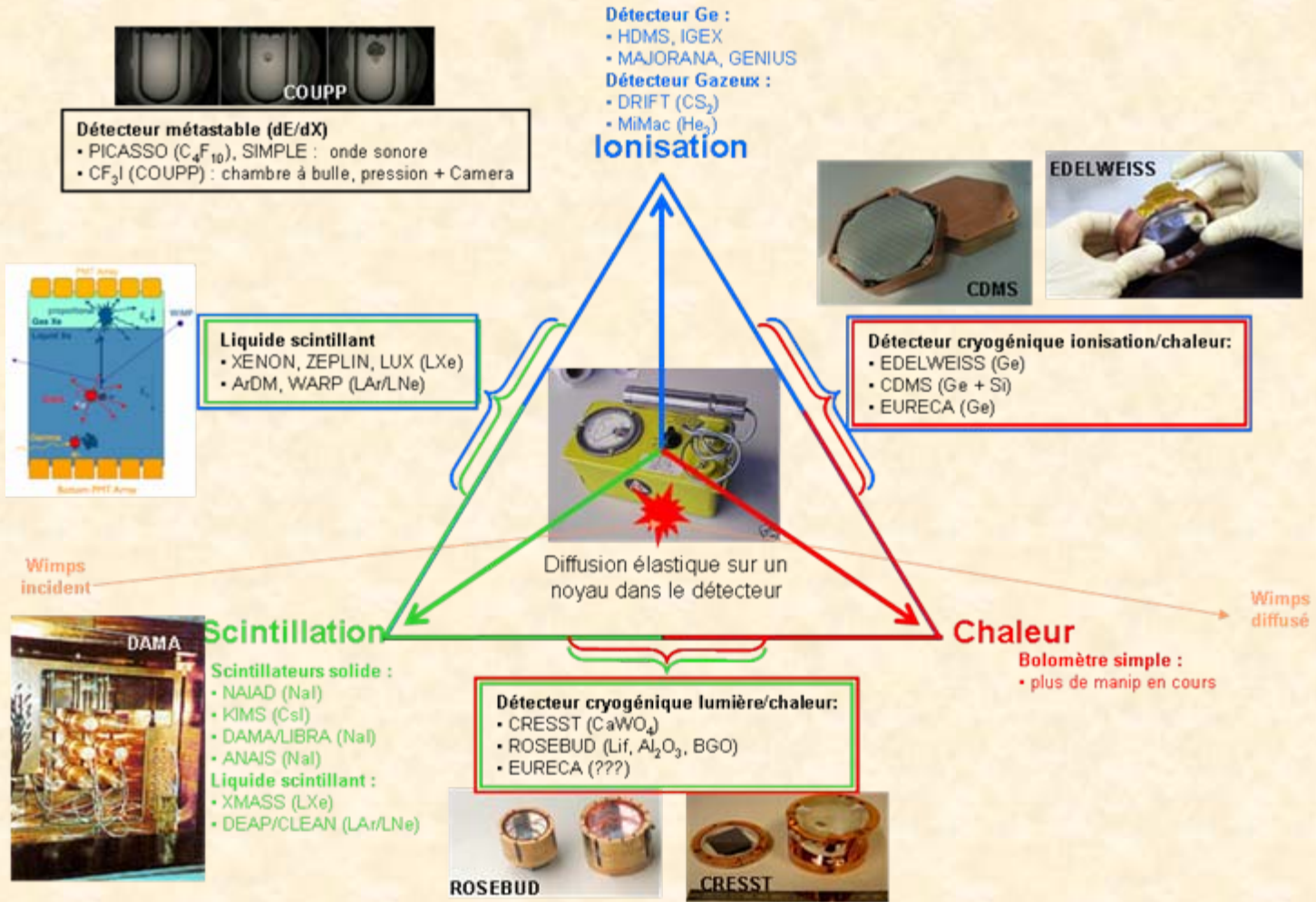


DRTBT09

Recherche directe de Matière Noire

A.Juillard

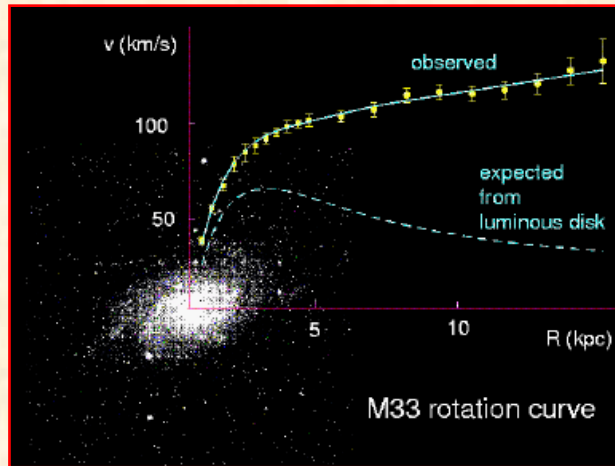
IPNL/IN2P3



Plan

- I {
 - Matière Noire
 - Quelles signatures
 - Contraintes générales sur les expériences
 - Revue
 - Scintillateurs
 - Gaz nobles liquéfiés (simple et double phase)
 - Metastable dE/dX
 - Gaz TPC
- II {
 - Cryogénique (chaleur + ionisation ou lumière)

Matière Noire galactique



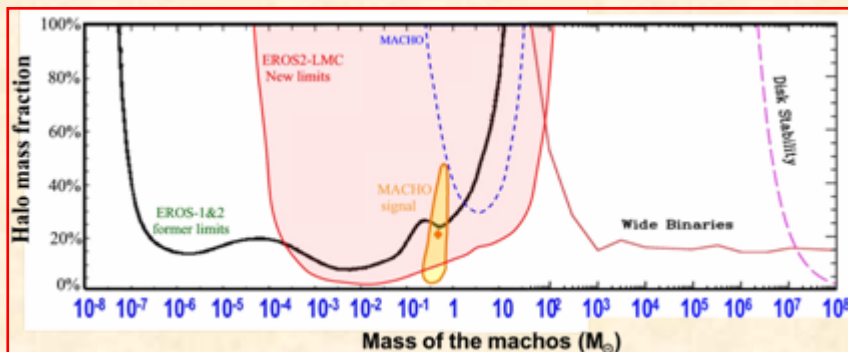
- **Mesure dynamique (courbe rotation ...)**

- Halo de Matière Noire baignant les galaxies
- Densité locale $\rho_{DM} \approx 0.3 \text{ GeV/cm}^3$

- **Matière Noire baryonique ?**
- **Mesure microlentille (EROS, MACHO...)**

- MACHOs
- Trous noirs
- gaz froids ...

Ne suffisent pas : < 15%

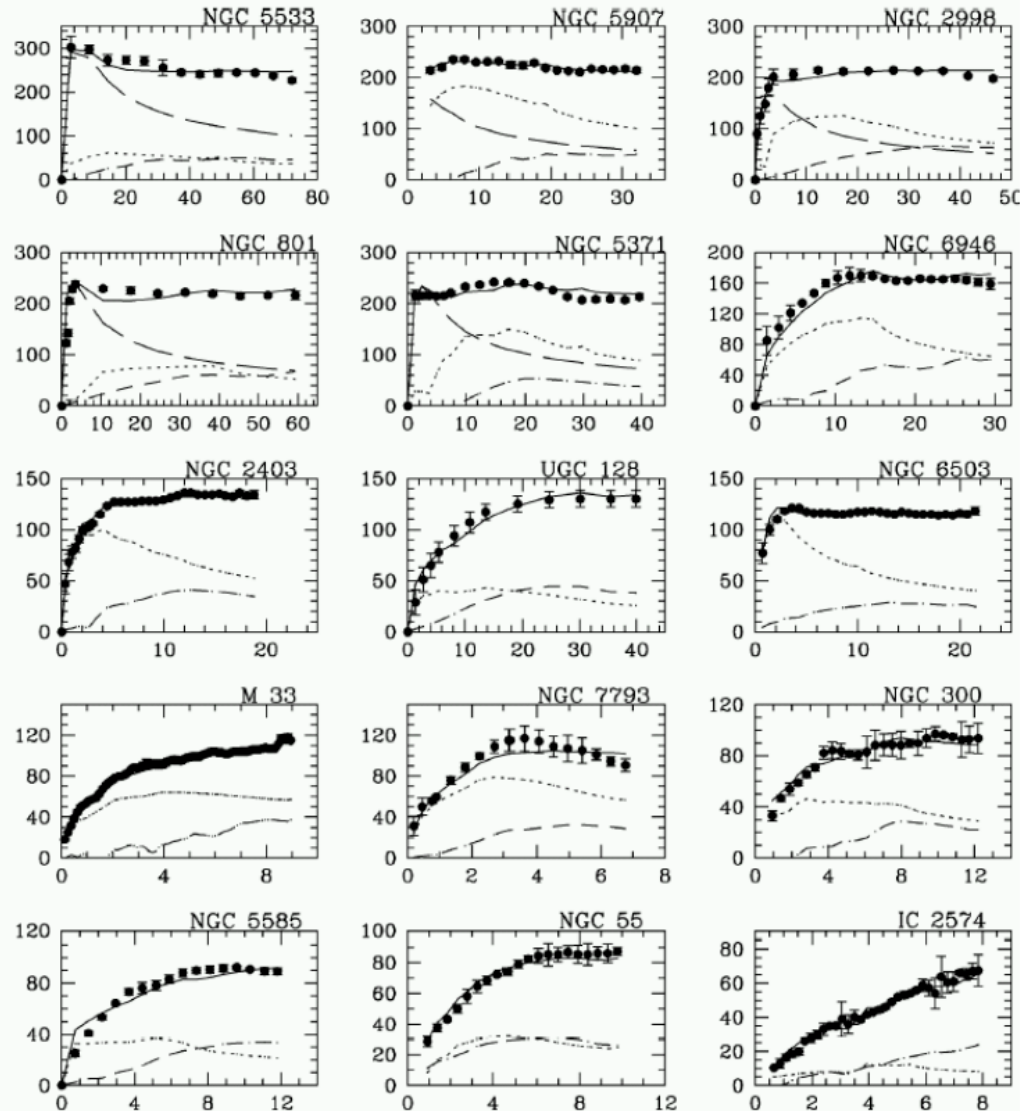


⇒ Matière Noire non baryonique majoritaire

Matière Noire galactique...

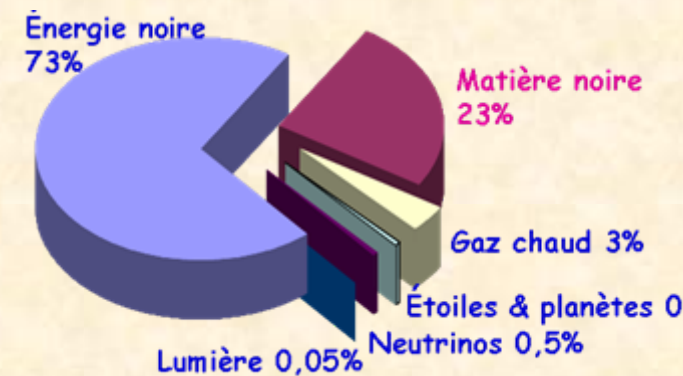
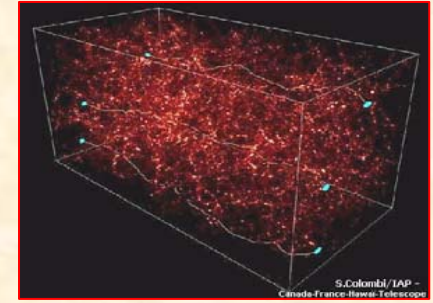
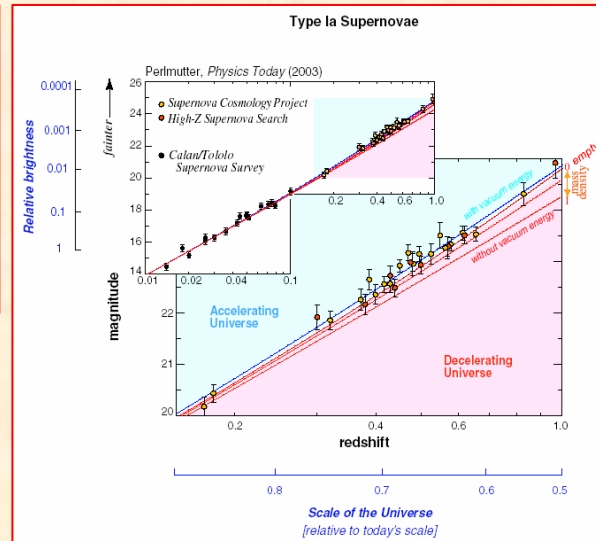
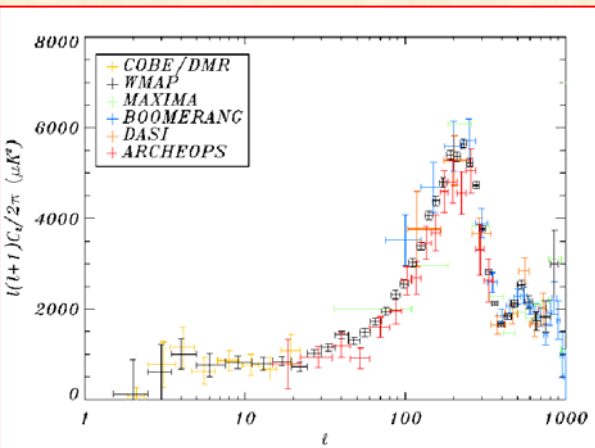
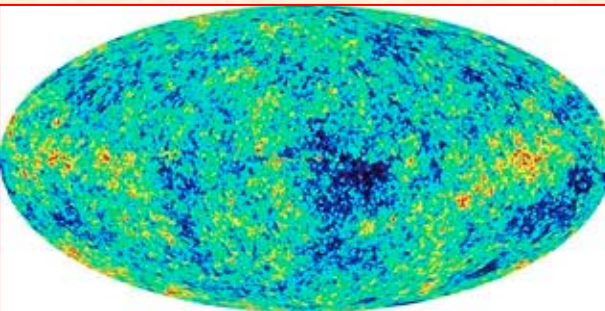
MOdified Newton Dynamic marche très bien au niveau galactique

A huge variety of rotation curves can thus be well fitted by MOND

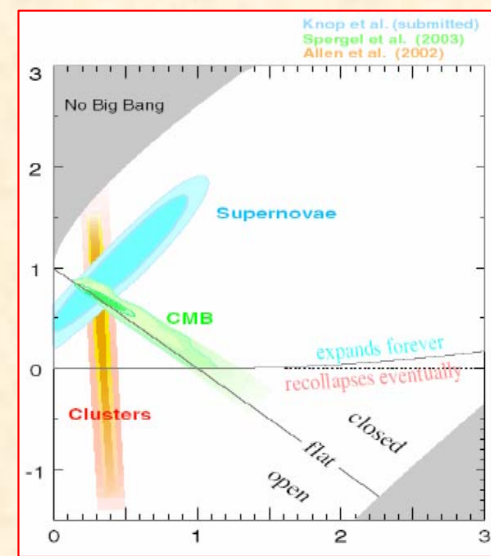


Sanders & Verheijen [astro-ph/9802240]

Matière Noire aux échelles cosmologiques



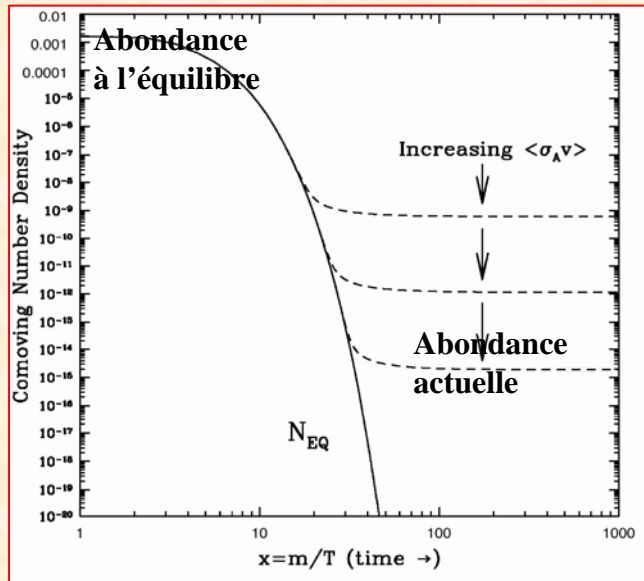
- Structure à grande échelle
- Simulation
- Anisotropie CMB (fond diffus cosmologique)
- SN IA (SuperNovae standard)
- BAO (oscillation acoustique baryons)
- Mesures dynamiques ...



Modèle de concordance :
 $\Omega_i = \rho_i / \rho_{critique}$ ($\rho_c \approx 10^{-29} \approx 5 \text{ protons/m}^3$)

- $\Omega_{total} \approx 1$
 - $\Omega_\lambda \approx 0.73$ (« Énergie du vide »)
 - $\Omega_{matter} \approx 0.27$ CMB+SN1A+BAO
- $\Omega_{baryonique} \approx 0.04$ BBN + CMB
- (Rq: visible qq %)
- $\Omega_{matière\ noire\ chaude} < 0.02$ (v)
- $\Omega_{matière\ noire\ froide} \approx 0.23$ (...)

Candidats Matière Noire froide



- **WIMPs (Weakly Interactive Massive Particle) stables créés après le Big Bang**
 - $\Omega_{WIMPS} \propto (\sigma_{anniv})^{-1}$
 - $\Omega_{WIMPS} \approx 0.3 \Rightarrow \sigma_{anni} \approx \sigma_{\text{électrofaible}} !$
- **Candidat « naturel » : SUSY LSP (Lightest SuperParticle) neutralino χ**
 - $m_{\chi} \approx 10 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$
 - $\sigma_{\chi\text{-nucléon}} \approx 10^{-6} \text{ pb} - 10^{-10} \text{ pb}$
 - **cadre pour comparer différentes expériences**
 - Recherche directe
 - Recherche indirecte (annihilation)
 - Recherche accélérateur : LEP, Tevatron, LHC...
- **Pour $m_{Wimps} \approx 100 \text{ GeV}$**
 - 3000 Wimps / m^3 dans cette pièce
 - 500 000 000 Wimps/ m^2/s !!
- **Mais aussi...**
 - Axions : $m_{\chi} \approx 10^{-5} - 10^{-2} \text{ eV}$
 - Large Scale US Axion Search @ Lawrence Livermore National Laboratory
 - CAST @ CERN
 - Kaluza-Klein (LKKP stable) : $m \approx \text{TeV}$
 - Wimpzilla : $m \approx 10^{12} \text{ GeV}$
 - ...

Candidats Matière Noire froide

The SUSY Particle Spectrum

Standard Model

$$P_{\tilde{\chi}_1^0} = N_{11}\tilde{B} + N_{12}\tilde{W} + N_{13}\tilde{H}_1 + N_{14}\tilde{H}_2$$

Name	Symbol	Spin	Name	Symbol	Spin
leptons	l, ν	1/2	sleptons	$\tilde{l}_R, \tilde{l}_L, \tilde{\nu}_L$	0
quarks	q_L, q_R	1/2	squarks	$\tilde{q}_L, \tilde{q}_R (\tilde{b}_{1,2}, \tilde{t}_{1,2})$	0
photon	γ	1	neutralinos	$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$	1/2
Z boson	Z	1			
light Higgs	h	0			
heavy Higgs	H	0			
pseudoscalar Higgs	A	0			
W boson	W^\pm	1	charginos	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$	1/2
charged Higgs	H^\pm	1			
gluon	g	1	gluino	\tilde{g}	1/2
graviton	G	2	gravitino	\tilde{G}	3/2

'LSP'
(usually)

$$\chi = N_1\tilde{\gamma} + N_2\tilde{Z}^0 + N_3\tilde{H}_1^0 + N_4\tilde{H}_2^0; \sum_{i=1}^4 |N_i|^2 = 1$$

Recherche indirecte de WIMPs : principes

Credit *Piergiorgio Picozza*

Will distort the antiproton positron and gamma spectra from purely secondary production

... and background

$$p_{CR} + p_{ISM} \rightarrow \bar{p} + p + p + p$$

$$p_{CR} + p_{ISM} \rightarrow \pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$$

$$\rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$$

Neutralino Annihilations

$$\chi + \bar{\chi} \rightarrow X + \gamma$$

$$+ \nu$$

$$+ \bar{p}$$

$$+ e^+$$

$$+ \bar{D}$$

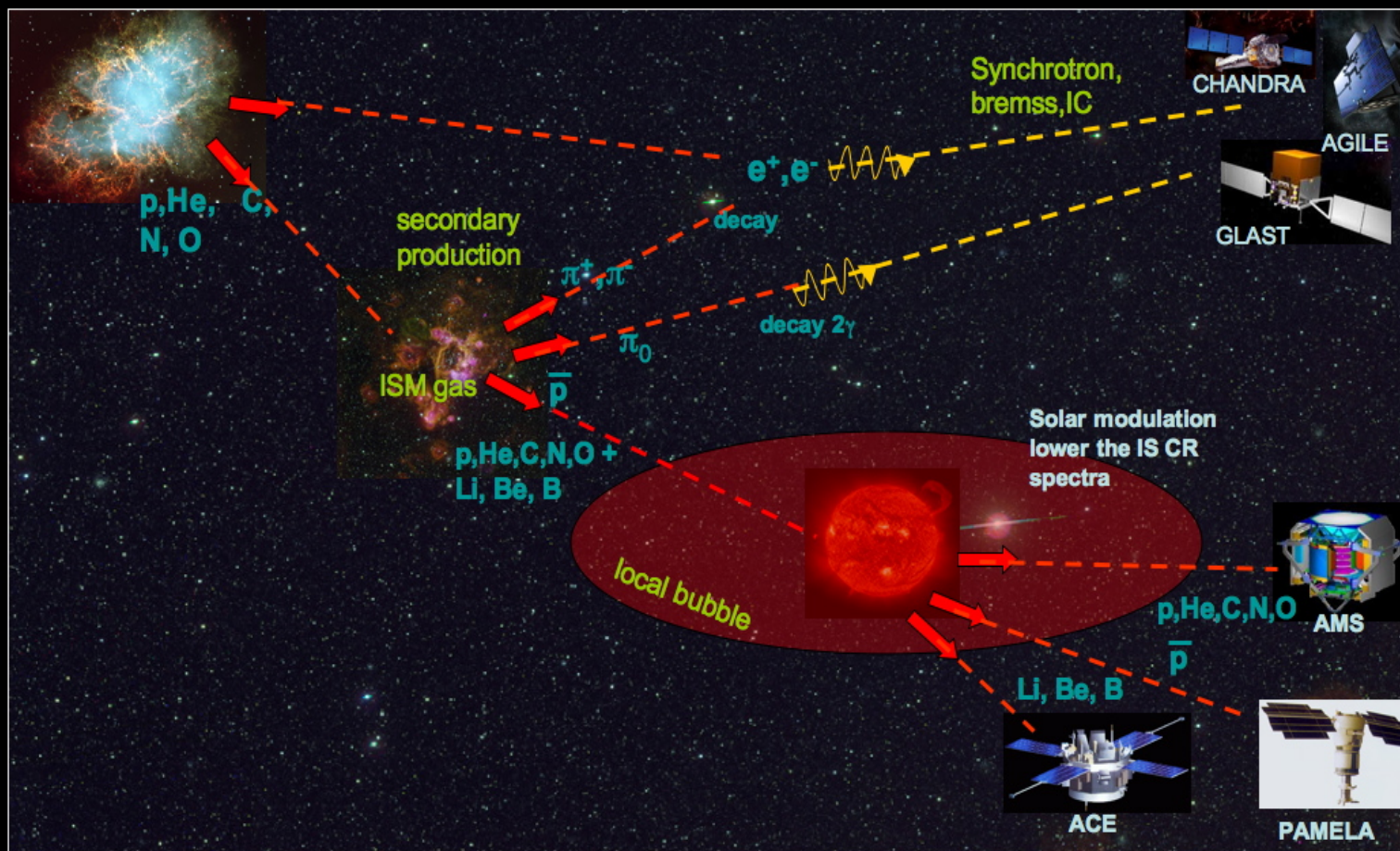
(GLAST-FERMI
AMS-02)
(AMANDA / IceCube)

PAMELA
(and Bess, HEAT, AMS etc.)

Recherche indirecte de WIMPs : fond

Credit Piergiorgio Picozza

COSMIC RAYS PRODUCTION MECHANISMS



Credit Piergiorgio Picozza

Propagation of cosmic rays

In general a more involved equation (with respect to Leaky-box) models the cosmic rays propagation:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - D(E) \nabla^2 \Phi + \frac{\partial}{\partial E} (b(E) \Phi) + \frac{\partial}{\partial z} (V_c \Phi) = Q(E) - 2h\delta(z) \Gamma_{\text{spall}} \Phi$$

Diagram illustrating the cosmic ray propagation equation with labels for each term:

- $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$: differential flux
- $D(E) \nabla^2 \Phi$: diffusion
- $\frac{\partial}{\partial E} (b(E) \Phi)$: energy loss
- $\frac{\partial}{\partial z} (V_c \Phi)$: convection
- $Q(E)$: source term
- $2h\delta(z) \Gamma_{\text{spall}} \Phi$: spallation

Solution is of the form:

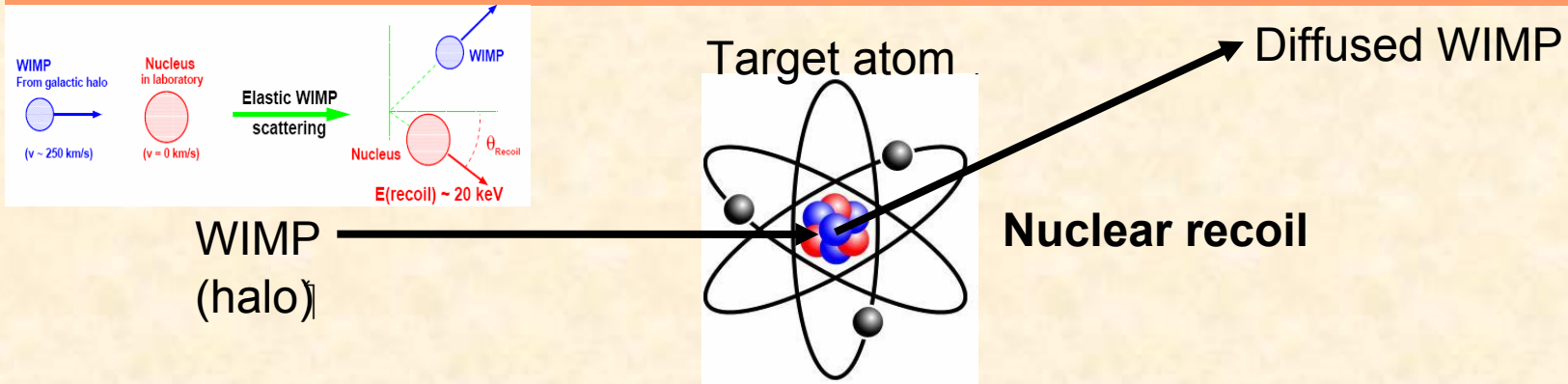
$$\Phi \propto n^2 \langle \sigma v \rangle \rightarrow \text{particle physics}$$

astro&cosmo

Thermal relic requires:

$$\langle \sigma v \rangle \simeq 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

Recherche directe de WIMPs : principes (1)



Signal WIMPs = diffusion élastique sur noyau cible

- Cinématique élémentaire : $E = \frac{\mu^2}{m_A} v_w (1 - \cos \Theta)$ avec $\mu = \frac{m_w m_A}{m_w + m_A}$
(énergie)

- Taux d'interaction total typique :
(nbre evts/unité de temps)

$$R = \frac{\rho_{0w}}{m_w} N \sigma_{w-A} \langle v_w \rangle$$

Densité local de Wimps/
masse du Wimps

Nombre
d'atome
cible

section
efficace
Wimps-Noyau

vitesse
moyenne
Wimps

Recherche directe de WIMPs : principes (2)

- Taux différentiel (/unité d'énergie/unité de temps) :

J.D. Lewin, P.E Smith/Astroparticle Physics 6 (1996) 87-112

$$\frac{dR}{dE} = \frac{\rho_{0W} \sigma_{w-n}}{2m_w \mu^2} I_f F(E)^2 \int_{v_w \min}^{v_w \max} \frac{f(v_w)}{v_w} dv_w$$

Physique des
particules

Physique
Nucléaires

Astrophysique

- Contraintes Astro :**

- Halo sphérique isotherme (→ distribution des vitesse de Wimps Maxwellienne)
 - with $v_{\text{moyenne}} = 230 \text{ km/s}$, $v_{\text{terre}} = 250 + 15 \sin(2\pi y) \text{ km/s}$, $v_{\text{echap}} = 650 \text{ km/s}$
 - $\rho_{0W} = 0.3 \text{ GeV}/c^2/\text{cm}^3$ densité local de Wimps
- D'autre modèle de Halo plus complexes possibles!!!

- Contraintes Phys. Part. : avec Hypothèse SuperSymétrie**

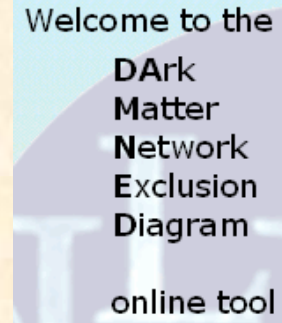
- $M_W \sim qq \text{ GeV}/c^2 - qq \text{ TeV}/c^2$
 - For $M_W \sim 100 \text{ GeV}/c^2$
 - Mean density : 3000 WIMPs/m³
 - Flux on Earth : 500 000 000 WIMPs/m²/s
- section efficace Wimps-Nucléon $\sigma_{w-n} < 10^{-7} \text{ pb}$ (10^{-43} cm^2 , 1barn ~section proton)
 - Taux de reculs < 1 evts/mois et recul typique qqkeV-qq10keV

- Contraintes Phys. Nucl. :**

- Facteur de forme pour collision élastique
- Facteur d'interaction
 - $I_f \sim A^2$ pour couplage scalaire (interaction cohérente)
 - $I_f \sim J(J+1)$ pour couplage axial (Les spins s'annulent 2 à 2, il en reste peu...)

Recherche directe de WIMPs : principes (3)

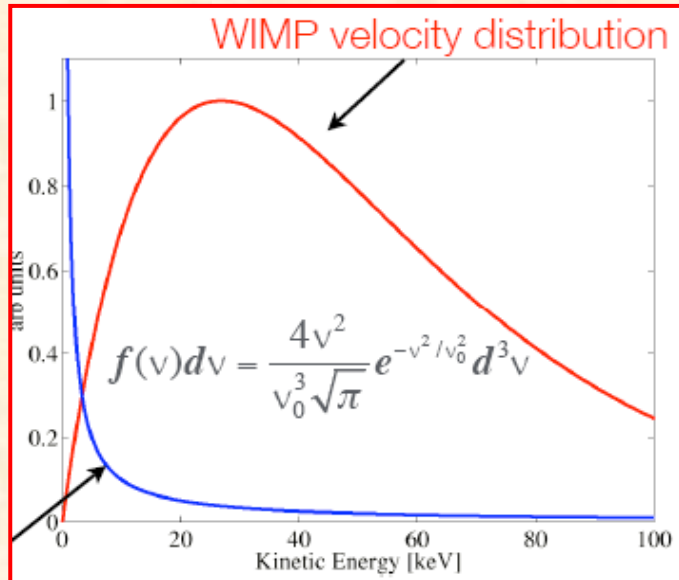
- Taux différentiel (/unité d'énergie/unité de temps) :



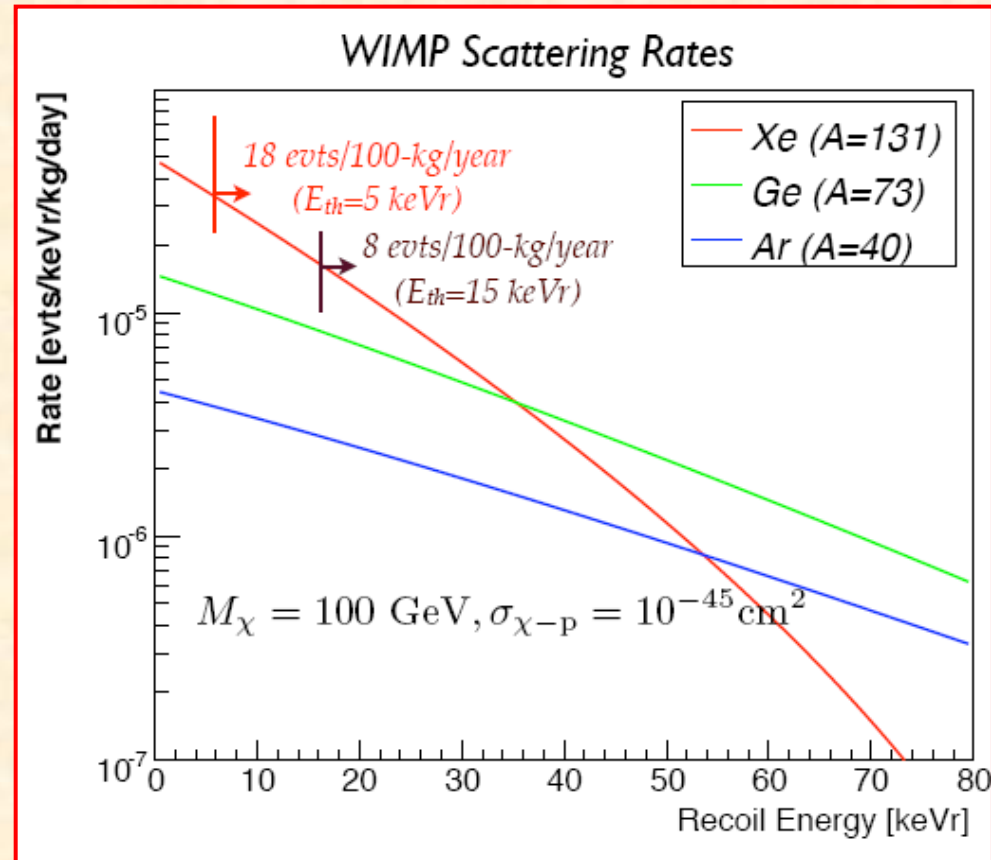
Spectre approché

$$\left. \frac{dR}{dE} \right|_{V_{\min}=0}^{V_{\max}=\infty} = \frac{R_0}{E_0} e^{-\frac{E}{E_0}}$$

<http://pisrv0.pit.physik.uni-tuebingen.de/darkmatter/>



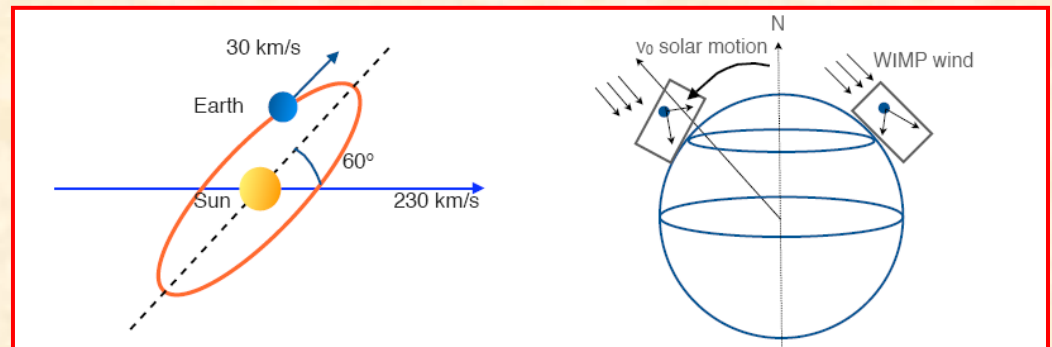
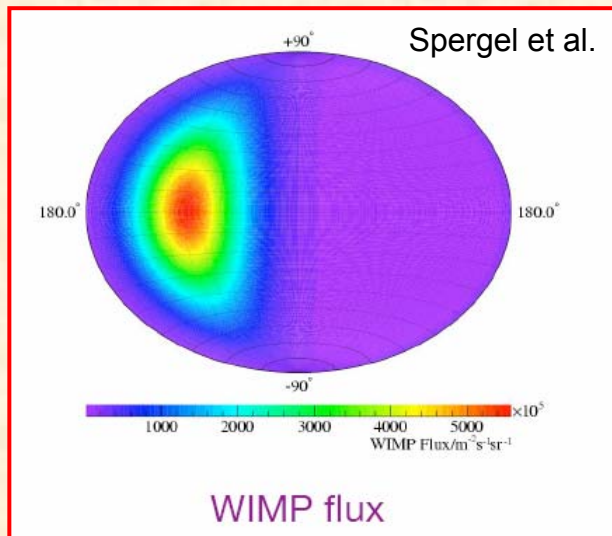
Recoil energy spectrum (depends on WIMP mass)



Recherche directe de WIMPs : Signatures diverses

Signal WIMPs = diffusion élastique sur noyau cible

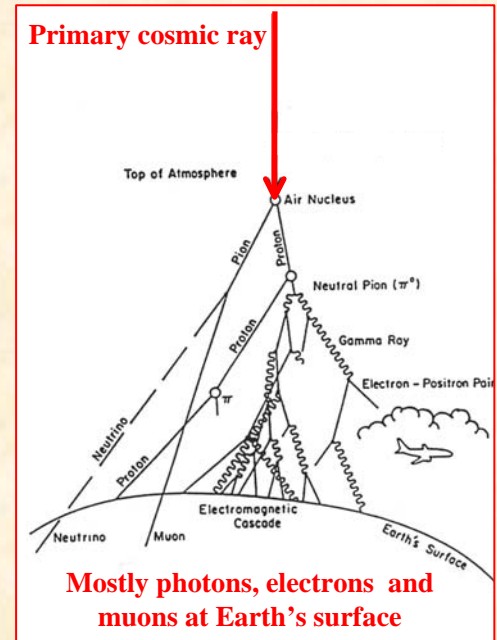
- **Discrimination** reculs nucléaires (χ, n)-reculs électroniques (fond)
 - Quenching recul nucléaire (double mesure)
 - Constante de temps scintillation
 - dE/dx (état metastable sensible uniquement aux reculs)
- **Allure du spectre de recul** (exponentiel, connaissance du fond indispensable...)
- **Cohérence entre différents noyaux** pour couplage scalaire (spin indépendant) : $\propto \mu^2 A^2$
- **Absence interactions multiples** (soustractions fond neutron?)
- **Réponse uniforme en volume** (rejet radioactivité surface : radon, queues spectre α, β)
- **Modulation annuelle** (masse importante, seuil bas)
- **Modulation diurne** (signature claire mais difficile)
- **Directionnalité**



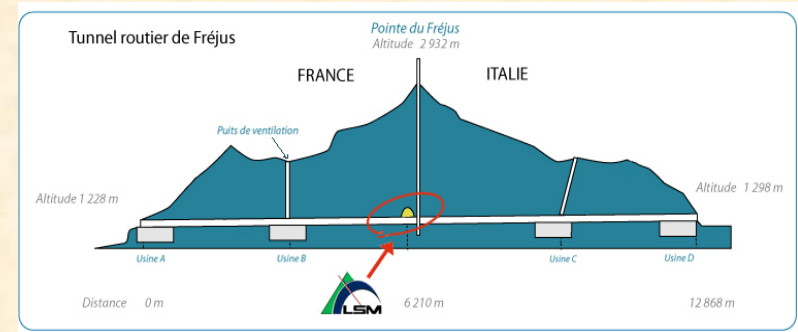
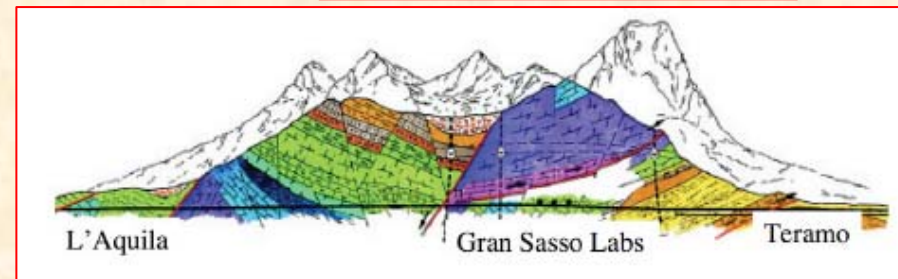
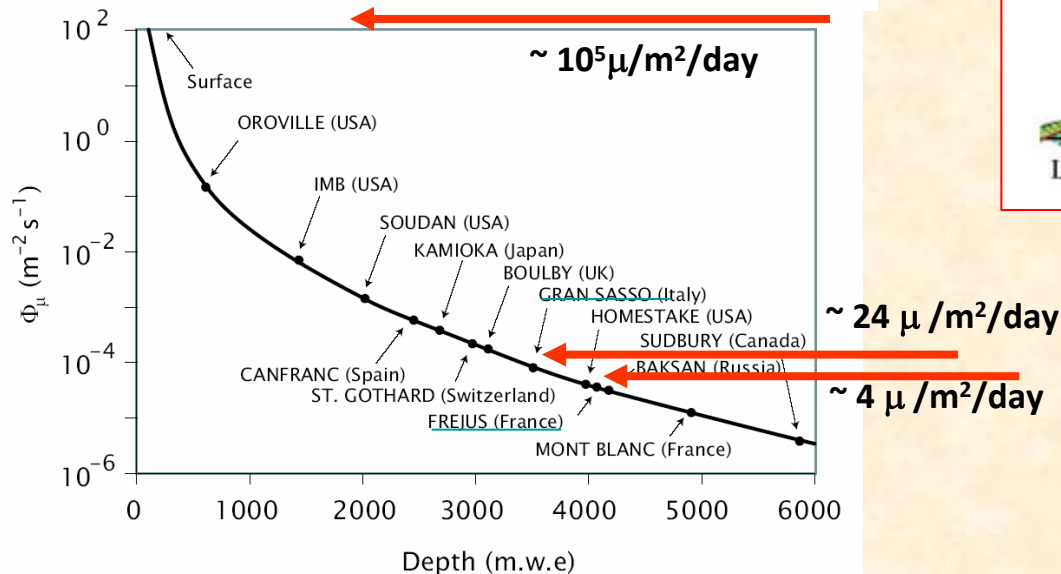
- Radioactivité support et détecteurs
 - Chaîne U-Th, K, Co.
 - Kr85, Ar39 (gaz noble liquéfié), Bi (BGO) etc.
 - Rn
- (Alpha,n) dans la roche et blindage
- Fission ^{238}U
- Neutron rapide induit par muon
- Futur génération : neutrino solaire.

