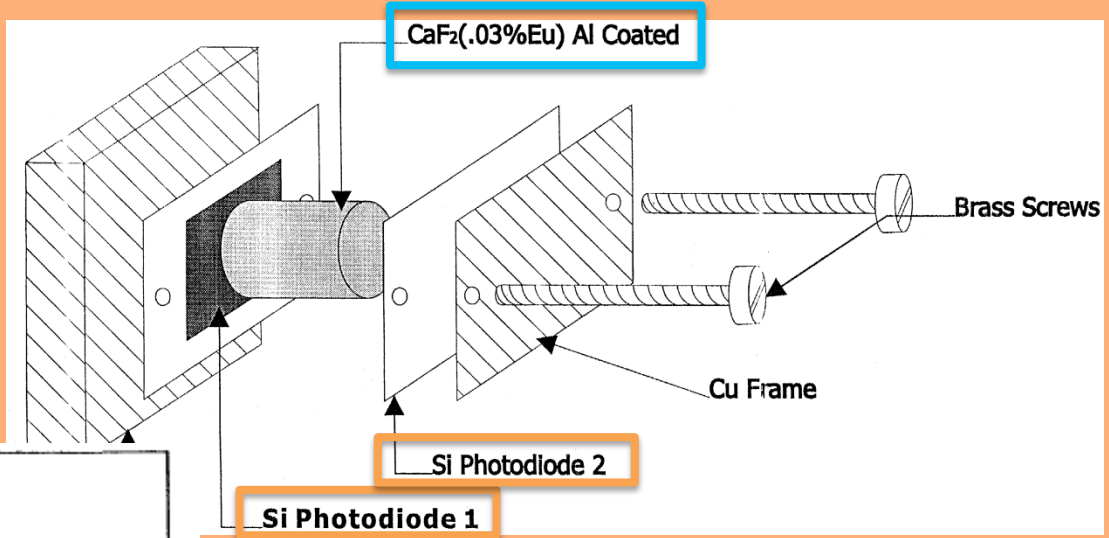
- ① Qu'est-ce que c'est un bolomètre? (détecteur de particules)
- ② Le bolomètre scintillant en configuration de bolomètre double
- ③ **La voie de la lumière (le vrai défi technologique)**
 - a) **Le bolomètre optique. Optimisation**
 - b) **Luminescence à basse température. Optimisation**

II. Les applications

- ① **Détection des événements rares**
 - **Désintégrations alpha rarissimes**
 - **Double désintégration beta sans neutrinos**
 - **Détection de la matière noire (WIMPs)**
- ② **Spectroscopie des neutrons rapides**

Première mesure simultanée de lumière-chaueur (Milan)

Détecteur de lumière:
Deux photodiodes en Si collées au cristal de $\text{CaF}_2:\text{Eu}$



La discrimination entre le fond α et le signal attendu de la désintégration $\beta\beta 0\nu$ ($2e^-$ à $E_{Q\beta\beta}$) est prouvée

A.Alessandrello et al., Proc 7th Moriond (1992) p201

Thèse d'Ezio Previtali à Milan (défendue en Janvier 1993)
« Sviluppo di Rivelatori Bomolettrici per Esperimenti sul Doppio Decadimento Beta del ^{130}Te e ^{48}Ca »

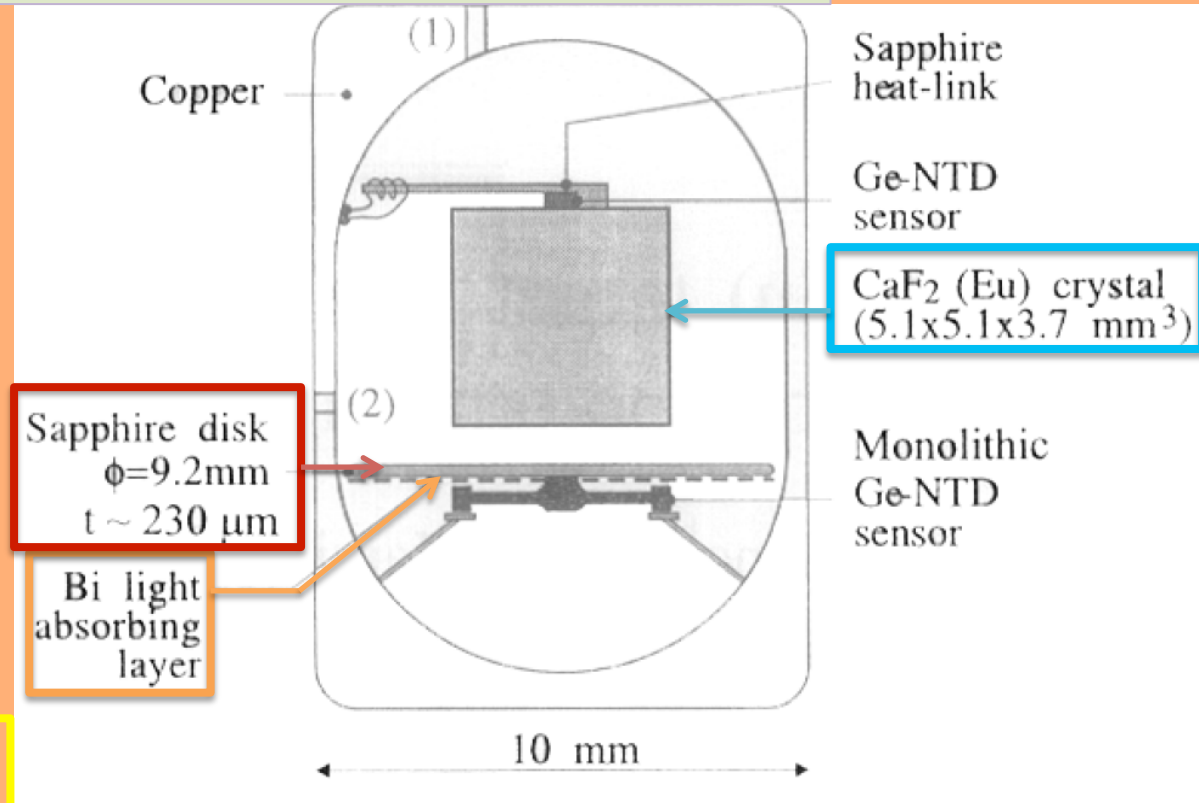
A.Alessandrello et al., Phys. Lett. B 420 (1998) 109-113

Réalisation du première bolomètre optique (IAS)

Détecteur de lumière:
bolomètre de type IR et sub-mm en **saphir** avec couche en **Bismuth**

- ✓ Technologie déjà développée (pour des surfaces $\sim \text{mm}^2$) prête à être adaptée
- ✓ Pour diminuer C à $T \downarrow$ l'absorbant sera remplacé par un semiconducteur.
- ✓ Solution retenue par toutes les expériences actuelles

La discrimination entre les particules α et β/γ est remesurée (même scintillateur).



Thèse de Christophe Bobin à Lyon (défendue en Janvier 1995)
« Bolomètres massifs et détection de la matière noire non baryonique »
C. Bobin et al., Nucl. Instr. Meth. A 386 (1997) 453-457

Comparaison des différents détecteurs de lumière de surface $\sim \text{cm}^2$

Mesure de scintillation à 300K

	Sensibilité NEP	Efficacité quantique	Bande d'absorption	Résolution temporelle (s)
PMs	10^{-16} à 300K 10^{-18} refroidis	$\sim 25\%$	Vis et UV	$\sim 10^{-9}$
Photodiodes	10^{-14}	$\sim 80\%$	NIR-UV	$\sim 10^{-6}$
Bolomètres optiques à cible semiconductrice	10^{-17}	$\sim 100\%$	1eV-10keV	10^{-3} - 10^{-2}

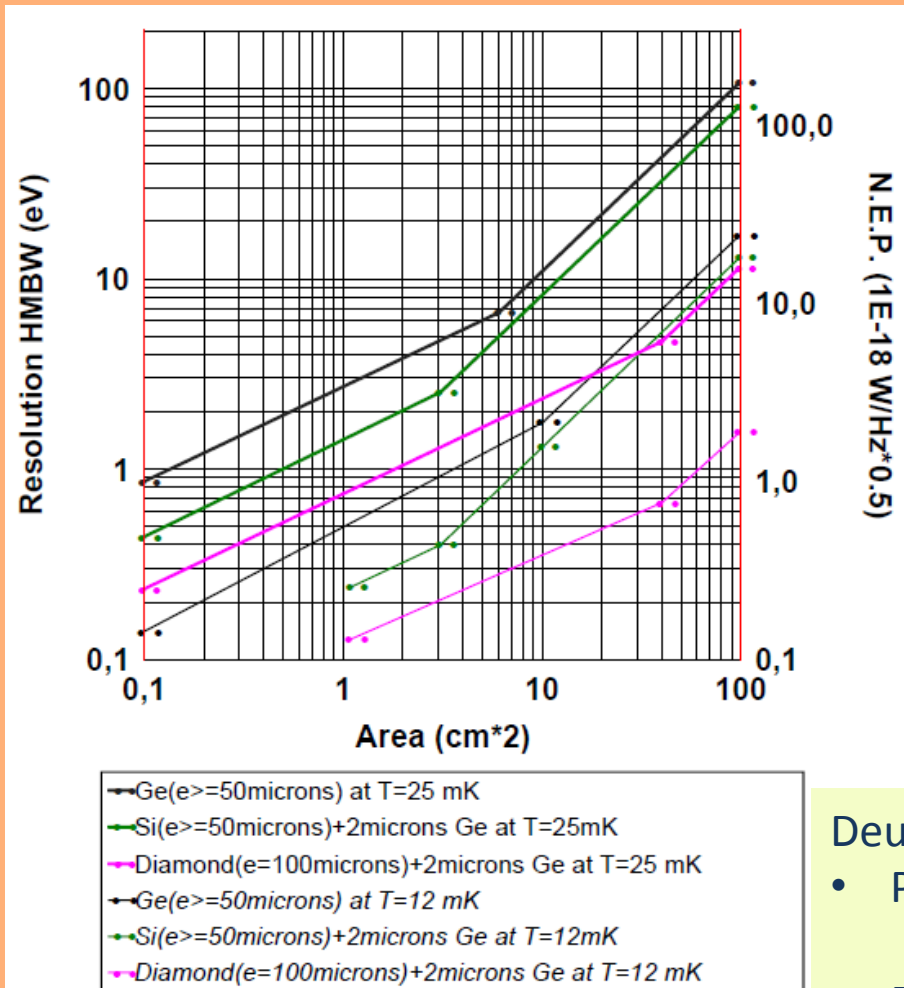
Détecteur de lumière *sur mesure* pour la technique lumière + chaleur

- ✓ Montage face au scintillateur sans fenêtre
- ✓ Calibration absolue de l'énergie sous forme de lumière avec source ^{55}Fe (6 keV)
- ✓ Sensibles à l'énergie et pas au nombre de photons

Mais:

- Il est très sensible à la μ phonie
- Il est lent

Bolomètres optiques: Choix de l'absorbant



- Ge
- Si + Ge
- Diamant + Ge

Absorbant: Ge vs. Si

$C(\text{Ge}) > C(\text{Si})$, mais

- Ge évite stress avec le Ge-NTD
- Meilleure absorption dans le rouge et NIR (bande $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$)

Ge $E_{\text{gap_OK}} = 0.72\text{eV} \rightarrow \text{abs } \lambda < 1.67\mu\text{m}$

Si $E_{\text{gap_OK}} = 1.15\text{eV} \rightarrow \text{abs } \lambda \leq 1.1\mu\text{m}$

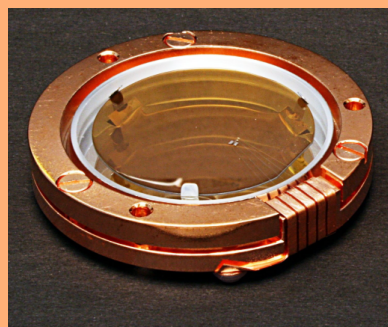
Deux approches:

- Pour un scintillateur avec émission $\lambda \leq 1.1\mu\text{m}$
Si est préféré (Ex: CRESST avec CaWO_4 à 420nm)
- R&D des différents scintillateurs
Ge est choisi pour sa plus large absorption

Performances des bolomètres optiques actuelles

Experiment	Absorber	Dimensions Thickness	T	Base line FWHM	Application
IAS	Ge	$\Phi=25\text{mm}$ $\text{ép}=45\mu\text{m}$	22mK	30 eV	WIMPs
LUCIFER	Ge	$\Phi=66\text{ mm}$ $\text{ép}=1\text{ mm}$	15mK	230 eV	$\beta\beta 0\nu$
CSNSM	Ge	$\Phi=50\text{ mm}$ $\text{ép}=250\mu\text{m}$	17mK	88 eV	$\beta\beta 0\nu$
CRESST	Si-on- Sapphire	$\Phi=40\text{mm}$ ($1\mu\text{m-on-}46\mu\text{m}$)	10mK	16 eV	WIMPs

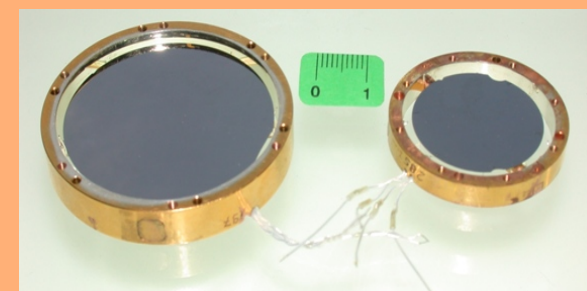
Sensibilité
x2 avec
effet Luke



CRESST
 $\varnothing = 40\text{ mm}$
FWHM=16 eV



LUCIFER
 $\varnothing = 66\text{ mm}$
FWHM=230 eV



IAS
 $\varnothing = 40\text{ mm}$ $\varnothing = 25\text{ mm}$
FWHM= 45 eV FWHM= 30 eV

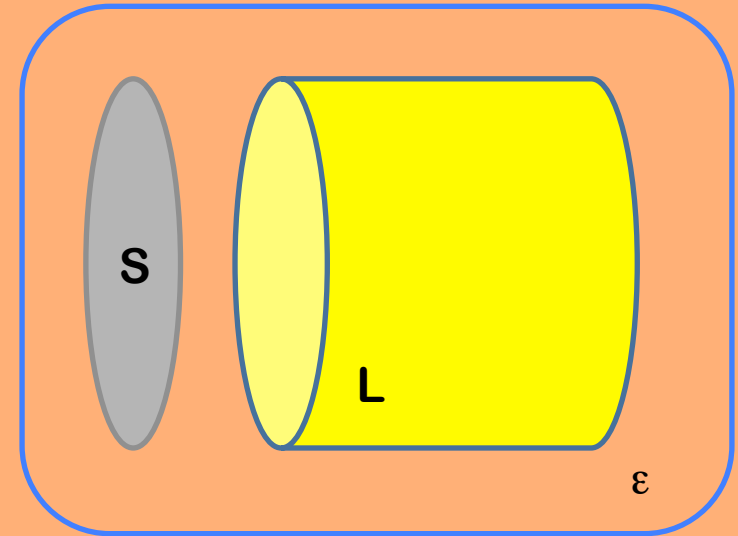
L'optimisation

1. Le bolomètre optique

Paramètres à optimiser:

- **S**: sensibilité du détecteur optique
- **L**: luminescence du cristal
- ϵ : efficacité optique (fraction de photons détectés)

Spécifiques pour
chaque cristal

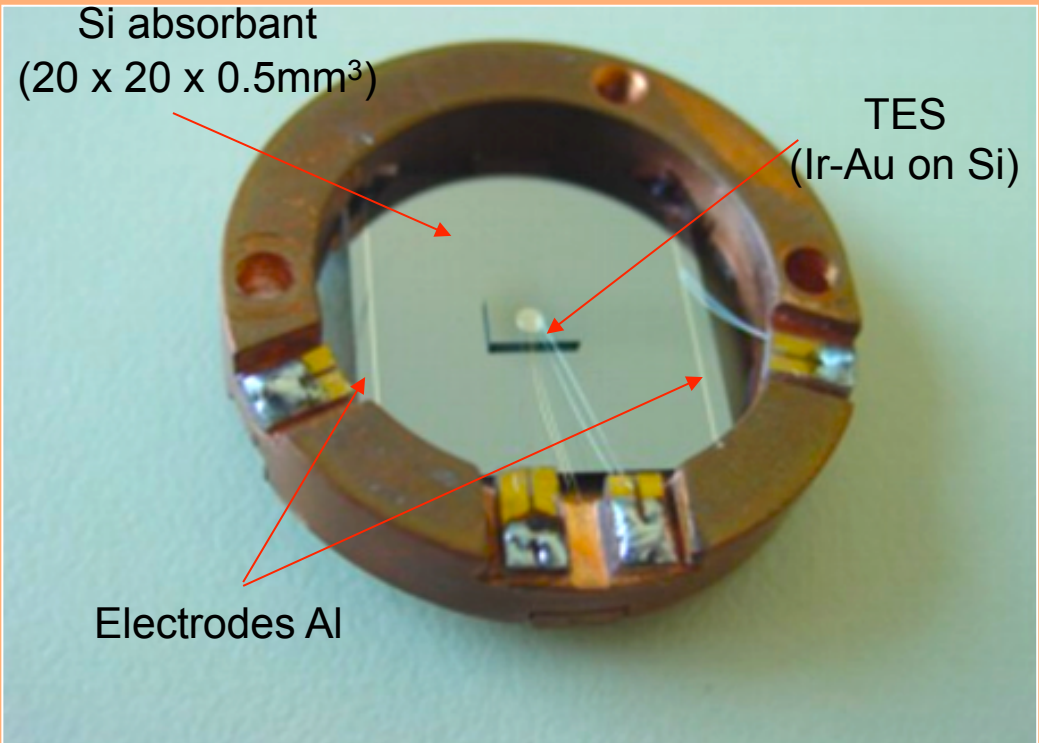


↓ Cela sert à toutes les applications!!

