
Les recherches de matière noire sous forme de WIMPs

Etat des lieux

Eric Armengaud - CEA / IRFU

21 septembre 2012



Plan de l'exposé

- A - Qu'est-ce que la matière noire ?
 - Rappels de cosmologie
 - Les modèles possibles de matière noire
 - Un cas d'école : les WIMPs

- B - Recherche de WIMPs par détection directe
 - Principes de détection
 - Bolomètres à ionisation en Germanium (EDELWEISS-CDMS) : état des lieux et derniers résultats
 - TPCs double phase au Xenon (XENON100) : état des lieux et derniers résultats
 - Les anomalies «WIMPs de basse masse»

A - Qu'est-ce que la matière noire ?

- ❑ Rappels de cosmologie
- ❑ Les modèles possibles de matière noire
- ❑ Un cas d'école : les WIMPs

Le modèle standard de la cosmologie

Un large ensemble d'observations décrites par un modèle simple

Hypothèses fortes :

- *Relativité Générale valable aux grandes échelles / aux temps lointains*

- *Contenu de l'Univers = champs connus (baryons etc)*

+ *d'autres encore inconnus*

matière noire, énergie noire, inflaton, ...

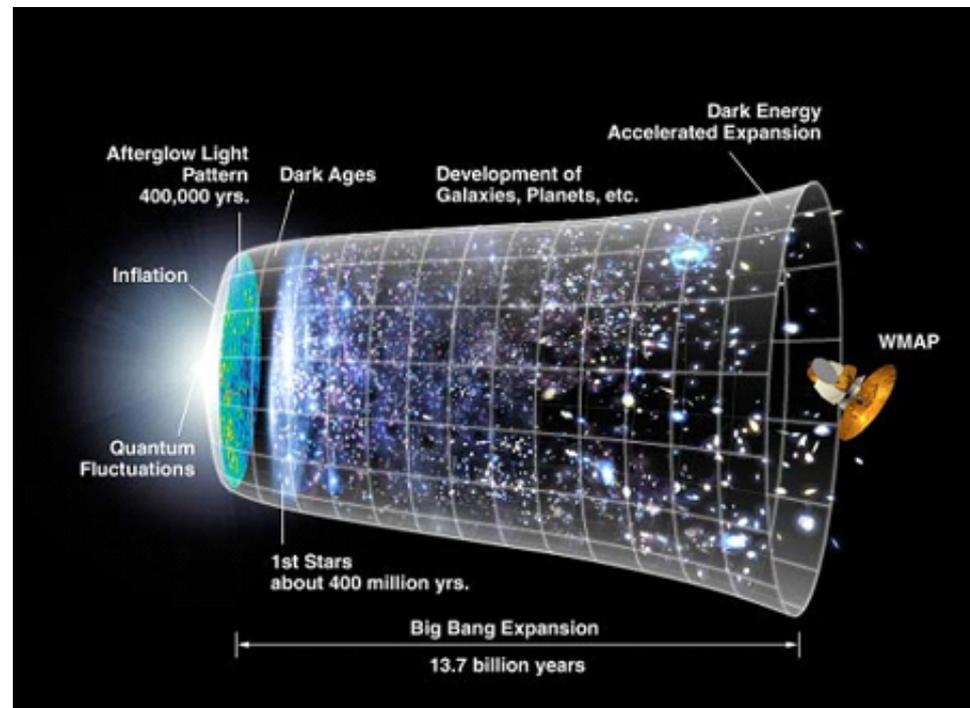
Scénario admis :

- plasma primordial, inflation, baryogénèse/transition électrofaible, transition QCD, nucléosynthèse primordiale

- découplages progressifs: gaz de « particules reliques » stables (neutrinos, photons = CMB, matière noire...)

- formation gravitationnelle des structures

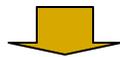
- intervention de l'énergie noire



Où l'on a besoin de matière noire (1)

Le « fit global » Λ CDM

Fluctuations du CMB, SN-Ia, Amas de galaxies
Spectre de puissance des grandes structures (dont BAO)
Abondances primordiales, ...



1) Présence d'une masse non-baryonique

$(\Omega_M=0.26) \neq (\Omega_{\text{baryons}}=0.04)$

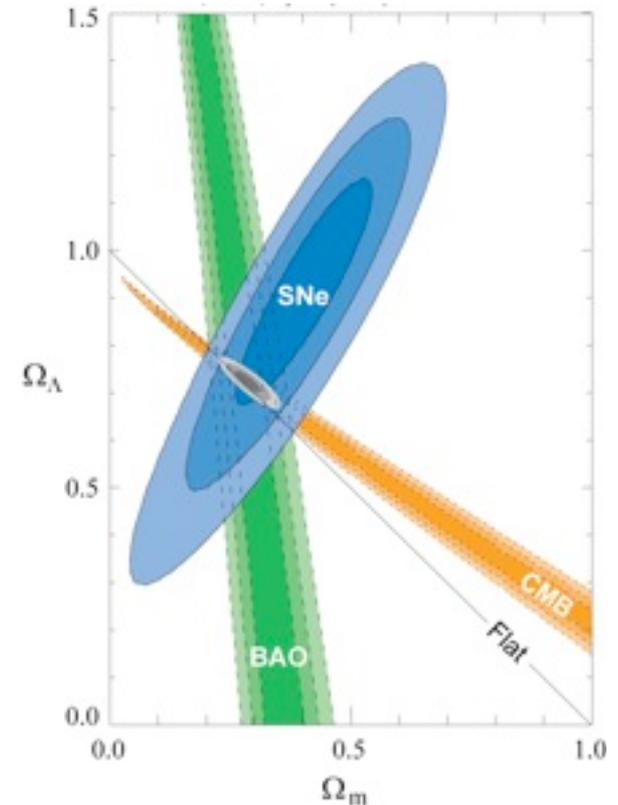
- intensité relative des pics acoustiques dans le CMB
- observation du BAO
- ajustement des mesures d'abondance au modèle de nucléosynthèse donne Ω_{baryons}

2) La matière noire est non couplée aux photons et « froide »

- spectre de puissance des galaxies + observation de galaxies à grand z , comparé aux modèles de formation des grandes structures
- matière noire « tiède » aussi possible, « chaude » exclue

• Pas de particule « Modèle Standard » correspondante

- cas des neutrinos : très contraint ($\Sigma m_\nu \leq \text{eV}$; $0.001 \leq \Omega_\nu \leq 0.05$; matière noire « chaude »)



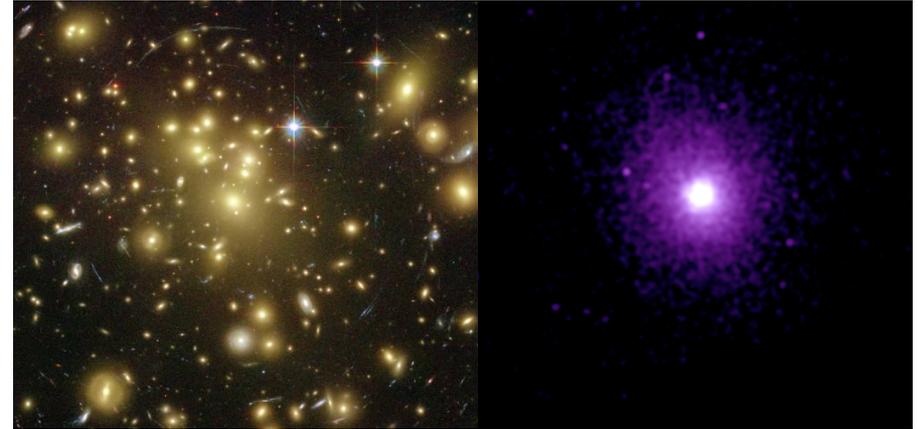
Où l'on a besoin de matière noire (2)

Les propriétés des objets astrophysiques «proches»

Abell 1689 (visible:galaxies ; X:gaz intergalactique)

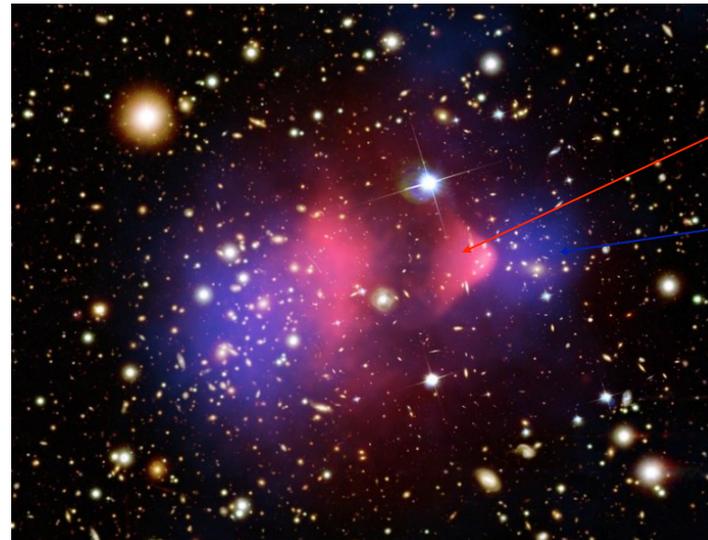
- Amas de galaxies

- mesure M_{tot} : distribution en vitesses des galaxies, température du gaz, lentille gravitationnelle sur objets en arrière-plan
- $M_{\text{galaxies}} \sim 0.02 M_{\text{tot}}$
- $M_{\text{gaz}} \sim 0.1 M_{\text{tot}}$



- Collision de 2 amas : le « bullet cluster »

La masse manquante n'interagit pas lors de la collision, contrairement au gaz



gaz
(émission X)
masse
reconstruite
(lensing)

Où l'on a besoin de matière noire (2)

Les propriétés des objets astrophysiques «proches»

- Dynamique des galaxies

- spirales : courbe de rotation
- elliptiques : dispersion des vitesses
- galaxies naines, satellites ...

- **Nécessite en général masse**

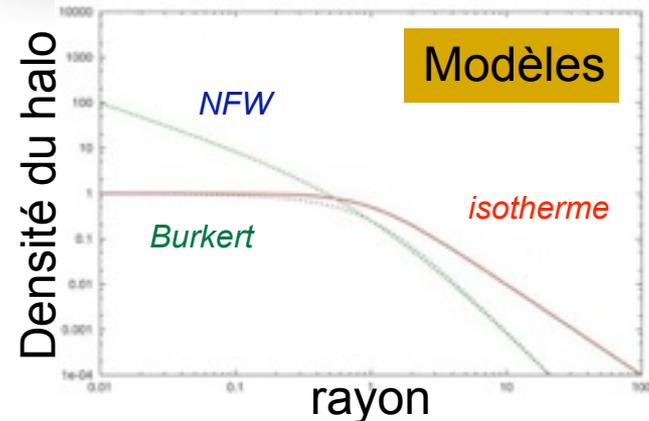
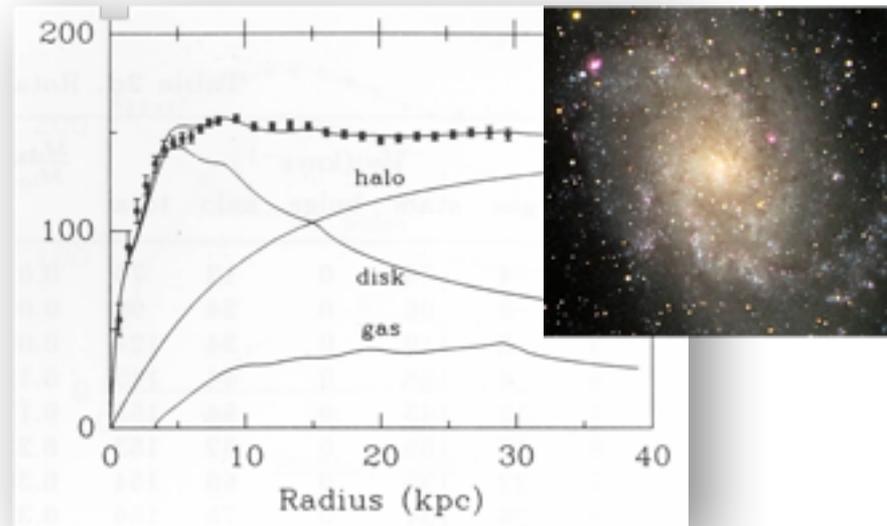
supplémentaire (ou modif. loi de la dynamique gravitationnelle)

«Modèle» CDM (simulations):

- halo de matière noire sphérique et étendu; densité = $f(r)$
- distribution de vitesses \sim maxwellienne
- observations et prédictions délicates au centre du système (« core » vs « cusp »)
- présence de « clumps » = sous-structures de forte densité

NB: Physique complexe à modéliser (baryons...)

Lois d'échelles observées, pas forcément bien comprises dans le cadre du modèle CDM

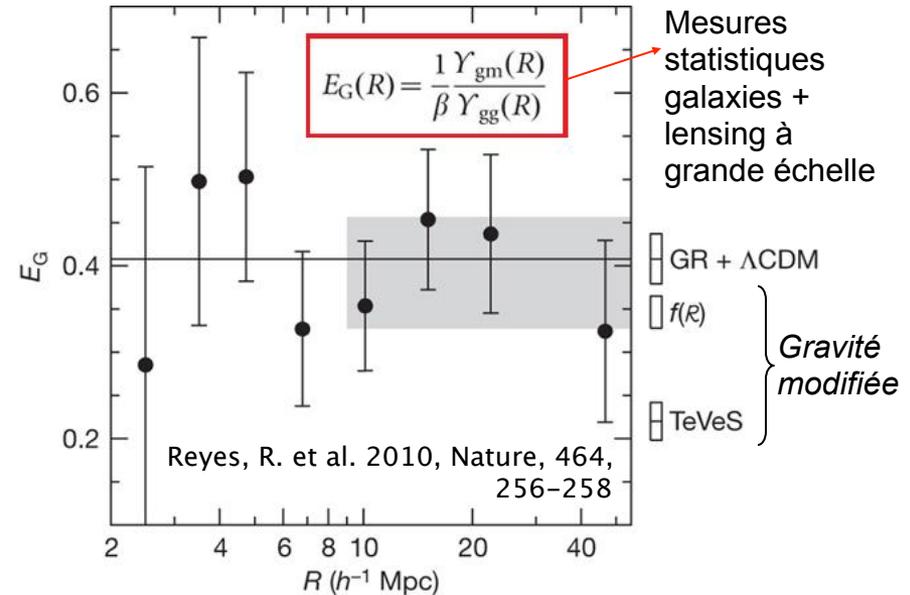


Quelle est la nature de la matière noire ?

« Un champ supplémentaire »

1. Gravité modifiée ?

- A l'échelle galactique, modèle non-relativiste « MOND »
- Théories relativistes : ajout d'un scalaire/vecteur/...
- Contraintes fortes par l'ensemble des observations cosmologiques ⇒ pas de modèle émergeant pour l'instant
- Les futurs tests de la RG aux grandes échelles seront déterminants



2. Nouvelles particules ?

- Le Modèle Standard est un modèle certainement effectif
- Difficultés théoriques (paramètres libres, fine-tuning, etc..) en de nombreux points
- Beaucoup d'extensions possibles existent
- **De nombreuses extensions prédisent des particules supplémentaires ayant les bonnes propriétés pour former la matière noire**



Concentrons-nous sur cette hypothèse...