Recherche directe de WIMPs : contraintes

- Site souterrain (fond neutron induit par μ)
- Sélection rigoureuse des éléments proches
- Blindage passif et actif (μ veto).
- Discrimination active du fond
- Grande masse de détecteur
- Seuils bas (qq keV) et bonnes résolutions
- Stabilité sur de longues périodes (>an)
- Reproductibilité

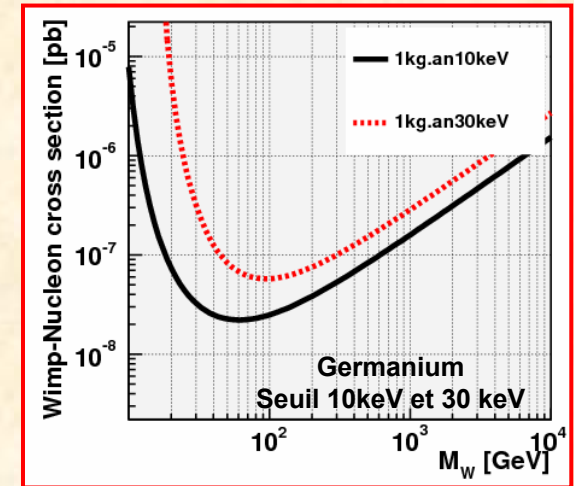


Muon underground flux



Recherche directe de WIMPs : ordre de grandeur

- $M_W \sim qq\text{GeV}/c^2$ - $qq\text{TeV}/c^2$, vitesse $\sim c/1000$
 - For $M_W \sim 100 \text{ GeV}/c^2$
 - **Densité moyenne : 3000 WIMPs/m³**
 - **Flux sur Terre : 50 000 000 WIMPs/m²/s**
- section efficace Wimps-Nucléon $\sigma_{w-n} < 5 \cdot 10^{-8} \text{ pb}$
 - Dans le Ge correspond à 1 evt pour 1 kg de détecteur pendant 1 an (1evt/kg/an) !
- Radioactivité humaine : env 100 désintégrations par seconde et par kg
 - Donc environ $3 \cdot 10^9 \text{ evt/kg/an}$!
- Plomb standard : 100 désintégrations par seconde (Pb210)
- Cuivre sélectionné : $< 10^{-6}$ désintégrations par seconde
- Blindages, sélection des matériaux, site souterrain obligatoires !!!
- malgré ça, environ 10-100 evts/kg/jour dans le détecteur...
- Réjection active indispensable !
- Objectif manip de future génération (2010-2015) $\sigma_{w-n} < 10^{-10} \text{ pb}$
 - **~ quelques evts/tonne/an !!!**



Recherche directe de WIMPs : techniques



COUPP

Détecteur métastable (dE/dX)

- PICASSO (C_4F_{10}), SIMPLE : onde sonore
- CF_3I (COUPP) : chambre à bulle, pression + Camera

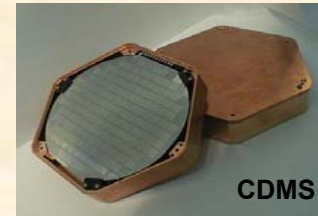
Détecteur Ge :

- HDMS, IGEX
- MAJORANA, GENIUS

Détecteur Gazeux :

- DRIFT (CS_2)
- MiMac (He_3)

Ionisation



CDMS



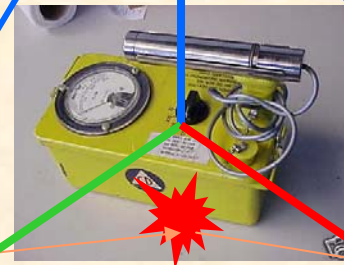
EDELWEISS

Détecteur cryogénique ionisation/chaueur:

- EDELWEISS (Ge)
- CDMS (Ge + Si)
- EURECA (Ge)

Liquide scintillant

- XENON, ZEPLIN, LUX (LXe)
- ArDM, WARP (LAr/LNe)



Diffusion élastique sur un noyau dans le détecteur

Scintillation

Scintillateurs solide :

- NAIAD (NaI)
- KIMS (CsI)
- DAMA/LIBRA (NaI)
- ANAIS (NaI)

Liquide scintillant :

- XMASS (LXe)
- DEAP/CLEAN (LAr/LNe)

Détecteur cryogénique lumière/chaueur:

- CRESST ($CaWO_4$)
- ROSEBUD (LiF, Al_2O_3 , BGO)
- EURECA (???)



ROSEBUD



CRESST

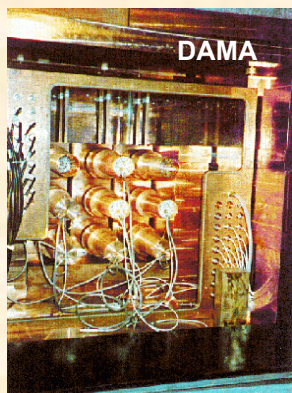
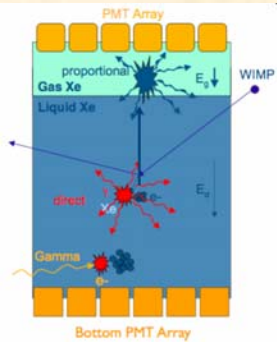
Chaleur

Bolomètre simple :

- plus de manip en cours

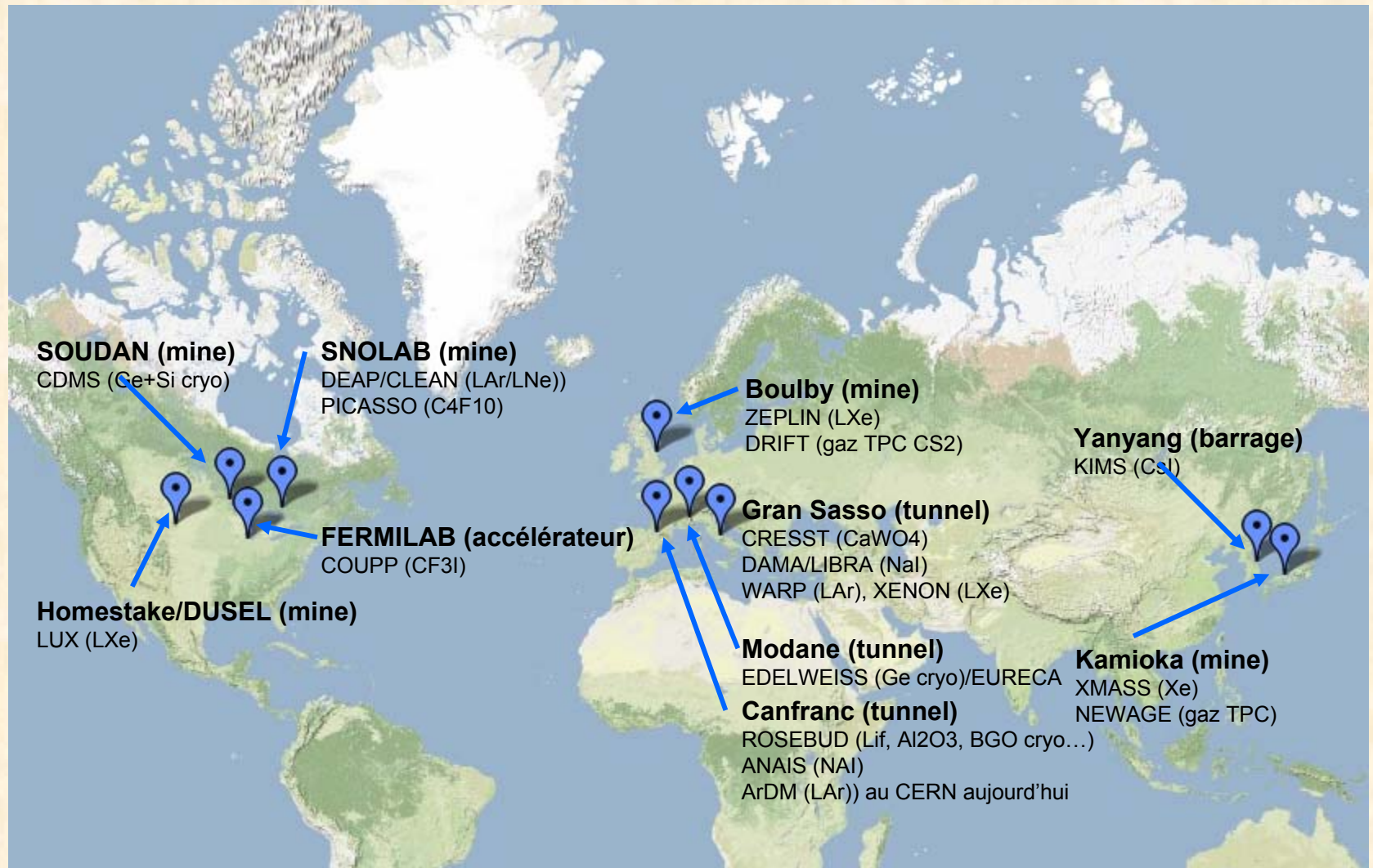
Wimps diffusé

Wimps incident



DAMA

Recherche directe de WIMPs : où ?



Recherche directe de WIMPs : Etat de l'art

- **Couplage scalaire**

(Spin-Indépendant)

- CDMS-II (**Ge cryogénique**)
- XENON-10 (**lphase LXe**)

- **Couplage axial**

(Spin-Dépendant)

- **Sur Proton**

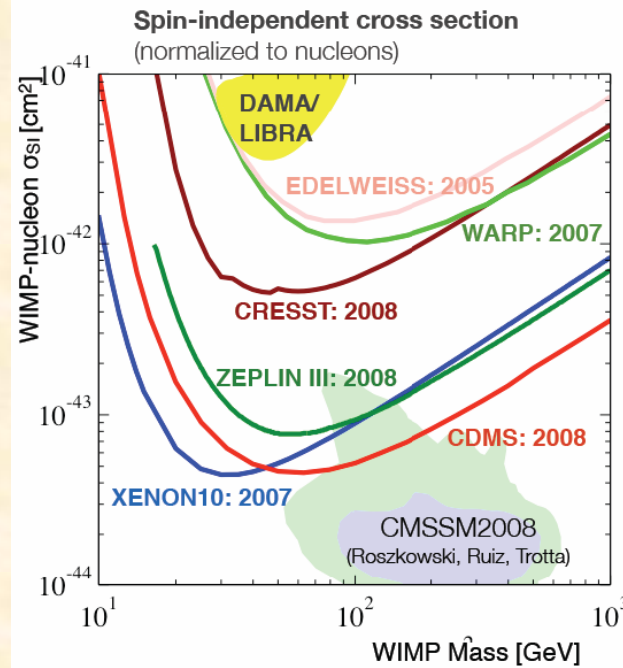
- KIMS (**scintillateur CsI**)
- COUPP (**chambre à bulle CF₃I**)

- **Sur Neutron**

- Xenon-10

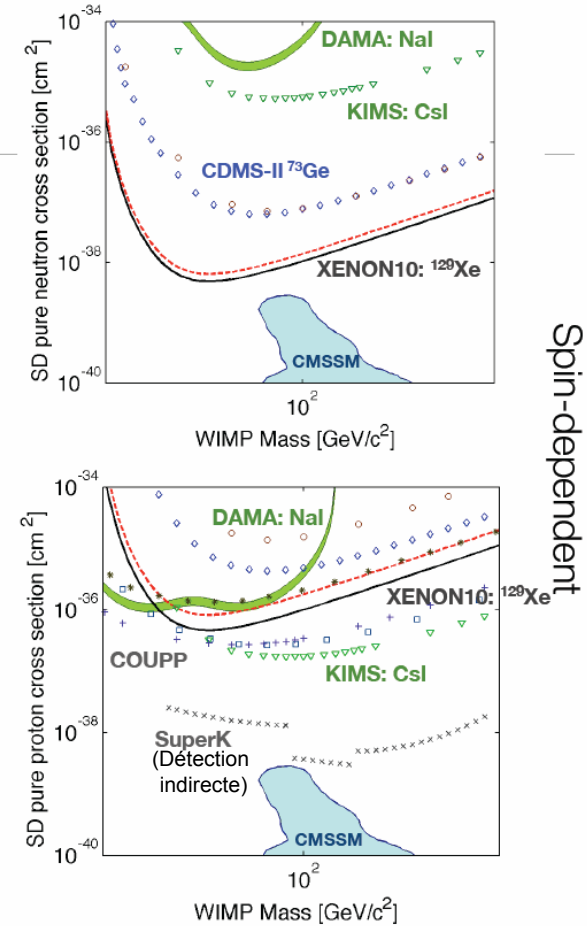
→ 4 technologies totalement différentes !!

Experimental Results



Laura Baudis, University of Zurich, ENTAP DM Workshop, February 3, 2009

En SI les expériences approchent des modèles SUSY (une partie déjà explorée)



En SD les expériences n'explorent pas encore les modèles SUSY. La détection indirecte reste plus compétitive (SuperK)

Recherche directe de WIMPs : Quoi de neuf ?

- Résultats 2007-09 :
 - CRESST Sept 2007
 - XENON10 Mai 07
 - KIMS Sept 07
 - CDMS Mars 08
 - COUPP Fev 08
 - DAMA Avril 08
 - CoGeNT Juin 08
 - ZEPLIN III Dec 08

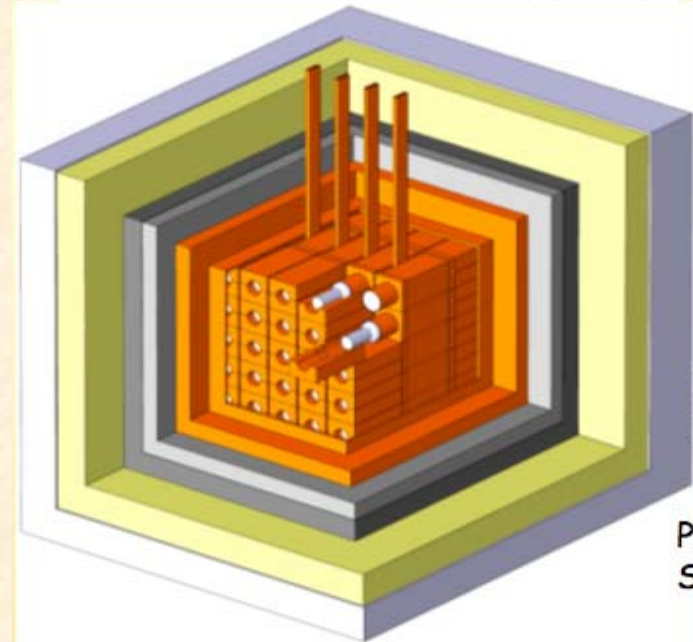
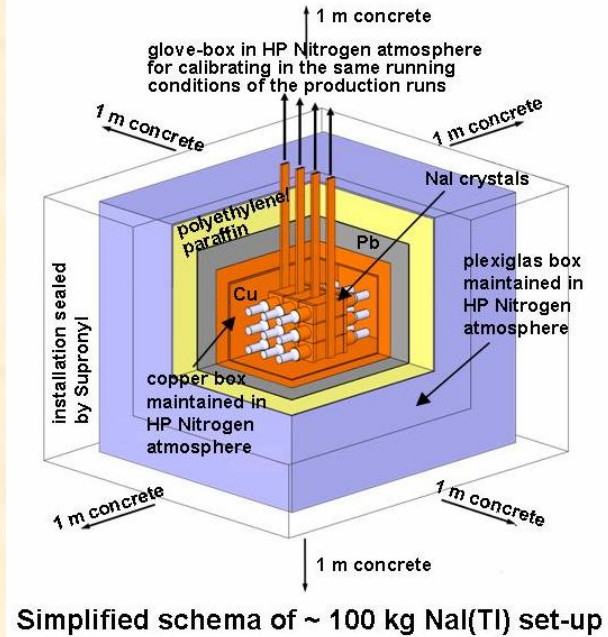
Recherche directe de WIMPs : Scintillateurs solides

- scintillateur inorganique alcalin-halide dopé:
(dense et bon rendement lumineux)
 - **DAMA/LIBRA** (Gran Sasso) : cristaux NaI(Tl)
 - **ANAIS** (Canfranc) : cristaux NaI(Tl), projet 100kg
 - **KIMs** (YangYang): cristaux CsI(Tl)
- Sensibilité aux couplages Spin-Indépendant et Spin-dépendant
- Analyse par PSD (Pulse Shape Discrimination) possible mais \neq réjection active événement par événement...
- Production en masse aisée à un coût raisonnable:
 - étude du signal de modulation annuel possible



Recherche directe de WIMPs : DAMA/LIBRA

- DAMA = 9×9.7 kg NaI(Tl)
(DARkMATTER)
 - Fond $\sim 1\text{-}2$ evt/kg/jour/keV
 - Seuil ~ 2 keVee ~ 25 keVrecul
 - 7 cycles annuels 1995-2002, 0.29 tonnes.an
- LIBRA = 25×9.7 kg NaI-(Tl)
(Large sodium Iodide Bulk for RARE processes)
 - 4 cycles annuels 2003, 0.53 tonnes.an



PL
S



Recherche directe de WIMPs : DAMA/LIBRA

→ **Signal de modulation à $\sim 8.3 \sigma$ CL ...!!**

$\text{Acos}[\omega(t-t_0)]$; continuous lines: $t_0 = 152.5$ d, $T = 1.00$ yr

D'après P. Belli
DAMA/LIBRA results
Virtual Institute of Astroparticle physics
April, 3rd 2009

2-4 keV

$A = (0.0215 \pm 0.0026)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 51.9/66$ **8.3 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 117.7/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.3 \times 10^{-4}$

2-5 keV

$A = (0.0176 \pm 0.0020)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 39.6/66$ **8.8 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 116.1/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.9 \times 10^{-4}$

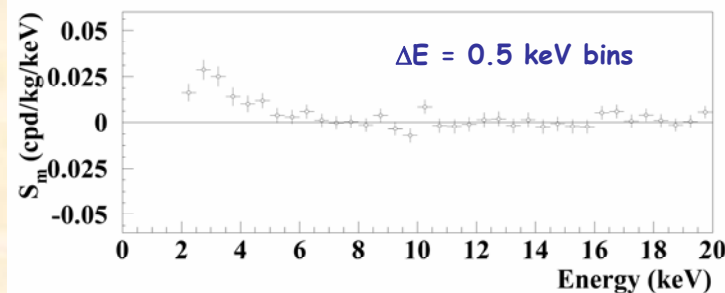
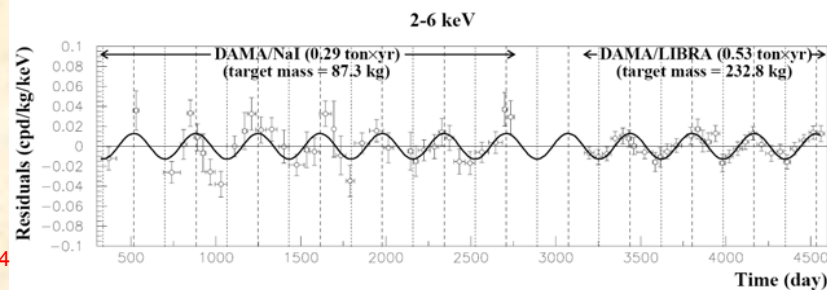
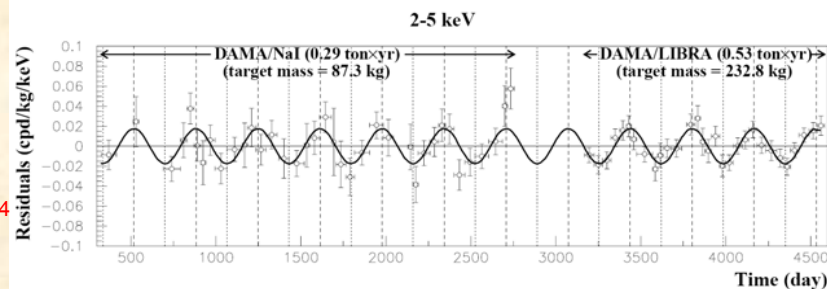
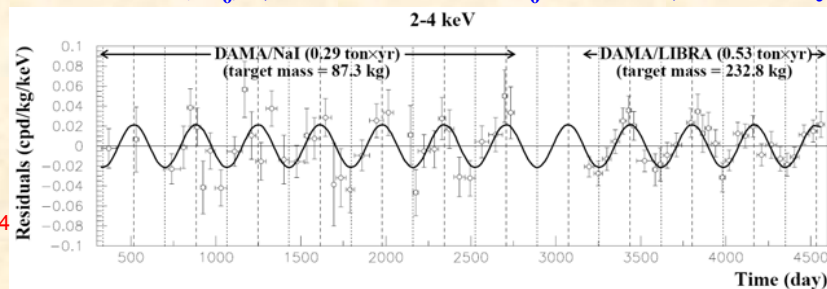
2-6 keV

$A = (0.0129 \pm 0.0016)$ cpd/kg/keV

$\chi^2/\text{dof} = 54.3/66$ **8.2 σ C.L.**

Absence of modulation? No

$\chi^2/\text{dof} = 116.4/67 \Rightarrow P(A=0) = 1.8 \times 10^{-4}$



$$R(t) = S_0 + S_m \cos[\omega(t - t_0)]$$

here $T = 2\pi/\omega = 1$ yr and $t_0 = 152.5$ day



Recherche directe de WIMPs : DAMA/LIBRA

- le signal DAMA/LIBRA est exclu par presque toutes les expériences de détection directe en prenant les scénarios « classiques » jusqu'à $M_w \sim 10 \text{ GeV}$

Grosse activité théorique autour du signal DAMA/LIBRA

- Matière Noire (très) légère
- Effet canalisation (très controversé)
- Interaction inélastique
- Couplage uniquement aux leptons...

Questions ouvertes aussi...

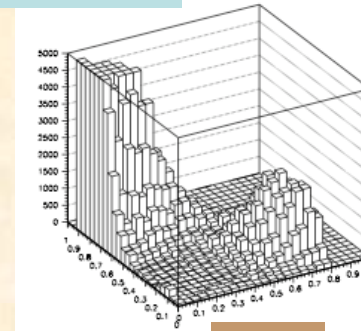
- Le signal est très proche du seuil
 - le bruit des PMs est dominant : queue de distribution modulée?
 - l'efficacité varie
- Pic vers 3 keV dans le spectre modulé et le spectres simples
 - Contributions du 40K (3keV X)
 - Modulation du pic ?
- Analyse statistique des simples / multiples

Upgrade électronique sept-oct 2008

Remplacement de tous les PMs planifié

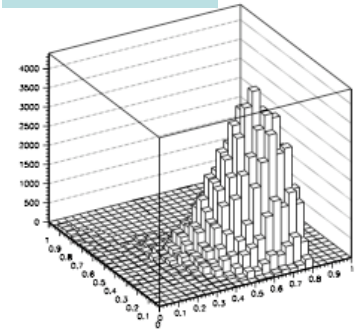
2-4 keV region : pulse shape analysis for PMT noise rejection

PMT noise

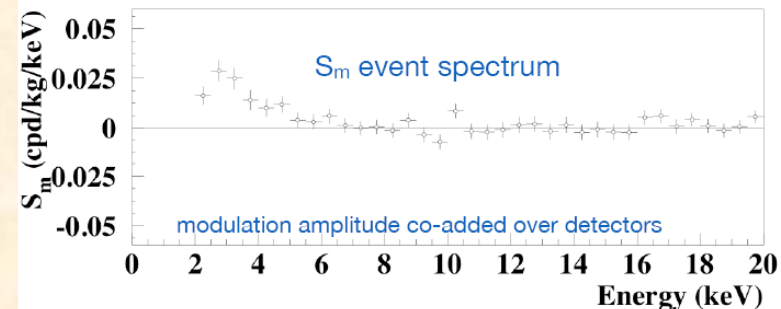
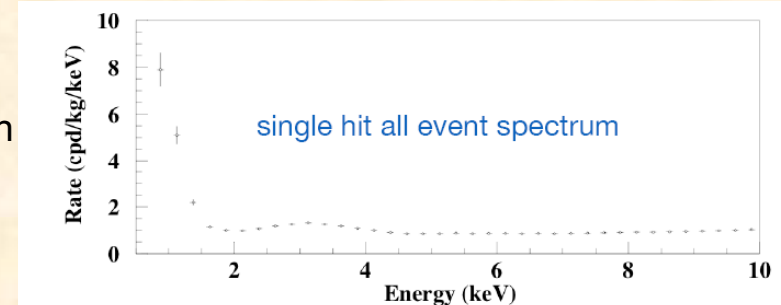


Data

Nal(Tl) evts



Source calib

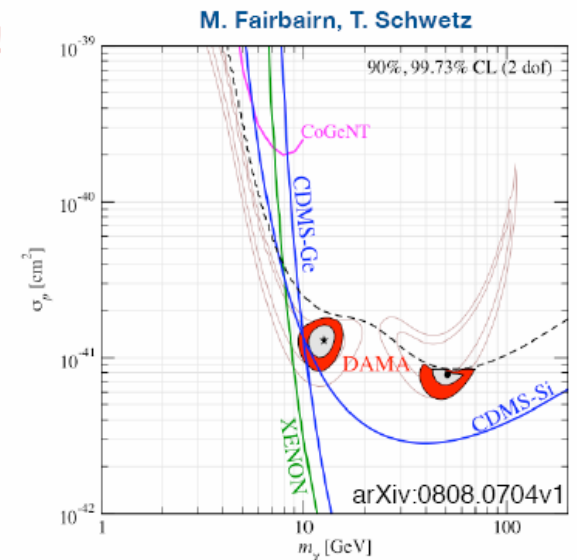
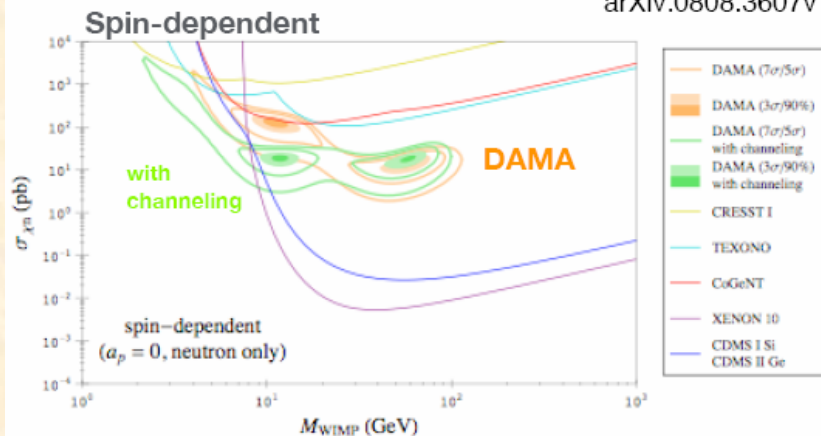
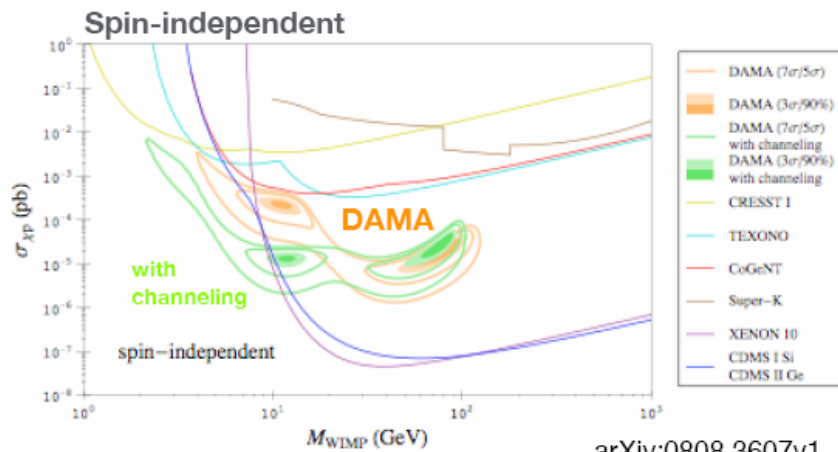




Recherche directe de WIMPs : DAMA/LIBRA

DAMA Signal and Existing Experimental Limits at Low WIMP Masses

- WIMP hypothesis: severe tension with other experiments!



Ion channeling effect: scattered ion parallel to crystal axis will undergo small-angle scattering which will channel it along the gaps in the lattice; such an ion has lower dE/dx , yielding increased light, effectively reducing the energy threshold for low-energy nuclear recoils

Channeling: has not yet been demonstrated for nuclear recoils starting from a lattice site, only for incident ion beam; nor has been the opposite effect, ion blocking, been considered

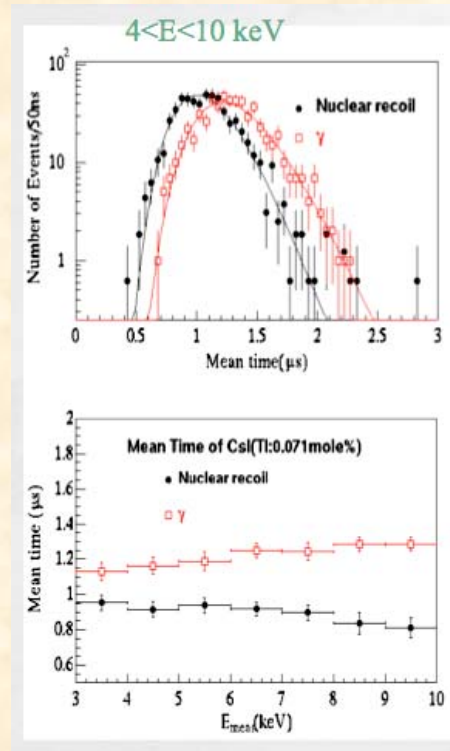
Recherche directe de WIMPs : KIMS

Korea Invisible Mass Search

- 4*8.7 kg CsI(Tl)
- Analyse avec PSD sur 3409 kg.d

Upgrade récents

- 12 détecteurs (104.4 kg)
- μ veto (scint. Liq. + 56 PMTs)
- Fond réduit à 1 dru (1 coup/jour dans la bande d'intérêt).
- But = test de la modulation DAMA



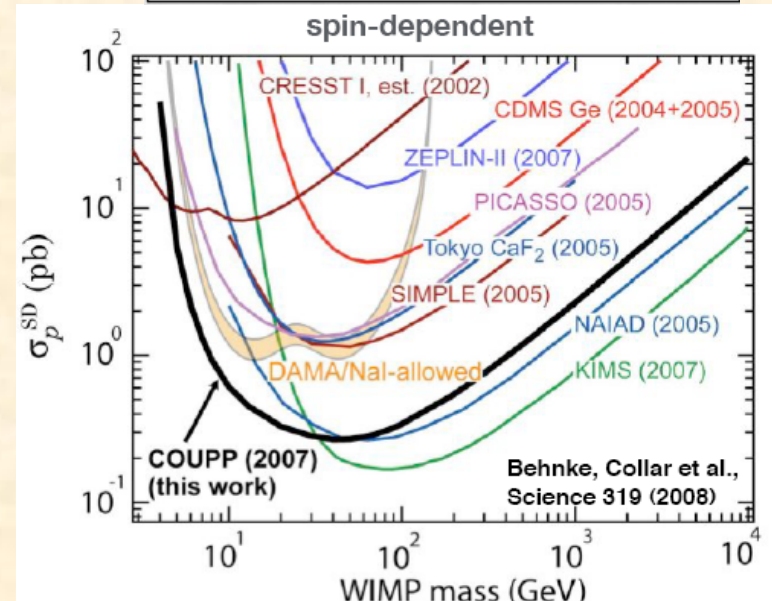
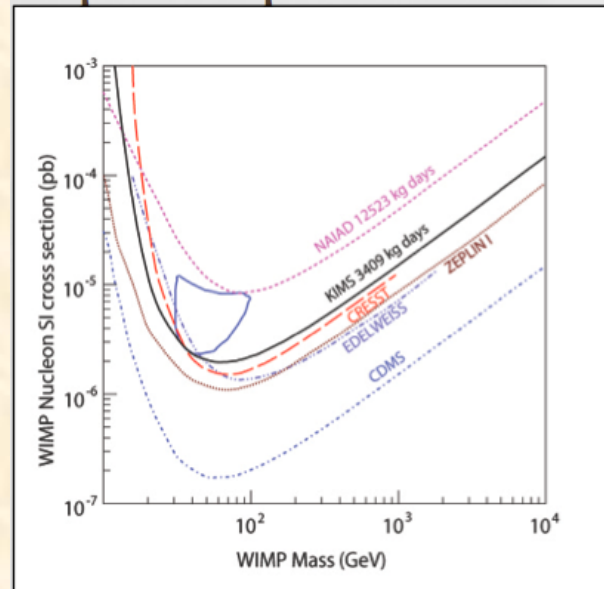
	<Sp>	<Sn>		CsI(Tl)	NaI(Tl)
Cs-133	-0.370	0.003	Photons/MeV	~60,000	~40,000
I-127	0.309	0.075	Density(g/cm ³)	4.53	3.67
Na-23	0.248	0.019	Decay Time(ns)	~1050	~230
			Peak emission(nm)	550	415
			Hygroscopicity	slight	strong

Recherche directe de WIMPs : KIMS

- Comparaison direct avec DAMA en couplage Spin.Ind.
- Signal DAMA ^{127}I rejeté pour $M_W > 20 \text{ GeV}/c^2$ (PRL99, 091301(2007))
- Meilleures limites avec COUPP en Spin.Dep. sur proton
 - (Ge, Xe peu sensible en Spin.Dep.), complémentaire.
- Run en cours sur la nouvelle installation



Spin independent limits



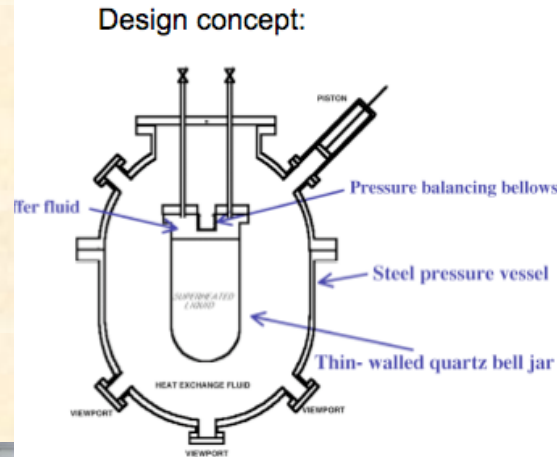
Recherche directe de WIMPs : dE/dX

- **Principes :**
 - État métastable transitant sous l'effet d'un dépôt d'énergie dE/dX « concentré »
 - Condition de fonctionnement tel que dE/dX pour le fond (gamma) n'induit pas de transitions
 - Discrimination « passive »
 - Le fond est souvent du au Radon (fond α) + fond neutron habituel
- **2 expériences en compétition**
 - PICASSO : gouttelette 50-100 μ m C_4F_{10} dans matrice
 - COUPP : chambre à bulle CF_3I (CF_3Br)
 - + SIMPLE ??