Deux approches
actuelles:

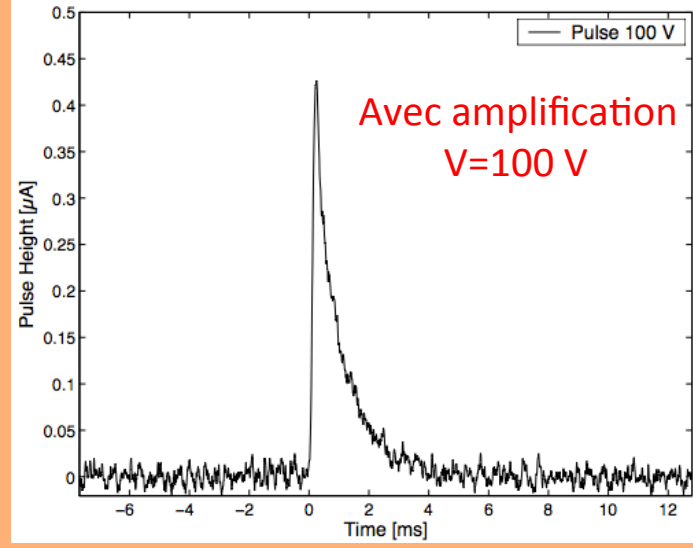
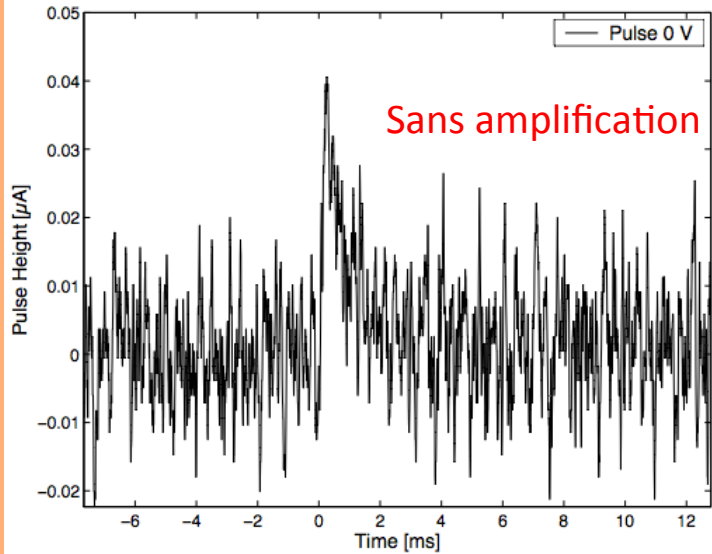
1. Amélioration des propriétés d'absorption de la lumière de l'absorbant
2. **Bolomètres optiques à effet Neganov-Luke:**
amplification du signal phononique dans le semi-conducteur par la dérive des charges lors de l'application de un champ E

Bolomètres optiques à effet Luke en silicium (Munich pour CRESST) *(d'après C. Isaila Phys. Lett B 716 (2012) 160)*

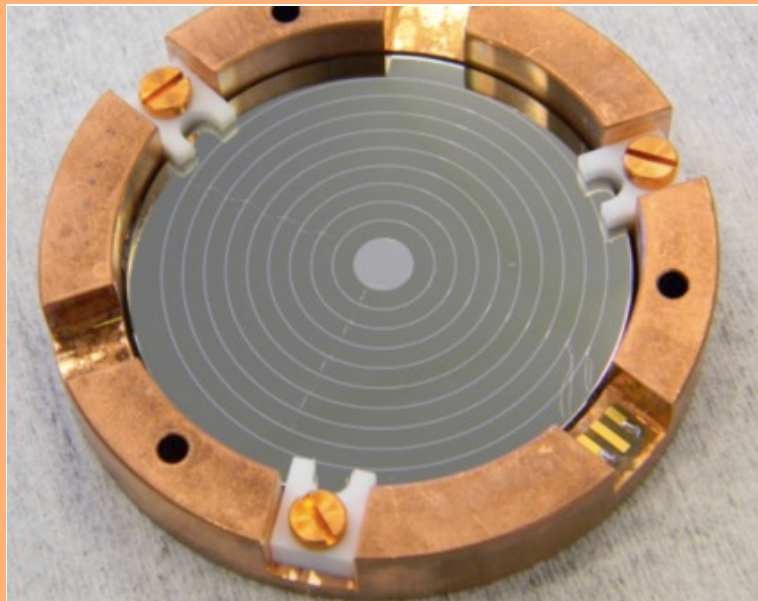


Gain en signal x 13
Gain en S/B x 9

FWHM = 10 eV
(à comparer avec 16 eV sur $\Phi=40$ mm
obtenue sans effet Luke)

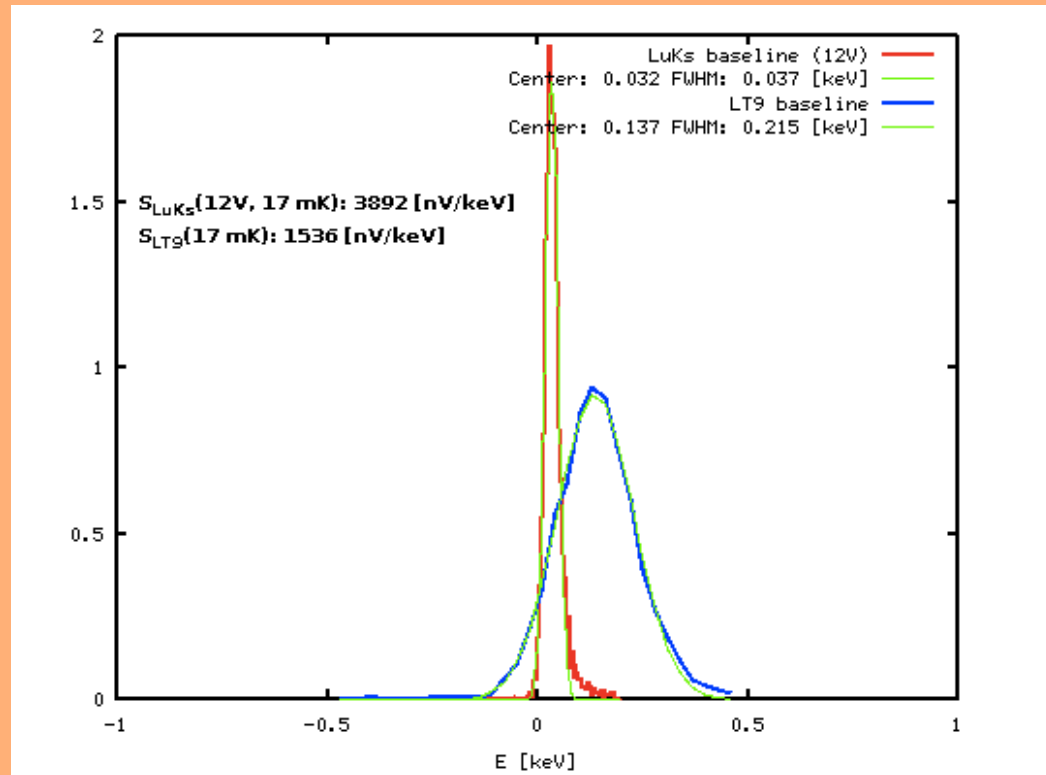


Bolomètres optiques à effet Luke en germanium (CSNSM) *(d'après E. Olivieri PhotoDet 2012)*



$\Phi = 50.8 \text{ mm}$
 $\text{Ép} = 500 \text{ }\mu\text{m}$

Electrodes concentriques en Al
déposées sur le disque en Ge
(technologie héritée
d'EDELWEISS-FID)



$\text{FWHM}_{\text{LuKs}}(12\text{V}, 17 \text{ mK}): 37 \text{ eV}$ ←
 $\text{FWHM}_{\text{LD}}(17 \text{ mK}): 215 \text{ eV}$

Gain en S x 2.5
Gain en S/B x 6

(à comparer avec 88 eV obtenu sans effet Luke)

Vers une palette sans précédent de scintillateurs à haute résolution

- A l'IAS, luminescence trouvée dans tous les cristaux testés, à 20mK

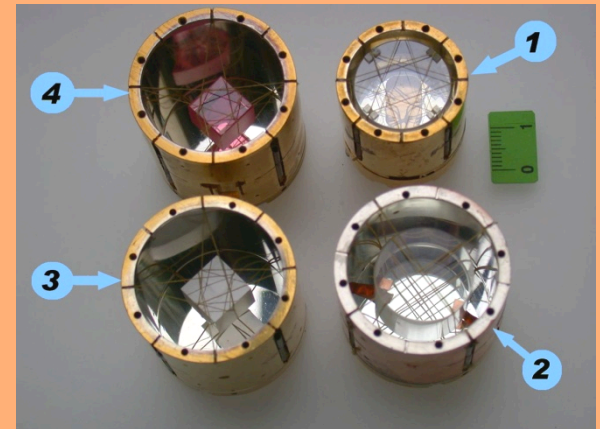
Montages en bolomètres
(lumière & chaleur)

- CaWO_4
- BGO
- LiF
- TeO_2
- Al_2O_3
- SrF_2



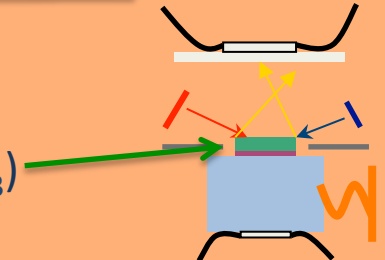
Cristaux seuls devant bolomètre
optique (lumière)

- YAP:Ce (3)
- GSO:Ce
- CaF_2 :Eu (2)
- Al_2O_3 :Ti (4)



Montage en bolomètre à cible démontable
(identification par les constantes de temps):

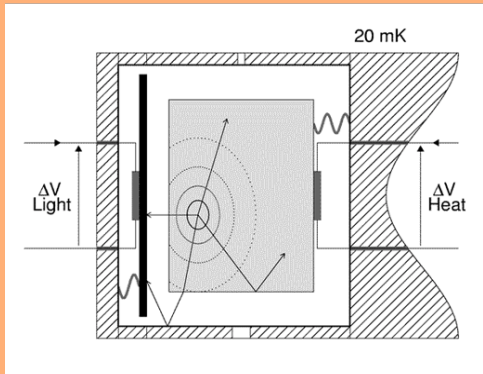
quartz (SiO_2), LGBO ($\equiv \text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$), LEB ($\equiv \text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$)



- + tous ceux testés par Stefano Pirro (R&D INFN BoLux pour $\beta\beta 0\nu$)

ZnMoO_4 PbMoO_4 SrMoO_4 CdMoO_4 CaMoO_4 ZnSe
 CdWO_4 CaF_2

La grande applicabilité des bolomètres est gardée



Mesure de lumière difficile à rater:

- ✓ Détecteur optique adapté et sensible
- ✓ Signal de chaleur en coïncidence (mesure de l'énergie)

- Pour la désintégration $\beta\beta 0\nu$:

- ✓ Lumière Cherenkov:

Rejet de fond efficace dans la région d'intérêt pour tous les cristaux!
(avec des bolomètres optiques suffisamment sensibles)

- ✓ Des bons scintillateurs contenant des noyaux ^{100}Mo et ^{82}Se sont au menu (ZnSe , ZnMoO_4)

- Pour la matière noire:

- ✓ il y a des scintillateurs avec des très bas seuils de discrimination neutrons vs. β/γ

- mais le signal de lumière des reculs des noyaux à basse énergie reste au niveau du bruit

- Pour la détection des neutrons: recherche des nouveaux scintillateurs contenant ^6Li et ^{10}B

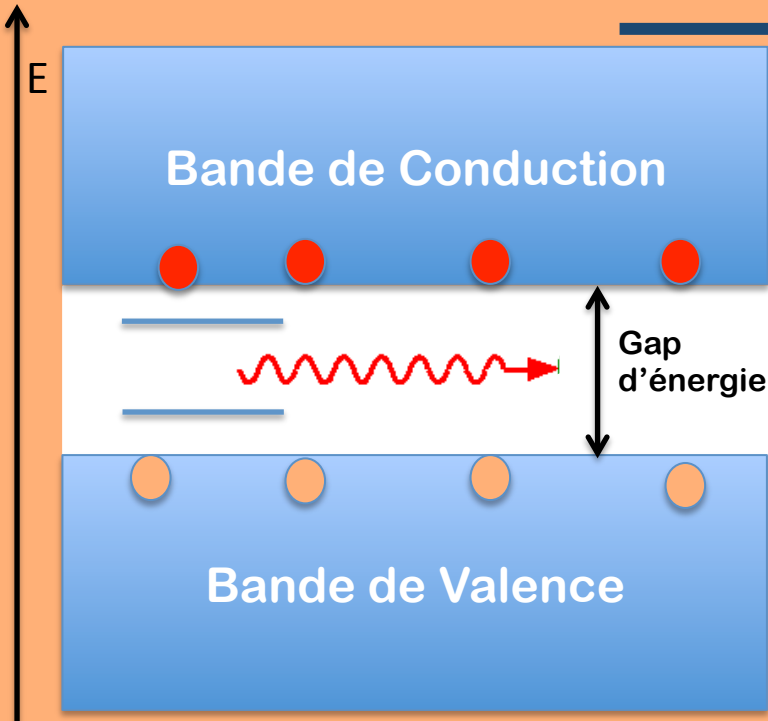
L'optimisation de la scintillation à basse température

Phénomène qui doit être mieux compris

Multidisciplinarité

Scintillation à basse T (~10-20 mK)

Il s'agit d'une discipline nouvelle (~10 ans)



Les excitons (paire électron-trou couplé) jouent un rôle important dans la scintillation

- Ils ont une énergie de couplage de 1meV
 - U (à 300K)=26meV capable de découpler les excitons
- => Son rôle sera plus important à basse T

Les résultats obtenus à 300K ne sont pas extrapolables à T↓

- le transport de l'énergie aux centres de scintillation est $f(T)$
- La probabilité d'émission d'un centre est $f(T)$
- ...

Il faut, d'abord, comprendre le mécanisme d'émission

(plus compliqué pour les scintillateurs extrinsèques: émission due à la présence d'impuretés et/ou défauts)

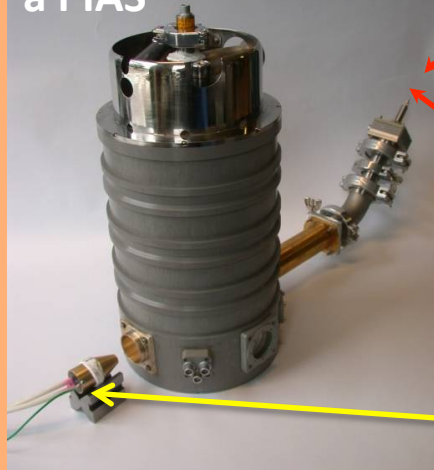
- Etude de la luminescence $f(T)$
- Etude du spectre de scintillation $f(T)$
- Etude des constantes de temps de scintillation $f(T)$

« Recommencer tout de 0 »
Refaire le travail fait à 300K

Article Review: V.B. Mikhailik et al., Phys. Status Solidi B 247, No. 7 (2010)

Qqs montages pour l'étude de la scintillation à basse T

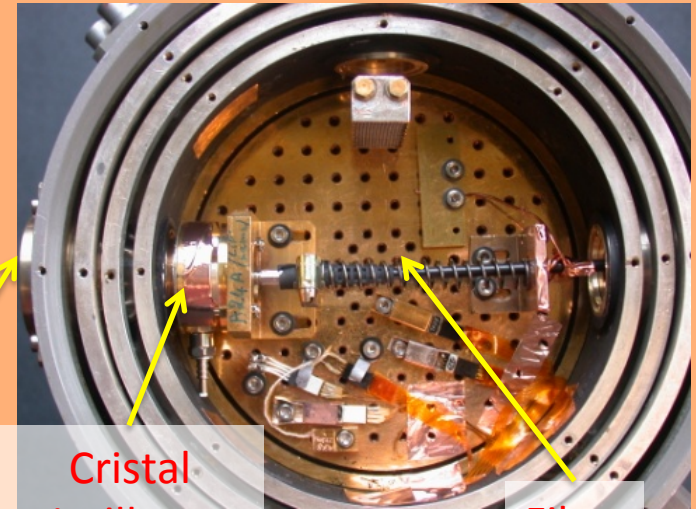
Cryostat à fibre à l'IAS



Vers spectromètre à fibre

Vers Photodiode Si Luminescence f(T)

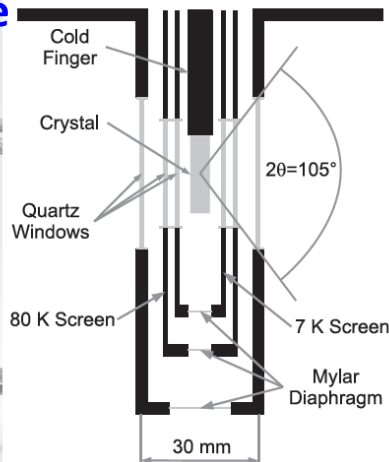
Tube X



Cristal scintillateur

Fibre

Cryostat optique Lyon

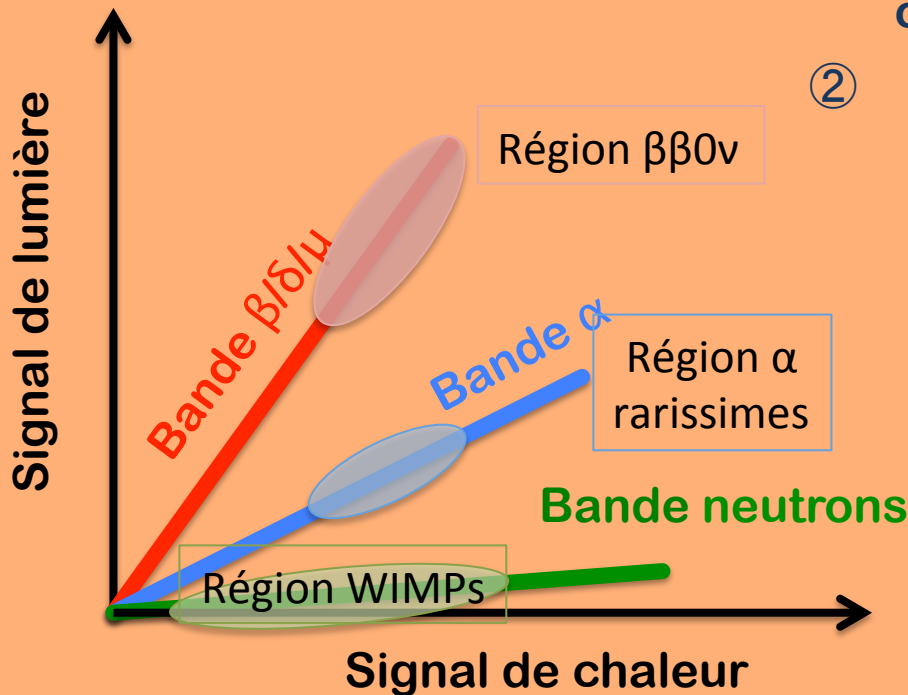


Mesure de luminescence et constantes de temps du BGO et BaF2 sous excitation γ

Thèse M.A. Verdier, Université de Lyon, 2010

II. APPLICATIONS DES BOLOMETRES SCINTILLANTS

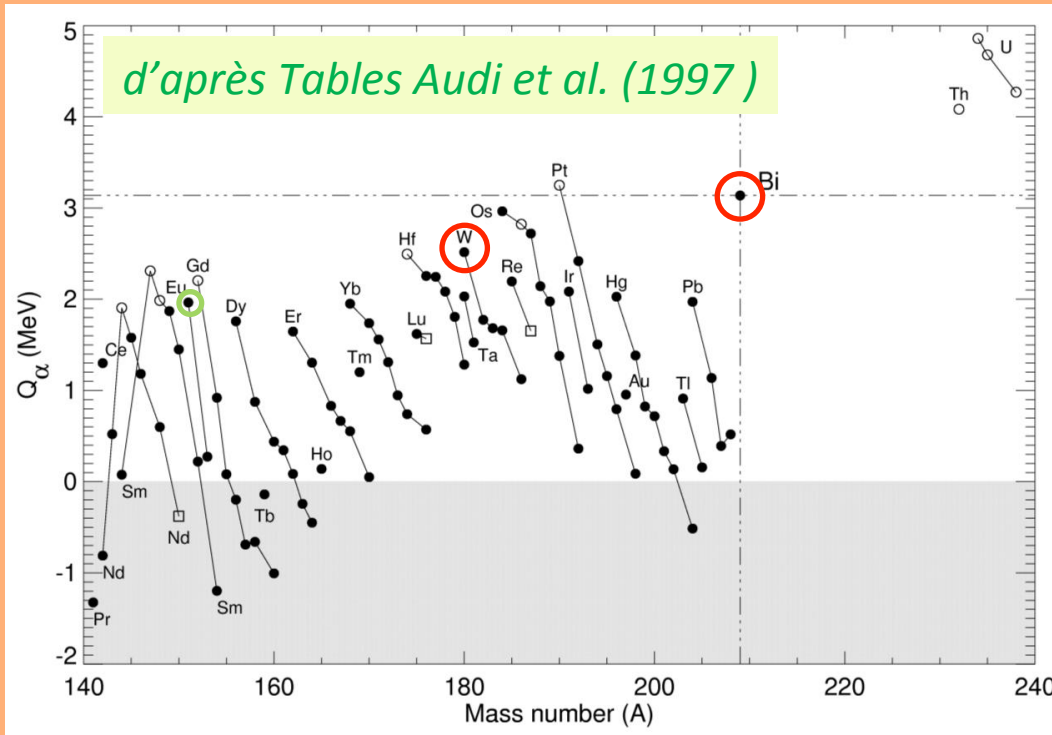
- ① Détection des évènements rares
 - a. Désintégrations alpha rarissimes
 - b. Double désintégration beta sans neutrinos
 - c. Détection de la matière noire (WIMPs)
- ② Spectroscopie des neutrons rapides