Constituants de la matière				Bosons de jauge			
	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille	Interaction forte	Interaction électro-magnétique	Interaction faible	
Quarks	Up (u) (0.03 GeV)	Charm (c) (1.3 GeV)	Top (t) (174 GeV)	Gluons (g)	Photon (γ)	Bosons W ⁺ (80.4 GeV) W ⁻ (80.4 GeV) Z ⁰ (91.2 GeV)	Boson de Higgs (H ⁰) (125 GeV)
	Down (d) (0.06 GeV)	Strange (s) (0.14 GeV)	Bottom (b) (4.3 GeV)				
Leptons	Electron (e ⁻) (0.0005 GeV)	Muon (μ^-) (0.106 GeV)	Tau (τ^-) (1.7 GeV)				
	Neutrino (ν_e) électronique (≈ 0 GeV)	Neutrino (ν_μ) muonique (≈ 0 GeV)	Neutrino (ν_τ) tauique (≈ 0 GeV)				

Quelques candidats CDM plausibles à l'heure actuelle

Les axions

- Origine de l'absence de violation de symétrie CP pour l'interaction forte?
- Solution en introduisant un *champ pseudo-scalaire similaire au pion*
- « Axion-like particles » souvent prédites dans les théories de cordes
- Axion bon candidat cold dark matter pour $m_a \sim \mu\text{eV} - \text{meV}$
- *Détection directe possible (expérience en cours ADMX)*

Le neutrino stérile

- Propriétés des neutrinos très peu connues: fermions de Dirac/Majorana? Quelles masses? Trois familles ou plus ? ...
- Il y a de la place pour un *neutrino non sensible à l'interaction faible*
- Bon candidat *warm dark matter* pour certaines gammes de masse ($\sim\text{keV}$)

Particules associées à la physique électrofaible

- Lois physiques à l'échelle d'énergie de la brisure de symétrie électrofaible?
- boson de Higgs détecté, «standard-like»
- problèmes de fine-tuning (naturalness) dans le modèle standard
- *But majeur du LHC après le Higgs...*
- ... *dont les résultats restent négatifs à ce jour...*

Exemples:

• Supersymétrie

- symétrie boson-fermion
- très nombreux modèles et paramètres libres

- bons candidats matière noire froide: *neutralino (détectable), gravitino, axino*

• Dimensions supplémentaires compactifiées

- bon candidat matière noire froide : B(1) (*détectable*)

• Autre chose ? (little higgs, ...)

La matière noire sous forme de WIMPs

- **Weakly Interacting Massive Particles « χ »**
 Masse ~ 10 GeV à 1 TeV
 Sensible aux interactions faibles
- **Prédites dans plusieurs modèles de nouvelle physique électrofaible (pas systématiquement)**
 « Lightest Supersymmetric Particle »
 « Lightest Kaluza-Klein Particle »

• Argument fort : le 'miracle WIMP'

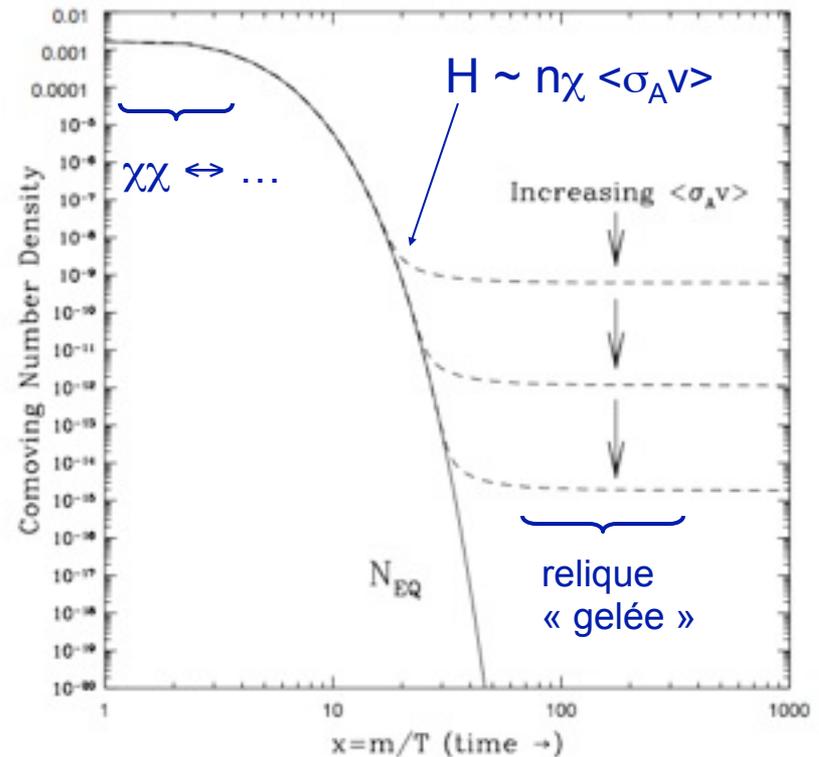
Avec l'hypothèse générique « **relique thermique** », la densité relique peut être estimée facilement et on a l'ordre de grandeur :

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}}{\langle \sigma v \rangle}$$

- Pour les interactions faibles :
 $M \sim \text{GeV} - \text{TeV} \Rightarrow \langle \sigma_A v \rangle \sim 10^{-25/26}$

.. et on a le bon Ω !

- C'est seulement un grossier ordre de grandeur...
- Il existe des candidats matière noire qui sont des reliques non-thermiques...

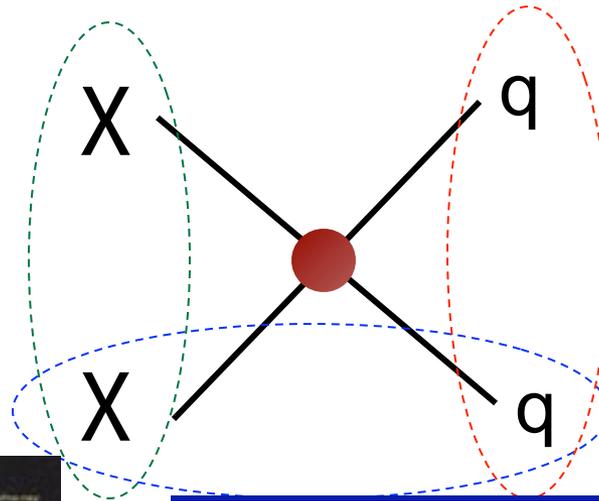


➔ **Concentrons-nous sur cette hypothèse...**

Stratégies de recherche des WIMPs

Détection indirecte

- observation des produits d'annihilation des WIMPs de notre galaxie
- nombreux « observatoires » impliqués

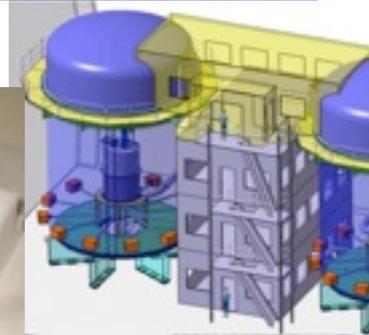
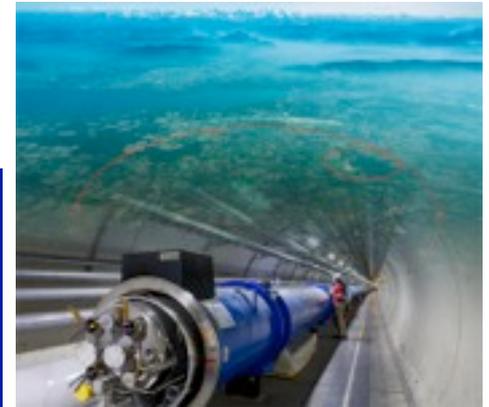


Collisionneurs

- production de WIMPs, détection d'une « énergie manquante »
- LHC en marche
- si signal: ne prouvera pas que c'est bien la matière noire

Détection directe

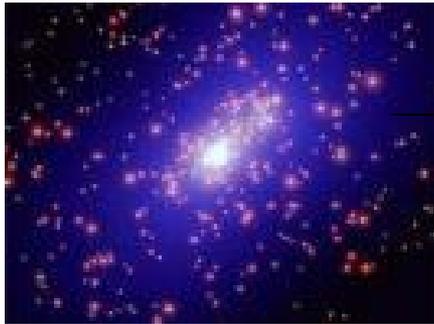
- observation de l'interaction des WIMPs galactiques directement sur un détecteur terrestre
- expériences dédiées, nécessitant une forte R&D détecteurs



B - Recherche de WIMPs par détection directe

- ❑ Principe de détection
- ❑ Détecteurs bolométriques (EDELWEISS-CDMS) : état des lieux et derniers résultats
- ❑ TPCs double phase au Xenon (XENON100) : état des lieux et derniers résultats
- ❑ Les anomalies «WIMPs de basse masse»

Principe de la détection directe des WIMPs



WIMP galactique

vitesse $v \sim 200$ km/s
densité locale ρ_0

Interaction dans un détecteur terrestre

WIMP

θ_r

Dépôt d'énergie
Recul nucléaire E_r

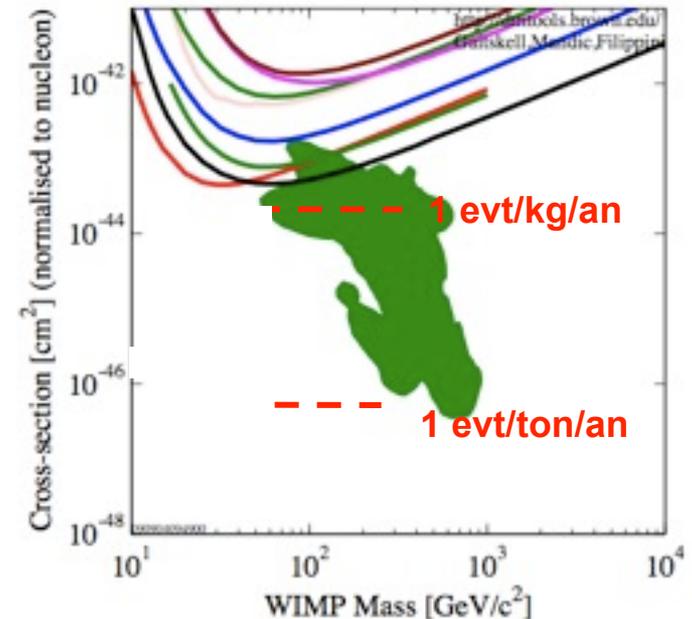
- Paramètres des WIMPs:
 - **masse $m_\chi \sim 10$ GeV à 10 TeV** pour les extensions usuelles du Modèle Standard
 - **Section efficace de diffusion WIMP-nucléon σ** , peu contrainte mais de l'ordre de l'interaction faible

- Diffusion non-relativiste:

$$E_r = \left(\frac{m_\chi v^2}{2} \right) \times \frac{4m_N m_\chi}{(m_N + m_\chi)^2} \times \cos^2 \vartheta_r \sim 1 - 100 \text{ keV}$$

- Taux d'interaction:

$$R \sim \frac{\rho_0 \sigma v}{m_\chi m_N} \sim 0.04 \left(\frac{100}{A} \right) \left(\frac{100 \text{ GeV}}{m_\chi} \right) \left(\frac{\sigma_0}{10^{-8} \text{ pb}} \right) \left(\frac{\rho_0}{0.3 \text{ GeV cm}^{-3}} \right) \left(\frac{v_0}{230 \text{ km s}^{-1}} \right) \text{ kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$$



Théorie : un calcul plus précis

$$\frac{dn_{WIMP}}{dv d^3r} = \frac{\rho_0}{m_\chi} f_1(v) \quad f_1(v) : \text{distribution des vitesses relatives à l'observateur}$$

- Taux par unité de masse de détecteur
- Reculs d'énergie [q^2 ; q^2+dq^2]
- Interaction sur les WIMPs de vitesse relative [v ; $v+dv$]

$$dR = \left(\frac{\rho_0}{m_\chi m_N} \right) v \frac{d\sigma}{dq^2} f_1(v) dv dq^2$$



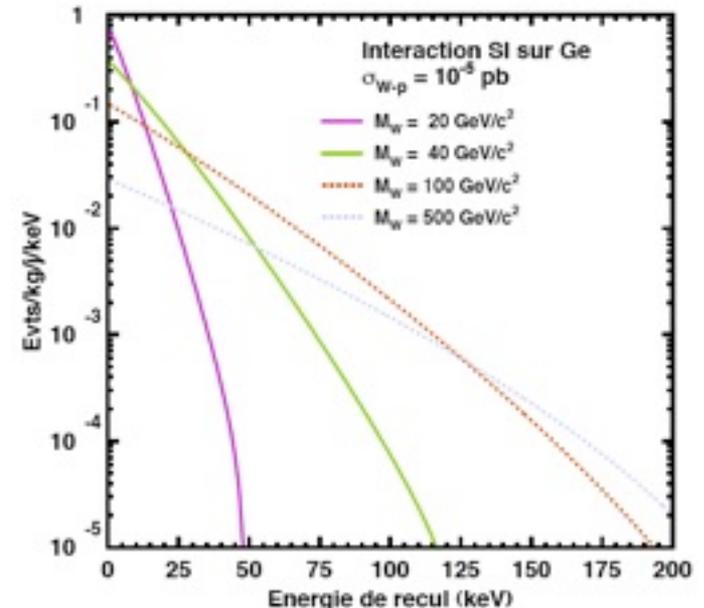
$$\frac{dR}{dE_r} = \frac{\sigma_0 \rho_0}{2 m_\chi m_r^2} F^2(q) \int_{v_{\min}}^{\infty} dv \frac{f_1(v)}{v}$$

Où m_r = masse réduite et $v_{\min} = \sqrt{\frac{m_N E_r}{2 m_r^2}}$
 $F(q)$: facteur de forme nucléaire

- halo maxwellien simple : $f_1 = k \times \frac{v^2}{v_0^3} e^{-v^2/v_0^2}$
- mouvements de la Terre et du Soleil par rapport au halo : $v_e = v_0(1.05 + 0.07 \cos \omega t)$

$$\frac{dR}{dE_r} = \frac{\sigma_0 \rho_0}{4 v_e m_\chi m_r^2} F^2(q) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{v_{\min} + v_e}{v_0} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{v_{\min} - v_e}{v_0} \right) \right]$$

