

Stefanos MARNIEROS
Journée P2I PHOM
Centre CEA – 20 juin 2019

Bolomètres

Détecteurs sub-K et applications

Journée P2I - PHOM

Bolomètres dans P2I

Projets

- Détection directe de la Matière Noire de l'univers (EDELWEISS)
- Fond diffus cosmologique – modes B et inflation (Planck, QUBIC, Litebird)
- Microcalorimètres-X (instrument X-IFU du satellite ATHENA)
- Physique du neutrino : double désintégration β sans émission de neutrino (CUPID)
- Diffusion cohérente élastique neutrino – noyau (RICOCHET, BASKET)

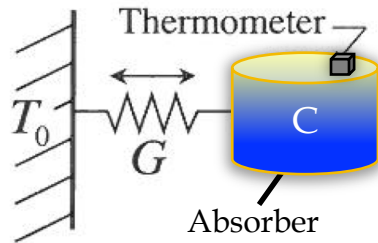
R&D très active sur les détecteurs :

- Développement des nouveaux concepts de détection sub-K
- Amélioration des techniques de détection (rejet du « bruit de fond », localisation, pixellisation)
- Amélioration des seuils de la résolution et de la bande spectrale
- Electronique front-end basse T & bas bruit (HEMTs, multiplexage)

Domaines de physique concernant la R&D détecteurs sub-K:

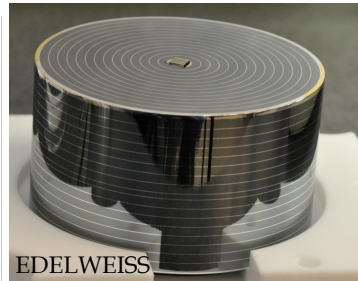
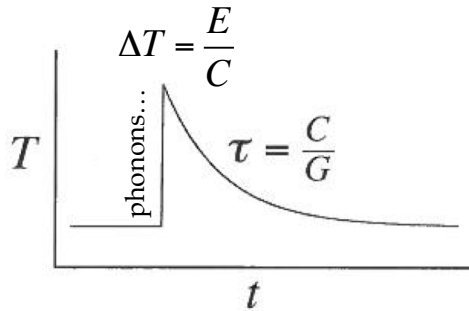
- Physique de la matière condensée à basse température
- Supraconductivité
- Physique des semiconducteurs et scintillateurs à basse T

Détection des variations de température d'une cible de particules



C : capacité calorifique du détecteur (cible + senseur)
 G : couplage thermique détecteur-cryostat

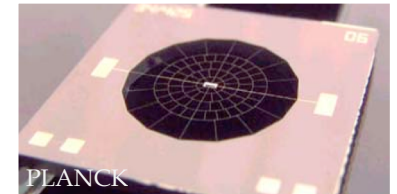
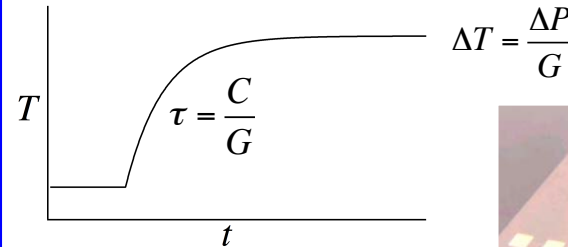
Mode « calorimètre » ($E > 1\text{eV}$)
 mesure du dépôt d'énergie E



Fluctuations thermodynamiques en énergie :

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

Mode « bolomètre » ($E < 1\text{eV}$)
 mesure du flux de particules, puissance P



Fluctuations thermodynamiques en puissance :

$$NEP = \sqrt{4k_B T^2 G}$$

Le fonctionnement à très basse température permet d'améliorer la sensibilité.
 Utilisation des cryostats sub-K : $10\text{mK} < T < 500\text{mK}$

Choix de l'absorbeur et du senseur

Performances :

Absorbeur et thermomètre de faible C
Thermomètre le plus sensible possible

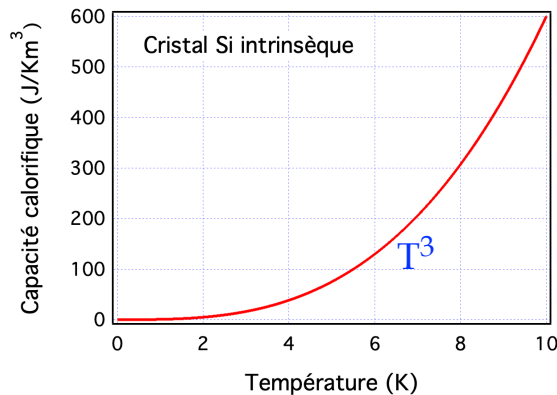
$$\Delta E = \sqrt{k_B T^2 C}$$

$$\Delta T = E/C$$

Physique :

Large choix d'absorbeurs en fonction de l'expérience envisagée

Pour des absorbeurs de grande masse les meilleurs candidats sont les cristaux diélectriques et certains supraconducteurs



cristaux diélectriques : $C \sim \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3$