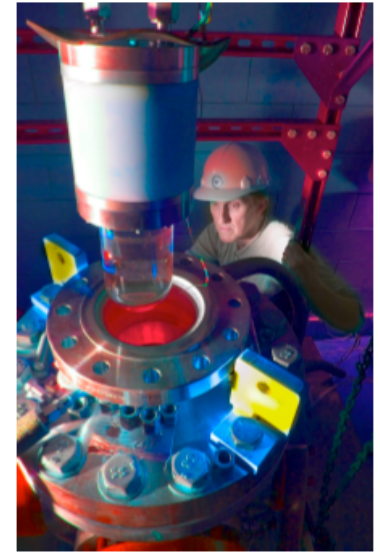
Recherche directe de WIMPs : COUPP

- **Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics @ Fermilab (300mwe)**
- Liquide surchauffé
- Faible coût
- Spin.Dep et Spin.Ind. (I, Br, F, C)
- Rejection γ 10^{10} @10keV !
- Scan de T et P permet de remonter à Er
- 2kg de cible
- Trigger piezzo + 2 camera pour reconstruction 3D
- Fond principal = décroissance ^{222}Rn

1-Liter Chamber in NuMi Tunnel

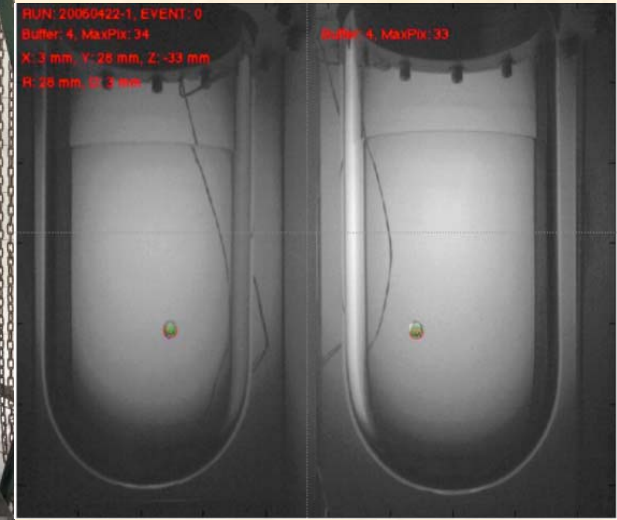


Target liquid: CF_3I



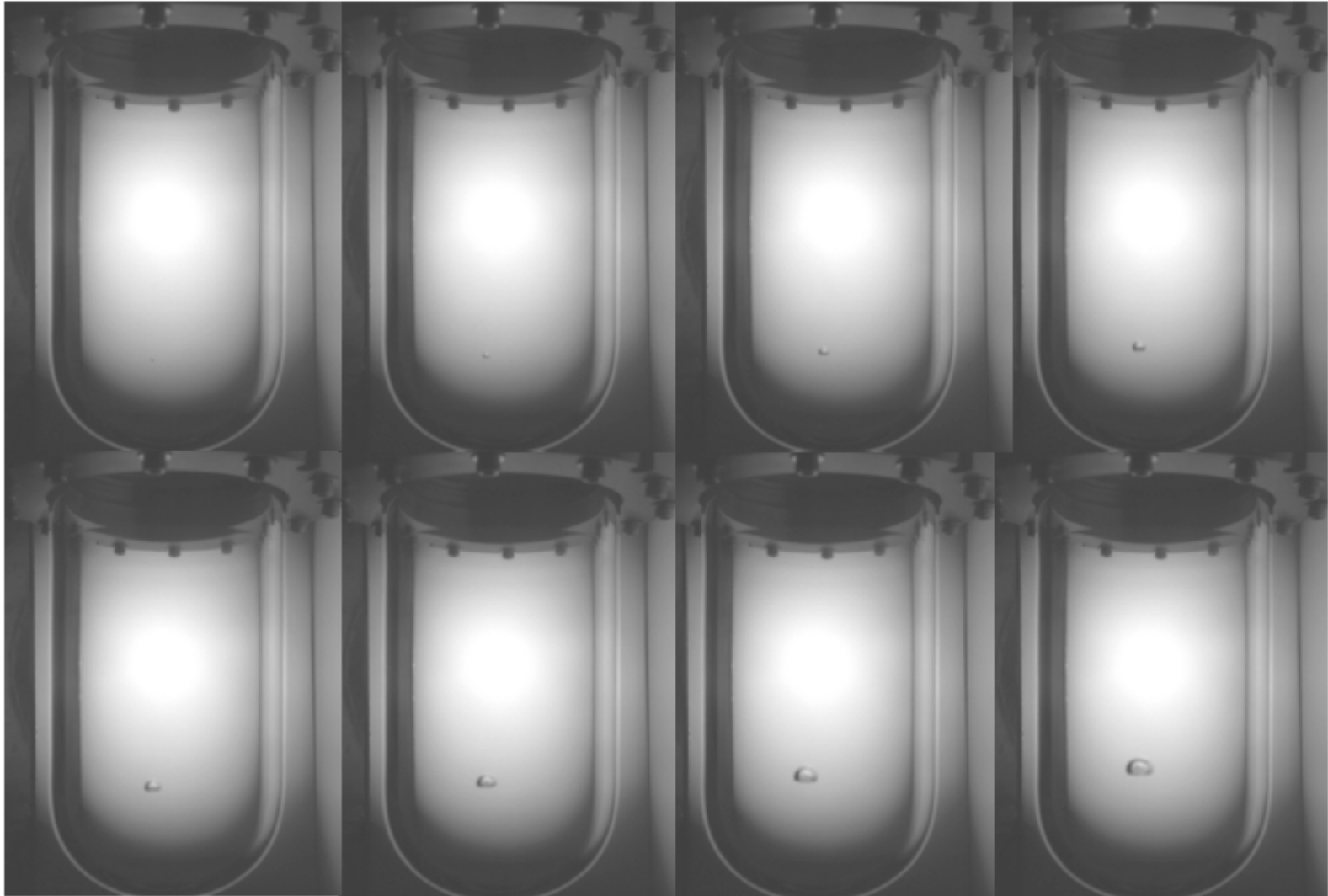
RUN: 20060422-1, EVENT: 0
Buffer: 4, MaxPix: 34
X: 3 mm, Y: 26 mm, Z: -33 mm
R: 28 mm, Ω : 3 mrad

Buffer: 4, MaxPix: 33



Recherche directe de WIMPs : COUPP

160 msec of Video Buffer (20 msec/frame)

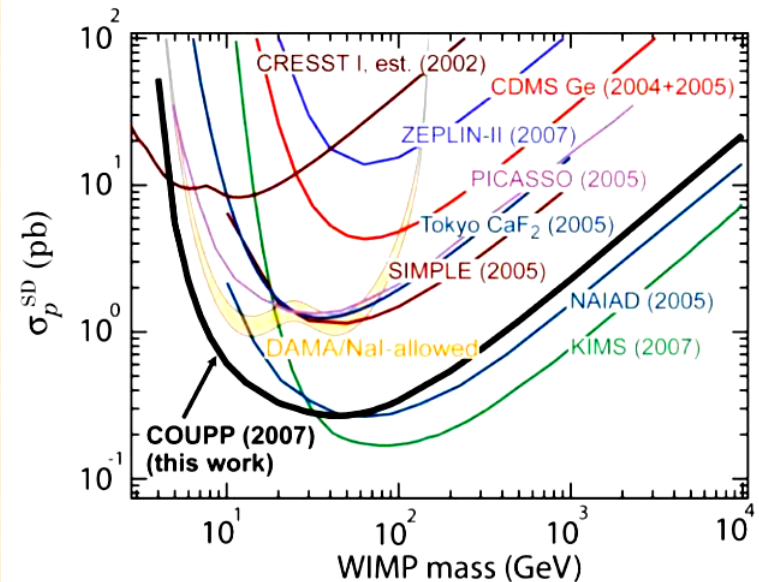
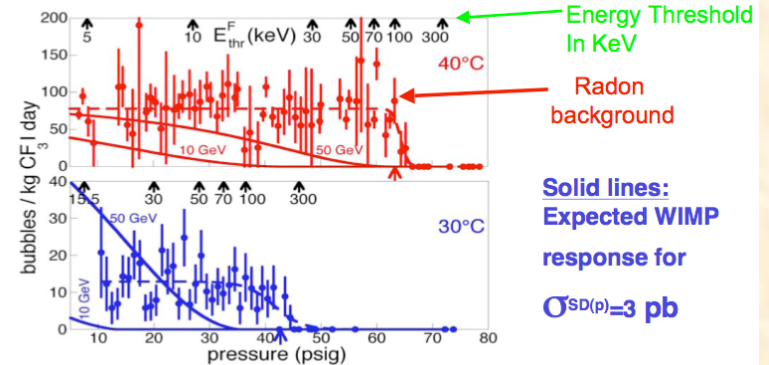


Recherche directe de WIMPs : COUPP

- Bonne sensibilité du ^{19}F en Spin.Dep. (sur proton)
- Run en 2006 +2007 avec meilleur fond
- Vase de 20kg et 60kg en construction (but qq 10^{-8} pb en Spin.Ind.)

Data from 2006 Run

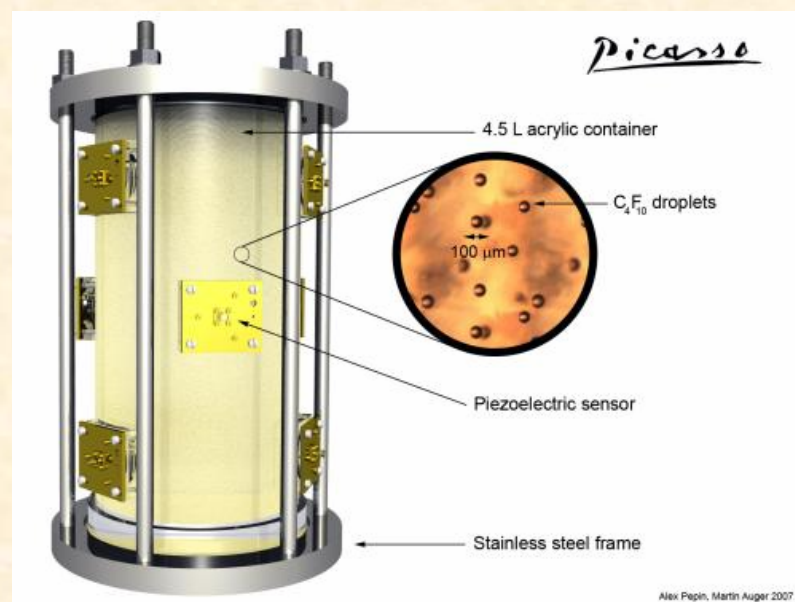
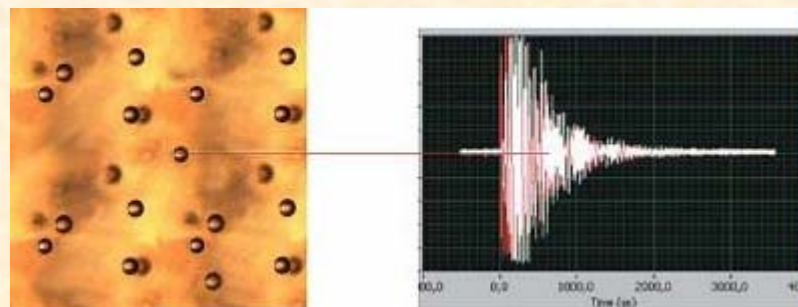
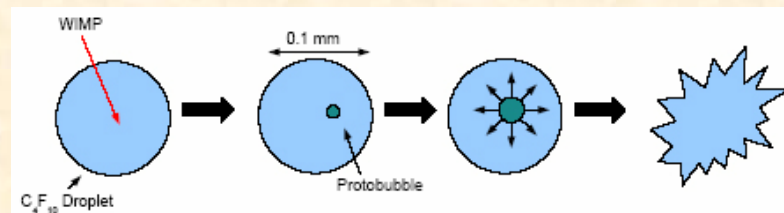
- Data from pressure scan at two temperatures.
- Fit to alphas + WIMPs



Recherche directe de WIMPs : PICASSO

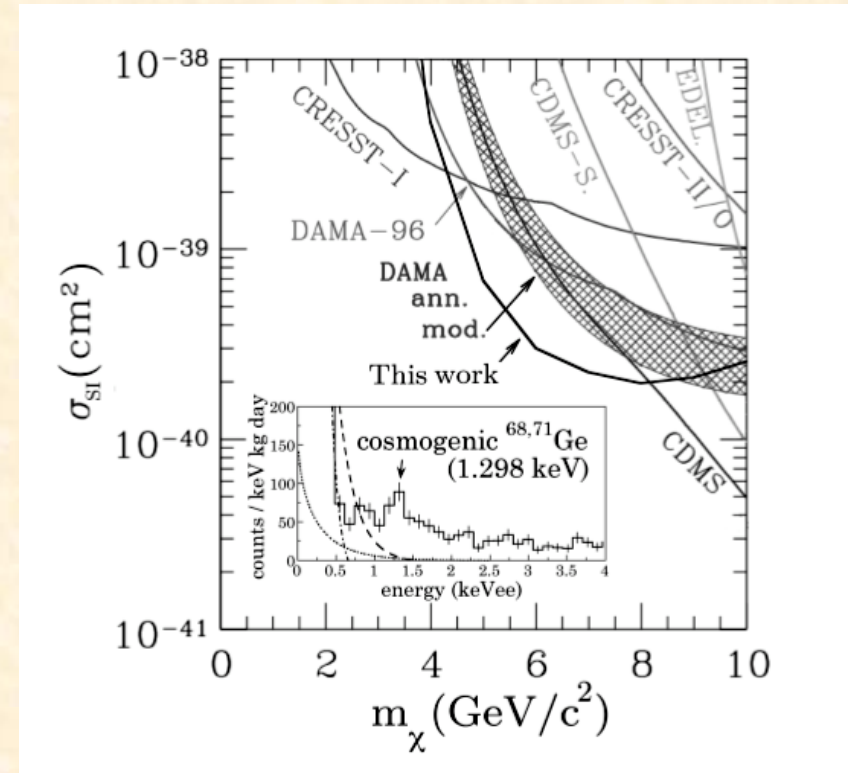
Projet d'Identification de **C**Aandidats **S**upersymétriques **S**Ombres

- @ SNOLAB
- Un 1^{er} module de 4,5 l avec 80g de masse active de C₄F₁₀.
- signal acoustique de qq ms enregistré par 9 transducteurs piézo-électrique
- Localisation par triangulation
- 32 modules en cours d'installation (2.6 kg actif)



Recherche directe de WIMPs : CoGeNT (77K)

- 330 mwe près de Chicago
- PPC HPGe 0.475 kg detector (1 pf, small electrode, p type, EurifET ER 105) : seuil 330 eV !
- Anticompton NaI
- 2 papiers Sept 07, July 08
- R&D pour GERDA/MAJORANA



Recherche directe de WIMPs : Gaz noble liquéfié

(transparents suivants inspirés cours E. Aprile et revue L. Baudis

Pourquoi ?

- Détecteurs multi-tonnes envisageables
- Cryogénie classique : 170 K pour LXe, 87 K pour LAr (27K pour Ne)
- Auto-blindage performant (surtout pour LXe)
- Seuil de détection bas : scintillation élevé (proche du NaI(Tl))
- Discrimination active des reculs nucléaires: sur rapport charge/lumière (IIphase) ou avec PSD (Pulse Shape Discrimination)
- Xe ($A \sim 131$) : sensible aux couplages Spin.Ind.et Spin.Dep. (~50% isotopes impaires)
- Xe: Pas d'isotopes radioactifs à longue durée de vie (Kr-85 peut être retiré)
- Ar: Ar-39 (radioactif) est un gros problème. Des solutions sont à l'étude

Gaz noble liquéfié : propriétés de base

Dense and homogeneous
 Do not attach electrons, heavier noble gases give high electron mobility
 Easy to purify (especially lighter noble gases)
 Inert, not flammable, very good dielectrics
 Bright scintillators

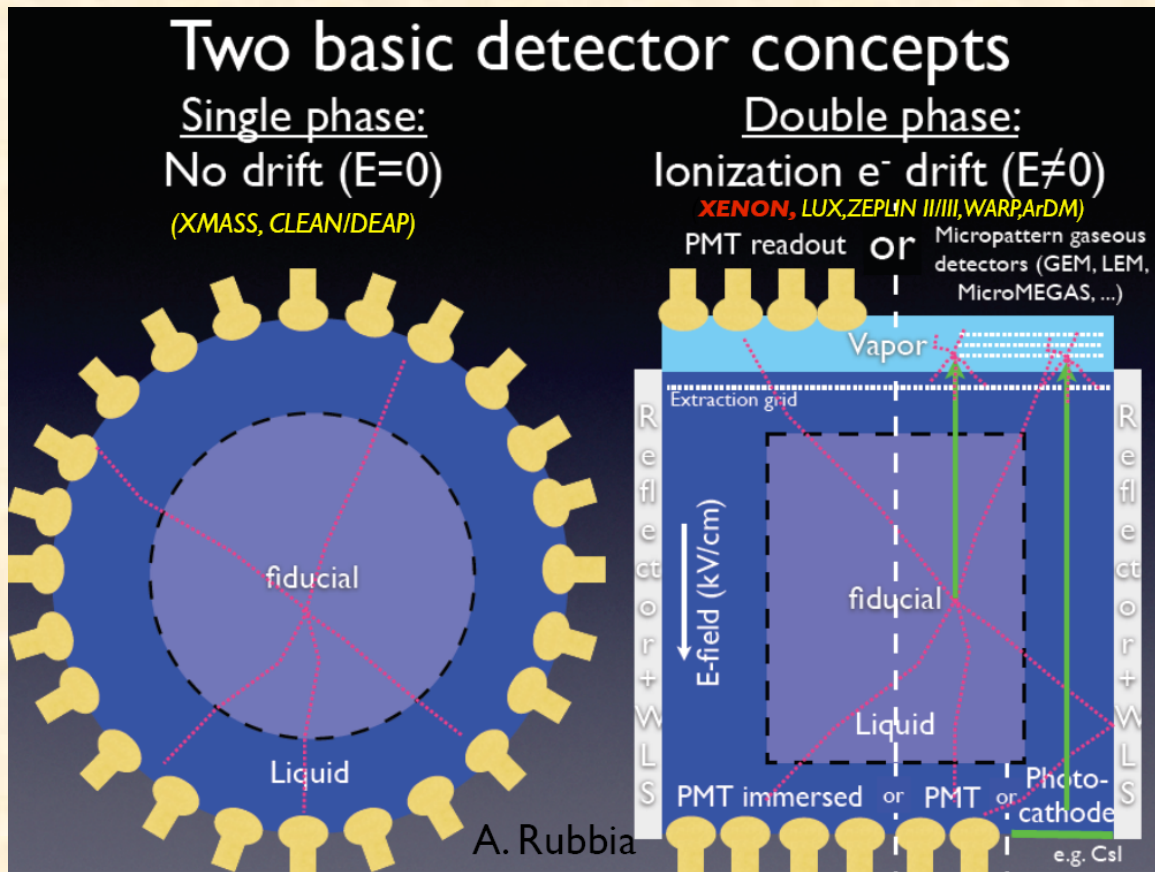
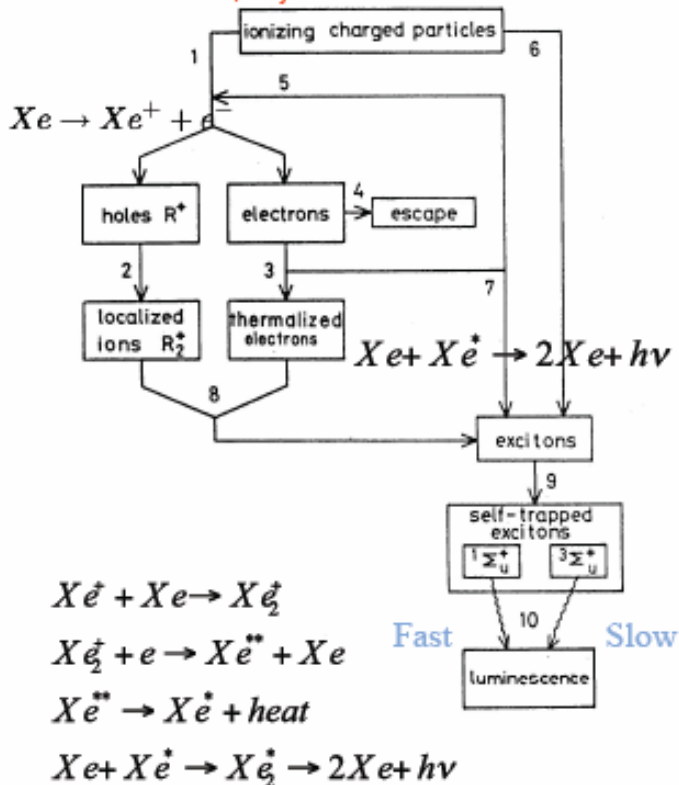
	Liquid density (g/cc)	Boiling point at 1 bar (K)	Electron mobility (cm ² /Vs)	Scintillation wavelength (nm)	Scintillation yield (photons/MeV)	Long-lived radioactive isotopes	Triplet molecule lifetime (μs)
LHe	0.145	4.2	low	80	19,000	none	13,000,000
LNe	1.2	27.1	low	78	30,000	none	15
LAr	1.4	87.3	400	125	40,000	³⁹ Ar, ⁴² Ar	1.6
LKr	2.4	120	1200	150	25,000	⁸¹ Kr, ⁸⁵ Kr	0.09
LXe	3.0	165	2200	175	42,000	¹³⁶ Xe >10 ²¹ ans ββ	0.03

Material	Ar	Kr	Xe
Gas			
Ionization potential <i>I</i> (eV)	15.75	14.00	12.13
W-values (eV)	26.4 ^a	24.2 ^a	22.0 ^a
Liquid			
Gap energy (eV)	14.3	11.7	9.28
W-value (eV)	23.6±0.3 ^b	18.4±0.3 ^c	15.6±0.3 ^d

	Scintillation Light	Intrinsic Backgrounds
Ne (A=20) \$60/kg 100% even-even nucleus	85 nm requires wavelength shifter	Low BP (20 K), all impurities frozen out No radioactive isotopes
Ar (A=40) \$2/kg 100% even-even nucleus	128 nm requires wavelength shifter	Natural Ar contains ³⁹ Ar at 1Bq/kg, corresp. to ~150 ev/kg/day/keV at low energies
Xe (A=131) \$800/kg 50% odd nuclei (¹²⁹ Xe, ¹³¹ Xe)	175 nm UV quartz PMT window	No long lived isotopes ⁸⁵ Kr can be removed by active charcoal filter or distillation

Gaz noble liquéfié : principes

Kubota et al. 1979, Phys. Rev.B



Ar $\tau_{\text{singulet}}/\tau_{\text{triplet}} = 7\text{ns}/1.6\mu\text{s}$

Xe $\tau_{\text{singulet}}/\tau_{\text{triplet}} = 4\text{ns}/22\text{ns}$

• Simple mais pas de rejet actif événement par événement .

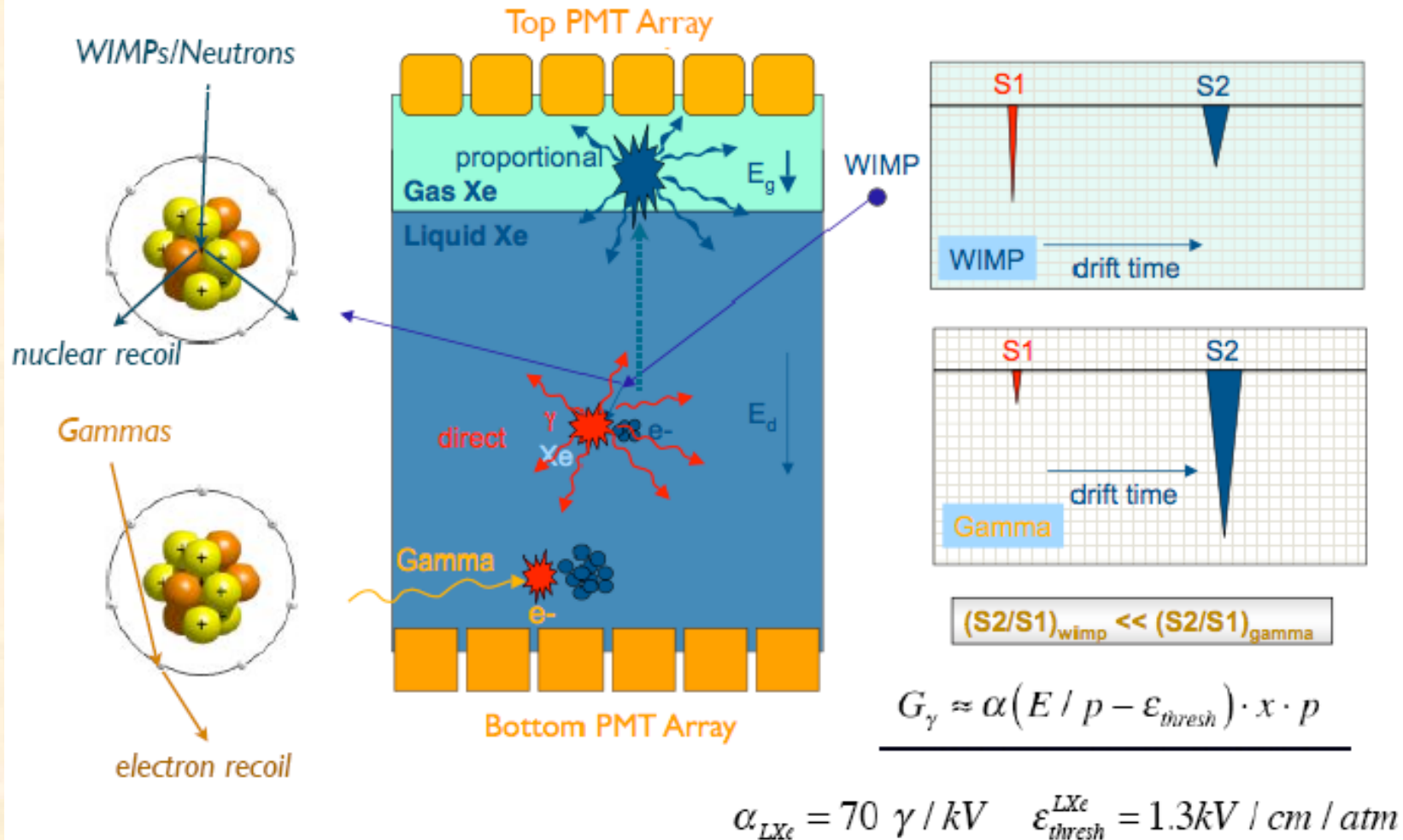
• PSD possible (bien adapté à Ar, tps de vis différents singulet-triplet)

• Plus complexe mais rejet actif événement par événement .

• différentes technologie pour lire la charge

Gaz noble liquéfié : principes double phase

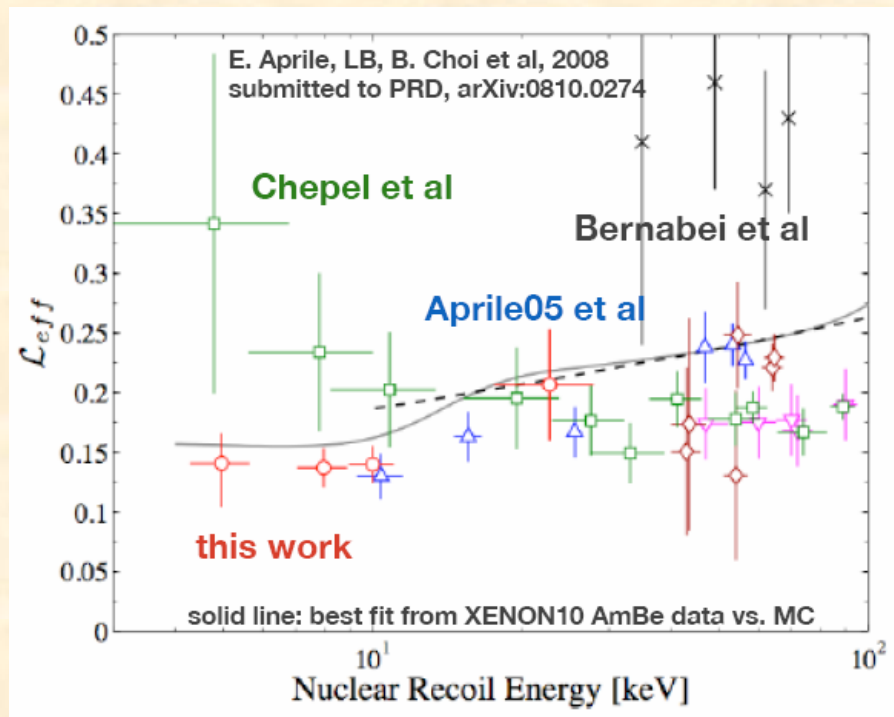
Noble liquid two-phase TPC



Gaz noble liquéfié : LXe

De nombreux projets :

- Simple phase : XMASS
- II-phase : XENON, ZEPLIN-II-III, LUX
- Étude approfondie du LXe (quenching)

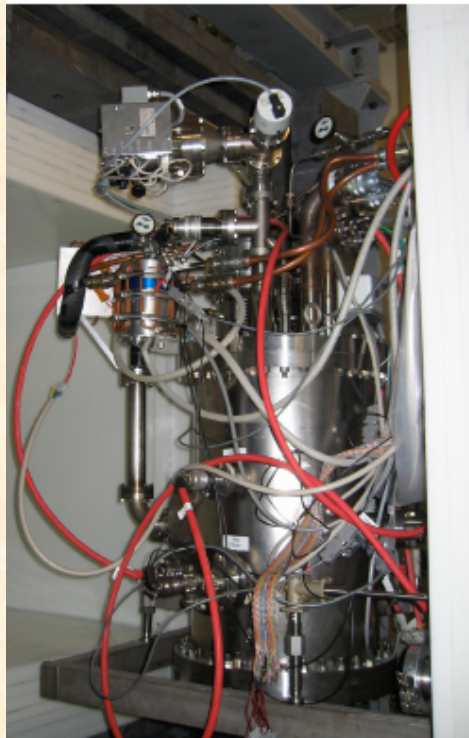


Gaz noble liquéfié LXe: Xenon

The XENON Dark Matter Search Phases



the past
(2005 - 2007)



XENON10

Achieved (2007) $\sigma_{SI} = 8.8 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$

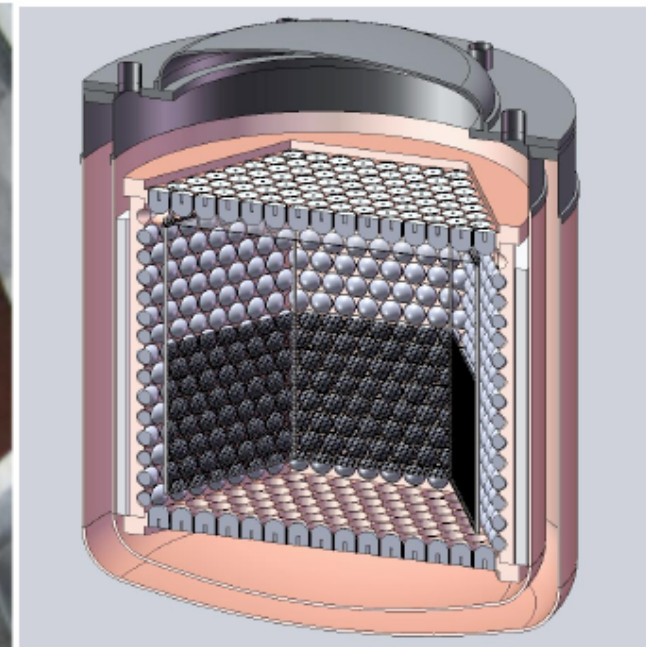
the current
(2007-2010)



XENON100

Projected (2009) $\sigma_{SI} \sim 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$

the future
(2010-2014)

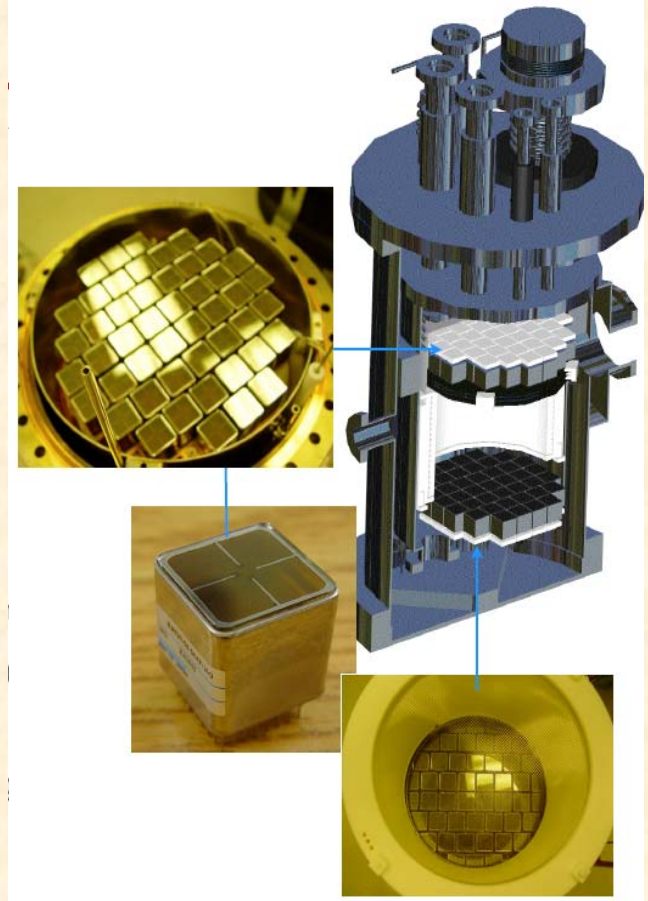
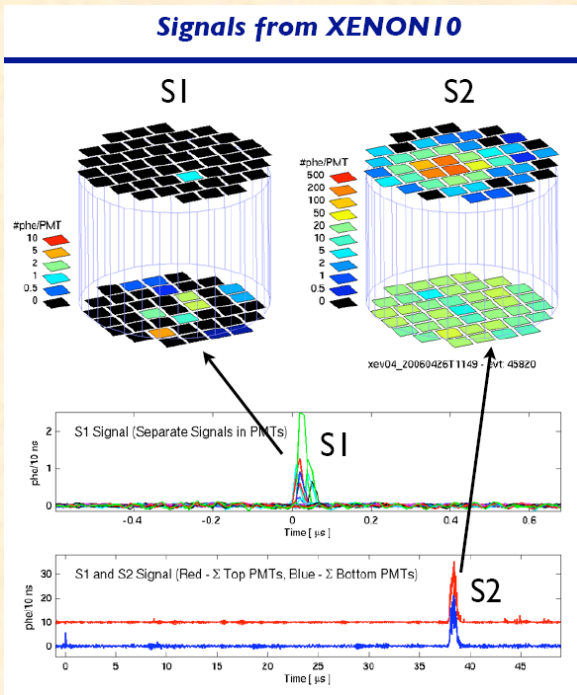


XENON1T

Projected (2014) $\sigma_{SI} \sim 10^{-47} \text{ cm}^2$

Gaz noble liquéfié LXe: Xenon-10

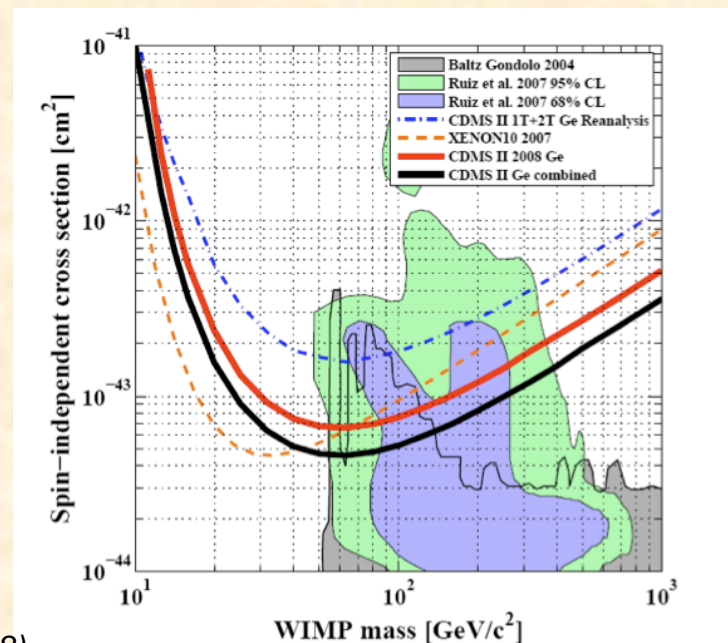
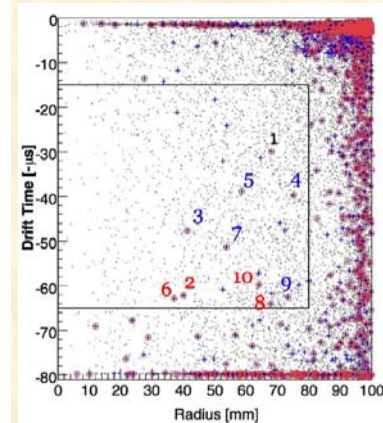
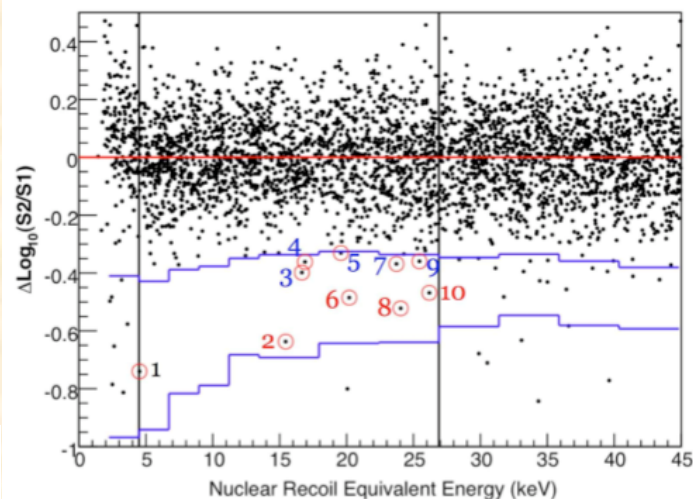
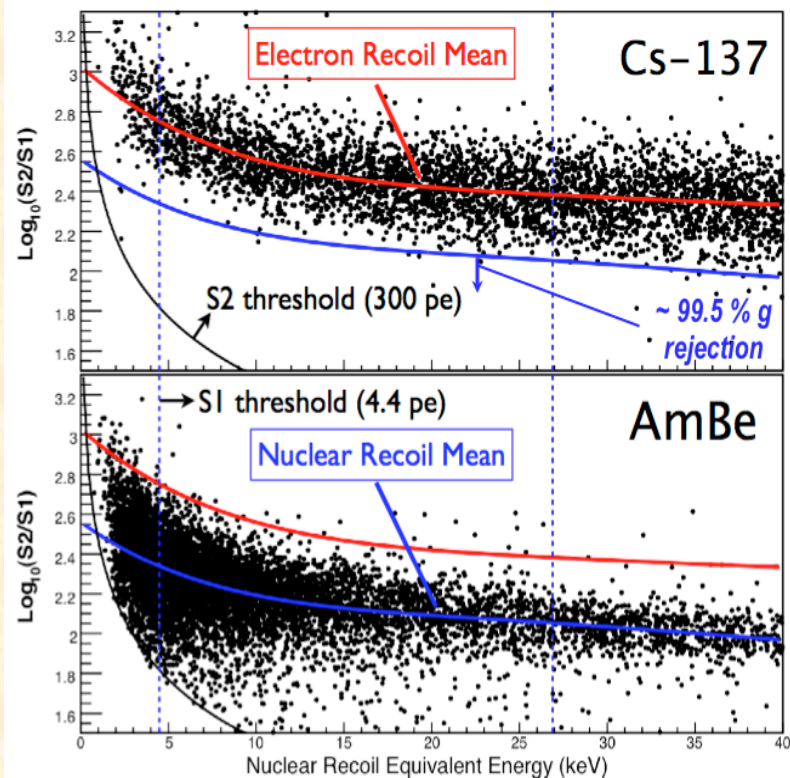
- Gran-Sasso
- 22kg de LXe, 15 kg actif, 5 kg fiduciel, Drift charge sur 15cm
- **Hamamatsu R8520 1"× 3.5 cm PMTs**
 - bialkali-photocathode Rb-Cs-Sb, Quartz window; ok at -100°C and 5 bar, QE > 20% @ 178 nm
- **48 PMTs top, 41 PMTs bottom array**
 - x-y position from PMT hit pattern; $\sigma_{x-y} \approx 1$ mm, z-position from Δt_{drift} ($v_{d,e^-} \approx 2\text{mm}/\mu\text{s}$), $\sigma_Z \approx 0.3$ mm
- **Cooling: Pulse Tube Refrigerator**
 - 90W, coupled via cold finger (LN2 for emergency)
 - LXe maintained at $T = 180$ K and $P = 2.2$ atm
- **12 kV cathode:** $E_d = 0.73$ kV/cm (drift), $E_{\text{gas}} = 9\text{kV}/\text{cm}$ (S2)