- Spectre ~ exponentiel
- Modulation annuelle ~ 7% du taux d'interactions



Théorie : section efficace de diffusion

- Cas du couplage scalaire (« spin-indépendant ») - le plus favorable

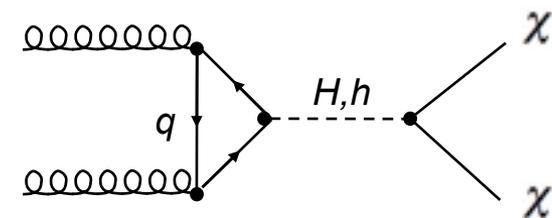
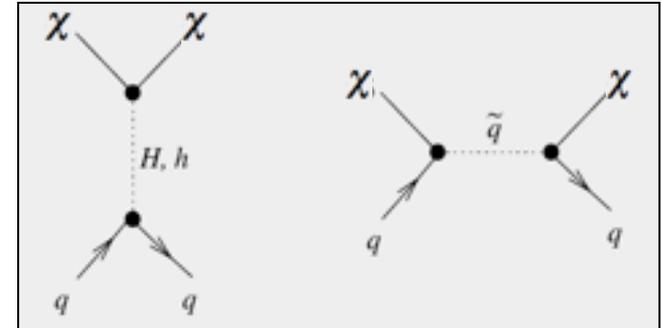
- Lagrangien effectif quark - neutralino pour un modèle de SUSY donné : obtenu par sommation de diagrammes de Feynman, à la limite non-relativiste

$$L_{q\chi} = f_q (\bar{q}q) (\bar{\chi}\chi)$$

- Passage au nucléon : sommation sur les quarks/ gluons (physique hadronique)
- Passage au noyau : prise en compte du facteur de forme (physique nucléaire)

$\Rightarrow \frac{d\sigma}{dq^2} = [Z f_p + (A - Z) f_n]^2 \frac{F^2(q)}{\pi v^2}$

couplages au proton et au neutron *facteur de forme*



- En général $f_p \approx f_n$:

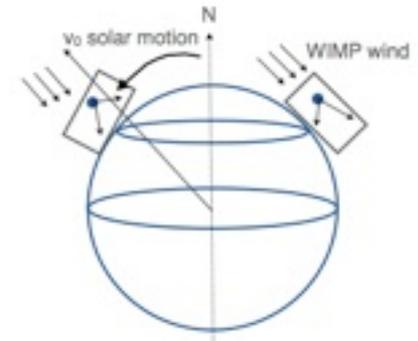
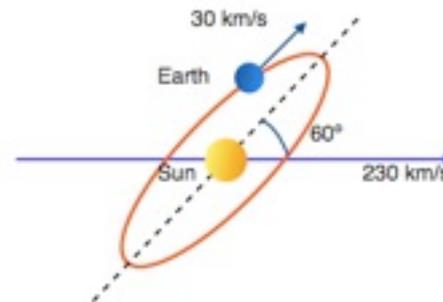
- on peut parler d'une section efficace WIMP-nucléon quel que soit le noyau cible
- la section efficace croît avec la masse (au moins en A^2) : avantage d'un noyau cible lourd

Pratique : spécifications pour un détecteur

- Détecteurs massifs (kg ... tonne[s])
- Bas seuil de détection (reculs \sim quelques keV)
- Réjection de tous les bruits de fond associés à la radioactivité ambiante jusqu'à la sensibilité désirée

Signatures d'une interaction de WIMP :

- **Reculs nucléaires** (pas électroniques)
- **Interaction unique** dans le détecteur (pas de diffusions multiples)
- Interactions **distribuées uniformément** dans le volume du détecteur
- Spectre de recul \sim exponentiel
- Dépendance « en A^2 » en fonction du noyau cible
- Modulation annuelle
- Directionnalité



Pratique : les bruits de fond à combattre

- Radioactivité gamma : matériaux environnant + radioactivité intrinsèque du détecteur
 - Blindage + radiopureté de l'ensemble de l'expérience
 - *Interaction sur le cortège électronique* : **discrimination active** recul nucléaire / électronique
- Radioactivité bêta : environnement proche
 - Interactions à la surface des détecteurs : **mesure de la position** de l'interaction
- Diffusion de neutrons rapide : générés par les interactions de muons cosmiques et la radioactivité environnante ; reculs nucléaires
 - **Expériences en site souterrain** : flux de cosmiques diminué
 - **Efforts sur la radiopureté** de l'ensemble de l'expérience
 - Vêto muons
 - **Mesure de la multiplicité** des interactions (détecteur segmenté)

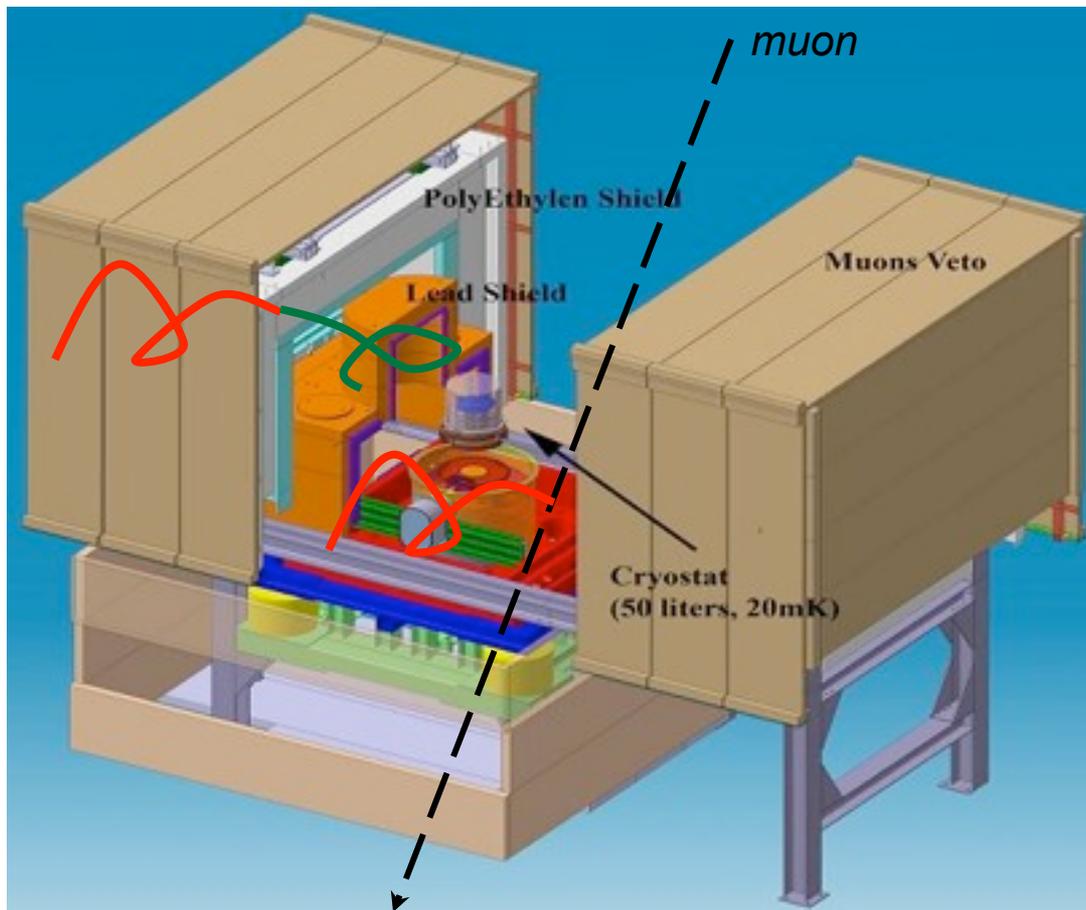


- A) Réjection passive des bruits de fond : blindages + utilisation de laboratoires souterrains
- B) Réjection active : R&D importante pour mettre au point des détecteurs « intelligents » capables de tagger les WIMPs par rapport aux radioactivités rencontrées

Détecteurs bolométriques (EDELWEISS-CDMS)

Installation de l'expérience EDELWEISS-II

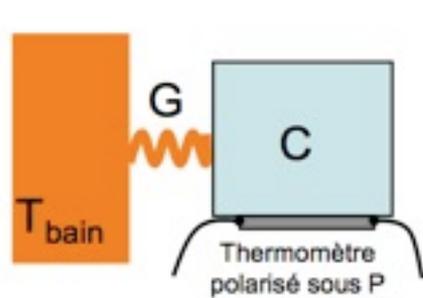
- **Edelweiss** : collaboration européenne (initialement française)
- Au Laboratoire Souterrain de Modane, depuis ~ 2006
- Le coeur de l'expérience = détecteurs + cryostat



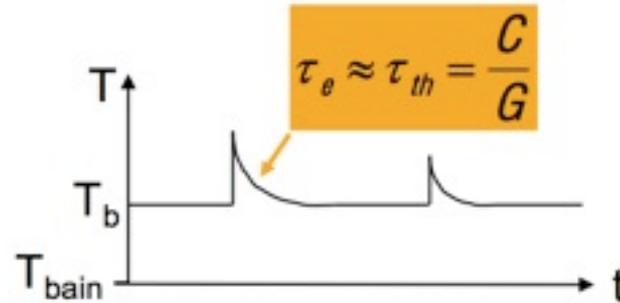
- En salle blanche
- Circulation d'air déradonisé autour des détecteurs
- Blindage Pb : fond gamma
 - Pb archéologique au voisinage des détecteurs
- Blindage polyéthylène (matériau hydrogéné): ralentit les neutrons rapides créés par la roche ou les cosmiques
- Vêto muons (scintillateur plastique) : taggue les muons résiduels pénétrant à l'intérieur du blindage PE
 - ils sont susceptible de créer des neutrons rapides dans le blindage

- neutron rapide
- neutron ralenti (thermalisé)

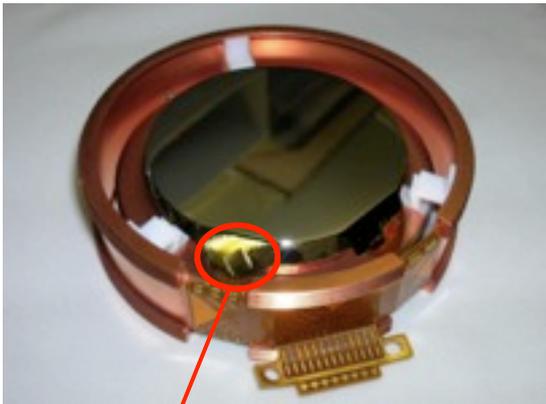
Mesure bolométrique de l'énergie déposée



C = capacité thermique
G = fuite thermique
 $P = G (T - T_{\text{bain}})$



Dépôt d'énergie E_0 dans
l'absorbeur : $\Delta T = E_0/C$



thermomètre NTD

EDELWEISS
Absorbeur ~ 400g

- Point de fonctionnement @ $T \sim 20$ mK (EDELWEISS):
 $C(T) \sim T^3$ (isolant) \Rightarrow gain en sensibilité
- Résolution théorique limitée par les fluctuations de l'énergie interne du détecteur
- Applications astroparticules/astrophysique :
 - **Matière noire**, double beta, astro X... : mode « impulsif » (mesure une énergie déposée)
 - CMB, IR, ... : mode « continu » (mesure une puissance moyenne)
- Différentes technos pour les thermomètres
 - EDELWEISS : **senseur NTD = phonons thermiques**
 - CDMS : sensible aux phonons hors-équilibre

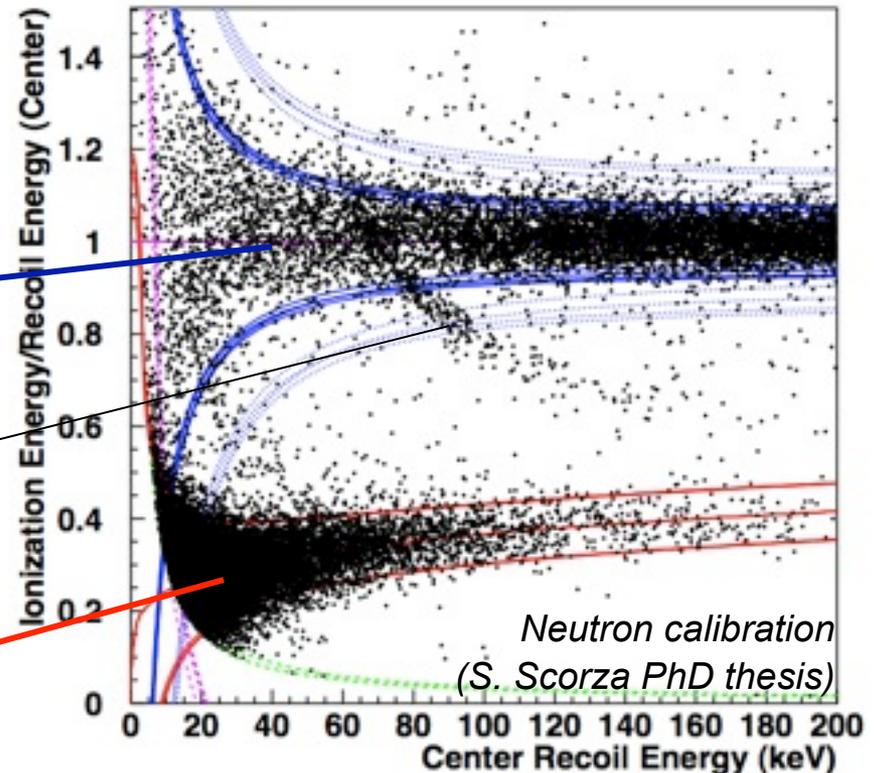
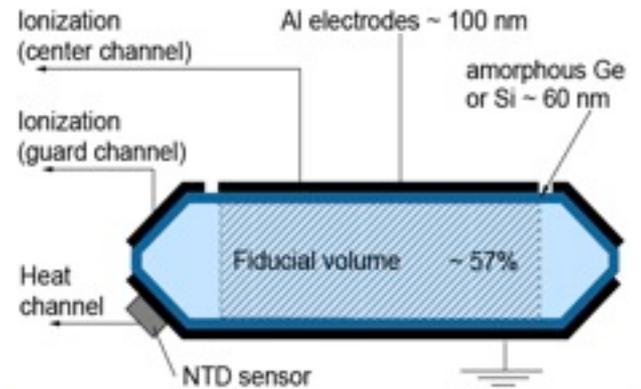
Détecteurs EDELWEISS-I

- Bolomètres en Germanium
 - Mesure ionisation @ quelques V/cm
 - Mesure chaleur (NTD) @ 20 mK:
 - signal chaleur = $k \times$ énergie déposée + effet Luke
 - *Variable discriminante entre reculs électroniques (ER) et nucléaires (NR) :*
 - « Q » = ionisation/énergie de recul
- ⇒ Séparation totale entre ER and NR

