

Détecteurs pour la recherche directe de Matière Noire

Défis scientifiques

Compétition technique

Les détecteurs cryogéniques:

- Senseurs de température, de phonon
 - d' ionisation et
 - de scintillation

J. Gascon

UCB Lyon 1, CNRS/IN2P3/IPNL

Lectures intéressantes

- *Particle Dark Matter : observations, models and searches*, G. Bertone (dir.), Cambridge University Press, 2010.
 - *Revue complète récente de la recherche de la matière noire sous forme de particule.*

- *Supersymmetric Dark Matter*, G. Jungman, M. Kamionkowski and K. Griest, Phys. Rep. **267**, 195 (1996); G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, Phys. Rep. **405**, 279 (2005).
 - *Une des première revue complète de tous les aspects de la matière noire supersymétrique, de la production au Big Bang à sa détection directe ou indirecte, et éléments essentiels de la supersymétrie.*

- *Review of mathematics, numerical factors, and corrections for dark matter experiments based on elastic nuclear recoils*, J. D. Lewin and P. F. Smith, Astropart. Phys. **6**, 87 (1996).
 - *Présentation complète mais claire des ingrédients requis pour le calcul du spectre expérimental des reculs dans un détecteur pour un modèle de WIMP donné.*

- Particle Data Group: sections *Cosmology*, *Dark Matter* et *Detectors for non-accelerators physics*
 - <http://pdg.lbl.gov/>

- *Cryogenic Particle Detection*, C. Enss.

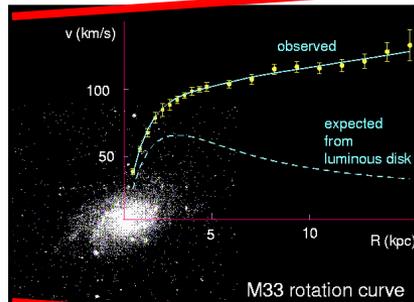
- *LTD14 proceedings*

1- CONTEXTE SCIENTIFIQUE

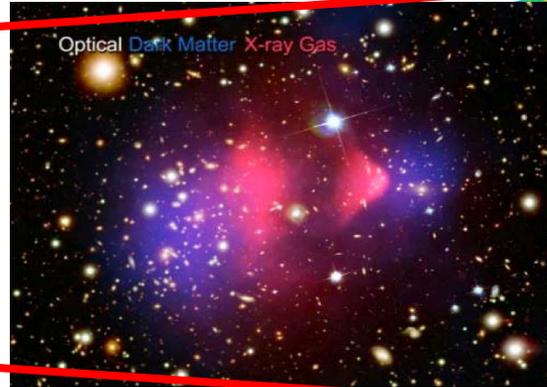
Une question fondamentale en astroparticule

- Matière Noire Froide présente à toutes les échelles ...

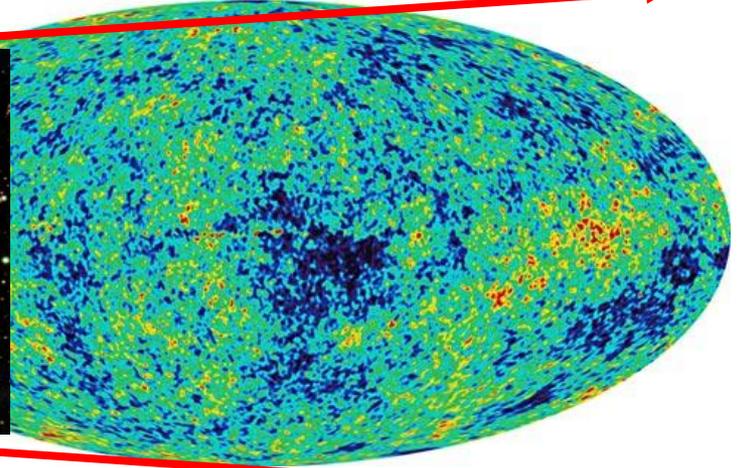
Essential part of a consistent picture



Galaxy



Clusters



CMB

- ... recherchée en tant que nouvelle particule au LHC
- Recherche indirecte: traces de produits d'annihilation dans les rayonnements cosmiques (γ , ν , e^+ , antimatière...)
- ... *recherche directe: collision des WIMPs de notre halo galactique avec des noyaux dans des cibles en laboratoire*
 - Clé de voute pour associer une particule à notre matière noire locale
 - Observatoire pour ces nouveaux messagers galactiques?

Les WIMPs sont-ils détectables?

- Cosmologie: $\Omega_{\text{DarkMatter}} \sim 0.23 \pm 0.02$ ($1.3 M_{\text{proton}} / \text{m}^3$)
- Astrophysique: Localement, $\rho_{\text{DM}} \sim 0.4 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ ($0.3 M_{\text{proton}} / \text{cm}^3$)

Hypothèse: production thermique lors du Big Bang

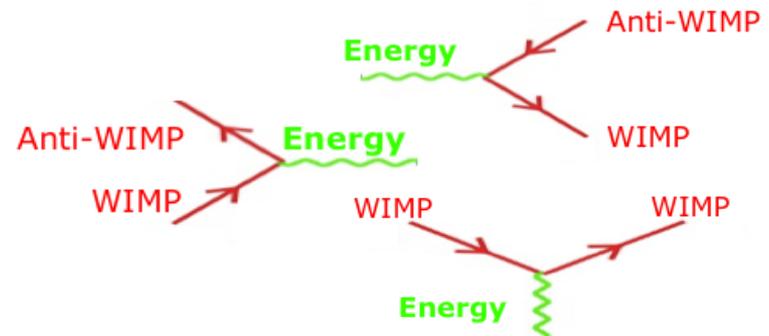
- *Physique des particules*: production (et annihilation) en paire
- *Thermodynamique du Big Bang*: $\Omega_{\text{DarkMatter}}$ proportionnel à $\sigma_{\text{annihilation}}$:

$$\langle \sigma_{\text{annihilation}} v \rangle / (\Omega_{\text{DM}} h^2) \sim 0.3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}$$

- *Miracle WIMP*: Pour $\Omega = 0.23$, $\sigma_{\text{annihilation}} \sim$ force nucléaire Faible.
- *Thermodynamique Big Bang + Force Faible*: $M_{\text{WIMP}} \sim 10 - 10\,000 \text{ GeV}/c^2$

→ *Prédictions possibles pour l'identification du WIMP, 3 voies :*

1. **Création au LHC** ($\sigma_{\text{création}}$)
2. **Produits d'annihilation dans les rayons cosmiques** ($\sigma_{\text{annihilation}}$)
3. **Diffusion sur cibles terrestres** ($\sigma_{\text{diffusion}}$)



- Une, deux ou trois de ces méthodes peuvent échouer:
 - *La matière noire n'existe pas (modification à la gravitation, ...)*
 - *La matière noire lourde a cessé d'exister (période $< 10^9$ années, ...)*
 - *La matière noire est absente localement (accident galactique, ...)*
 - *La matière noire n'a aucune interaction détectable hors la gravitation (pas de production thermique: pas de miracle WIMP, ...)*

- Nouvelle découverte / preuve de l'absence de matière noire à ~ tous les mois:
... mais trop d'indices accumulés pour abandonner les motivations premières, et temps de développement des détecteurs ~ décennie(s)

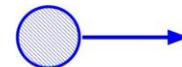
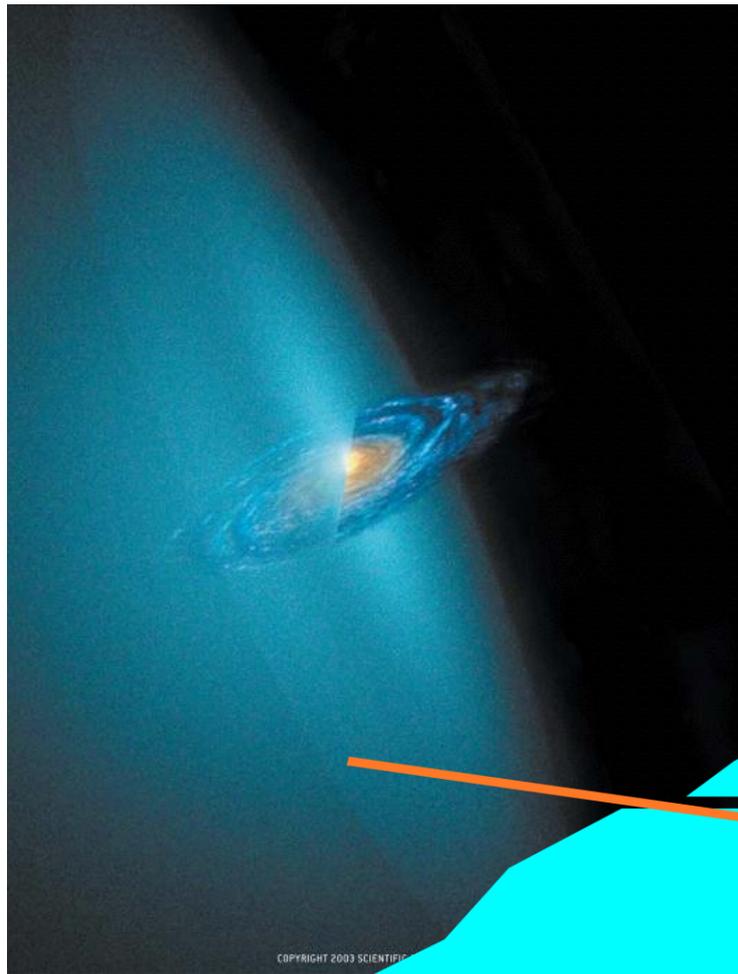
- Voies (1) et (2) sur des instruments dédiés à d'autres type de recherches (LHC, rayons cosmiques). Voie (3) sur instruments plus entièrement dédiés (pouvant être communs aux recherches de désintégration rares)

- Compte tenu des incertitudes sur la nature des WIMPs (nouvelle physique), les résultats (positifs ou négatifs) des 3 voies sont nécessaires. Chaque voie a ses atouts et ses inconvénients

... c'est tout simple, avant que ça se complique

2- RECHERCHE DIRECTE

Collision WIMP-nucleon



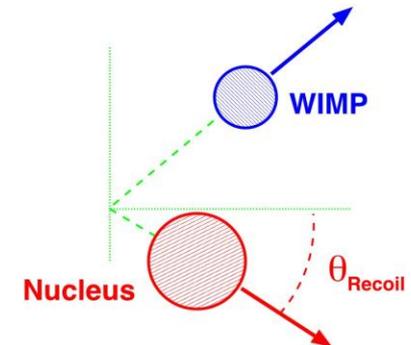
WIMP

From galactic halo
($v \sim 200$ km/s)

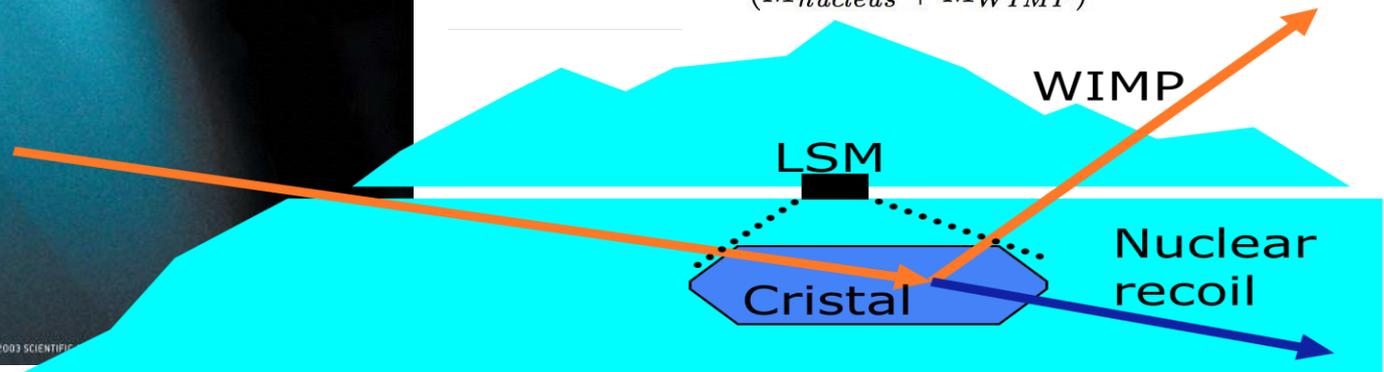


Nucleus
in laboratory
($v = 0$ km/s)

Elastic WIMP
scattering



$$E_{recoil} = E_{WIMP} \frac{4M_{nucleus}M_{WIMP}}{(M_{nucleus} + M_{WIMP})^2} \cos^2 \theta_{recoil}$$



Observables: Taux d'évènements, E_{recoil} , θ_{recoil} et longueur de parcours d'arrêt

Domaine de la recherche directe

S'applique à toute particule pouvant faire une collision élastique avec un noyau d'atome (*Neutralino χ , Kaluza-Klein, miroir, scalaire...*)

■ ... *Si l'énergie cinétique E_{WIMP} n'est pas trop petite*

- $M_{\text{WIMP}} \sim 100 \text{ GeV}/c^2$ (supersymétrie) et $v \sim 200 \text{ km/s}$ correspond à une moyenne $E_{\text{WIMP}} \sim 20 \text{ keV}$ (rayon X dur).

■ ... *Si $M_{\text{WIMP}} \sim M_{\text{noyau}}$*

- Transfer d'impulsion optimal pour $M_{\text{WIMP}} = M_{\text{noyau}} \sim 100 \text{ GeV}/c^2$ correspondant à un poids atomique $A \sim 100 \text{ g/mol}$

■ ... *Si la probabilité de collision n'est pas zéro*

- Doit être faible sinon aurait déjà été observé
- La théorie quantique des champs impose qu'il y ait une relation entre les probabilités de création, d'annihilation et de diffusion, dépendant du type d'interaction. Force faible : **kilo.jour...** ou **tonne.année.**

- Méthode suggérée en 1985
 - Goodman + Witten, Phys. Rev. D 31 (1985) 3059

- Dès 1987, premières limites significatives (exclusion d'un neutrino lourd) avec détecteurs germanium et silicium: sensibilité à des taux de quelques evts/kg/jour
 - Ge: S. P. Ahlen, et al., Phys. Lett. B 195 (1987) 603
 - Ge: D. O. Caldwell, et al., Phys. Rev. Lett., 61 (1988) 510
 - Si: D. O. Caldwell, et al., Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1305

- Besoin d'un meilleur rejet du fond radioactif: compétition de nouvelles techniques
 - Pulse-shape discrimination dans scintillateur NaI? *Bolomètres ionisation-chaleur* [Shutt et al, PRL 69 (1992) 3425 et 3531]? CsI? Argon liquide? Xénon bi-phase ? Bulles? etc ...

- Taux de collision par seconde R:

$$R = \varphi \sigma_A N_{\text{cible}}$$

φ = Flux de WIMP (WIMP/cm²/s) = $(\rho_W/M_W) v$

σ_A = section efficace de diffusion sur un noyau atomique (cm² ou pb)

N_{cible} = nombre de noyaux cibles exposés au flux φ

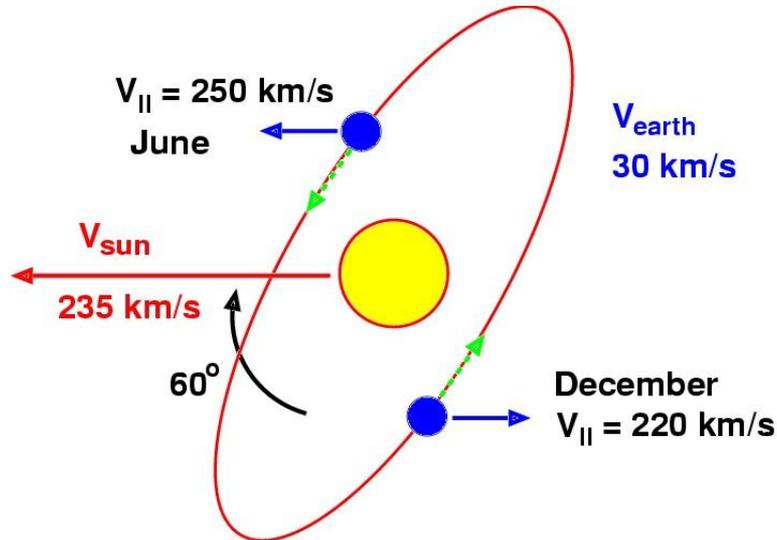
→ Besoin de détecteur massifs (N_{cible})

Flux: distribution de vitesse des WIMPs

- Exact calculation extremely difficult
 - N-body calculation, $N=\infty$, Gravity range = ∞
 - No dissipation: WIMPs don't "stick" together as ordinary matter
- Equilibrium: Kinetic energy \sim -Potential energy/2
- Simplest (crudest) case: spherical isothermal halo
 - Maxwellian velocity distribution:
$$\frac{dP(v)}{v^2 dv} = \frac{1}{(\pi v_0^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{v^2}{v_0^2}\right)$$
 - $v_0 \sim 220$ km/s ($v_{\text{rms}} = \text{sqrt}(3/2)v_0 = 270$ km/s)
 - Truncated to escape velocity from Galaxy ($v_{\text{esc}} \sim 544$ km/s)
- More realistic halo model: heated debate
 - Central cusp? clumps? triaxial? caustics? tidal flows? Comoving?
 - Direct search mostly sensitive to *average* v^2 (if not too clumpy)

Vitesses du Soleil et de la Terre

- Sun around the galaxy: ~235 km/s
- $\exp(-v^2/v_0^2) \rightarrow \exp(-|\vec{v} + \vec{v}_{||}|^2/v_0^2)$ (energy boost)
- Earth around the sun: 30 km/s (~60° to Galactic plane)



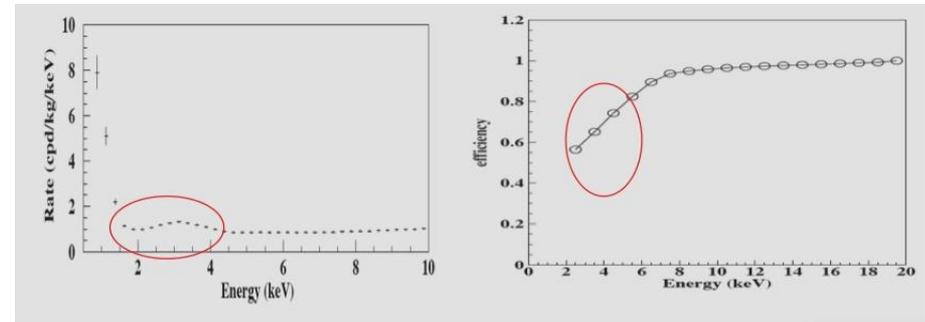
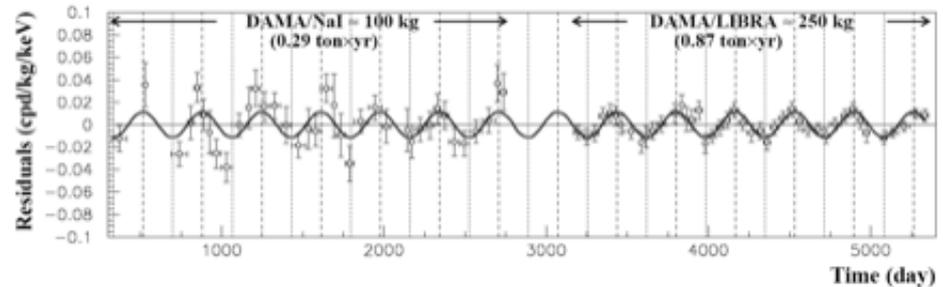
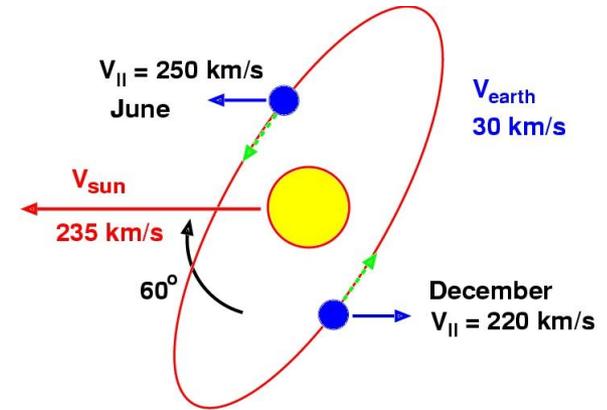
$$f(\mathbf{v}) =$$

$$f(\mathbf{v}; \mathbf{v}_o, \mathbf{v}_{\text{escape}}, \mathbf{v}_{\text{sun}}, \mathbf{v}_{\text{earth}})$$

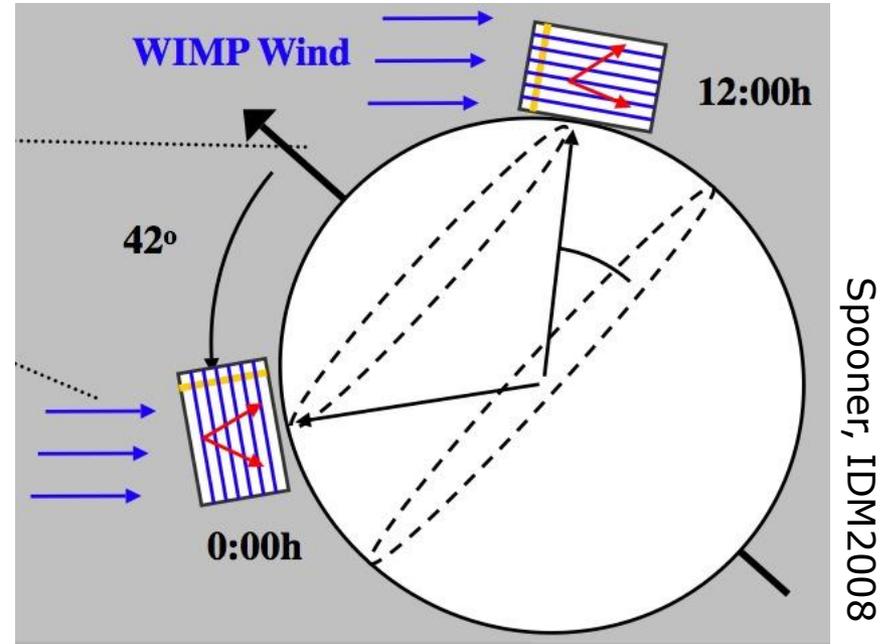
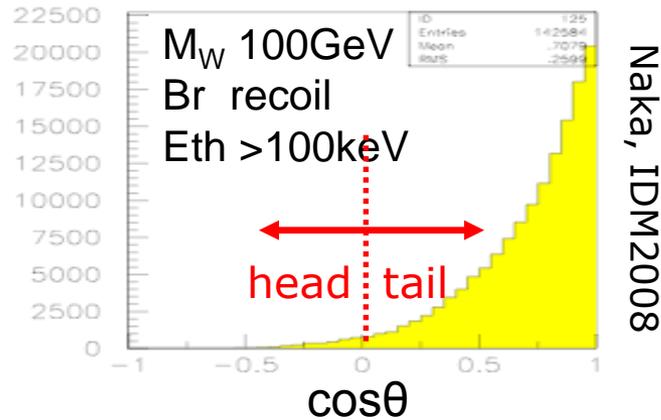
- Annual modulation of $\pm 7\%$ of $v_{||} \rightarrow < \pm 7\%$ on WIMP flux
- Modulation more sensitive to detailed halo model

Modulation annuelle de DAMA

- Claimed to be observed at low-energy in NaI (DAMA)
- Non-modulating component (~ 1 evt/kg/day, \sim total rate in NaI) not observed in Ge (EDELWEISS, CDMS), Xenon, CsI (KIMS): opens the door to (too many?) new models
- Signal in low-efficiency, near-threshold region
- No "source off" (like all searches): observation of signal in different detectors/targets essential for credibility!



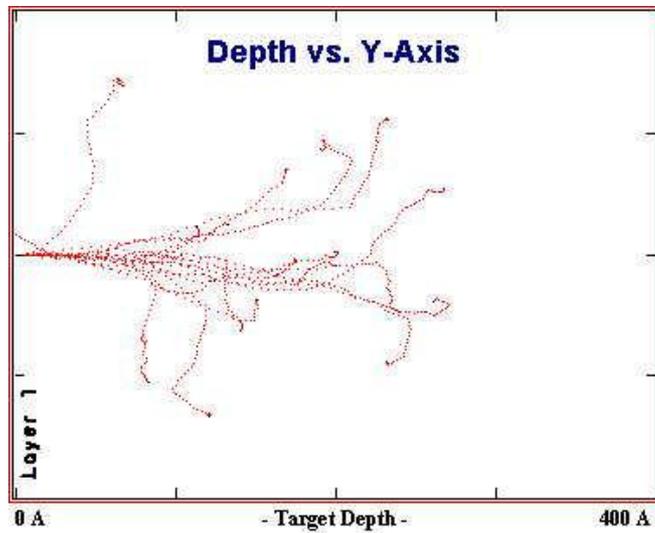
- Direction du vent
- $\theta_{\text{RECOIL}} \neq \theta_{\text{WIMP}}$
mais $\langle \theta_{\text{RECOIL}} \rangle = \langle \theta_{\text{WIMP}} \rangle$



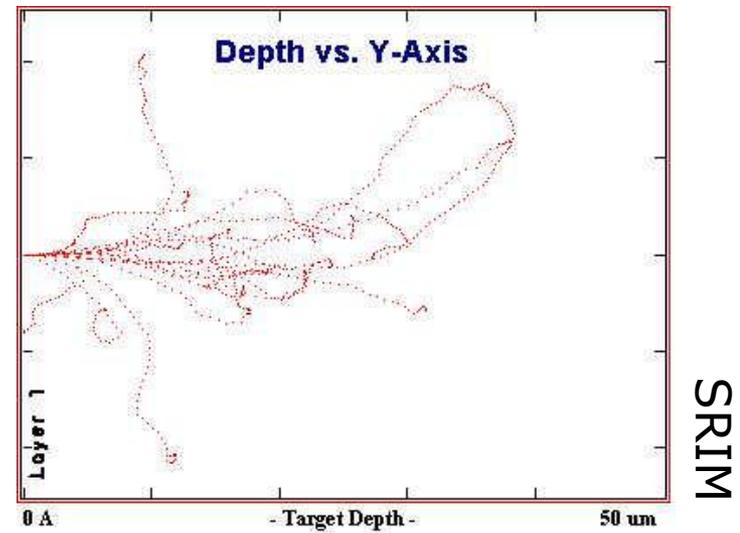
- Demande une excellente résolution sur la direction de la trace (et discrimination début/fin de trace?) malgré les très courts parcours
- Bonus astrophysique: mesure de $f(v)$

- *Difficult to observe θ_{recoil} and Range*

20 keV Ge recoils
in crystal Ge:
Range ~20 nm

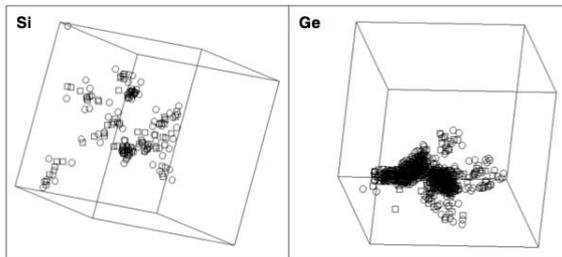
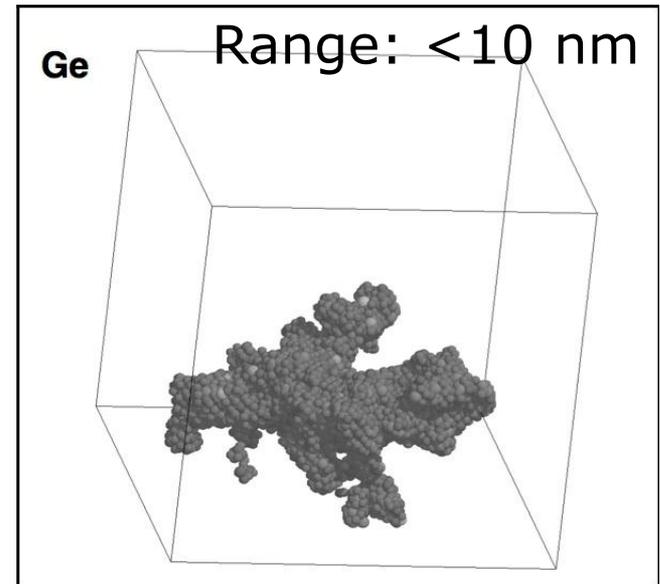
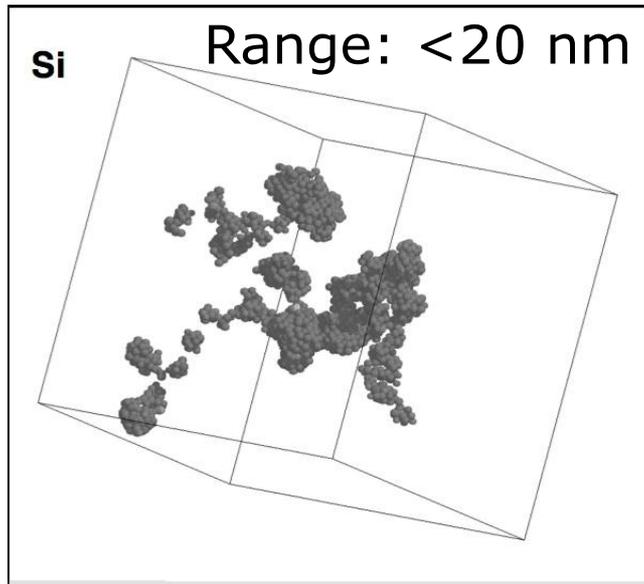


20 keV Kr recoils
in gaseous Kr:
Range ~30 μm



Directionnalité des reculs nucléaires

- Simulation par Dynamique Moléculaire des atomes "chauds" produits par un recul de Si ou Ge de 10 keV (Nordlund, 1998)

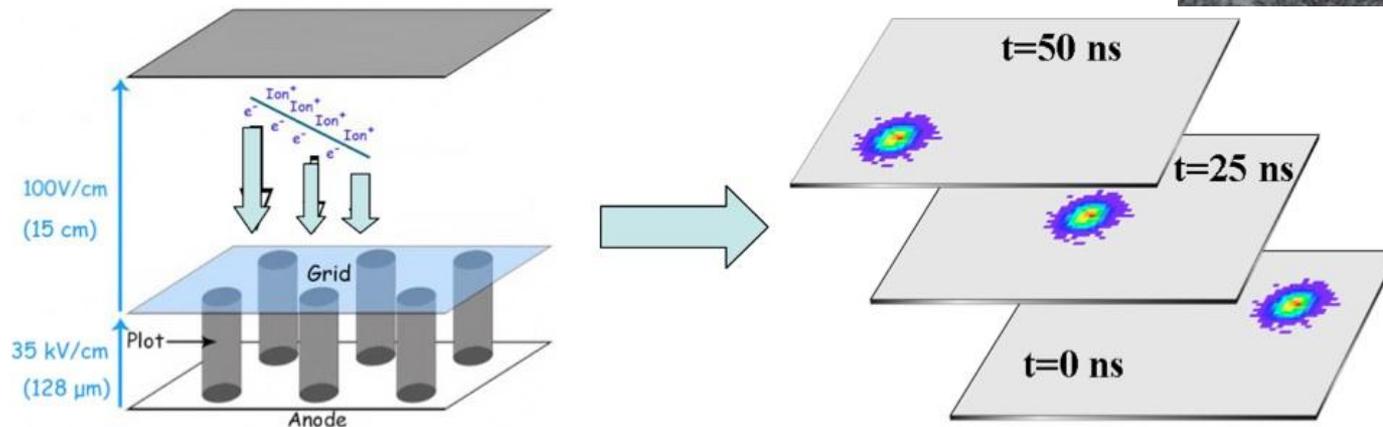
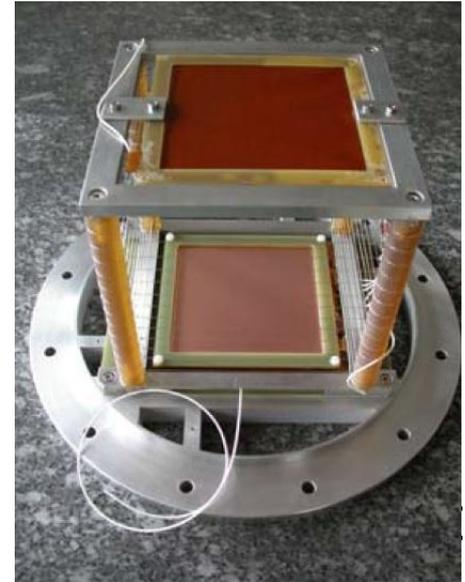


Dommages permanent dus à cette « dose femtoGray » (négligeable dans métaux, mais pas dans les semiconducteurs?)