Gaz noble liquéfié LXe: Xenon-10

- 59 days x 5.4 kg fiduciel * 0.86 (ϵ) * 0.5 (acceptance zone de recul 50%) = **136 kg.jour d'exposition**
- **~ 10 evts dans la zone de recul**

Calibration : discrimination vs énergie

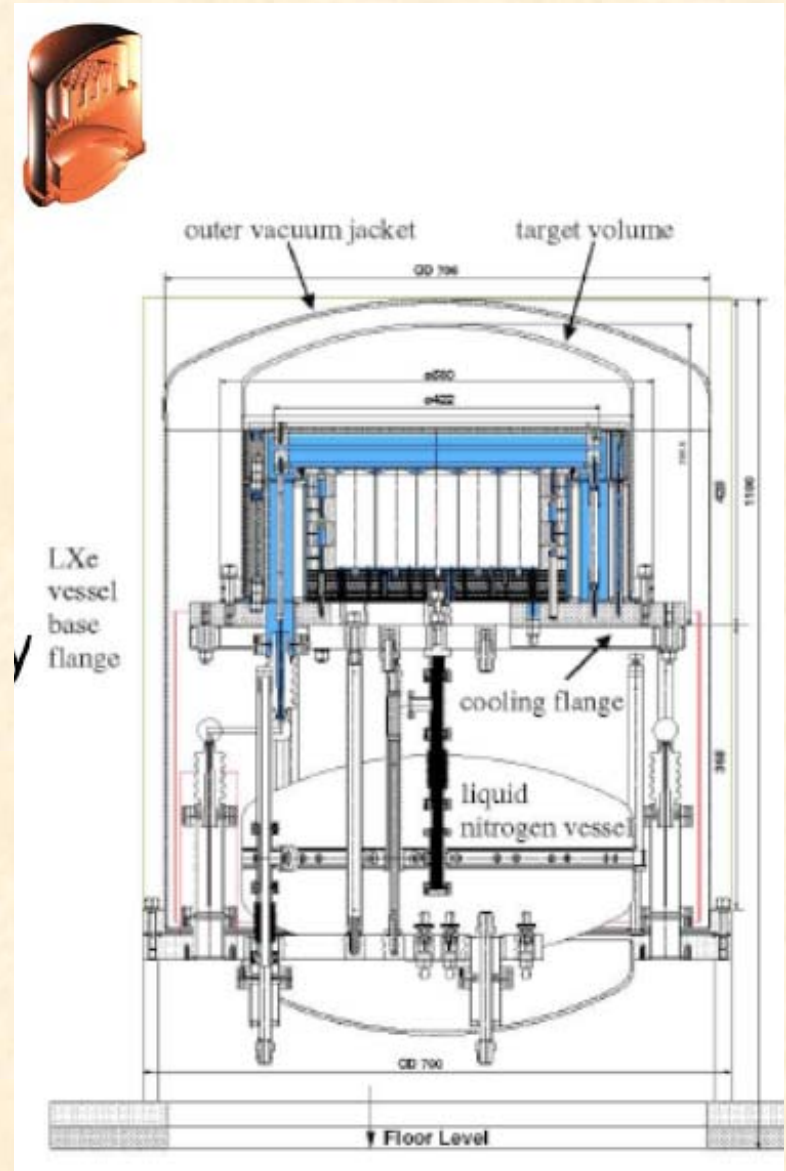


J.Angle et al.,
PRL 100, 021303(2008)

Gaz noble liquéfié LXe: ZEPLIN-III

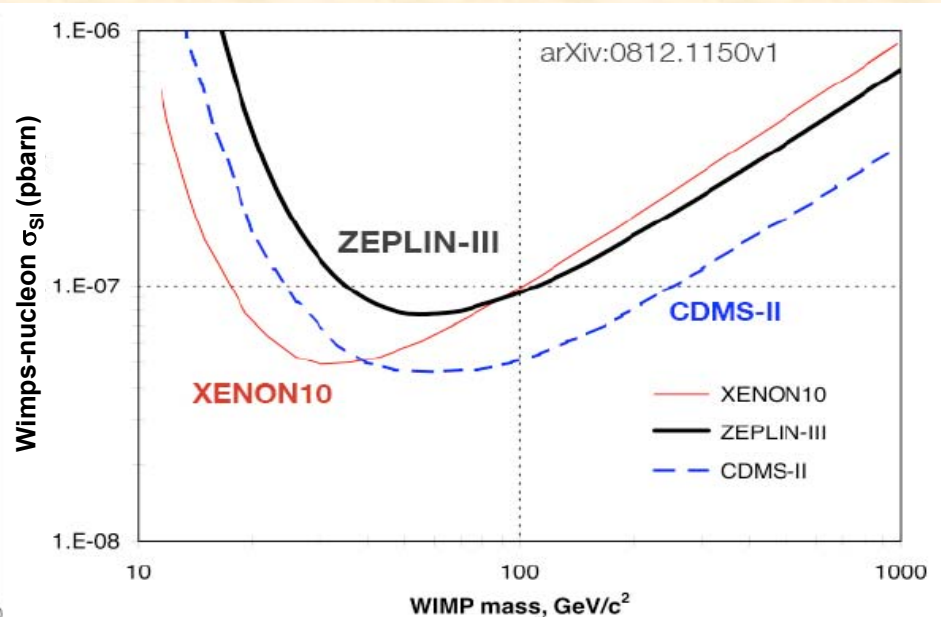
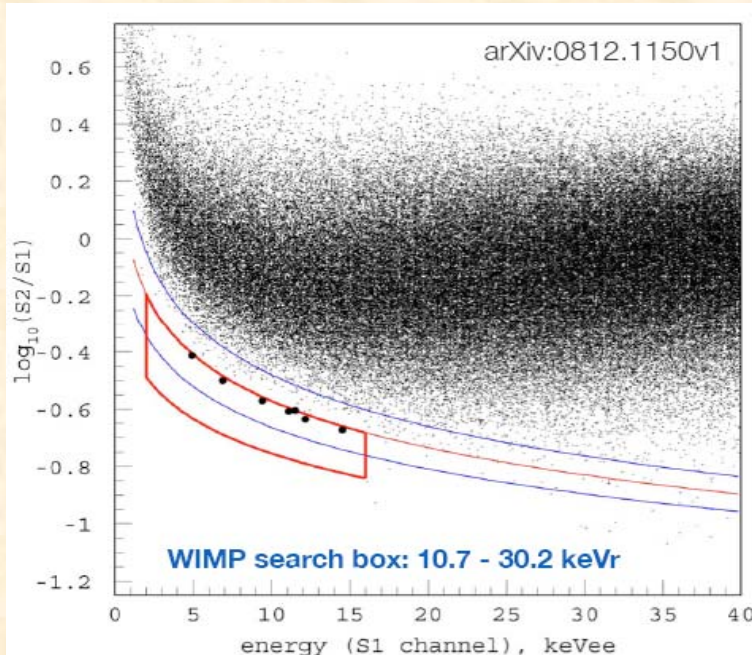
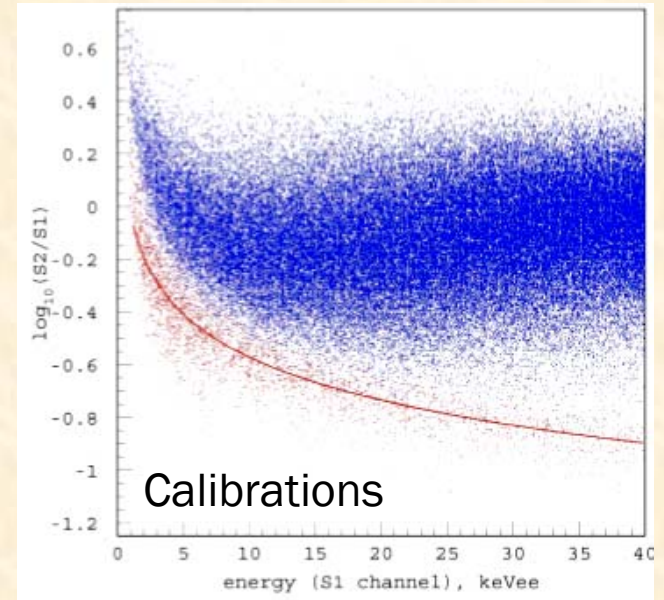
ZonEd Proportional scintillation in Liquid Noble gases

- Mine de Boulby
- II-phase LXe TPC: 12 kg actif, 7 kg fiduciel, drift sur 3.5 cm
- 31 x 2" PMTs
- E très élevé: 3.9 kV/cm dans liquide, 7.8 kV/cm dans gaz
- Fond élevé (10x XENON10) dominé par les PMTs
- Prochains runs avec PMTs bas bruit



Gaz noble liquéfié LXe: ZEPLIN-III

- 6.7 kg fiduciel, exposition de 127kg.jour après coupure
- 7 événements dans la zone de recul pour 11.6 ± 3 attendus
- Consistant avec 0 evts (limite sup. 90% CL à 2.9 évts)

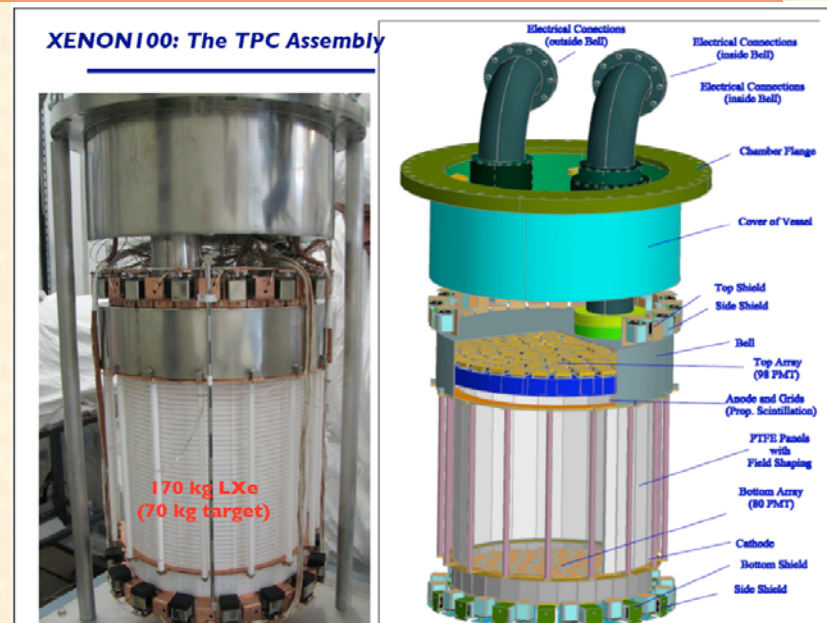


Gaz noble liquéfié II-phase LXe: Futur

- XENON-100 en froid, en cours de purification (2-3 mois...) avec de nombreuses améliorations / XENON-10
- Run de physique fin 2009 ? (un an de retard sur planning annoncé à l'été 2008)
- ZEPLIN-III en run
- LUX (**L**arge **U**nderground **X**enon) annonce un planning très agressif avec 300kg mais seulement 4 PMs aujourd'hui...
- Projet Multi-tonne en LXe simple phase (XMASS)

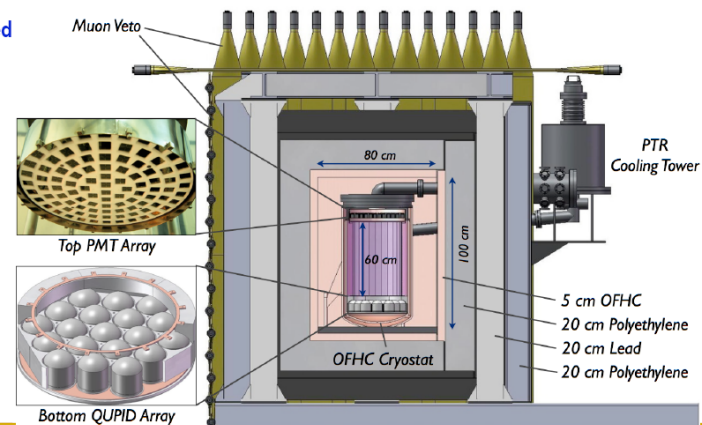
Gaz noble liquéfié LXe: XENON-100

- New TPC with 170 kg Xe (100 kg active shield)
 - x 10 fiducial mass of XENON10
 - x 2 drift gap (30 cm)
- Improved PMTs (242 for Target & Veto) and DAQ
 - Low activity (U/Th \sim 1 mBq/PMT)
 - QE > 30% @ 175 nm (bottom array)
- New Cryostat and Cryogenics System
 - Low activity SS (U/Th < 1 mBq/kg)
 - Cryocooler and Feedthroughs outside shield
 - Kr85-removal by distillation tower
- Background goal: 100 x less than XENON10
- Operational: waiting for improved light yield
- 1st Science Data: Fall 09



XENON100 Upgrade (2010-12)

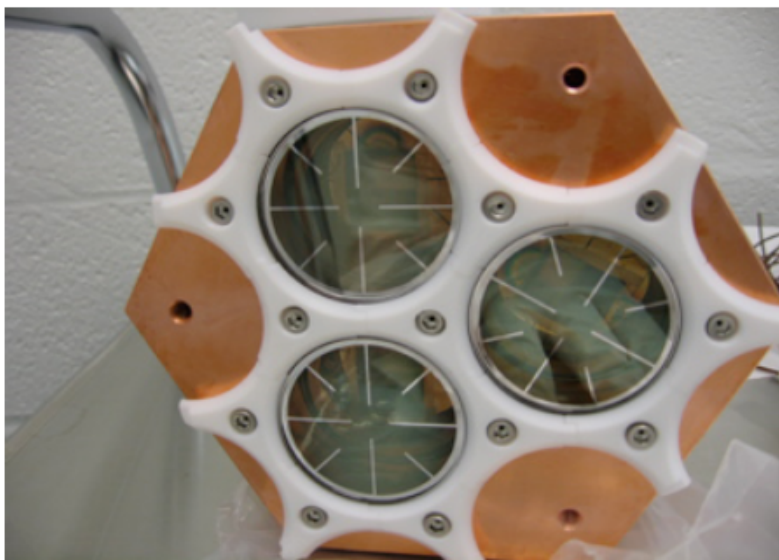
- > increase fiducial mass to 100 kg (double drift to 60 cm)
- > decrease background with lower activity cryostat and PMTs; 10 x more sensitivity by 2012
- > test technologies for XENON1T; larger collaboration: US, Europe, Japan, China
- > approved



Gaz noble liquéfié LXe: LUX

The LUX Experiment

- **300 kg dual phase LXe TPC (100 kg fiducial), with 122 PMTs in large water shield with muon veto**
- 50 kg LXe prototype with 4 R8778 PMTs being assembled and tested at CWRU
- full detector to be installed at Homestake Davis Cavern, 4850 ft in fall 2009 (in 8 m \varnothing water tank)
- **WIMP sensitivity goal: 7×10^{-10} pb after 10 months**

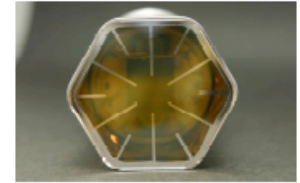


R. Gaitskell, IDM08, Stockholm



Gaz noble liquéfié LXe: XMASS

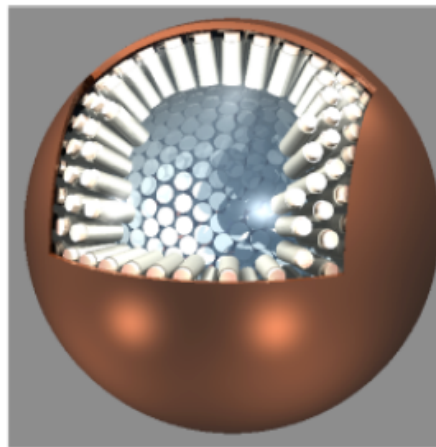
Single-Phase Xenon: XMASS



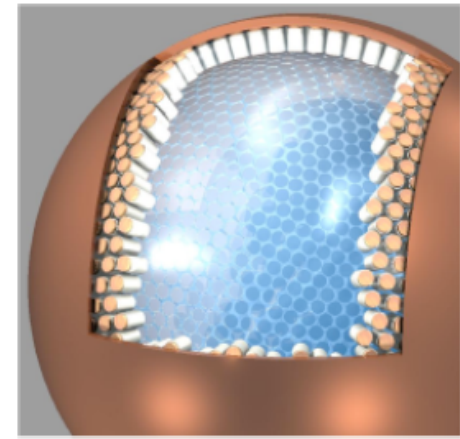
- 100 kg (3 kg fiducial mass) prototype operated (52 2" Hamamatsu R8778 PMTs)
 - the PMT coverage was limited, thus also the position reconstruction of edge events
- **next step:** 850 kg (100 kg fiducial mass) with 642 PMTs (64% photo coverage)
 - basic performance confirmed with prototype
 - vertex reconstruction, self-shielding, BG level are being studied with MCs
- **detector is being designed, new hall in Kamioka is ready since February 08**



100 kg (3 kg fiducial)



850 kg (100 kg fiducial)



23 t (10 t fiducial)

Y. Suzuki, IDM08, Stockholm

Gaz noble liquéfié : II-phase LAr

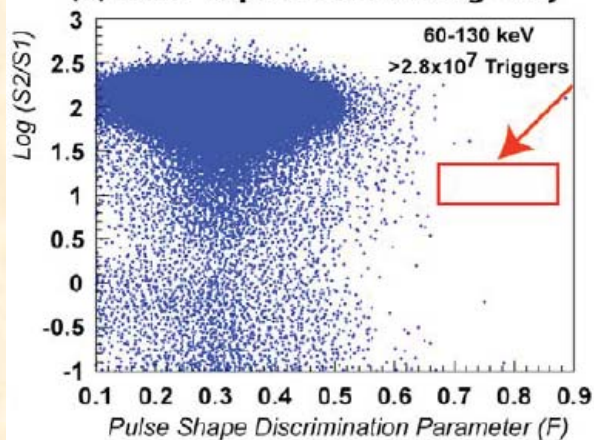
Two-phase Argon Detectors



WARP at LNGS

3.2 kg LAr operated at LNGS; results from zero events > 55 keVr

(b) WIMP Exposure of 96.5 kg · day



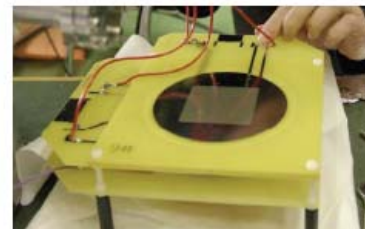
140 kg LAr, 41 3" PMTs under construction
active LAr shield: ~ 8 t,
viewed by 300 PMTs



ArDM at CERN



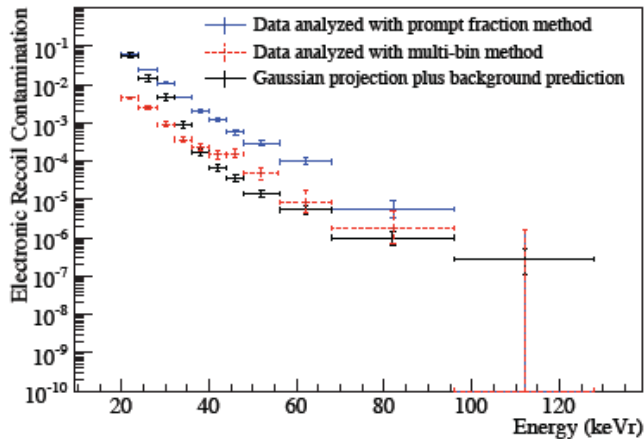
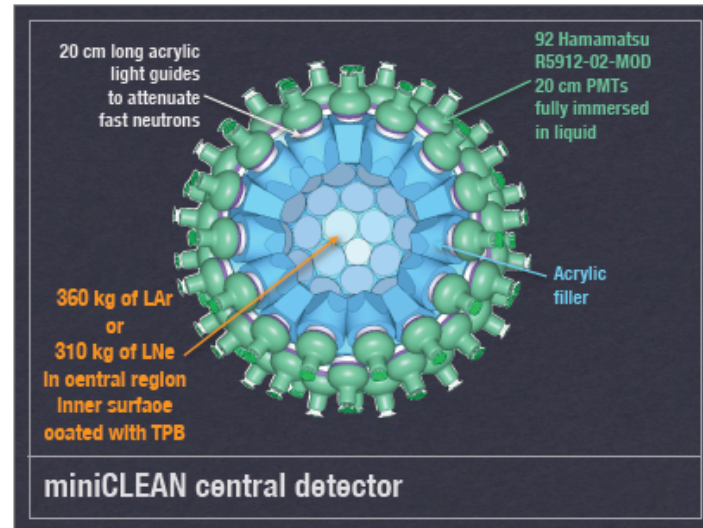
1 t LAr prototype under construction
direct electron readout via LEMs (thick macroscopic GEM) S1 with 14 x 8" PMTs



Gaz noble liquéfié : I-phase LAr

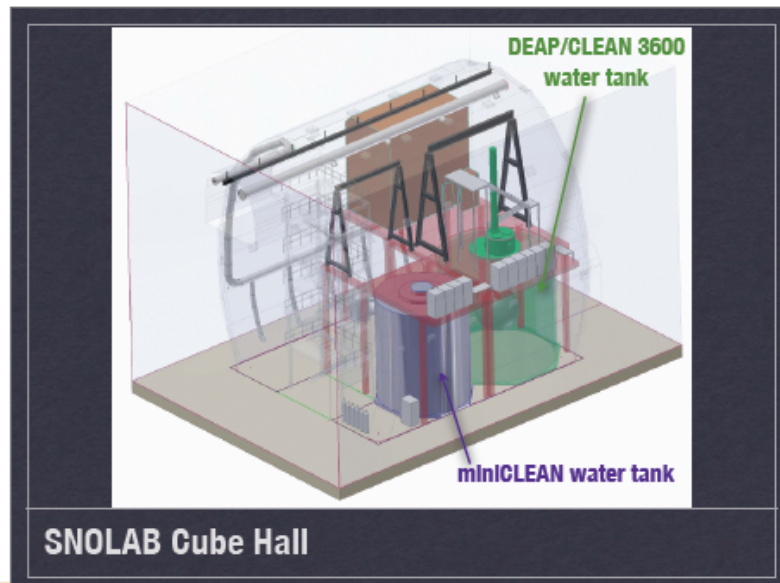
DEAP & CLEAN: Single Phase LAr Detectors

- ▶ ton scale DEAP/CLEAN planned for SNOLAB
- ▶ proposed first phase: 100 kg mini-CLEAN with WIMP search goal of $\sim 5 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ or ~ 10 events/yr
 $\sim 10^5 \text{ kg/d}$
- ▶ To reject gamma background from PMTs and Ar-39 a discrimination better than 10^{-8} for $ER > 50 \text{ keVr}$ is required
- ▶ Current data from small ($\sim 7 \text{ kg}$) DEAP-1 and micro-CLEAN detectors above ground demonstrate a discrimination of 10^{-5} limited by neutron back in lab



microCLEAN results

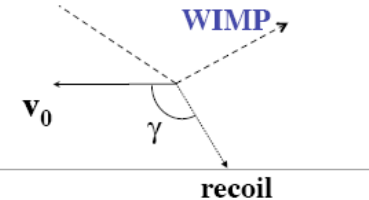
pulse shape discrimination of liquid argon, above ground, little shielding



Recherche directe de WIMPs : TPC gaz

- BUT : directionnalité

Directional Detectors: gas TPCs



DRIFT at Boulby

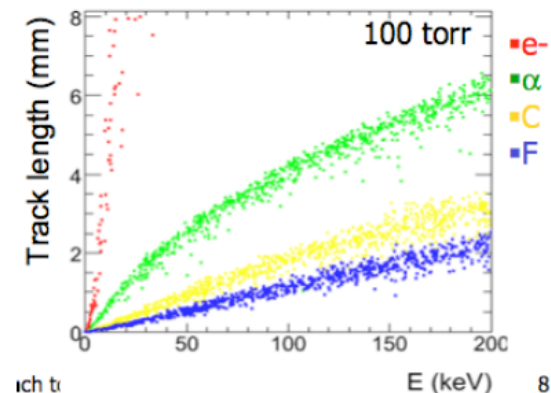
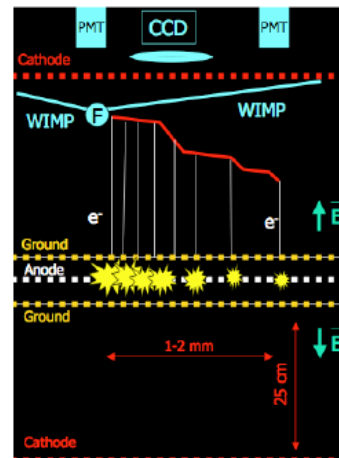
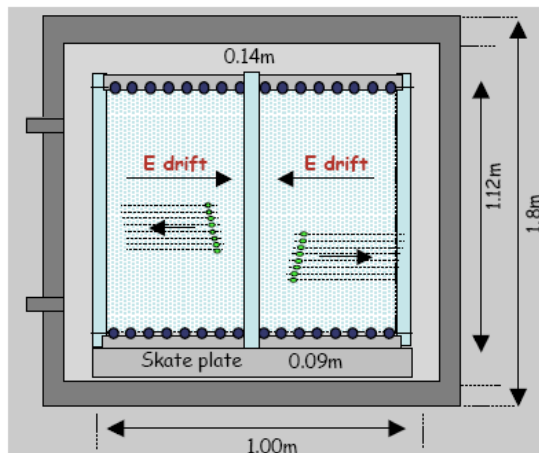
negative ion (CS_2) TPC: 1 m^3 40 Torr CS_2 gas (0.17 kg); 2 mm pitch anode + crossed MWPC

- NR discrimination via track morphology
- 3D track reconstruction for recoil direction: find head-tail of recoil based on dE/dx
- new run in 2007/08 at Boulby with strongly reduced Rn backgrounds

DM-TPC

low-pressure CF_4 gas TPC: 50 Torr

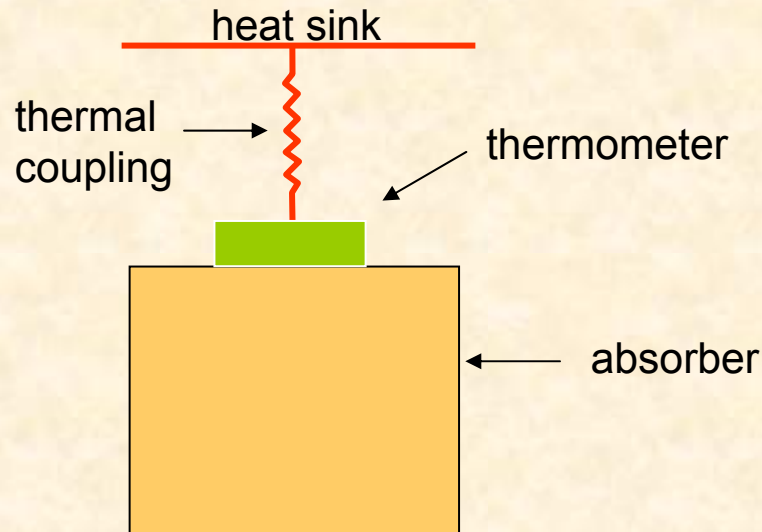
- 40 keV recoil $\sim 1\text{-}2 \text{ mm}$ track
- PMTs for trigger $\Rightarrow z$ - information
- CCD images avalanche region $\Rightarrow E$ and $x\text{-}y$
- head-tail of recoil based on dE/dx
- $2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ modules under commissioning at MIT and ready for operation at WIPP in 2009
- 1 m^3 detector being designed ($0.25\text{-}0.5 \text{ kg/m}^3$)



+ NEWAGE (Japon), MIMAC (He_3 , France)

Seconde Partie

Les détecteurs cryogéniques



Recherche directe de WIMPs : détecteurs cryogéniques

Pourquoi ?

- Résolution en énergie excellente même pour des détecteurs massifs :
 $\sim 2.35(k_B T^2 C)^{0.5}$ peut être diminué en baissant la T (100eV pour 1kg de Ge à 20mK)
- **Les bolomètres à double mesures (Ionisation-Chaleur, Lumière-Chaleur) permettent une excellente discrimination évt par évt**
- Discrimination peut-être améliorée par l'utilisation des signaux de phonons hors d'équilibre + analyse en temps des signaux d'ionisation + design approprié du détecteur : définition d'un volume fiduciel.
- Choix de cible important pour Lumière-Chaleur
- Ge étudié depuis des décennies + process industriel pour Ge ultra pur
- L'idée est d'avoir des expériences à 0 bruit de fond

Problèmes... ?

- Difficile de travailler avec des masses > 1kg
- Coût des détecteurs (ex EDELWEISS 10k€/ détecteur pour 400g)
- Cryogénie à dilution (T<20mK pour thermique, T<100mK pour athermique) assez lourde d'utilisation (mais cryostat sans Helium arrive...)

Paysage :

- 3 grosses expériences installées pour des mesures longues:
 - CDMS (Ge+Si mine du Soudan, E.U)
 - EDELWEISS (Ge tunnel du Fréjus, France),
 - CRESST (CaWO₄ + R&D cristaux, tunnel du Gran Sasso Italie)
- ROSEBUD R&D + mesures courtes au tunnel du Canfranc (Espagne)
- CUORICINO/CUORE (GranSasso) est la plus grosse expérience cryogénique en cours mais les objectifs sont la recherche du $\beta\beta 0\nu$.
- EDELWEISS-CRESST-ROSEBUD associées avec le CERN pour une future expérience européenne à l'échelle de qq 100kg -1 tonne de détecteur
- Contact étroit entre EDELWEISS-CDMS et EURECA-CDMS

Recherche directe de WIMPs : détecteurs cryogéniques

Plan :

- Présentation EDELWEISS + R&D
 - Evts de surface et solution (InterDigit (ionisation), NbSi(athermique))
 - Stratégie pour atteindre qq 10^{-9} pb (SI) d'ici 2011-2012
- Présentation CDMS + R&D
 - Evts de surface et solution (segmentation + athermique)
 - Stratégie pour atteindre qq 10^{-9} pb (SI) d'ici 2011-2012
- Présentation CRESST + R&D
 - Pas de pbs d'évts de surface (?)
 - Pbs des évts chaleur seuls (limitation surmontable ?)
 - Stratégie pour atteindre qq 10^{-9} pb (SI) d'ici 2011-2012
- Présentation EURECA + R&D scintillation ROSEBUD et IPNL
 - Nouvelle cavité au LSM
 - détecteur ?
 - calendrier

Cf Alain Benoit

Recherche directe de WIMPs : EDELWEISS

- ◆ CEA Saclay (DAPNIA & DRECAM)
- ◆ CSNSM Orsay
- ◆ IPN Lyon
- ◆ Institut Néel Grenoble
- ◆ FZ/ Universität Karlsruhe
- ◆ JINR Dubna

Detectors, electronics, acquisition, data handling, analysis

Detectors, cabling, cryogenics, analysis

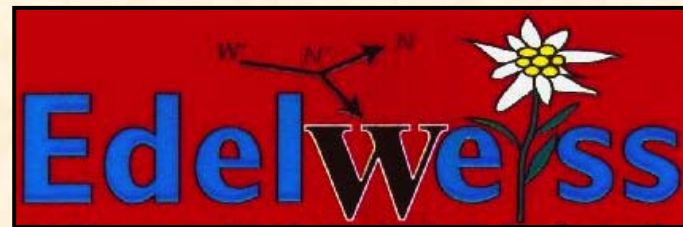
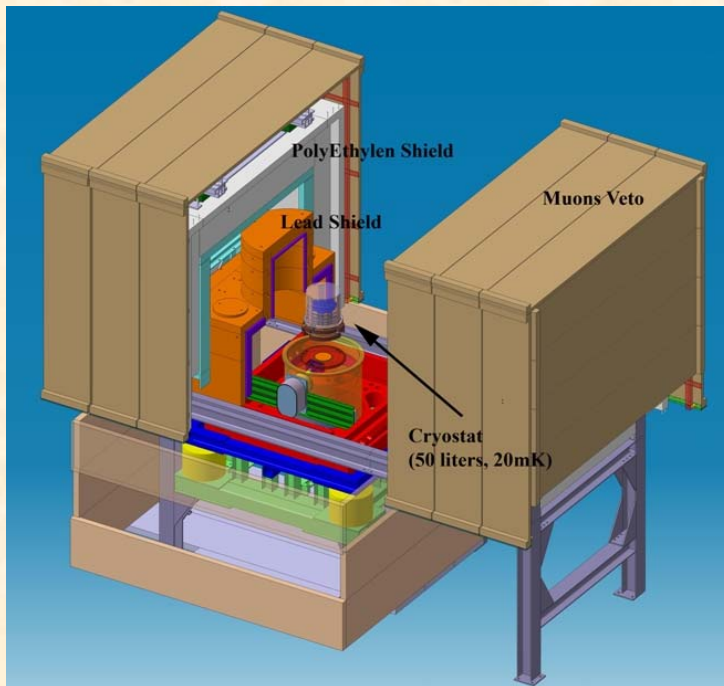
Electronics, low radioactivity, analysis, detectors

Cryogenics, electronics

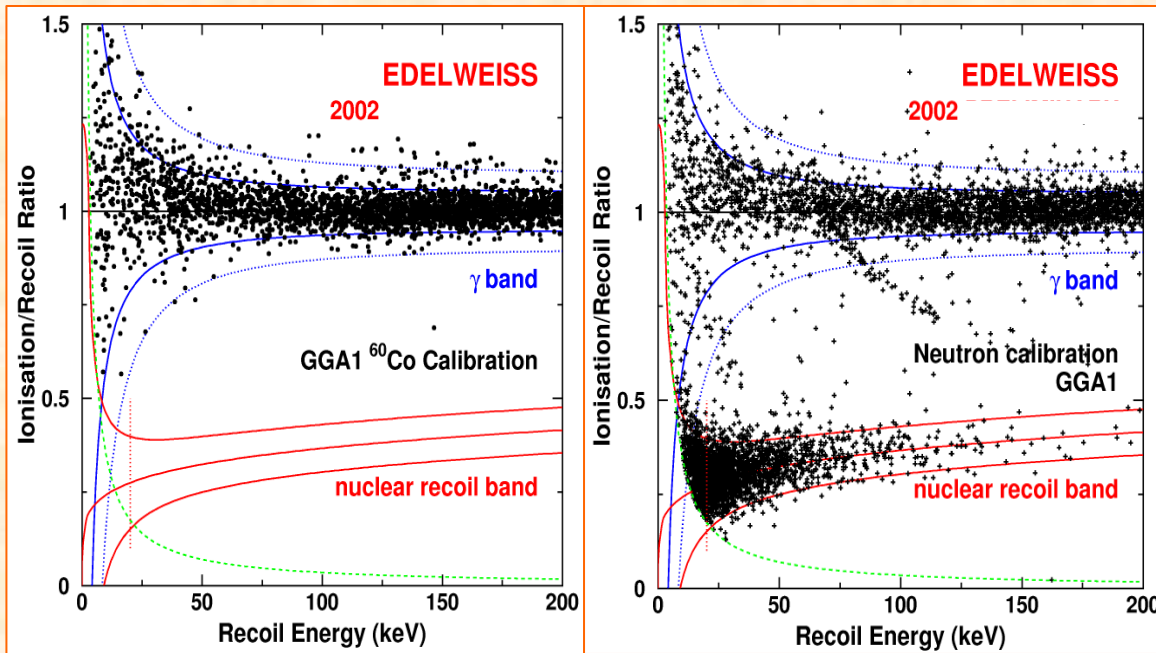
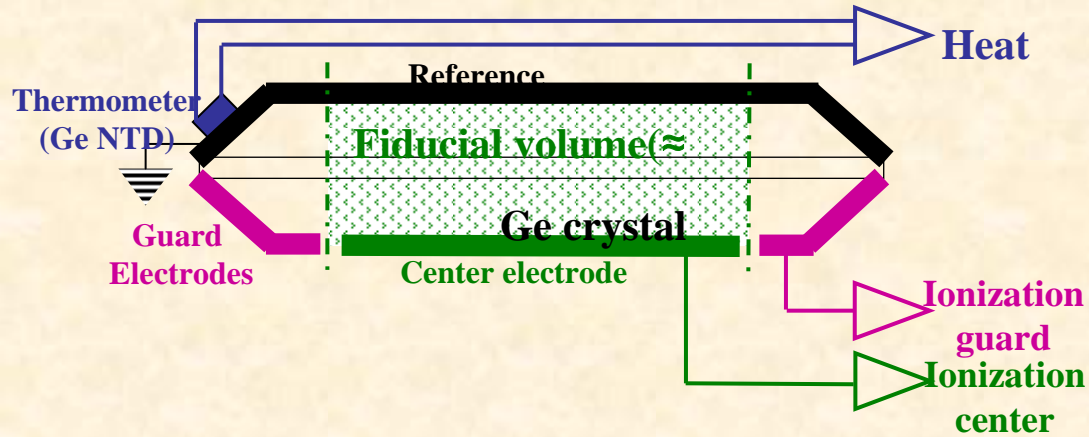
Vetos, neutron detectors, background,

Background, neutron radon monitors

Environ 50 personnes (10 thèses, 4 post-doc)



EDELWEISS-I : principes

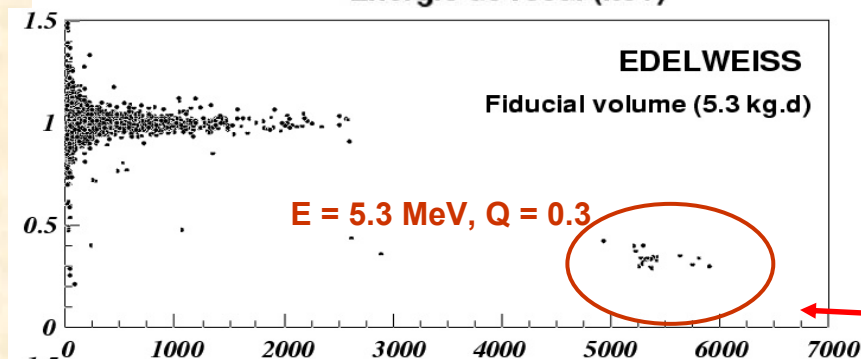
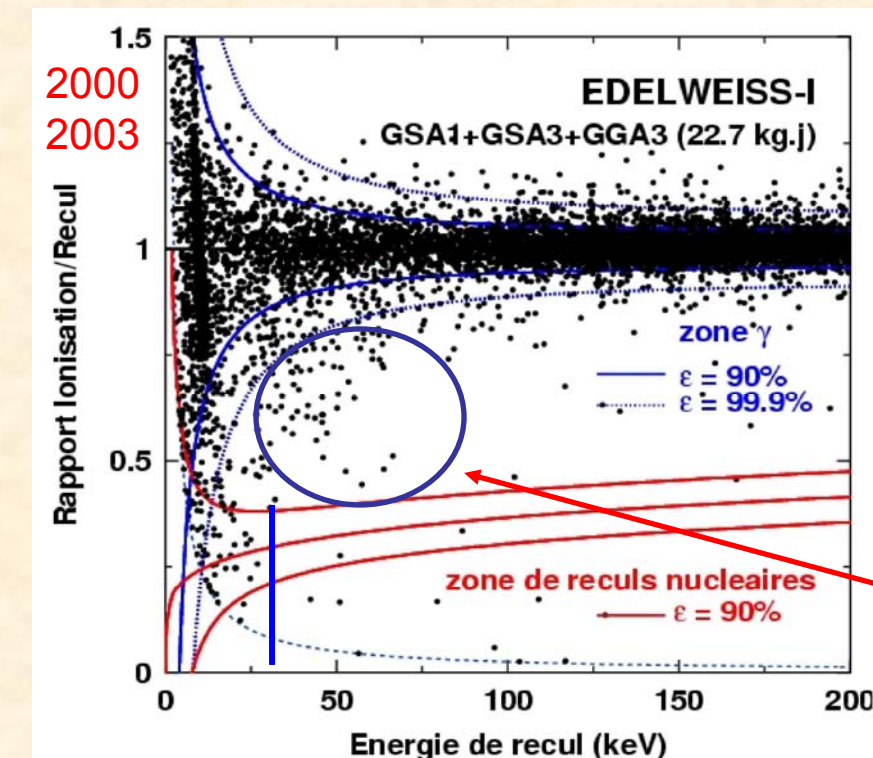


- ◆ **Simultaneous measurement**
 - **Heat** @ 17 mK with Ge/NTD thermometer
 - **Ionization** @ few V/cm with Al electrodes
- ◆ **Evt by evt identification of the recoil**
- ◆ $Q = E_{\text{ionization}} / E_{\text{recoil}}$
 - $Q=1$ for electronic recoil
 - $Q \approx 0.3$ nuclear recoil

\Rightarrow discrimination $\gamma/n > 99.99\%$ for $E_r > 15\text{keV}$

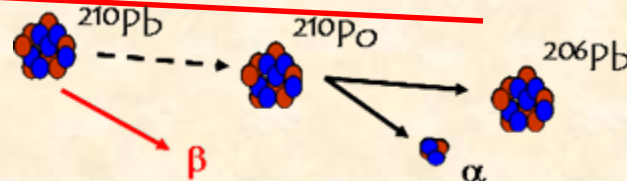
EDELWEISS-I : la réalité, les bruits de fond...