Détection des désintégrations alpha rares avec des bolomètres scintillants

La détection des alphas de $Q_\alpha < 3\text{MeV}$ est difficile :

- $T_{1/2}$ est élevé (peu d'énergie disponible pour l'effet tunnel à travers la barrière nucléaire)
- $Q_\alpha \sim E$ des γ des chaînes naturelles qui dominent le fond



- Détectée
- Détectée avec des bolomètres scintillants
- Pas détectée
- Indications avec des scintillateurs (reste à confirmer)

Désintégrations alpha de

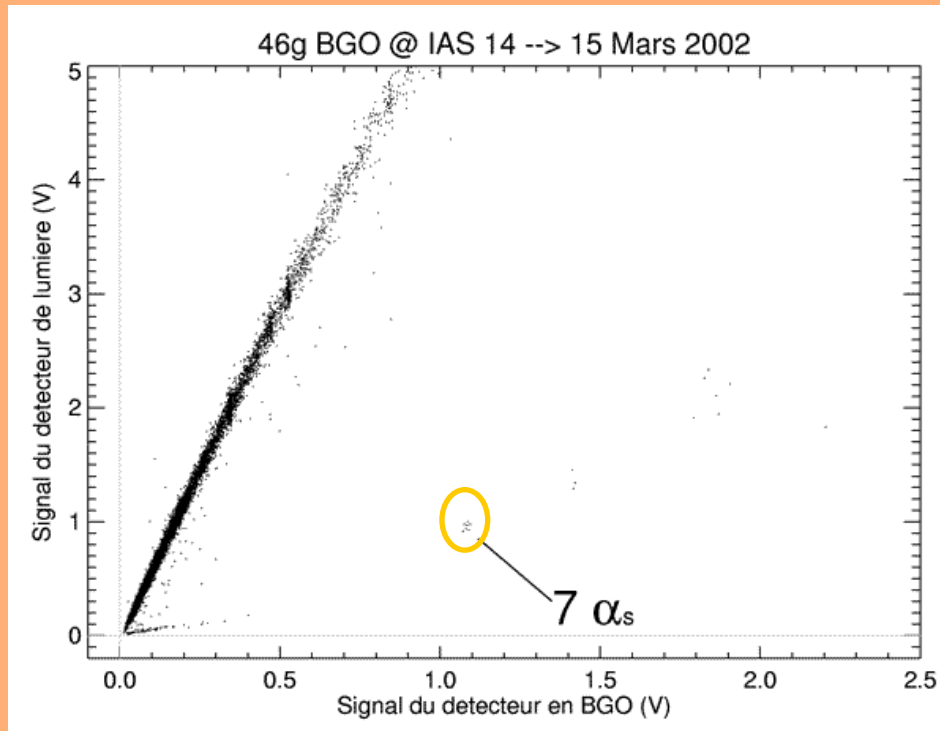
- ✓ ^{209}Bi (IAS; 2002 & LNGS; 2010) $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{19}$ ans
- ✓ ^{180}W (CRESST; 2004) $T_{1/2} \approx 2 \cdot 10^{18}$ ans

Première détection de la désintégration α du ^{209}Bi

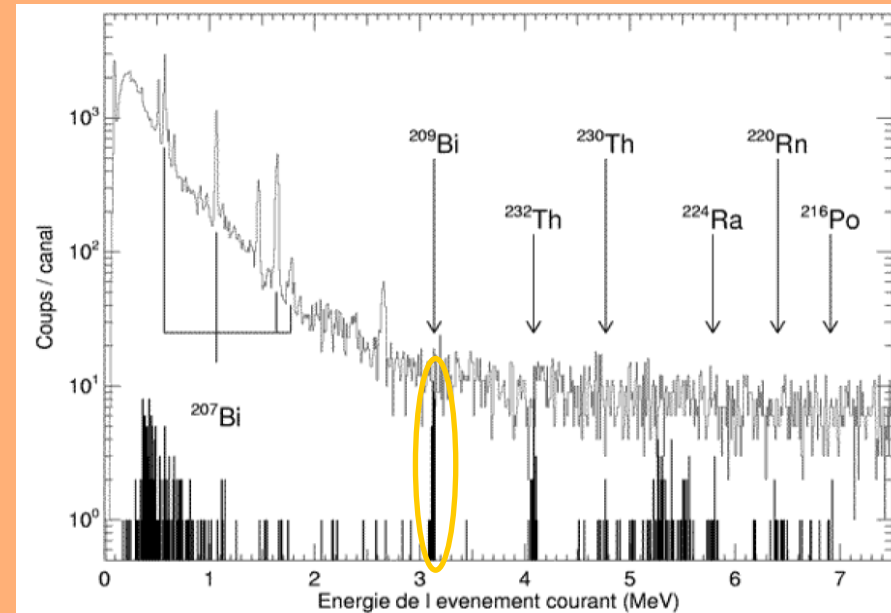
P. de Marcillac et al., Nature 422, 876 (2003)

Première mesure d'une nuit à l'IAS (~15h)

46g de BGO contiennent $\sim 3 \cdot 10^{22}$ noyaux de ^{209}Bi



Spectre total obtenu avec le BGO 46 g
(^{209}Bi confirmé par une mesure avec BGO 91g)

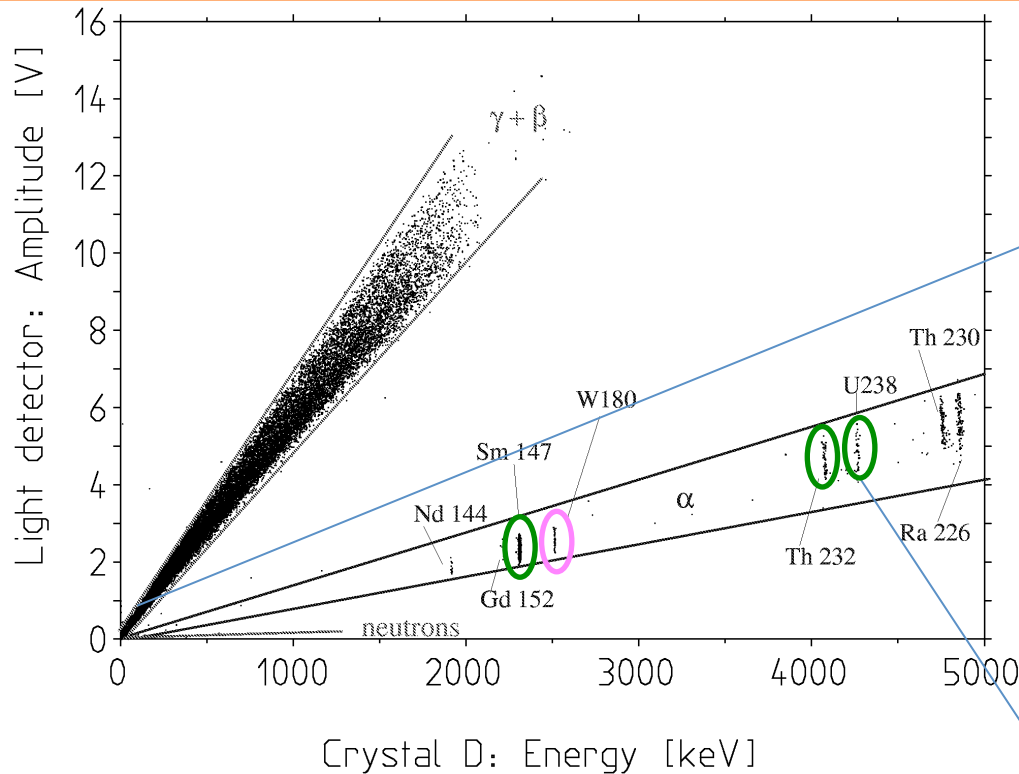


$$T_{1/2} = 1,9 \pm 0,2 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

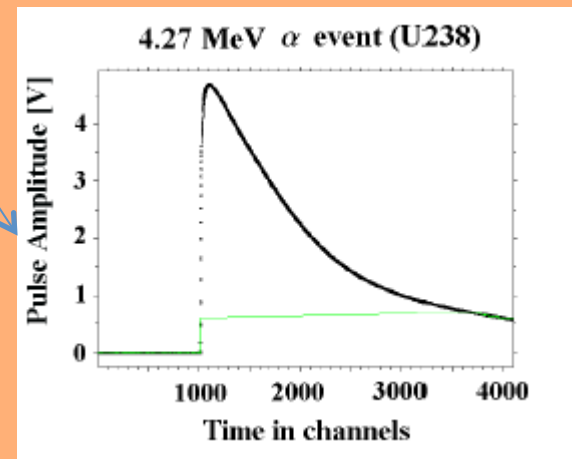
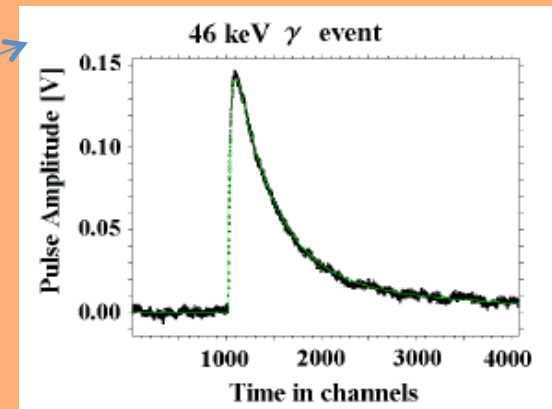
$$E_{Q\alpha} = 3137 \text{ keV} \pm 1(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})$$

Détection de la désintégration α du ^{180}W

C. Cozzini et al., *Physical Review C* 70 (2004)



Impulsions de chaleur: Les TES travaillent au dessus de la transition. La perte de linéarité est retrouvée par des gabarits



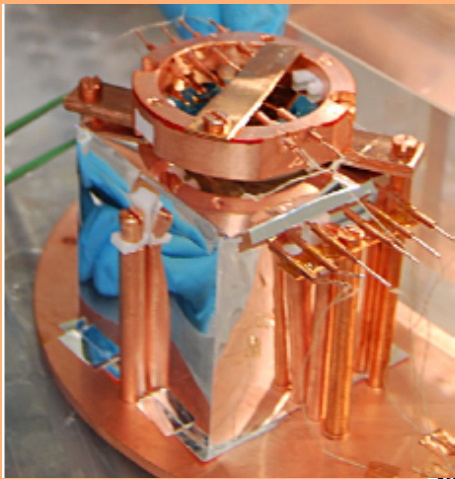
Calibration avec ^{147}Sm , ^{232}Th et ^{238}U

$$T_{1/2} = 1,8 \pm 0,2 \cdot 10^{18} \text{ ans}$$

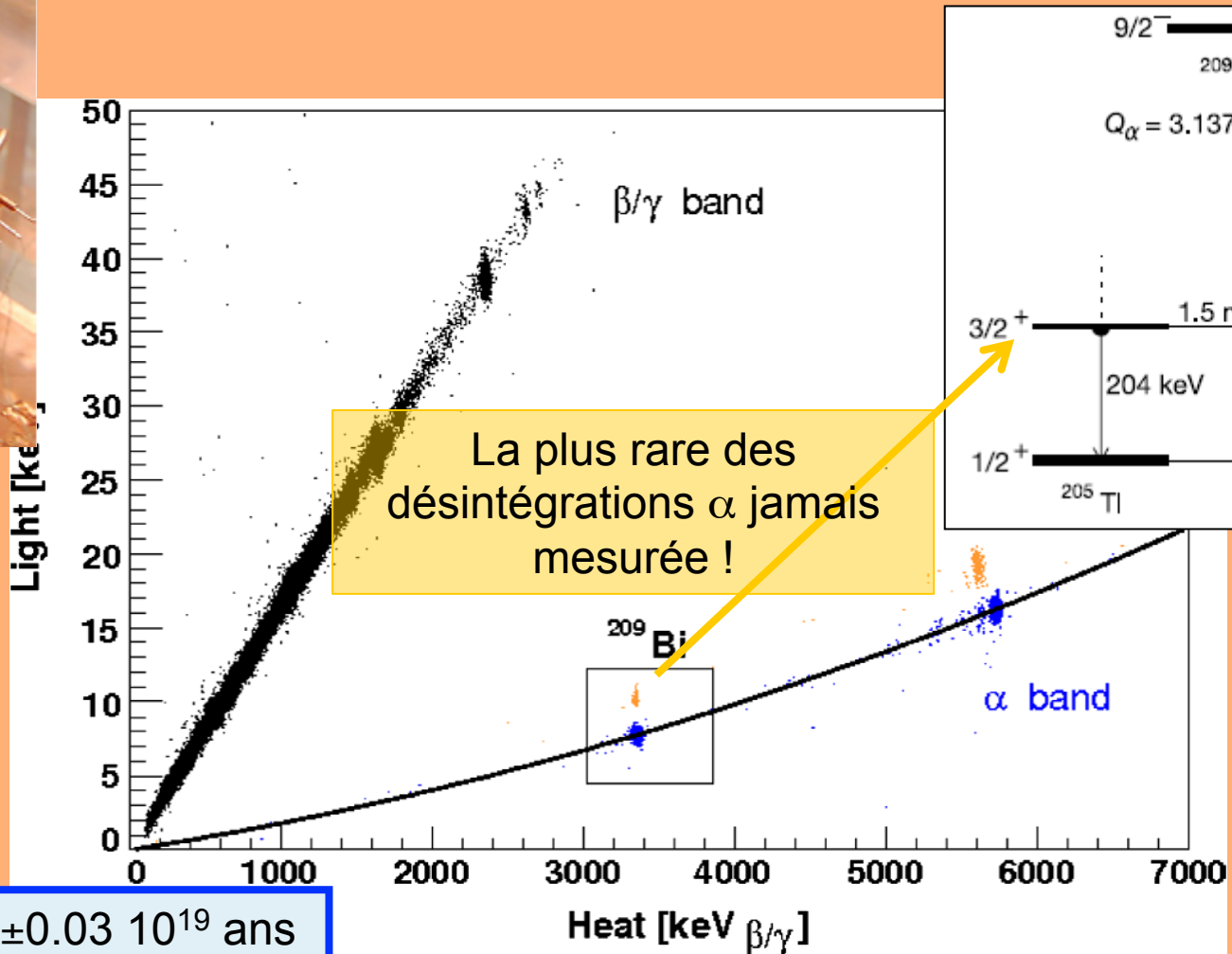
$$E_{Q\alpha} = 2516,4 \text{ keV} \pm 1,1(\text{stat}) \pm 1,2(\text{sys})$$

Première détection de la désintégration α du ^{209}Bi au premier niveau excité du ^{205}Tl

J.W. Beeman et al., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 062501 (équipe de Milan)



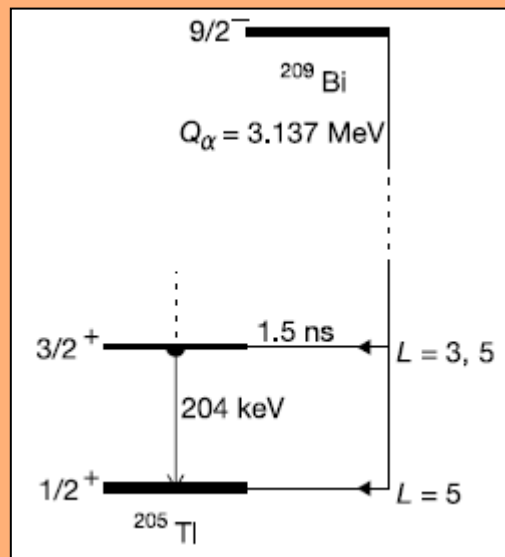
BGO 5 x 5 x 5 cm
@ Gran Sasso



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

... et après?