- Idea: check for recoil tracks in ancient mica, $\theta_{\text{recoil}} \sim -v_{\text{sun}}$
 - *Problem: direction of v_{sun} , v_{earth} changes constantly, continental drift...*
- Idea: low-pressure gas TPC detector (DRIFT+MIMAC project)
 - *Problems: “expand” track length to \sim cm (low-density target), keep e^- /ion diffusion low (negative CS_2 ions instead of e^-), target density...*
- Idea: use emulsions
 - *Not trivial to scan short tracks in \gg kg-year exposure with known velocity direction*
- **Observe E_{recoil} instead, use detector mass as target.**
 - **Count events with “unexplained” energy deposited in a detector**
 - **Need differential Rate vs E_{recoil}**

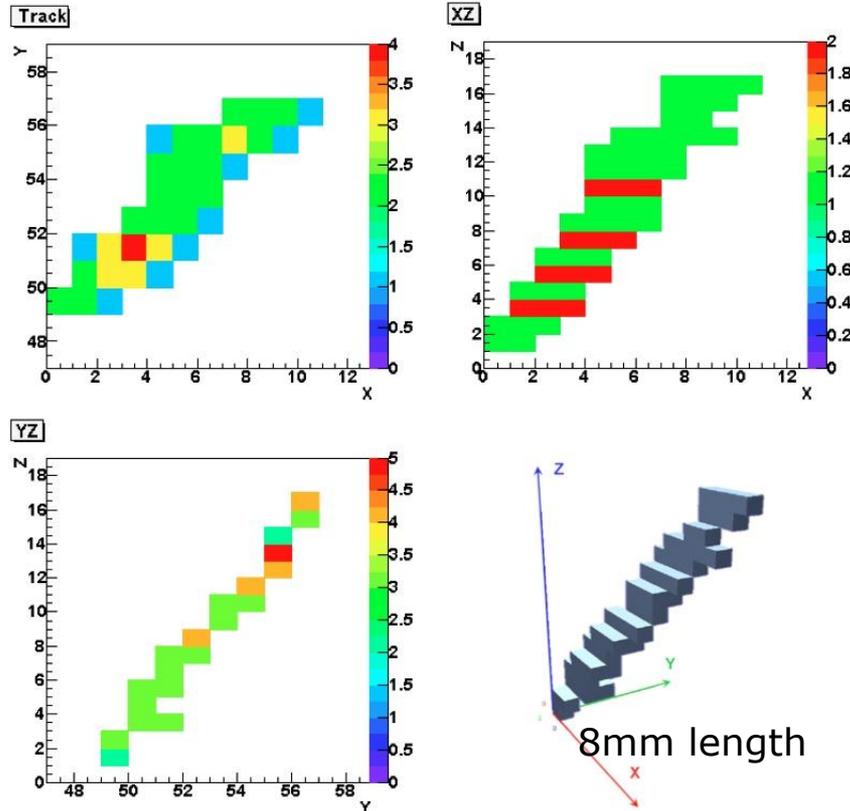
R&D MIMAC: low-pressure TPC

- LPSC Grenoble + CEA/Irfu + IRSN
- Micro-TPC Matrix of Chambers
- ^4He + C_4H_{10} , 300-350 mb (... ^3He , CF_4)
- Micromega technology for energy+track readout (0.3mm wide pixels)

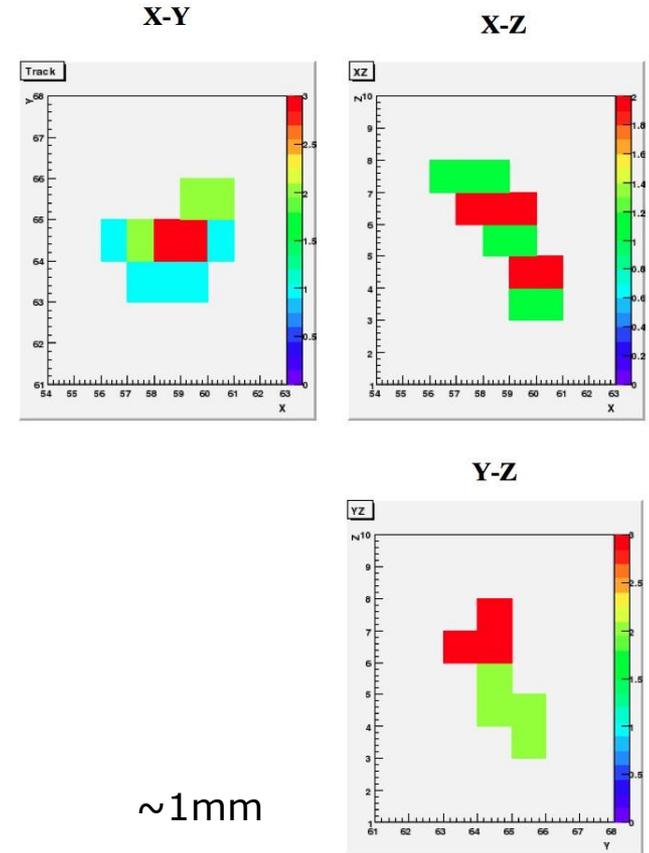


MIMAC electron and He recoil tracks @ 6keV

Electron



He recoil

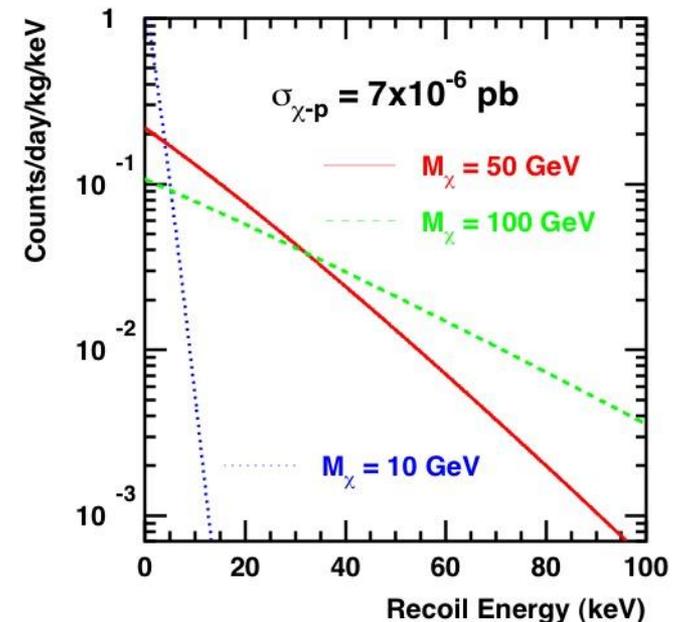


Spectre d'énergie de recul

Ingrédients:

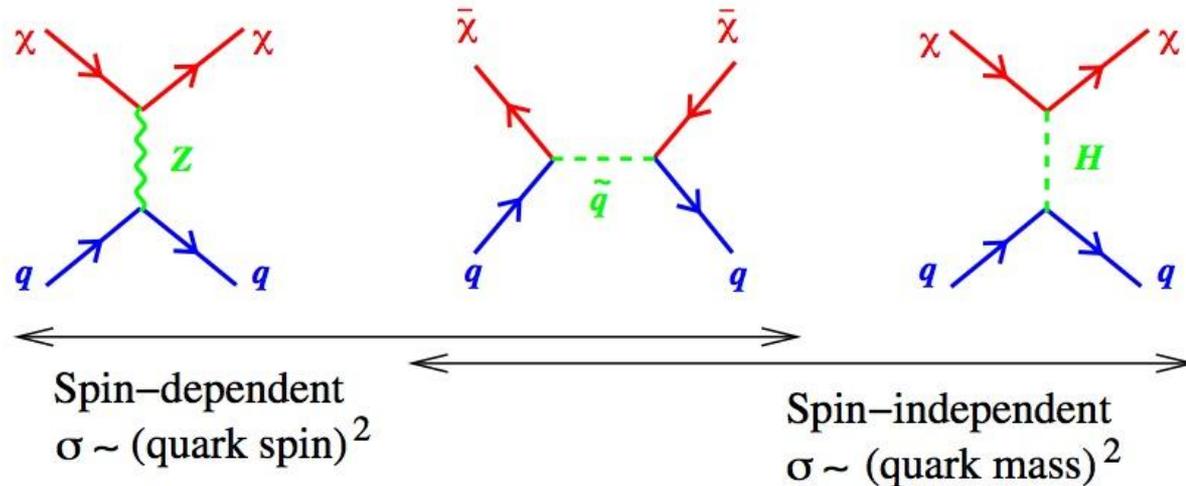
$$E_{recoil} = E_{WIMP} \frac{4M_{nucleus}M_{WIMP}}{(M_{nucleus} + M_{WIMP})^2} \cos^2 \theta_{recoil} \quad +f(\mathbf{v})$$

- $\langle E_{recoil} \rangle = \mu^2 v^2 / M_{recoil}$
- \sim Exponential distrib. of $v^2 \rightarrow$
 \sim Exponential distrib. of E_{WIMP}
- Flat distribution of $\cos^2 \theta_{recoil} \rightarrow$
flat distribution of E_{recoil} / E_{WIMP}
- \sim Exponential distribution of E_{recoil}



Section efficace de diffusion

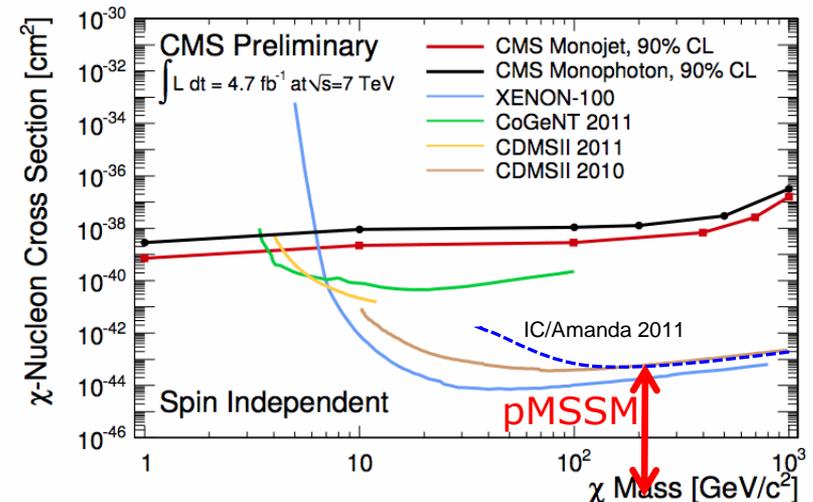
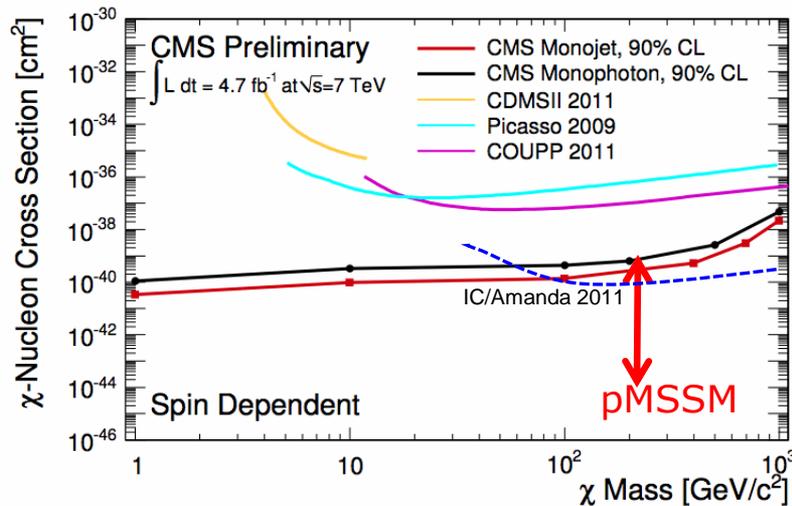
- χ -nucleon scattering cross-section can be calculated within SUSY



- Separation spin dependent (SD) / independent (SI): most general expression for most types of interactions, even beyond SUSY
- In a nucleus, spin of quarks add incoherently
 - Spin of most nucleons cancels out in most nucleus: incoherent sum
 - In a nucleus, quark masses add coherently
 - Strange quark content dominates! (ok, known to some precision)
 - Expect large coherence effects for SI (Good, that will help!)

Spin-dependent (SD) vs spin-independent (SI)

- Dans beaucoup de modèles, comme SUSY, le SD est soit déjà exclu, soit mélangé avec le SI (et en plus SI amplifié par A^2 supplémentaire).
- SD plus efficacement sondé par recherche indirecte (détecteurs neutrinos) ou même LHC, car la recherche n'a pas le boost en A^2 .
- Recherche SI favorisée (-> cibles A élevés favorisées, plutôt que spin), ... mais ceci reste un biais théorique



CMS Moriond EW 2012 + PRD85 (2012) 042002

Nucleon-to-nucleus scaling

■ Centre-of-mass effect:

- $\sigma_A/\sigma_n = \mu_A^2/\mu_n^2$ with reduced mass (for both SI and SD):

$$\mu_A = M_{\text{WIMP}}M_A/(M_{\text{WIMP}} + M_A)$$

$$\mu_n = M_{\text{WIMP}}M_{\text{nucleon}}/(M_{\text{WIMP}} + M_{\text{nucleon}})$$

■ Coherence effect: $\sigma_A/\sigma_n = A^2$ *for spin-independent interactions*

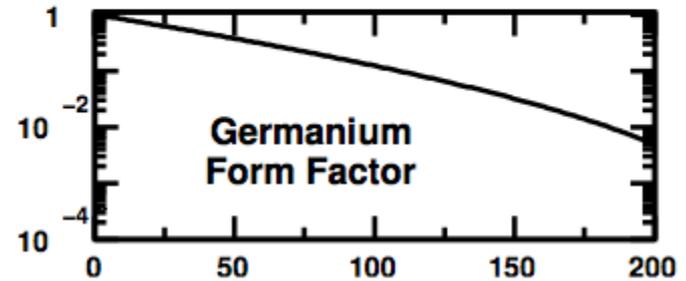
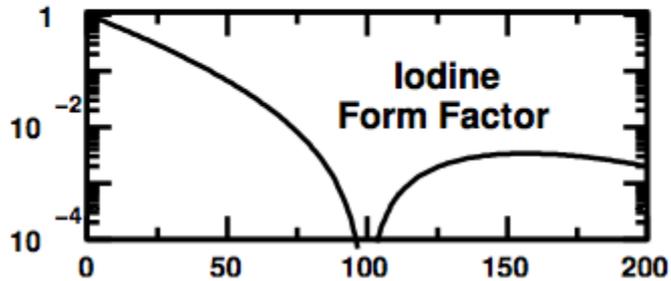
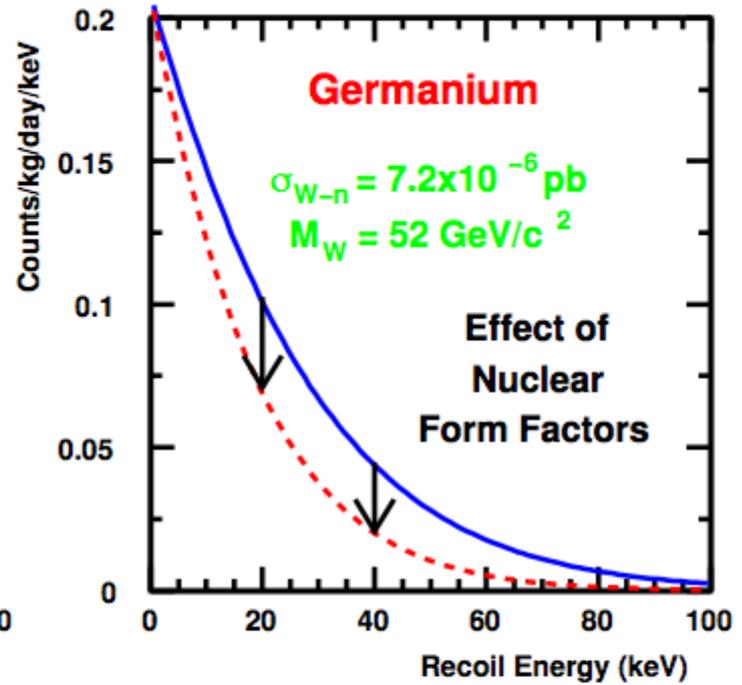
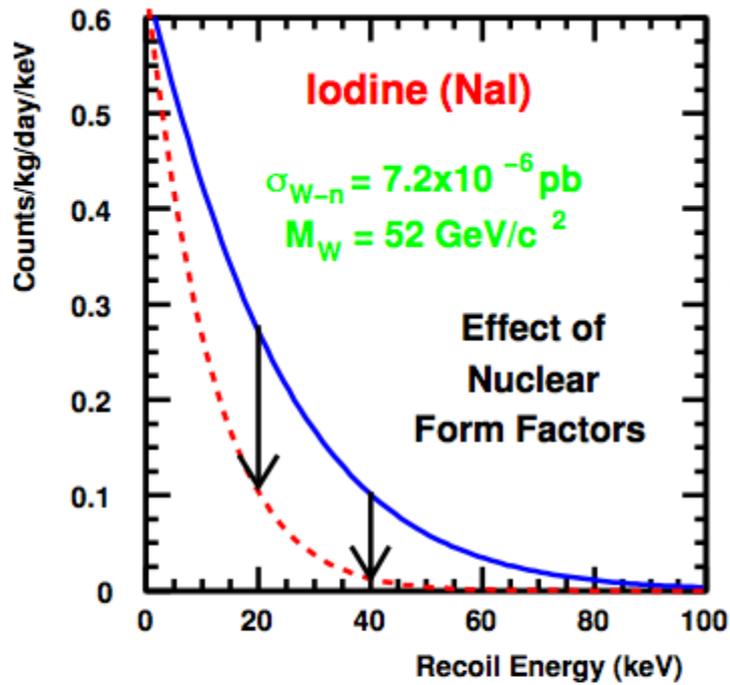
- $\sigma \propto (\text{mass})^2$
- Coherent sum of scattering amplitude on each nucleon
- Huge gain relative to spin-dependent terms for $A > \sim 20$

■ Nuclear form factor $F^2(E_{\text{recoil}})$:

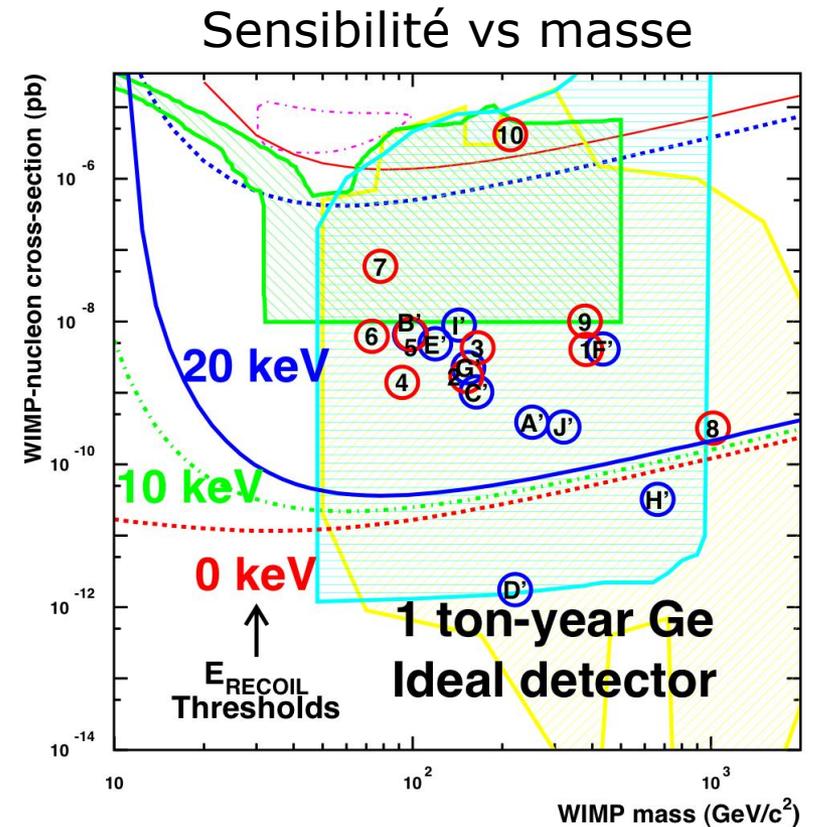
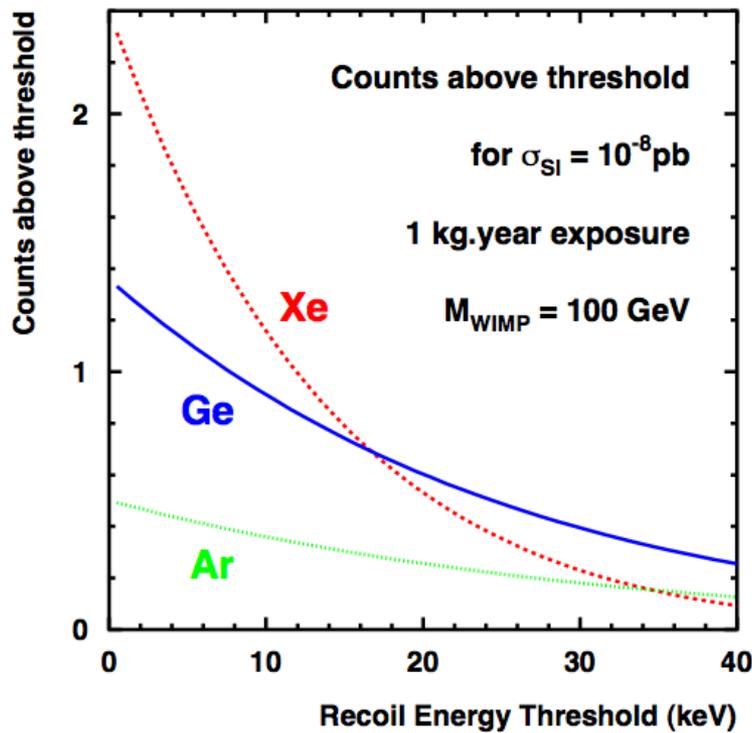
- Coherent scattering reduced by diffraction effects if transferred momentum $\sim \hbar/R$, R = nuclear radius.

■ Rates scales as $\mu_A^2 A^2 F^2(E_{\text{recoil}})$

Facteur de forme nucléaire

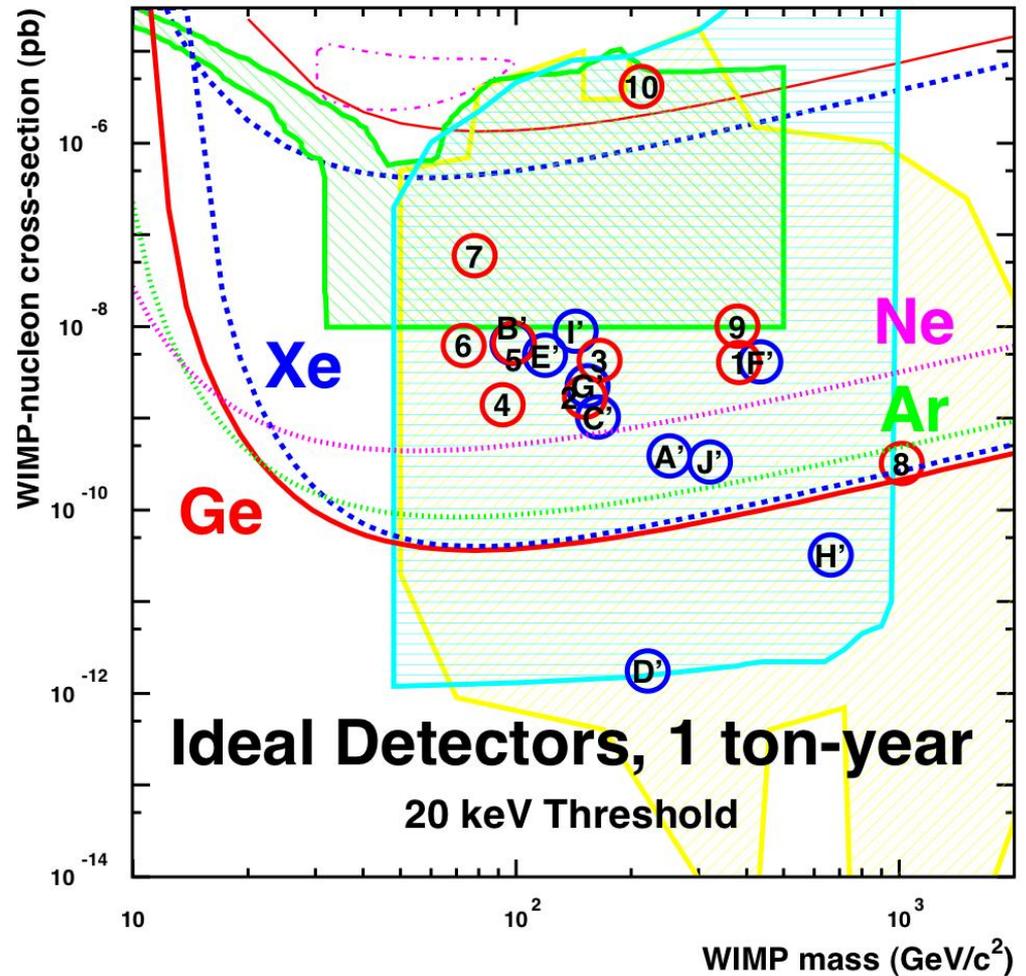


- Le taux de comptage dépend du seuil en énergie du détecteur
- Cet effet dépend de la masse du WIMP



Choix de masse de la cible

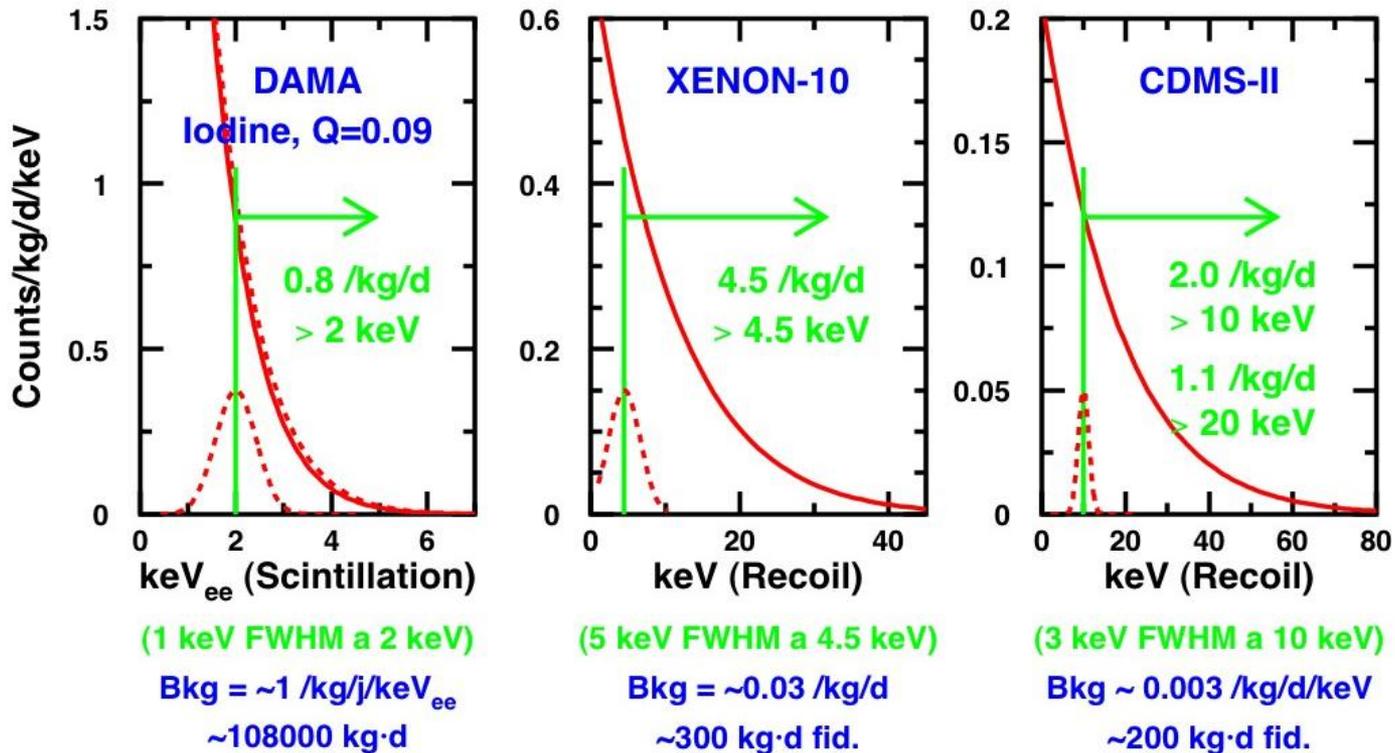
- Coherence favors large atomic masses A
- ... until form factor takes its bite
- Thresholds may vary
- $A > \sim 40$ is ok
- Lower A is ok if detector size is ok
- **Variety of targets essential to check A dependency and systematics control**



Spectres dans les détecteurs

- Taux dépend du noyau et du seuil
- Sensibilité dépend aussi du bruit de fond
- Résolution en énergie intéressante pour interpréter un éventuel signal

Response for $M_W=52 \text{ GeV}$, $\sigma_n=7.2 \times 10^{-6} \text{ pb}$



Summary of ingredients (1)

First three ingredients usually taken from the Lewin and Smith's prescriptions for comparing experiments.