(V. Sanglard and S. Fiorucci thesis)



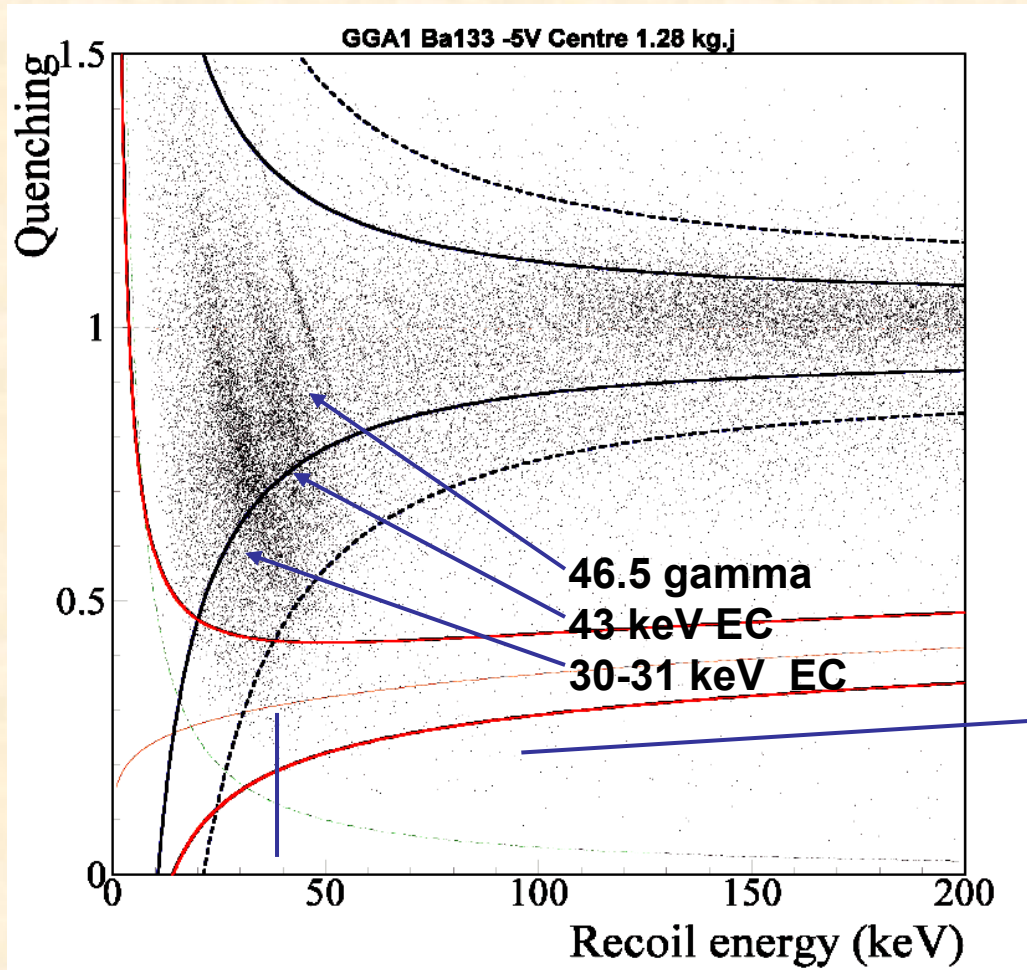
- 1kg Ge (limité par cryostat)
- Meilleures limites WIMP mondiale 2001-2003... mais:
- Neutrons:
 - 1 coïncidence n-n
 - Limité par blindage neutron (2 simples prédits par MC)
- Mauvaise collecte de charge
 - Pas observée avec source γ
 - Pas observée avec coïncs
 - β en surface
 - Mauvaise collecte: recombinaison et trapping
 - Taux compatible avec contamination ^{210}Pb :

Taux $\alpha \approx \beta \approx 5/\text{kg}/\text{jour}$

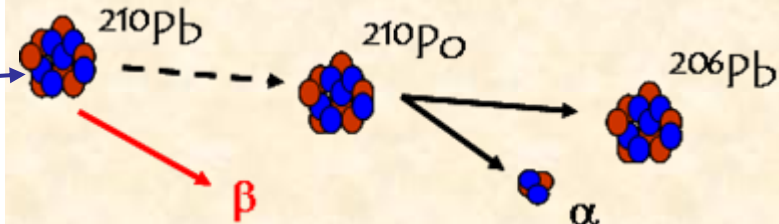


EDELWEISS-I : Confirmation et quantification de l'hypothèse ^{210}Pb

GGA1 ^{210}Pb calibration (sept 2007)



Source = 2500 fois EDW1
en alpha
 \Rightarrow 200(+/-100) evts/kg.j attendus
 \Rightarrow 130 mesurés dans ROI



- Env 2% des betas dans la zone de recul pour $30 < E_r < 100 \text{ keV}$
- Rejet beta de $\sim 1/1000$ nécessaire pour atteindre 10^{-8} pb!
- La R&D des dernières s'est concentré sur ce point bloquant

Edelweiss II : installation

◆ Radiopurity

- ◆ Dedicated HPGe detectors for systematic checks of all materials
- ◆ **Clean Room** (Cryostat class 100, class 10 000 for full shielding)
- ◆ **Deradonized air** (NEMO3 radon trap) from 10 Bq/m³ to 0.1 Bq/m³
- ◆ Thicker shield : 20 cm Pb shielding

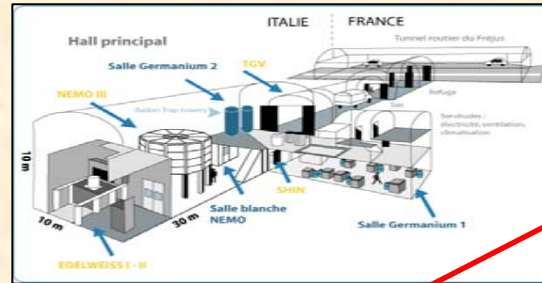
◆ Neutron Shielding

- ◆ EDW-I : 30 cm paraffin
- ◆ EDW-II : **50 cm PE** + better Ω
- ◆ **μ veto** (>98% coverage)
 - Neutron detectors (Karlsruhe/Dubna)

◆ => Aimed sensitivity (<EDW-I * 100)

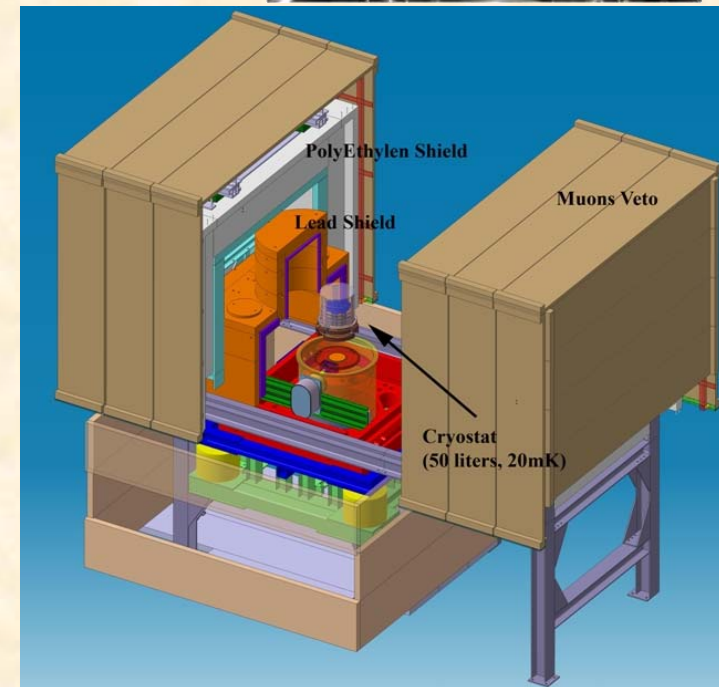
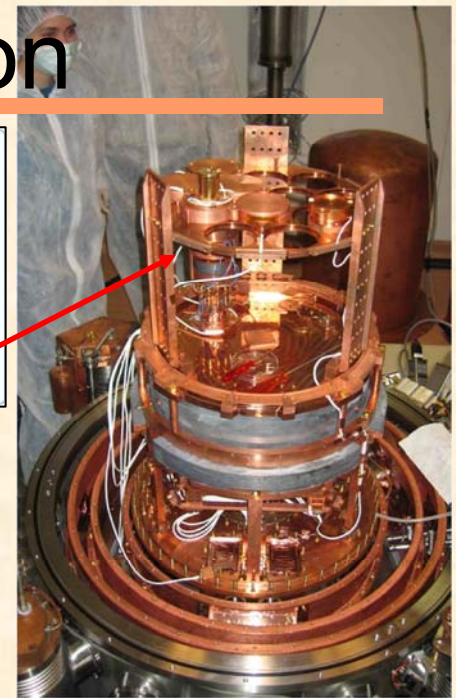
$$\sigma_{w-n} < 10^{-8} \text{ pb with 15 to 30 kg}$$

$$< 0.001 \text{ evt/kg/day (Er} > \sim 15 \text{ keV)}$$

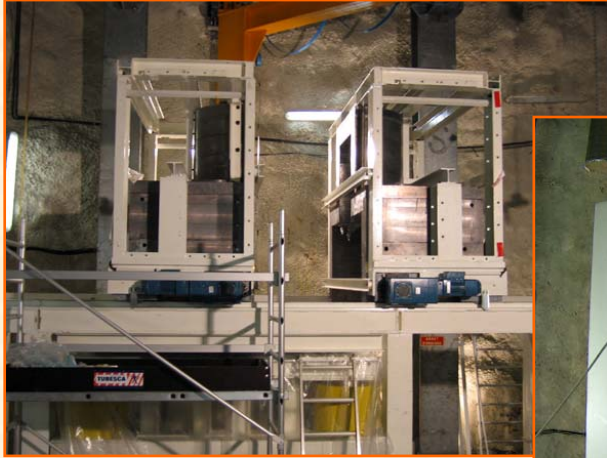


EDW1:
1kg

EDW2:
Up to
40 kg



Edelweiss II : installation



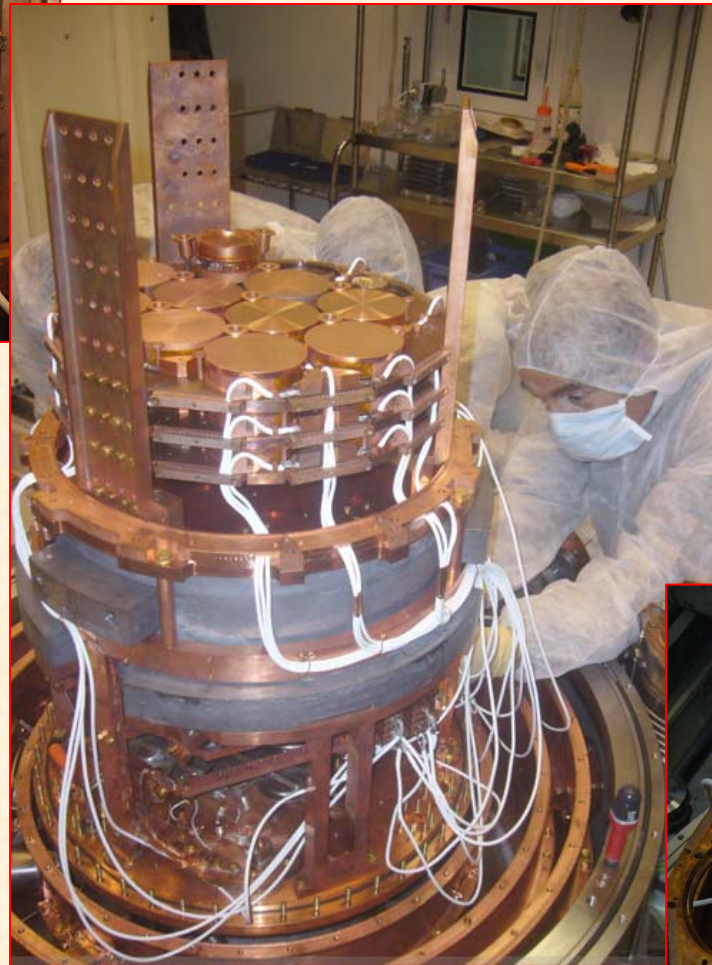
Jan.2005.....

.....Dec. 2005



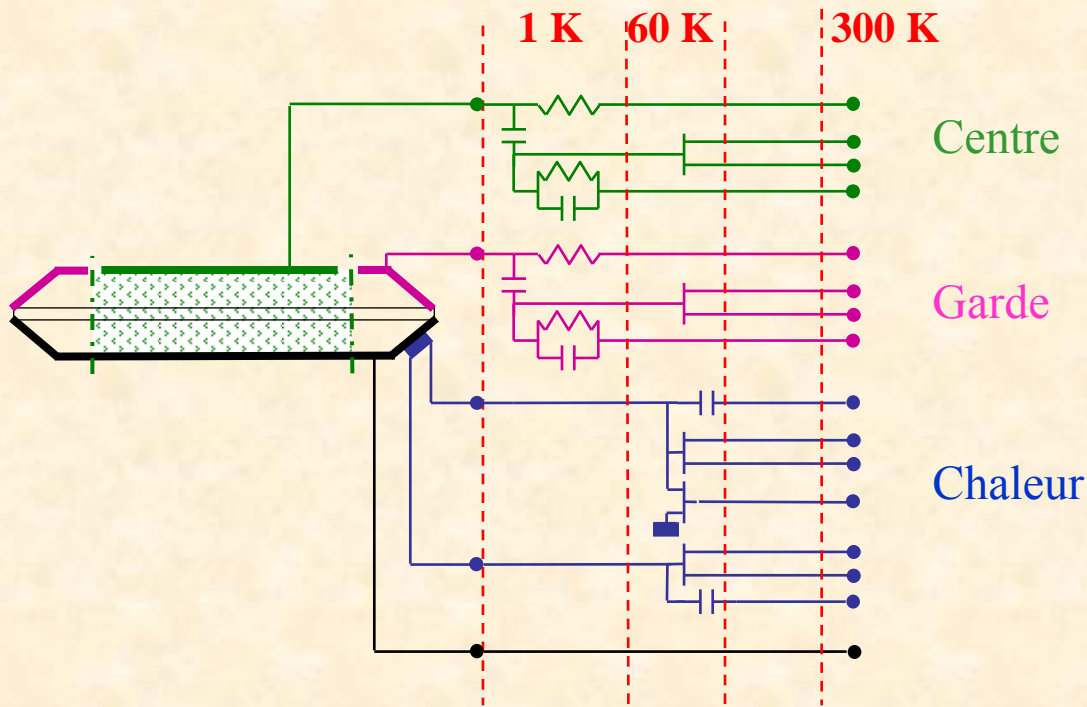
Edelweiss II : Etape 30 détecteurs

installée en mars 2007



Combien de câbles pour 1 bolo ?

Exemple Bolo Ge/NTD EDW-II



Ionization/Heat :	5 wires	9 wires	16 wires
T_{BOLO} regulation :	+2	+2	+2
T_{FET} regulation :			+1

7 wires	11	19
----------------	-----------	-----------

Valeurs typiques pour Ge/NTD et Ge/NbSi avec ionisation classique (pas d'électrodes segmentées ou interdigitées)

Choix des câbles EDW-II (après qq itérations...)

Ts les détails sur EDMS...

COMPOSITION DU CABLE

1 : 19 pico-coax type PCX38K10DK composé de :

- Conducteur AWG 3807 :
 - Matériau : Alliage de cuivre
 - Construction : 7 brins de \varnothing 0.040 mm nominal
 - Diamètre : 0.120 mm nominal
 - Section : 0.0208 mm² nominal
 - Résistivité ohmique : 250 Ohms/100 m nominal
- Diélectrique en FEP :
 - Diamètre : 0.35 mm nominal
- Galvage :
 - Matériau : Acier inoxydable
 - Diamètre d'un fil : 0.050 mm nominal
- Gaine extérieure en FEP naturel :
 - Diamètre : 0.51 mm nominal
 - Couleur : naturel
- Capacité : 10 pF/m nominal

2 : Gaine thermoplastique en FEP naturel

Caractéristiques générales

Diamètre extérieur : 3 mm nominal
 Masse approximative : 5.5 g/m
 Température d'utilisation : -50°C à +200°C

DOCUMENT NON VALABLE POUR FABRICATION

AXONCABLE SA
 8120 MONTHERVAL - FRANCE
 TEL : +33 3 84 81 10 00
 FAX : +33 3 84 81 10 80
 www.axon-cable.com

Titre : PCX38K10DK Inox K 19
 Formel : AX
 Date : AG218B

COMPOSITION DU CABLE

1 : 7 Pico-coax en acier inox low noise non gainé constitué de :

- Conducteur acier inox 4201 constitué de :
 - 1 brin de \varnothing 0.063 mm en acier inox
 - Section nominale : 0.00316 mm²
 - Résistivité électrique nominale : 3600 Ohms / 100 m
- Diélectrique Cellulose® \varnothing 0.55 mm
- Laque graphitée
- Galvage avec des brins en acier inox de \varnothing 0.05 mm
- Diamètre nominal du fil : 0.82 mm
- Capacité nominal : entre 30 et 40 pF / m
- Impédance nominal : 120 Ohms

2 : 6 fils UMT 3401 inox composé de :

- Conducteur acier inox 4201 constitué de :
 - 1 brin de \varnothing 0.16 mm en acier inox
 - Section nominale : 0.02 mm²
 - Résistivité électrique nominale : 540 Ohms / 100 m
- Gaine FEP incolore \varnothing 0.3 mm

3 : Ruban de maintien 4x4E
 4 : Gaine FEP incolore

Caractéristiques générales

Diamètre nominal : 3.1 mm
 Température d'utilisation : -40°C à +110 °C
 (Utilisation cryogénique possible en statique)
 Poids approximatif du câble : 18 g / m

DOCUMENT NON VALABLE POUR FABRICATION

AXONCABLE SA
 8120 MONTHERVAL - FRANCE
 TEL : +33 3 84 81 10 00
 FAX : +33 3 84 81 10 80
 www.axon-cable.com

Titre : Cable composite
 Formel : AX
 Date : AG012

COMPOSITION DU CABLE

1 : 7 Pico-coax low noise non gainé constitué de :

- Conducteur CONSTANTAN 3801 constitué de :
 - 1 brin de \varnothing 0.102 mm
 - Section nominale : 0.0081 mm²
 - Résistivité électrique nominale : 62 Ohms / m
- Diélectrique Cellulose® \varnothing 0.76 mm
- Laque graphitée
- Étirage avec des brins CONSTANTAN 3801 RECUIT
- Diamètre nominal du fil : 1.25 mm nominal
- Capacité nominal : entre 35 et 40 pF / m
- Impédance nominal : 100 Ohms

2 : Rubans PTFE non filrés naturels

Caractéristiques générales

Diamètre nominal : 4.10 mm
 Température d'utilisation : -40°C à +110 °C
 (Utilisation cryogénique possible en statique)
 Poids approximatif du câble : 27 g / m

DOCUMENT NON VALABLE POUR FABRICATION

AXONCABLE SA
 8120 MONTHERVAL - FRANCE
 TEL : +33 3 84 81 10 00
 FAX : +33 3 84 81 10 80
 www.axon-cable.com

Titre : Cable composite picocoax
 Formel : AX
 Date : AH820C04

300K-100K

Toron de 19 coaxes
 Conducteur Cu 7*40 μ m
 Tresse Inox 16*3*45 μ m

100K-1K

Toron de 7 coaxes + 6 fils
 Conducteur Constantan 1*100 μ m
 Tresse Inox 16*5*45 μ m

1K-100mK-10mK

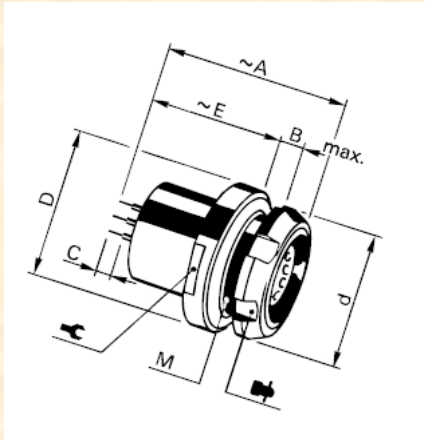
Toron de 7 coaxes
 Conducteur Constantan 1*100 μ m
 Tresse Constantan 16*2*100 μ m

Exemple de réponse
 aux spécifs :
 Apport thermique

ΔT	Longueur toron	Puissance/toron	Pour 60 torons	Spécification cryostat
300K-60K	1m	20mW	1.2 W	10W
100K-1.5K	1m	0.7mW	42mW	5mW (?)
60K-1.5K	1m	0.3mW	18mW	5mW (?)
1.5K-100mK	0.5m	0.4 μ W	24 μ W	10 μ W
100mK-10mK	1m	0.6nW	36nW	100nW

Conso 1.5 litre He/jour en plus

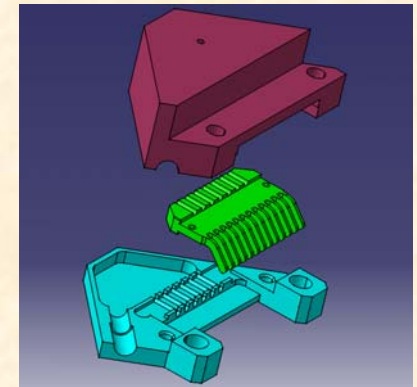
Choix des connecteurs EDW-II (après qq itérations...)



300K passage étanchéité
Fisher 12 broches
type DBPE1031
Pour circuit imprimé



100K, 1K, 100mK
Glenair MWDM
37 broches et 9 broches
Pour circuit imprimé



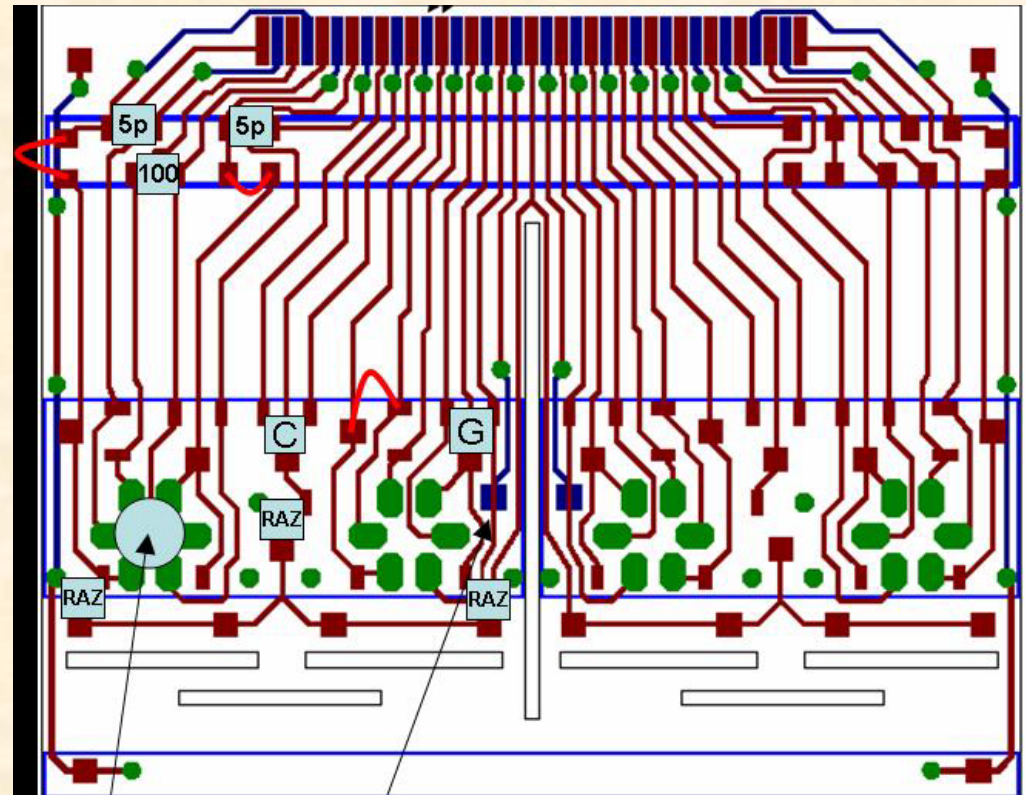
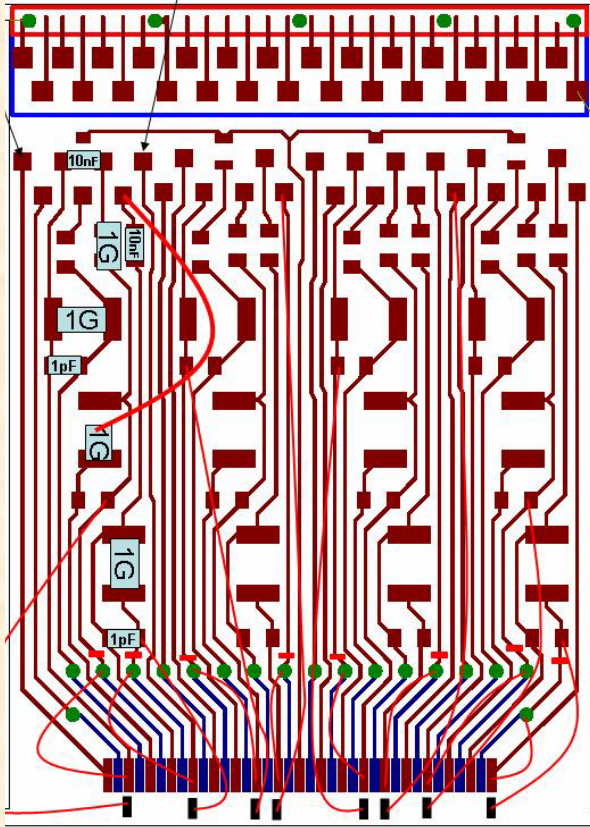
10mK
Connecteur maison
développé au SEDI
Pour circuit imprimé

⇒ Vu le nombre de voies, il a été impossible de conserver des connecteurs coaxiaux comme dans EDW-I : + de diaphonie, CEM

Kapton : rôle de connexion ET de thermalisation

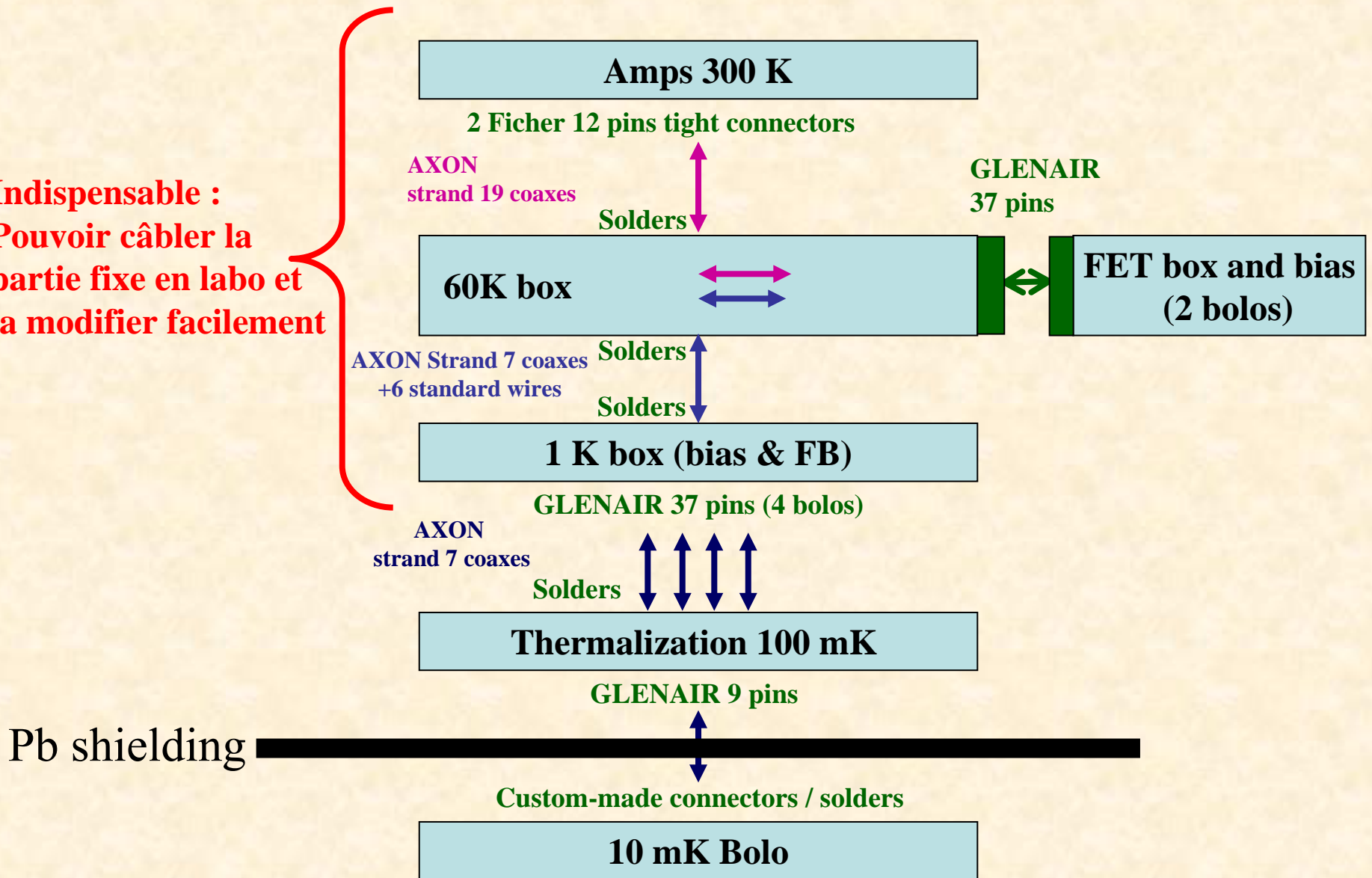
KAPTON 1K Fback
NTD version 2_1GOhm
Pour 4 bolos

KAPTON FET
NTD version 2
Pour 2 ,bolos



Architecture globale pour 1 bolo EDW-II

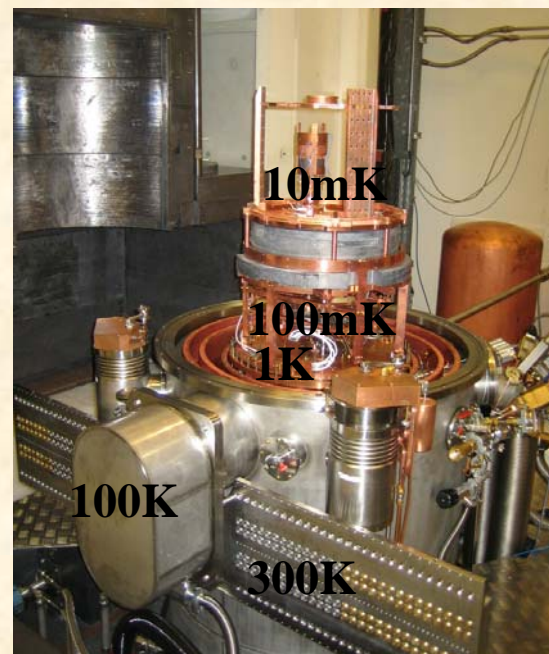
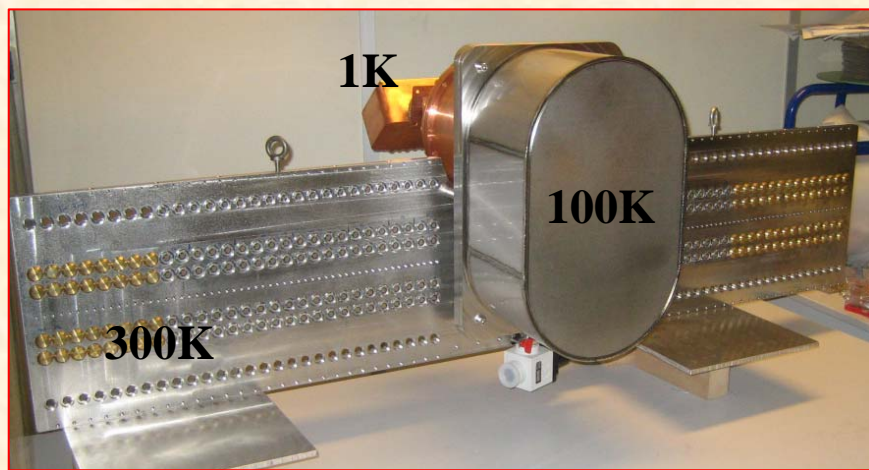
**Indispensable :
Pouvoir câbler la
partie fixe en labo et
la modifier facilement**



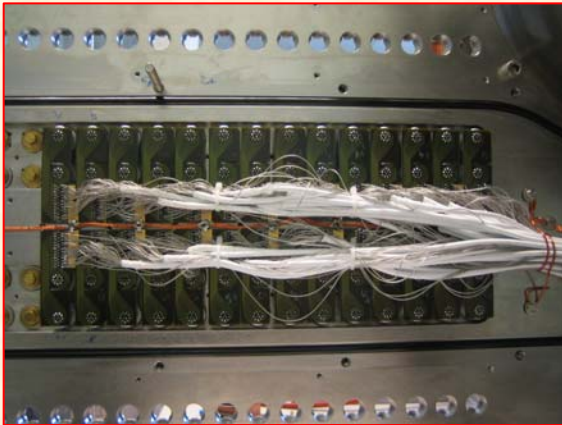
• cables + connectors, 5 capas, 3-5 resistors, 5 FETs: $\Rightarrow \approx 300$ solders

Tripe de câblage EDW-II

Module autonome avec tout le câblage 300K-1K

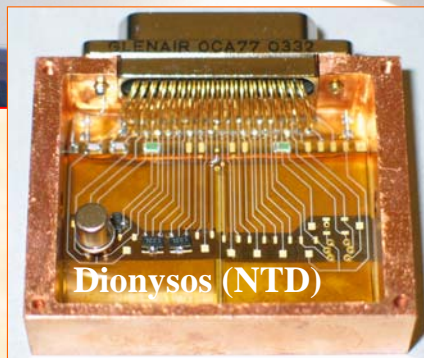
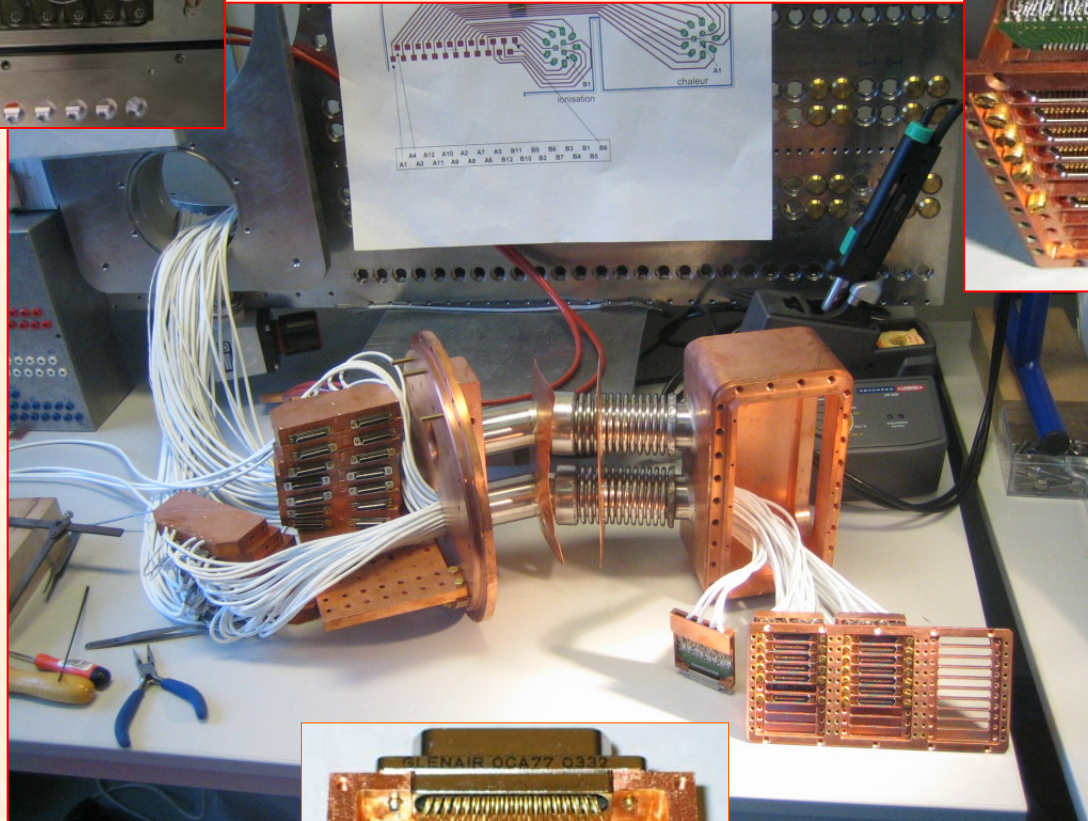