- La détection de la désintégration α du ^{209}Bi au niveau excité du ^{205}Tl constitue le record en durée de vie en détection mono énergétique (la détection du mode $\beta\beta 2\nu$ a des $T_{1/2}$ plus longues mais le spectre est continu)



Branching ratio mesurée du niveau excité = 98.8%

$T_{1/2}$ au niveau fondamentale = 1.99×10^{19} ans

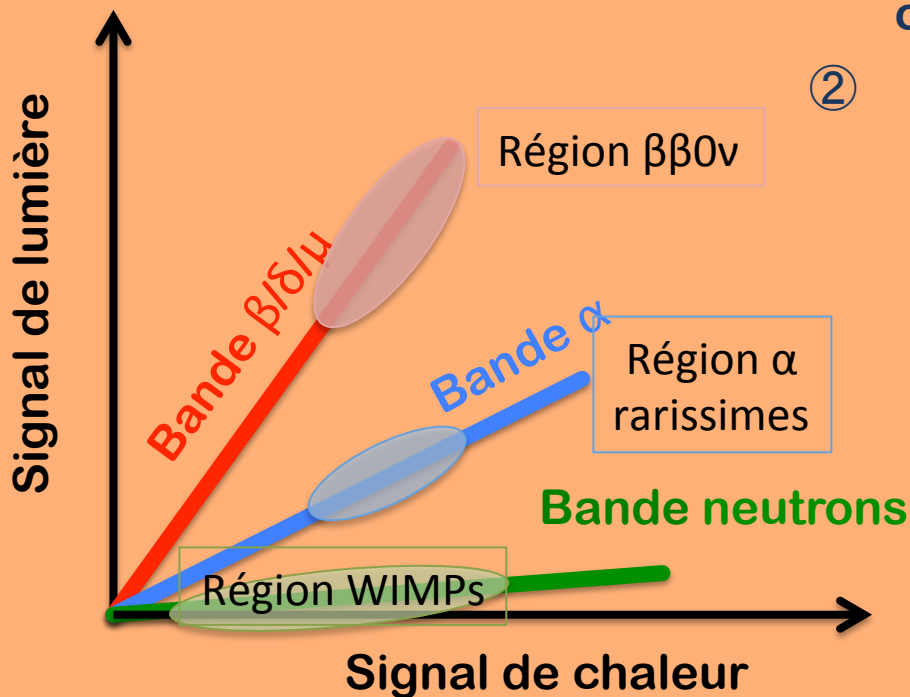
$T_{1/2}$ au niveau excité = 1.7×10^{21} ans (avec un seul cristal)

- Et après? Peut être la raie de la désintégration $\beta\beta 0\nu$

($T_{1/2}$ attendu $\geq 10^{25}$ ans)

II. APPLICATIONS DES BOLOMETRES SCINTILLANTS

- ① Détection des évènements rares
 - a. Désintégrations alpha rarissimes
 - b. **Double désintégration beta sans neutrinos**
 - c. Détection de la matière noire (WIMPs)
- ② Spectroscopie des neutrons rapides



La double désintégration β sans neutrinos

Réaction recherchée pour les noyaux tels que

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

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

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

$\beta\beta 0\nu \rightarrow \nu=\bar{\nu}$ Particule de Majorana

Echelle absolue de la masse du ν_e (nous connaissons les $(\Delta m)^2$ par les oscillations ν)

Hierarchie correcte des états propres de masse (1-2-3 ou 3-1-2)

▪ $Q\beta\beta 2\nu$ (continuum) a été vue dans

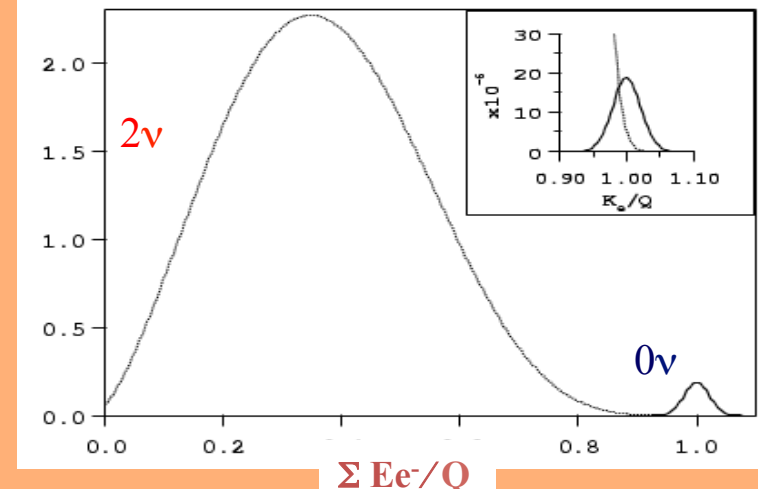
^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{150}Nd , ^{238}U

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

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

Avec des bolomètres

- Excellente résolution (CUORICINO: 0.24%)
- Perte de l'information topologique



Incontournable si nous voulons nous affranchir du fond $\beta\beta 2\nu$

Sensibilité au mode $\beta\beta 0\nu$

$$S \propto \sqrt{\frac{M \cdot t}{b \cdot \Delta E}}$$

S: $T_{1/2}$ maximale détectable qui peut être scrutée en considérant la limite signal=fluctuations du fond

M: Masse de l'isotope $\beta\beta 0\nu$

t: Temps de mesure

b: Fond (en évts/masse/t/ ΔE)

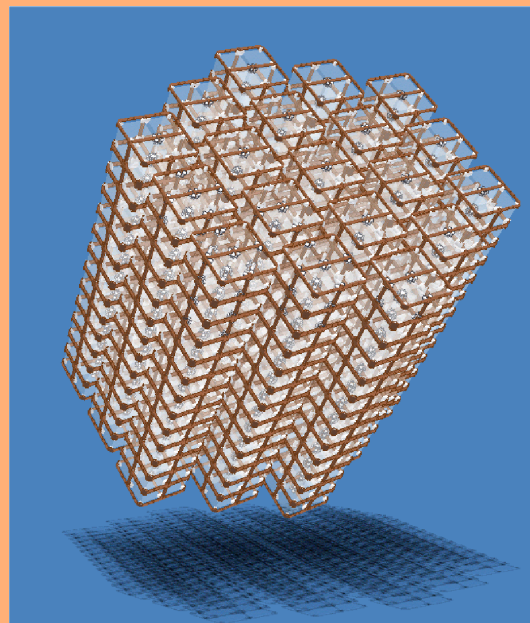
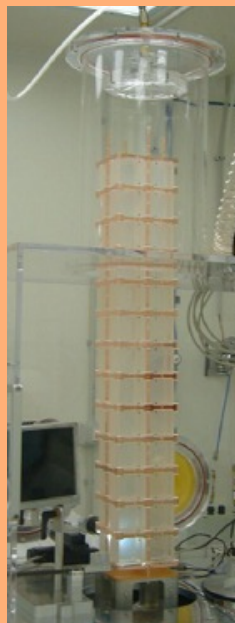
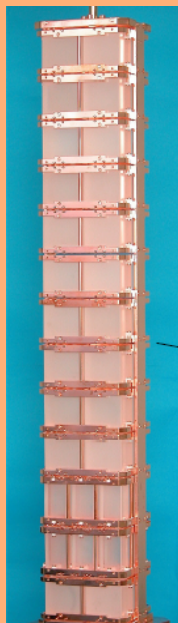
ΔE : Résolution (notre fenêtre de E)

Réduire le niveau de fond est aussi important qu'avoir une bonne résolution

Bolomètres pour la détection de $\beta\beta 0\nu$

Mono: **Chaleur**
(et peut être
lumière plus tard)

CUORICINO
2003 – 2008
40 kg TeO_2



$^{130}\text{TeO}_2$

$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 2.8 \cdot 10^{24} \text{ y}$ (90% C.L.)

CUORE-0
(2012 – 2014)
40 kg TeO_2

CUORE
(2015 – 2020)
1 ton TeO_2 (~ 200 kg ^{130}Te)

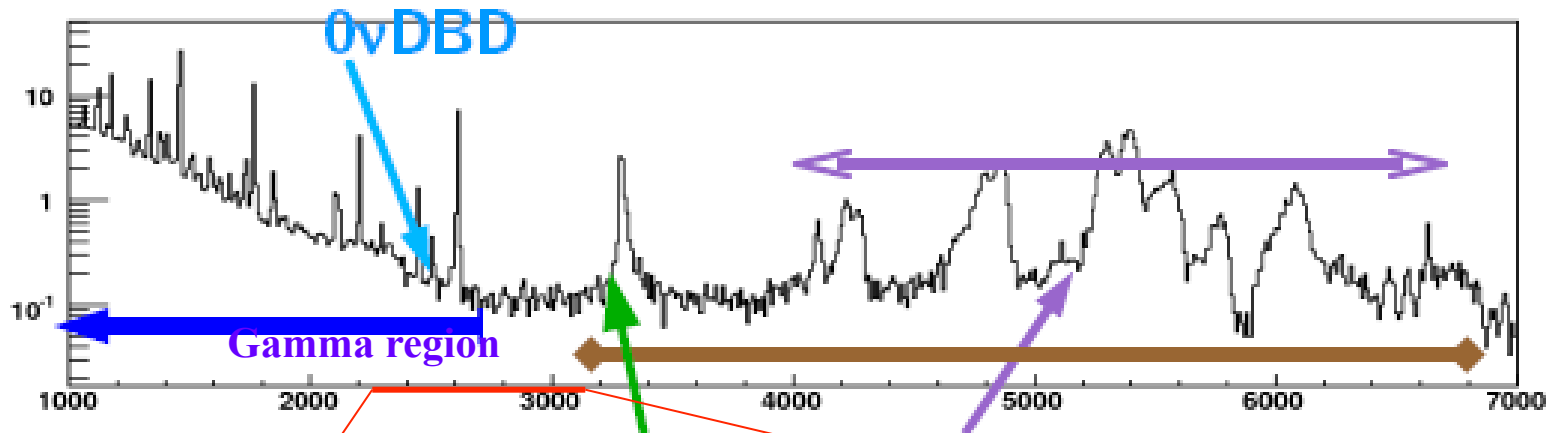
$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 4 \cdot 10^{24} \text{ y}$

$T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 10^{26} \text{ y}$ (in 5 years)

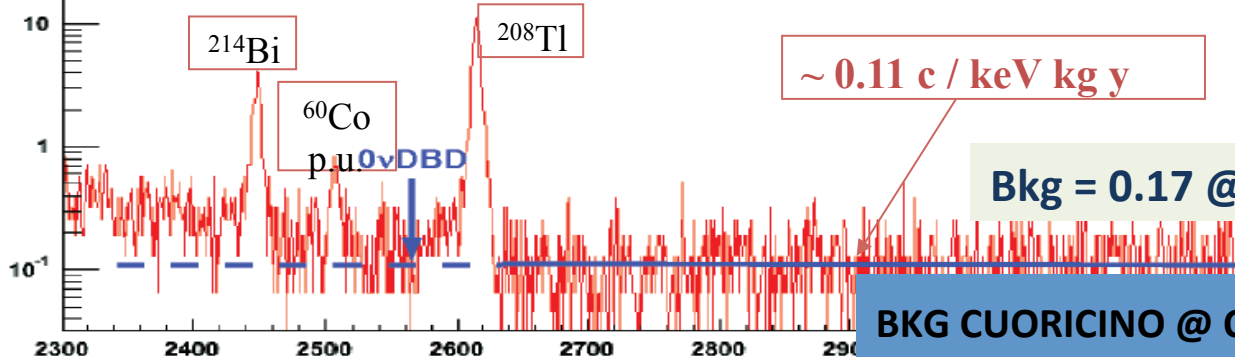
Dual: **Chaleur** + **Lumière**

- LUCIFER (Italie): Zn^{82}Se
- LUMINEU (France): $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$
- AMORE (Corée): $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$

Ce qu'on a appris de Cuoricino



Alpha region, dominated by α peaks
(internal or surface contaminations)

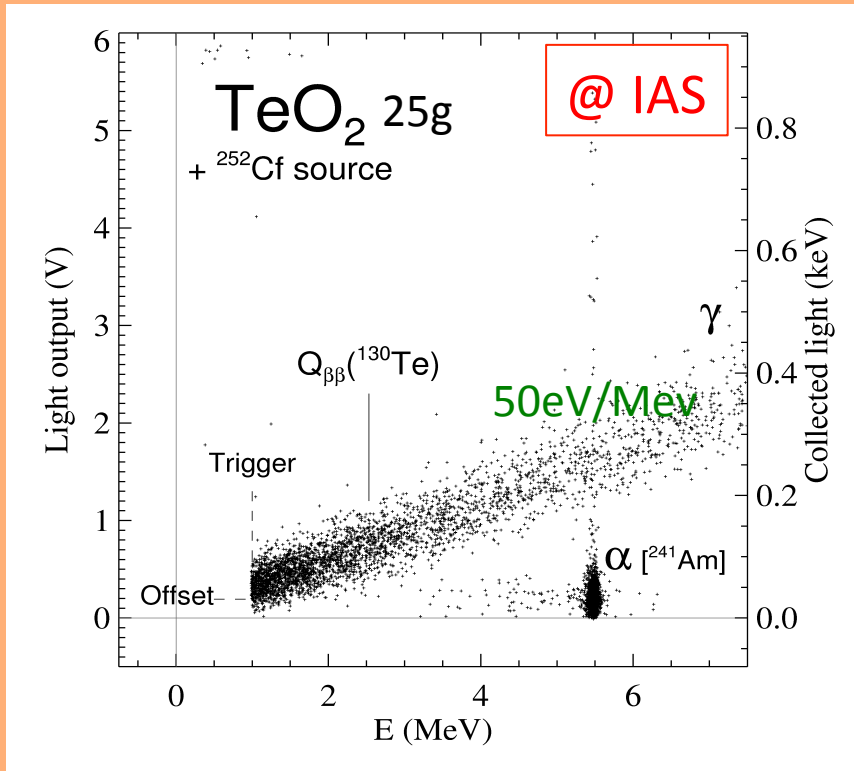


Bkg = 0.17 @ 0vDBD cts/(keV.kg.yr)

BKG CUORICINO @ $Q_{\beta\beta}$

$\sim 70\%$ α 's from crystals and Cu surfaces
 $\sim 30\%$ external γ from cryostat

Une solution évoqué en 2003: Lumière mesurée en TeO_2



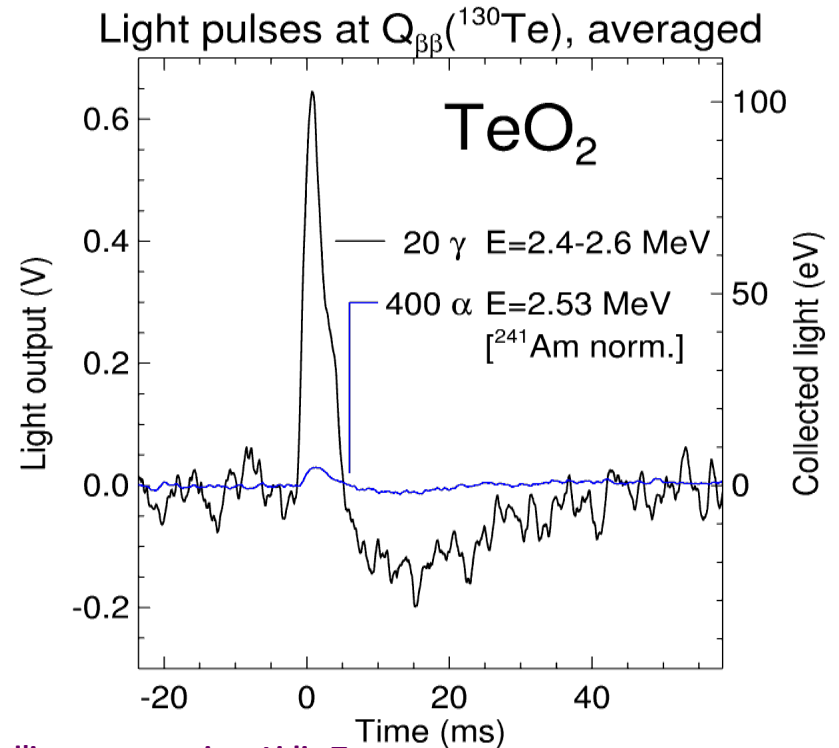
présenté à LTD10,
Gênes, 2003

« Scintillation (weak) separates alphas
and gammas at $E \approx Q_{\beta\beta}({}^{130}\text{Te})$ level ! »

Effet Cherenkov
des électrons ?



Diaphonie des α s ou scintillation
des impuretés résiduelles ?



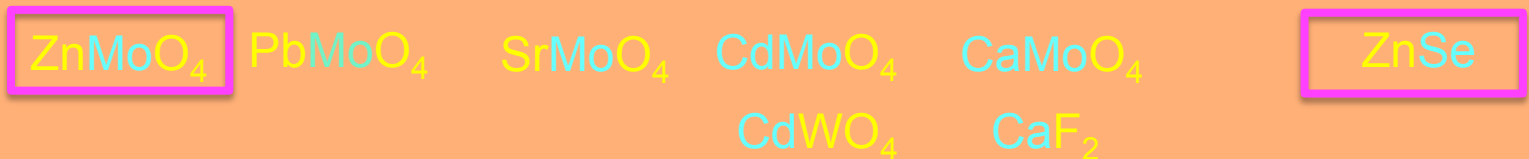
R&D en Italie: ...et si on rajoutait la lumière?