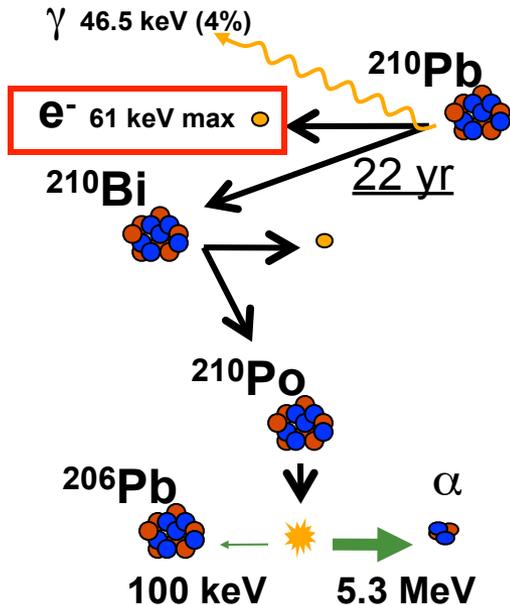
reculs électroniques

diffusion inélastique
de neutrons

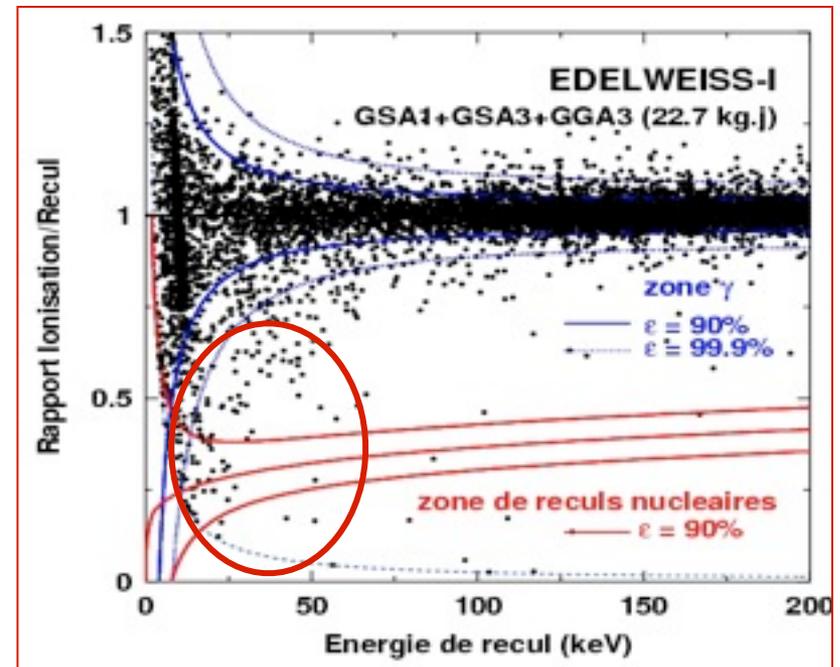
reculs nucléaires



Le problème des interactions de surface



- Source irréductible de radioactivité locale : rayons beta du ^{210}Pb (issu du Radon présent dans l'air)
- Une interaction beta = recul électronique, à la surface du détecteur (profondeur de pénétration ~ qqes microns)
 \Rightarrow **Collection de charge incomplète sur les electrodes** : impossible de discriminer des reculs nucléaires



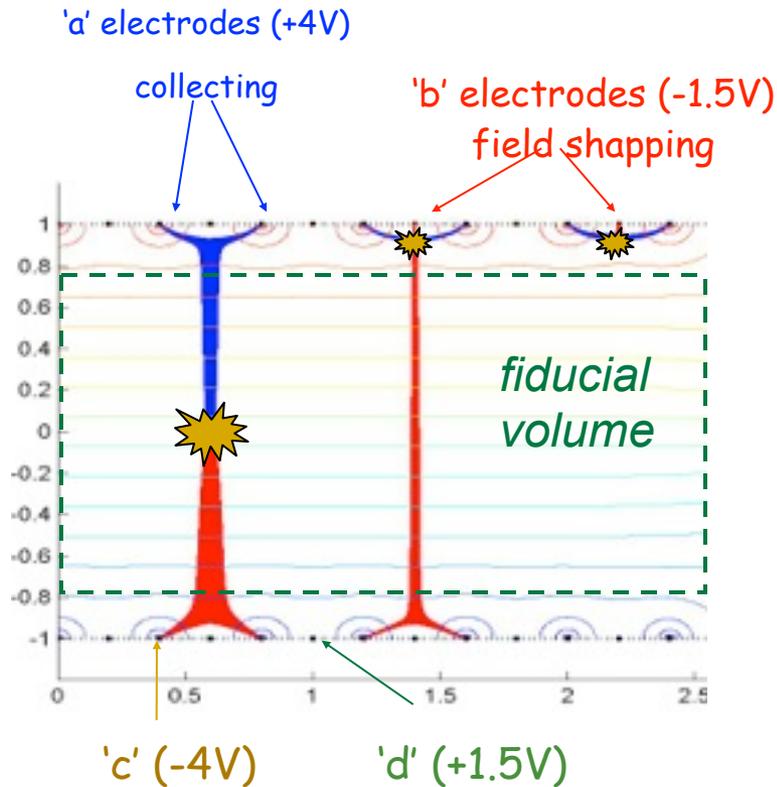
Run de fond Edelweiss - 2003

Sensibilité limitée par le fond beta

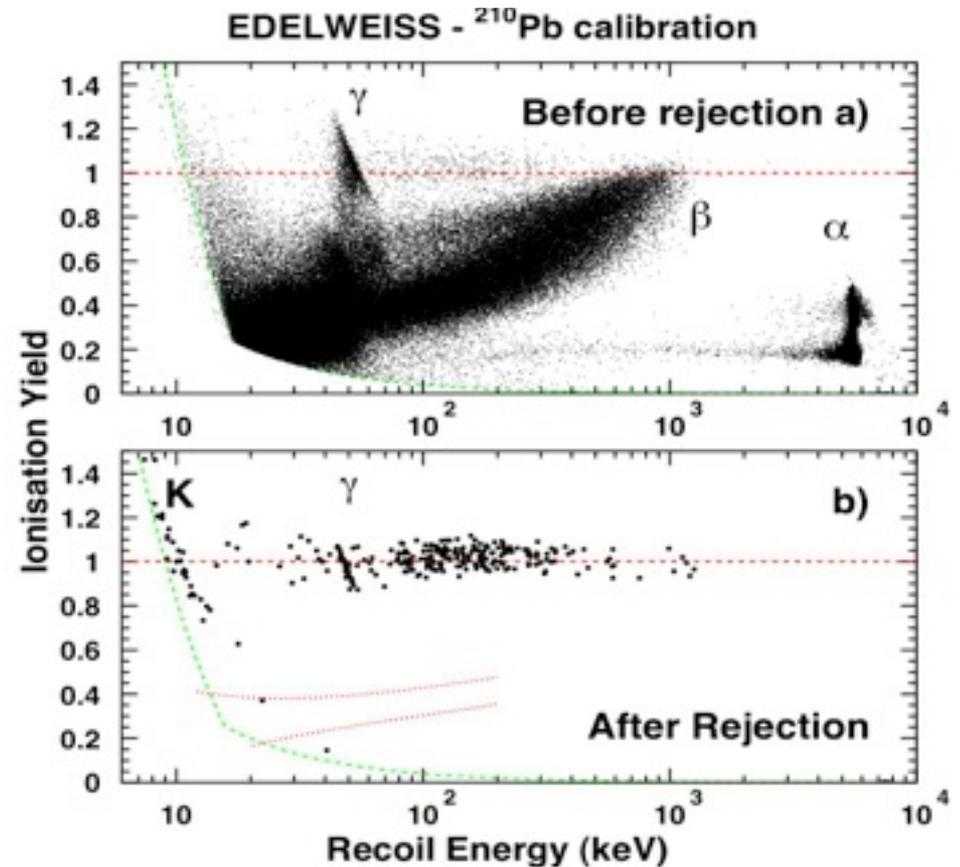
Quantitative bckgd understanding published 2007

S. Fiorucci et al. - Astropart. Phys. 28:143-153.2007 ([astro-ph/0610821](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0610821))

Réjection des betas par la voie ionisation (EDELWEISS-II)



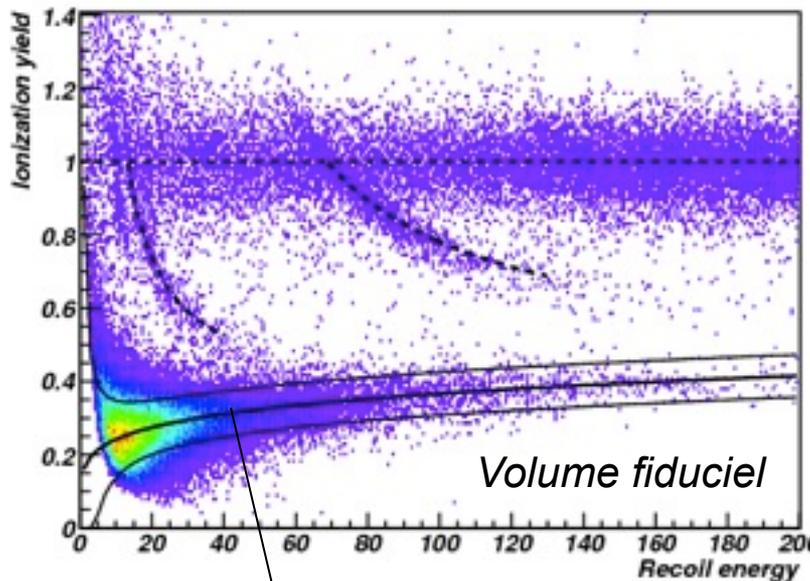
- Même thermomètre qu'EDELWEISS-I
- Modifie le champ E au voisinage des surface grâce à des électrodes « interdigité »
- Utilise les signaux 'b' et 'd' comme véto



- R&D démarrée 2007
- Détecteurs validés en conditions réelles 2008
- Run de physique 2009-2010

Calibrations des détecteurs EDELWEISS-II

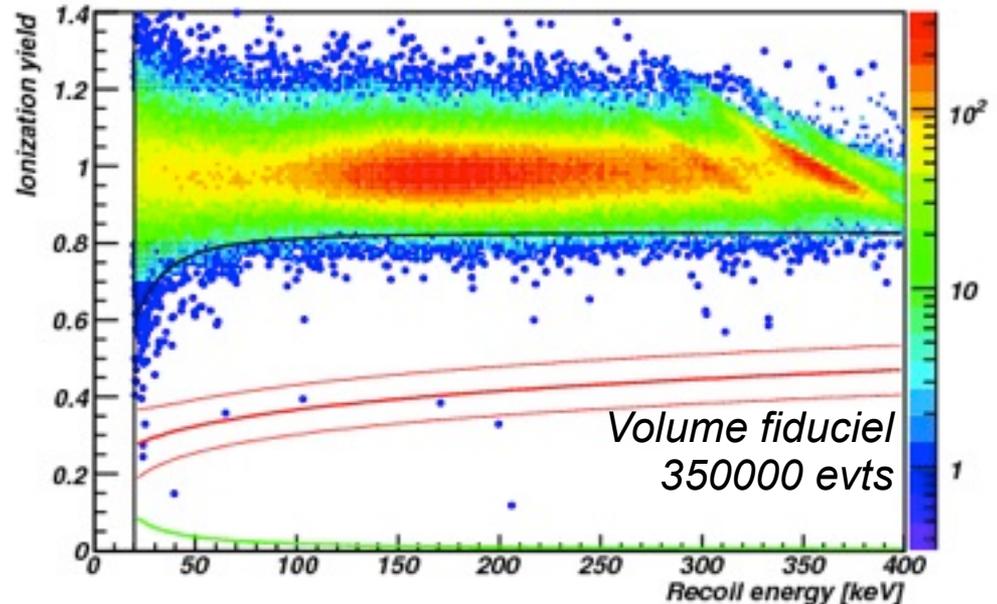
Neutrons (signal NR)



région à 90% CL. pour les NR :

- confirmation haute stat de $Q = 0.16 E_r^{0.18}$ de $<10\text{keV}$ à 200keV
- cross-check des effets de la résolution sur la bande NR
- efficacité totale aux NRs bien en-dessous de 20keV

Gamma-rays (fond ER)



- tous détecteurs stackés, même analyse/coupures que pour les données de physique
- évts anormaux observés:
 - pour $20 < E < 200\text{keV}$ ~ réjection $(3 \pm 1) \times 10^{-5}$
 - mécanisme possible identifié

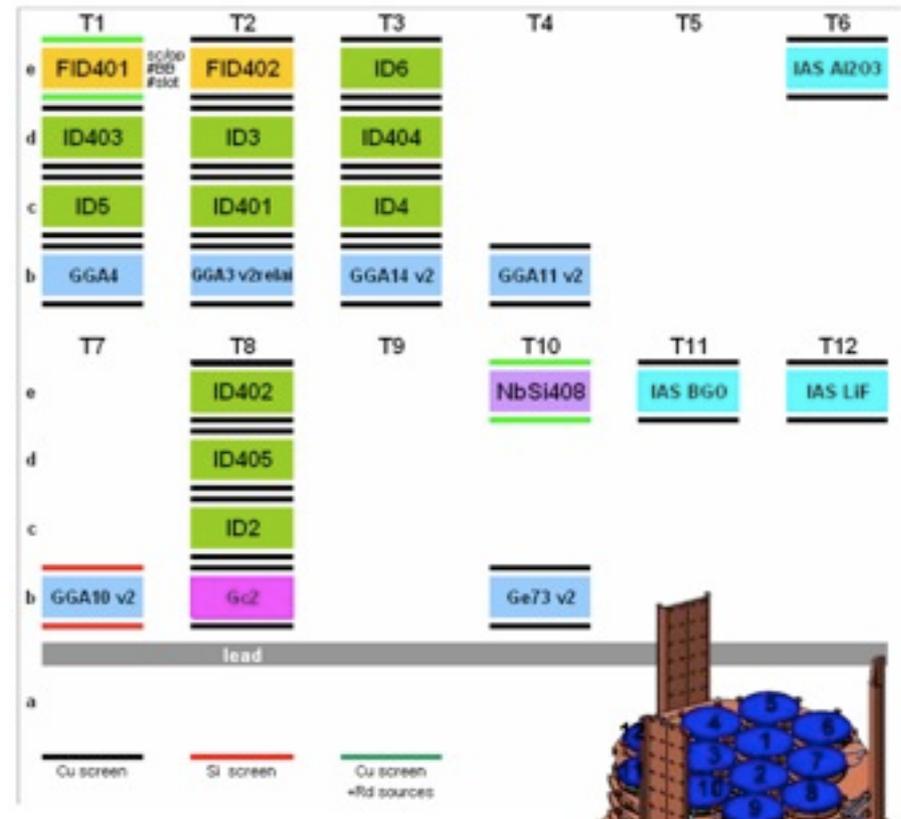
Recherche de WIMPs EDELWEISS-II : 10 détecteurs de 400g

~ 20 kg.jours en 2008 pendant les runs de validation (2 détecteurs)