Câblage Tripe à Orsay



300K

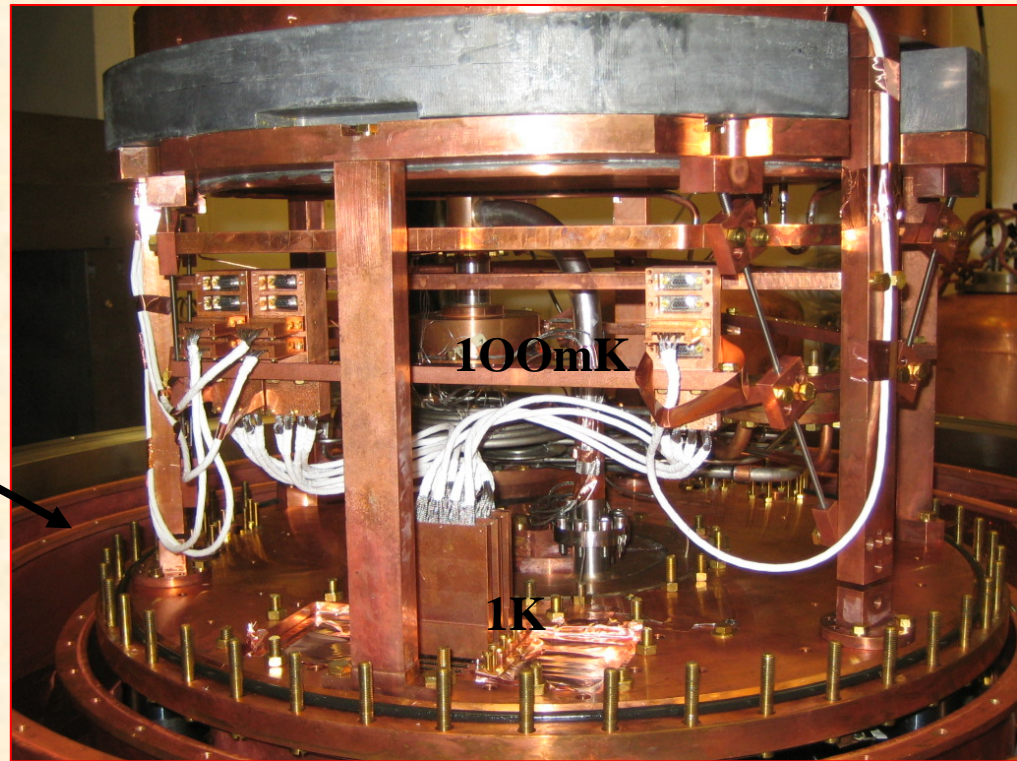
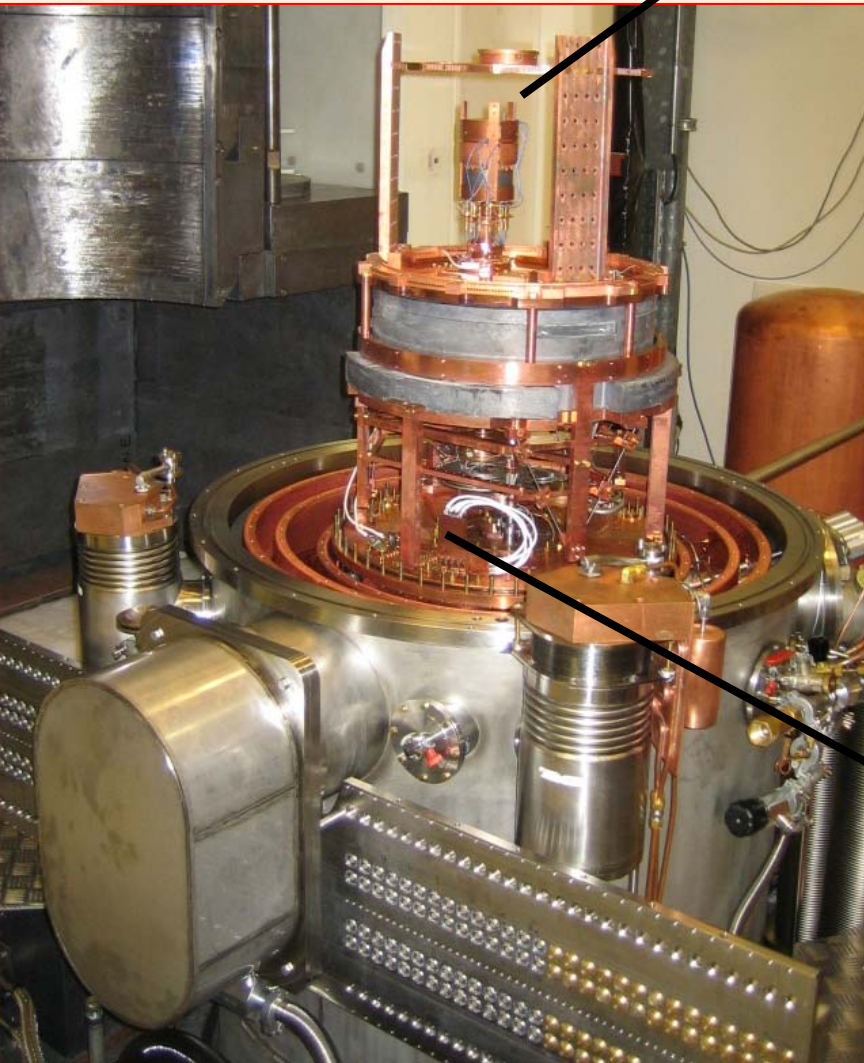
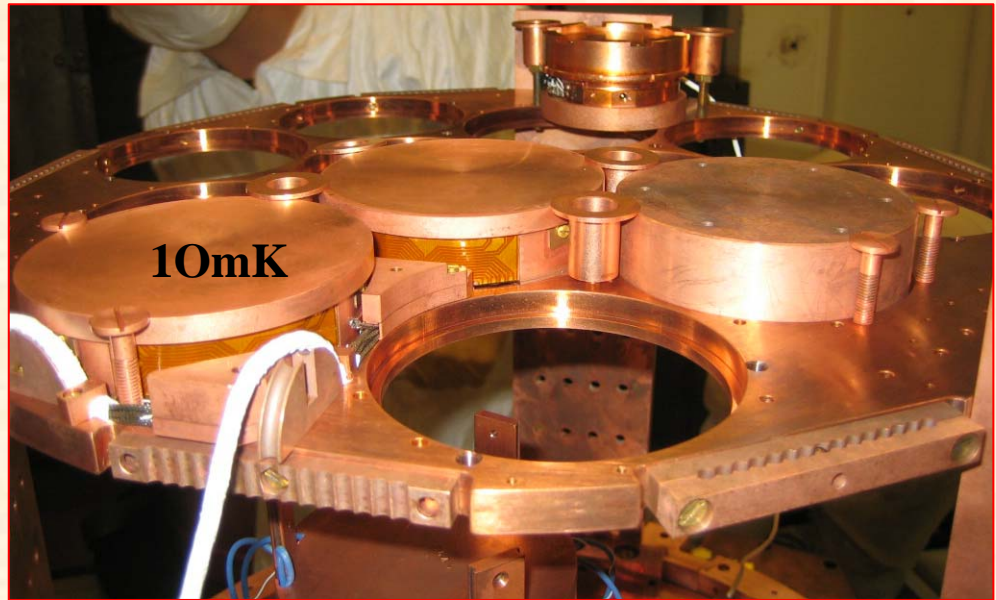
1K



100K

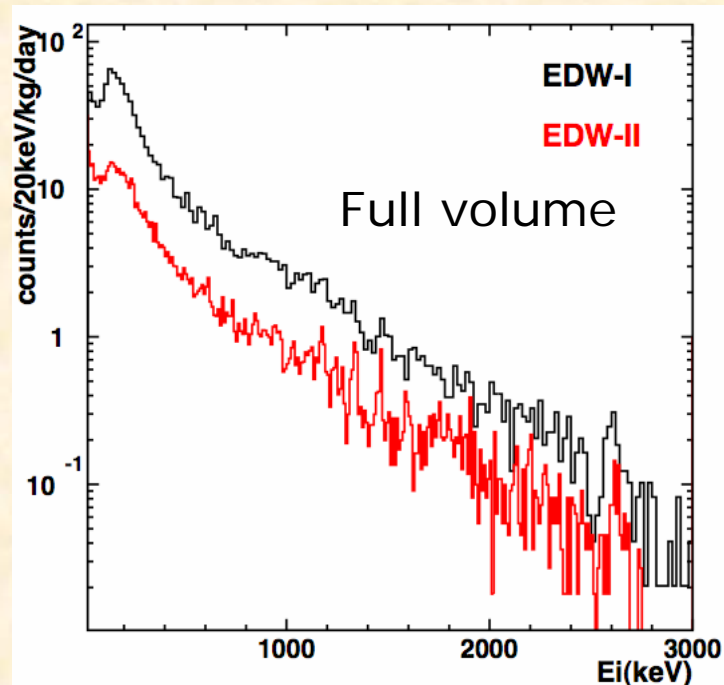
Boîtes FET (ancienne version)

Au LSM :
Câblage par bolo
1K-100mK-10mK (dec 2005)

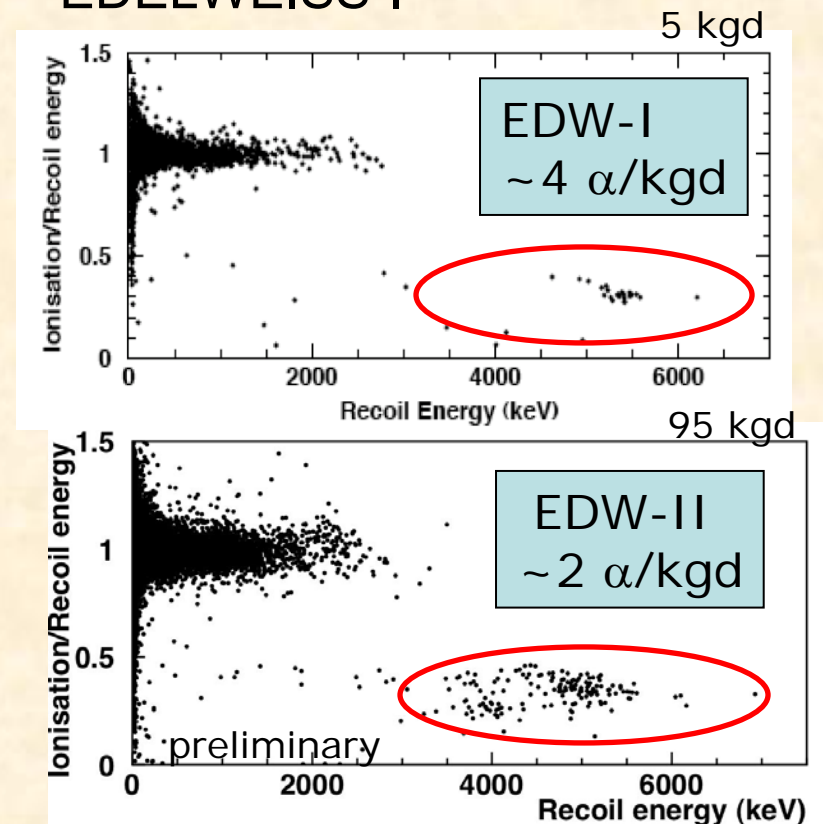


Edelweiss II : Amélioration du fond

- Gamma background reduction of x3 relative to EDELWEISS-I
- ^{210}Pb -chain background: reduction of x2 relative to EDELWEISS-I



Further bkg reductions after fiducial + coincidence cuts, and in ID



Edelweiss II : Résultats Ge.NTD (préliminaires)

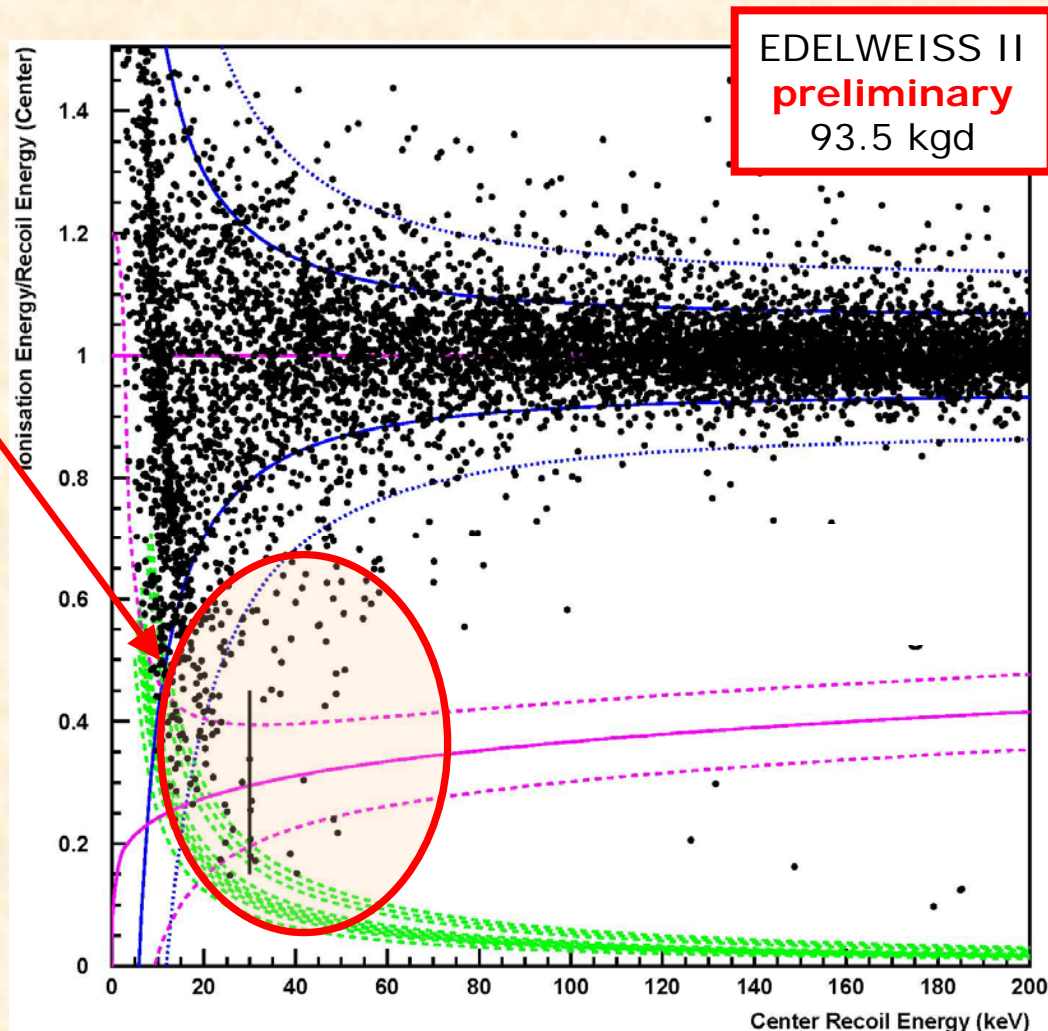
Thèse Sylvia Scorza

- 93.5 kg.day at 30 keV threshold (reste la même chose à analyser)
- 3 events observed in nuclear recoil band
- Evidence for events with incomplete charge collection (surface electron recoils: trapping, recombination)

=> **Limited rejection capabilities!**

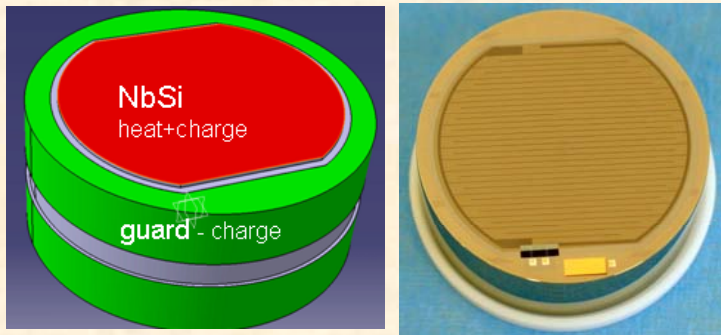
To reach 10^{-8} pb sensitivity

- Need ~2500 kgd at 15 keV threshold
- Need $\sim 10^5$ rejection for gammas
- Need to reject expected $\sim 5000 \beta$ from ^{210}Pb

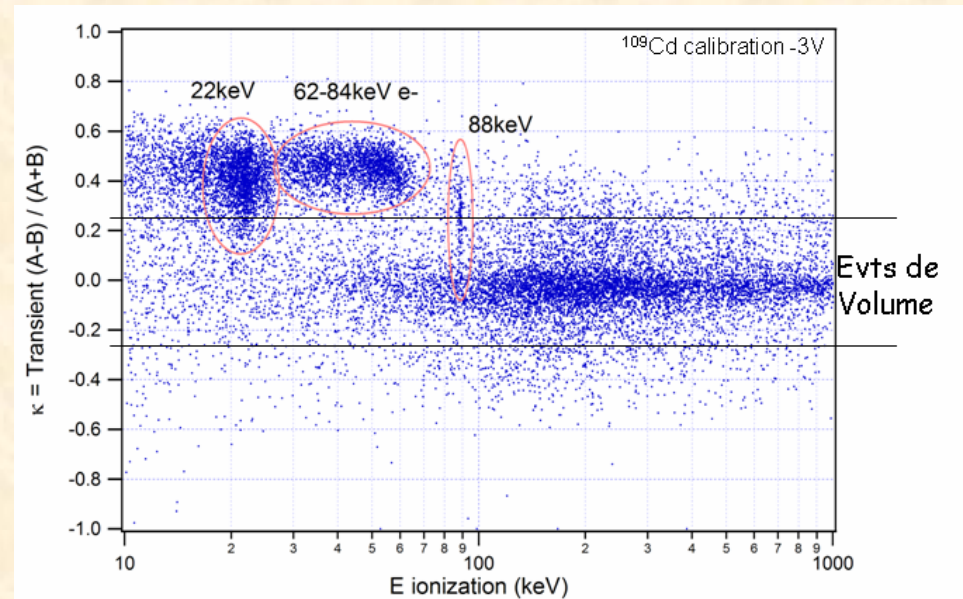
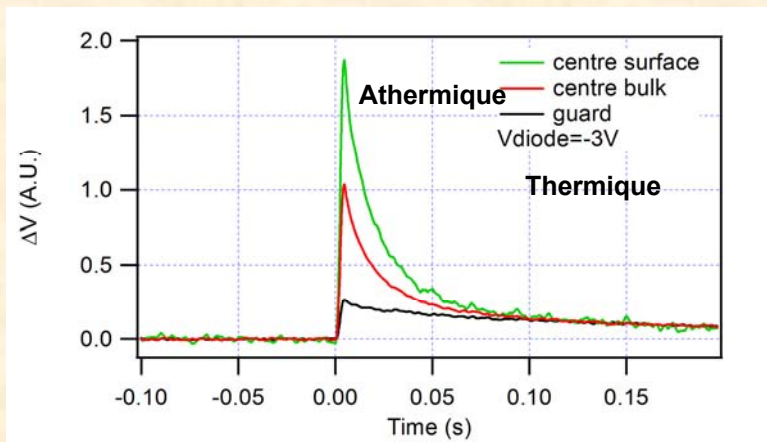


Edelweiss II : Ge/NbSi pour identifier les évts de surface

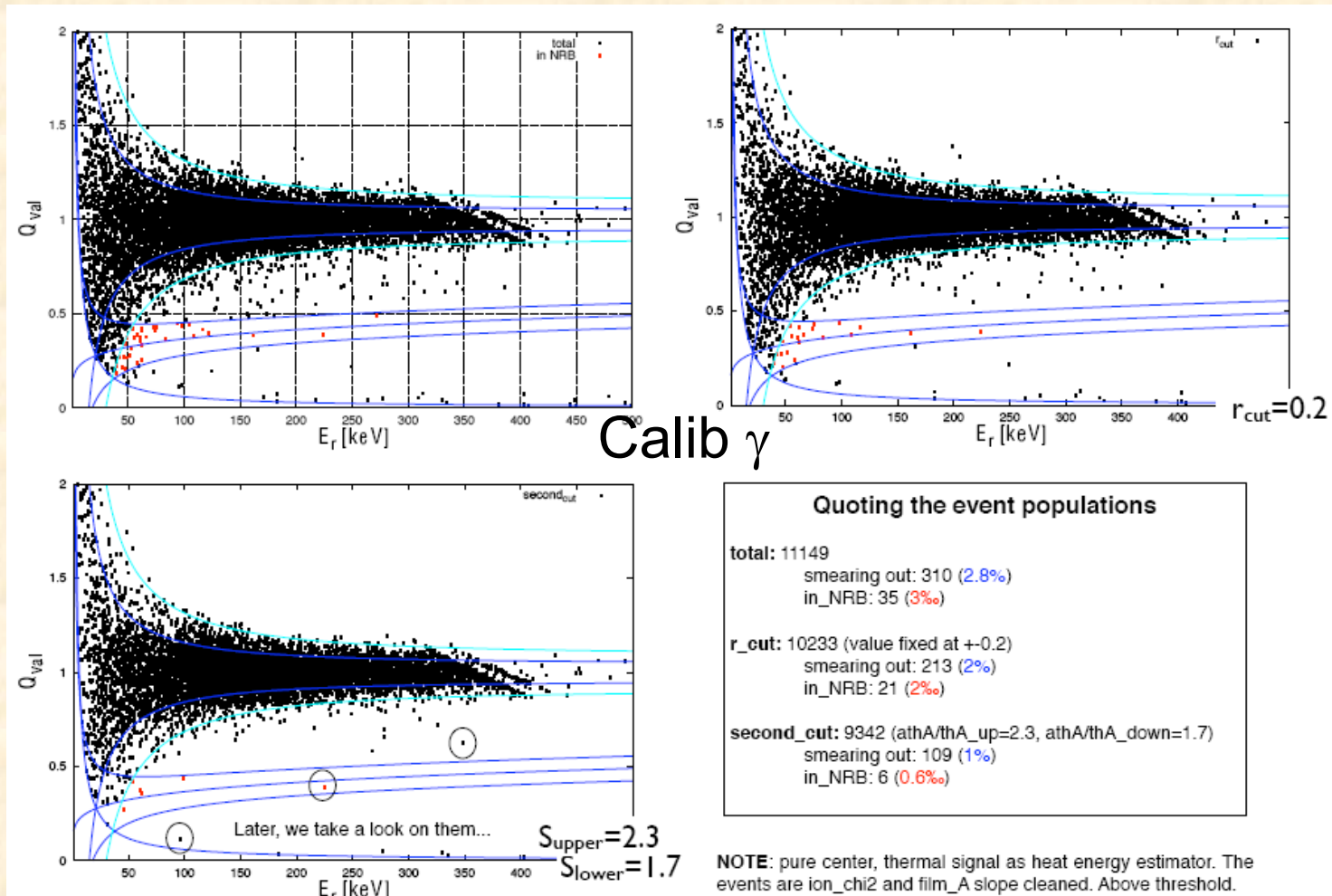
- 1^{ère} piste explorée dès 2000 pour rejeter les évts de surface
- Identification des evts de surface par **utilisation des phonons athermiques**
- - Energie déposé par régime thermique



- Sous-couche Germanium amorphe
- 2 voies ionisation (3 possibles)
- 2 voies chaleur film minces NbSi



Edelweiss II : Performances Ge/NbSi

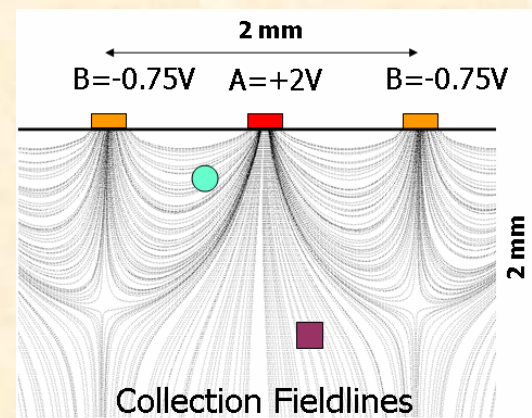
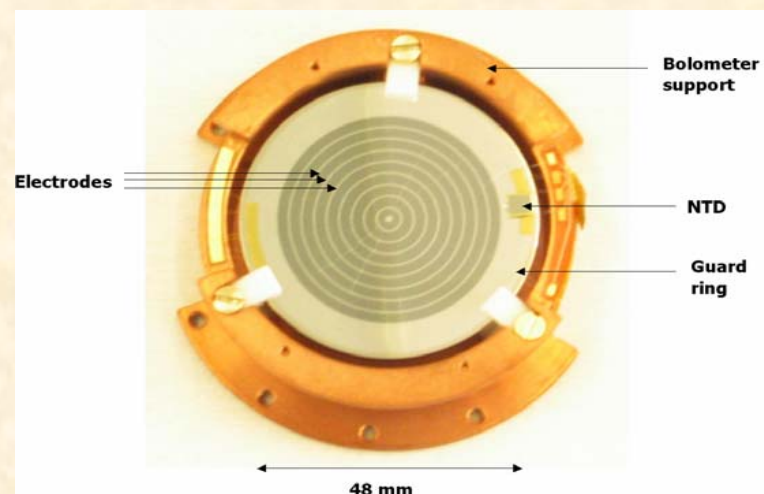
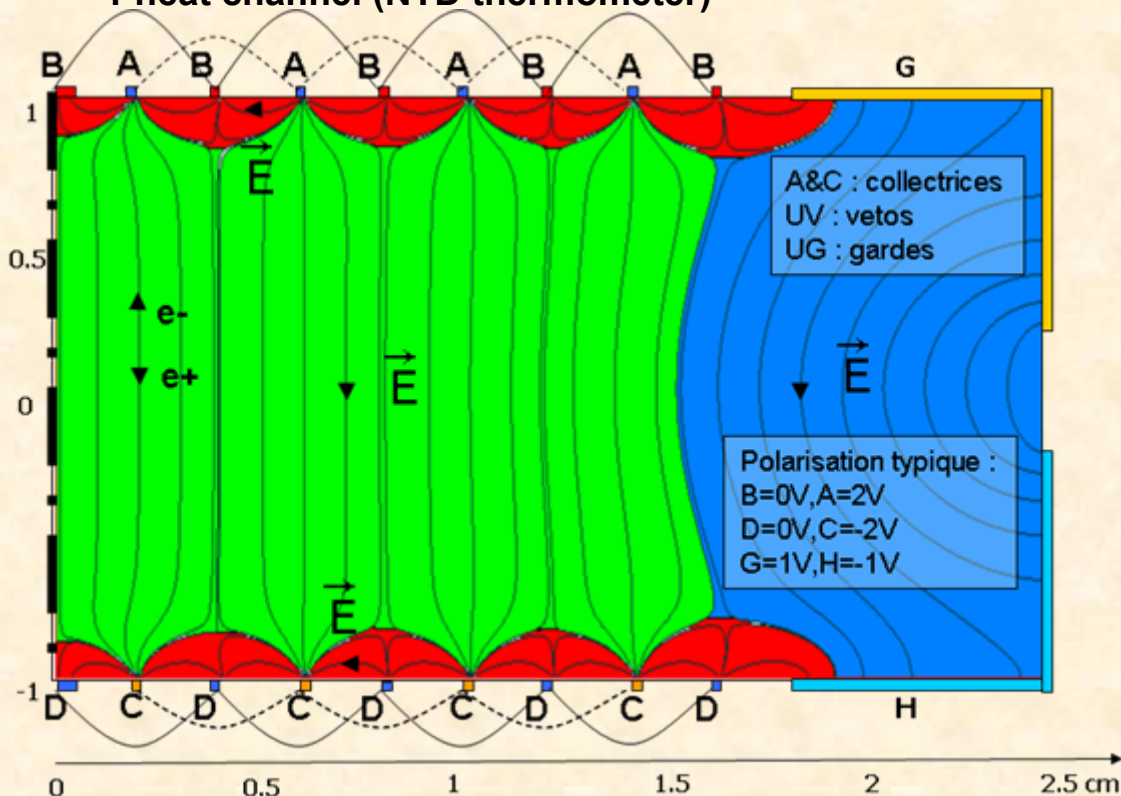


- Il reste 0.06% d'evts mal collectés + seuil > 30keV
- R&D suspendue devant le succès rapide des Ge/InterDigit

Edelweiss II : Ge/InterDigit, principes

1^{er} Proto ID201 (juin 2007):

- 193g crystal
- Germanium amorphous underlayer
- 6 ionisation channels
- 1 heat channel (NTD thermometer)



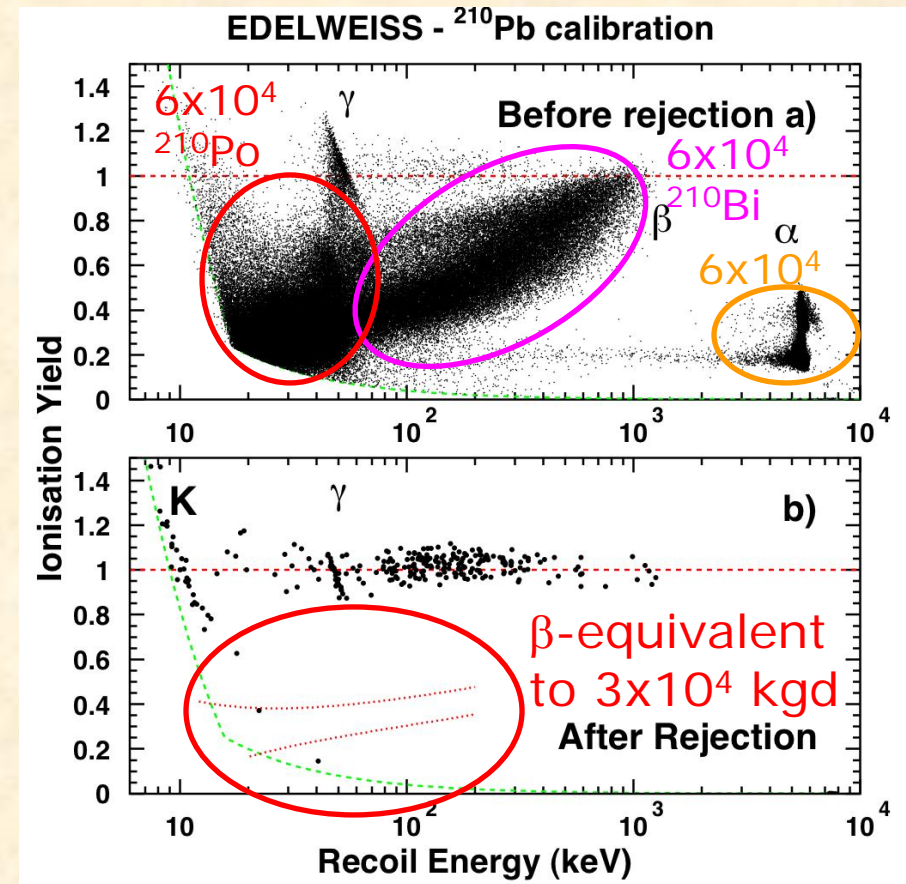
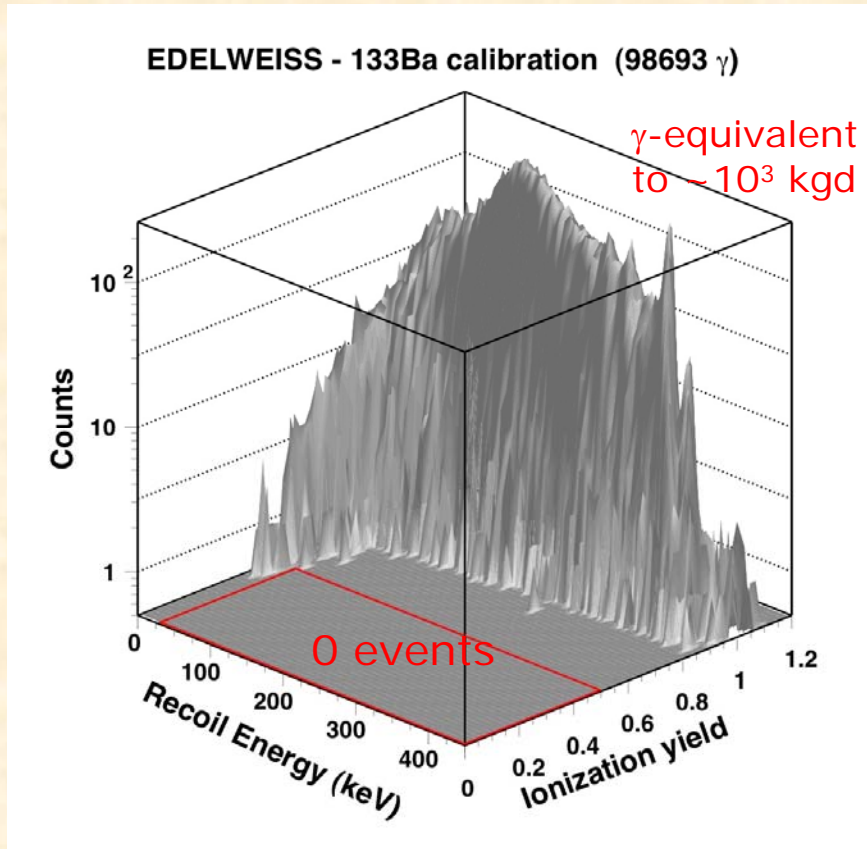
- Identification des événements de surface par utilisation des voies ionisation
- Application de champs électriques verticaux dans le volume et horizontaux en surface
- Toute collecte sur B ou D signe un evt de surface

Edelweiss II : Ge/InterDigit, performances en calib

arXiv:0905.0753v1, soumis à PRL

- Gamma rejection of 400g
 - ~1 month calibrations

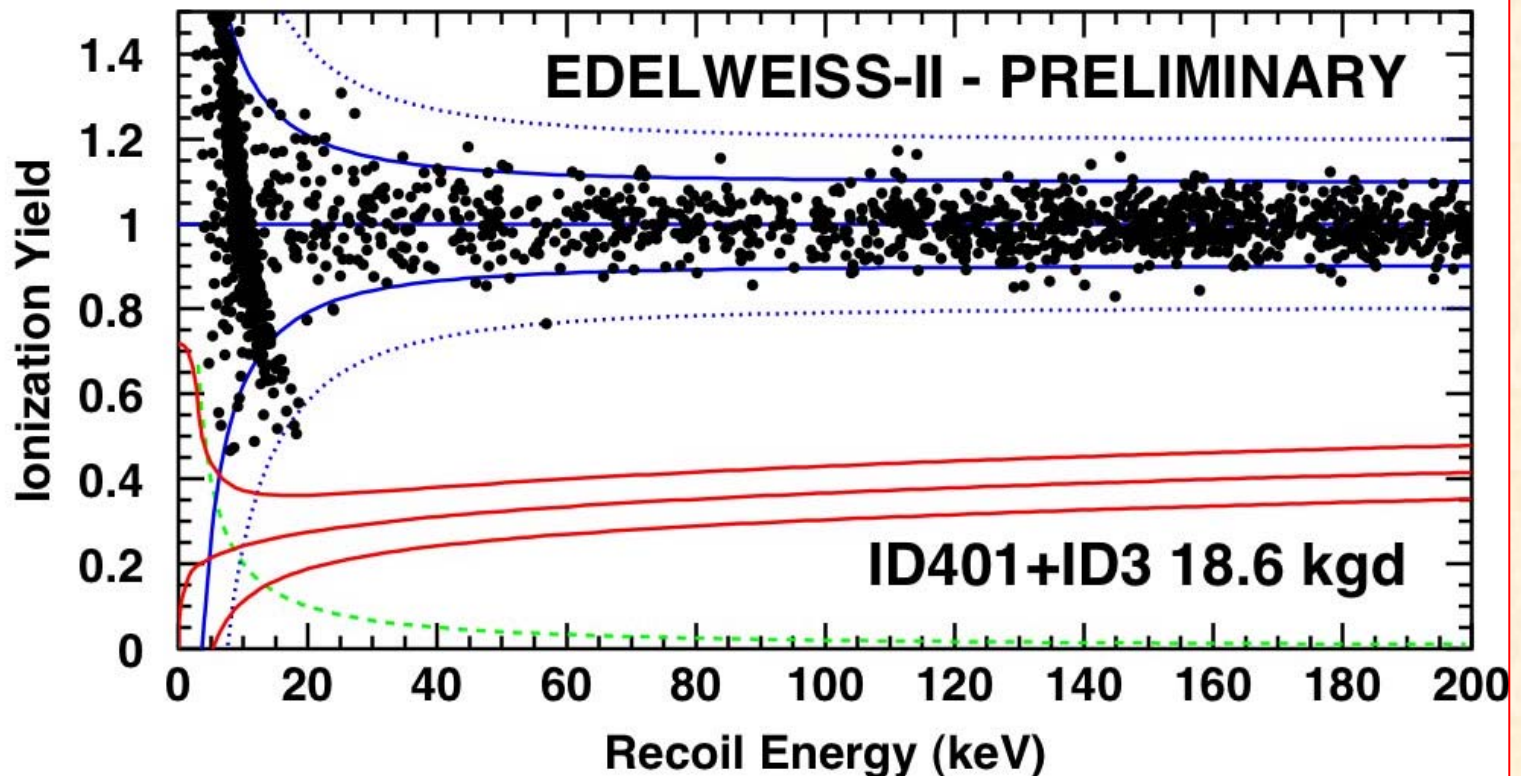
- Beta rejection of 200g



Ok pour qq 10^{-9} pb !!!