- ρ_W , WIMP density in the laboratory
 - Galaxy rotation curves suggests $\sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3$
 - Observed rate $\propto \sigma_n \times \rho_W$
- $f(v)$, WIMP velocity distribution
 - Dependence on average v_{rms} , not much on $f(v)$ details (except: modulation)
 - Adopted reference: Isothermal halo, $v_{\text{rms}} = 270 \text{ km/s}$, $v_{\text{escape}} \sim 544 \text{ km/s}$, +sun and earth velocities.
- σ_A/σ_n , nucleon-to-nucleus scaling of scattering cross-section
 - Nuclear form factors matter (from ~ 0.2 to 1).
 - $A^2 \mu^2$ scaling (spin-indep. case) dominates for $A > 30$ in MSSM.
 - $A < 30$, non-MSSM WIMPs: spin-dependent may dominate. No large gains from scaling, more model-dependence, poor rates.

Summary of ingredients (2)

- Last two ingredients usually left as free parameters of the searches:
- M_W , WIMP mass
 - Taken from SuperSymmetric (or other) Model prediction
 - Method works from $10 \text{ GeV}/c^2$ to $>10 \text{ TeV}/c^2$
 - Typical SUSY range: from $50 \text{ GeV}/c^2$ to $1 \text{ TeV}/c^2$
- σ_n , WIMP-nucleon cross-section
 - Taken from SuperSymmetric (or other) prediction
 - Method *could maybe* work down to 10^{-11} pb
 - Typical SUSY range: 10^{-6} to 10^{-11} pb (kg.day \rightarrow ton.year)
- Generic search: test all values of (M_W, σ_n)

Quick rate calculation

- Rate calculation per 1 kg Germanium target ($A(\text{Ge}) = 0.073 \text{ kg/mol}$, $N_A = 6 \times 10^{23} \text{ atoms/mol}$)

$$N_{\text{target}}/\text{kg} = N_A/A = 8 \times 10^{24} \text{ atoms/kg}$$

- Recall:

- WIMP local density $\rho \sim 3000/\text{m}^3 = 3 \times 10^{-3}/\text{cm}^3$

- WIMP velocity $v \sim 200 \text{ km/s} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$

- WIMP flux $\phi = \rho v \sim 6 \times 10^4 \text{ WIMP/cm}^2/\text{s}$ ($5 \times 10^9 \text{ /cm}^2/\text{day}$)

- for $\sigma_A = 10^{-6} \text{ pb}$, let's calculate $\phi \sigma_A N_{\text{target}}$

$$R = 5 \times 10^9 \text{ /cm}^2/\text{day} \times (10^{-6} \times 10^{-12} \times 10^{-24} \text{ cm}^2) \times (8 \times 10^{24} \text{ /kg})$$

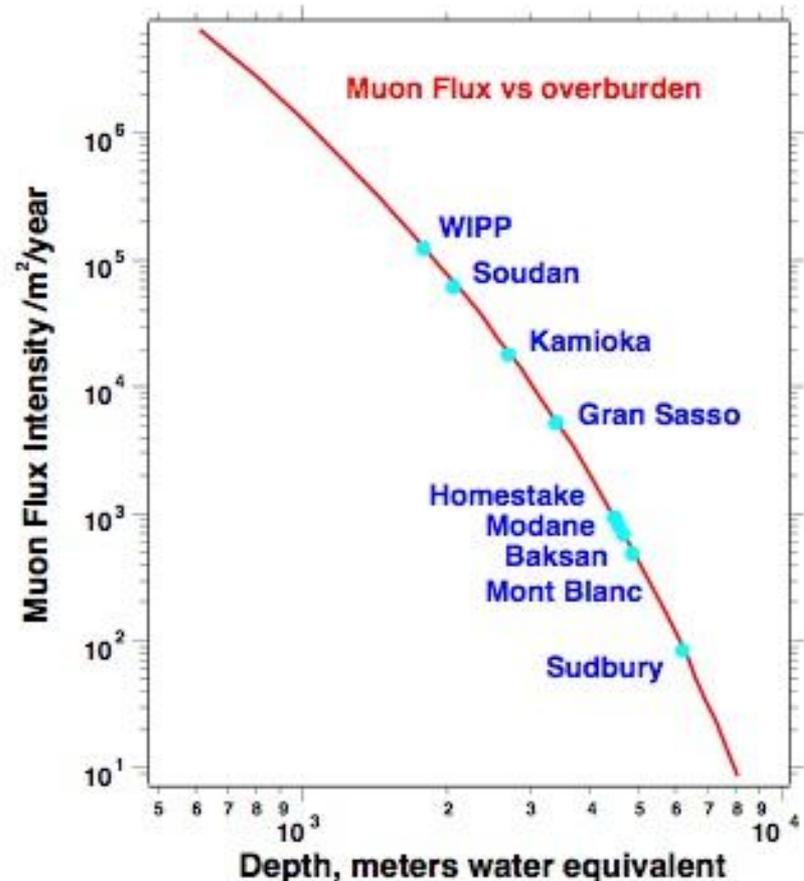
$$R = 4 \times 10^{-4} \text{ collision/kg/day}$$

- ... with $\mu^2 A^2$ enhancement: $R = 0.4 \text{ collision/kg/day}$

Le fond radioactif (1): cosmiques

- La moitié du fond radioactif dans notre corps ($\sim 10^7$ réactions + désintégrations /kg/jour) provient des rayons cosmiques

- **Material selection**
- **Cosmic activation:**
Underground site
- γ radiation from rock:
Lead+Copper shields
- **Neutron radiation from rock:**
Polyethylene/water shields
- **Cosmogenic neutron bkg:**
Avoid Lead shields!
- **Radioactive dust:**
Clean room; increase air flow
- **Radon in air:**
Age air, decrease air flow!



Fond radioactif (2): chaînes Uranium et Thorium

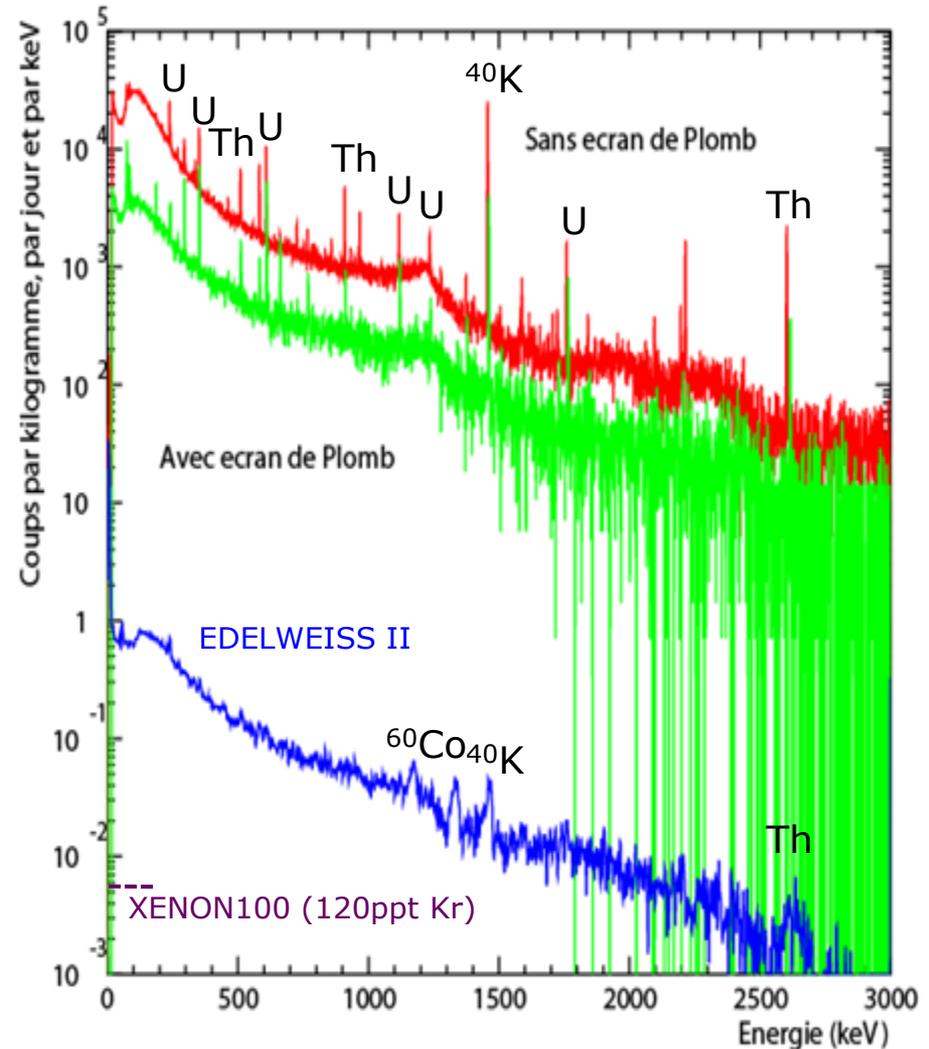
- Une des radioactivités naturelles les plus répandues

^{238}U : $T_{1/2} = 4.5 \times 10^9$ années ^{232}Th : $T_{1/2} = 14 \times 10^9$ années

- Rapport 10^{-6} :1 dans roche commune
 - Roche « normale » = Equivalent à 10^6 désintégrations / kg / jour
- Chaîne de désintégration jusqu'aux noyaux ^{206}Pb and ^{208}Pb , respectivement
 - Multiplie par ~ 10 l'activité une fois la chaîne en équilibre
- Emetteurs alpha et béta
 - Parcours moyens: Alpha = 20 microns, Béta < 1 mm
- Les chaînes passent par le gaz *Radon*
 - *S'échappe dans l'air à la vitesse du son! Dépose des atomes de plomb radioactifs ^{210}Pb , jusqu'à une profondeur ~ 20 nm, difficile à éliminer (Période = 22 ans, diffusion à l'intérieur des solides)!*

Exemple de fond gamma dans un germanium

- Rouge: fond en surface (salle TP M1 de physique Lyon1)
- Vert: écran ~ 5 cm de plomb, réduction $\times \sim 10$
- Bleu: fond EDELWEISS-II au LSM, avant identification des reculs nucléaires.
Réduction 3×10^4 à ~ 50 keV
[Thèse S. Scorza, 2009]
- Réduction $> 10^4$ après rejet gamma, besoin de 10^6 dans le futur



Plomb archéologique

- Le plomb est un des écrans anti-gamma les plus dense et économiques (Z élevé, 11 g/cm^3)
- ^{210}Pb (Période 22 ans) chimiquement identique au plomb stable: pollution qui survit à tout raffinage

- Intérêt du plomb archéologique (... qui se refroidit bien à 15 mK: EDWII)

Épave de Ploumanach,
IV^{ème} siècle

- *Hélas, Pb source de neutrons lorsque bombardé par muons cosmiques: écrans d'eau ~ 20 fois plus épais (2 à 3m) préférés pour projets futurs*



■ Cristaux

- Une structure cristalline parfaite aide à contrôler la pureté
- Attention aux isotopes radioactifs

■ Semiconducteurs

- Très bon contrôle de la pureté déjà réalisé en industrie (zone refining). Contamination de surface plus difficile à contrôler.

■ Liquides et Gaz nobles

- Stabilité chimique
- Purification en phase gazeuse, recirculation
- Attention aux isotopes radioactifs de l'argon et du krypton
- ~ 100 ppb Kr dans XENON100, $^{85}\text{Kr}/\text{Kr} \sim 10^{-11}$. Distillation pour $\times 10^{-3}$.
- $^{39}\text{Ar}/\text{Ar} = 8 \times 10^{-16}$ dans l'air: 6×10^4 evt/kg/jour... à réduire de 10^8 !

... que faire devant tant de bruit?

3- DISCRIMINATION DES RECVLS NUCLÉAIRES

Signaux en recherche directe

- Spectre en énergie exponentiel (seuils bas requis)
- Dépendance en A^3 du taux par kg de cible
- Pas de coïncidences entre deux détecteurs
 - Séparation en modules?
- Taux uniforme sur tout le volume du détecteur
 - Auto-écranage dans un gros détecteur, volume fiduciel
- Modulation annuelle (plus de 10^4 evts WIMP requis!)
- **Identification de reculs nucléaires (plutôt qu'électroniques):**
 - Permet de rejeter une grande part des 10^{10} coups de fond par kg et par an qui doivent être supprimés
 - caveat: la diffusion de neutrons produit également des reculs nucléaires, et devient un fond important une fois le fond gamma maîtrisé

Quel détecteur choisir?

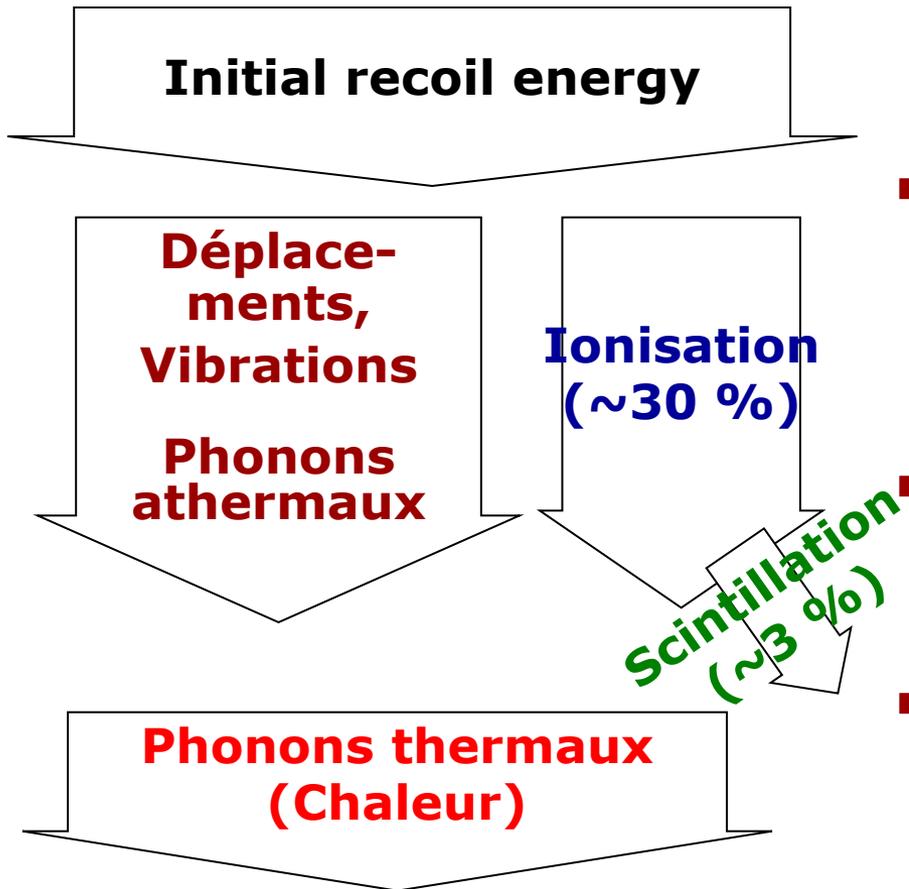
- En principe, tous peuvent fonctionner...
- Comparer au moins deux types (contrôle des systématiques, dépendance en A^2)
- Les problèmes les plus sérieux sont les fonds:

Les fonds radioactifs

La moindre imperfection du détecteur

- Très fortes contraintes sur la faible radioactivité
- La prédiction du signal – pour un modèle donné – est souvent plus précise que les prédictions des fonds et des imperfections
 - Queues de distributions de fonds jamais vus à d'aussi bas niveaux
 - Dès qu'un fond est compris, il est plus productif de concevoir un nouveau détecteur sans ce fond que de le soustraire des données
 - Limites calculées en utilisant Yellin plutôt que Feldman-Cousins

Discrimination des reculs nucléaires et électroniques



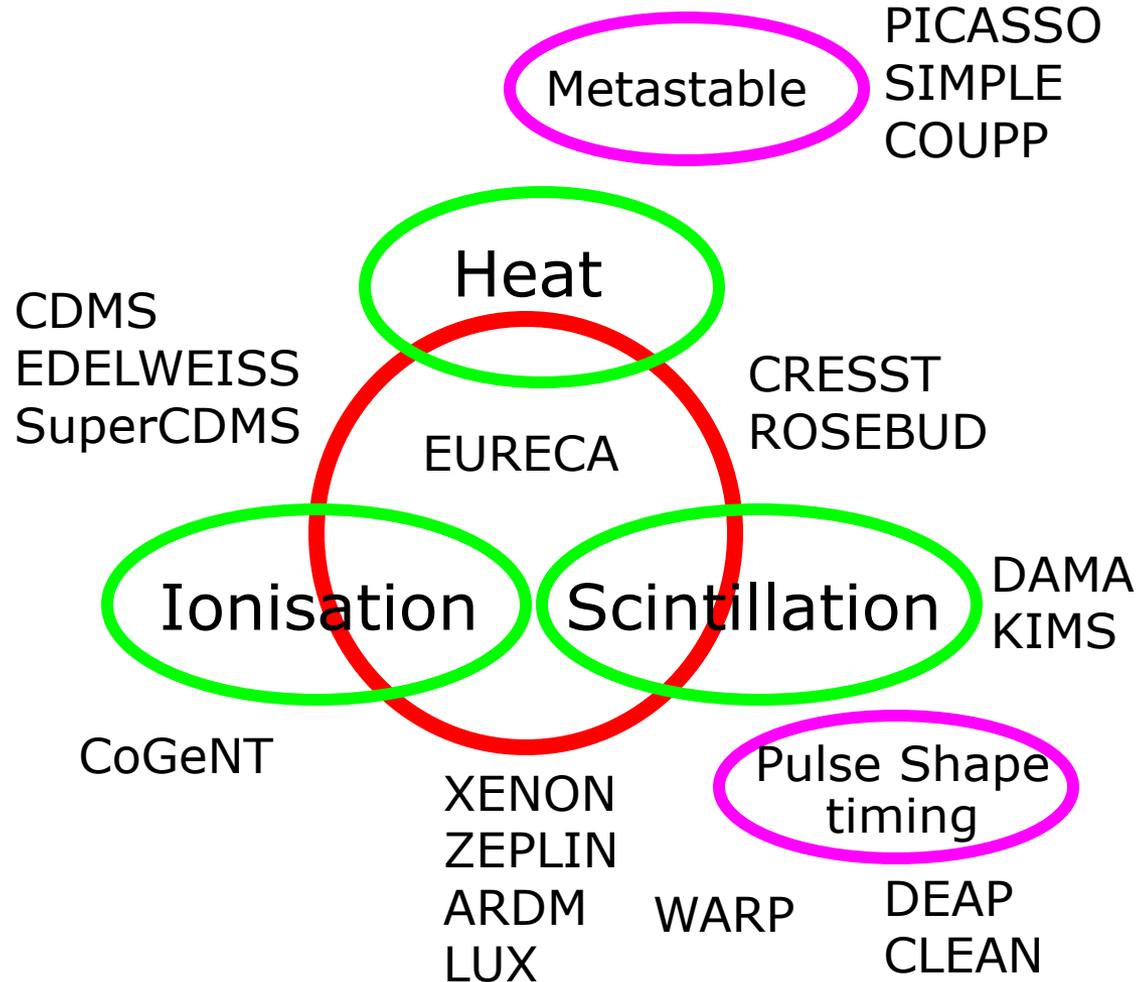
- Différence de dE/dx entre électrons et ions de recul (excitation matrice cristalline)
- Rendement en ionisation et en scintillation dépend du recul (électron ou ion)
- Chaleur (phonon): mesure précise et inclusive de toute forme d'énergie
- Mesure simultanée de deux signaux pour extraire:
 - Énergie totale
 - Rendement ion. ou scint.

(+ Pièges, + Défauts cristallins permanent?)

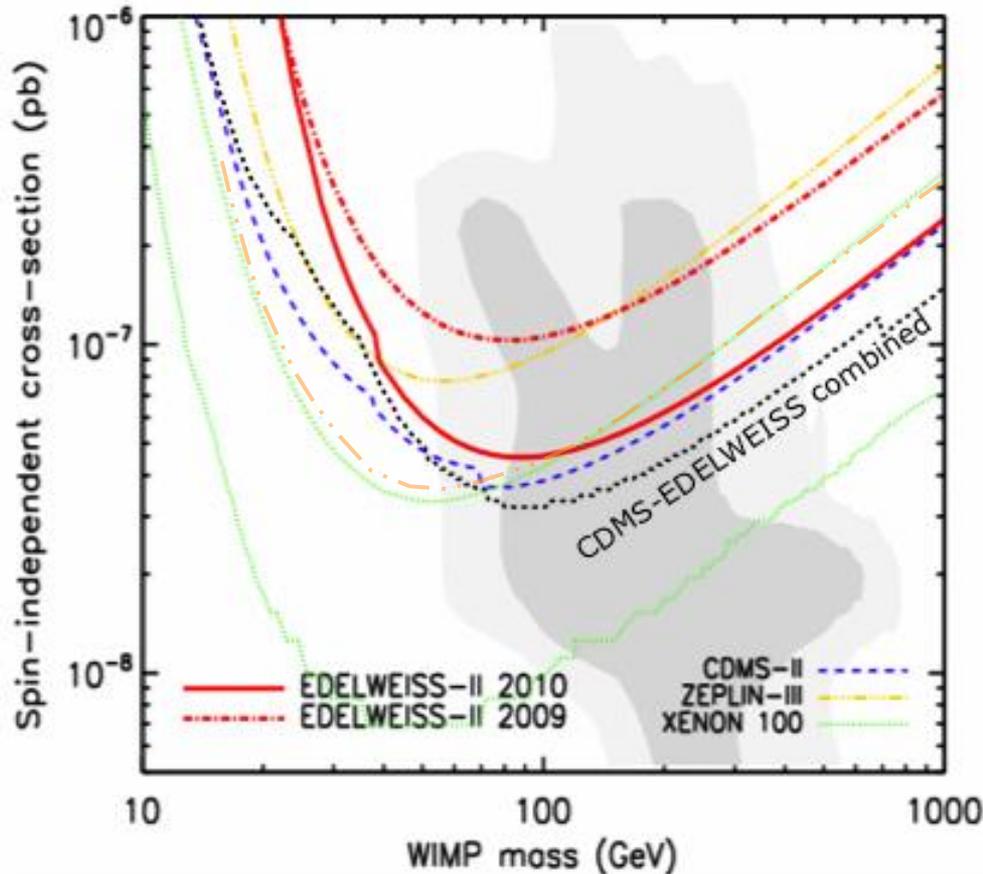
Techniques de détection

γ , β discrimination:

- Two simultaneous signals
 - Heat/Phonon
 - Ionisation
 - Scintillation
- Pulse shape discrimination
 - Noble gas/liq.
 - Cristal
- Other “dE/dx” related ideas

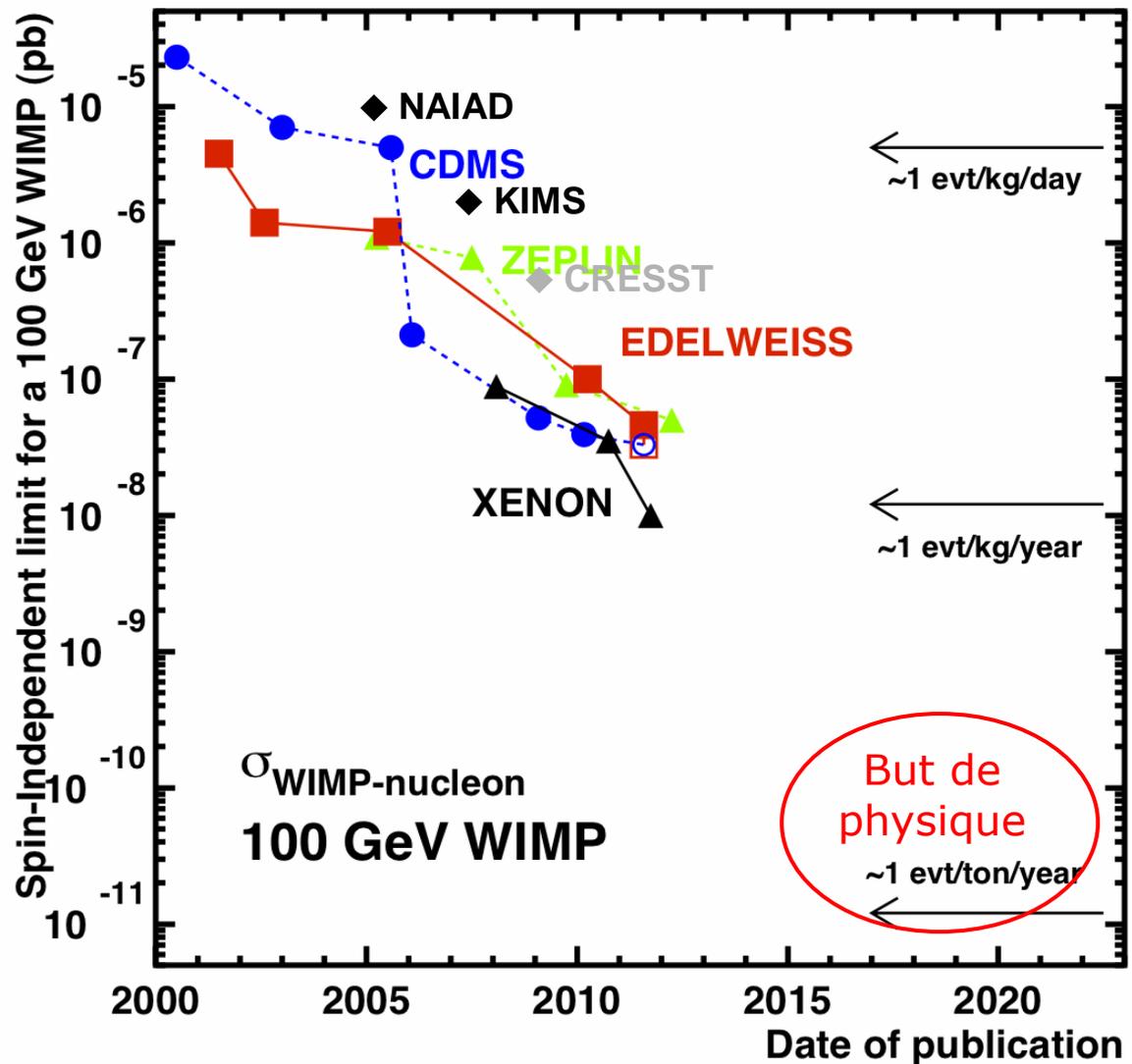


Leading spin-independent searches



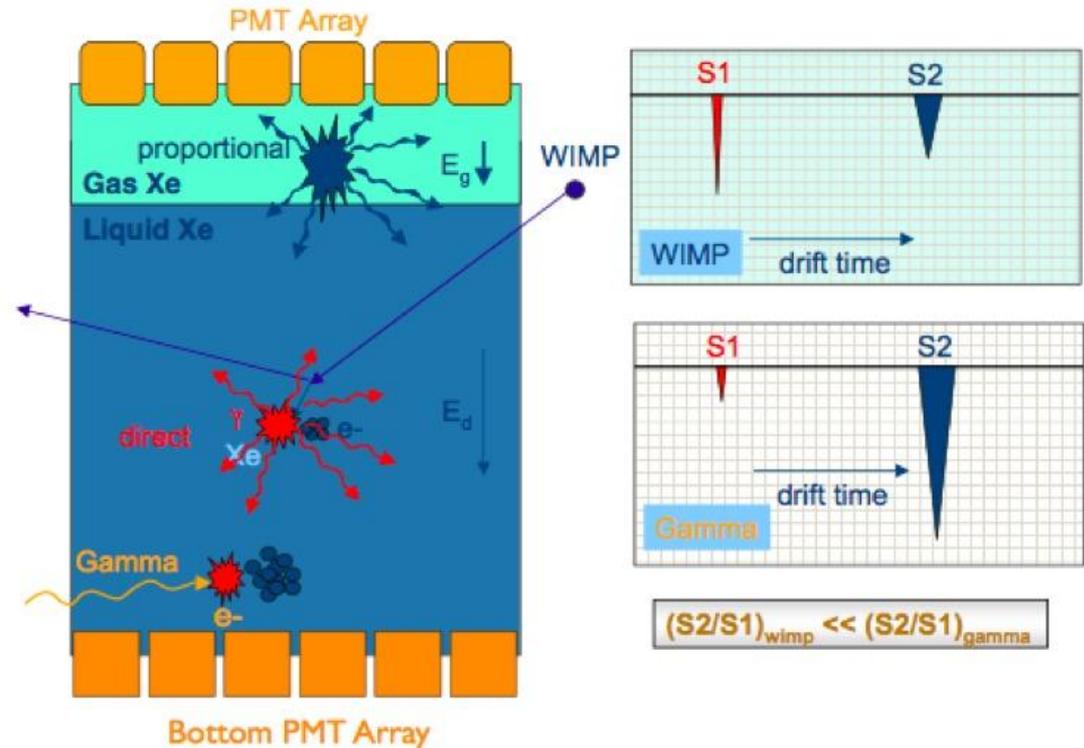
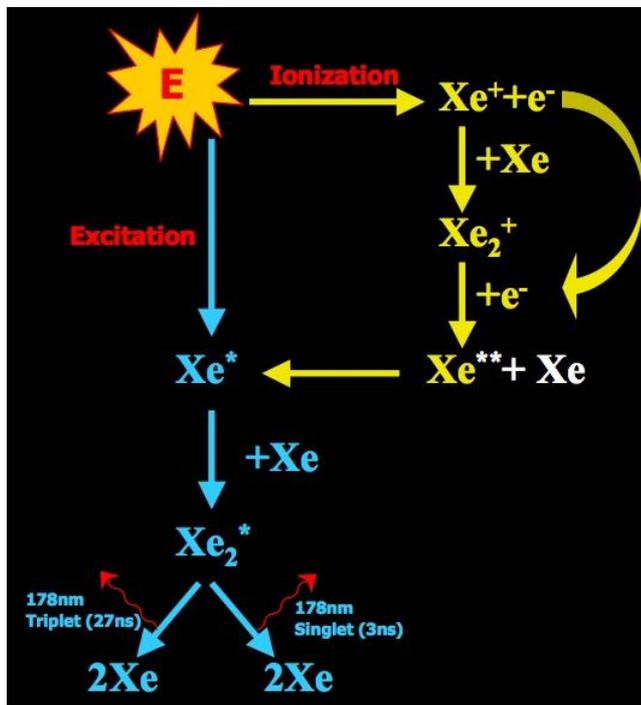
- Most sensitive expts use different technologies
- Xenon-100 (~ 1500 kgd), ZEPLIN (1344 kgd):
Liquid xenon ionisation+scintillation
- CDMS: Ge
Phonon+Ionisation 379 kgd
- EDELWEISS: Ge
Heat+Ionisation 384 kgd
- CRESST-II: CaWO_4
Heat+Scintillation