Run de physique Avr 2009 - Mai 2010 (10 détecteurs) : ~ 360 kg.d

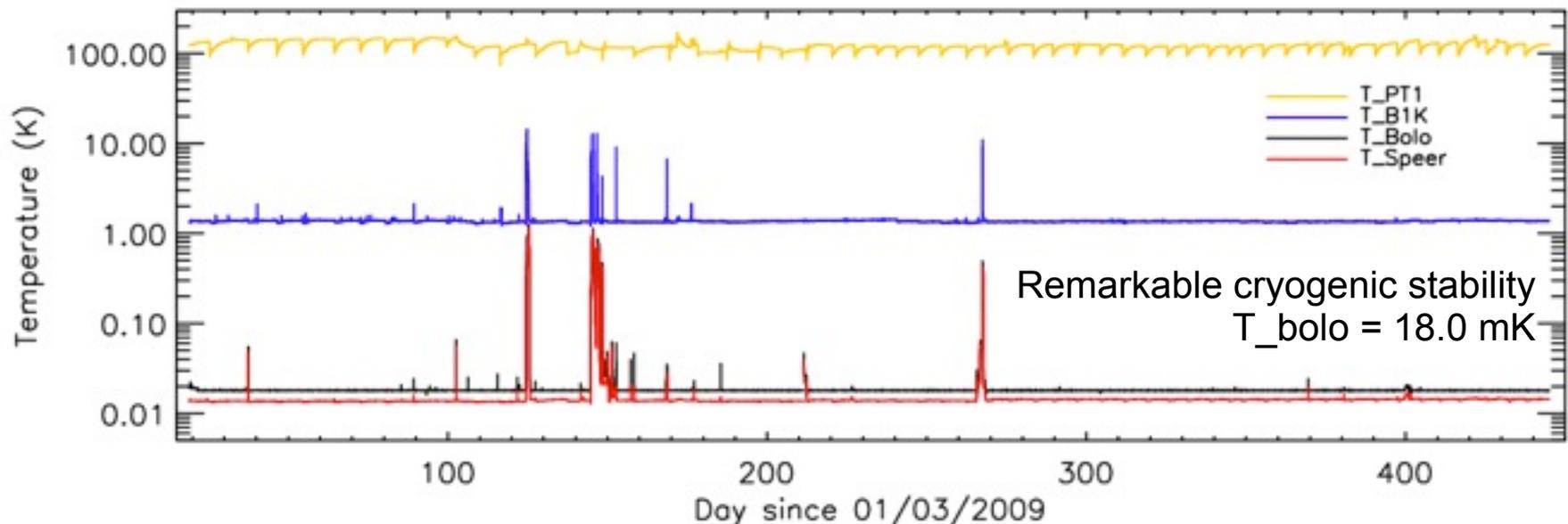
- premiers 6 mois: **Phys. Lett. B687 (2010) 294-298**
- analyse finale: **Phys. Lett. B702 (2011) 329-335**

- Toutes voies chaleurs fonctionnent
- 55/60 voies ionisation fonctionnent
 - *redondances entre voies: tous les détecteurs peuvent être utilisés (d'après les calibrations)*



Recherche de WIMPs : procédure

- Trigger online sur pulses de chaleur
- Deux processings indépendents, utilisant un filtrage optimal des données chaleur et ionisation
- Réjection des périodes bruyantes : 17% perte d'exposition
 - rejette FWHM chal < 2.5 keV, ion_fiducielle < 2 keV, ion_garde < 2.5 keV*
- Réjection des pulses mal reconstruits (chi2) : 2.7% perte efficacité
- Sélection volume fiduciel (160g)
- Réjection coincidences + veto muon ⇒ **427 kg.d**
- Réjection gamma 99.99% + sélection bande NR à 90% + seuil à 20 keV
 - ⇒ **384 kg.jours d'exposition avec efficacité 98.3% au seuil**



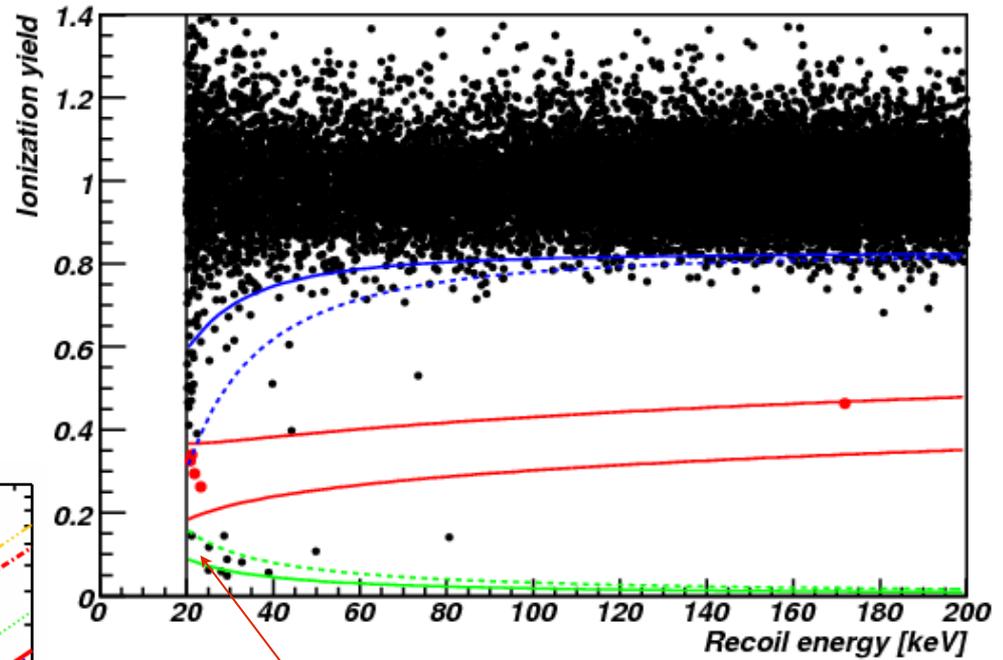
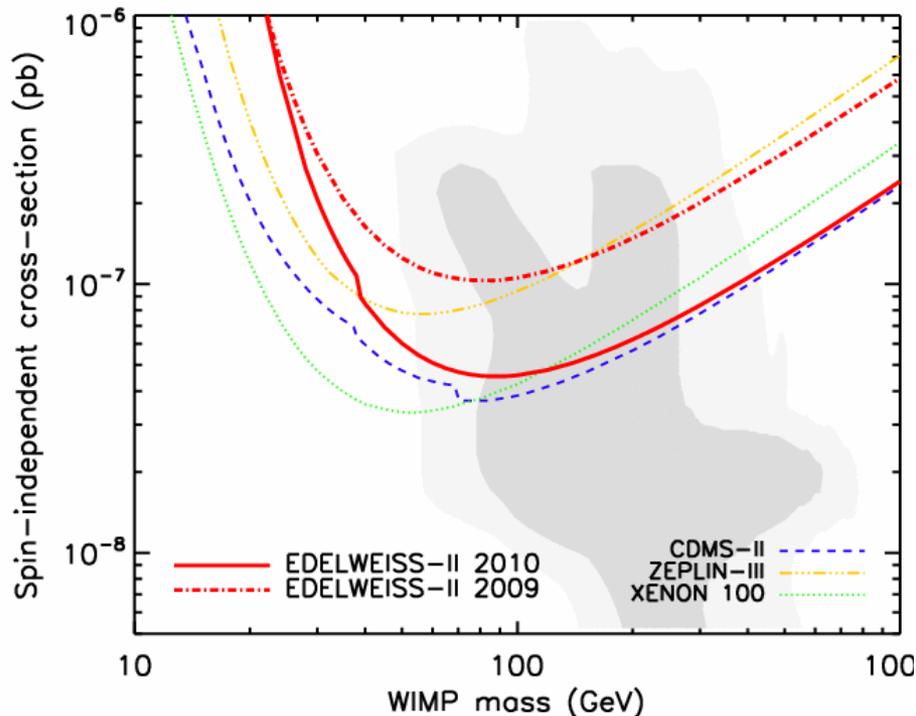
Bruits de fond attendus

- *Gamma:* ^{133}Ba calib rejection x observed bulk γ <0.9
(3×10^{-5}) (18000)
- *Beta:* β source rejection x observed surface evts <0.3
(6×10^{-5}) (5000)
- *Neutrons from μ 's:* μ veto efficiency x observed muons <0.4
(meas. > 92.8%) (0.008 evts/kgd)
- *Neutrons from rock:* measured neutron flux x Monte Carlo simu <0.1
MC cross-check with outside strong AmBe source
- *Neutrons from Pb+PE+Cu+structure:* measured U limits x Monte Carlo simu <0.2
- *Other neutrons from within the cryostat (cables..)* <1.1

Fond estimé pour l'ensemble du run WIMPs : 3 événements

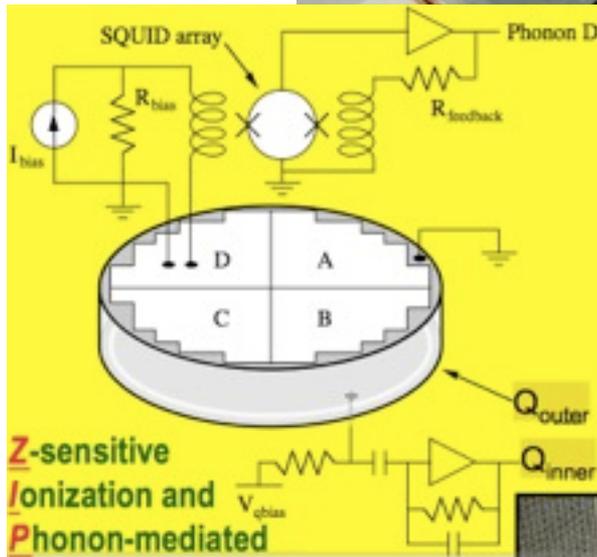
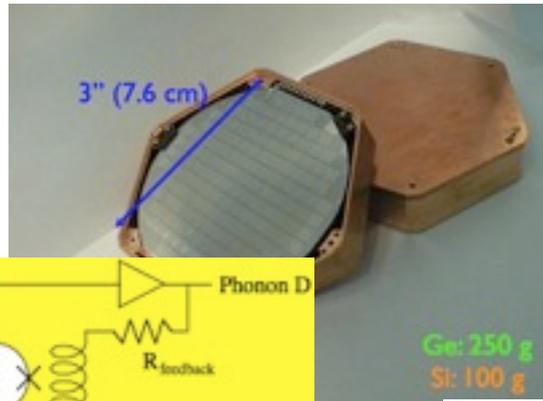
Résultats d'EDELWEISS-II

1 an de prise de données en continu
avec 10 détecteurs (2009-2010)

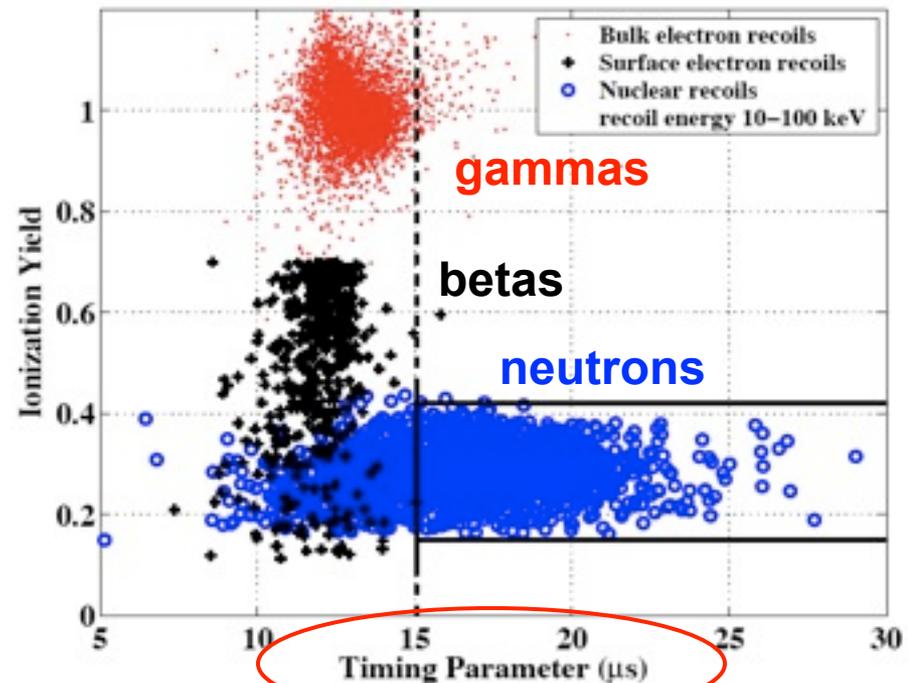


Zone de signal reculs nucléaires :
- 5 événements « candidats WIMP »
- Bruit de fond attendu ~ 3

CDMS : réjection des événements de surface avec les phonons



- Capteurs mesurant les phonons thermiques et athermiques, avec une division complexe en cellules \Rightarrow reconstruction partielle de la position de l'interaction (phonon athermique plus rapide pour les interactions de surface)

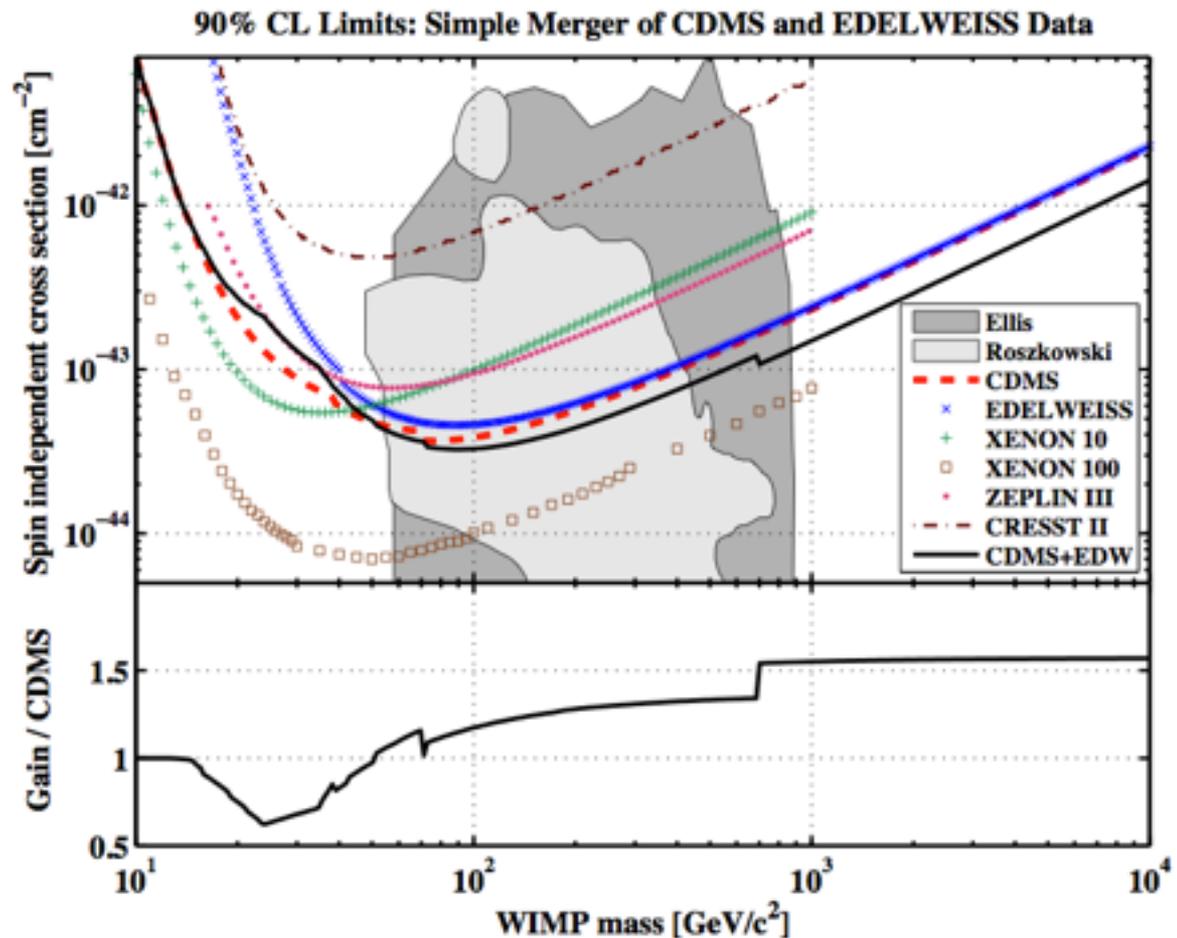


- Variable de discrimination additionnelle : réjection des betas au prix de 50% de perte d'efficacité

Analyse combinée EDELWEISS-II + CDMS-II

- L'utilisation du même noyau cible permet une combinaison simple des données
- Procédure de combinaison des données choisie avant analyse
 - EDW: 384 kg.d, [20-200keV], 5 evts
 - CDMS: ~379 kg.d, [~10-100keV], 4 evts
- D'autres méthodes ont aussi été testées

gain ~50% à masse de WIMP élevée.