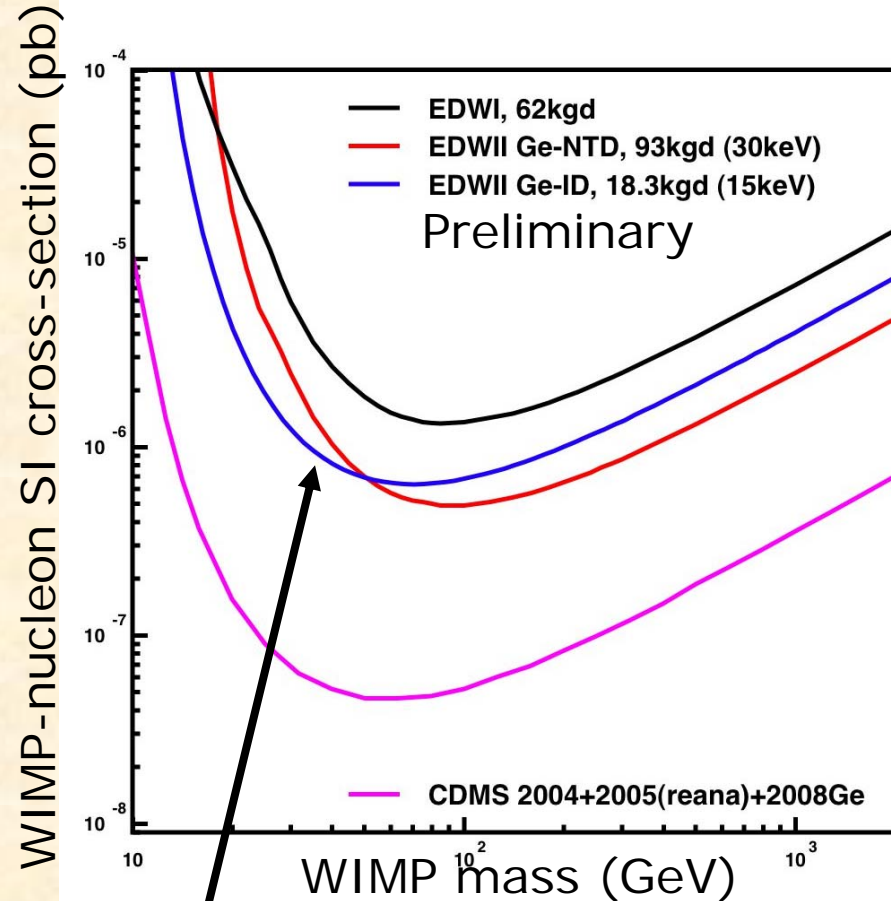
Edelweiss II : Ge/InterDigit, performances en run

- 1 x 400g + 1 x 350g detector, 86 live days
- <15 keV threshold achieved for exposure of 18.3 kg.days
- 50% efficiency at 10 keV
- No events in (or around) nuclear recoil band



Edelweiss II : Ge/InterDigit et Ge/NTD, limites

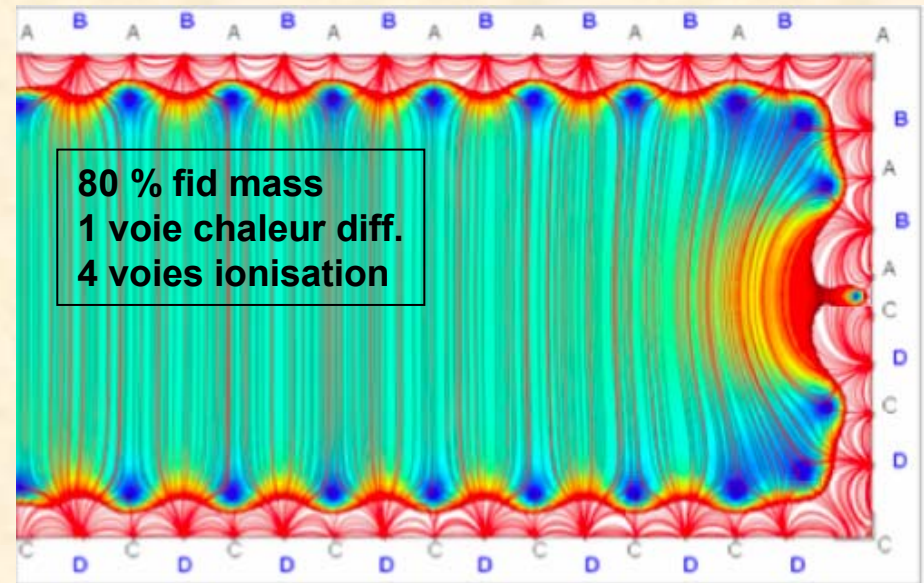
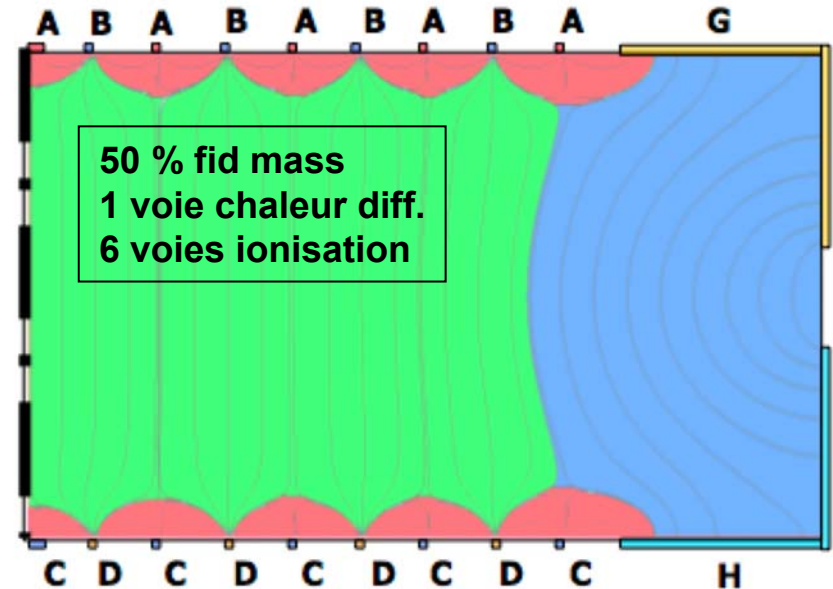
- 93.5 kgd GeNTD
 - 11 detectors x 4 months
 - 30 keV threshold
 - 3 events observed in nuclear recoil band
- 18.6 kgd ID
 - 2 detectors x 4 months
 - 15 keV threshold
 - No nuclear recoils
 - No evts outside γ band
- **Jan. 2009: 10 ID detectors**
 - x 20 improvement in 6-8 months:
 4×10^{-8} pb
 - **More detectors build in 2009**



On gagne à basse M_W
avec le seuil plus bas

Edelweiss II : conclusion, perspectives

- Significant reduction in α , β and γ backgrounds relative to EDELWEISS-I
- Improved understanding of backgrounds and of response of detectors to backgrounds
- Background reduction alone not sufficient to reach 10^{-8} pb
- ID detectors have the surface rejection needed to reach this goal
- Running in 2009 with 10 x 400g detectors
- **7 FID 400g et 2 FID 800g au LSM fin 2009 + 8 nouveaux FID800g fin 2010**
- **ID/FID = base pour la R&D EURECA : “plus gros, plus performant, moins cher !”**





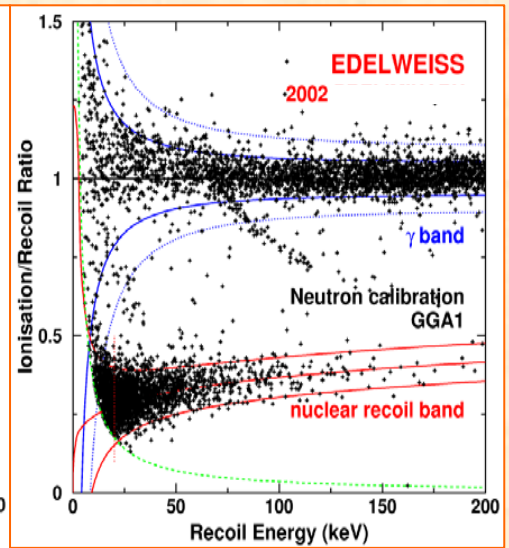
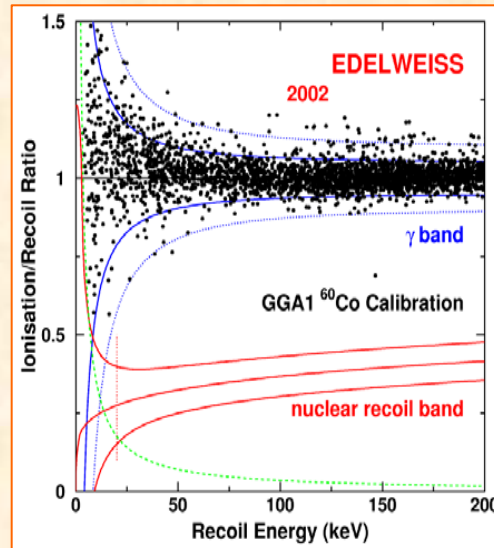
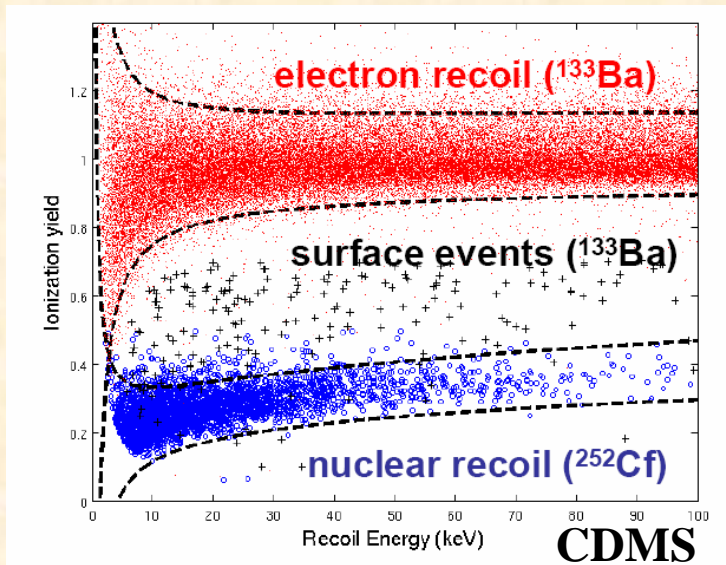
Recherche directe de WIMPs : CDMS

Présentation comparée avec EDELWEISS

Cold Dark Matter Search (env. 50 personnes)

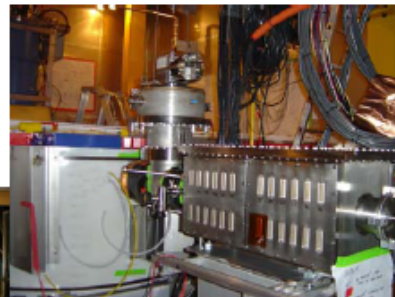
- **Brown University** **Caltech** **Case Western Reserve University**
 - **Fermilab** **MIT** **Queens University**
 - **Santa Clara University** **Stanford University** **Syracuse University**
 - **University of California, Berkeley** **University of California, Santa Barbara**
 - **University of Colorado, Denver** **University of Florida**
 - **University of Minnesota** **University of Zurich**
-
- **Principe de détection commun : Double mesure de l'ionisation et de la chaleur**
 - **Points communs :**
 - **détecteur Ge (et Si pour CDMS) à double mesure ionisation/chaleur**
 - **Sensibilité aux phonons hors d'équilibre (en suspens pour EDELWEISS)**
 - **Voie ionisation**
 - **Différences :**
 - **Thermomètres supraconducteurs**
 - **technologie et électroniques différentes : FETs+SQUIDs/FETs**
-
- **Principe de l'identification des événements de surface**
 - **Sensibilité aux phonons hors d'équilibre**
 - **Pas d'utilisation des signaux ionisation : pas de comparaison avec INTERDIGIT**
-
- **performances**
 - **Planning de prise de donnée**
 - **RetD et projet futur**

CDMS : principes



- Le principe de détection est le même pour CDMS (Ge+Si) et EDELWEISS (Ge) : double mesure de l'ionisation et de la chaleur
→ les contraintes sont les mêmes aussi (+ évts de surface)...
- les 2 installations sont très proches :
 - Site souterrain
 - cryogénie <100mK
 - salle blanche
 - flux anti-Rd
 - blindage PE-Pb
 - veto anti-m

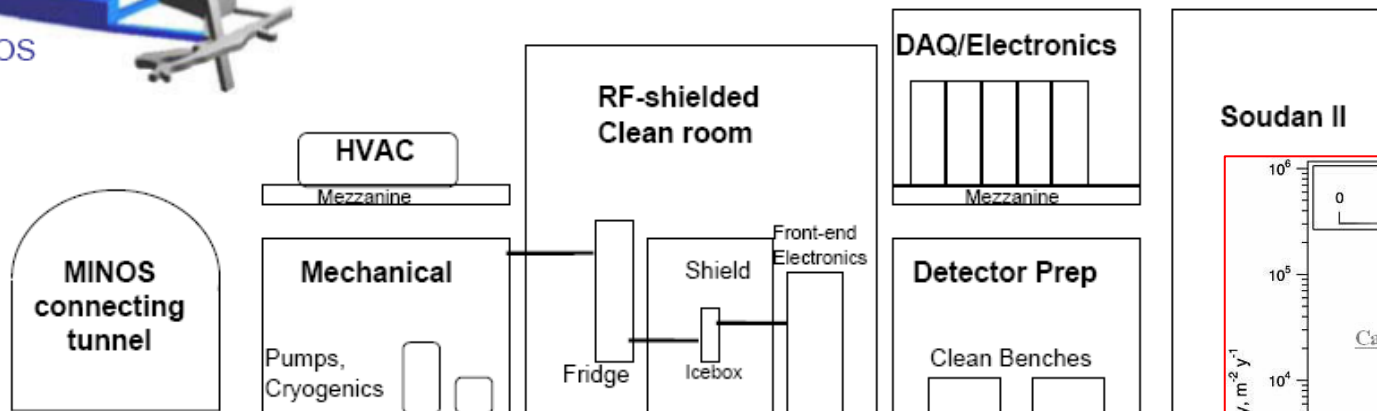
CDMS : installation



LEVEL NO. 27
2341 FEET BELOW THE SURFACE
689 FEET BELOW SEA LEVEL

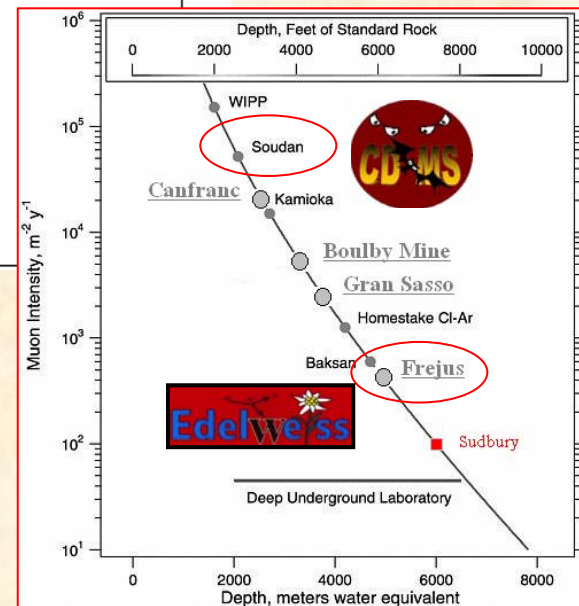


Mine du Soudan (Minnesota)

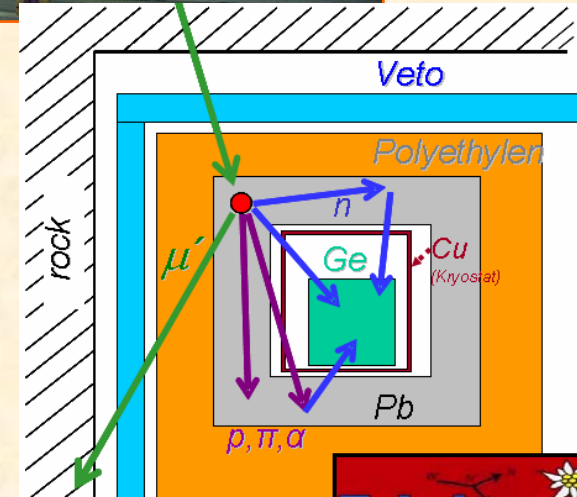
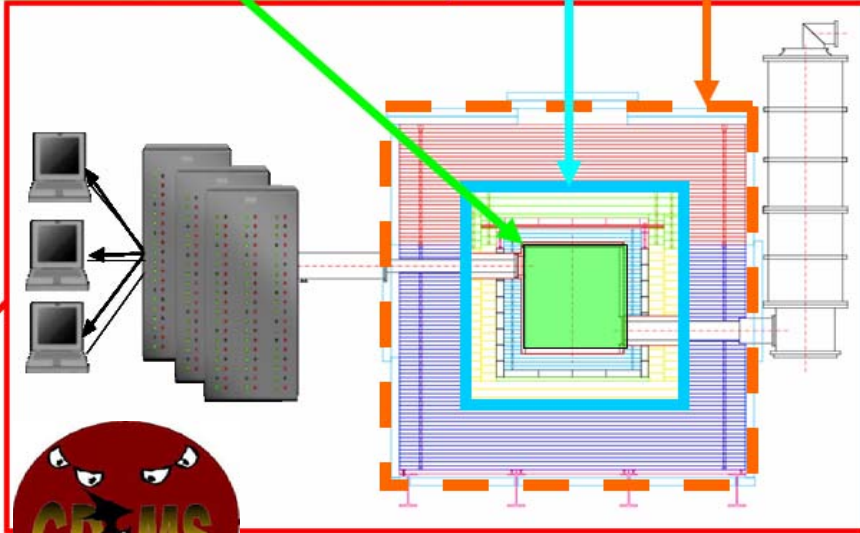
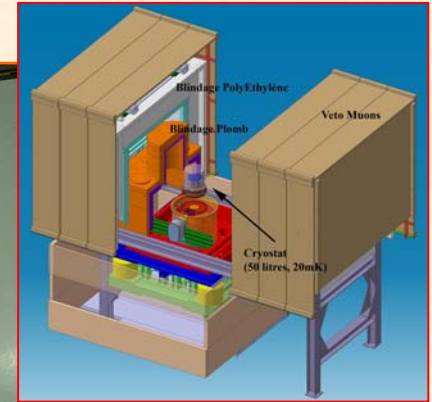


Mine du Soudan (Minnesota)

- **Moins bonne couverture que tunnel du Fréjus**
- Plus de contrainte sur le veto
- Sudbury/SNOLAB est envisagé pour SuperCDMS



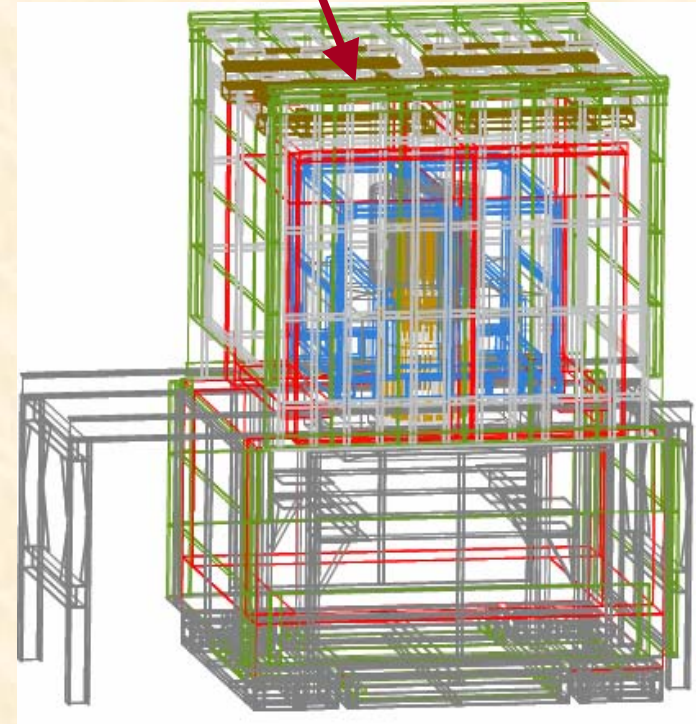
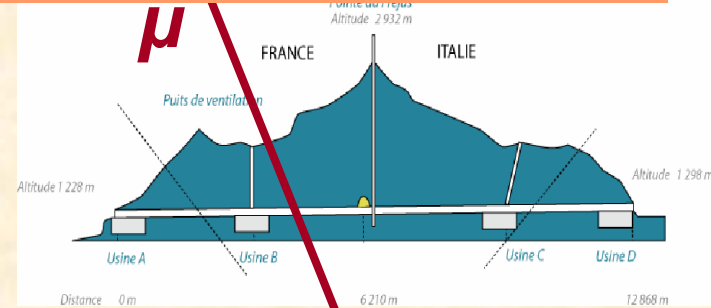
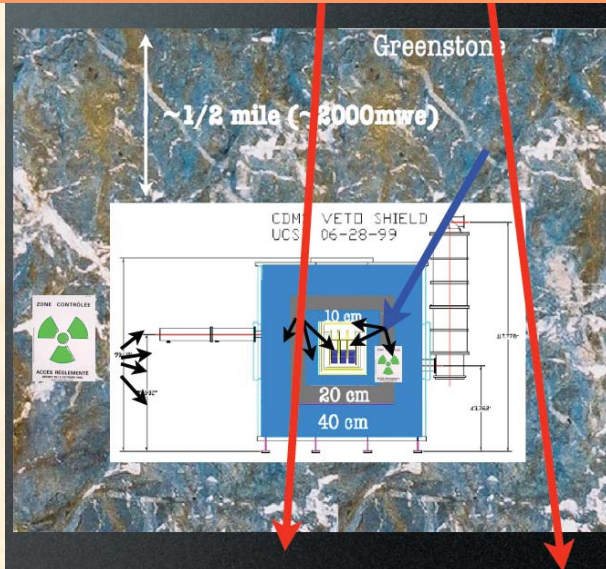
CDMS : blindages



- CDMS : Veto μ + 40cmPE-20cmPb-10cmPE
- EDW : Veto μ + 50cmPE-20cmPb



CDMS : Neutrons résiduels



Les reculs nucléaires produits par les WIMPS peuvent aussi être produits par des neutrons...

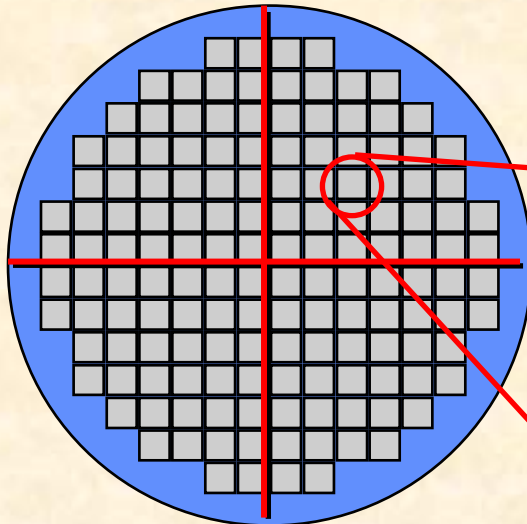
- Sources de neutrons dans CDMS et EDELWEISS :
 - Radioactivité (U/Th) roche et blindage (Pb)
 - réactions (alpha, n)
 - fission spontanée ^{238}U
 - Neutron induits par les muons
- Les taux de neutrons résiduels simulés (Er 10-100keV) par CDMS et EDELWEISS sont proches : $3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$ evts/kg.j
- **Le fond neutron est négligeable pour les 2 expériences pour qq 1000kg.j**

CDMS-II : détecteur ZIP

ZIP: Z-sensitive Ionization and Phonon Detector

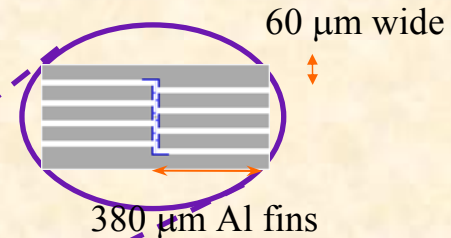
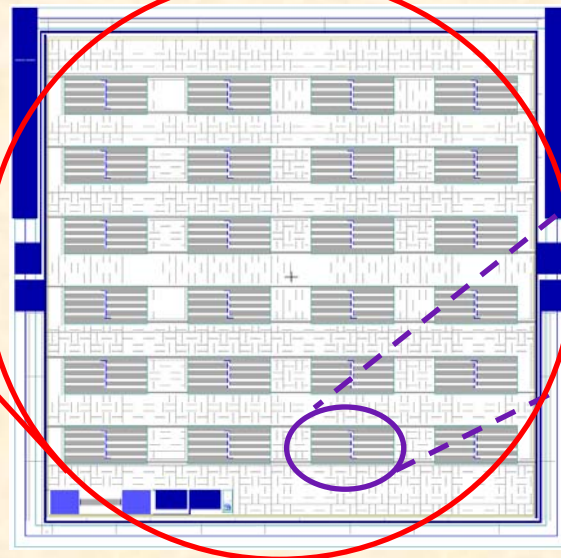
Detectors

- 250 g Ge or 100 g Si crystal
- 1 cm thick x 7.5 cm diameter



Phonon Sensors

- Photolithographic patterning
- 4 quadrants
- 37 cells per quadrant
- 6x4 array of 250 μ m x 1 μ m W TES per cell
- Each W sensor "fed" by 8 Al fins



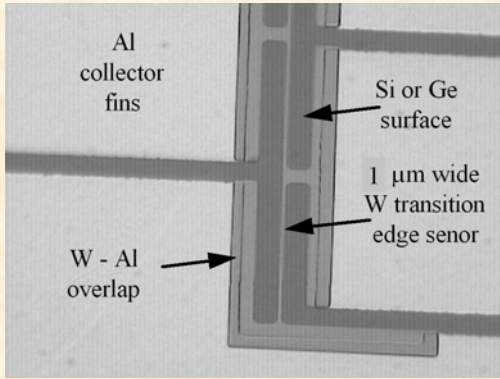
Ionization Sensors

- 2 electrodes (+ ground)
- Allow rejection of events near outer edge



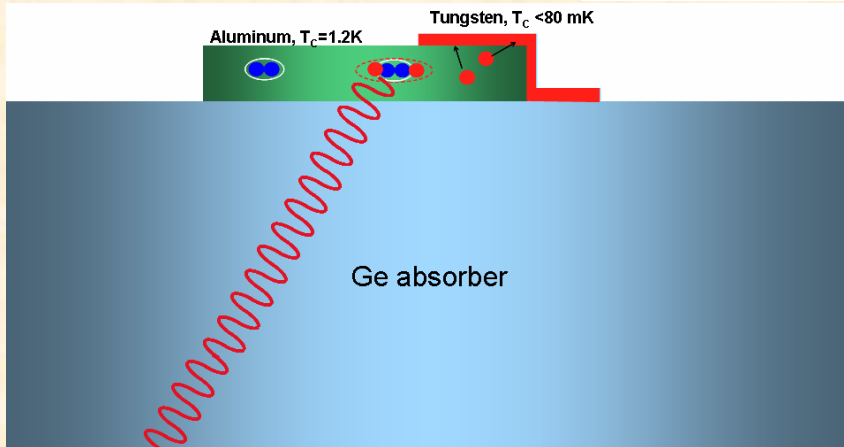
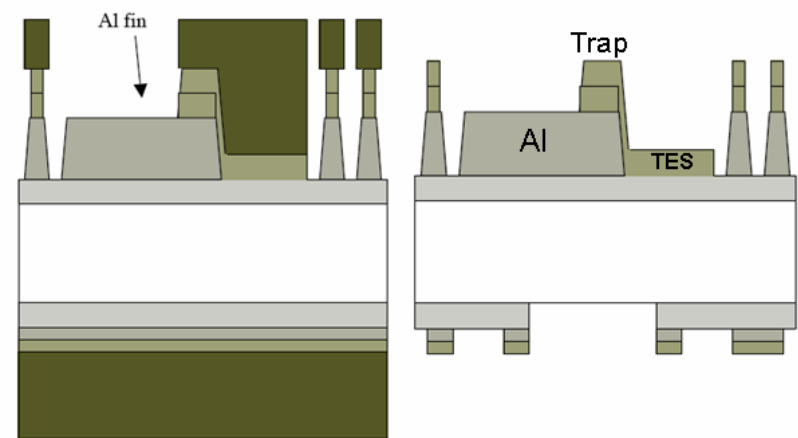
CDMS-II : détecteur ZIP

Process CDMS = CMOS lithographie double couche
EDELWEISS = évaporation avec masques



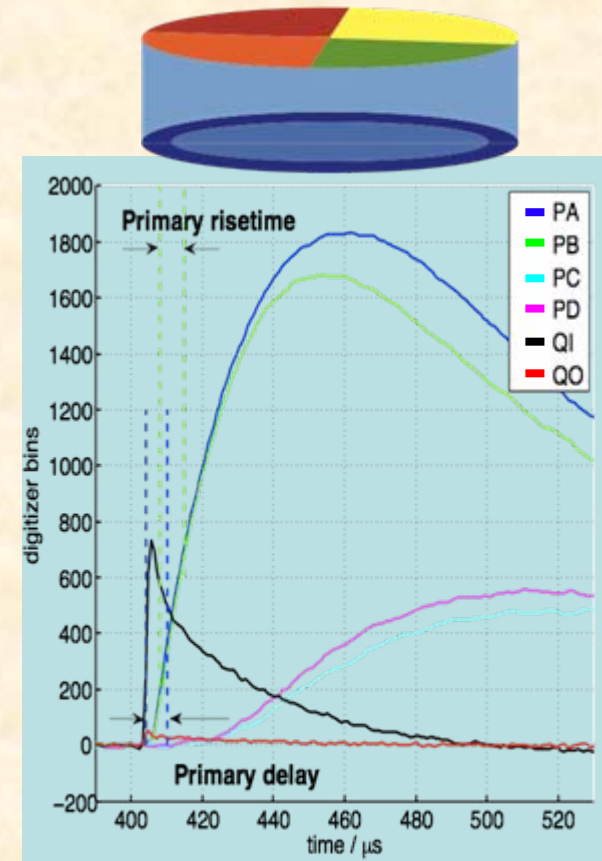
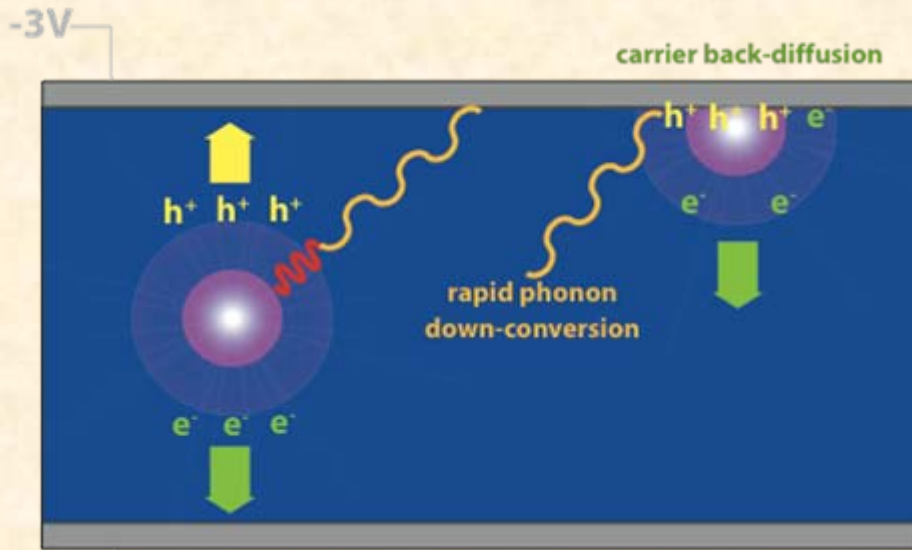
TES 1 micron wide

W	35 nm
Al	300 nm
α -Si	40 nm
Ge	
α -Si	40 nm
Al	20 nm
W	20 nm



- Thermomètre Supraconducteur W
- Médiation par quasiparticules dans l'Alu
- Électronique basse impédance à Squids + Fet pour Ionisation

Identification événements de surface CDMS : Phonon timing



La physique de dégradation des phonons et la présence d'Alu fait que les évts de surface sont plus rapides que les évts de volume

→ 2 paramètres sont utilisés pour les coupures :

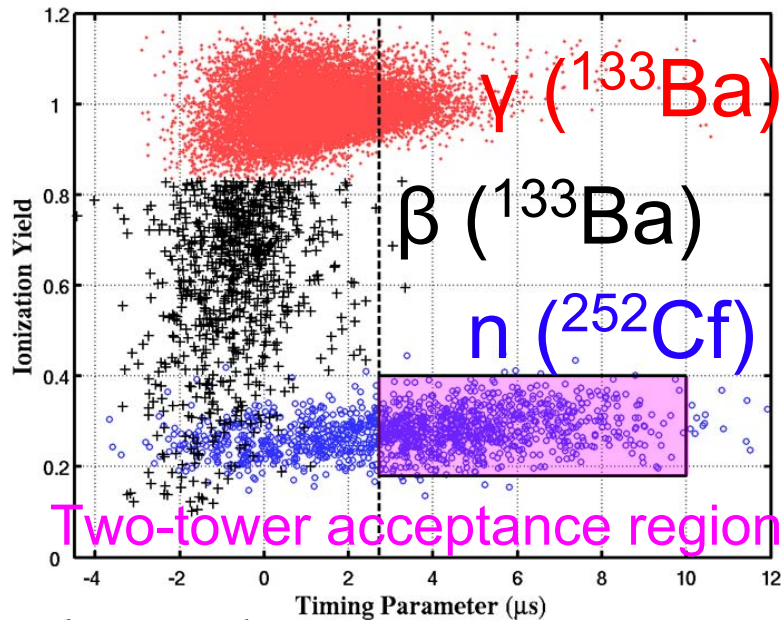
- **Primary risetime**

(délai entre 10% - 40% amp. phonon)

- **Primary delay**

(délai entre 20% amp. charge et 20% amp. phonon)

Identification événements de surface CDMS : Phonon timing



A. Reisetter, UMinn
PRL 96, 011302 (2006)

**Coupure utilisées pour le run à 2 tours
(2004)** (93.1 kg.days avant coupure 03/2003 to 08/2004)

126 low-yield singles
15 (12%) in NR band
1 passed timing in NR band
(run with poor neutralization)

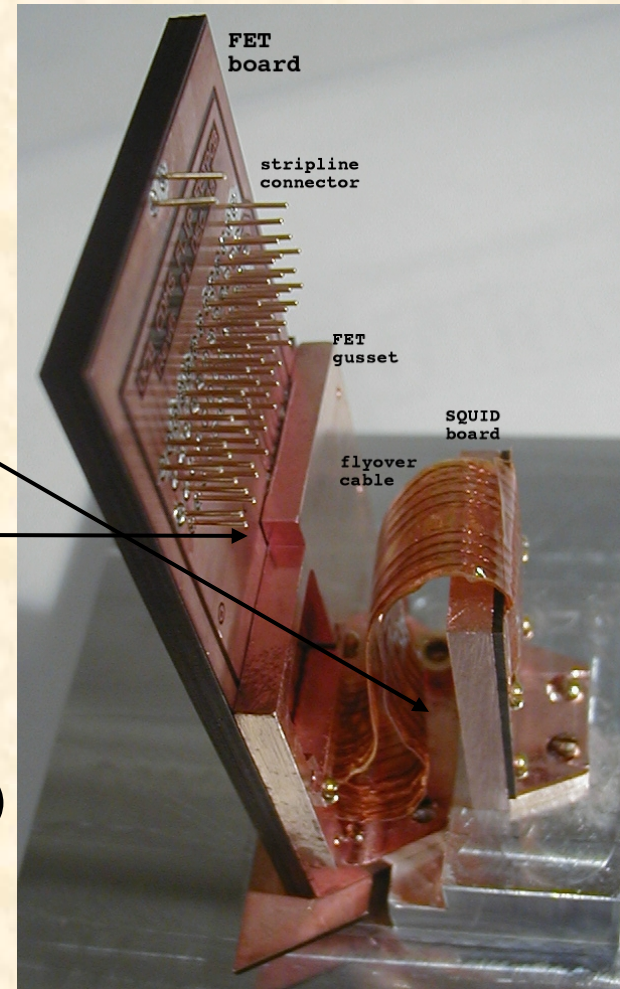
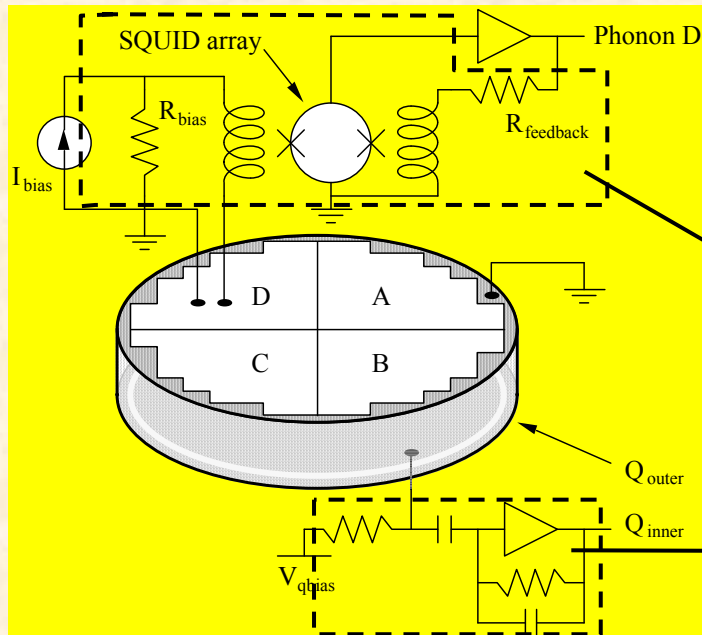
(combinaison linéaire primary risetime and delay)

CDMS travaille sur d'autres analyses pour améliorer le rejet :

- sum of delay and rise time
- χ^2 timing analysis
- event position reconstruction
- neural network, etc.

Rien de précis en conférence ou de publié encore pour le run actuel à 5 tours

CDMS-II : Électronique froide « SQUETs »



- Phonon signals are readout by SQUID based Amps (0.6 K)
- Charge Amps first stage: Cold FET (130 K)
- Both SQUID and FET based amps are assembled on a single card (SQUETs)
- A CDMS “tower” consist of 6 ZIPs and corresponding SQUETs.

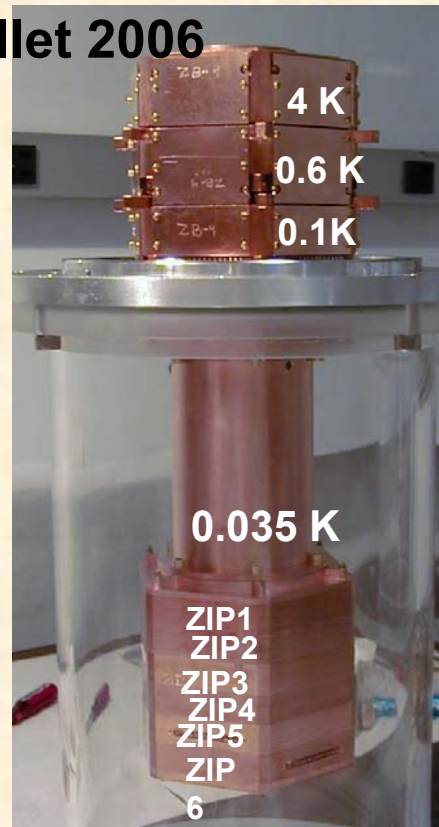
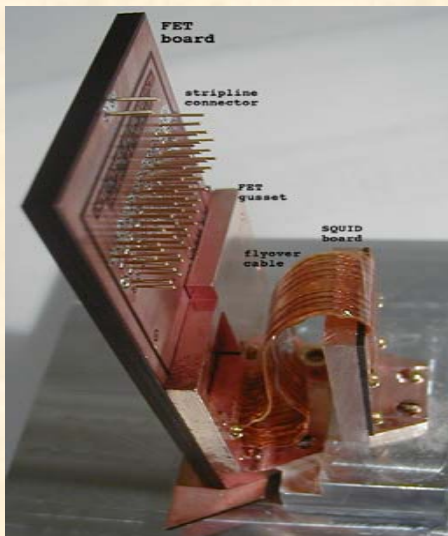
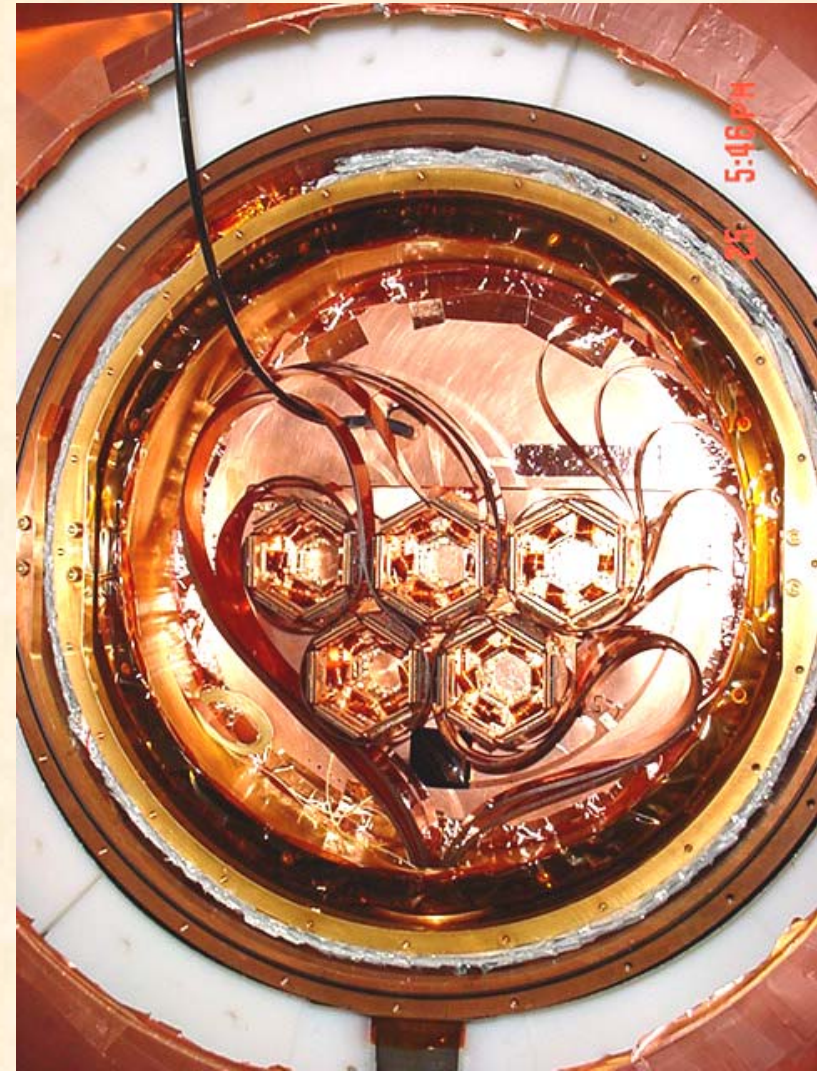
5 tours à Soudan : 4.5 kg of Ge

CDMS-II : production ZIPs

- En 4 ans seulement 18 ZIPs (+ électronique froide = 3 tours) ont été produits : technologie très complexe
- 5 tours depuis Jan 2005
- 2005 - Juillet 2006: commissioning à Soudan
- **En run depuis Juillet 2006**

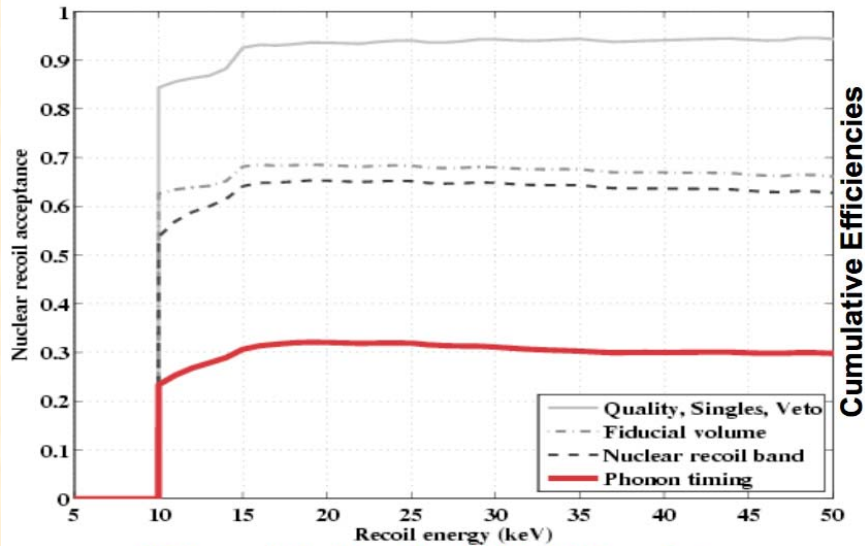
N.Mirabolfathi et al. Nucl. Instr. Meth. A 559 (2006), p. 417.