Résultats spin-independent (publiés) récents

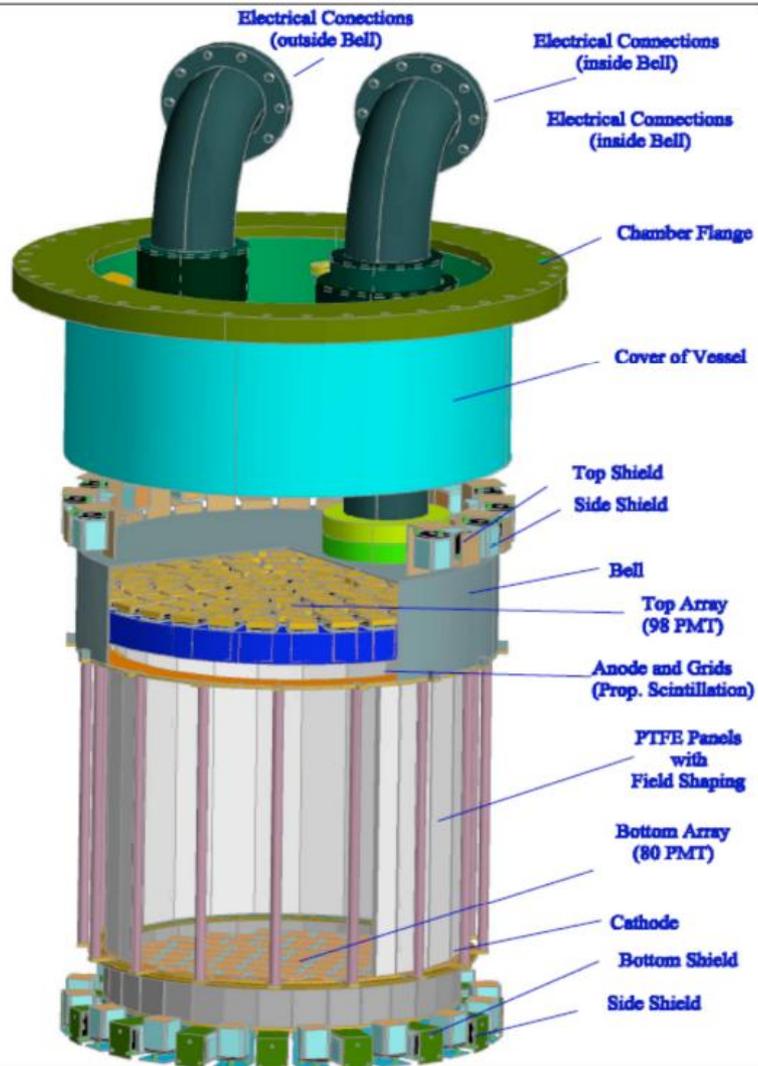


La compétition: XENON

- Different scintillation (S1) and ionisation (S2) yields for nuclear / electronic recoils
- PMT array for (x,y), drift time for z : fiducial volume
- **Xenon 100**: 170 kg LXe, 40 kg fiducial, 30 cm drift, 98(top)+80(bottom) PM's
- *Trigger on 3 PM coincidence: bad energy resolution, but excellent noise suppression*
- 10 keV nuclear recoil: **S1 ~ 5 P.E.** **S2 ~ 800 P.E.**

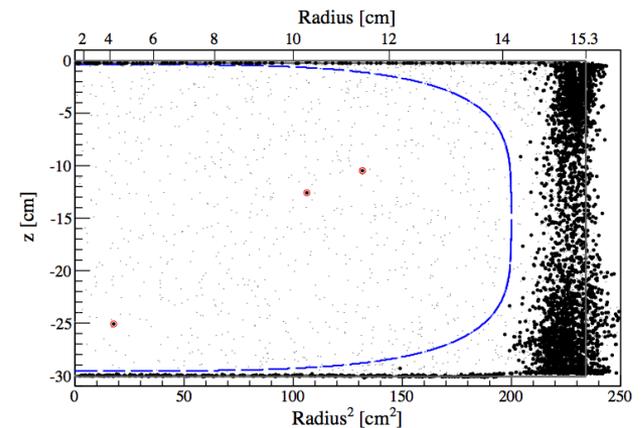
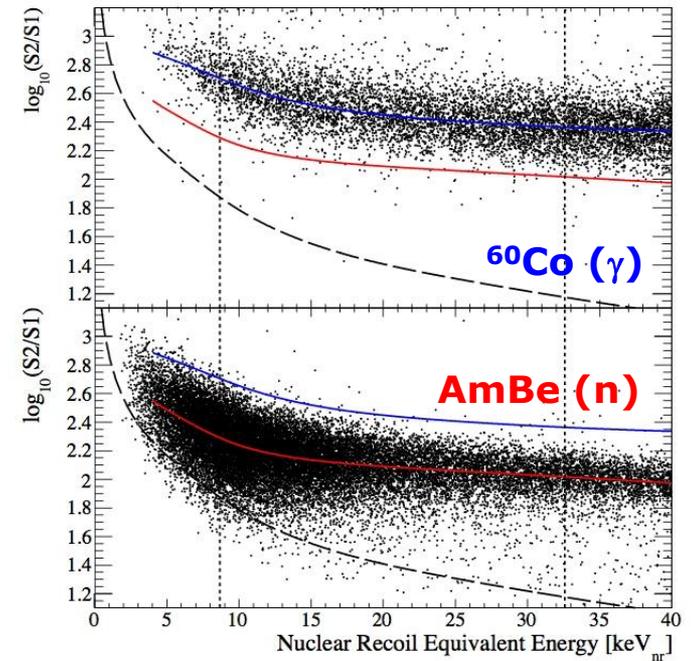
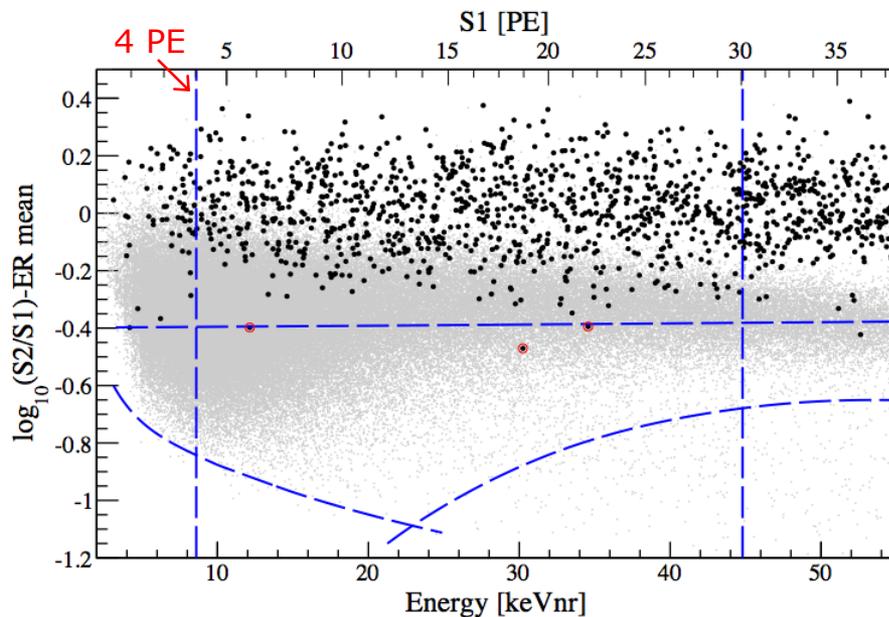


XENON100: The TPC Assembly

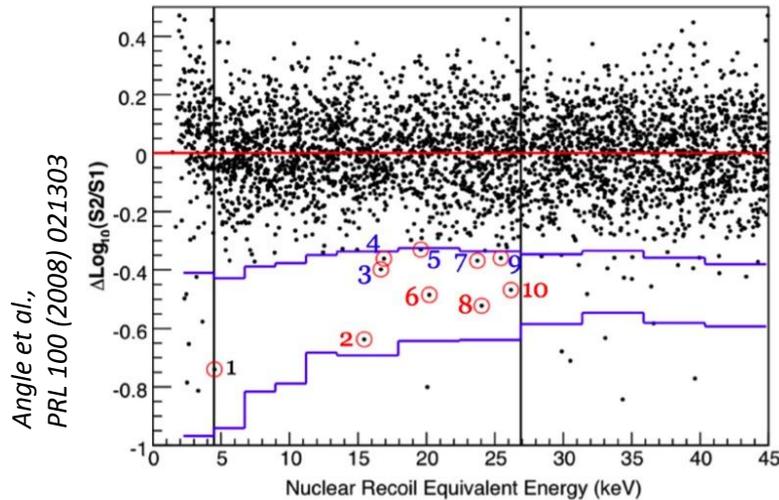


XENON-100 Discrimination

- 100 kg Xe, 40kg fiduciel
- ~ 1500 kg.jour équivalent
- Observent 3 evts, compatible avec fond attendu provenant de g non rejeté issus du ^{85}Kr (0.7 ppb, $T_{1/2}=12$ yrs)
- Résultats avec meilleure purification à venir

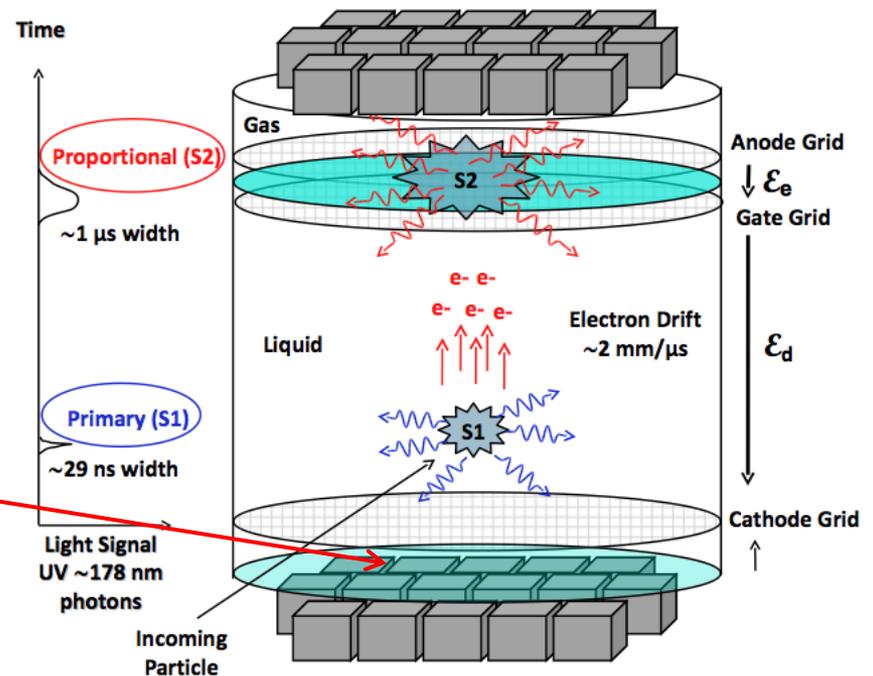


Ex. de correction d'imperfectionw: XENON10->100



XENON-10:
59 d x 5.4 kgfid
10 NR evts

- XENON-10 était entre autres limité par un fond suspecté de provenir de Compton dont une des interaction est dans la zone sans collecte de charge entre les PMs inférieurs et la grille cathode
- Coupures dans XENON-10
- Reduction relative de la taille de cette zone dans XENON-100



- XENON 1t: projet en préparation. *Réduction du fond radioactif (cryostat, PM, purification).*
- LUX (Homestake): 300 kg
- XMASS (Kamioka): 100 kg + 642 PMs. Monophasé, rejet de fond que par fiducialisation. En cours: besoin d'étudier et d'améliorer le fond.
- DEAP-CLEAN (SNOLAB): 100 kg Ar, *besoin d'un rejet 10^8 du fond radioactif ^{39}Ar (pulse shape discr., $\tau = 1.6 \mu\text{s}$)*
- DarkSide-50: 33 kg fiduciel Ar, *déplété en ^{39}Kr (source souterraine, déplétion 10^{-2} à 10^{-3})*

dEdx discrimination: Picasso detectors (Canada)

- Derives from a neutron dosimeter technique
- Tiny (200 μm) liquid droplets of freon suspended in a gel as active material.
- The droplets are kept in a superheated state.
- When a WIMP hits the droplet the freon changes phase to a gaseous bubble.
- Shock wave that is detected by a piezo-electric sensor
- Temperature adjusted so that α dE/dx can't burst droplets
- Further α discrimination using audio pulse shape

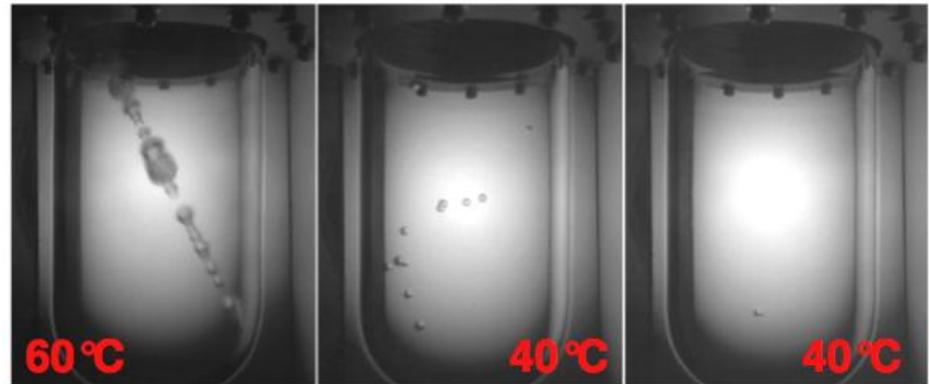
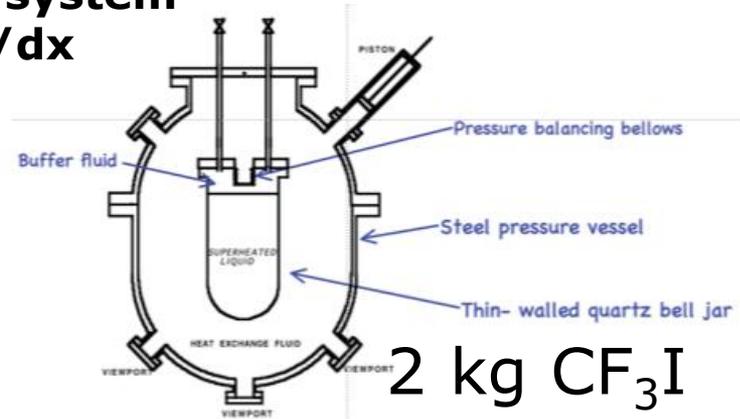


Discrimination « dE/dx »: COUPP

Bubble formation in metastable system triggered by large+localized dE/dx



Andrew Sonnenschein guides the vessel into place in the pressure chamber



muon

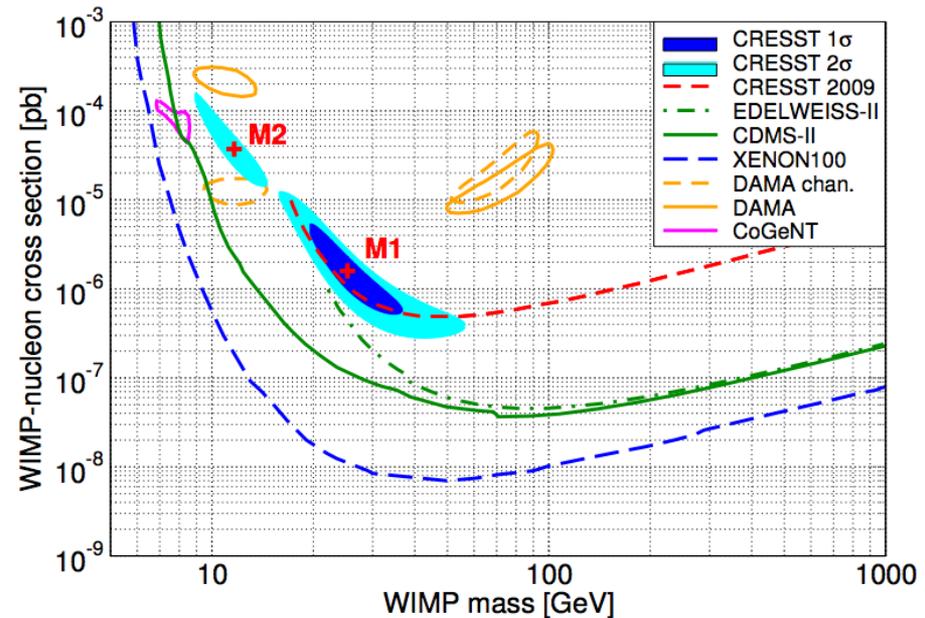
Neutron(s)

WIMP

A CCD camera takes pictures at 50 Hz. Chamber triggers on appearance of bubble in the frame.

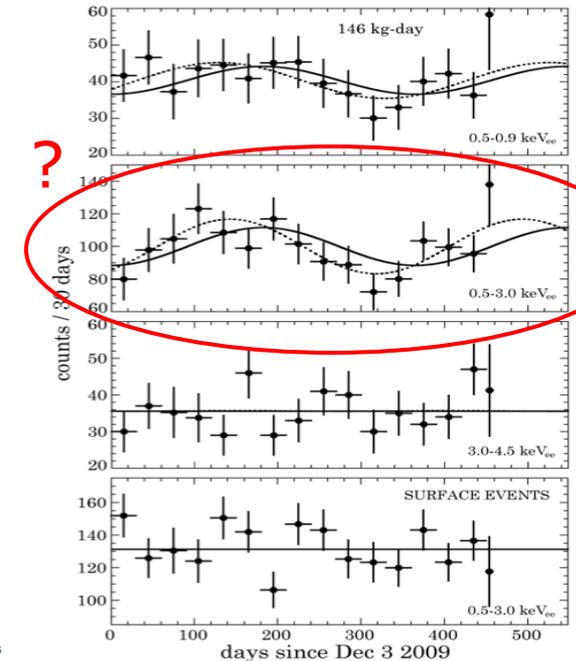
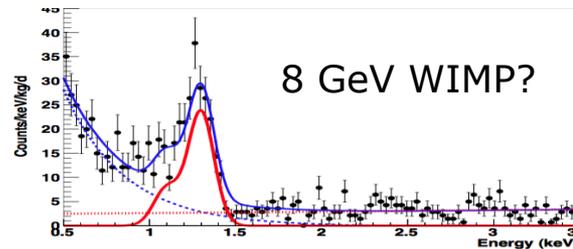
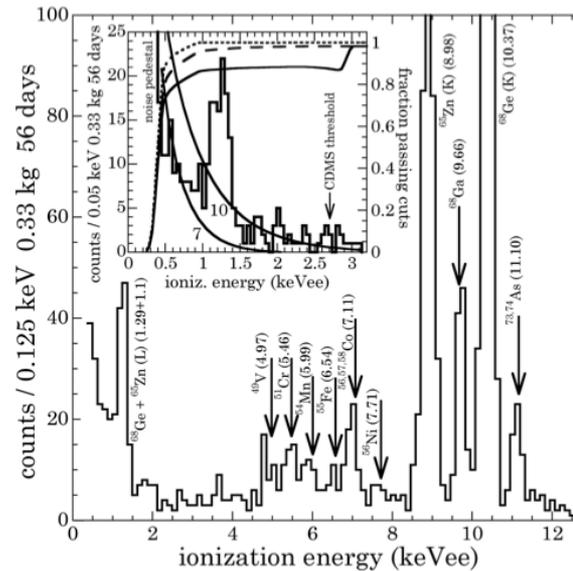
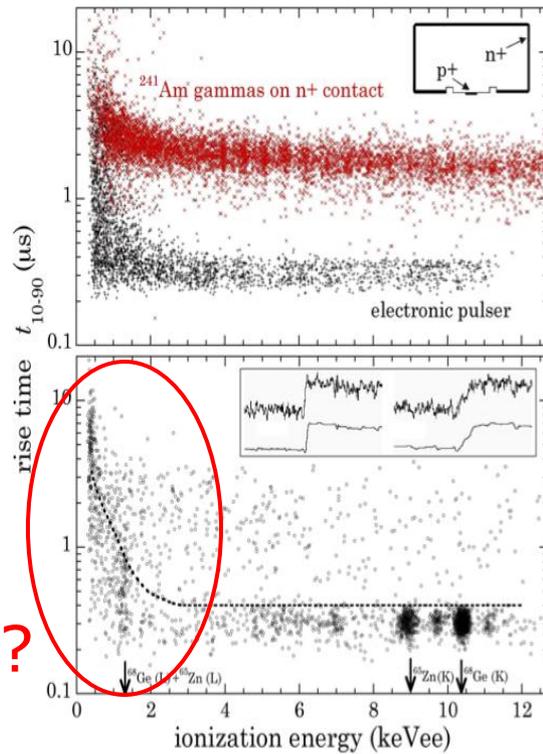
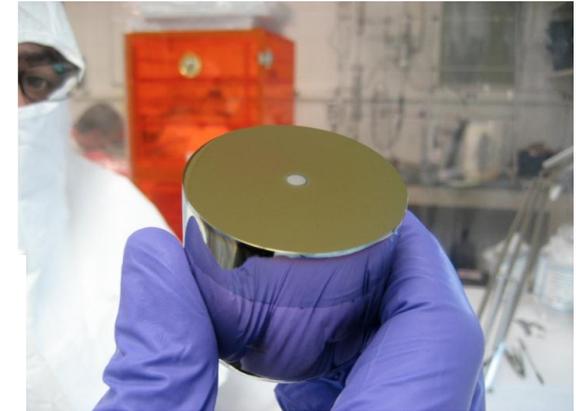
Le cas des anomalies à basse masse

- Signaux de WIMP $\sim 10 \text{ GeV}/c^2$ dans DAMA, CoGeNT et CRESST?
- Peu consistant entre eux
- Proche des seuils bas
- Peu consistant avec SUSY, LEP/LHC, flux γ FERMI des galaxies proches, etc...
- Exclu par XENON100 (à moins de sérieux problèmes de mesures de quenching Xe), et partiellement par CDMS, EDELWEISS
- *Besoin de ré-étudier les signaux à plus bas seuil qu'envisagé* (CDMS-II: 10 keV \rightarrow 2 keV, EDELWEISS-ID 20 keV \rightarrow 6 keV)



- Problème de fiabilité de rejet de surface dans CoGeNT?
- Signal/Fond (bien compris?) ~ 1 dans CRESST
- DAMA...

- 440 g Ge diode, point-contact electrode
- Arxiv 1002.4703 (Discr. temps de montée)
- Arxiv 1106.0650 (Modulation annuelle)



... les détecteurs qui amènent de la résolution

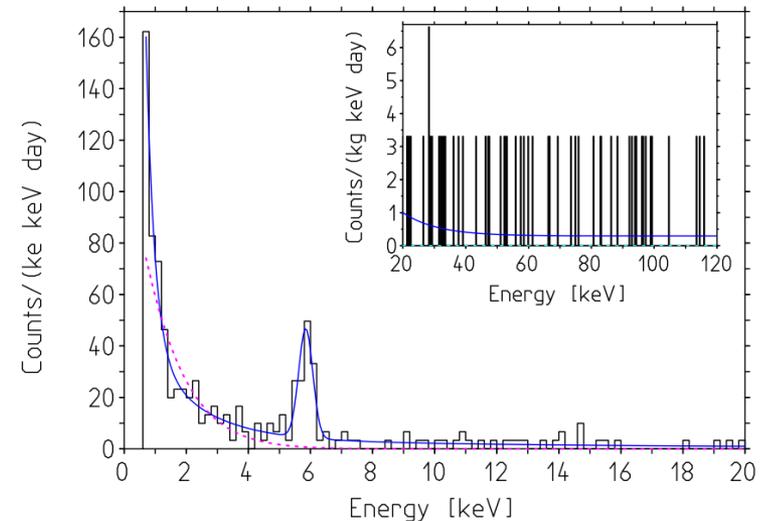
4- BOLOMÈTRES

- Résolution en énergie < 1 keV, et seuils bas

Ex.: CRESST saphir 262g

133 eV FWHM [astro-ph/0106314]

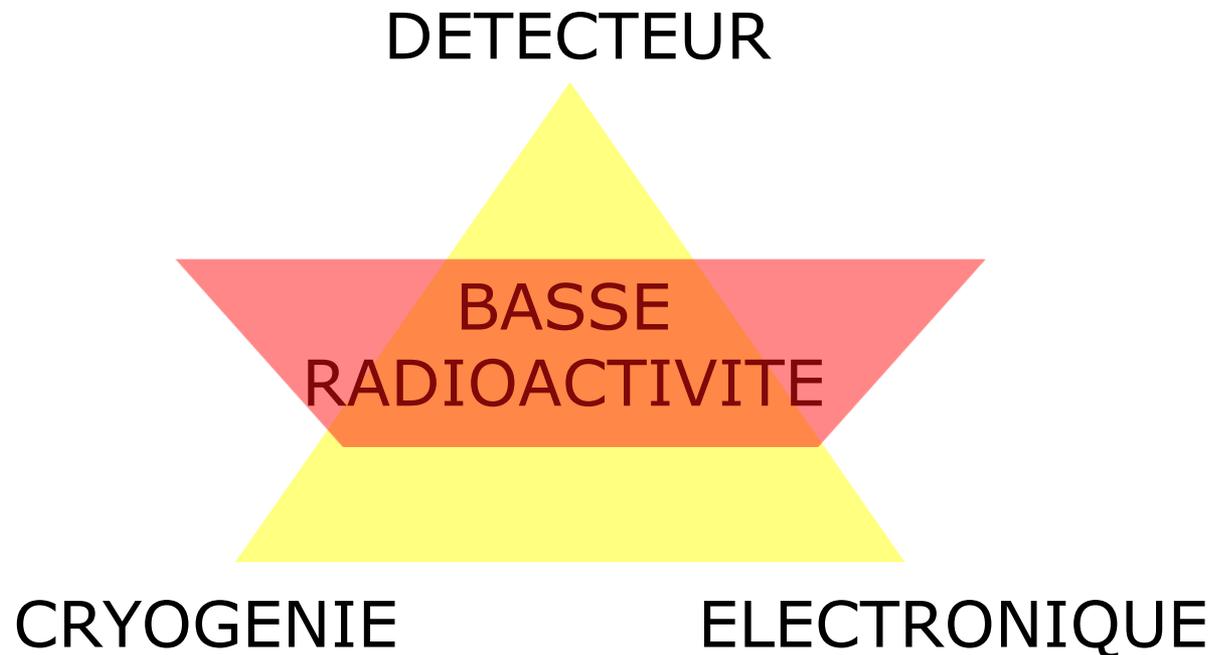
...mais chaleur seule ne suffit pas

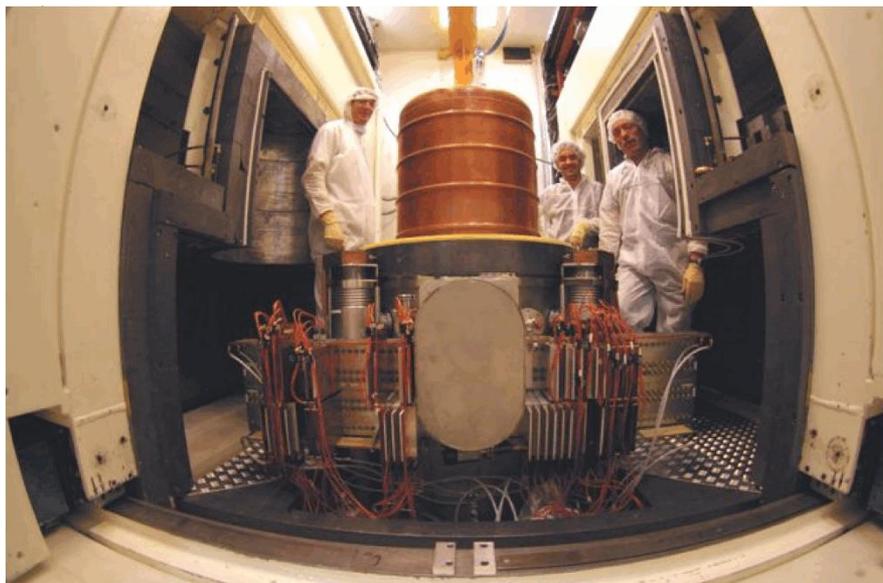


- Mesure vraie de l'énergie (vrai calorimètre!), pas dégradé par effet de surface ou de quenching
- Phonons/chaleur peut être combiné avec ionisation (Si, Ge) ou scintillation avec un grand choix de cible

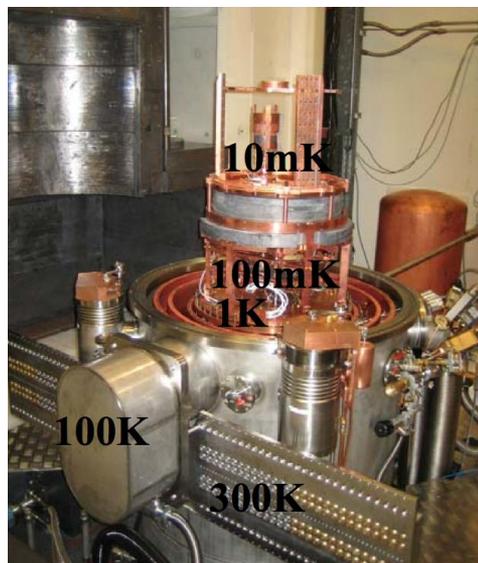
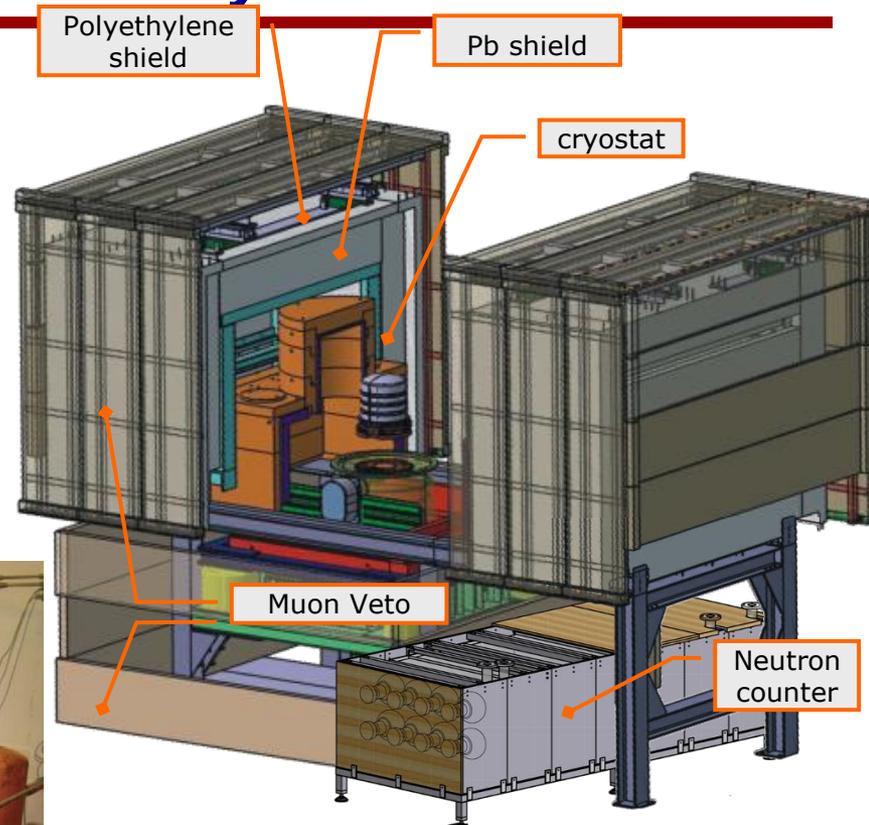
Contraintes des bolomètres pour la matière noire

1. Cryogénie nécessaire pour refroidir les détecteurs, *mais ne doit pas induire de fond radioactif*
2. Détecteurs et électronique de lecture frontale devraient être les plus intégrés que possible: *contraint par cryogénie et la radioactivité des composants*