Phys. Rev. D 84, 011102 (2011).

Projet en cours : EDELWEISS-III

Détecteur «FID800» : masse et sensibilité accrues :

- cristaux de 800g
- deux senseurs NTD par détecteur
- électrodes interdigitées sur toute la surface : plus de région «garde», volume fiduciel $\sim 75\%$

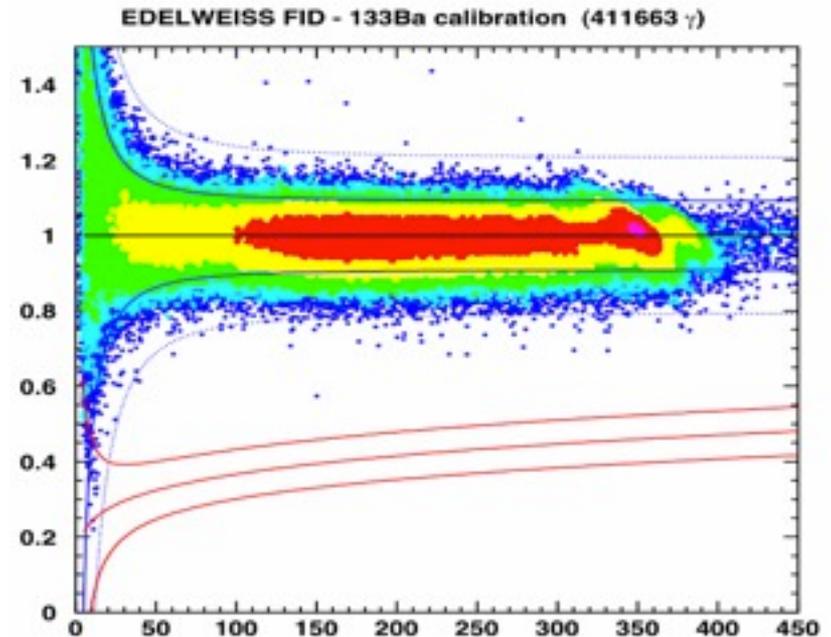
■ Infrastructure : Upgrades du câblage, électronique froide, cryo, acquisition et blindages **au sein du setup EDW-II**

- Seuils plus bas grâce aux bruits réduits
- Bruit de fond neutrons réduit : blindage additionnel interne de PE

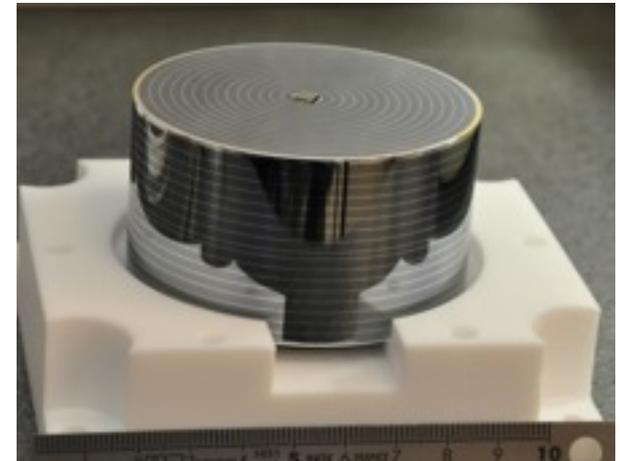
■ Détecteurs : ~ 40 bolomètres FID800 en cours de fabrication: **24 kg fiduciel [\sim Xenon100]**

⇒ Vise sensibilité à $\sim 10^{-9}$ pb

- Côté US : développement techno «iZIP»
- Phase 150kg-1tonne : projets Eureka / SuperCDMS



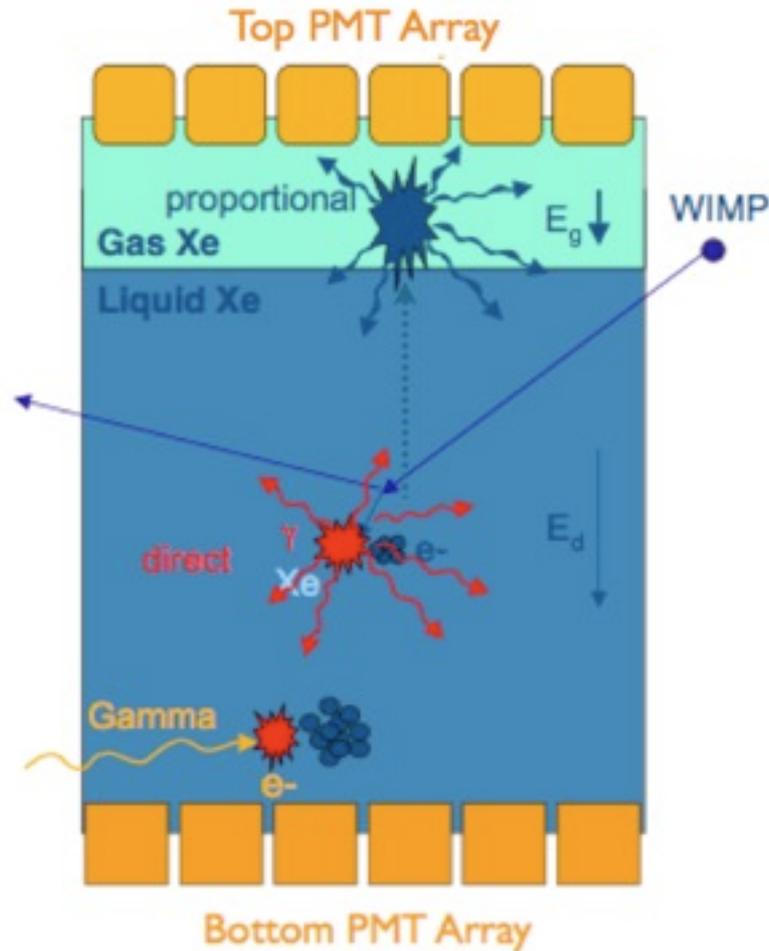
Amélioration de la réjection gamma par rapport à EDELWEISS-II



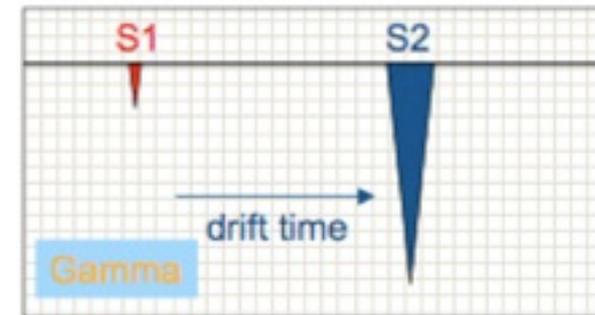
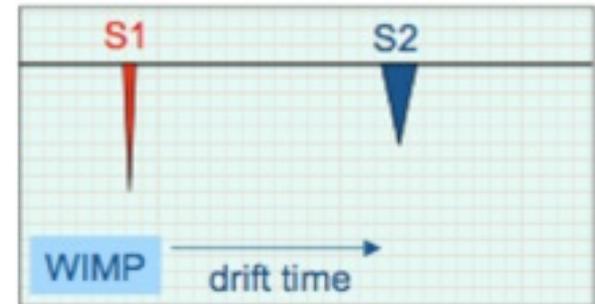
TPC diphasique au Xenon liquide (XENON100)

Principe de la TPC à deux phases au gaz noble liquéfié (Xenon / Argon)

Time Projection Chamber



« S1 » = lumière directe, scintillation
« S2 » = lumière émise au passage des électrons à l'interface liquide/gaz, ionisation

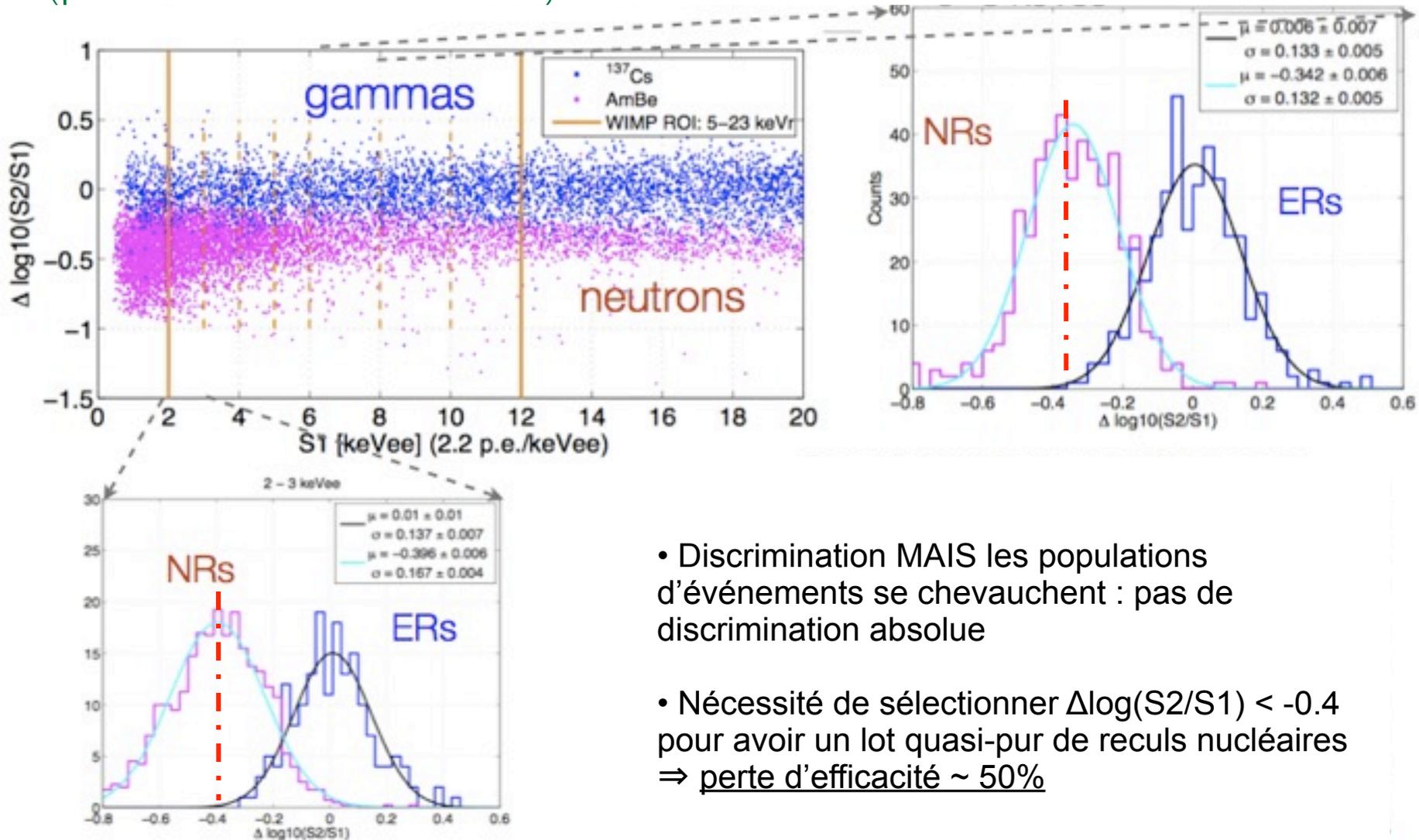


$$(S2/S1)_{wimp} \ll (S2/S1)_{gamma}$$



Discrimination recul nucléaire / recul électronique

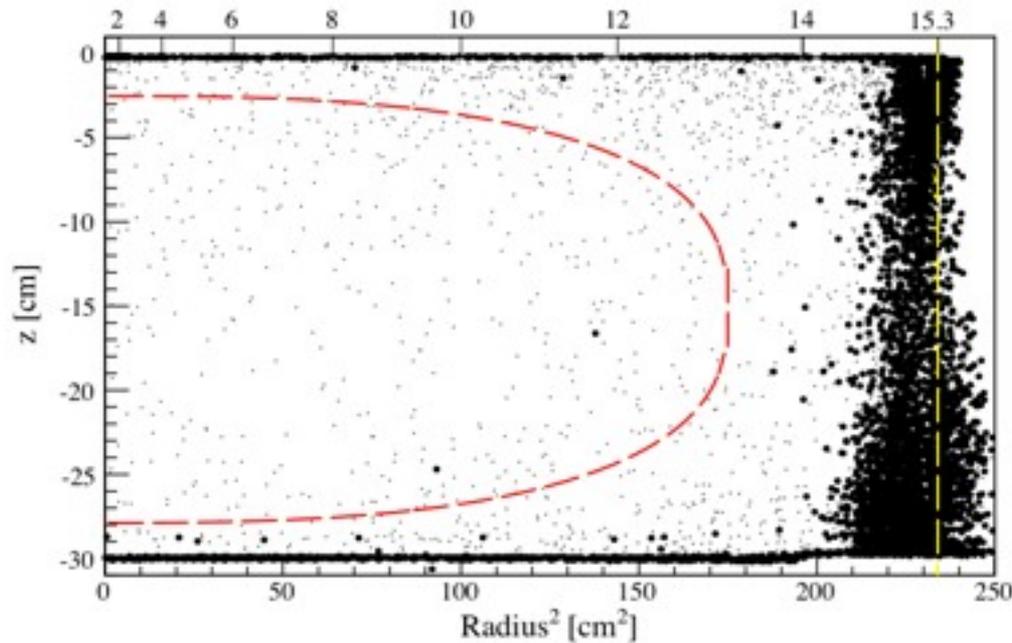
Discrimination reculs nucléaires/électroniques dans XENON 10 (précurseur de XENON100)