- Trois lignes en parallèle:

1. Dopage du TeO_2 avec Nb and Mn
2. Mesure de la lumière dans ses cristaux de TeO_2
3. Tests lumière + chaleur des autres cristaux pour le double beta

Sans succès

S. Pirro et al. Physics of Atomic Nuclei, 69 (2006)

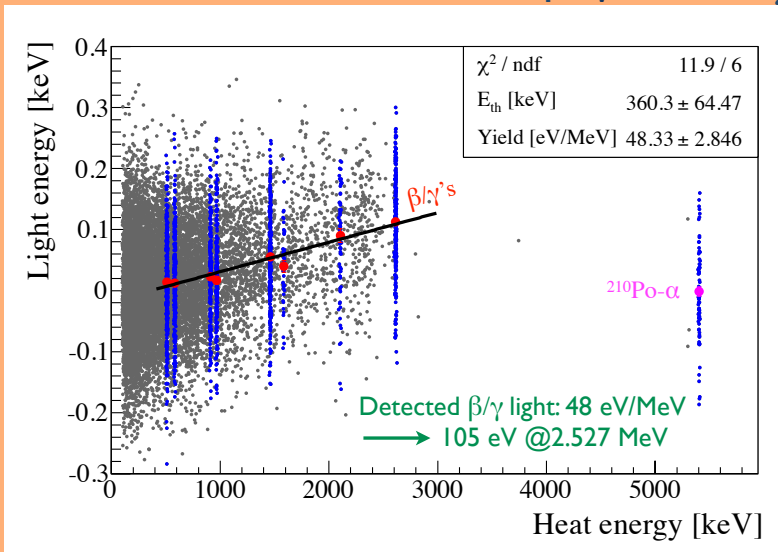


- En 2009 la lumière Cerenkov des β est proposée comme signature d'identification for les évènements $\beta\beta$ en bolomètres

T. Tabarelli de Fatis, Eur. Phys. J. C 65 (2010) 359

- L'émission de lumière des β/γ du TeO_2 est détecté (2011)

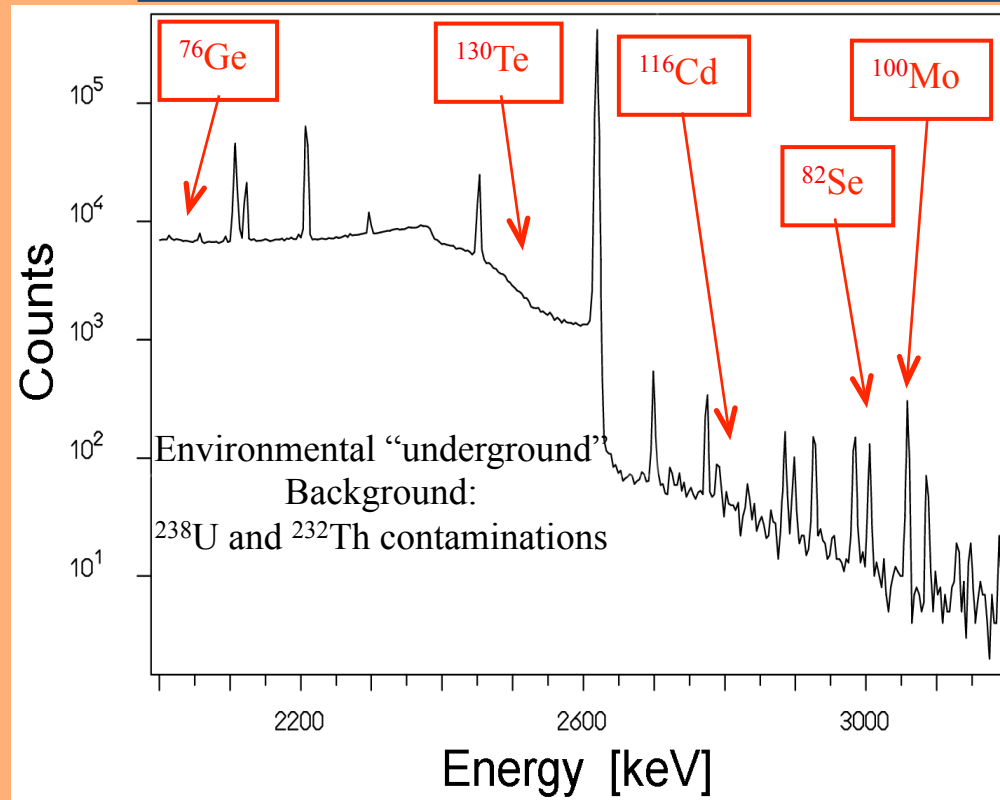
J.W. Beeman, Astropart. Phys. 35 (2012) 558



Bande β/γ : **48 eV/MeV** de lumière détectée
(résultat de l'IAS : 50 eV/MeV)

+ tests de directionnalité qui confirment qu'il s'agit de lumière Cherenkov

Les noyaux $\beta\beta$ d'intérêt avec des bolomètres luminescents



Noyaux d'intérêt: ceux avec $Q_{\beta\beta} > E_{\gamma}^{208\text{Tl}}$ à 2615 keV

^{116}Cd $Q_{\beta\beta} = 2809$ keV

^{82}Se $Q_{\beta\beta} = 2998$ keV

^{100}Mo $Q_{\beta\beta} = 3034$ keV

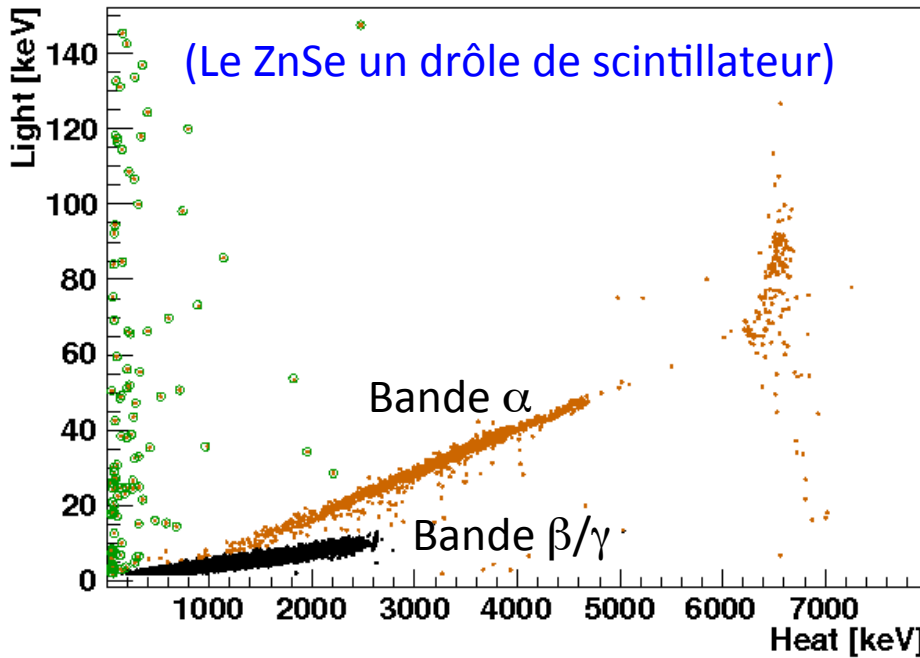
(^{48}Ca exclu à cause de a.i. basse et difficultés du Ca pour être enrichi)

(^{150}Nd exclu à cause de C↑)

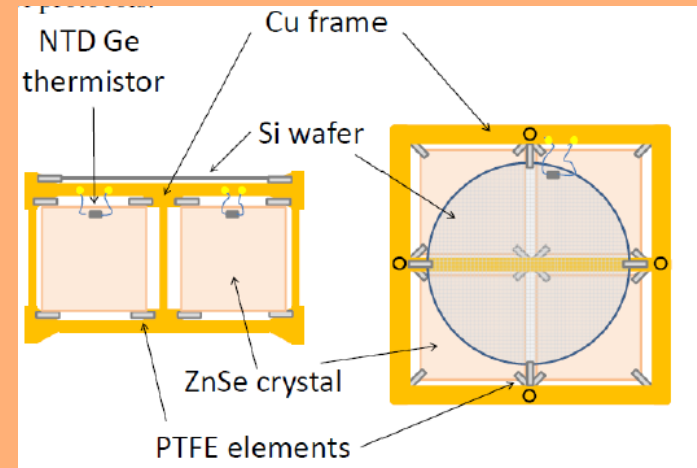
LUCIFER (ZnSe)

ERC (Advanced GRANT 2010-2015)

- Le cryostat de “Cuoricino” abritera ~ 50 cristaux ZnSe $\Rightarrow \sim 15$ kg de ^{82}Se
- $\Rightarrow T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) \sim (0.5 - 1) \times 10^{26}$ y en 5 ans



Fond alpha rejeté par son rapport lumière / chaleur différent et par la forme des impulsions de lumière



2012

2013

2014

2015

R&D on light detectors

Thermistor production

Natural crystal (growth) R&D

15 kg ^{82}Se production

Enriched crystal growth

Detector assembling

LUMINEU (ZnMoO_4)

ANR (France 2012-2016)

• La Collaboration:

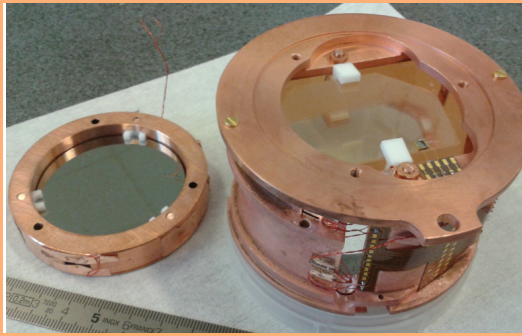
- CSNSM Orsay (7) :
 - Tests des prototypes à Orsay et suivi des détecteurs à Modane (EDELWEISS)
 - Bolomètres optiques à effet Luke
 - Nouveaux senseurs de T: TES résistifs à basse de NbSi supra en serpent in
 - Coordination
- IAS Orsay (3):
 - bolomètres optiques « classiques »
- ICMCB Bordeaux (2):
 - Cristaux: contrôle des cristaux et caractérisation optique
- CEA Saclay (12)
 - Production des senseurs Ge-NTD (procès complète): X-F Navick (SEDI)
 - Senseurs de T (GeNTD et NbSi): C. Nones (SPP)
 - Bolomètres optiques couplés à des senseurs magnétiques (rapidité): M.Loidl et M. Rodrigues (LNHB)
 - Electronique et DAQ in Modane (EDW): M.Gros, B. Paul,
 - Irradiation de Ge à Orphée (Saclay): F.Koskas et O.Strazzer
 - S. Hervé, Y. Penichot, P. Magnier, M.Massinger



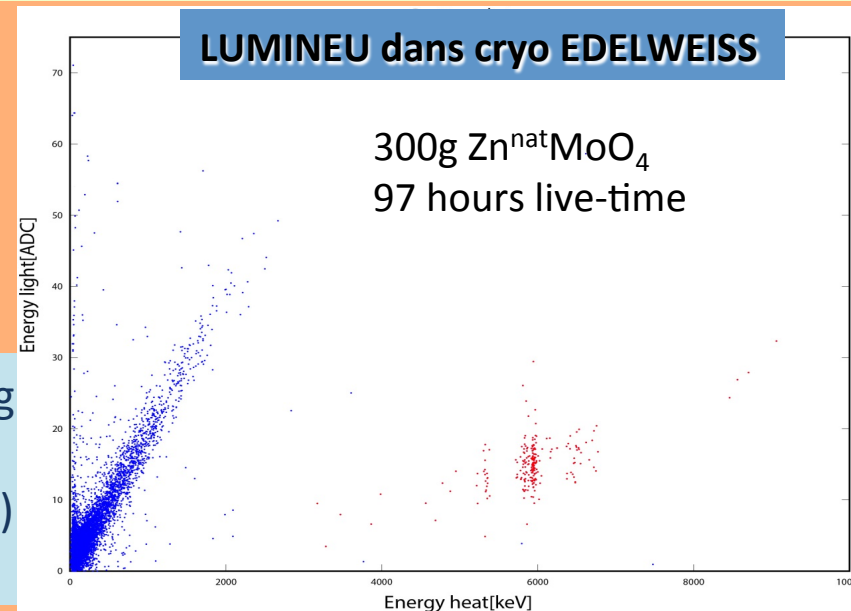
+ laboratoires associés: KINR et NIIC (Ukraine): Croissance des cristaux

LUMINEU (ZnMoO_4)

- Démonstrateur setup avec 4 cristaux \Rightarrow mi-2014 @ cryostat d'Edelweiss (LSM)
 $\approx 0.7 \text{ kg } ^{100}\text{Mo} \Rightarrow T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 10^{24} \text{ ans (1 an)}$
- Deuxième setup avec ~ 30 cristaux $\approx 7 \text{ kg } ^{100}\text{Mo} \Rightarrow T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 5 \cdot 10^{25} \text{ ans (5 ans)}$



- Première mesure de fond $\text{Zn}^{\text{nat}}\text{MoO}_4$ crystal (300g)
 \Rightarrow Amplitude signal chaleur $\sim \text{TeO}_2$
 \Rightarrow Pas d'événements $e^-/\gamma > 2.6 \text{ MeV}$ (97 heures)
- Run de fond long en 2013



Niveau de fond β/γ à $E_{\beta\beta}$ est «presque 0»

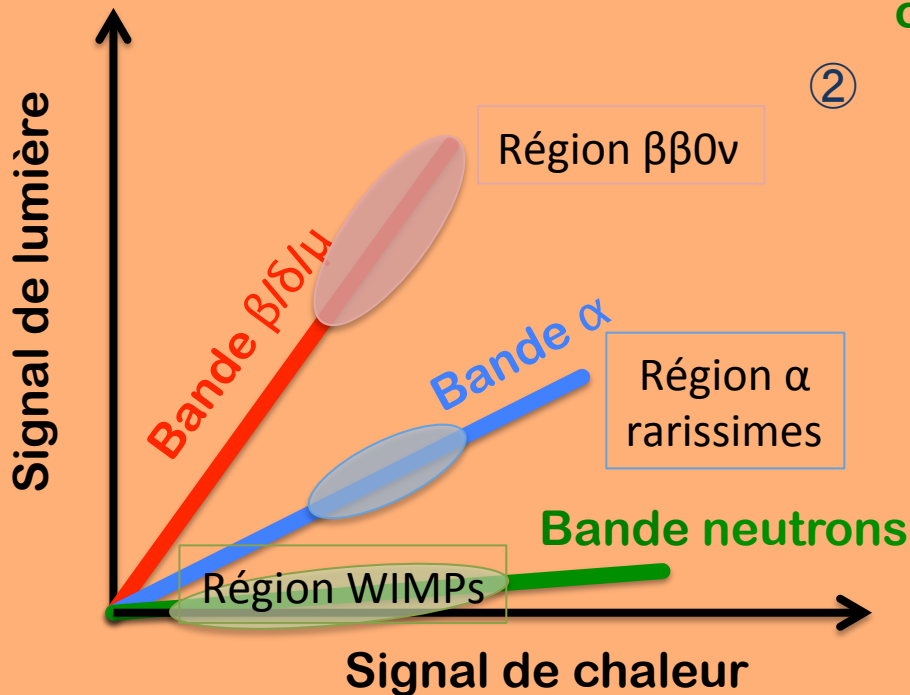
D'après les simulations: [J.W.Beeman et al., Phys. Lett. B 710 (2012) 318]

L'incontournable fond $\beta\beta 2\nu$ sera le fond limitant for 100 kg sous la forme d'empilements

- ➔ Un bolomètre optique rapide pourrait séparer l'empilement
- ➔ Bolomètre optique à senseur magnétique (LNHB/CEA)

II. APPLICATIONS DES BOLOMETRES SCINTILLANTS

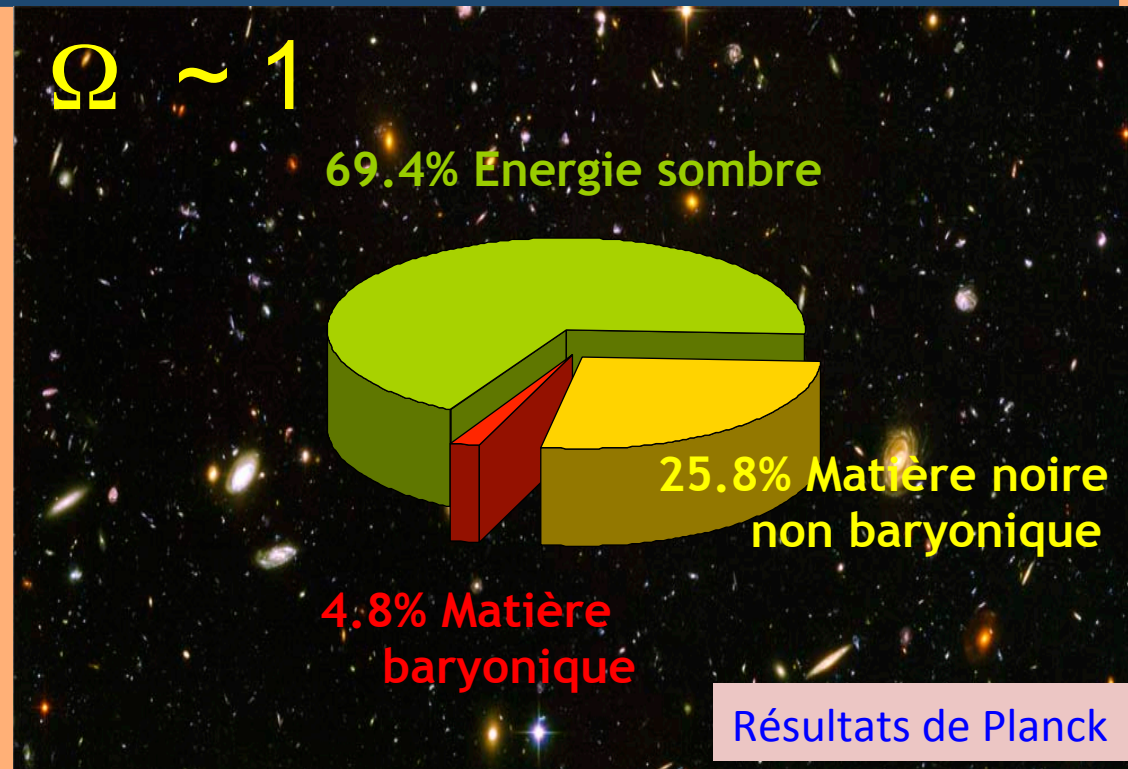
- ① Détection des évènements rares
 - a. Désintégrations alpha rarissimes
 - b. Double désintégration double beta sans neutrinos
 - c. **Détection de la matière noire (WIMPs)**
- ② Spectroscopie des neutrons rapides



Détection de la matière sombre, une recherche bien motivée

Masse manquante dans les observations à échelle

- Galactique
 - courbes de rotation
- Amas
 - Dynamique des Amas(Coma, Zwicky)
 - collision du Bullet Cluster
- Cosmologique
 - formation de structures
 - Etude des anisotropies du CMB (WMAP et Planck)



Un candidat à faire partie du 25.8% de l'Univers: le WIMP

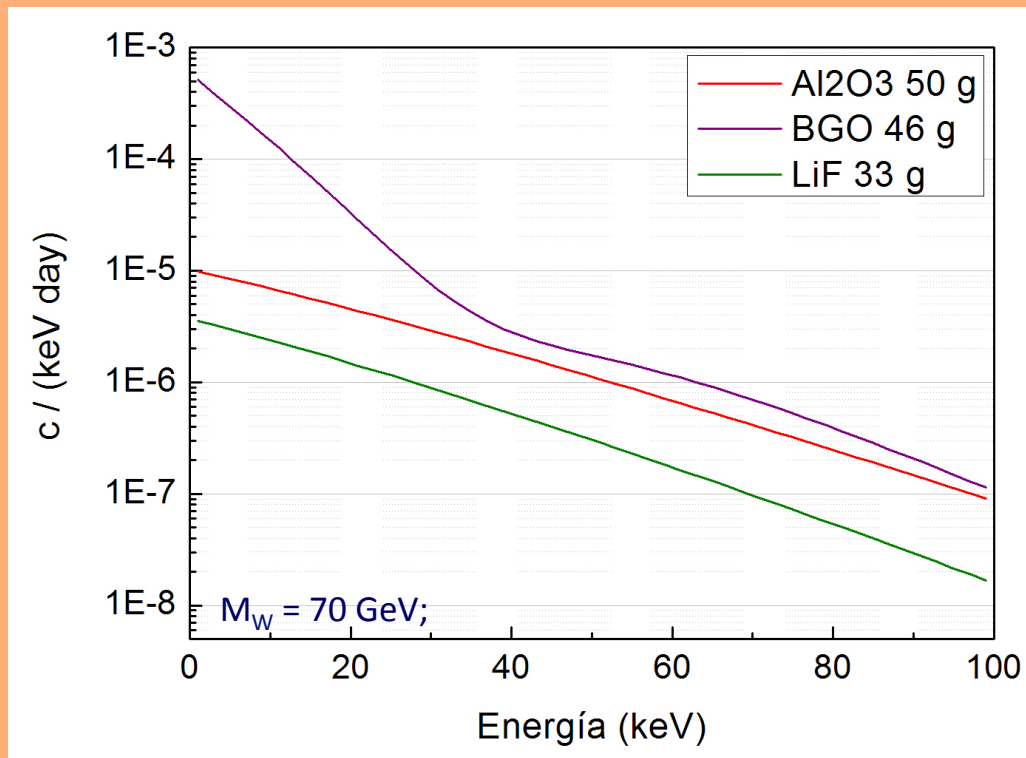
- ✓ Massive, neutre et stable
- ✓ Couplage à la matière ordinaire faible
- ✓ Froid ($v \ll c$ au moment du découplage radiation-matière)