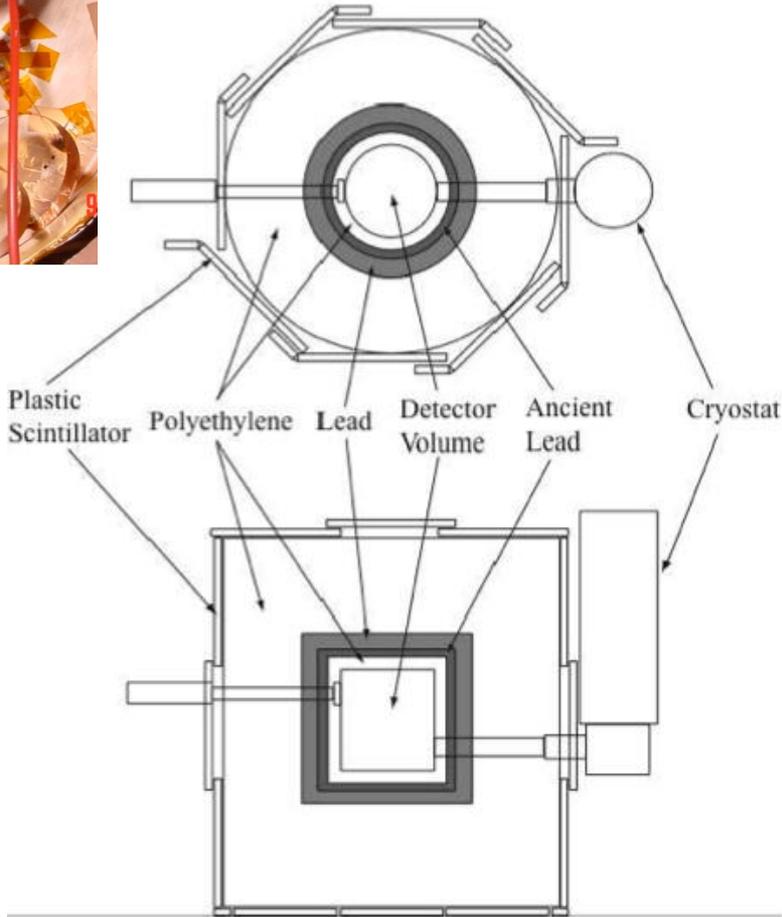
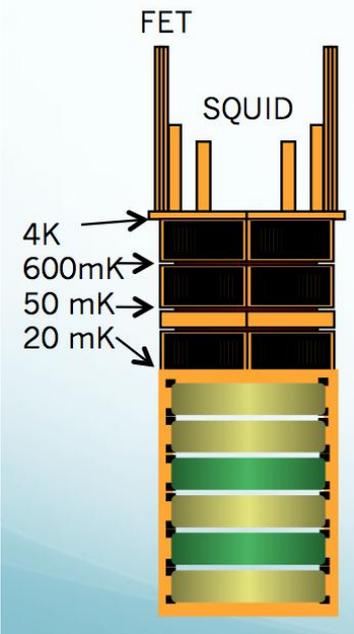
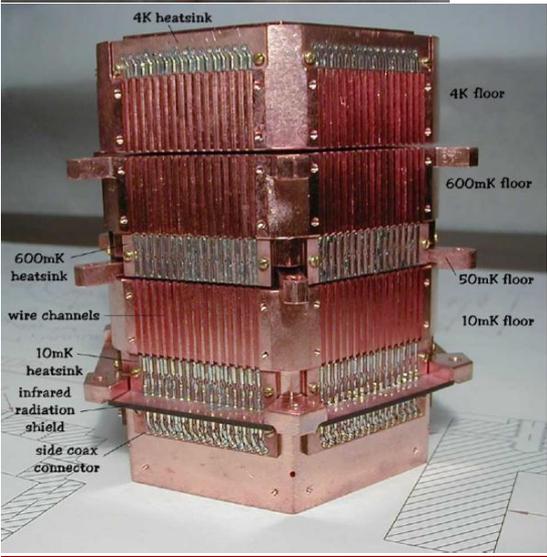
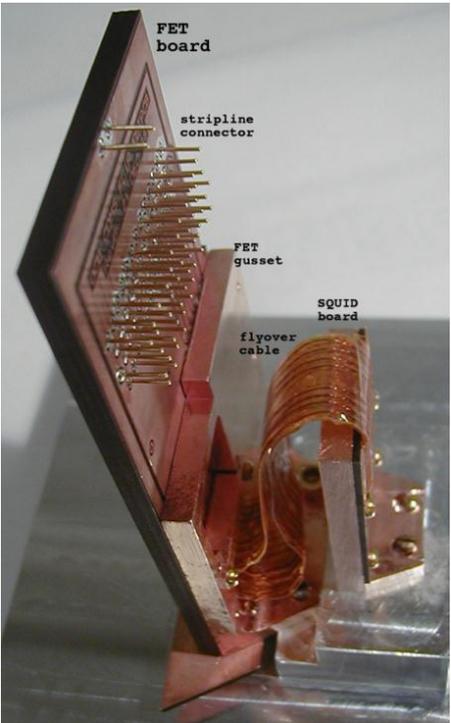




Cryostat EDELWEISS



Cryostat CDMS

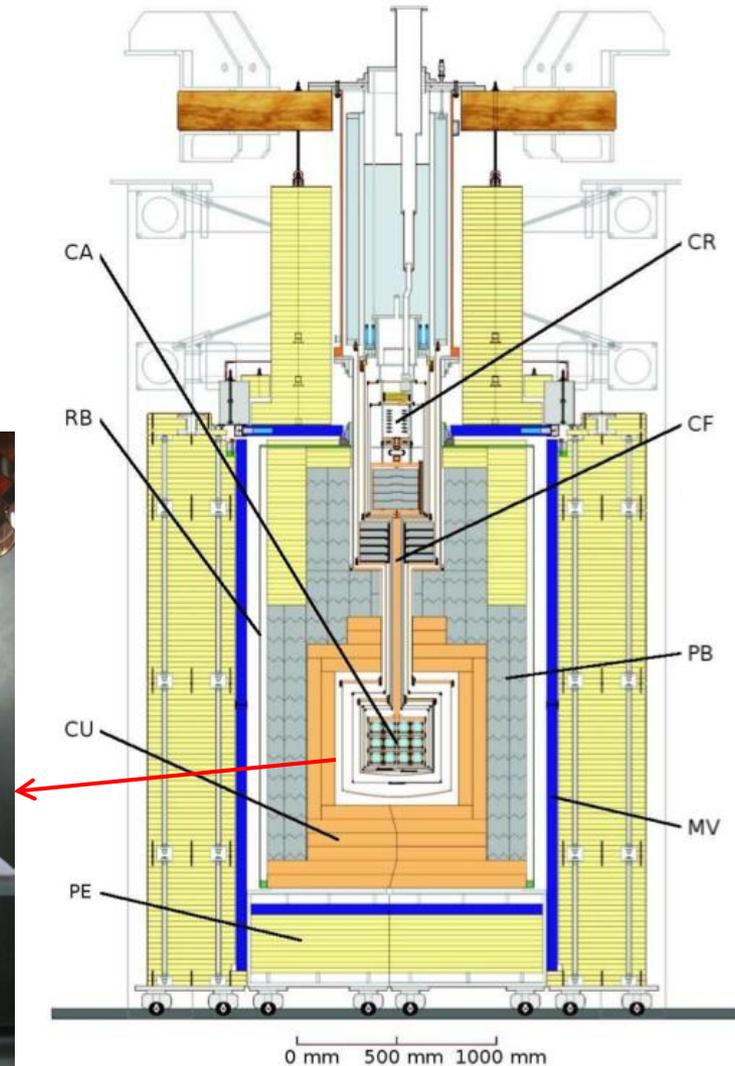
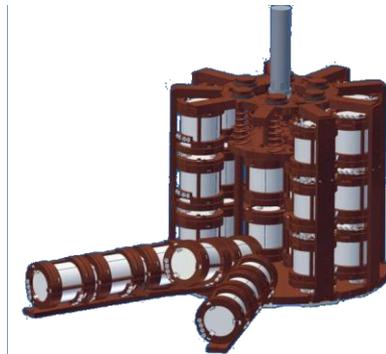
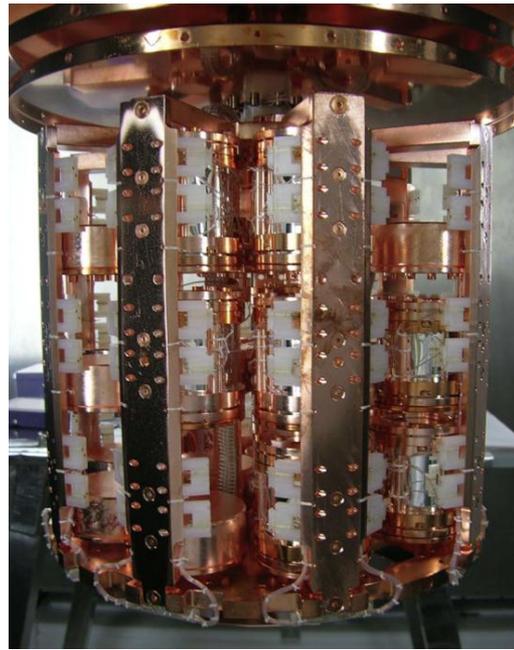


Cryostat CRESST

66 SQUID channel
readout (33
detectors)



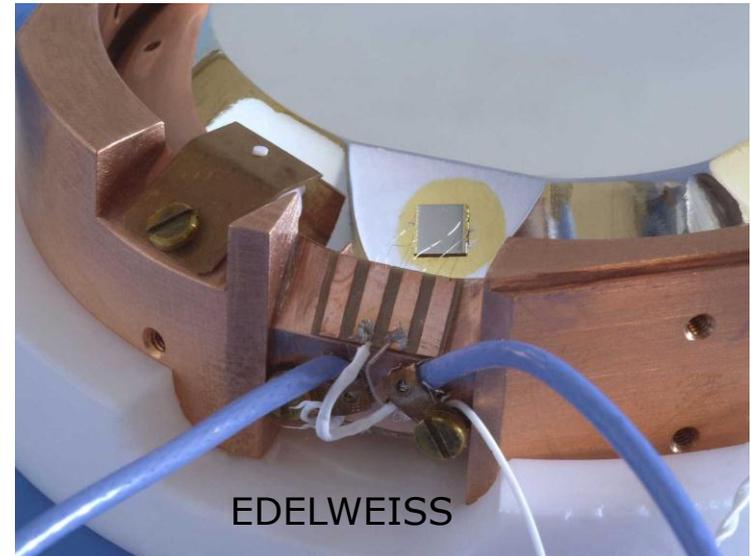
Carroussel
de détecteurs



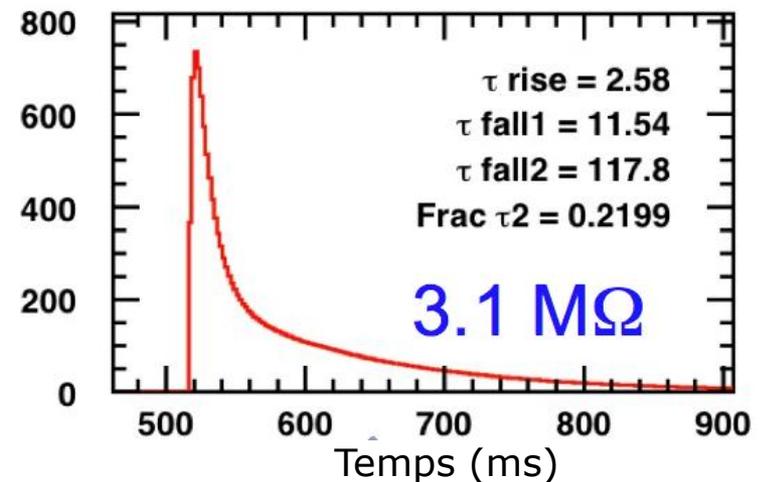
Arxiv:1109.0702

Senseurs de température: Ge-NTD

- $\Delta T = E/C$ (après thermalisation)
- Neutron-Transmutation Doped Ge crystal (quelques mm³):
 $R(T) = R_0 \exp[(T_0/T)^{1/2}]$
- Utilisé par EDELWEISS, ROSEBUD
- Mesure de haute impédance (1-10 M Ω)
- Excitation de courant constant, mesure de tension
- Montée \sim ms, descente \sim 100 ms

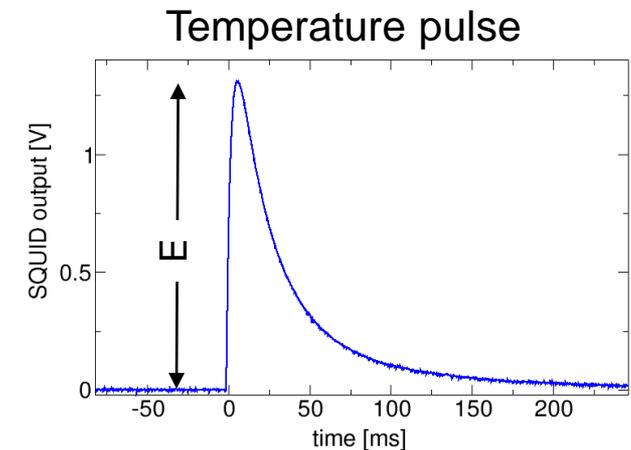
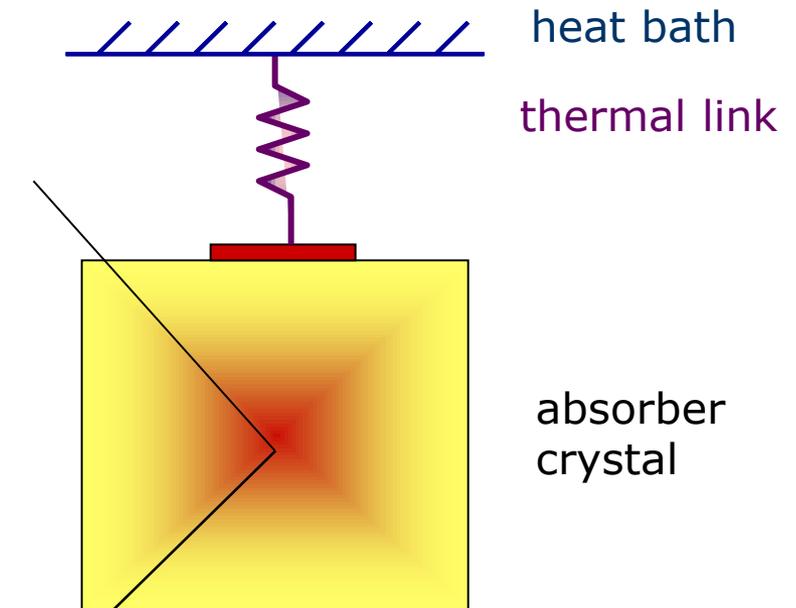
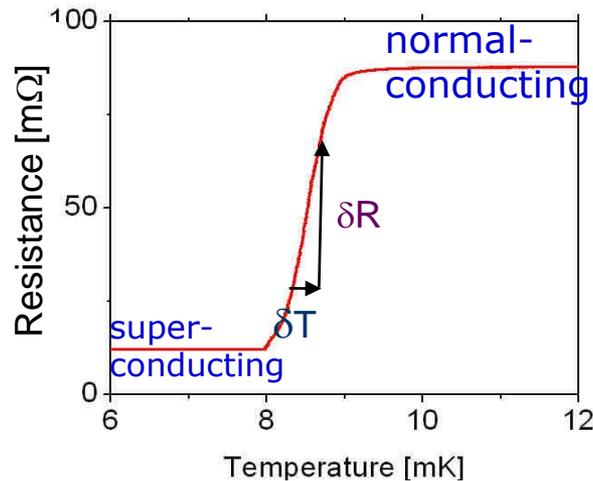


Pulse chaleur Ge-NTD
EDELWEISS



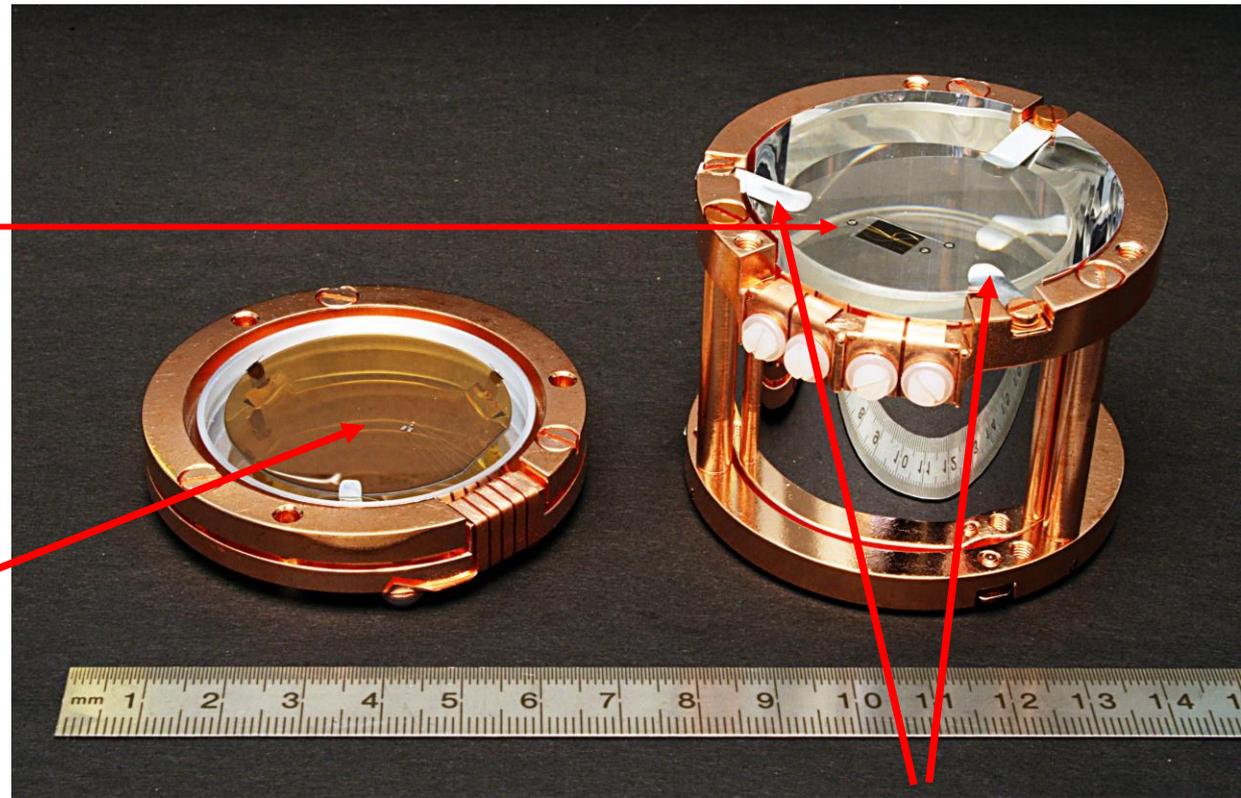
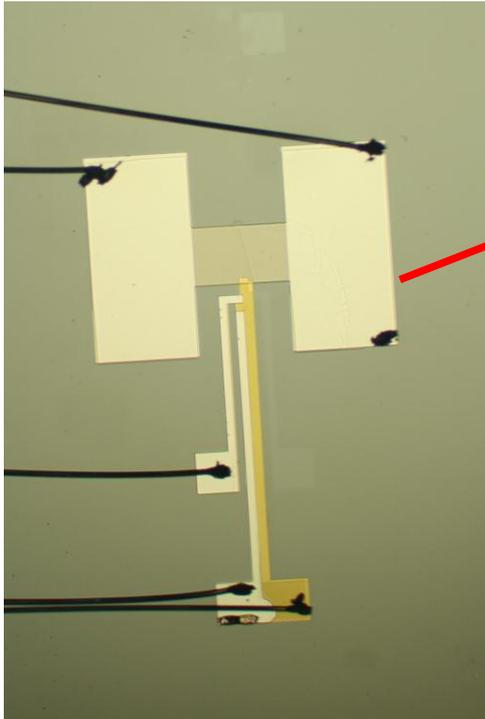
Mesure de chaleur CRESST

- Transition Edge Sensors
 - SQUID based (low impedance) read out circuit
- Width of transition: $\sim 1\text{mK}$,
keV signals: few μK
Longterm stability: $\sim \mu\text{K}$



Senseurs W de CRESST

The phonon detector:
300 g cylindrical
 CaWO_4 crystal.
Evaporated tungsten
thermometer with
attached heater.

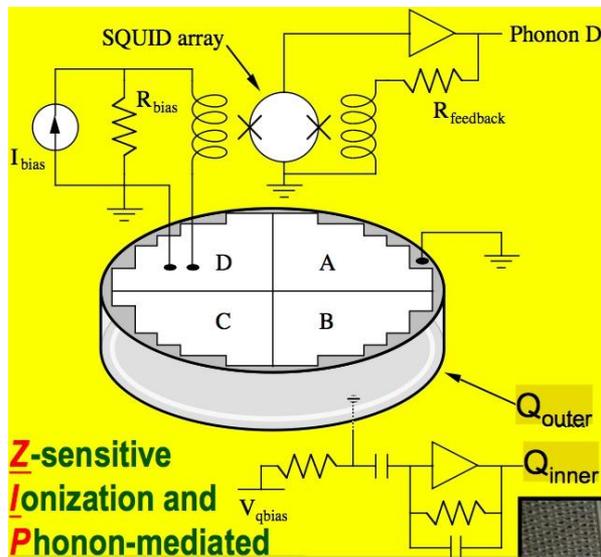
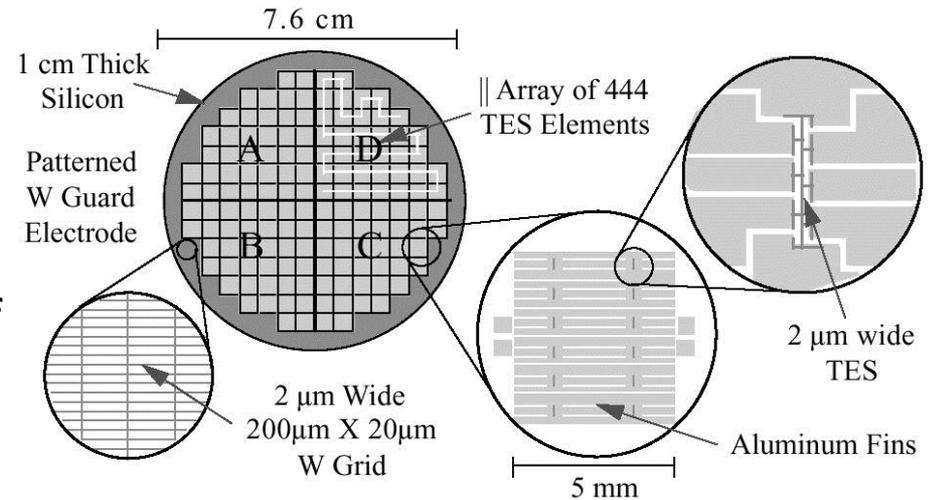


Light detector:
 $\varnothing=40$ mm silicon on sapphire wafer.
Tungsten thermometer with attached
aluminum phonon collectors and thermal link.
Part of thermal link used as heater

Clamps not
scintillating

Détection de phonon athermiques: ZIP

- Large area: sensitivity to athermal phonons
- *Sensitivity to surface interactions*
- Photolithographic patterns of W-TES + Al collector (CDMS)



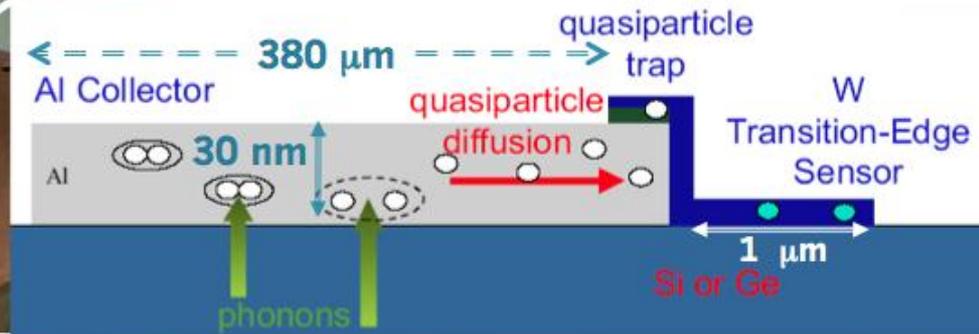
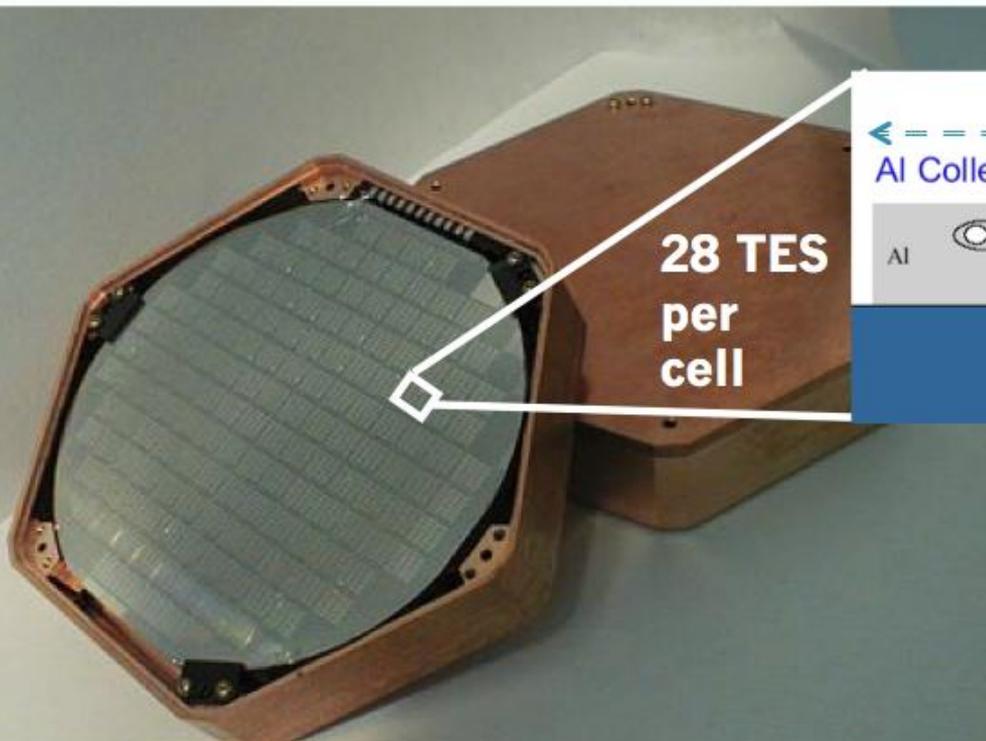
Transition: 50-100 mK

Détecteurs ZIP de CDMS:
4 quadrants de ~100 senseurs

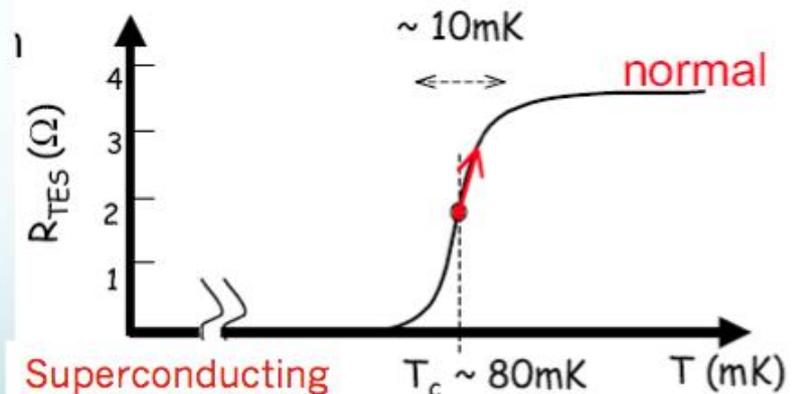


Lecture de phonons CDMS

photolithographic patterning produces 4144 "thermometers"
(quasi-particle-assisted electrothermal-feedback transition-edge sensors)