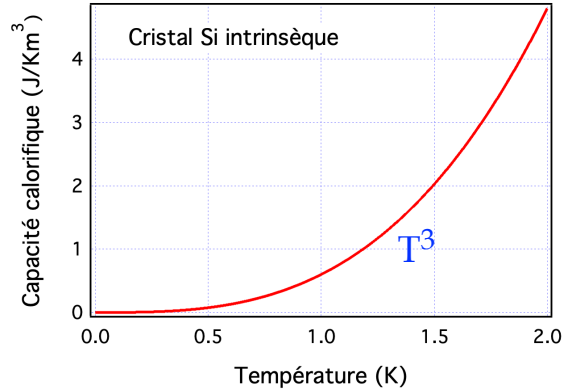
1 kg cristal de Si intrinsèque (pas dopée) à 15mK : $\Delta E = 10 \text{ eV}$

$C_{\text{réseau cristallin}} \ll C_{\text{électrons libres}} : C_{\text{Cu}}/C_{\text{Si}} = 7 \cdot 10^5$ (C_{Vol} à 15mK)

La capacité calorifique des cristaux diélectriques est liée aux vibrations des atomes du réseau cristallin

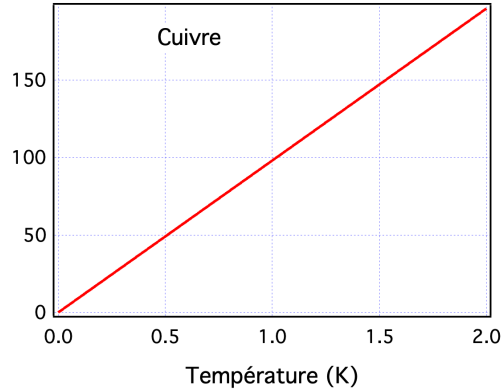
Choix de l'absorbeur

Cristaux diélectriques



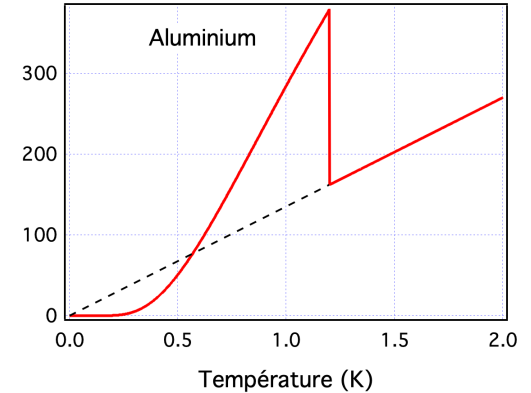
Capacité calorifique du réseau cristallin

métaux



Capacité calorifique liée aux électrons libres du système

supraconducteurs



Absorbeurs diélectriques pour des détecteurs de grande masse

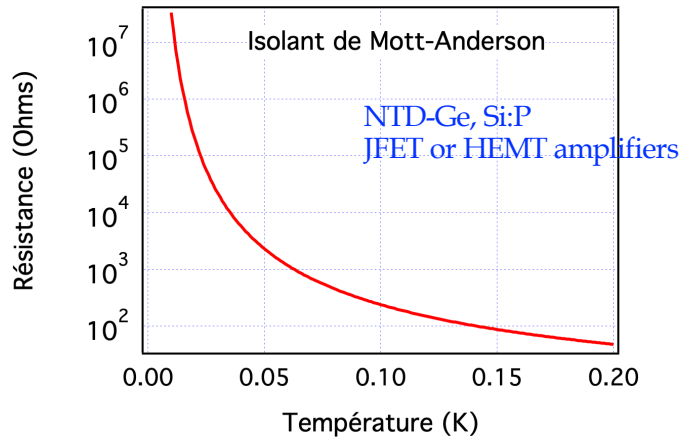
Absorbeurs métalliques pour les microcalorimètres-X (1 - 20 keV : meilleure résolution)

Absorbeurs métalliques ou supraconducteurs en couches minces pour la détection des photons $< 1\text{eV}$ ($< \text{gap semicond.}$)

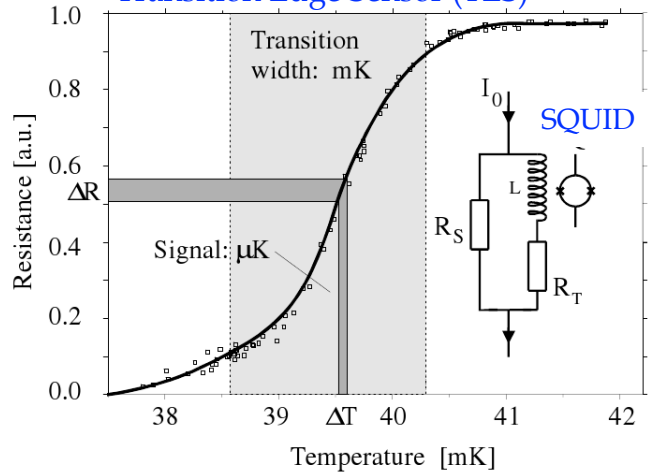
Choix du senseur

Senseurs résistifs

Conversion $\Delta T \rightarrow \Delta R$

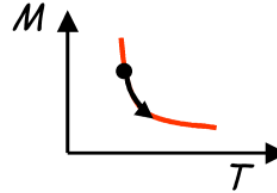


Transition Edge Sensor (TES)