Un oeil sur le LHC
Signe de supersymétrie?
La particule supersymétrique plus légère serait un bon candidat
(+ conservation de la R-parité)

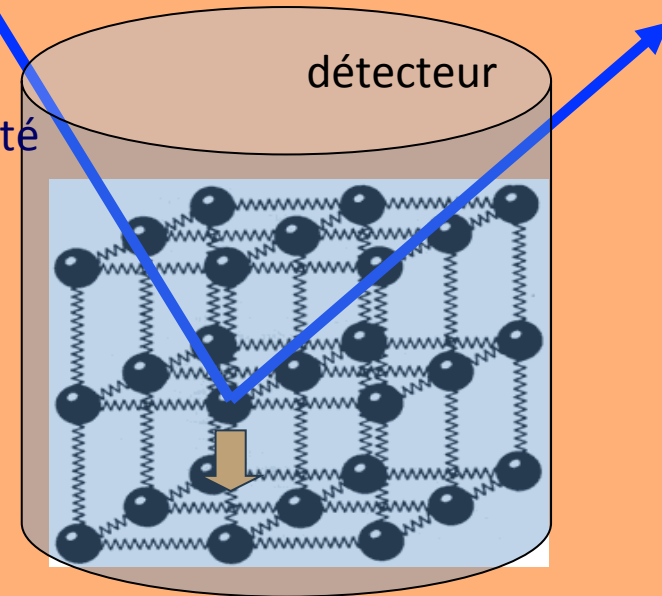
Détection directe de WIMPs

Les signal est:

- ✓ Peu ionisant
- ✓ sans signature spectrale
- ✓ peu énergétique <100 keV
- ✓ très peu probable $\ll 1 \text{ ev} / (\text{keV kg jour})$
- ✓ Signature distinctive: modulation annuelle ou directionnalité



W



Le WIMP produit le même effet qu'un neutron
C'est le fond à surveiller de plus près après la discrimination

Bolomètres scintillants pour la matière noire

- Le signal cherché décroît «quasi» exponentiellement avec $E \rightarrow$ bon seuil des bolomètres
- Mais le seuil de l'expérience est l'énergie à partir de la quelle on peut identifier les reculs de noyaux: « seuil de discrimination»
- Le signal de lumière des reculs nucléaires à $E < 100 \text{keV}$ est dans le bruit (au niveau de sensibilité actuelle)
- Au seuil la rejection du fond β/γ est possible mais pas l'identification de l'évènement comme recul nucléaire (il y a d'autres évènements sans lumière).
- Les exigences pour les scintillateurs pour la matière noire sont plus contraignantes que pour le double bêta
- Un calcul simple:

0.6 eV /keV pour les reculs

12 eV à 20keV

FWHM bl des meilleurs bolomètres optiques = 16eV (seuil à 5σ de **34 eV**)

- Les reculs des différents noyaux ne peuvent pas être distingués
- Comparaison des noyaux lourds / légers dans différents cristaux

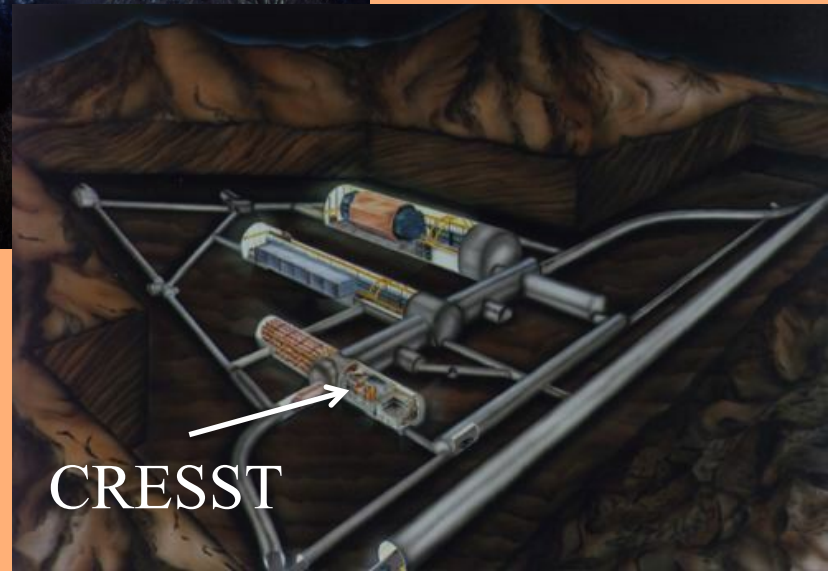
	Undoped crystals				
	CaWO ₄	BGO	LiF	TeO ₂	Al ₂ O ₃
Mass	54g	46g	16g	25g	50g
Light yield, $\Phi(\gamma)$ KeV/MeV on γ's	6	7.5	0.38	0.05	12.7
Qf= $\Phi(\gamma)/\Phi(\text{recoil})$	10	12-15	6.5		21.5
Light yield, $\Phi(\text{rec})$ KeV/MeV on rec	0.6	0.5 – 0.6	0.06		0.6

CRESST @ Gran Sasso

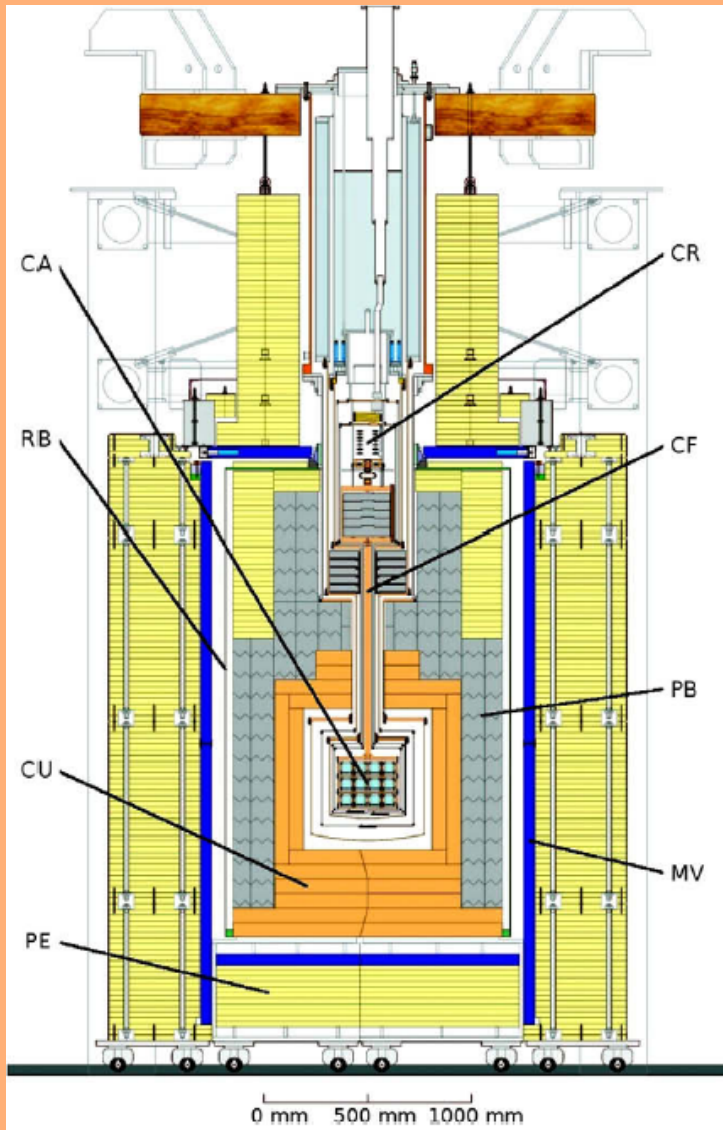
Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers



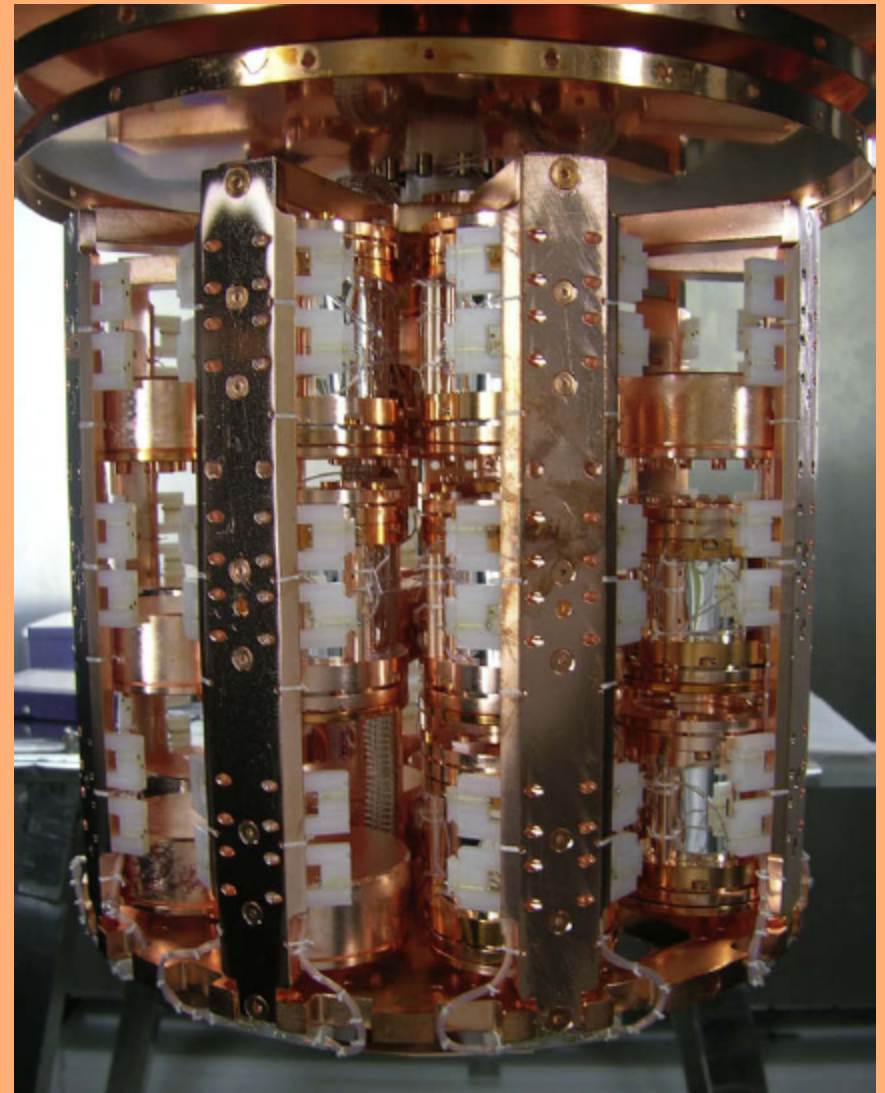
Max-Planck-Institut für Physik
University of Oxford
Technische Universität München
Laboratori Nazionali del Gran Sasso
Universität Tübingen



Set-up CRESST-II



Réfrigérateur 10mK

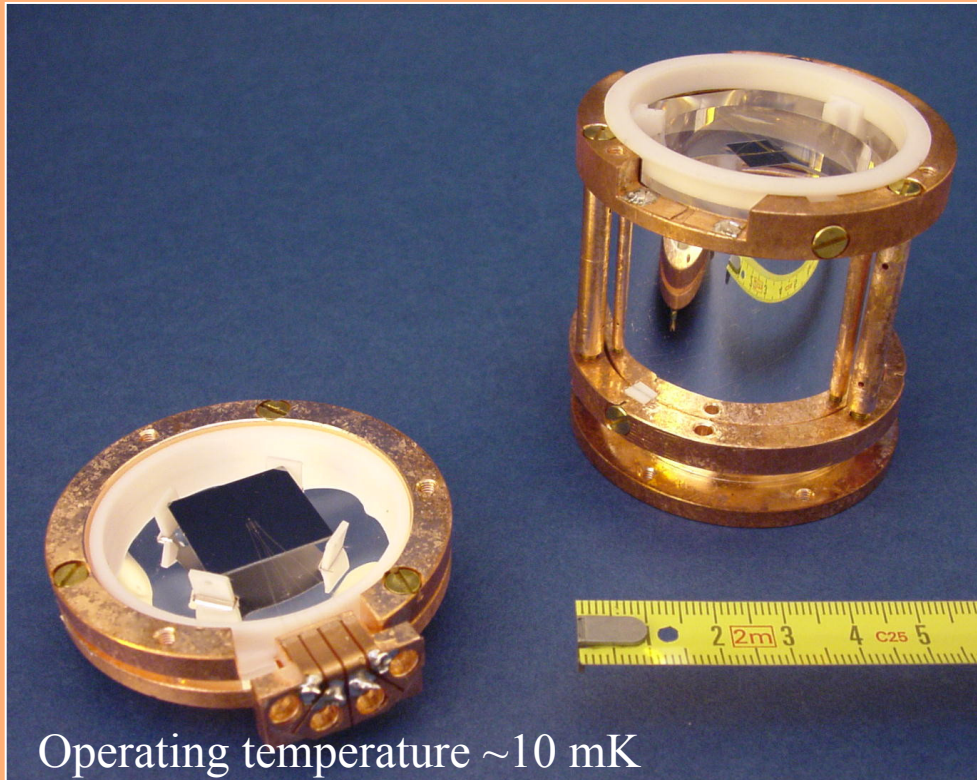


Carrusel détecteurs (pour 33 détecteurs de 300g)

Les détecteurs de CRESST

2.Réalisation

300 g detector module



phonon channel:

300g CaWO_4 (~10kg en total)

Senseur: TES en W

light channel:

Si 30 x 30 x 0.4 mm³

**W-SPT with Al phonon
collector**

reflector:

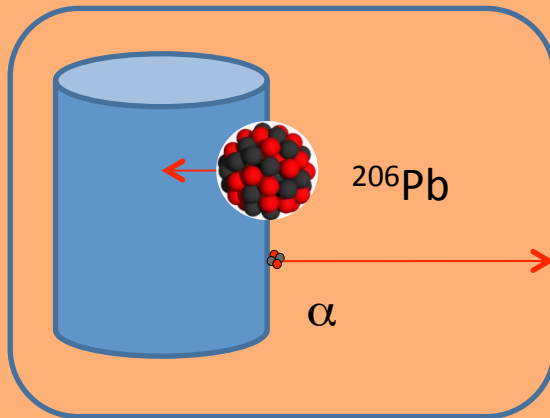
polymeric foil, teflon

Le réflecteur astucieux (à utiliser dans toutes les applications)

Les multicouches réfléchissantes scintillent!

Grace aux multicouches CRESST peut rejeter les des évènements superficiels:

Cristal avec contamination superficielle de ^{210}Po (il vient du ^{222}Rn)



La lumière produite par le réflecteur permet d'identifier ce fond et de le rejeter

...Mais le réflecteur ne peut pas être monté aux points d'appui des suspensions (clamps)

➔ Il y a un fond résiduel de reculs de ^{206}Pb dans la région de WIMPs

Résultats de CRESST (730 kg-jour)

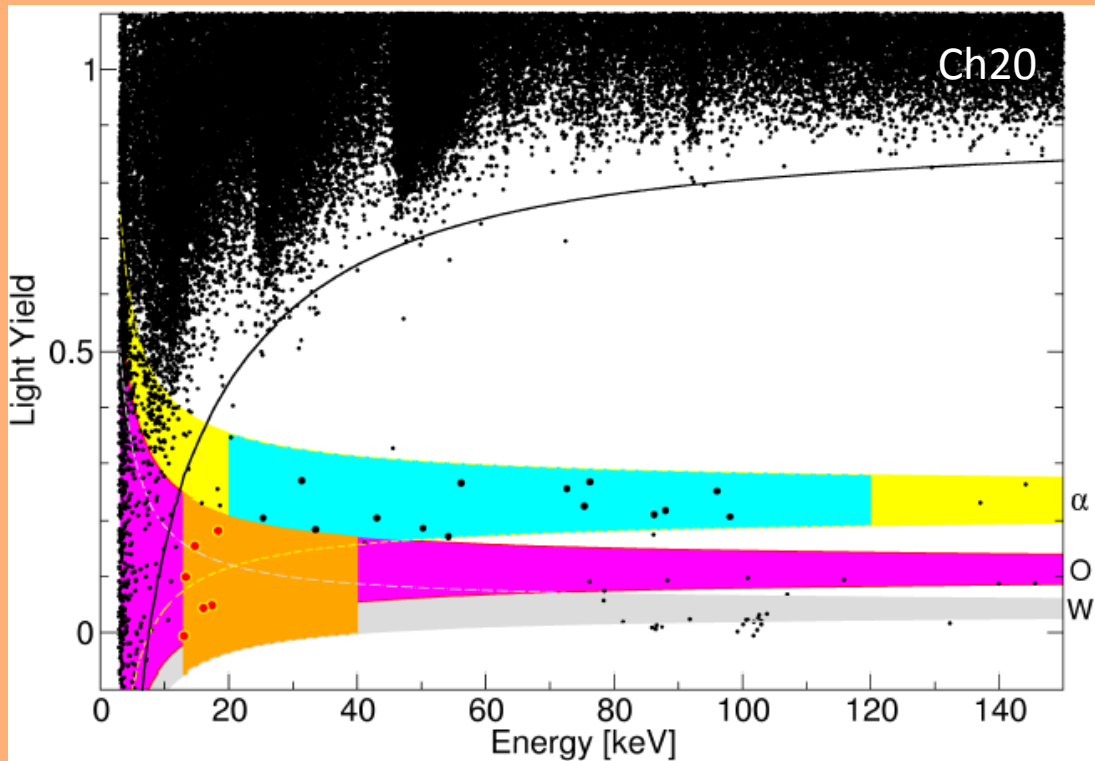
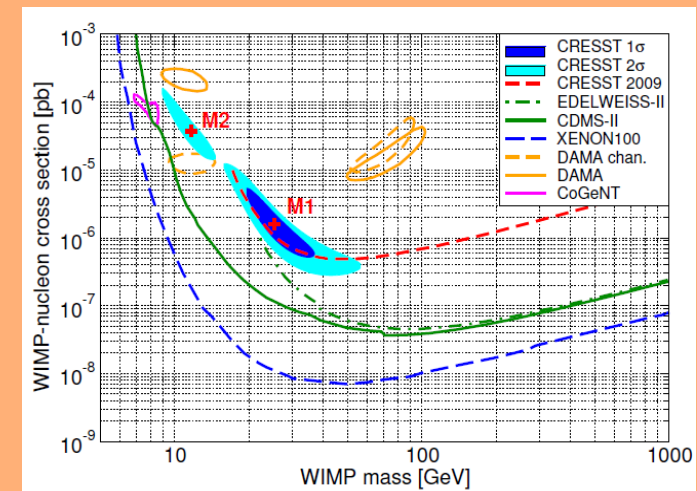