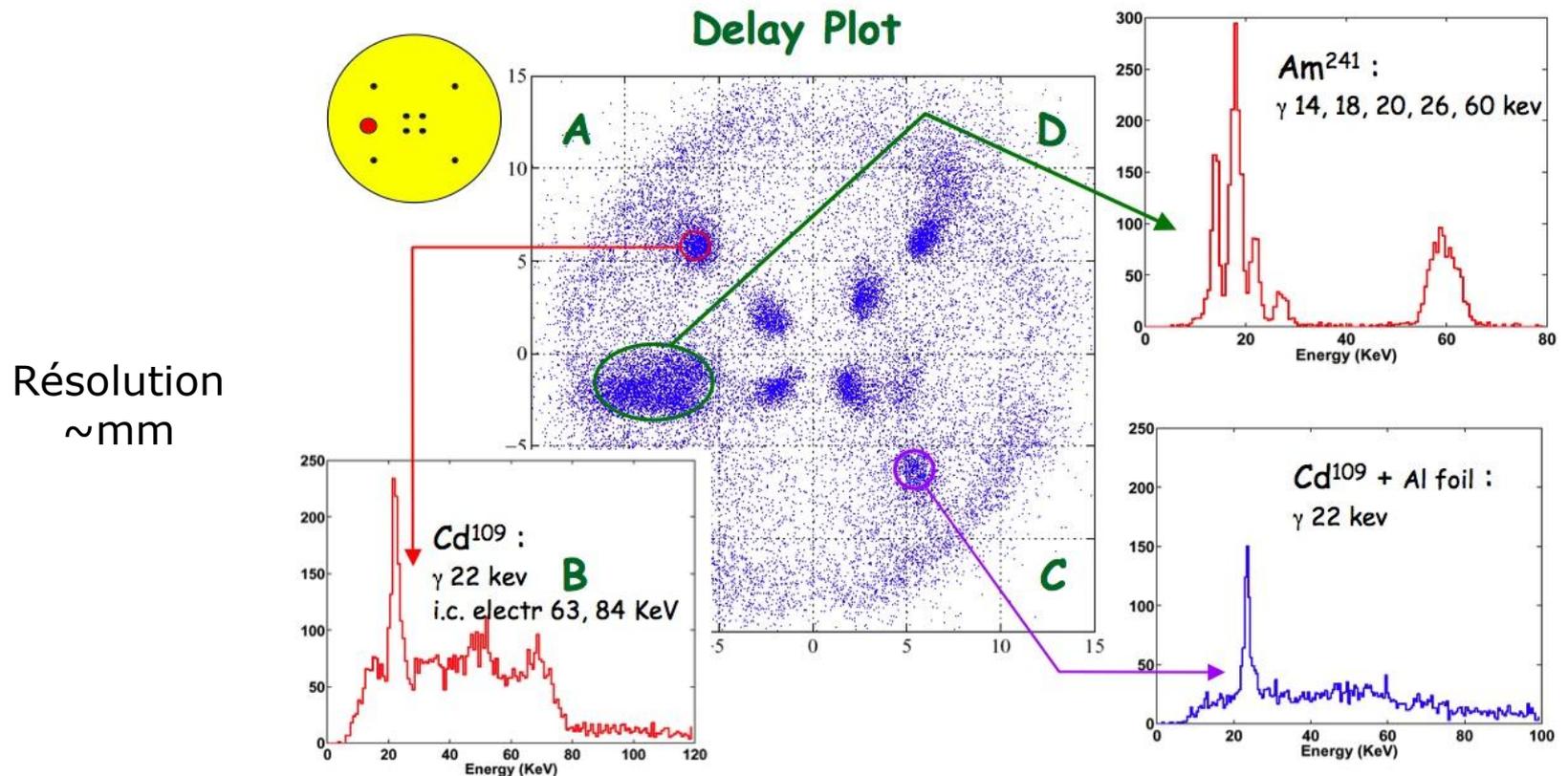


1 cm thick x 7.5 cm diam crystals of
250 g Germanium or 100 g Silicon



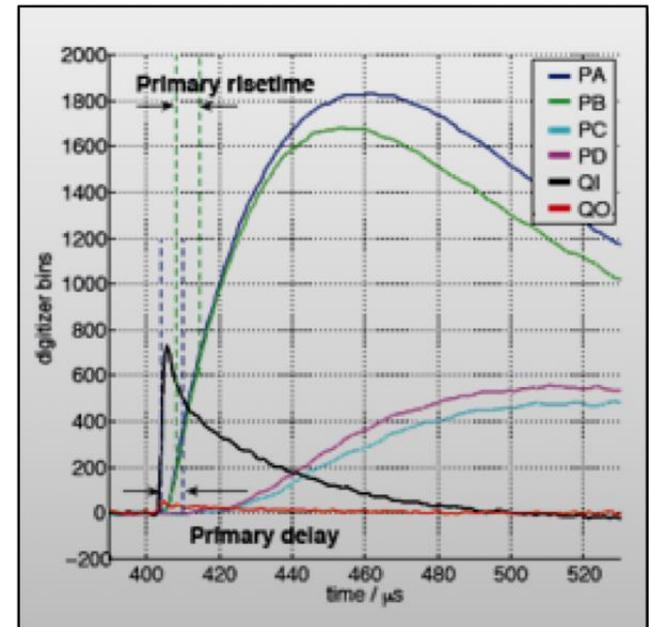
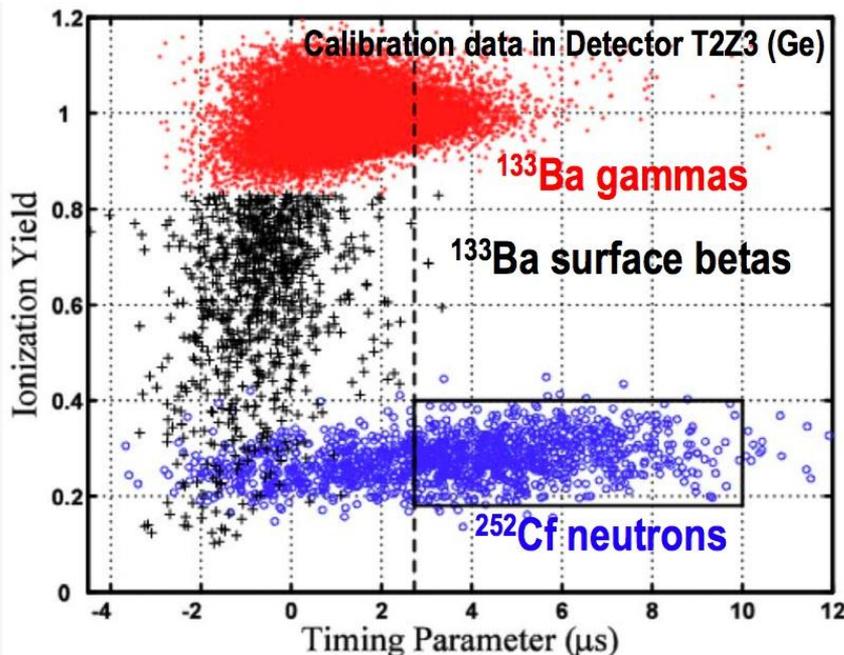
ZIP: localisation radiale des évènements

- Phonons athermiques: dépendance en position radiale des amplitudes
- Comparant l'amplitude mesurée par les 4 quadrants: mesure de position radiale + calibration en énergie dépendant de cette position



ZIP: temps de montée phonon

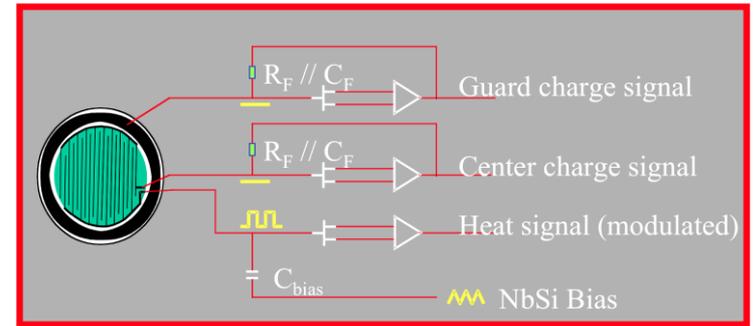
- Temps de montée du signal phonon $< 50 \mu\text{s}$
- « Timing »: Mesure du *temps de montée* et du *retard* par rapport au *signal rapide d'ionisation*



- Sensibilité à « z »? (non, car senseur d'un seul côté)
- Plutôt, différence entre phonons issus de l'interaction primaire et ceux issus de l'effet Luke-Neganov (voir section ionisation)

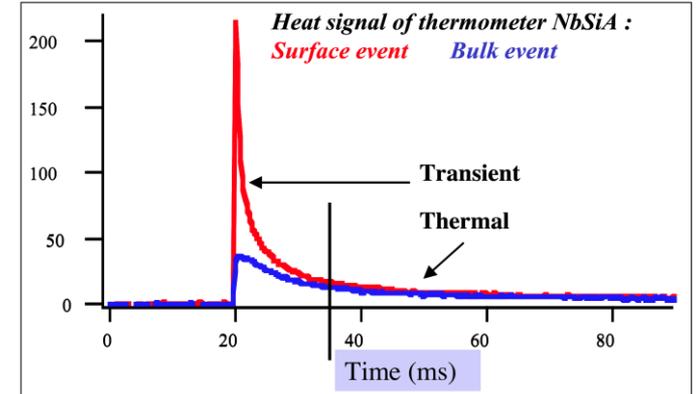
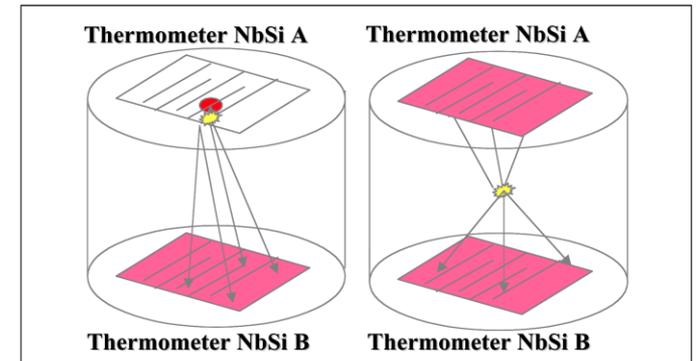
Phonon athermiques: EDELWEISS NbSi

- Thermomètres: méandre en films mince NbSi, sur les 2 surfaces planes
- Film NbSi également utilisé pour collecter la charge (ionisation)
- Phonons thermiques (mesure énergie) et athermiques (identification des événements proches de la surface) : « vrais » ZIPs



CSNSM

Status R&D: très bon rejet de surface, mais le film doit être optimisé pour la résolution en énergie



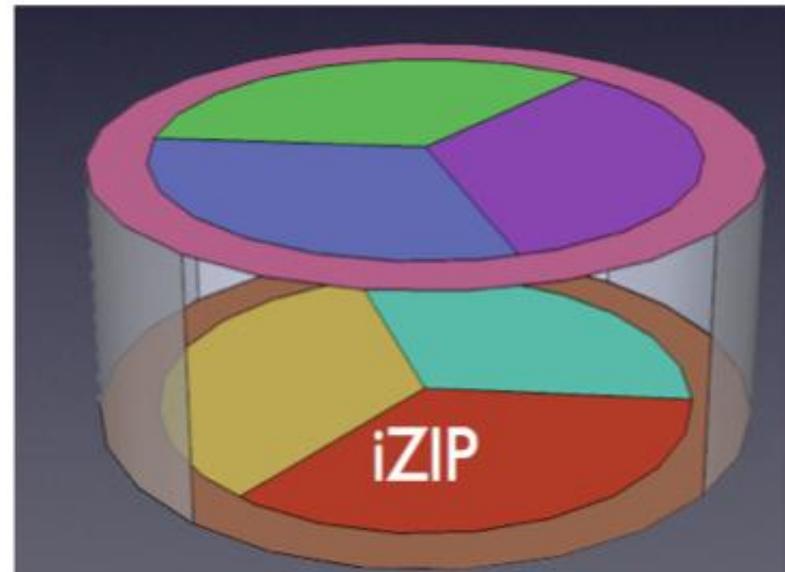
CDMS iZIP: phonons sur deux faces

- ZIP: La discrimination sur le timing des phonons est un peu moins bonne du côté opposé du senseur
- Nouveau design avec senseurs des deux côtés

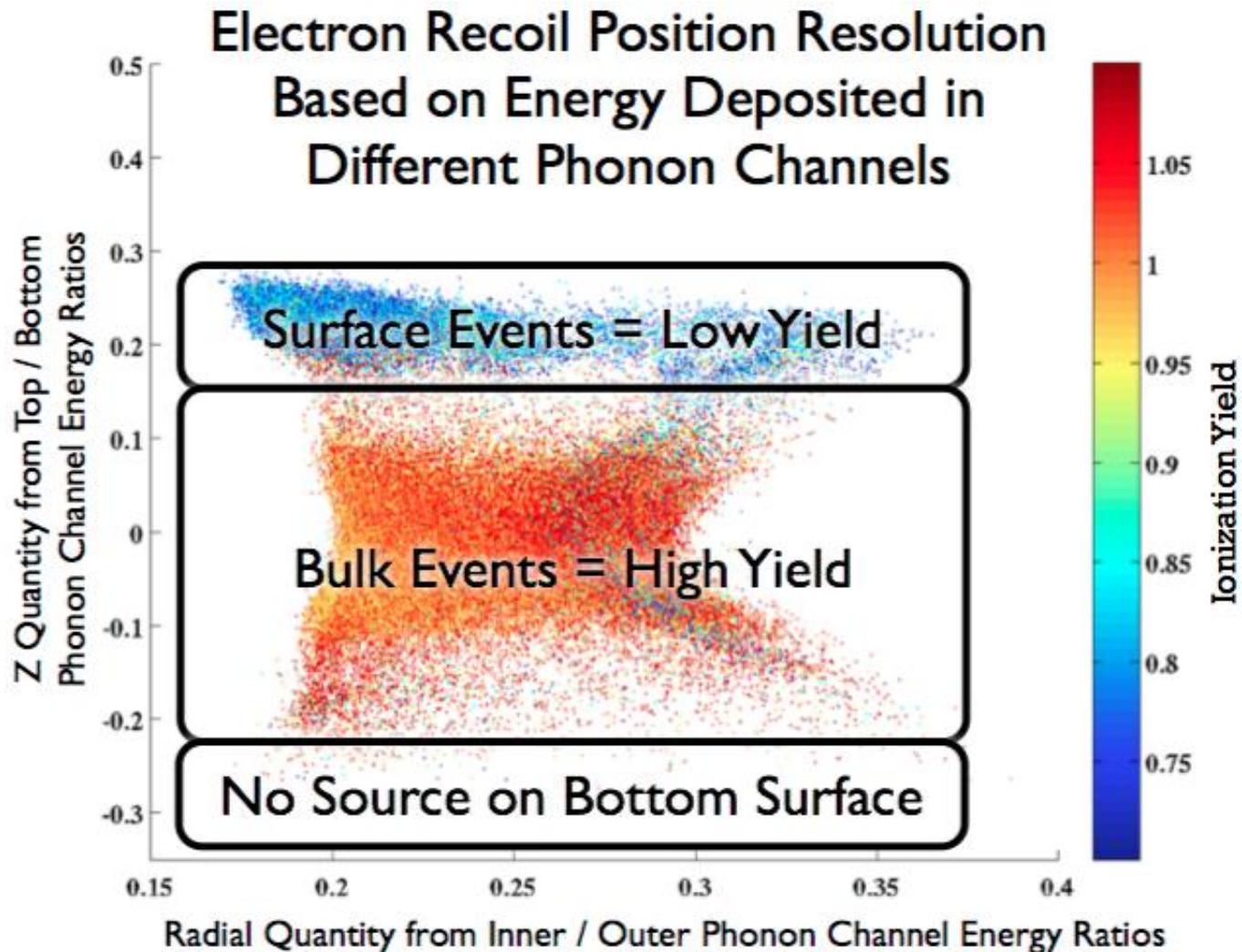
New Layout Phonon Sensors

Three inner phonon channels and one outer phonon “ring” channel to provide better radius determination in the phonon signal.

Bottom channels are rotated 60 degrees from top channels



Phonons *iZIP*: 3 signaux côté pile, 3 côté face



8

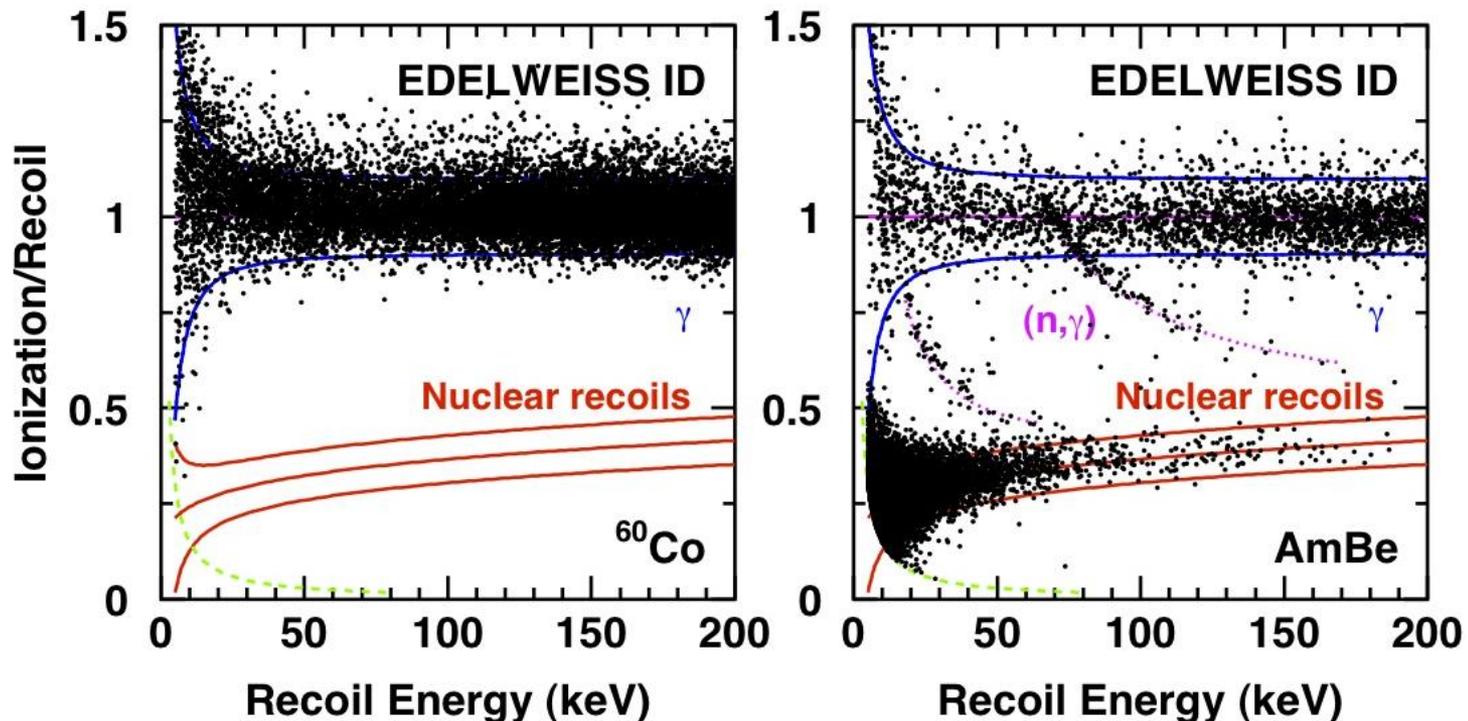
... un peu plus compliqué que $V = Q/C$

5- IONISATION

Cryogenic Germanium detectors

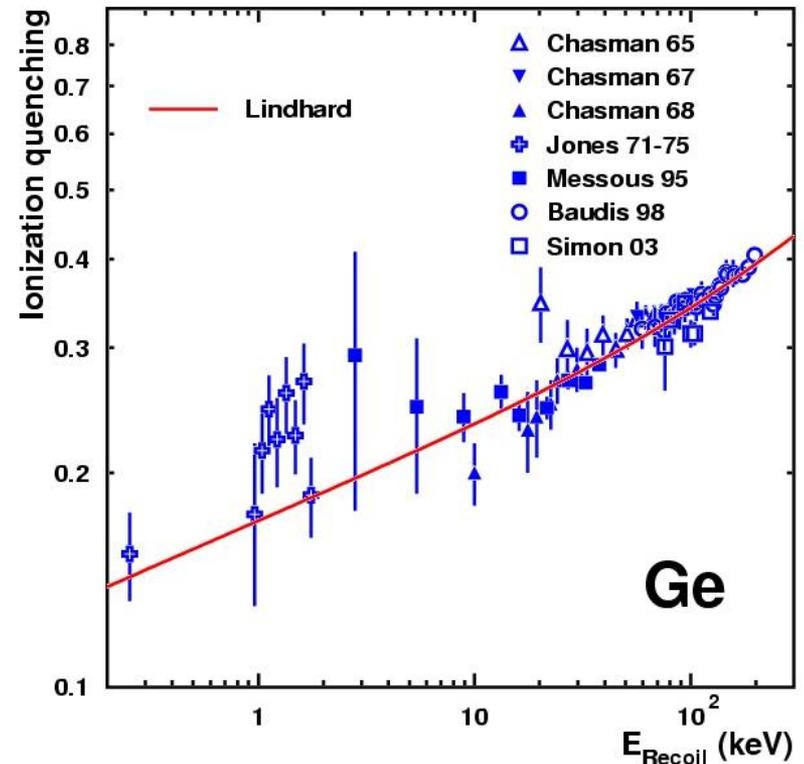
- Very pure material
- True calorimetric measurement of recoil energy
- Different ionization yields for nuclear recoils (WIMP or neutron scattering) and electronic recoils (β, γ decays)
 - discrimination of dominant background

Need best baseline (0 keV) resolutions -> cold electronics



Quenching ionisation

- Très bien connu dans le germanium, jusqu'au \sim keV
[e.g. revue dans NIM A577 (2007) 558]
- Suit la loi phénoménologique de Lindhard, y compris à des énergies (< 23 keV) où le choc d'un ion ne peut transférer à un électron une énergie supérieure au gap
- Quenching chaleur moins bien connu (mais effet faible)
[NIM A577 (2007) 558]



- *Effet Joule: la collecte des charge induit un courant qui chauffe le bolomètre (effet Luke-Neganov)*

- Travail = chaleur = $e N_{\text{charge}} \times |V_{\text{polar}}|$

- *Amplification* du signal chaleur:

$$E_{\text{chaleur}} = E_{\text{recul}} + eN_{\text{charge}} \times |V_{\text{polar}}|$$

- Germanium: 3.0 eV/e pour un recul d'électron:
signaux ionisation E_{ion} étalonné à partir du signal charge:

$$E_{\text{ion}} = N_{\text{charge}} \times 3.0 \text{ eV/e}$$

- On peut donc retrouver E_{recul} à partir de E_{chaleur} et E_{ion} :

$$E_{\text{chaleur}} = E_{\text{recul}} + E_{\text{ion}} \times |V_{\text{polar}}|/3.0V$$

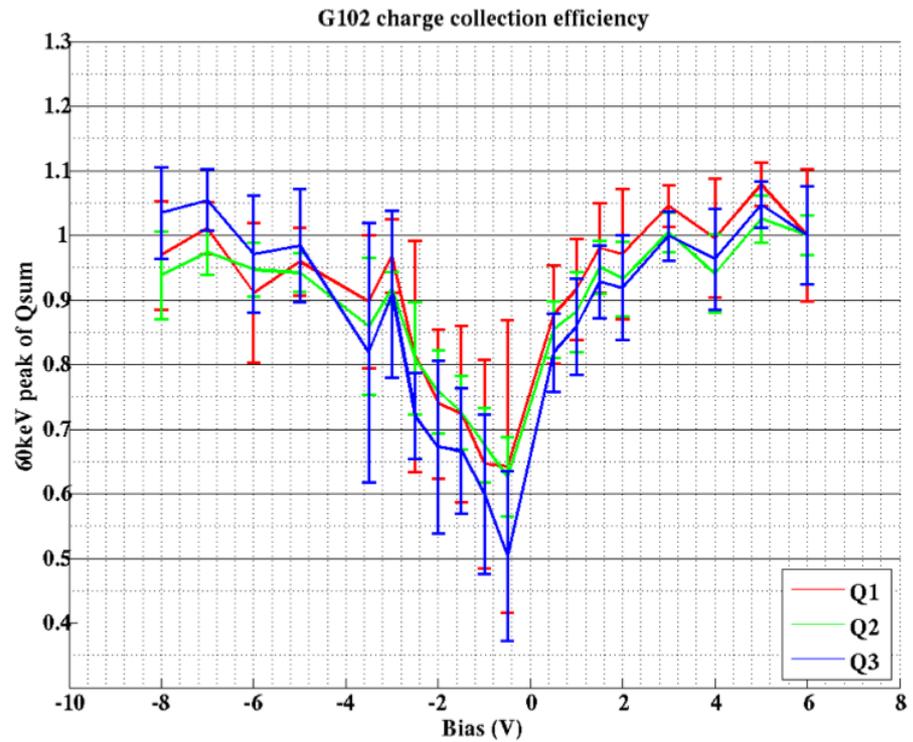
$$**E_{\text{recul}} = E_{\text{chaleur}} - E_{\text{ion}} \times |V_{\text{polar}}|/3.0V**$$

- Augmenter V_{polar} améliore la résolution chaleur, mais pas la discrimination des reculs nucléaire/électronique qui dépend de $E_{\text{ion}}/E_{\text{recul}}$

- Besoin de garder $V_{\text{polar}} \sim < 3V$

Collecte en champ faible

- La tension de collecte doit être suffisamment grande pour que les charges ne soient pas piégées lors de leur transit
- Valeur critique $\sim 1\text{V/cm}$
- Piégeage asymétrique
- Nombreux pièges en surface (ne serait-ce que parce que la structure du cristal cesse d'être parfaite)

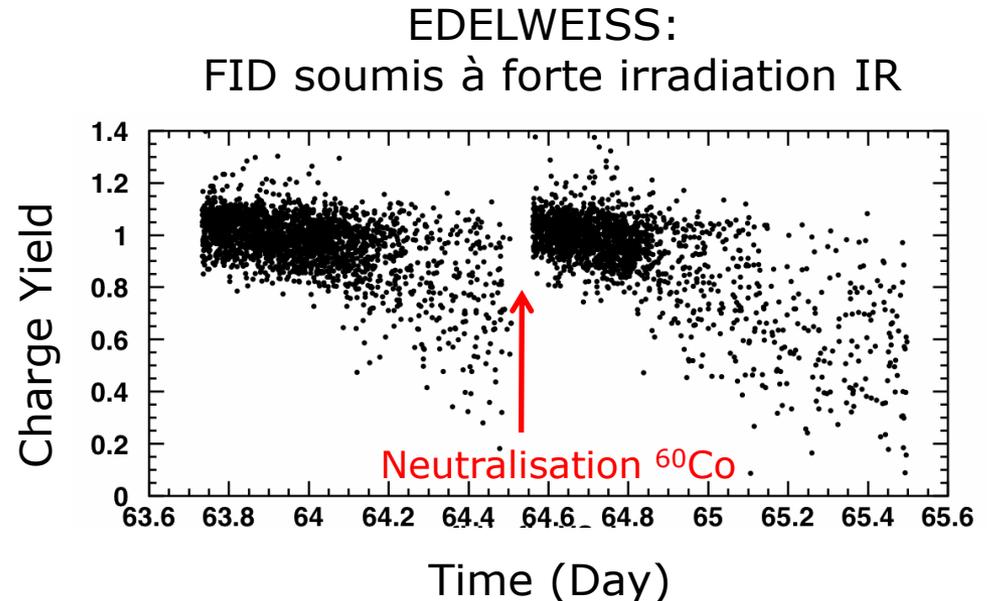
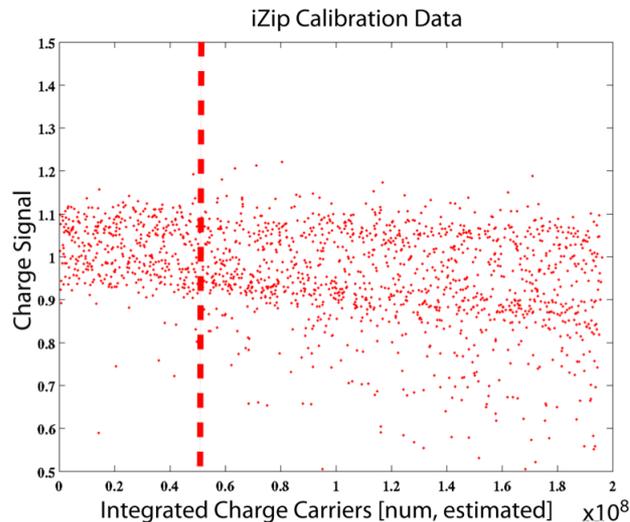


CDMS, p+, Bias over 3.3 cm

Piégeage et neutralisation

- Les charges trappées lors de la collecte finissent par créer un contrechamp, qui diminue le champ total et favorise encore plus le piégeage...
- Solution 1: éviter piégeage
- Solution 2: neutraliser régulièrement ce contrechamp (« régénération »)
 - Enlevant le champ externe, il ne reste que le contrechamp
 - Faire migrer des charges sous l'effet de ce champ: elles neutraliseront ces pièges
 - Source ^{60}Co externe (EDELWEISS) ou infrarouge (CDMS)
- Opération ~quotidienne

*Voir aussi:
B. Censier, thèse (2006)*

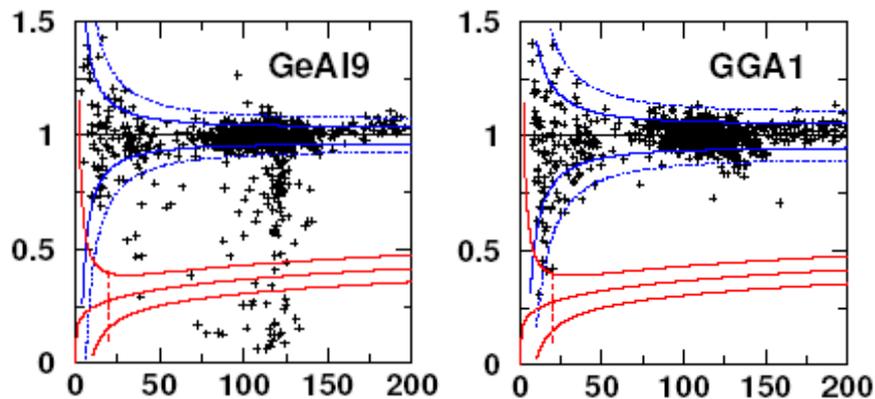


Événements de surface: mauvaise collecte

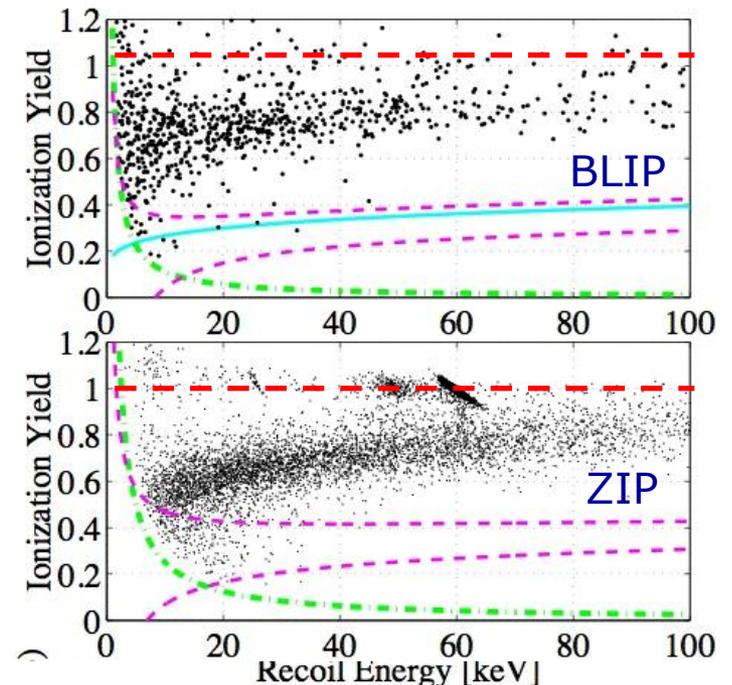
- Pas de collecte dans les couches mortes: électrodes, couches amorphes
- Nombreux défauts en surface: piégeage des charges
- Diffusion des charges: collecte de charge sur électrode du mauvais signe
- Contaminants α, β surface: collecte imparfaite

EDELWEISS

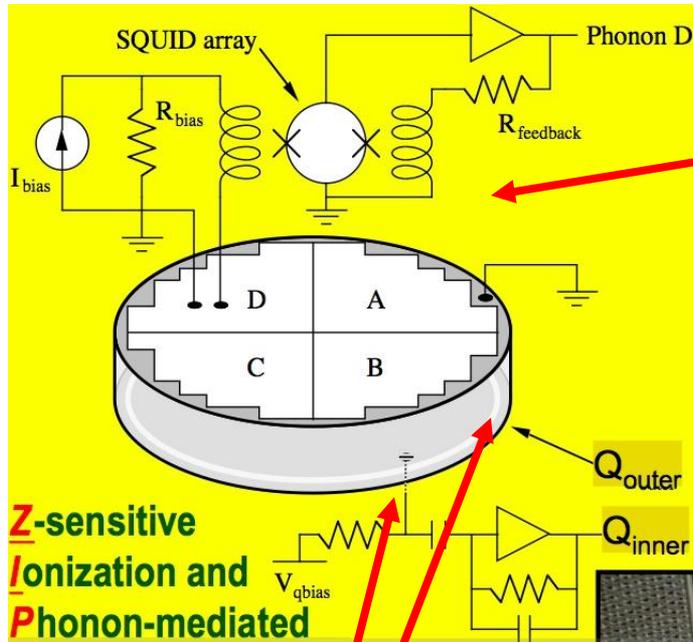
Calibration γ : une couche amorphe aGe aide à empêcher les charges de diffuser vers les « mauvaises » électrodes