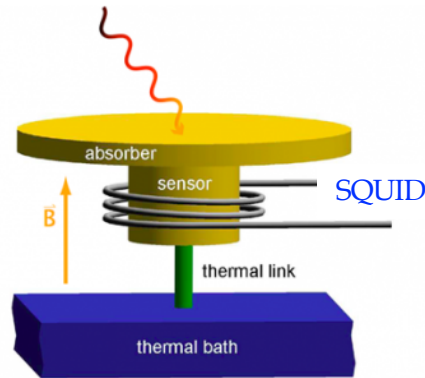


Senseurs magnétiques (MMC)

Conversion $\Delta T \rightarrow \Delta M$



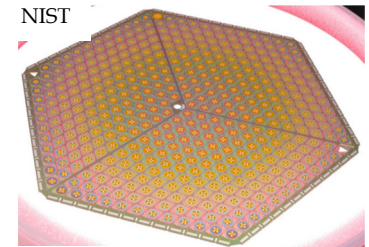
Senseur paramagnétique dans un faible champ magnétique



Variations du moment magnétique du senseur mesurées par un SQUID

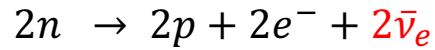
Supraconducteurs MKID, STJ, HEB ...

Propriétés des quasi-particules dans un supraconducteur



MKID array

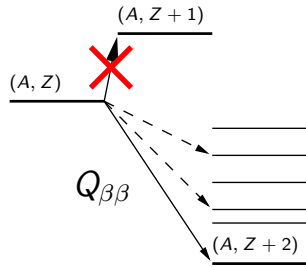
Double désintégration bêta sans neutrino



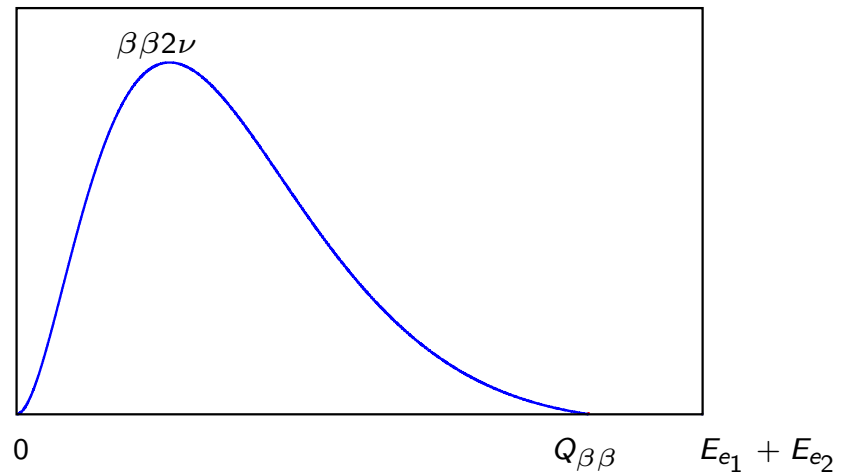
Processus avec émission de deux neutrinos ($2\nu\beta\beta$)

Observé sur 11 noyaux (permis dans le cadre du modèle standard)

Demi-vie $10^{18} - 10^{24}$ ans

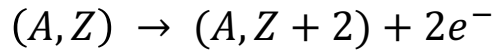
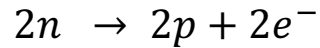


Isotope	$Q_{\beta\beta}$ (keV)
^{48}Ca	4271
^{76}Ge	2039
^{82}Se	2995
^{100}Mo	3034
^{130}Te	2530
^{136}Xe	2478
^{150}Nd	3200



Energie_ $Q_{\beta\beta}$ partagée entre les électrons et les antineutrinos

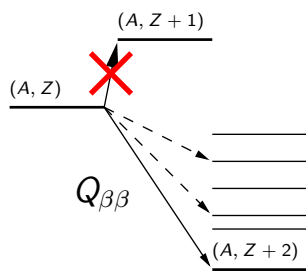
Double désintégration bêta sans neutrino



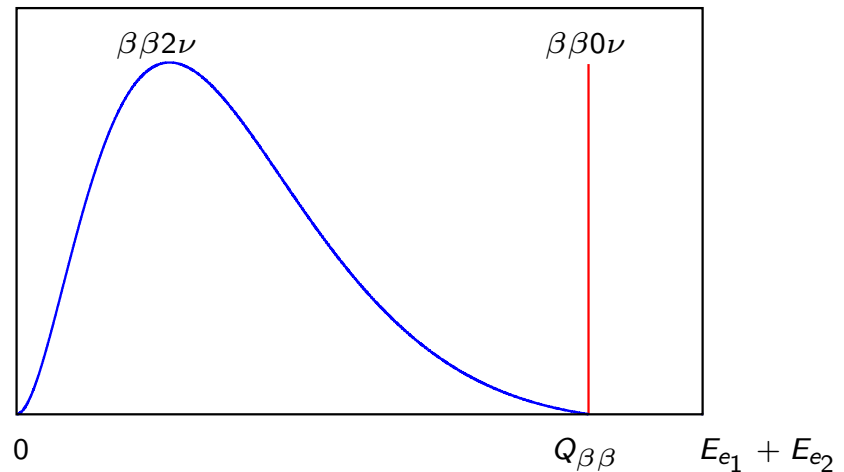
Au-delà du modèle standard :