Table 1 The exposures, lower energy limits E_{acc}^{min} of the acceptance regions, and the number of observed events in the acceptance region of each detector module

Module	Exposure [kg d]	E_{acc}^{min} [keV]	Acc. events
Ch05	91.1	12.3	11
Ch20	83.0	12.9	6
Ch29	81.1	12.1	17
Ch33	97.0	15.0	6
Ch43	98.1	15.5	9
Ch45	93.1	16.2	4
Ch47	99.0	19.0	5
Ch51	88.5	10.2	9
Total	730.9	–	67

- ce ne sont pas des neutrons (d'après cal Am-Be)
- ce ne sont pas des reculs ^{206}Pb (d'après simul SRIM)

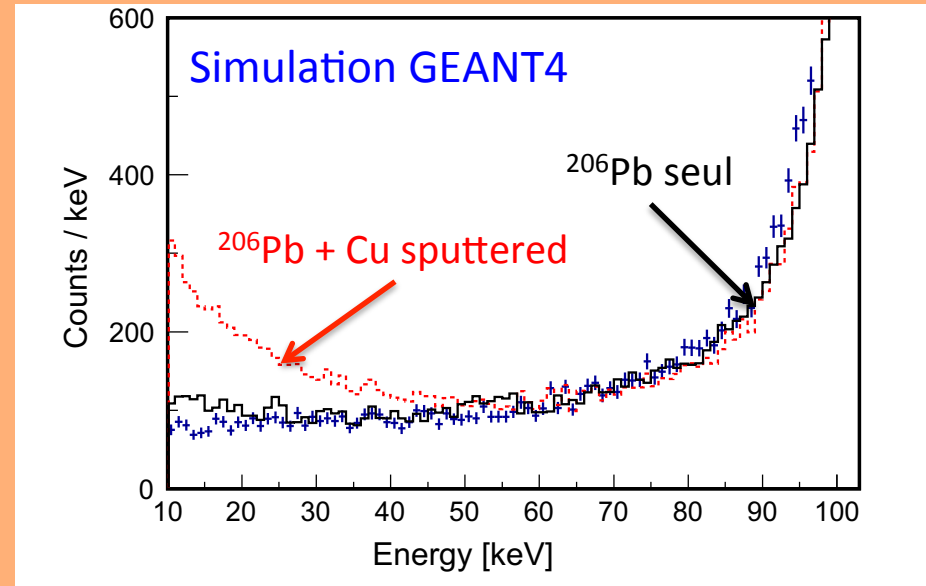
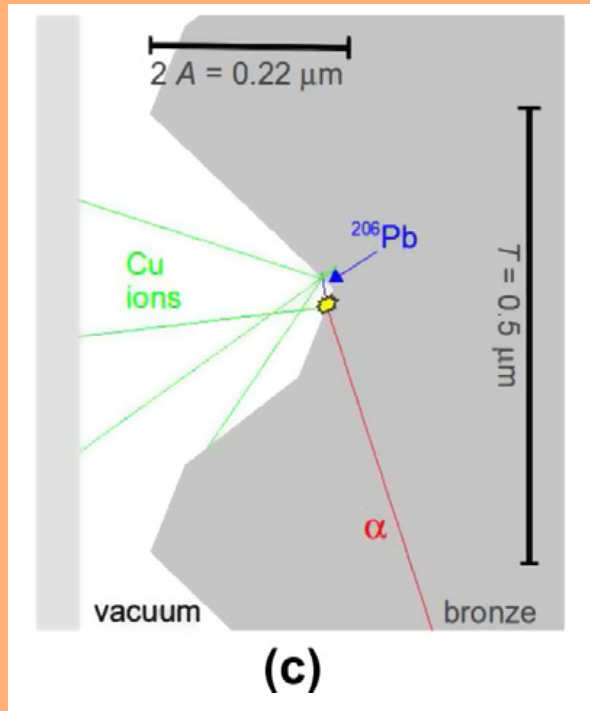
...et si les 67 évènements étaient des WIMPs?
 Les régions (σ_W, m_W) de l'espace de paramètres sont déduitesmais prudence...



Une possible explication: contribution du ^{210}Pb sous-estimée

M. Kuzniak Astrop. Phys 36 (2012) 77

La surface réelle est rugueuse ($\sim 2A$)



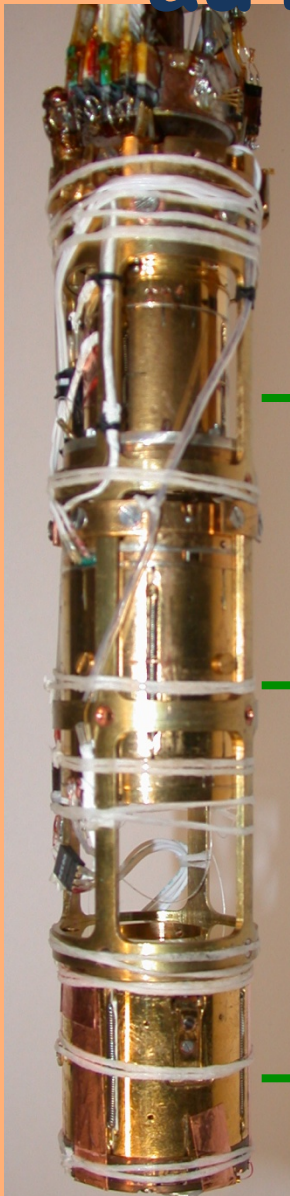
En tenant compte de la géométrie des détecteurs de CRESST ils trouvent un fond de (simulation GEANT4) 53-68 évènements qui pourrait expliquer l'excès de CRESST

**Un banc de test « Matière Noire »:
ROSEBUD
dans les pyrénées aragonaises**



IAS – UZ 2007 ROSEBUD au Laboratoire Souterrain de Canfranc

Détecteurs



BGO 46 g + optical bolometer: (tested for 1st time underground):

- high Z material
- ^{209}Bi : $\uparrow A \Rightarrow \uparrow \sigma_{\text{SI}}$,
 $J = 9/2 \Rightarrow \sigma_{\text{SD}}$

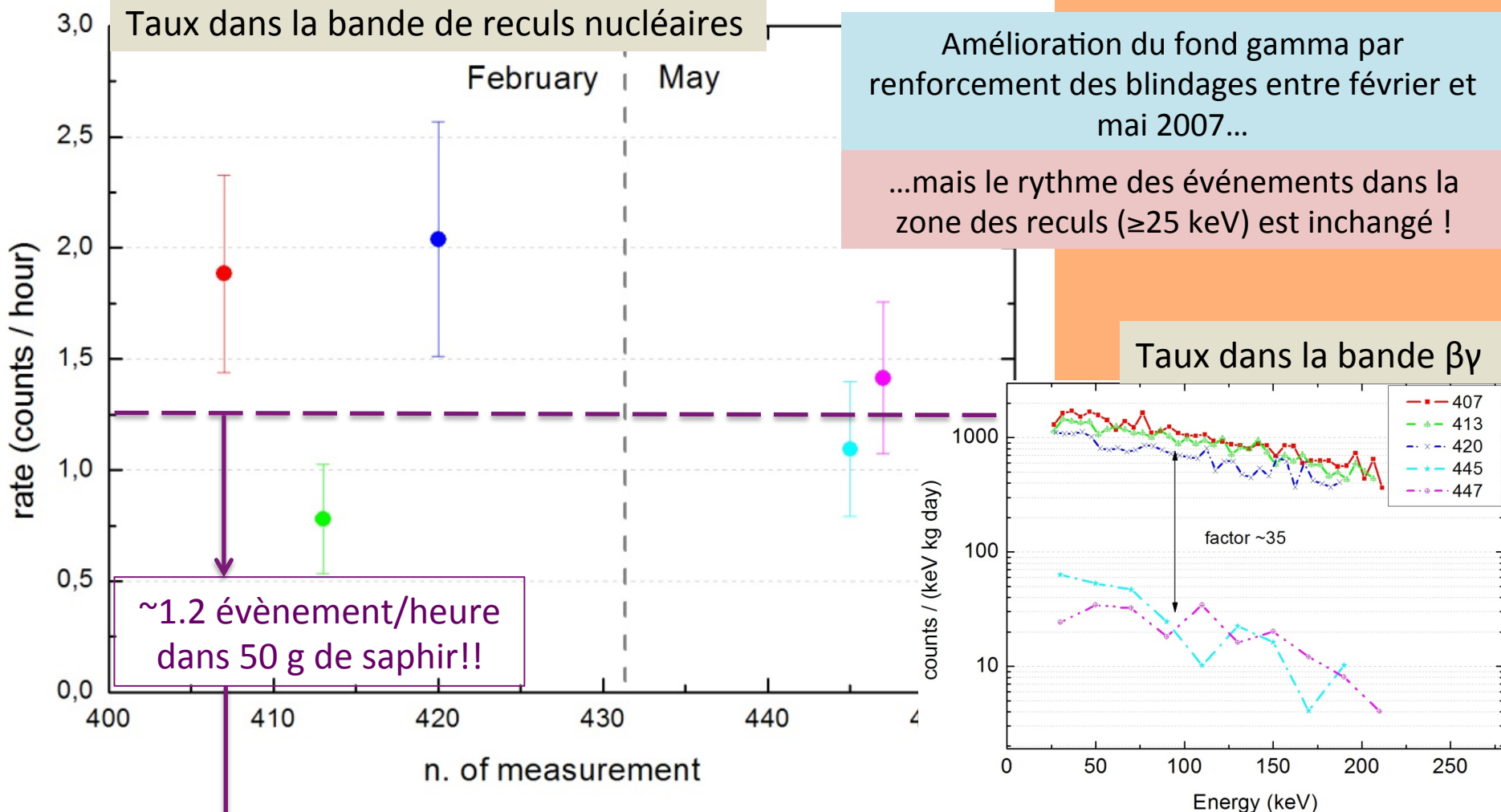
LiF 33 g + optical bolometer:

- low Z material
- monitoring of neutrons through the capture reaction:
 $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + t \quad E = Q + E_n = 4.78 \text{ MeV} + E_n$

Al_2O_3 50 g + optical bolometer:

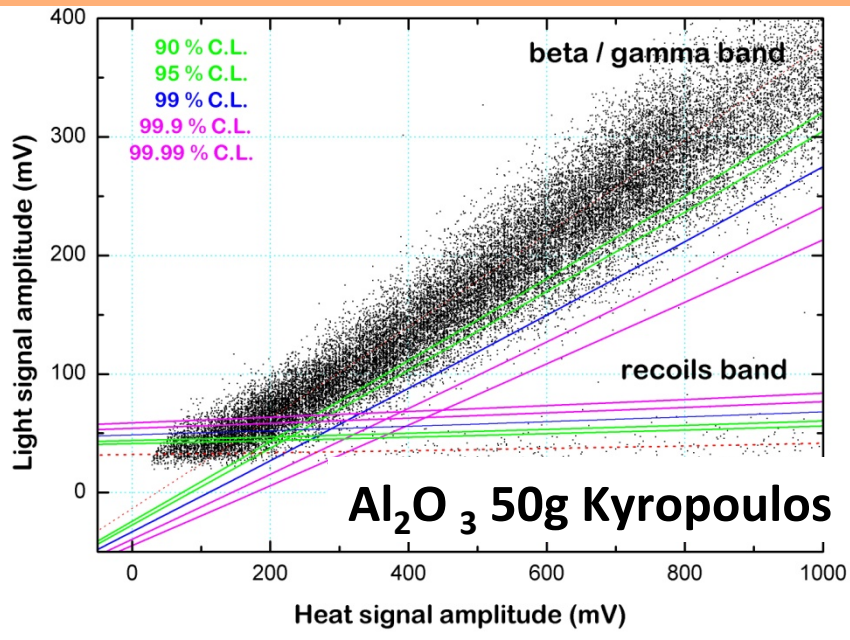
- low Z material
- high β/γ background rejection down to 8keV

Les fonds de ROSEBUD au LSC en saphir 50g



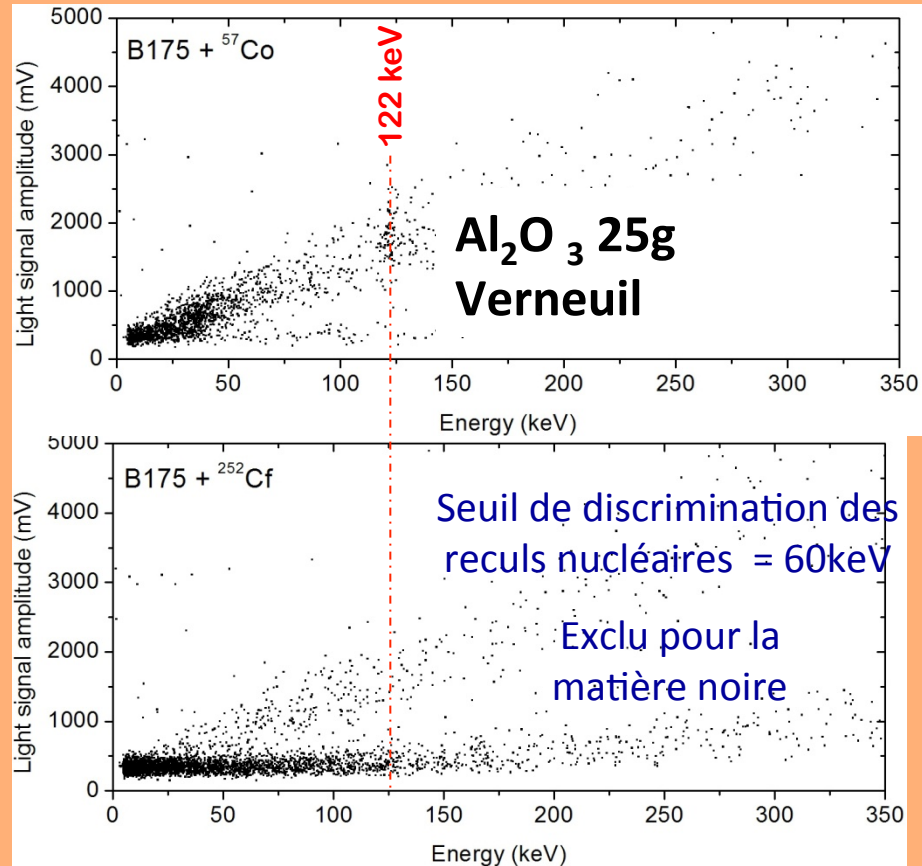
Trop grande pour être dû aux neutrons du laboratoire (site souterrain et blindage n partiel)
Avec ce fond d'origine inconnu dans la bande des reculs **les détecteurs ne sont pas qualifiés pour la matière noire**

Al₂O₃. Seuil de discrimination et reproductibilité



C.L (1tailed)	E (keV)
90 %	8.7
95 %	10.0
99 %	13.0
99.9 %	17.1
99.99 %	21.3

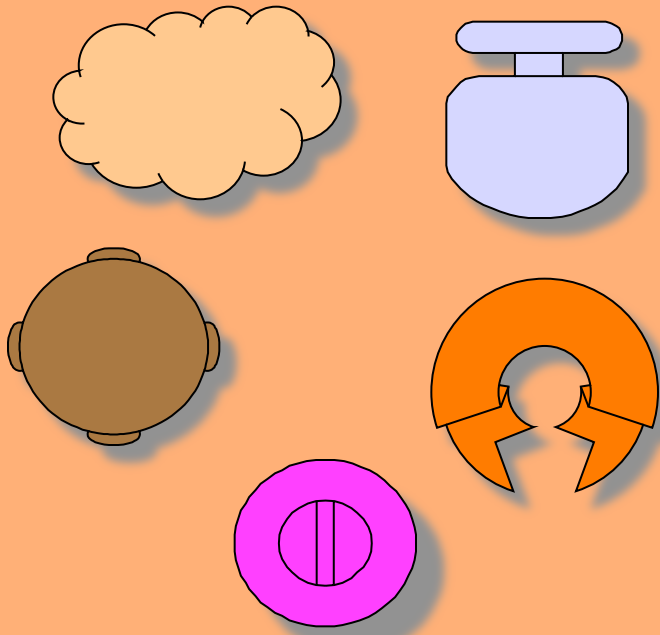
Très bon seuil de discrimination des recoils nucléaires (<10 keV)



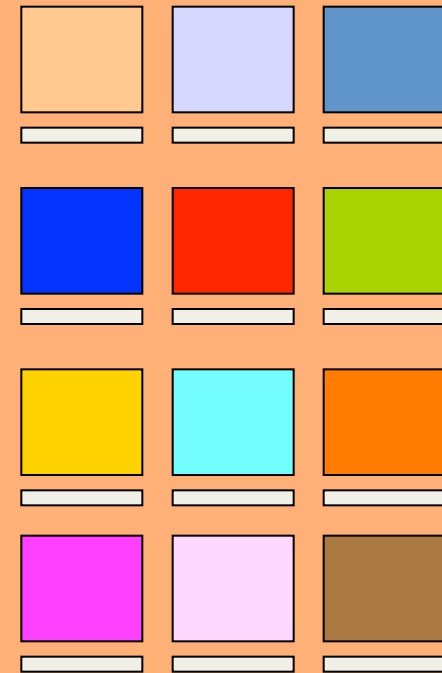
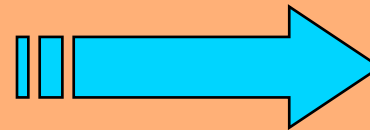
Ce saphir est actuellement la meilleur cible pour scruter le WIMP de basse masse pour un recherche avec des bolomètres scintillants

Mais reproductibilité pas encore obtenue

Bolomètres scintillants: la seule technique multi-cibles



- Mono-cible
- Multi-sites

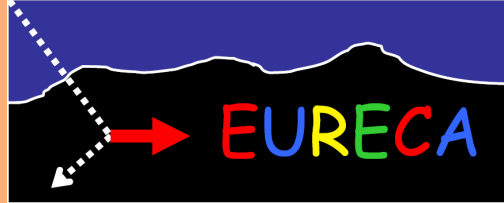


- Mono-site
- Multi-cibles

Comparaisons difficiles !