CDMS: calibration β : mauvaise collecte de charge



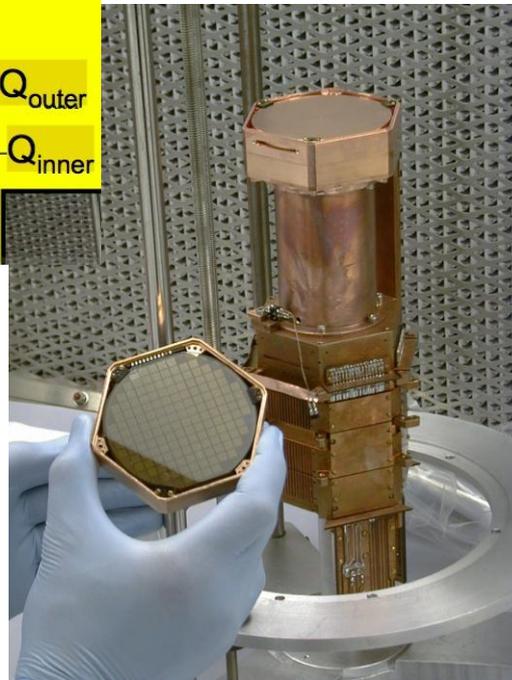
Détecteurs ZIP de CDMS



- Athermal phonon measurement with 4 quadrants of ~ 1000 transition-edge W sensors

- Phonon risetime and delay wrt ionization: detects proximity from surface ("Z")

- Charge measurements: centre and guard ring

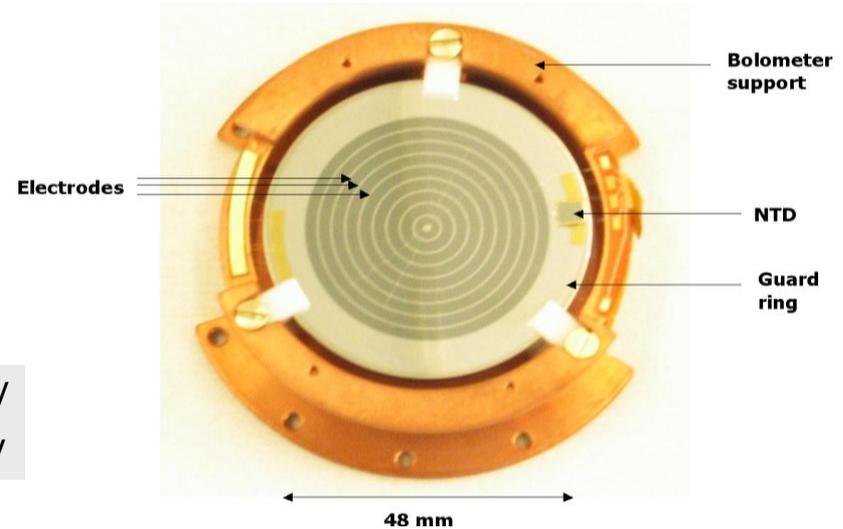
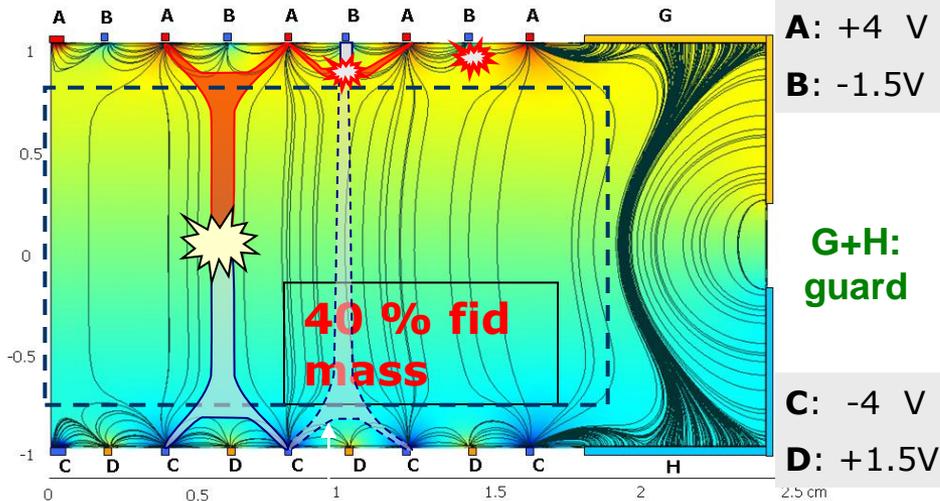


EDELWEISS: Interleaved electrodes

« ID » (interdigit) detector

A+C electrodes
Collecting bulk

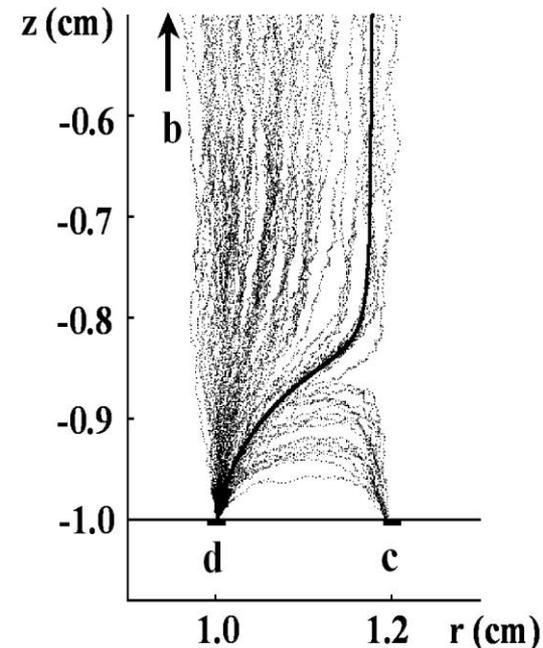
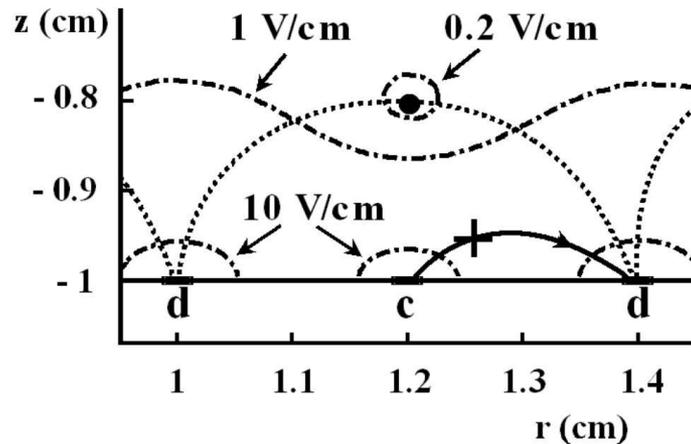
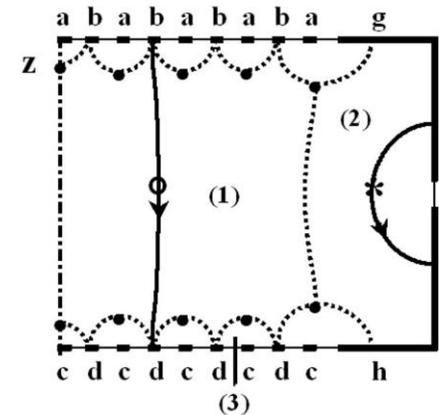
B+D electrodes
field shaping
+ surface events



- Keep the EDW-I phonon detector
- Modify the E field near the surfaces with interleaved electrodes
- Use 'b' and 'd' signals as vetos against surface events

Collecte de charge en mode « ID »

- **Effet « grid »: champ fort proche des électrodes de collecte, bon pour éviter piégeage**
- **Zones de champs nul: « contournées » par effet de diffusion des charges**

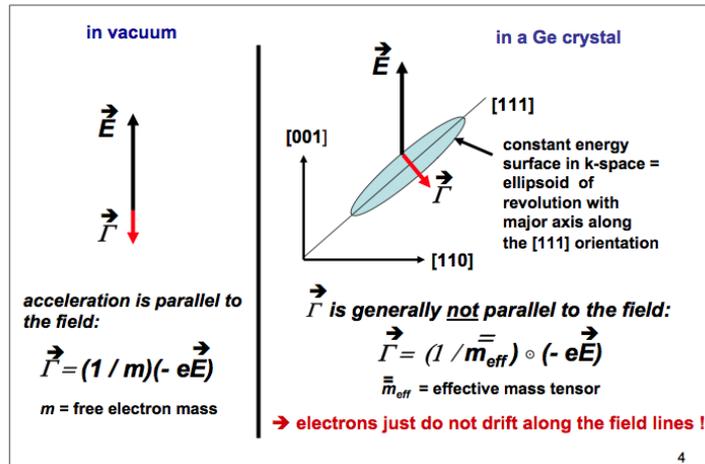


Broniatowski, PLB 681 (2009) 305

Transport de charge anisotropique

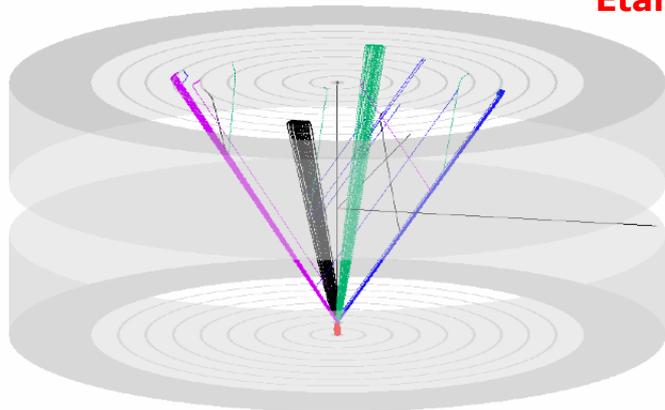
Broniatowski, ITN 1/1

Dynamics of electrons under an applied electric field



LTD14 Heidelberg, Germany Aug. 1-5, 2011

b) Simulation treats electron transport anisotropy, but neglects impurity scattering



ID203: $N_{scatt} = 0$, $V_a = 1V$.

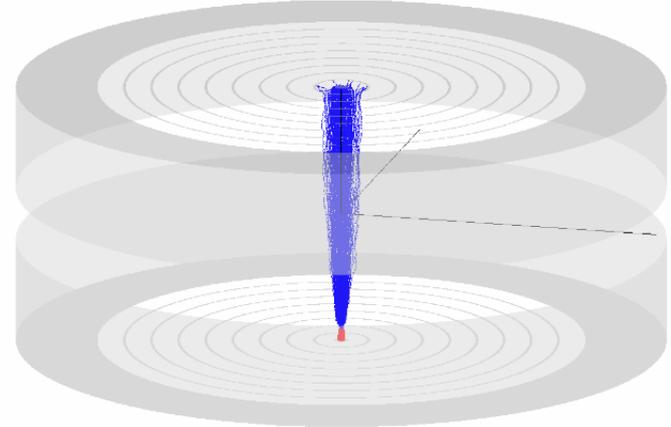
6

LTD14 Heidelberg, Germany Aug. 1-5, 2011

Etalement de la charge

ID203
Height 20 mm
Diam. 50 mm
Ge p-type
doped to
 10^{11} cm^{-3}
Field: 0.5V/cm

a) Simulation includes impurity scattering but neglects electron transport anisotropy

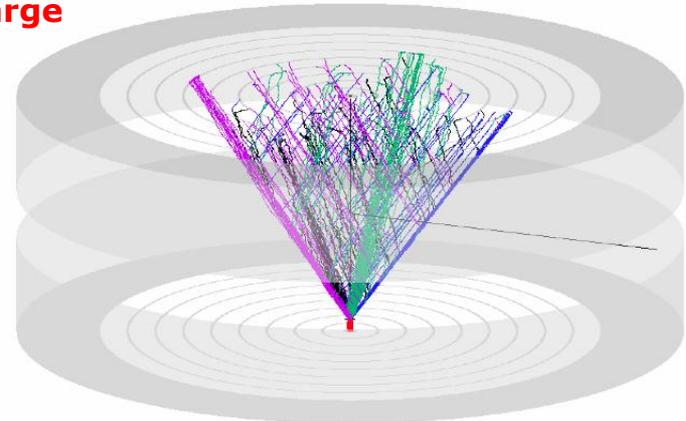


ID203: $N_{scatt} = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $V_a = 1V$.

5

LTD14 Heidelberg, Germany Aug. 1-5, 2011

c) Simulation treats the combined effects of impurity scattering and electron transport anisotropy



ID203: $N_{scatt} = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $V_a = 1V$.

7

LTD14 Heidelberg, Germany Aug. 1-5, 2011

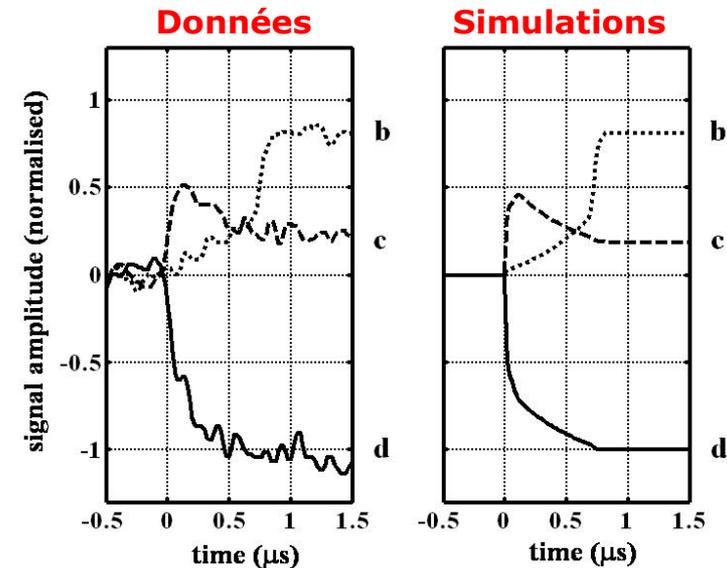
Collecte de charge

- Version simplifiée de la collecte des charges: les électrodes + collectent les e^- , les électrodes - collectent les trous h^+
- Version correcte: la charge collectée sur une électrode est l'intégrale des courants induits par *toutes* les charges en mouvement (e^- et h^+):

$$i = qE_{\text{Ramo}}v$$

... la charge commence à arriver dès $t=0$.

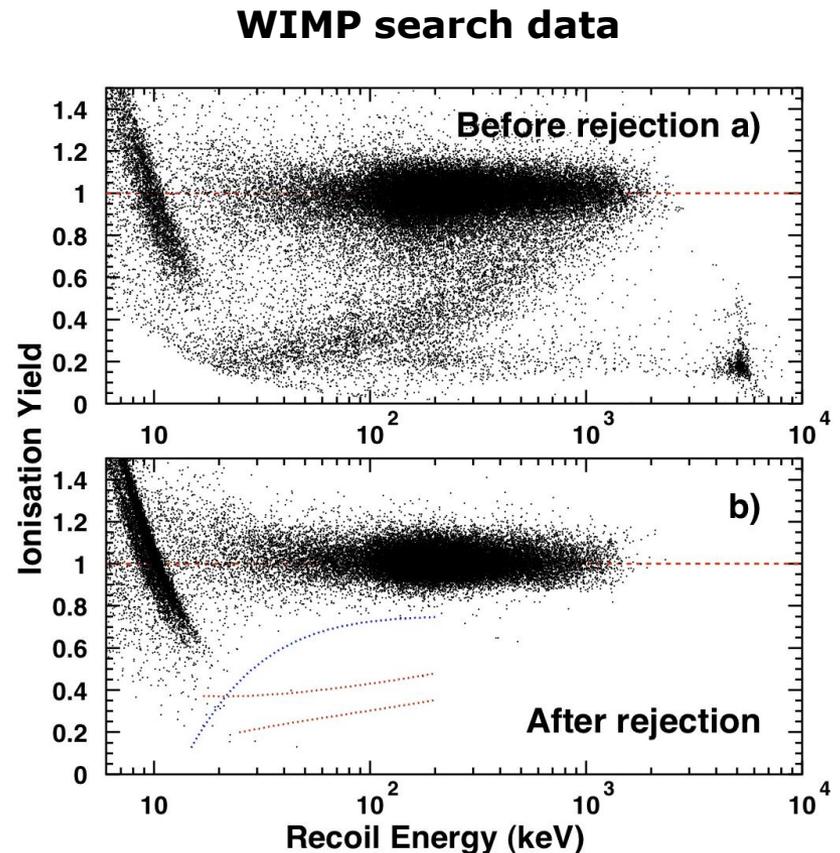
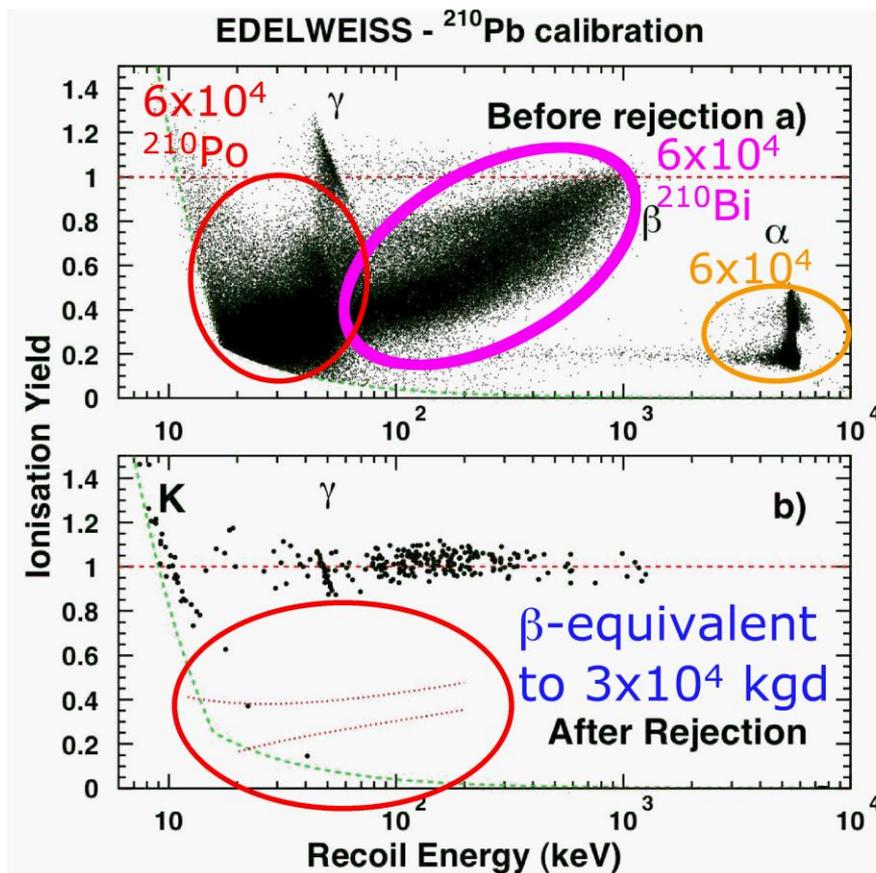
- E_{Ramo} : champs pour une électrode à 1 et les autres à 0
- L'effet se voit bien sur les fronts montants des signaux ionisations \longrightarrow
- $Q^+ = Q^-$ sur détecteur planaire symétrique, mais situation plus complexe si plus de deux électrodes (ID, iZIP): géométries champs E_{ramo} sensiblement différentes de celle du champ appliqué



Broniatowski, PLB 681 (2009) 305

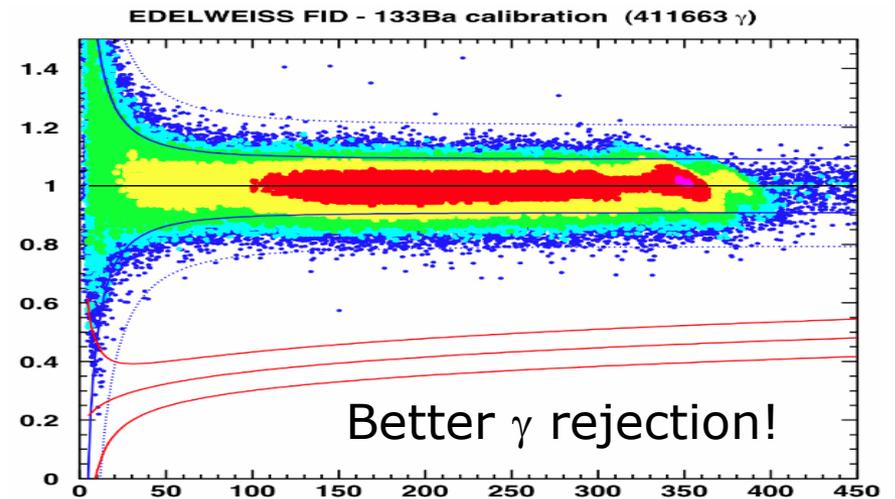
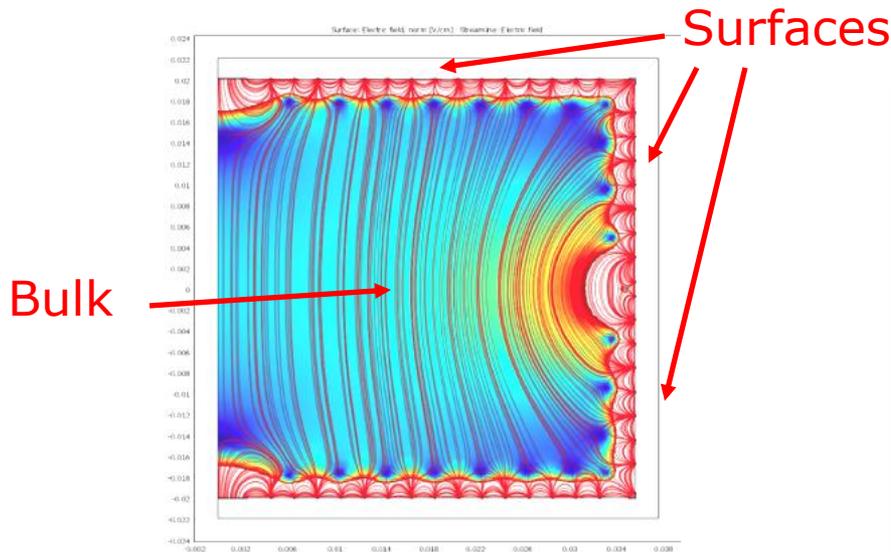
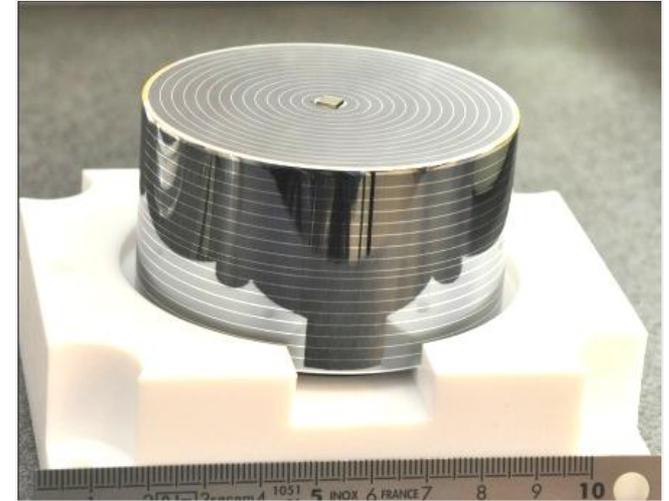
Identification des événements de surface

- La complexité des mécanismes de collecte de charge conspire de façon cohérente pour fiabiliser l'identification des evts de surface



Need to reduce non-fiducial background

- FID: detectors FULLY covered with interleaved electrodes (and go from 400 -> 800 g)
- 40 detectors for 2013



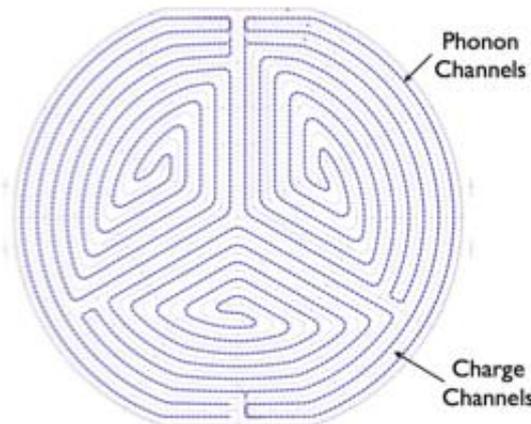
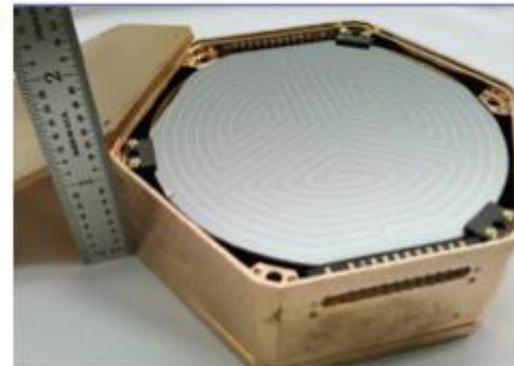


iZIP detector design - II

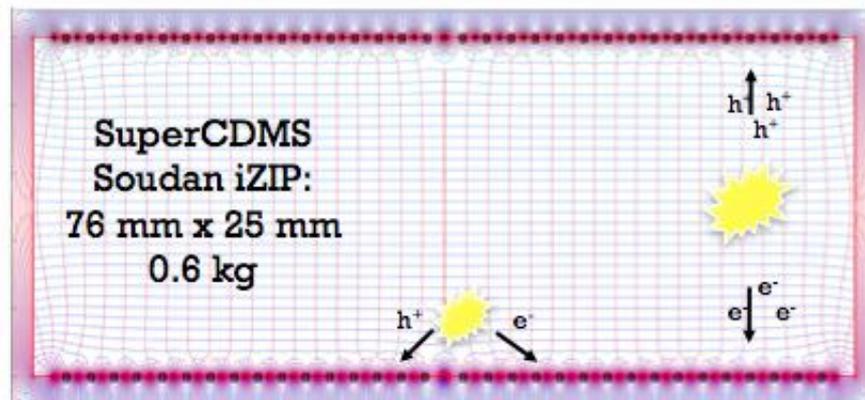


Electrode Scheme

- NEW interleaved layout of ionization and phonon sensors
- We now have phonon sensors and ionization sensors on BOTH the top and bottom of the detector
- Major improvements in discrimination from this new technology



Silvia Scorza

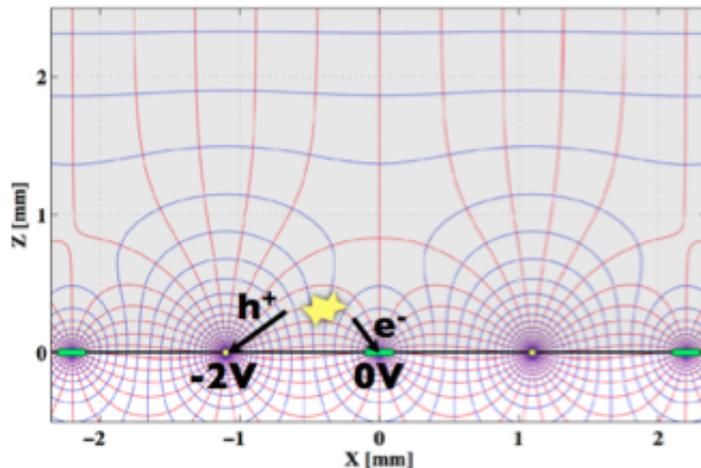


9/6/11

+ Charge-based Surface event rejection

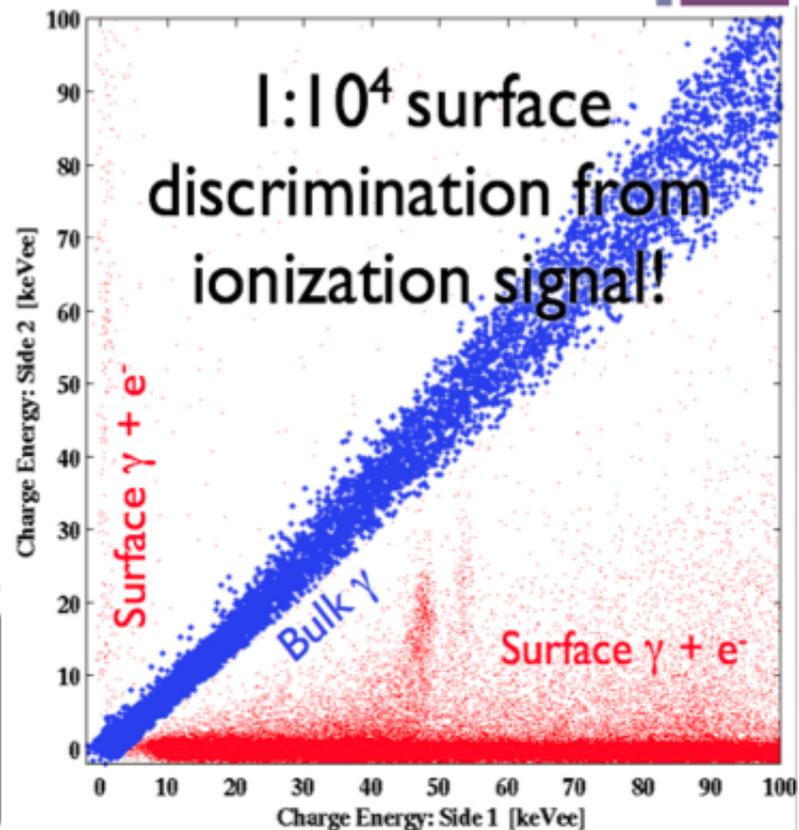
6

Complex E-fields produced by interleaving +2V/0V electrodes encode Position Information