Processus sans émission de neutrinos ($0\nu\beta\beta$)

Demi-vie $> 10^{25}$ ans



Isotope	$Q_{\beta\beta}$ (keV)
^{48}Ca	4271
^{76}Ge	2039
^{82}Se	2995
^{100}Mo	3034
^{130}Te	2530
^{136}Xe	2478
^{150}Nd	3200



Physique liée à l'observation de la désintégration $\beta\beta 0\nu$:

- Conservation du nombre leptonique
- Est-ce que le neutrino est son propre antiparticule (particule de Majorana)
- Echelle de masse absolue des neutrinos

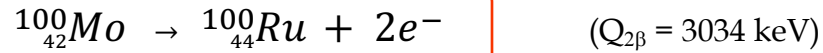
$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = \log(2) \cdot G_{0\nu} \cdot g_A^4 \cdot |M_{0\nu}|^2 \cdot m_{\beta\beta}^2$$

masse effective du neutrino de Majorana

$$m_{\beta\beta}^2 = \left| \sum_{i=1}^3 m_i \cdot U_{ei}^2 \right|$$

Bolomètres $0\nu\beta\beta$ pour CUPID : méthode source = détecteur

Cas spécifique de l'isotope ^{100}Mo :

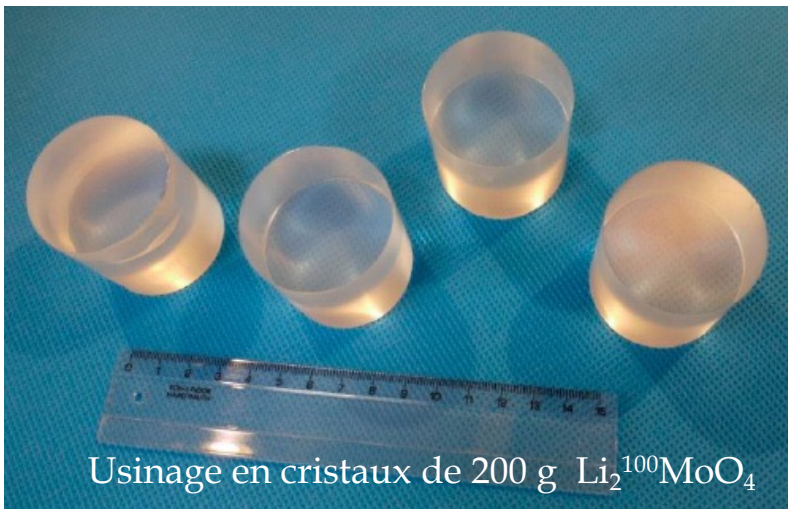


Réalisation de bolomètres à base d'absorbours massifs en Li_2MoO_4 .

Points clés :

- Tirage des cristaux massifs (100 g - 1 kg) extrêmement purs et de grande qualité cristalline
- Bolomètre avec une bonne résolution en énergie
- Rejet passif et actif du bruit de fond dans la région d'intérêt (Q-value ^{100}Mo : 3034 keV)
- Possibilité de réalisation et fonctionnement à froid d'un grand nombre de bolomètres

Bolomètres $0\nu\beta\beta$ Li_2MoO_4 : Tirage de cristaux

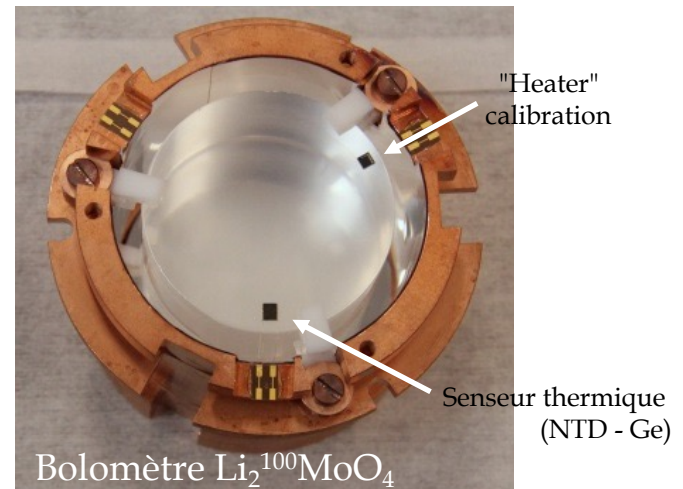


Des cristaux de Li_2MoO_4 de très grande qualité peuvent être synthétisés.