Soudan Icebox



CDMS-II : Résultats 5 tours 2008

Efficiencies

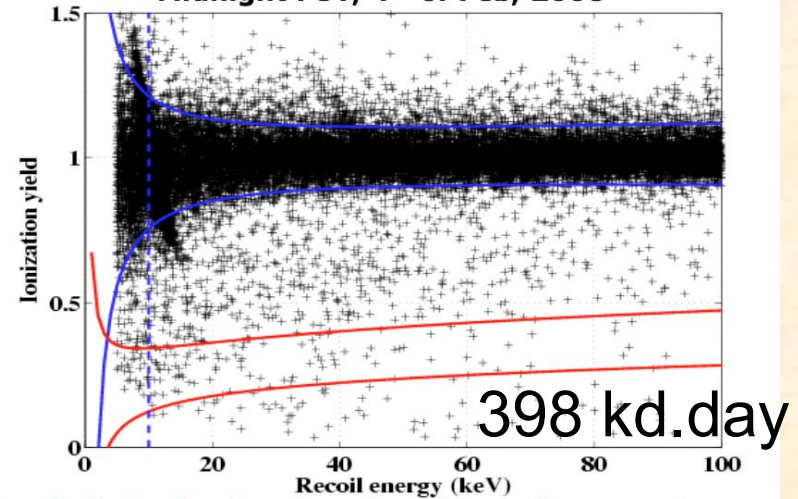


Efficiency plot includes effect of Fiducial Volume Cut

- Before cut on surface events
- 77 evts predicted in ROI
- After applying cut on surface events
- **0.6 evt expected, none seen**
- Fid exposure : 121 kg.d
- Efficacité faible 121kg.j sur plus de 650 kg analysés

The WIMP Search Data

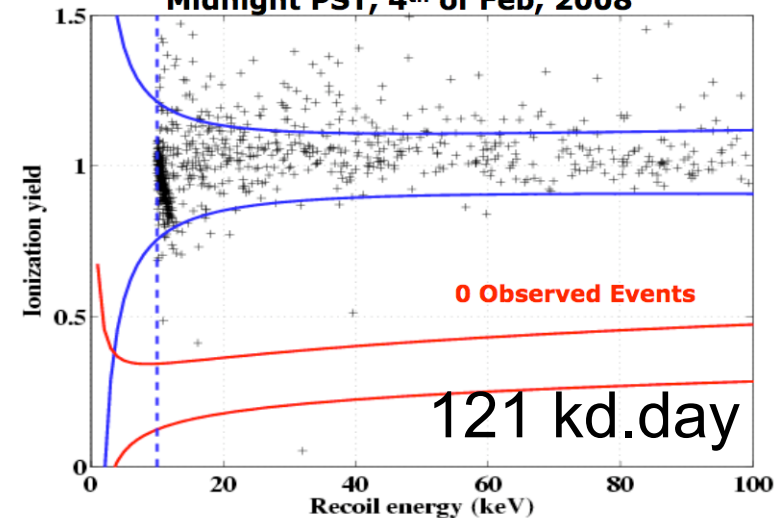
Midnight PST, 4th of Feb, 2008



97 Singles in Signal region rejected by Surface Event Cut

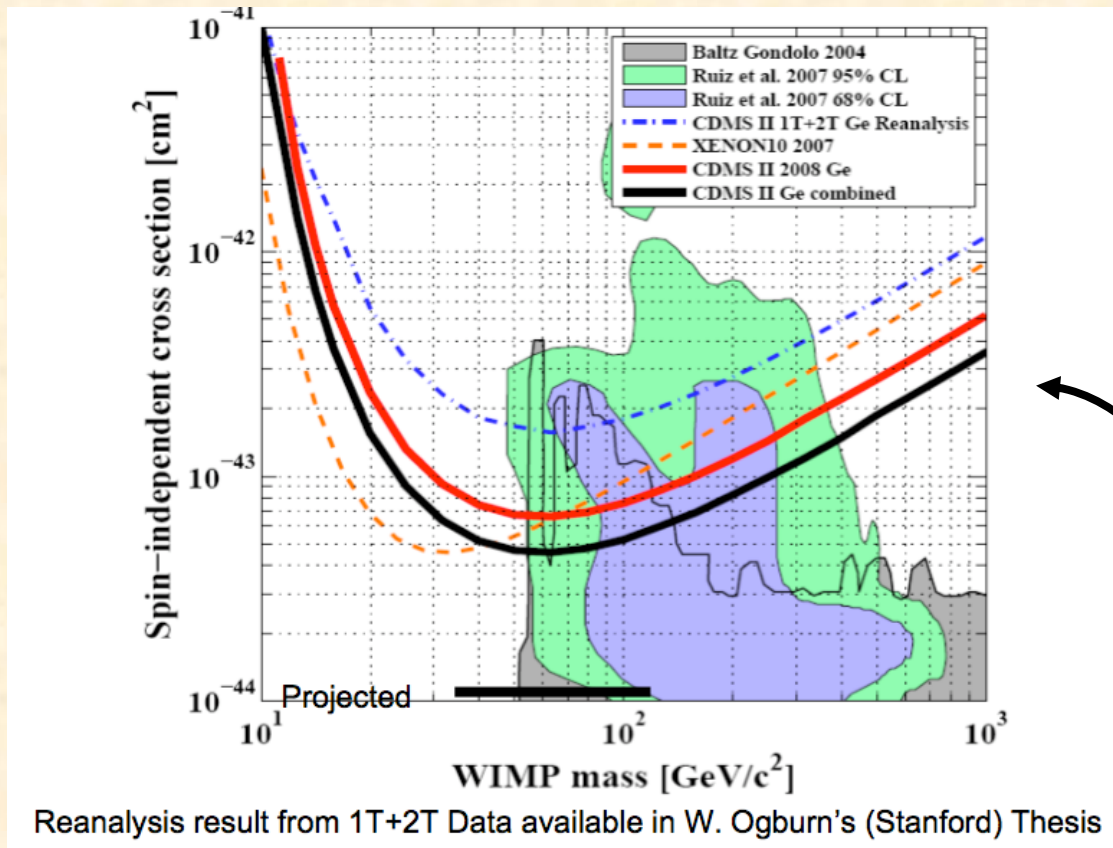
Open The Box: Surface Event Cut

Midnight PST, 4th of Feb, 2008



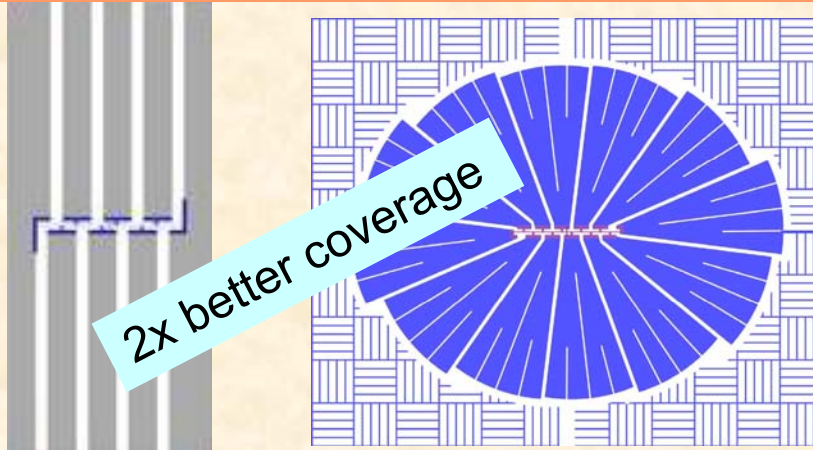
Expected Background: 0.6 ± 0.5 surface events and < 0.2 neutrons

CDMS-II : Résultats



- **30 Ge (4.75 kg) et Si (1.1 kg) détecteurs avec 5 tours**
- **Run 123+124:** 163 live days, results published in PRL102 (2009) 011301
- **Run 125-128:** 240 live days under analysis, first results in summer 09 ? (sensitivity reach $\sim 1 \times 10^{-44}$ cm²)

CDMS-II : Futur = SuperCDMS



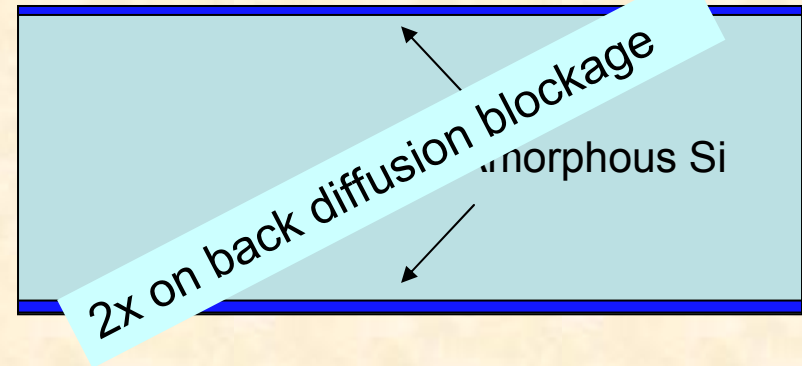
**Current ZIP
TES**

Modified ZIP TES

- SuperDétecteurs 650g (1cm→1 inch)
- 1 SuperTour en 2009, 5 en 2010
- Gain 40 en rejection espéré

A plus long termes :

- Massive 6" diameter ZIP detectors (~2.5kg)
- Kinetic inductance phonon sensors
- Multiplexing
- Phonon sensors on both faces
- Move to SNOLAB, reduce apparatus backgrounds, improve stability



+ H₂ to passivate the Si

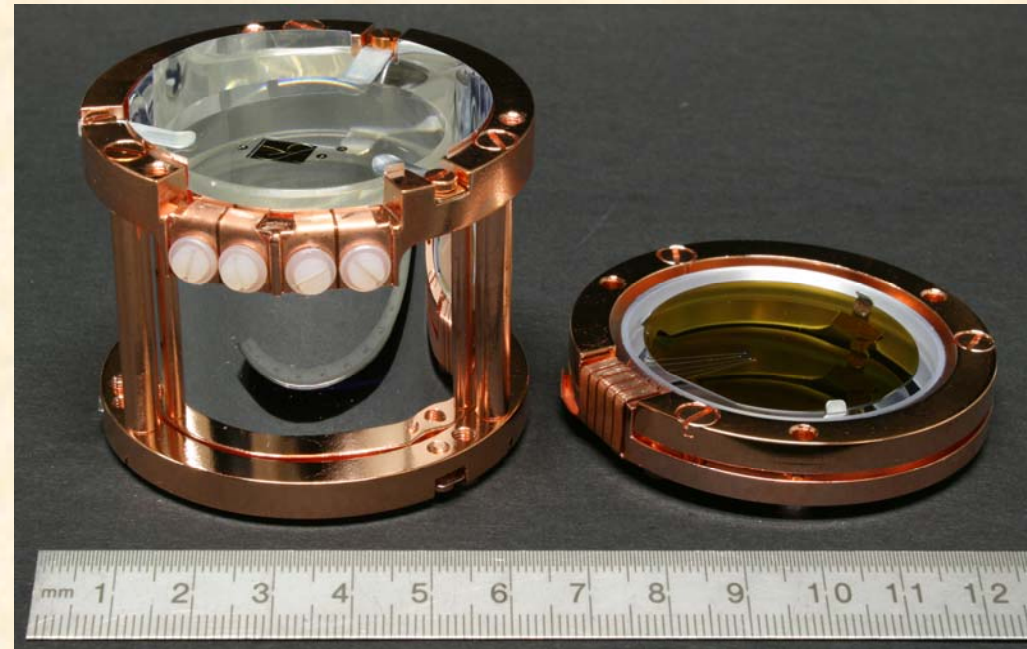
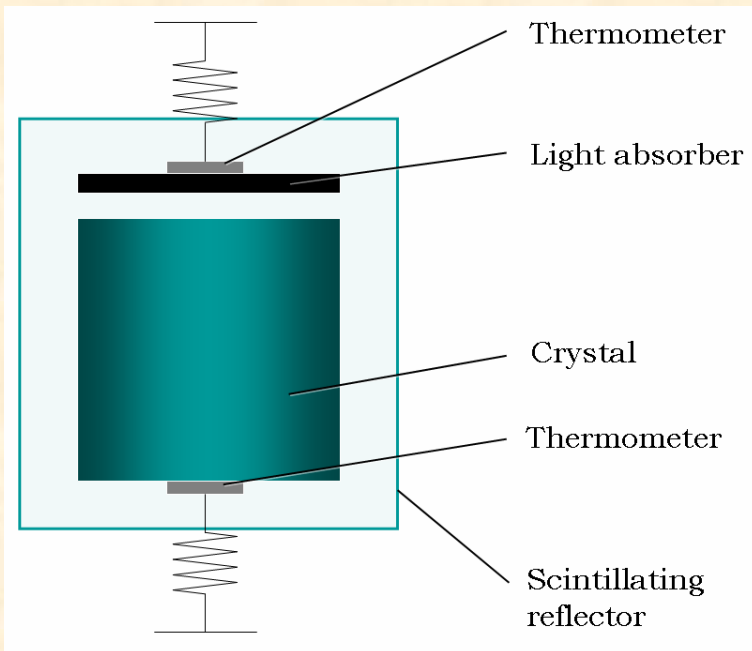
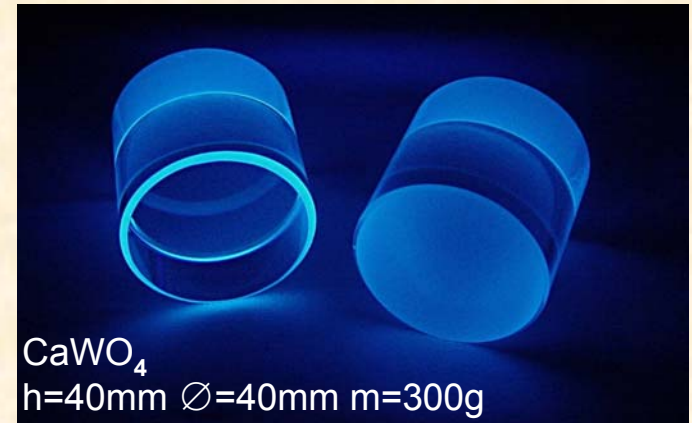
Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

~50 personnes (sur les publis...)

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

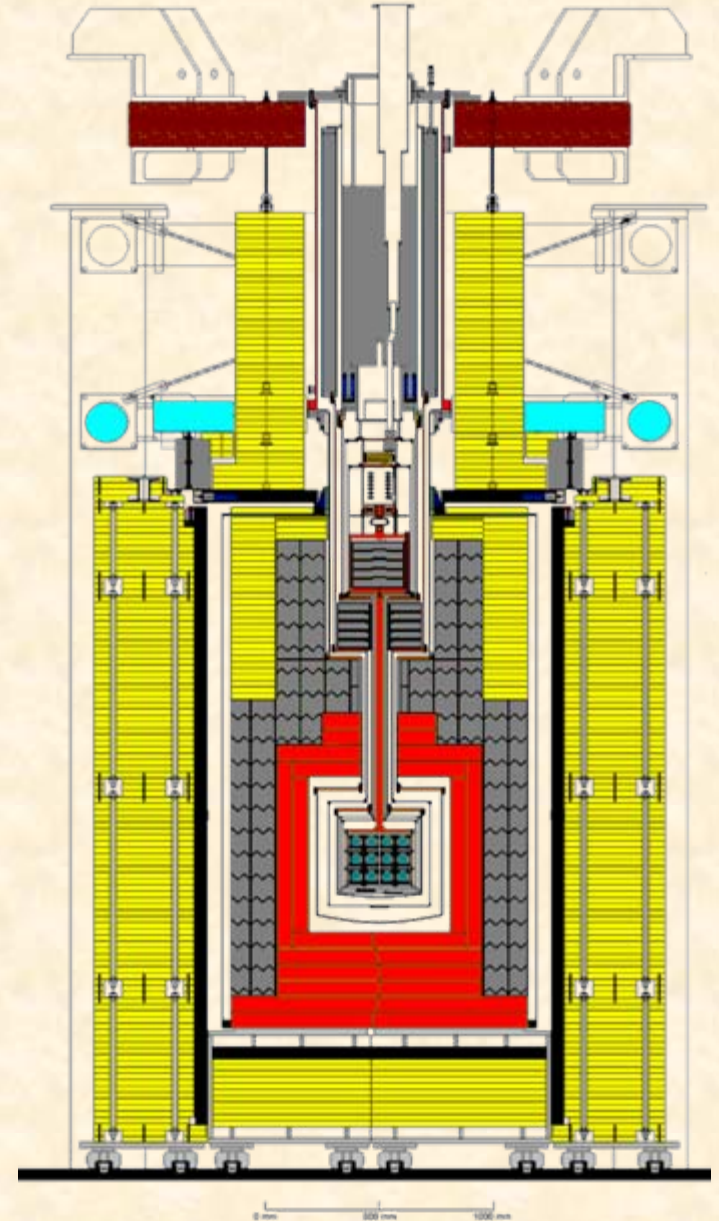
CRESST : détecteurs

- Tungsten dans CaWO_4 ($A=184$)
- Thermomètre W supra
- Lecture à SQUID
- Double mesure chaleur-lumière



CRESST : Blindages

- Tunnel du Gran Sasso
- ~ 14 cm copper (about 10 tons)
- ~ 20 cm lead (about 24 tons)
- muon-veto
- ~ 40 cm PE (about 12 tons)
- use only radio-pure materials
- radon box



CRESST : installation

Modular structure

- Up to 33 modules
- Up to 10 kg target mass
- Multi-target possible

Upgrade 2007

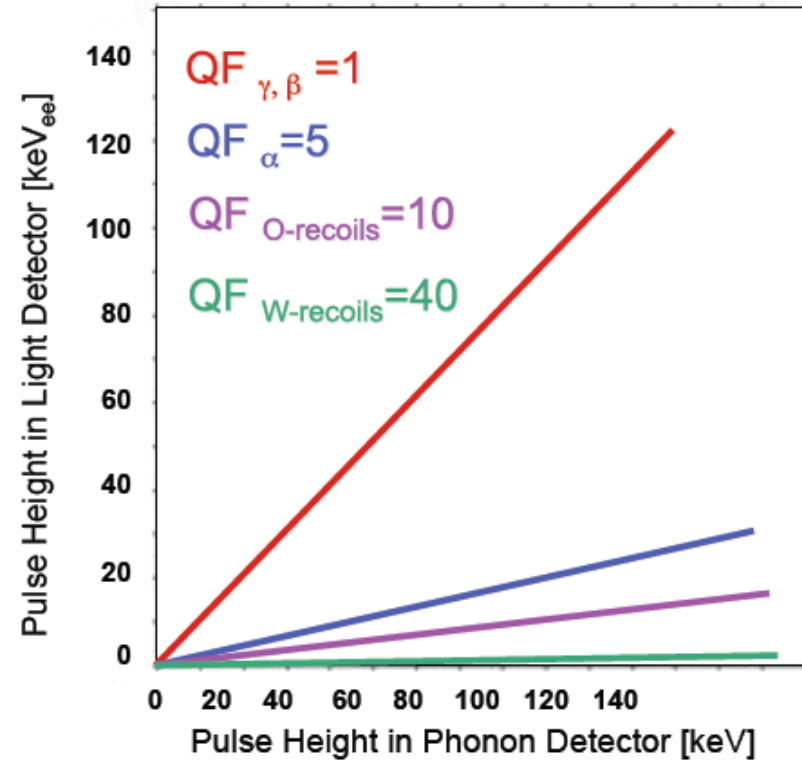
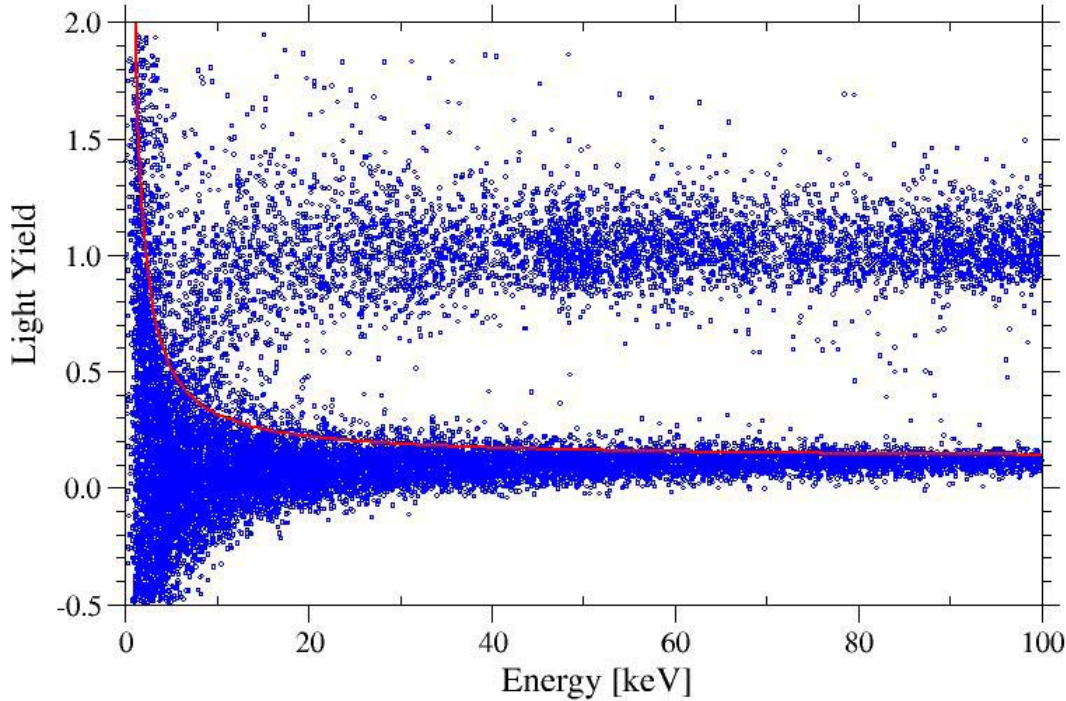
- new detector support structure
- 66 channel SQUID system
- new wiring
- new heater and bias electronics
- new DAQ
- neutron moderator and muon veto installed

Run 2007

- 9 modules placed
- 4 months commissioning (“Run 29”)
- 2-3 modules operational
- background “Run 30”

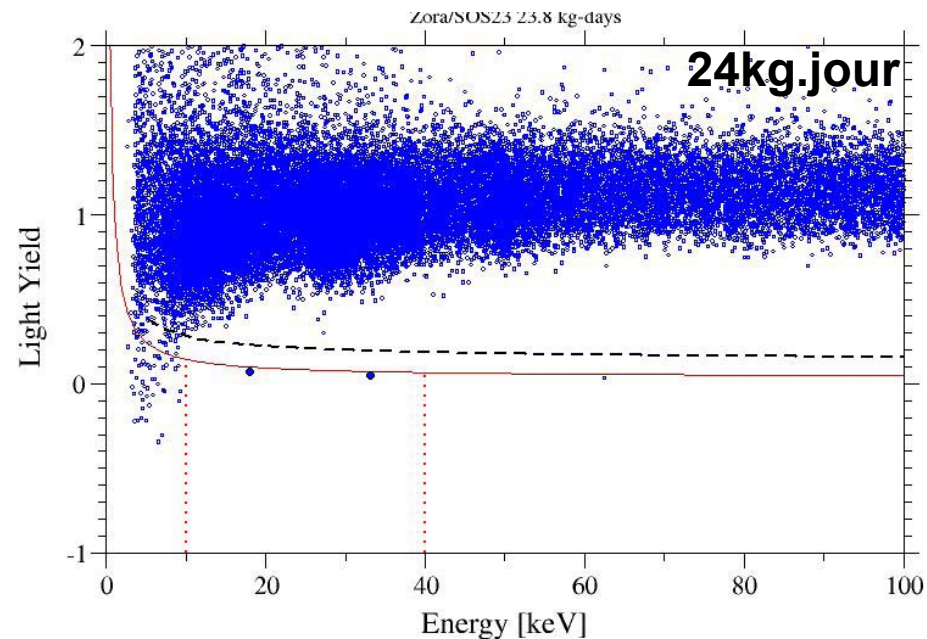
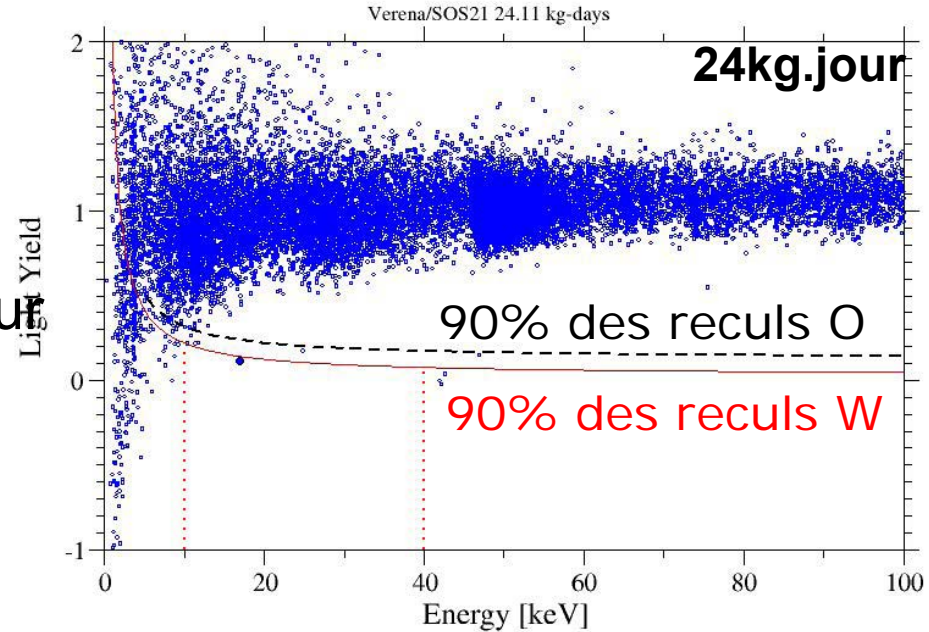
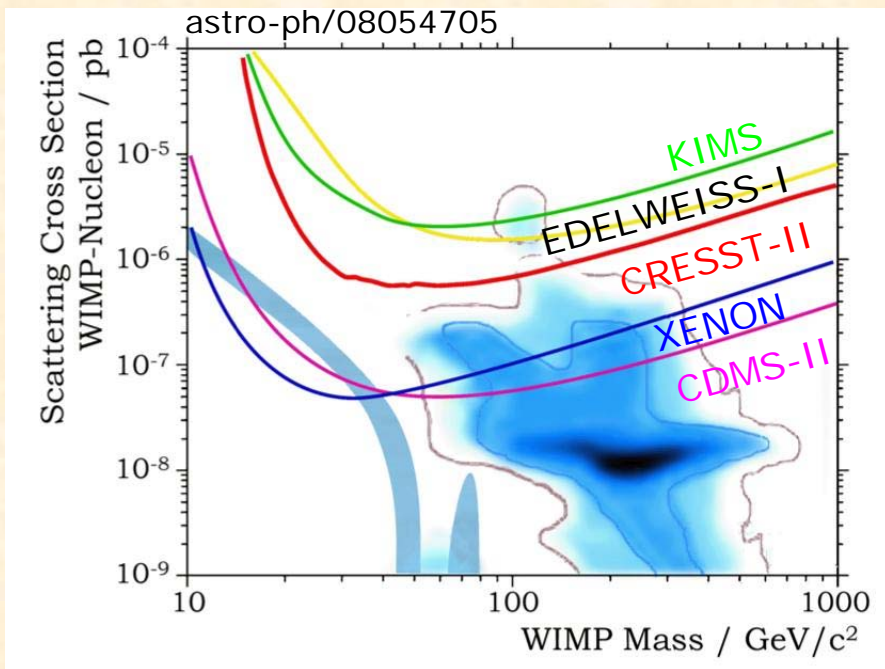


CRESST : discrimination WIMPs/neutron



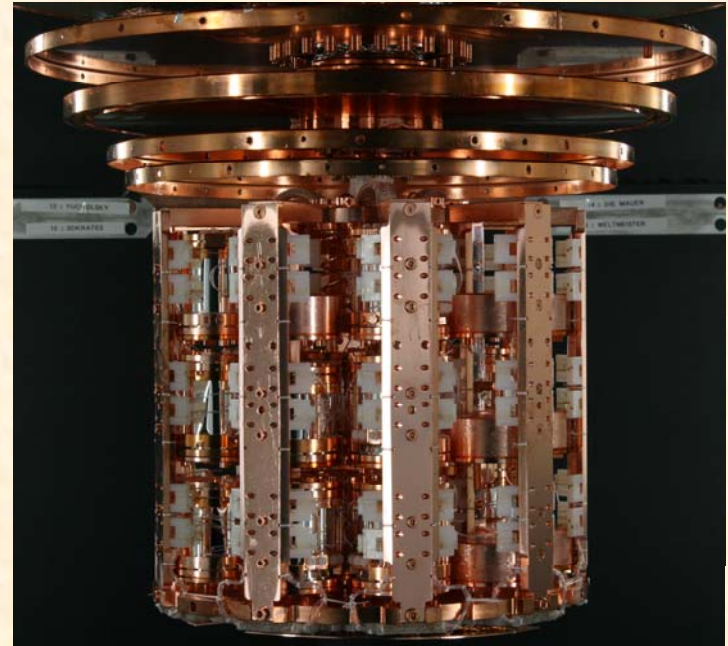
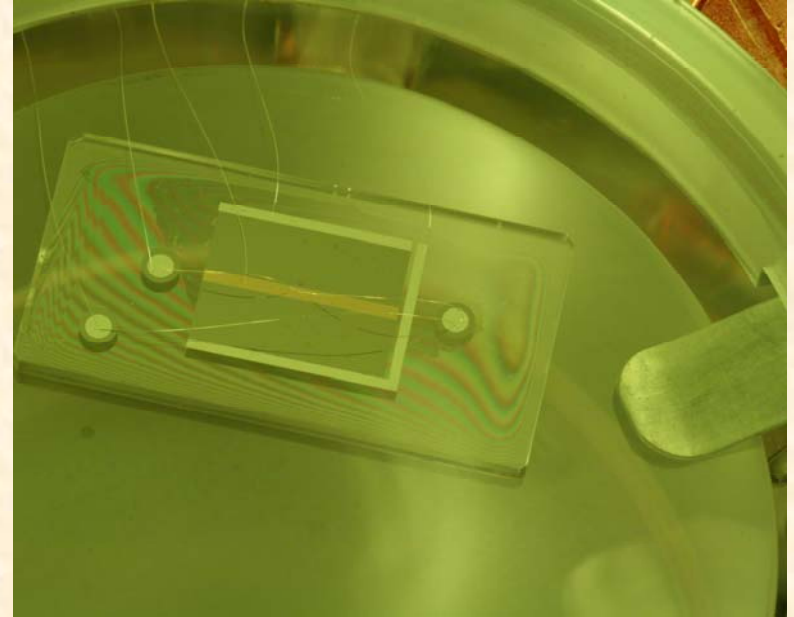
- Discrimination WIMPs neutron en théorie mais...
- Recul WIMPs donne très peu de lumière
- Évts chaleur seul (microphonie) pris pour signal WIMPs !

- Cinématique : Wimps recul de W
Neutron recul 0 et Ca
- 3 évts entre 10-40keV en 48 kg.j
- Grosse limitation car évts « chaleur seule »



CRESST : Futur

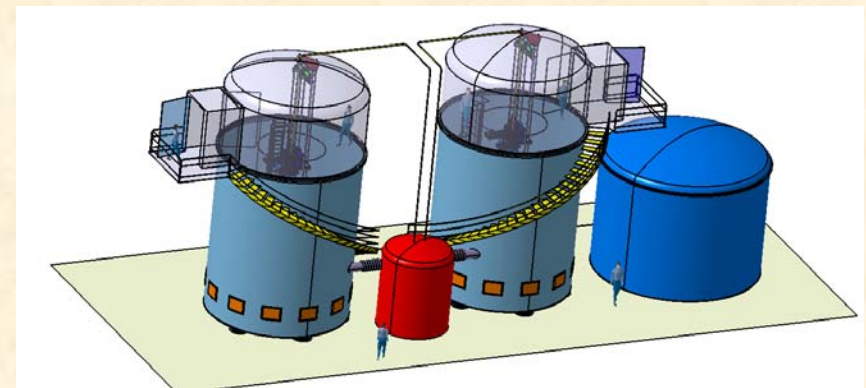
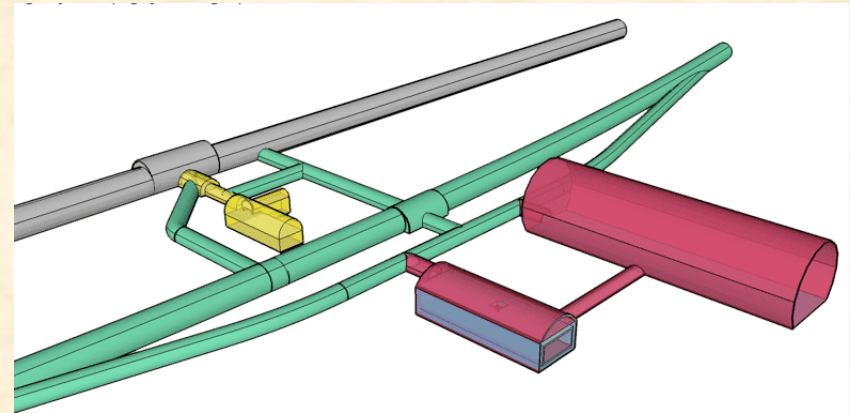
- 17 modules installés (5 kg)
- Thermomètres collés : meilleurs contrôle et meilleur rendement de lumière
- Nouveaux détecteurs ZnWO₄ installés
- Upgrade électroniques
- Moins de “chaleur seule” ?



Recherche directe de WIMPs : EURECA

- EURECA: beyond 10^{-9} pb, major efforts in background control and detector development
- Joint effort from teams from EDELWEISS, CRESST, ROSEBUD, CERN, +others...
- $\gg 100$ kg cryogenic experiment, multi-target
- Part of ILIAS/ASPERA European Roadmap
- Preferred site: 60 000 m² extension of present LSM ($4 \mu\text{m}^2/\text{d}$), to be dig in 2011-2012

Cf. Alain Benoit

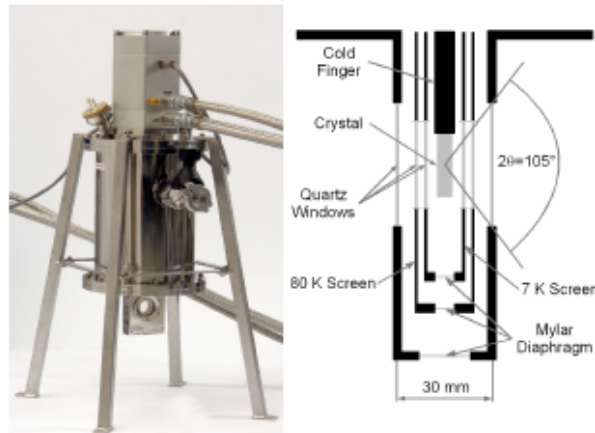


2 experiments
(different nuclei, different
techniques),
e.g. 1 bolometric, 1 noble liquid;

EURECA : R&D scintillation

- CRESST-EDELWEISS(IPN Lyon)-ROSEBUD travaillent sur les bolomètres lumière-chaleur
- L'approche multi-cible reste privilégiée + monitoring neutron (cf P.de Marcillac spectro possible)

The SciCryo Optical Cryostat



- Helium closed circuit with pulse tube built by Air Liquide
- Temperature regulation between 3 K and 40 K
- Geometry compact and original
- 40% of total solid angle \Rightarrow Allow the use of γ sources
MA Verdier et al, accepted in Rev. Sci. Instr.

Cf. clip M.A. Verdier

Recherche directe de WIMPs : conclusion

- **Un foisonnement d'expériences avec des techniques différentes**
- Les gaz nobles liquéfiés ont un avantage sur la masse de la cible mais n'ont pas démontré un rejet total du fond
- Les expériences cryogéniques ont une discrimination et une résolution excellente mais la tonne sera difficile à atteindre
- Les détecteurs gaz TPC avancent pour une possible signature directionnelle
- Complémentarité avec détection indirecte (très chaud en ce moment, ballon ATIC + satellite PAMELA) + LHC

1 evts/kg/an