- Discrimination MAIS les populations d'événements se chevauchent : pas de discrimination absolue

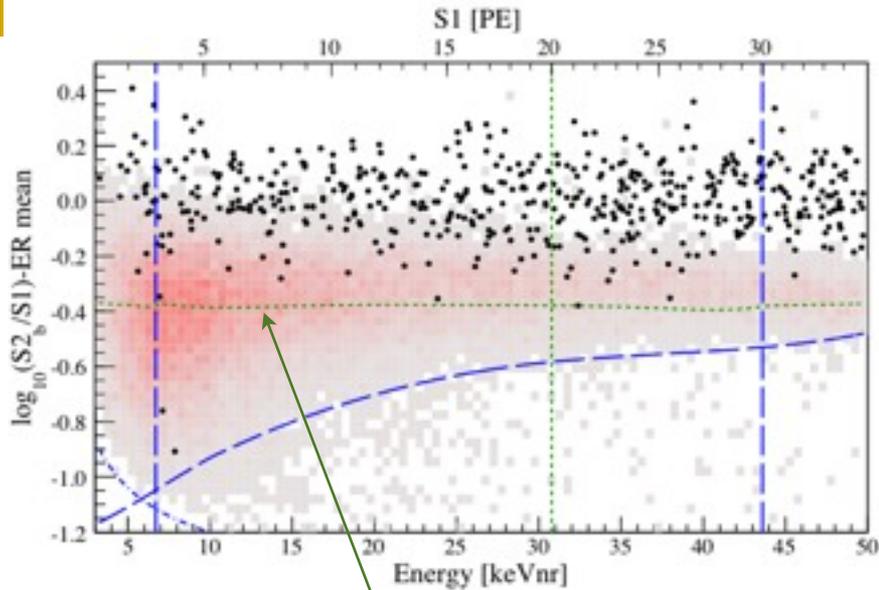
- Nécessité de sélectionner $\Delta \log(S2/S1) < -0.4$ pour avoir un lot quasi-pur de reculs nucléaires \Rightarrow perte d'efficacité $\sim 50\%$

L'expérience XENON100 : position des interactions



- Position en z : reconstruite à partir du temps de dérive des électrons
 - Position radiale : bonne reconstruction à partir des PMTs
-
- Définition d'un volume fiduciel dans la TPC : 34 kg
 - L'essentiel de la radioactivité provient des surfaces (en particulier les PMTs)
 - ⇒ **Autoblindage efficace du détecteur**
 - Radioactivité résiduelle en volume (contamination en krypton) : nécessité de purifier le Xénon...

Résultats de XENON100

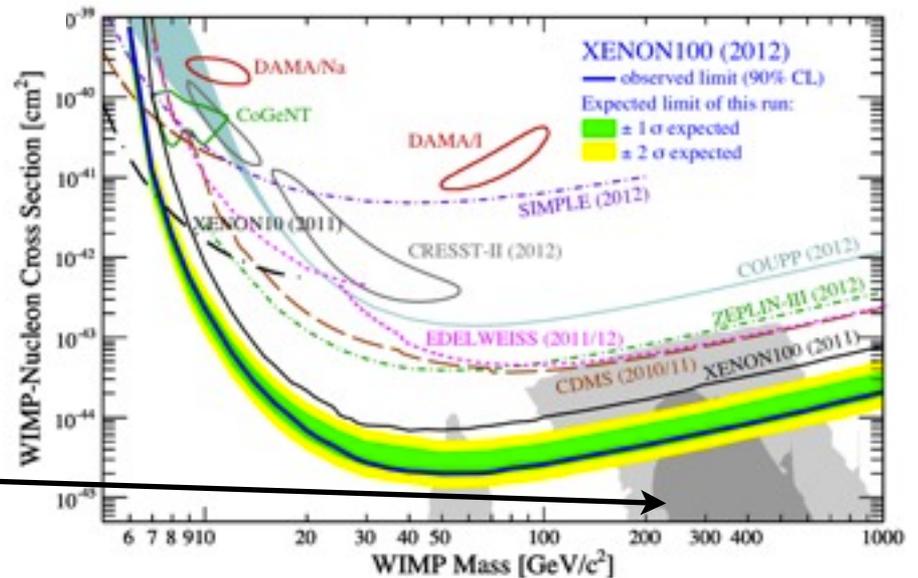


Zone du «signal WIMP»

Prédiction d'un sous-ensemble de modèles SUSY (CMSSM) compatible avec les données LHC de 2011

225 jours de prise de données de fond
- 2 «candidats WIMPs» compatibles avec le fond attendu

- Phase suivante : XENON 1 tonne en développement



Des anomalies pointant vers des
WIMPs de basse masse ?

Le signal DAMA est toujours présent

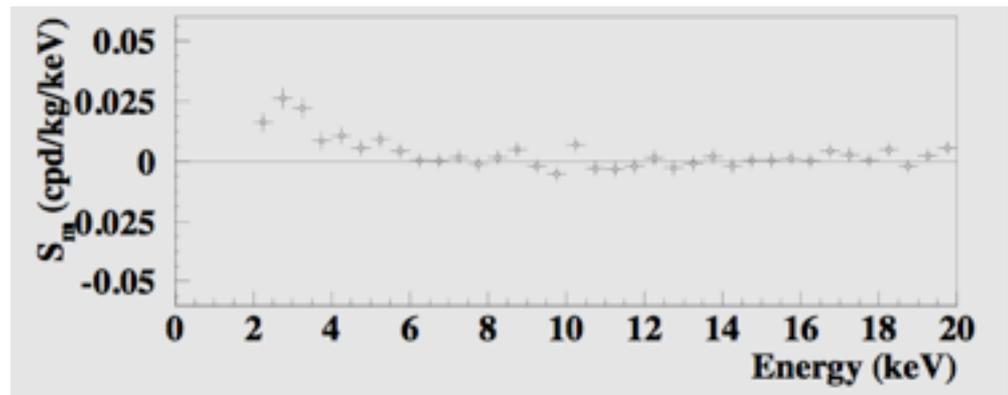
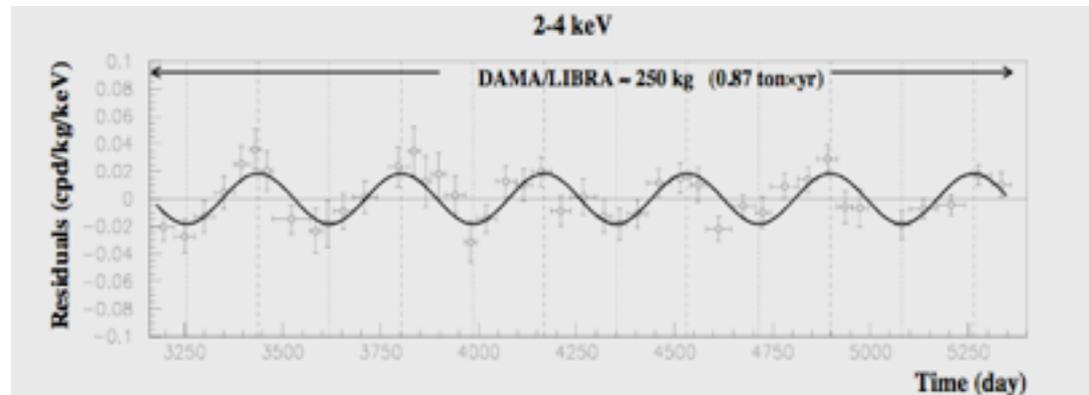
- Cristaux scintillants de NaI : pas de réjection des fonds de recul électronique
- Recherche modulation annuelle du taux brut d'interactions singles
- 1.17 tonne.an (0.29 DAMA + 0.87 DAMA/LIBRA)

Large statistique mais résultat reste controversé

très bas seuil, efficacité, bruits de fond

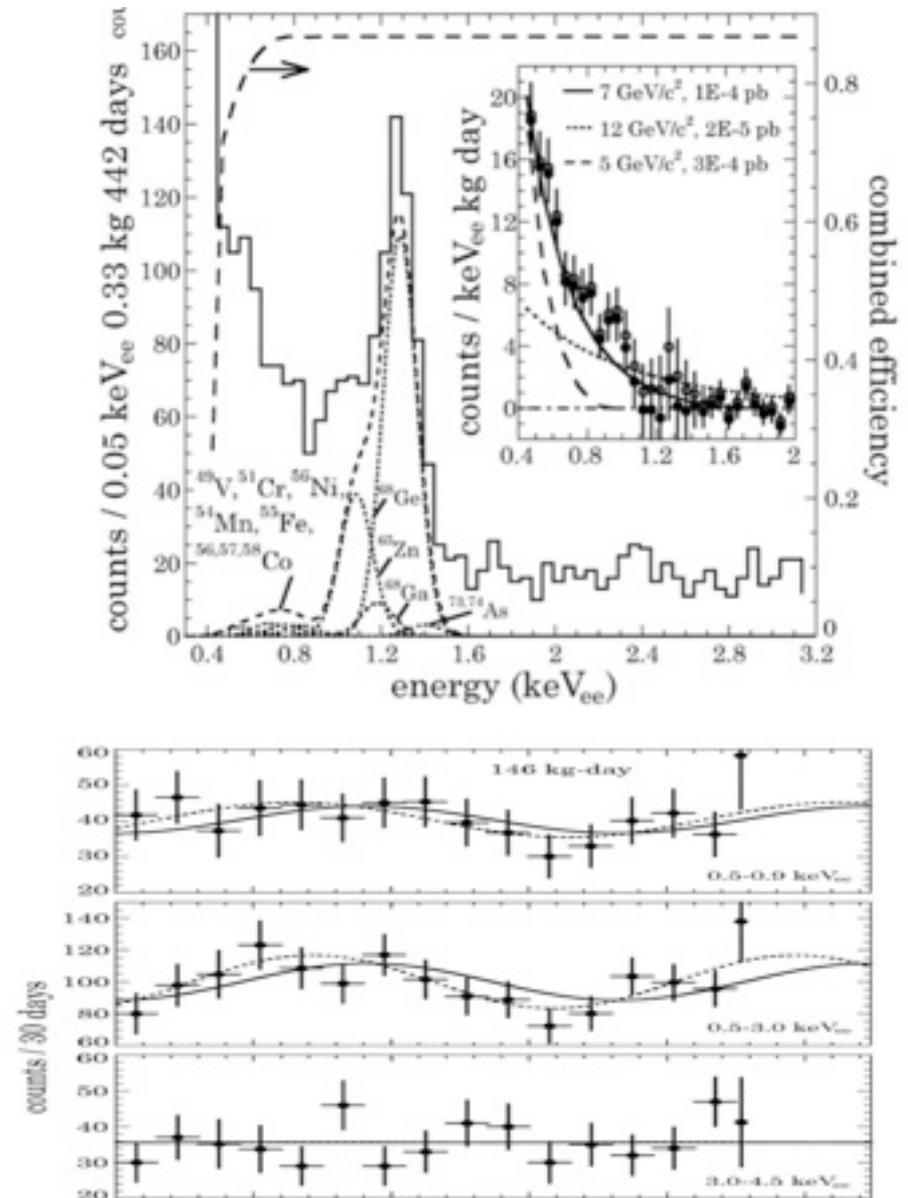
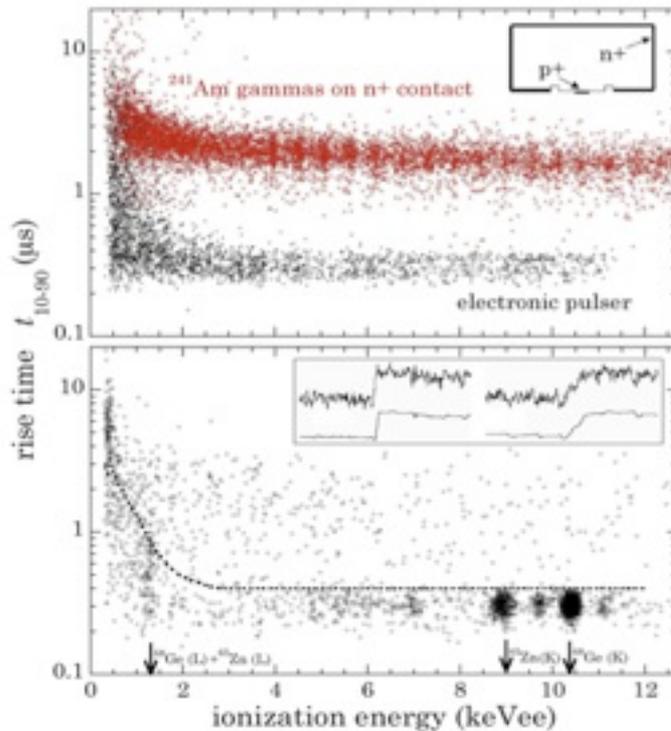
- Décroissance de l'amplitude de modulation?
- Phase \sim phase de la modulation du flux de muons @LNGS (LVD)?

- Cross-check possible au Pôle Sud, sur le site d'Ice Cube????

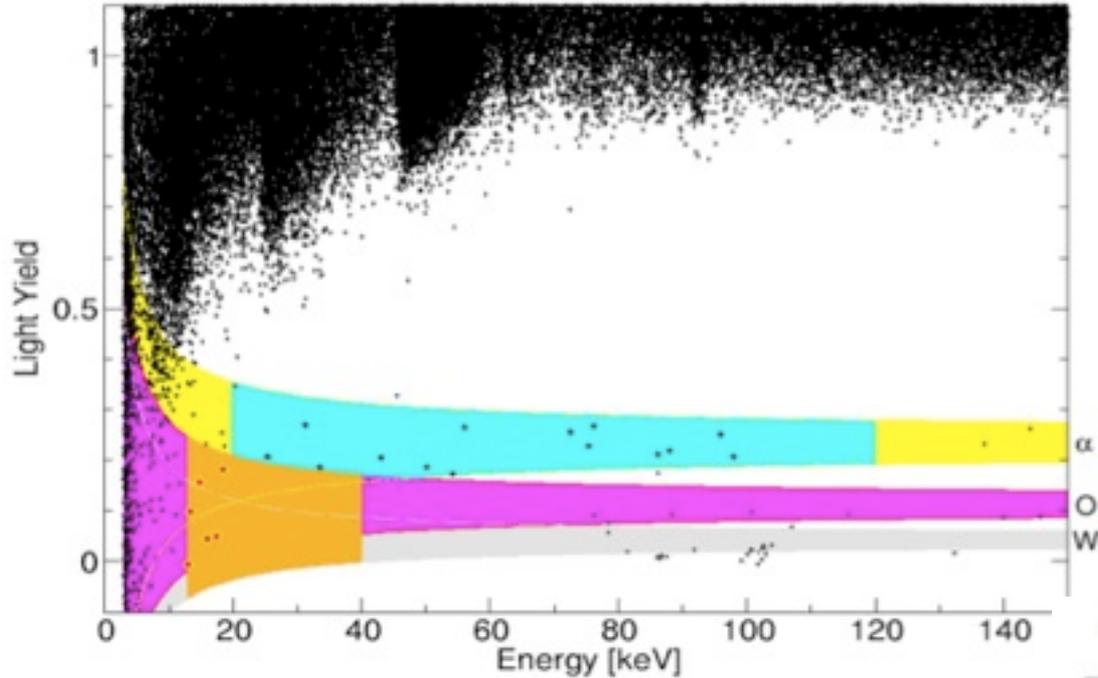


Le signal CoGeNT

- Germanium, ionisation seule
- Remontée exponentielle incompressible (??) du spectre de fond
- Signal de modulation annuelle (significatif??)