- Purification de la matière première (Molybdène et Li_2CO_3)
- Croissance LTG-Cz (low thermal gradient Czochralski)
- R&D spécifique pour éviter les contaminations (en particulier ^{40}K)

Eur. Phys. J. C 77 (2017) 785 & AIP Conf. Proc. 1894 (2017) 020017

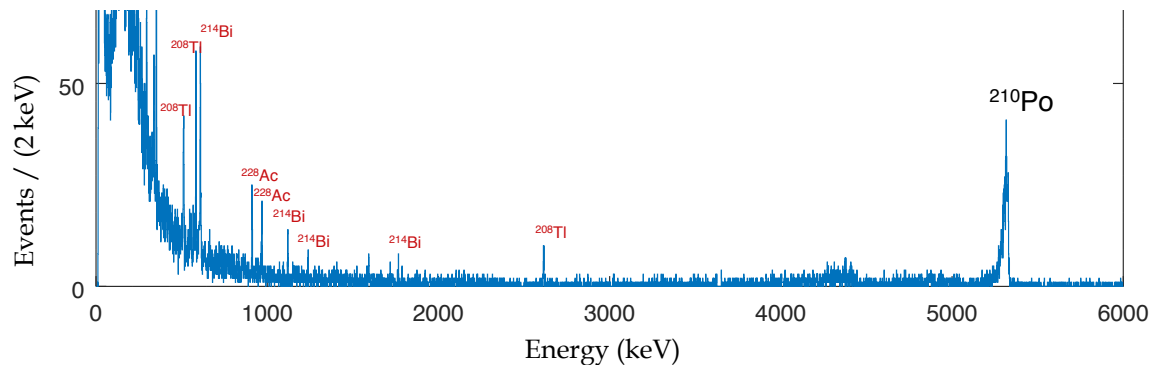
Réalisation d'un bolomètre en Li_2MoO_4 équipé d'un senseur thermique en NTD-Ge



Bolomètres $0\nu\beta\beta$ Li_2MoO_4 : control du bruit de fond

Demi-vie $> 10^{25}$ ans \rightarrow tau d'évènements $0\nu\beta\beta < 1$ / an dans un détecteur en Li_2MoO_4 de 200 g

Détection d'évènements rares, nécessitant un contrôle très poussé du « bruit de fond » dans la zone d'intérêt.
Idéalement aucun évènement de fond « parasite » dans la zone autour de $Q_{0\nu\beta\beta}$ du ^{100}Mo (3034 keV)



Origine des événements du bruit de fond $> 1\text{MeV}$

- Rayonnement cosmique (principalement muons)
- gammas-bêtas chaîne ^{238}U et ^{232}Th
- Radioactivité alpha, en particulier à la surface des cristaux (fond limitant l'expérience CUORE)

Solutions

Site souterrain + veto muons

Blindages. Choix d'un isotope $0\nu\beta\beta$ de grande énergie de transition

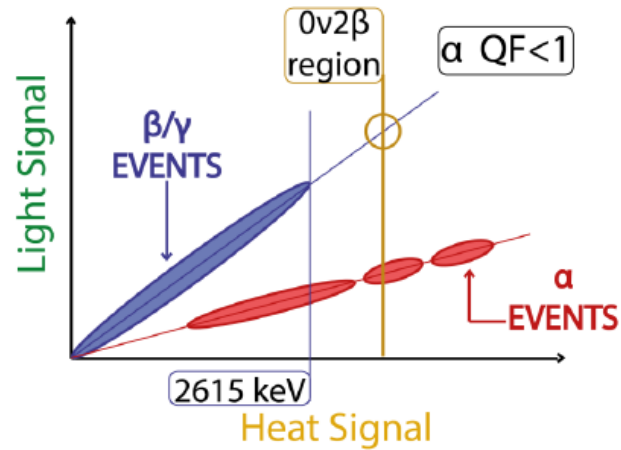
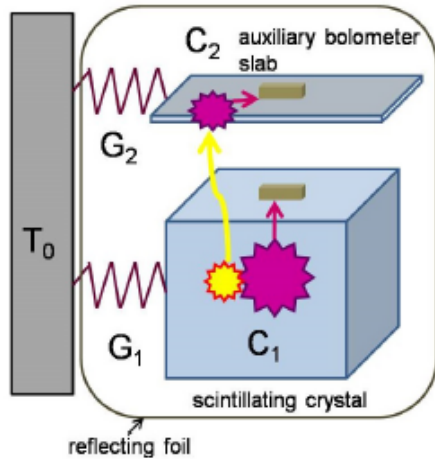
Rejet actif du fond alpha de surface:

détection simultanée chaleur + luminescence
phonons hors équilibre : forme du pulse chaleur

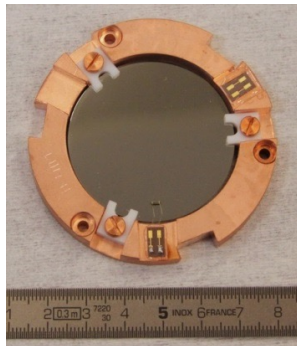
Détection simultanée chaleur - lumière

Des nombreux cristaux sont légèrement scintillants à basse température

Li_2MoO_4 : événements β, γ : $\sim 1\%$ lumière
événements α : $\sim 0.2\%$ lumière