Outer charge electrodes separately measured for radial information

Silvia Scorza

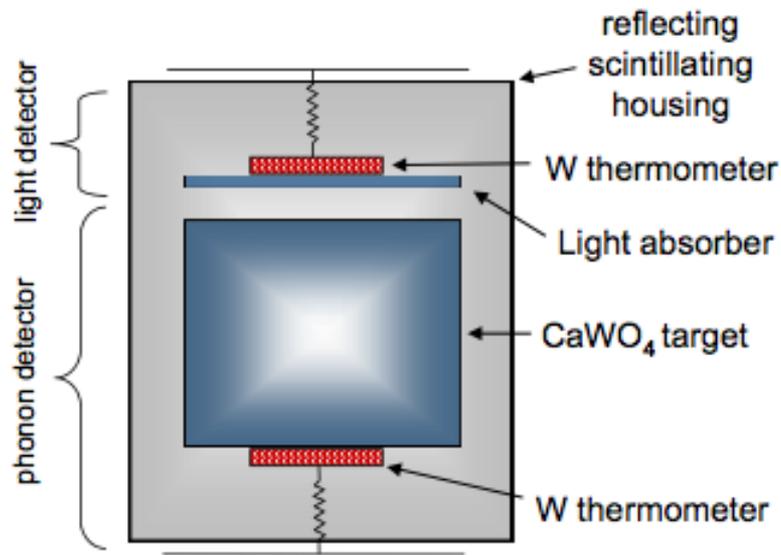


9/6/11

6- SCINTILLATION

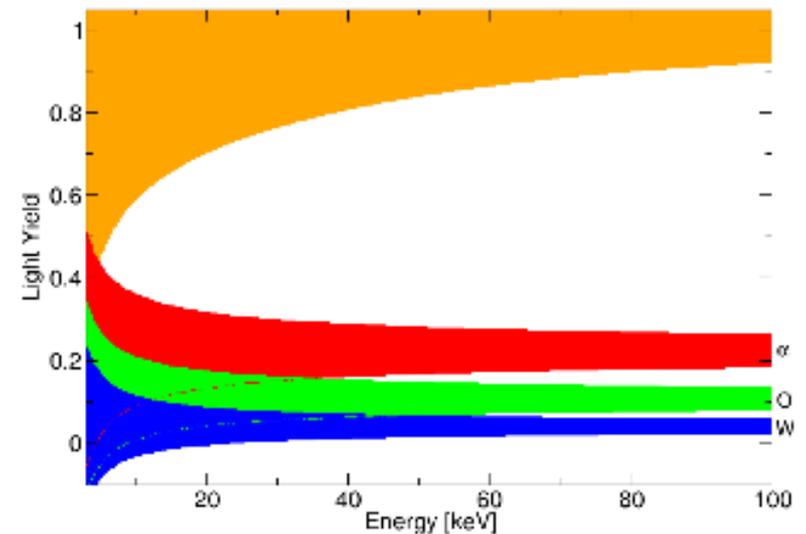
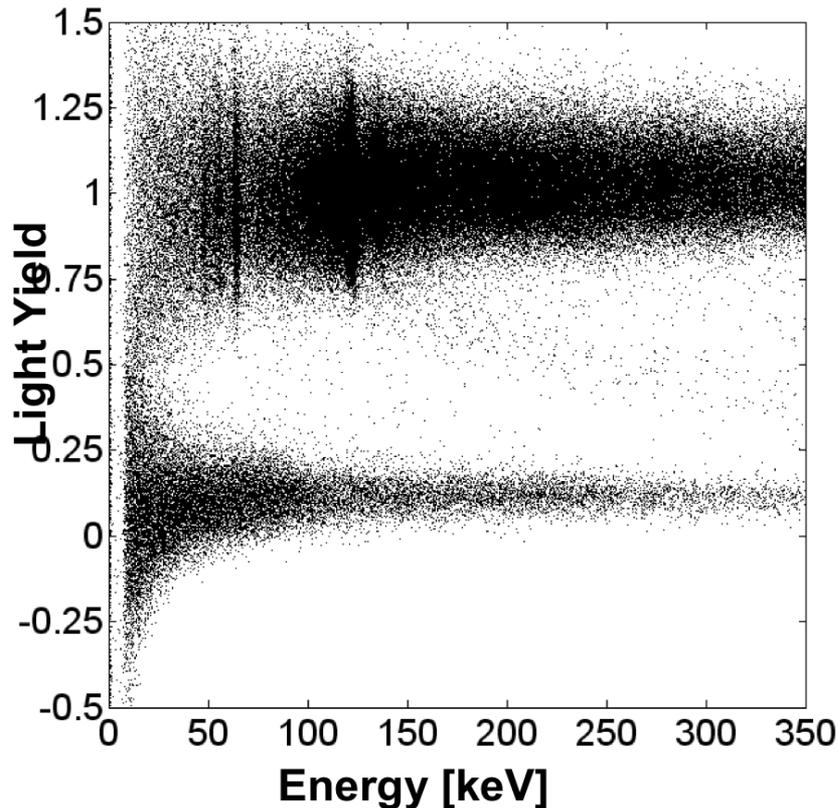
Scintillation-chaaleur: CRESST

- Cristaux CaWO_4 avec thermomètres à film de W (~ 10 mK)
- Détecteur de lumière = pastille Si avec un autre thermomètre



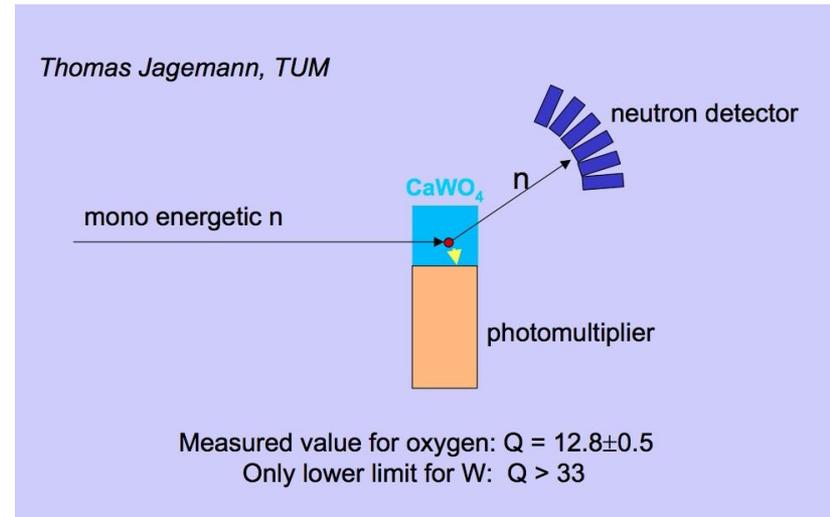
CaWO₄: Neutron/gamma separation

- « Quenching » (relatif aux gammas): alpha ~ 0.22 , Oxygène ~ 0.10 , Calcium ~ 0.06 et Tungstène ~ 0.04

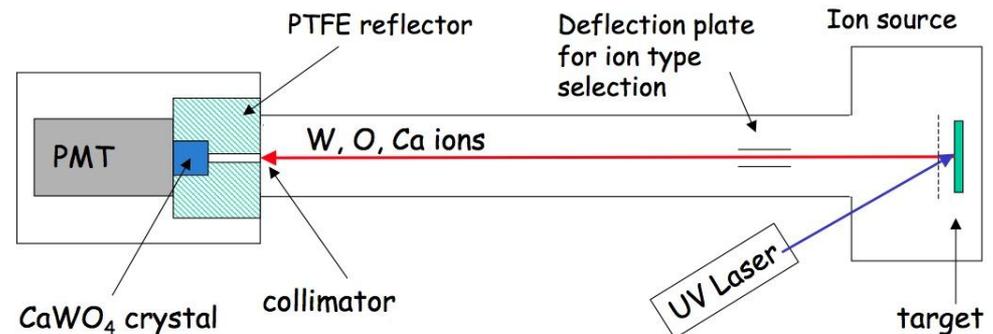


Mesure Quenching scintillation CaWO_4

- Mesure par diffusion de neutron monoénergétique (+tag de l'angle de diffusion, pour sélectionner E_{recul} unique)
- Similaire aux mesures Ge



- Bombardement d'ions en surface (ok car pas d'effe de surface comme le Ge)

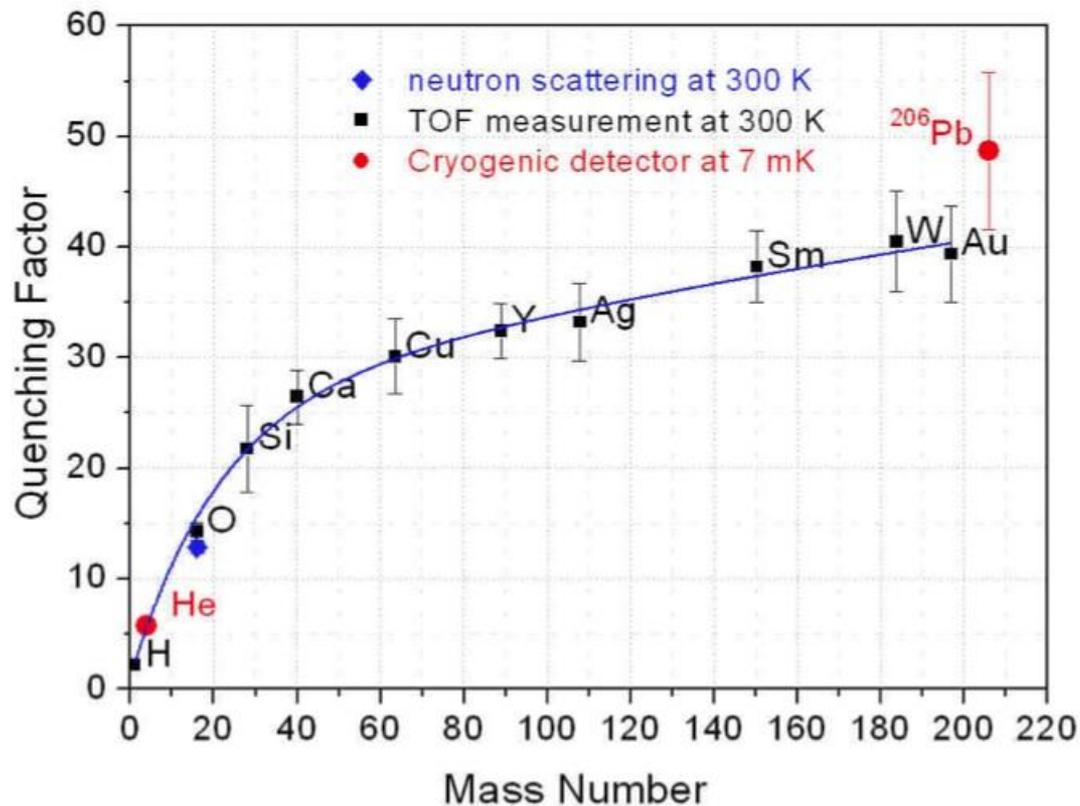


•UV Laser desorbs singly or doubly charged ions from almost any material. Acceleration to 18 keV (or 32 keV for double charged)

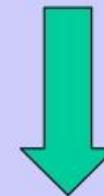
•Mount CaWO_4 crystal on PMT at end of flight tube and record single photon counts with fast digitizer

Quenching scintillation CaWO_4

Quenching Factors for various nuclei in CaWO_4

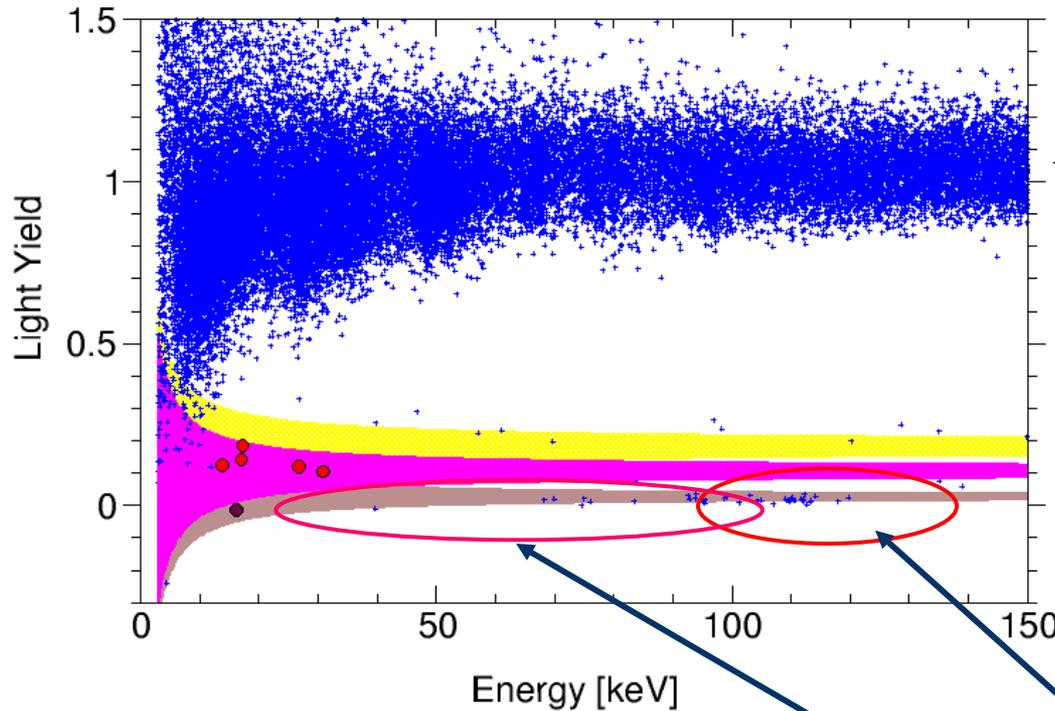


High value of $Q=40$ for tungsten \rightarrow very little light for recoils <40 keV



Discriminate W recoils (WIMPS) from O recoils of neutrons

730 kg.jour CRESST



$\gamma + \beta$ band

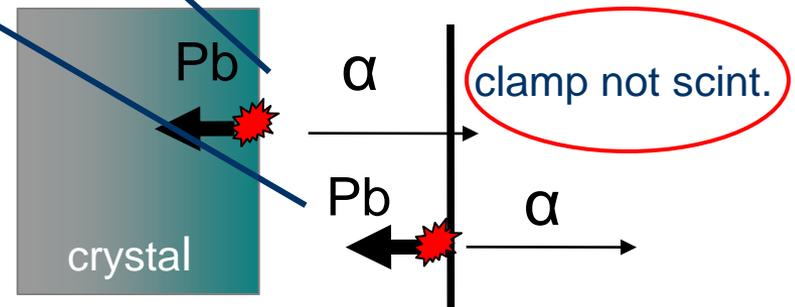
67 candidats WIMPs,
mais fond estimé à ~ 45

\langle band

O-recoil-band

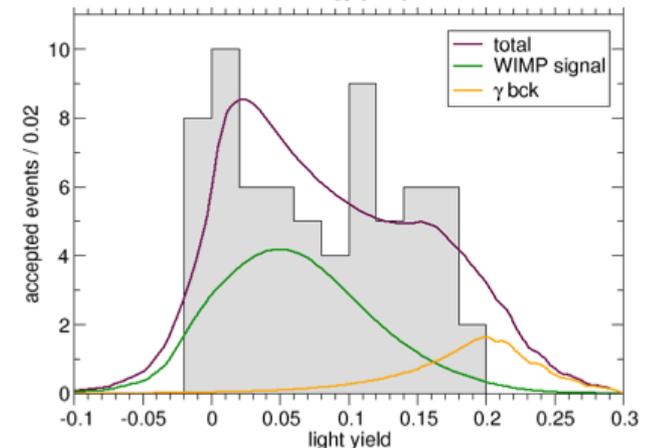
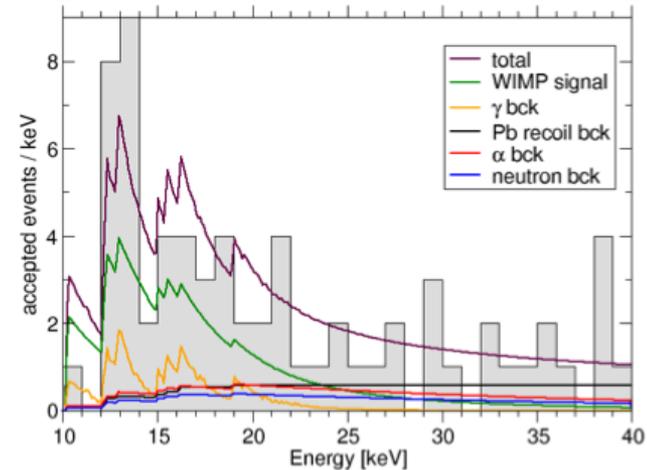
W-recoil-band (+Pb)

Besoin de réduire les fonds γ ,
neutrons, alpha, reculs Pb de
surface, evts sans lumière



Results of Likelihood Analysis

- Energy spectra of α , neutron or Pb backgrounds do not resemble the expected WIMP signal and only the e/γ contribution has a similar shape
- Light yield spectrum of e/γ differs significantly from the expected WIMP signal and thus cannot explain the total LY distribution

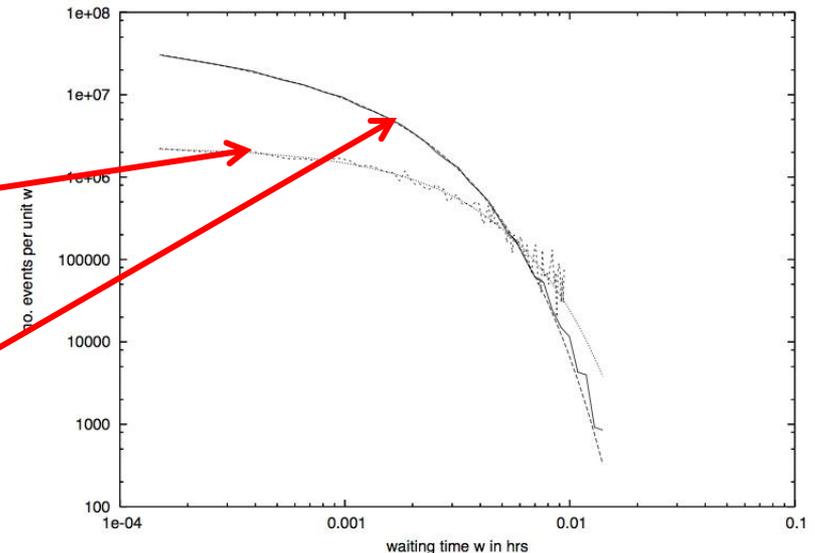


Événements sans chaleurs: fractures

- Problem: W recoils (most likely for WIMP coherent scattering) at very low energy (<15 keV) may not be distinguishable from scintillationless events
- Observed source of no-light event in first data taking: fractures in crystal
- Autocorrelation in this process shown to be very similar to seismologic data [arXiv:physics/0504151v3]
- Solution found before 730kg run: release the pressure from the holding clamps. Background apparently acceptable for now.

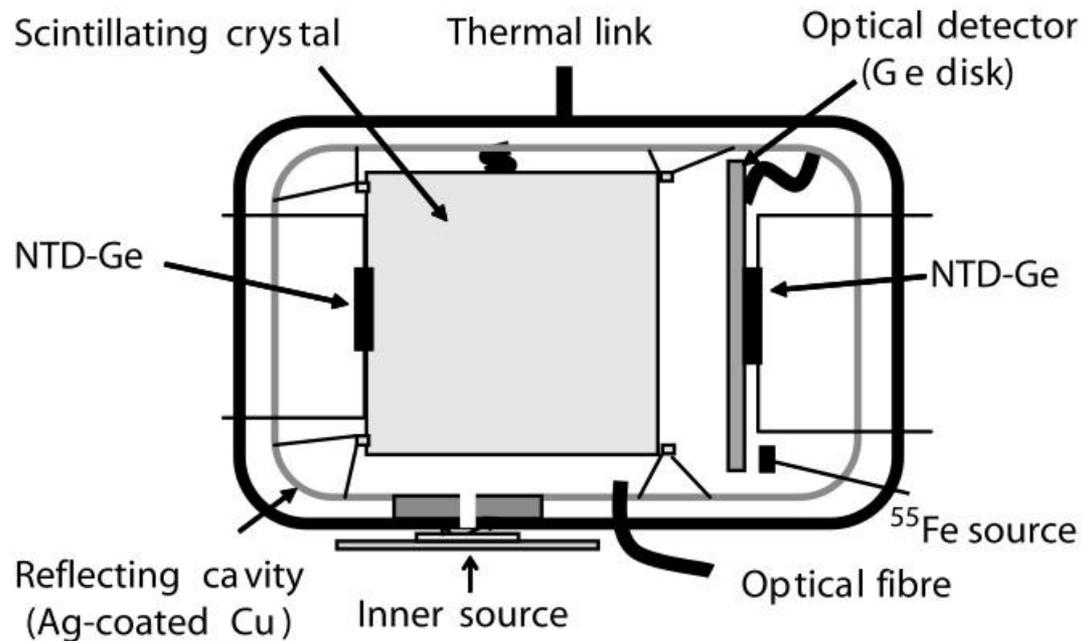
Waiting time between successive evts

- Photons: $\exp(-t/\tau)$
- Cracks: $(t)^{-\alpha} \exp(-t/\tau)$, $\alpha = 0.33$



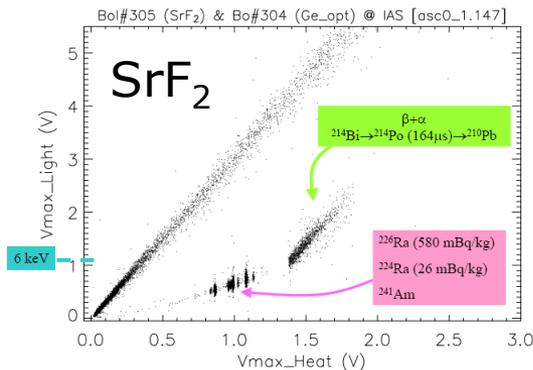
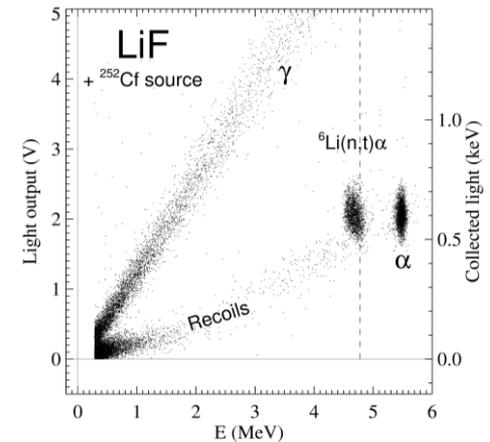
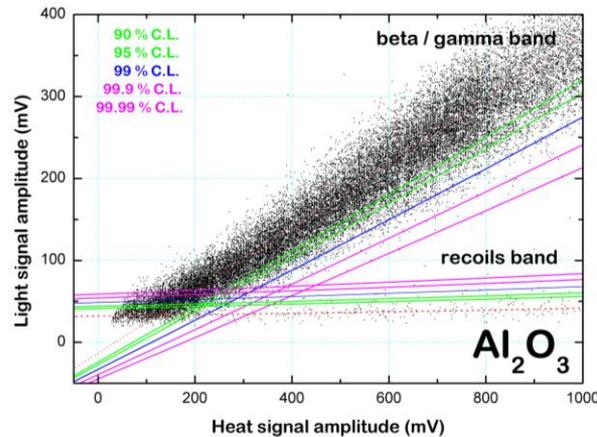
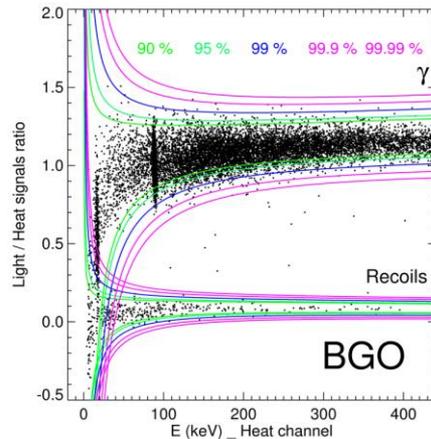
R&D pour exploiter la variété de cible

- Programme ROSEBUD: même principe chaleur+scintillation que CRESST, mais avec senseurs Ge-NTD
- Senseur de lumière: pastille Ge



IAS heat-and-scintillation detectors

- R&D with wide selection of targets at Institut d'Astrophysique Spatial (Orsay) : ROSEBUD, EURECA



- Neutron monitoring**
- Spin-dependent
- Byproduct: first measurement of ${}^{209}Bi$ period (1.2×10^{19} y) [Nature 422 (2003) 876]

Longueur d'onde de luminescence vs T

- Non seulement l'intensité et les constantes de temps varient en fonction de la température, mais également les *longueurs d'onde*
- Celles-ci dépendent aussi des *concentrations des dopants*
- Optimisation de tous ces paramètres

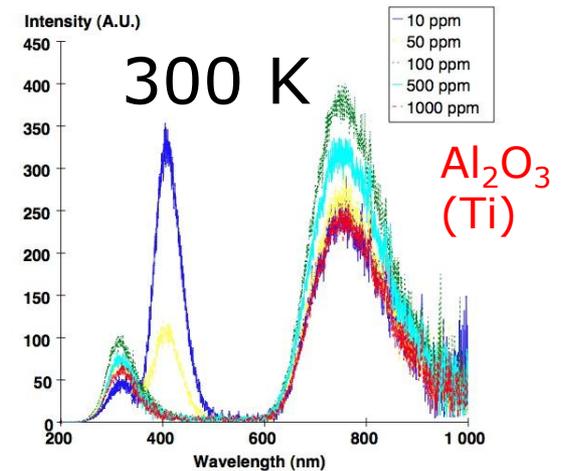
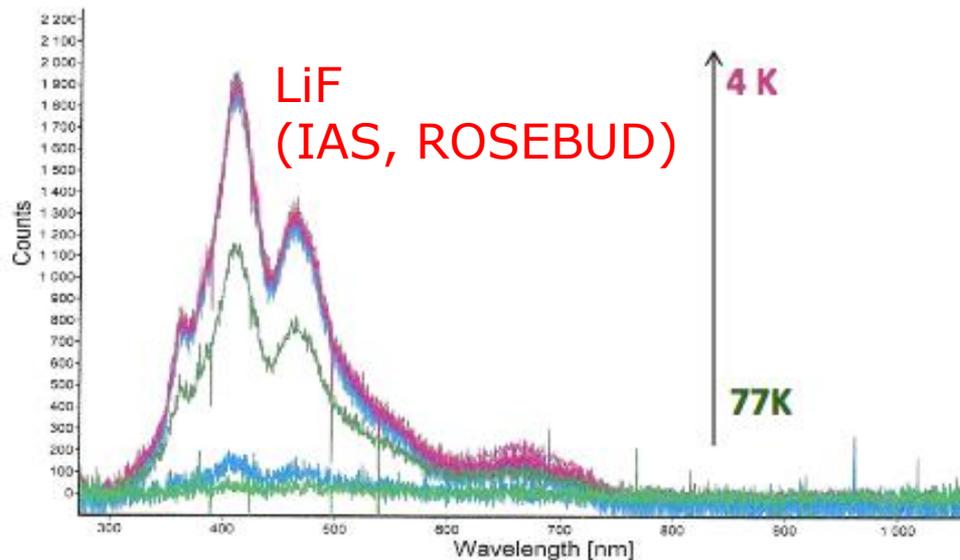


Figure 4.14: Room temperature scintillation spectra of $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ with Ti concentrations of 10, 50, 100, 500 and 1000 ppm.

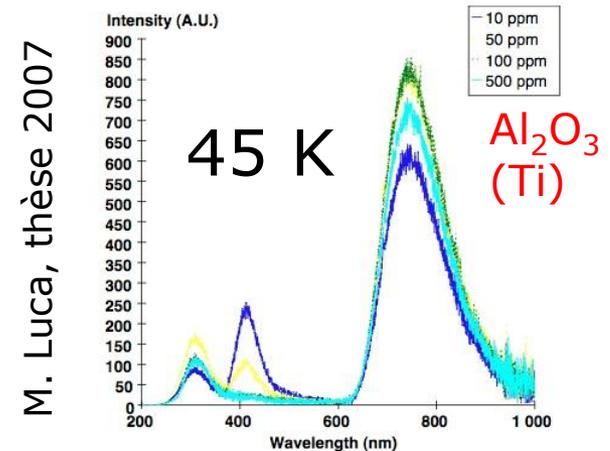
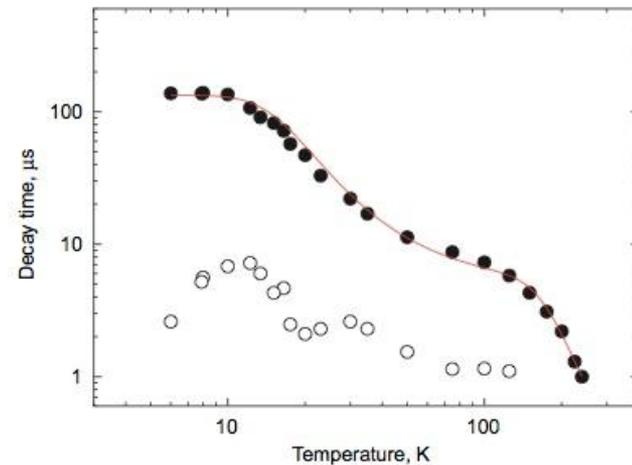
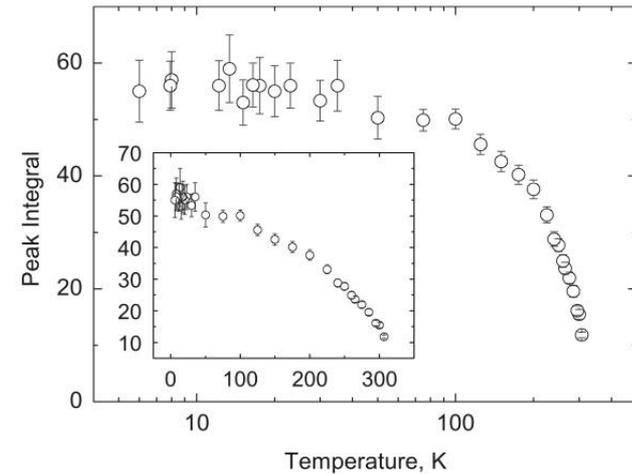
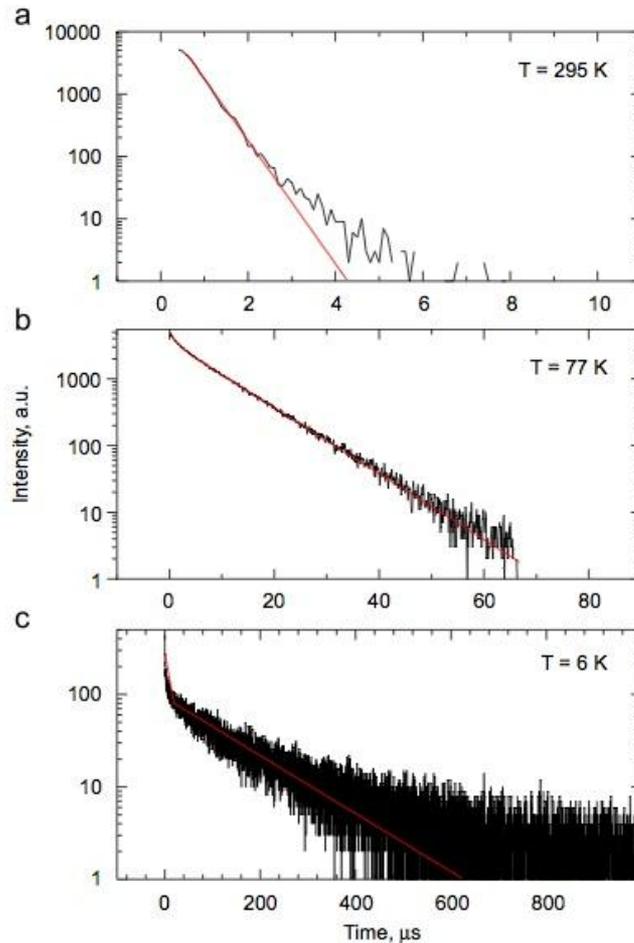


Figure 4.18: Scintillation spectra of $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ crystals with a Ti concentration of 10, 50, 100 and 500 ppm at 45 K.

Luminescence vs Température: exemple du BGO

- Gironnet et al, NIM A 594 (2008) 358 (+ M.A. Verdier, thèse (2010))



- Identification de la Matière Noire: défi scientifique majeur
- Recherche directe: un des 3 piliers incontournables
 - Méthode simple, qui se complique à cause du fond
 - Compétition technologique des méthodes de rejet de fond
 - Leader actuel (pour l'instant): XENON
- Perspectives détecteurs cryogéniques: massifier, et jouer de l'atout « résolution plus fine »
 - Scintillation/chaleur: besoin de réduire les fonds
 - Ionisation/chaleur: exploiter présente nouvelle génération
« Interdigit »: FID 40 kg (EDELWEISS), iZIP 10 kg (CDMS)
 - Futur: EURECA, SuperCDMS: 100kg -> 1 tonne, pour la compétition avec XENON 1t, DARWIN 5t, ...