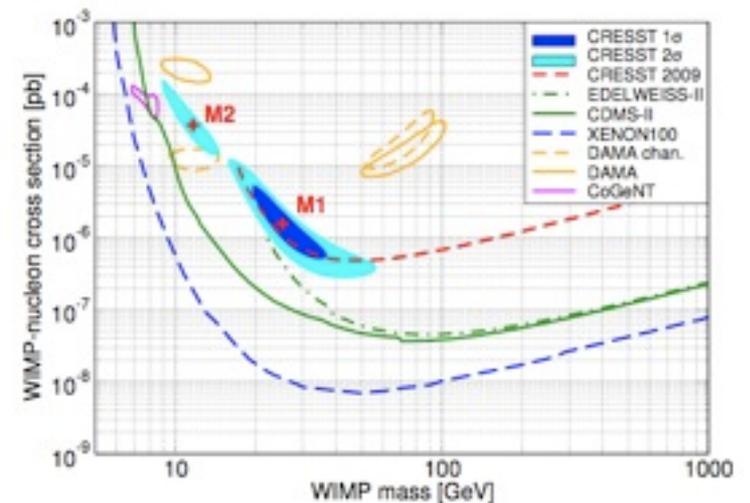


Le signal CRESST

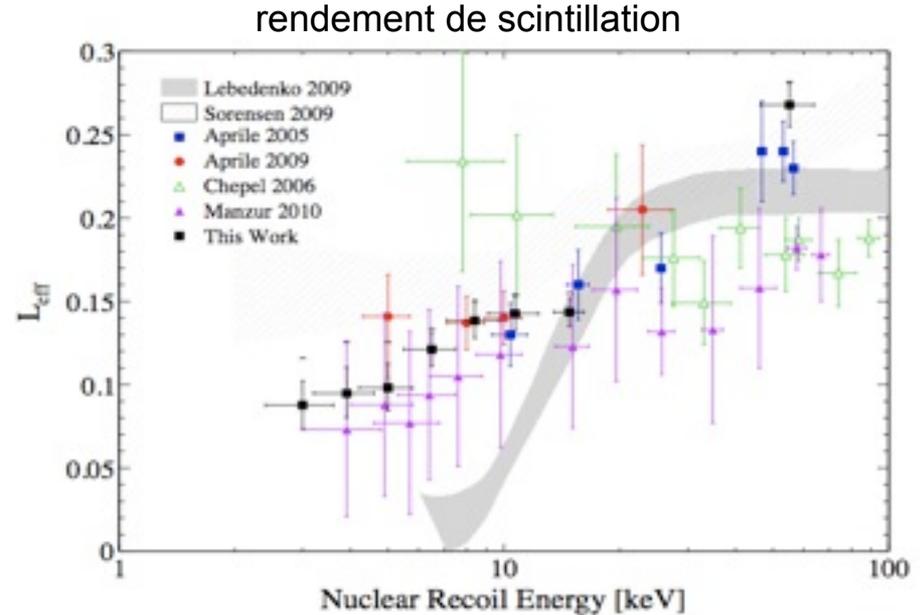
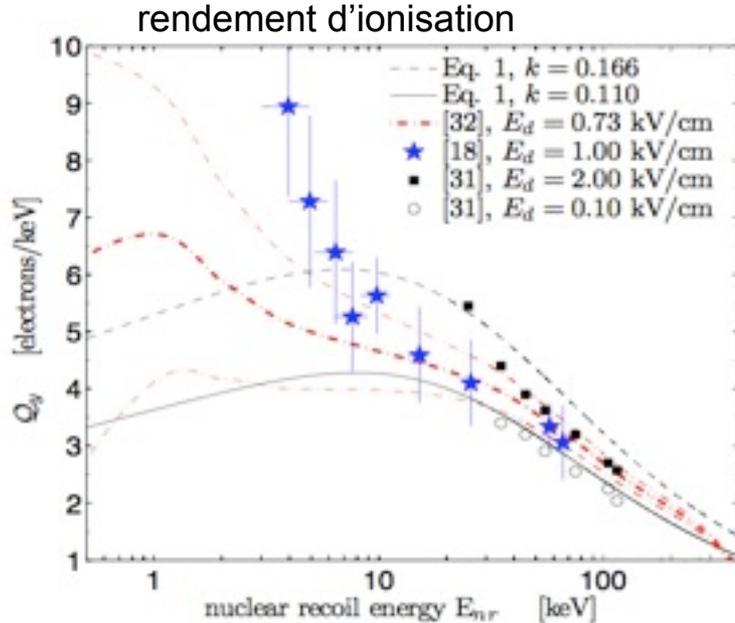


- Technologie bolométrique
- Réjection des reculs électroniques à l'aide d'un signal de scintillation

Nombreux bruits de fond résiduels, sous contrôle?



Compréhension de la réponse du Xénon à basse énergie



Les expériences Xenon10 et Xenon100 contraignent sévèrement ces anomalies, mais...

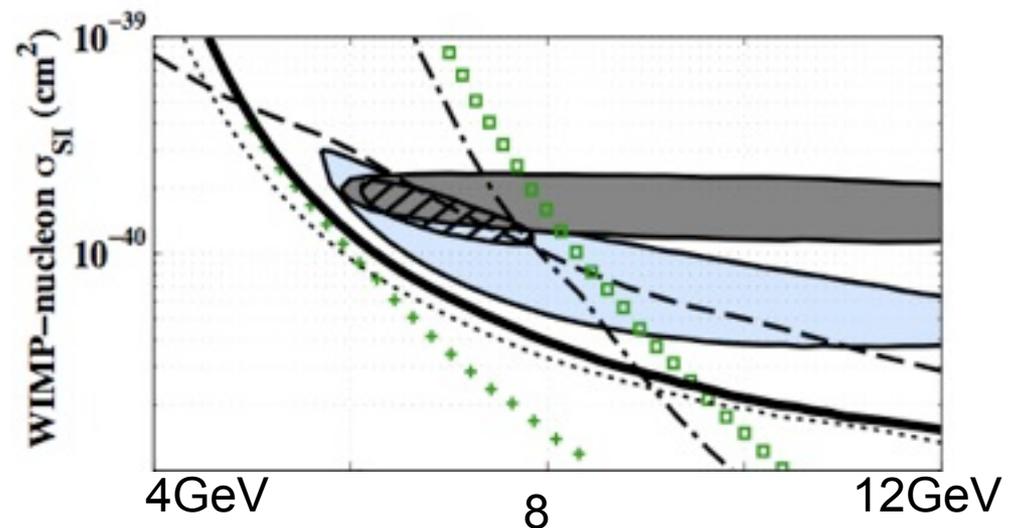
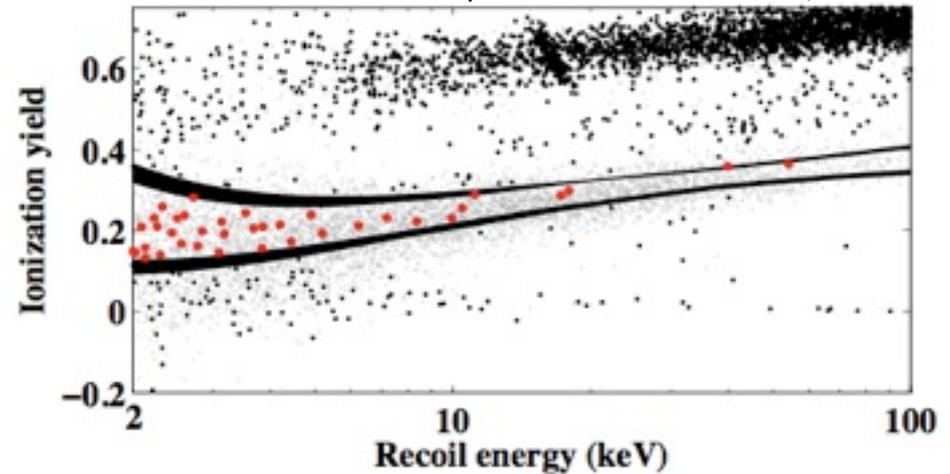
L'évaluation de la sensibilité WIMP à basse masse (=basse énergies de recul) du Xenon reste délicate:

- calibrations peu précises
- sensibilité reposant sur des fluctuations poissoniennes de signal sous le seuil
- sensibilité reposant sur la modélisation de la queue de distribution de la distribution en vitesses des WIMPs du halo

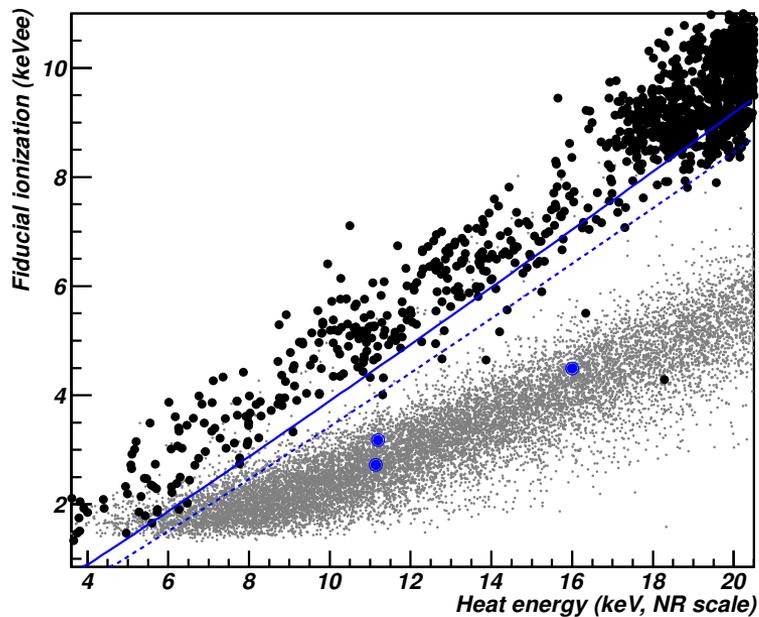
Études dédiées bas seuil: CDMS

- Abandonne du pouvoir de discrimination pour gagner de la sensibilité à basse énergie
- Utilise, de manière effective, les meilleurs détecteurs (meilleures résolutions)
- Plusieurs bruits de fond délicats à quantifier:
 - gammas et betas non rejetés
 - Événements sans ionisation
- Limite calculée en supposant que les événements résiduels sont des interactions de WIMPs

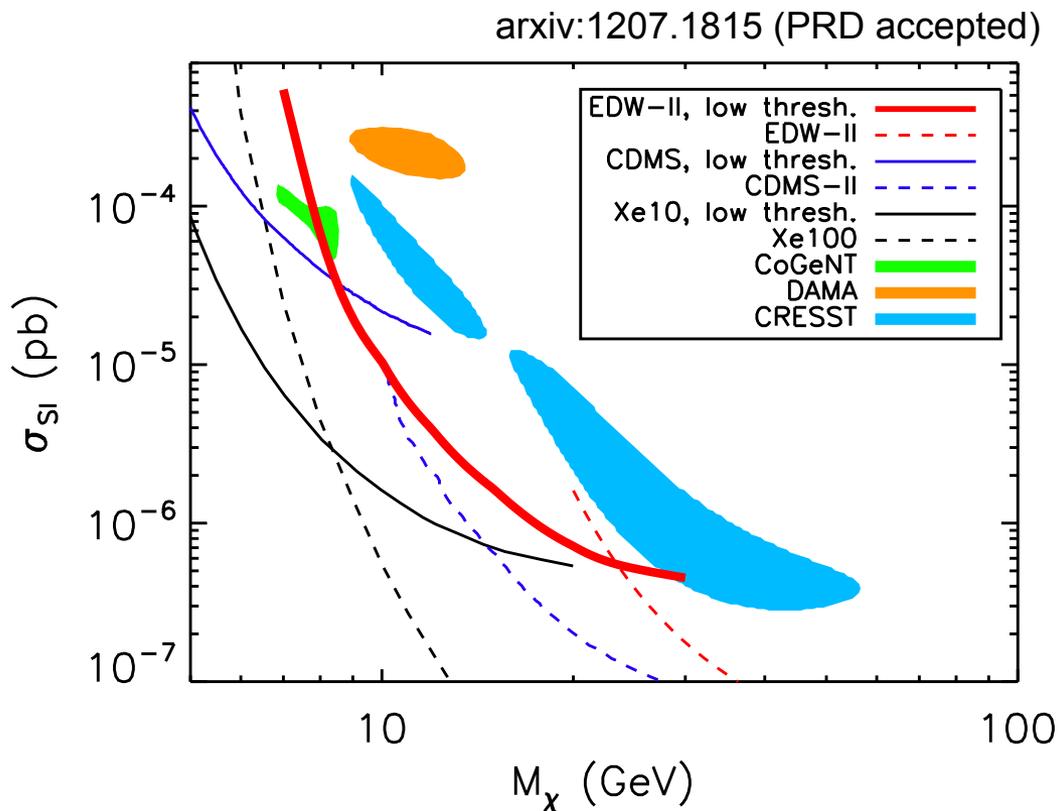
Phys.Rev.Lett.106:131302,2011



Études dédiées bas seuil: EDELWEISS



- Stratégie similaire à CDMS
- Réjection efficace des bruits de fond jusqu'à très basse énergie : intérêt de la technologie «électrodes ID»
- Limite bas bruit de fond, pas d'incertitudes sur la réponse du détecteur - mais limitée par les seuils



Bilan

La matière noire : un ingrédient essentiel de la cosmologie actuelle

- nature inconnue

- mais propriétés contraintes et nombreux modèles viables existent

- hypothèse WIMP : champ de recherche expérimental le plus actif *actuellement...*

Détection directe

- instruments dédiés (nécessite forte R&D détecteurs)

- techno Xenon la plus efficace actuellement, Germanium reste compétitif

- d'autres technologies sont envisagées (chambres à bulles, TPC gaseuses, argon liquide...)

- Recherches existent depuis ~ 20 ans...

- Sensibilités intéressantes vis-à-vis des prédictions théoriques surtout depuis quelques années : complémentarité LHC

Résultats essentiellement négatifs pour l'instant, des progrès à attendre encore dans les prochaines années...

Lié aux résultats LHC sur la physique électrofaible