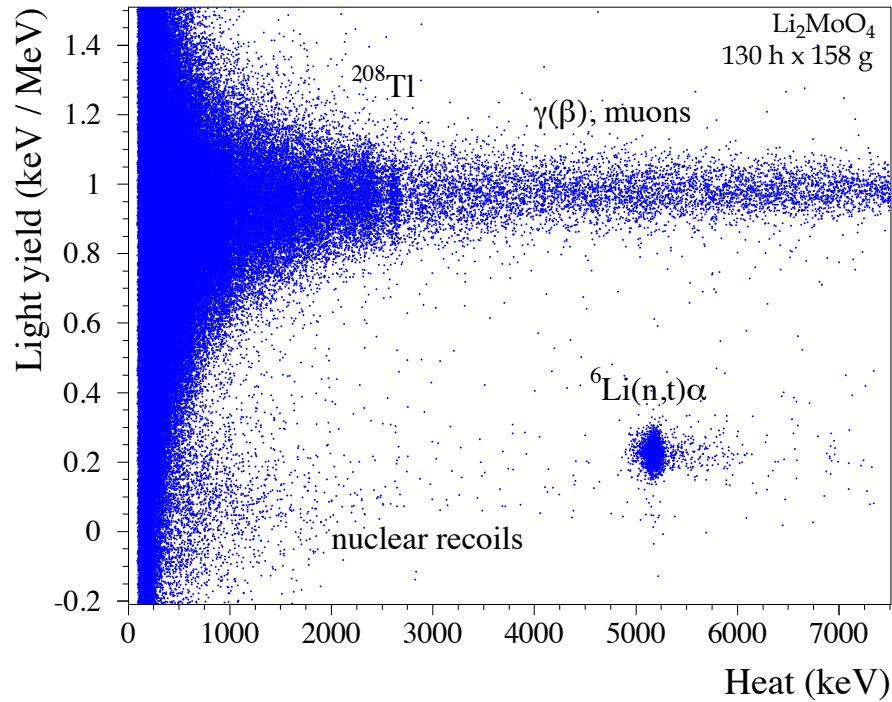


Bolomètre Li_2MoO_4

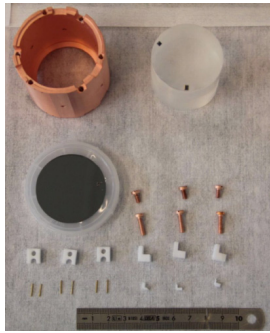


Bolomètre Ge
détecteur de lumière

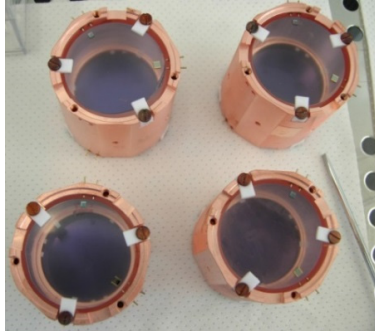
Détection simultanée chaleur - lumière pour Li_2MoO_4



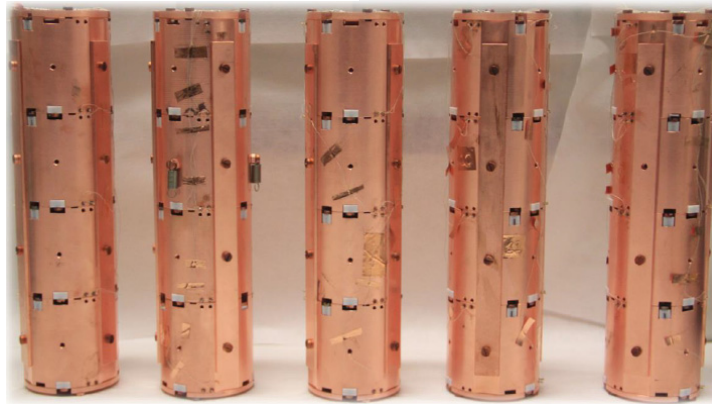
Above ground calibration
arXiv : 1801.07909v2



Single module
0.2-kg $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$
 $\varnothing 44 \times 0.17$ -mm Ge