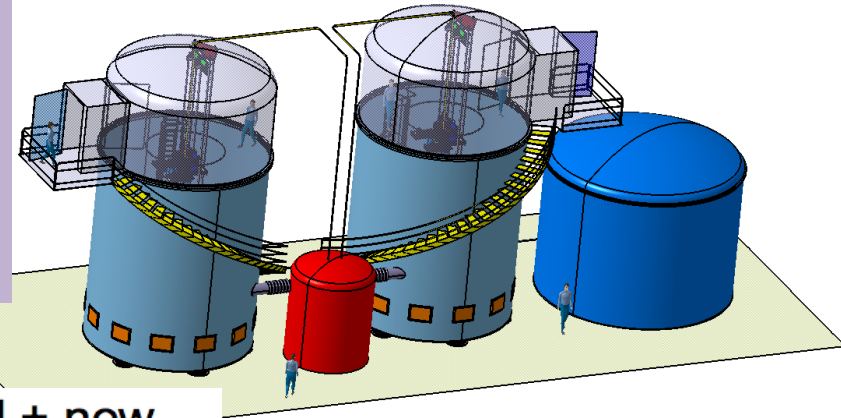
Comparaison des spectres
(ils voient le même fond)

→ identification +++ !



@ Modane

- sensibilité visée 10^{-10} pb (interactions SI)
- 1 tonne de détecteurs cryogéniques
- approche multi-cibles : Ge (chaleur + charge)
CaWO₄ (chaleur + lum)
autres?



CRESST, EDELWEISS, ROSEBUD, CERN + new groups

United Kingdom 

Oxford (H Kraus, coordinator)

Germany 

MPI für Physik, Munich

Technische Universität München

Universität Tübingen

Universität Karlsruhe

Forschungszentrum Karlsruhe

Russia 

DNLP Dubna

France 

CEA/DAPNIA Saclay

CEA/DRECAM Saclay

CNRS/CRTBT Grenoble

CNRS/CSNSM Orsay

CNRS/IPNL Lvon

CNRS/ICMCB Bordeaux

CNRS/IAS Orsay

Spain 

Zaragoza

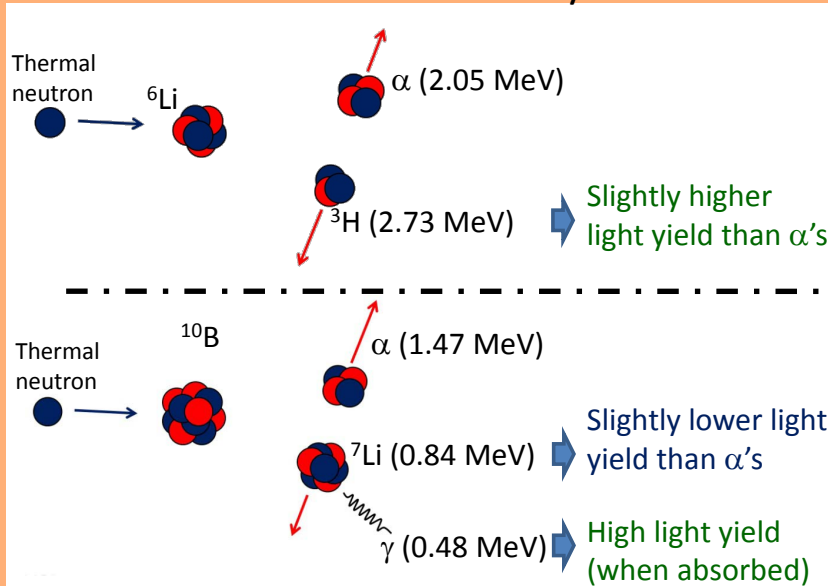
CERN



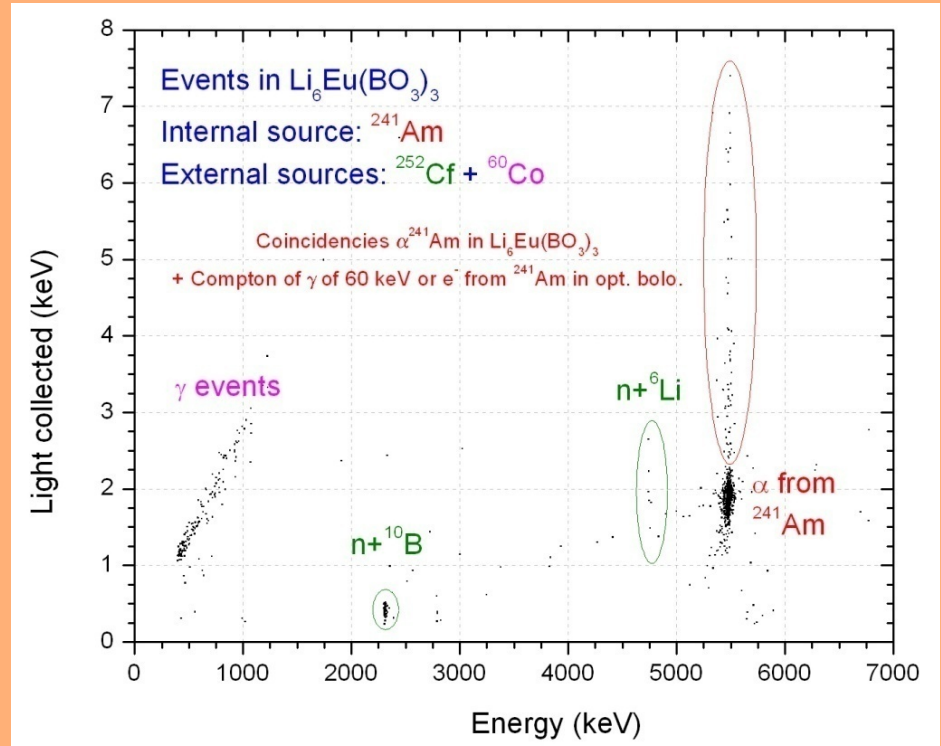
Détection des neutrons rapides

Principes

Cristaux contenant ${}^6\text{Li}$ et / ou ${}^{10}\text{B}$



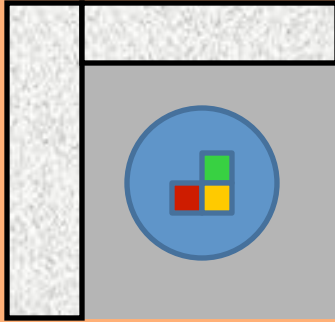
La signal de lumière des réactions de capture ne peut pas être distingué des alphas actuellement (les $\beta/\gamma/\mu$, si)



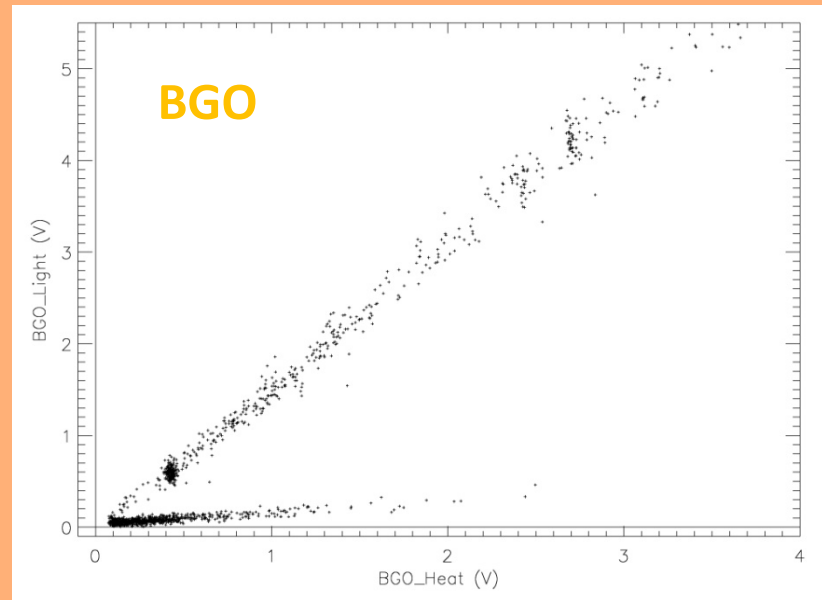
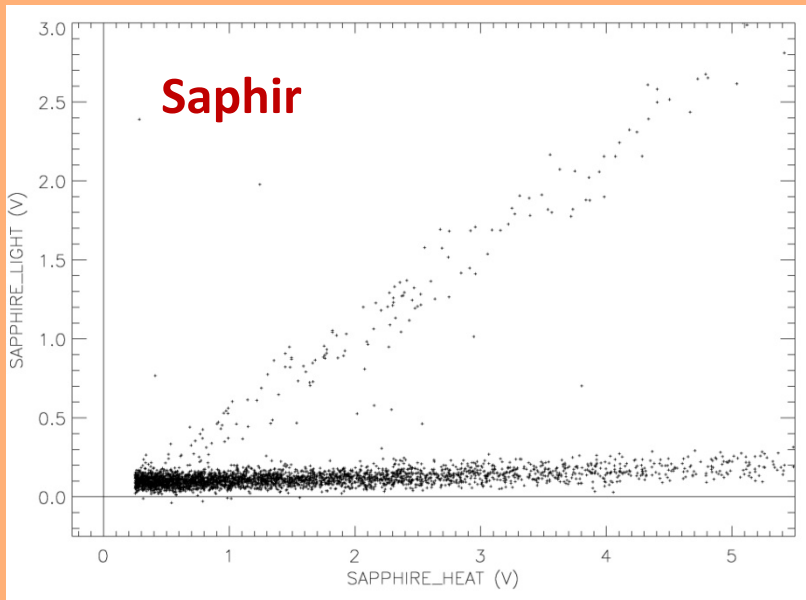
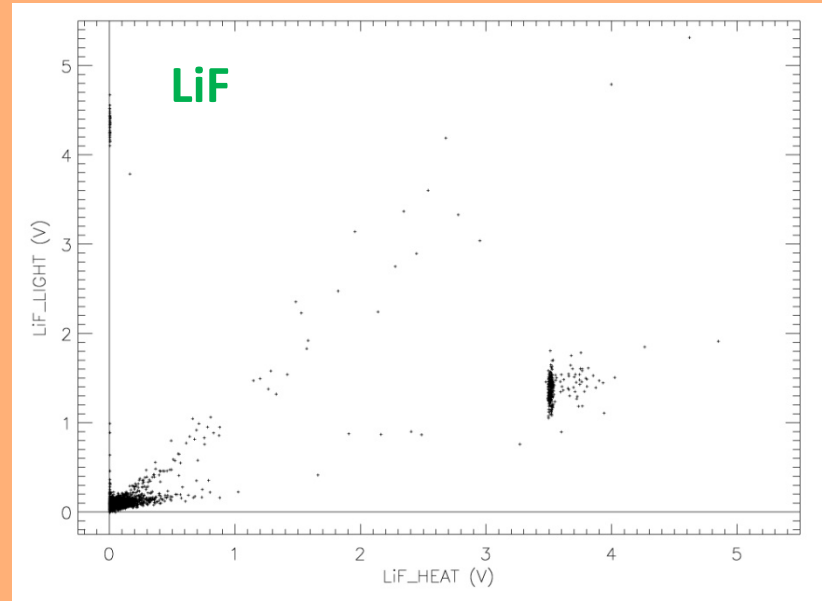
Si le neutron est rapide, les produits de la réaction se partagent le surplus d'énergie
 Spectroscopie de neutrons possible: $E_n = E - E_{\text{th}}$
 (principe vérifié avec neutrons mono-énergétiques au réacteur AMANDE/CEA-Cadarache)

Cristaux testés à l'IAS: LiF , ${}^6\text{LiF}$, LiEuBO , LiGdBO

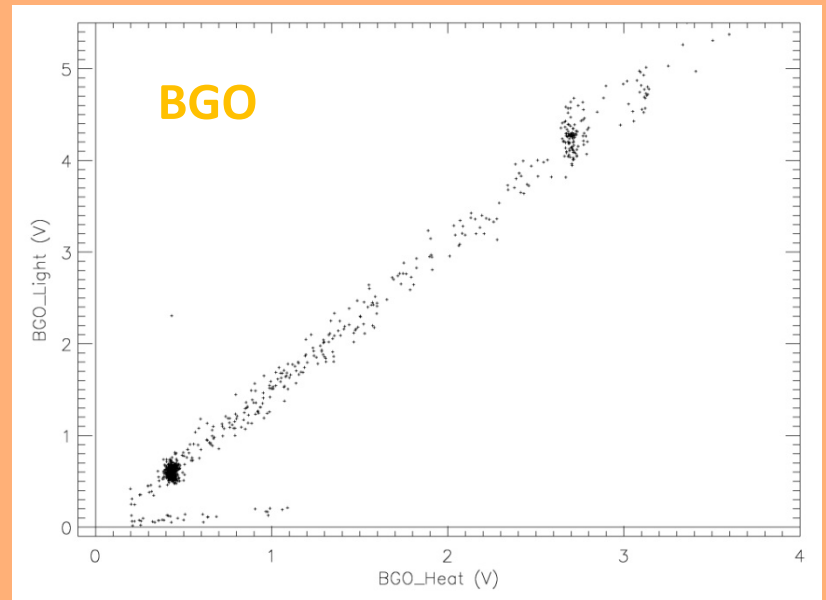
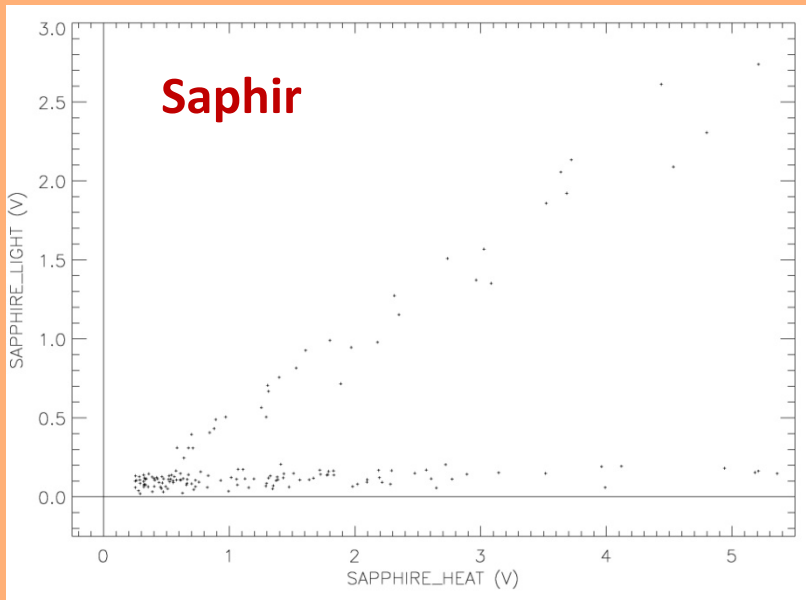
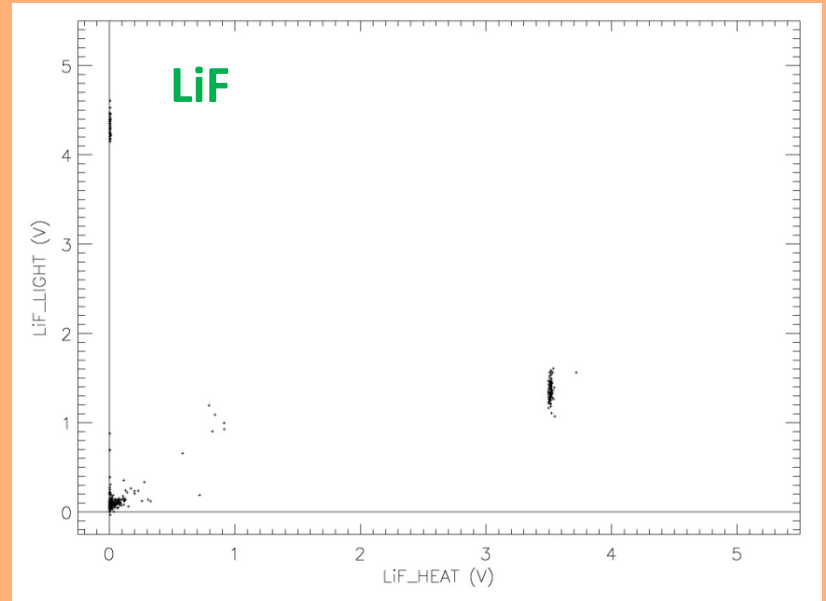
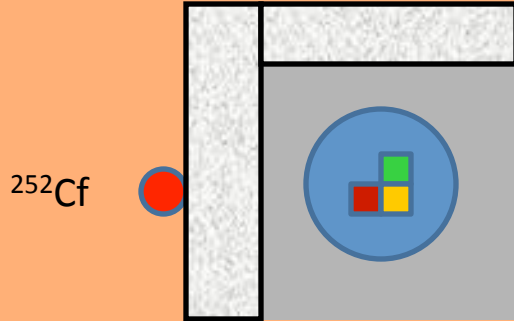
Neutrons rapides




 ^{252}Cf



Neutrons thermiques



Conclusions

- Les bolomètres scintillants sont des détecteurs polyvalents avec des sensibilités très compétitives pour la détection des événements rares
- Croissance spectaculaire en moins de 15 ans avec des records de sensibilité battus
- Pour la détection de la désintégration $\beta\beta 0\nu$
 - Avec des bolomètres optiques plus sensibles la technique peut être étendue à **tous les cristaux** (avec C raisonnable) grâce à l'émission Cherenkov
 - Défi dans l'avenir: rejection du fond intrinsèque $\beta\beta 2\nu$
 - Bonne résolution à retenir
 - Séparation des empilements avec des bolomètres optiques plus rapides (à basse de senseur magnétique?)
- Pour la matière noire
 - CRESST montre le niveau de sensibilité aux WIMPs de la technique
 - Expériences multi-cibles à venir (EURECA)
 - Le phénomène de la scintillation à basse T doit être mieux compris pour bénéficier d'une **sélection astucieuse de cibles (sans/avec J, noyaux légers/lourds)**
 - Détections des **neutrons rapides in situ** (le fond directement vu par les autres détecteurs)