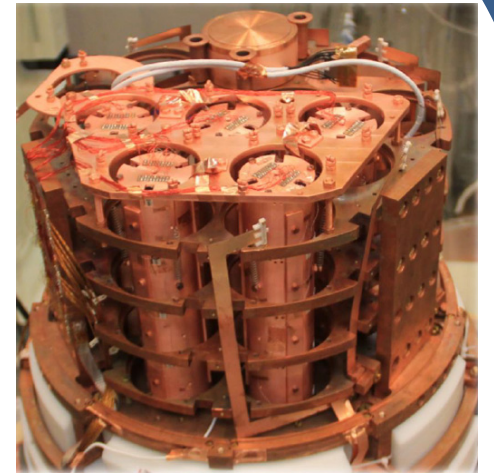
**Four modules
per tower**



Five suspended towers
4.18 kg crystals \Rightarrow 2.34 kg of ^{100}Mo

CUPID-Mo au LSM

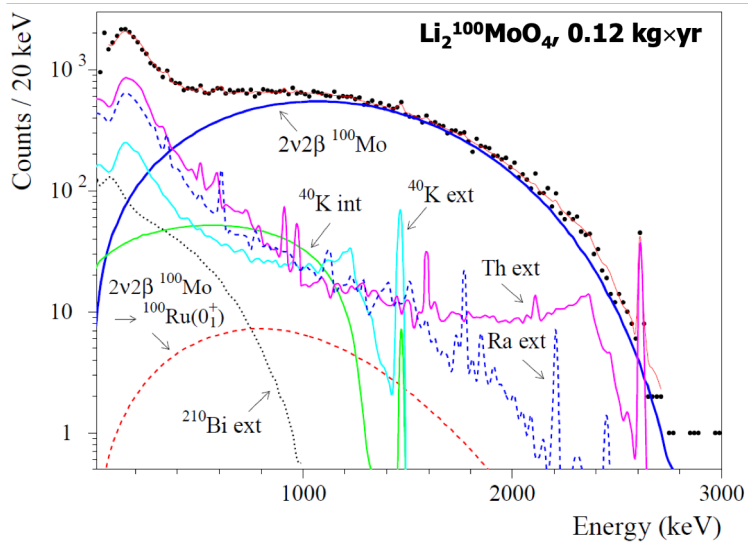
installation de 20 bolomètres de 200 g
chaleur – lumière dans le cryostat « EDELWEISS 3 »



**CUPID-Mo
in EDELWEISS set-up**

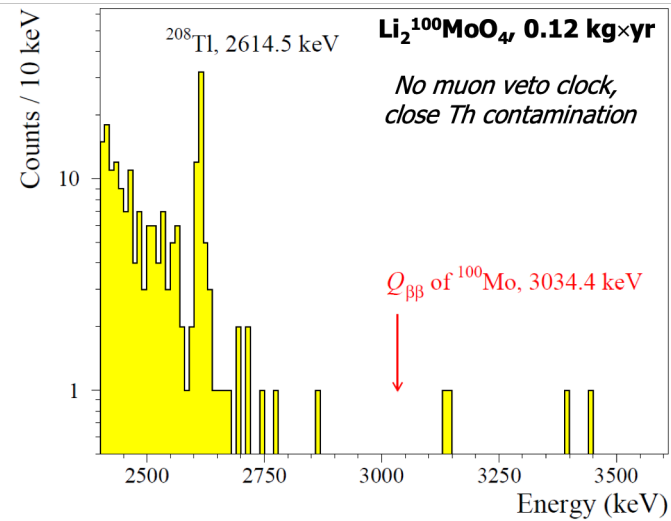
CUPID-Mo au LSM (commissioning phase)

$2\nu\beta\beta$



$$\tau_{1/2} (2\nu\beta\beta \text{ } ^{100}\text{Mo}) = [6.90 \pm 0.06(\text{stat})] \times 10^{18} \text{ yr}$$

$0\nu\beta\beta$



$$\tau_{1/2} (0\nu\beta\beta \text{ } ^{100}\text{Mo}) \geq 0.7 \times 10^{23} \text{ yr}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \leq 1.4\text{--}2.4 \text{ eV}$$

Configuration [crystal×yr]	Sensitivity @90% CL	
	$\tau_{1/2}$ [yr]	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ [eV]
(1) Phase I 20×0.5	1.3×10^{24}	0.33–0.56
(2) Phase I 20×1.5	4.0×10^{24}	0.19–0.32
(next phase) 40×3.0	1.5×10^{25}	0.10–0.17

AIP Conf. Proc. 1894 (2017) 020017; Proc. Moriond-2018

Sélection de la meilleure technologie d'ici 2 ans pour une expérience $0\nu\beta\beta$ de 1 tonne de bolomètres:

CUPID - 1t dans le cryostat CUORE du LNGS

Stefanos MARNIEROS
Journée P2I PHOM
Centre CEA – 20 juin 2019

Bolomètres

Détecteurs sub-K et applications

Journée P2I - PHOM

Phonons hors équilibre dans un bolomètre

Par quel processus l'énergie déposée initialement à un seul électron ou un seul noyau d'un cristal diélectrique finit par chauffer l'ensemble du détecteur?

Phonons dans un solide : vibrations collectives d'un ensemble d'atomes en interactions dans un cristal

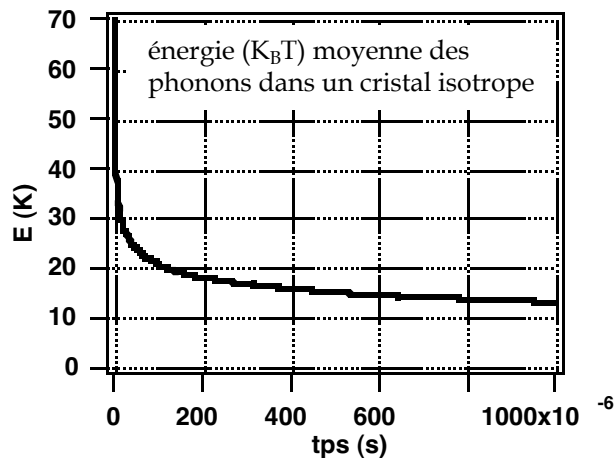
L'énergie déposée va très rapidement (~ 10 ps) déformer le réseau cristallin en créant un « hot spot » de phonons avec des fréquences proches de la fréquence de Debye. Le hot-spot s'étale et les phonons se propagent en subissant des désexcitations:

Processus anharmoniques normaux : un phonon initial se désexcite en deux phonons de plus faible énergie :

$$\frac{1}{\tau_N} = A E^5$$

Processus de diffusion élastique : changement du vecteur d'onde du phonon. Pas de changement d'énergie mais conversion des phonons transverses en phonons longitudinaux beaucoup plus instables via les processus anharmoniques normaux

Dans un modèle simple, les phonons se propagent de manière quasi-diffusive et leur énergie moyenne après quelques dizaines de μ s varie très lentement:



En absence de défauts on obtient des phonons $E \sim 15$ K avec un libre parcours moyen $>$ dimensions du cristal :
gaz de phonons hors équilibre

Temps de vie des phonons :

- $E = 10$ K : 70 ms
- $E = 1$ K : 2 heures
- $E = 0.1$ K : 2 ans

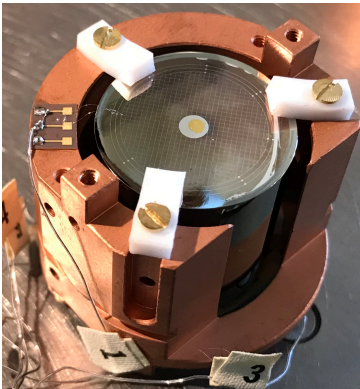
Relaxation de l'énergie de phonons par les défauts, en particulier à la surface du cristal

Phonons hors équilibre dans un bolomètre

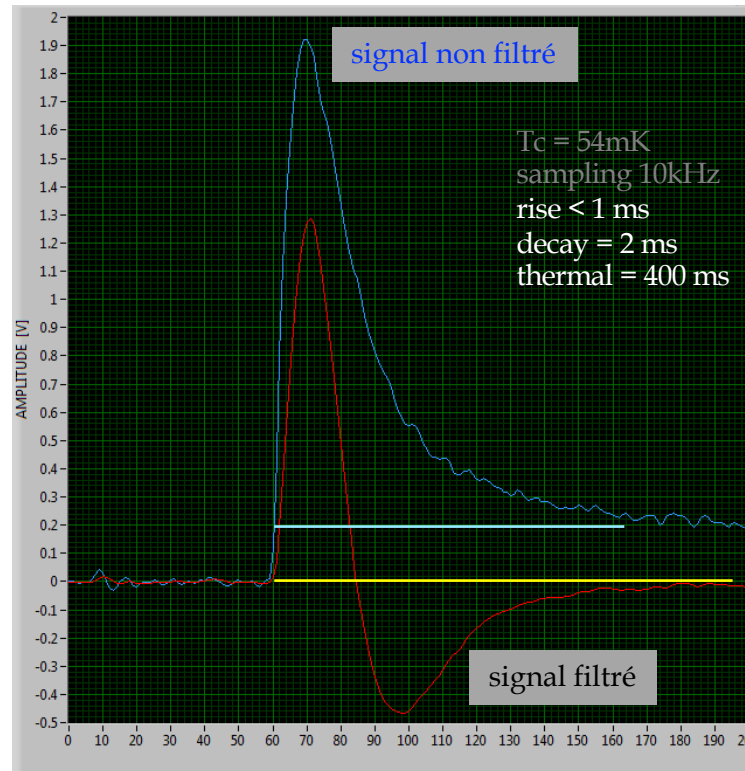
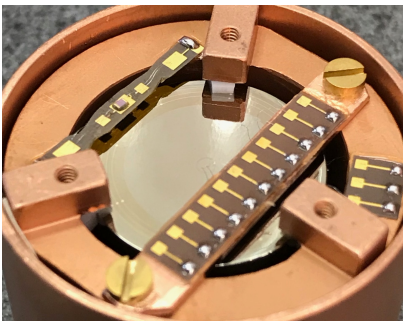
Une couche métallique déposée à la surface du cristal va absorber les phonons hors équilibre (forte interaction électron-phonon dans les métaux)

La quasi-totalité de l'énergie déposée dans l'absorbeur peut se retrouver transitoirement dans la couche métallique.

C'est aussi le cas pour les senseurs thermiques en forme de couches minces



Détecteur 32 g Ge
avec TES en couche mince NbSi



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

Amélioration de la limite
thermodynamique :

$$C = C_{\text{senseur}}$$

indépendant de $C_{\text{Absorbeur}}$

Rejet du fond radioactif de surface par analyse de forme du signal chaleur

Projet CROSS

Le dépôt d'une couche supraconductrice en Aluminium va accélérer la relaxation des phonons hors équilibre pour des événements proches de la surface du cristal (proche de la couche en Al).

