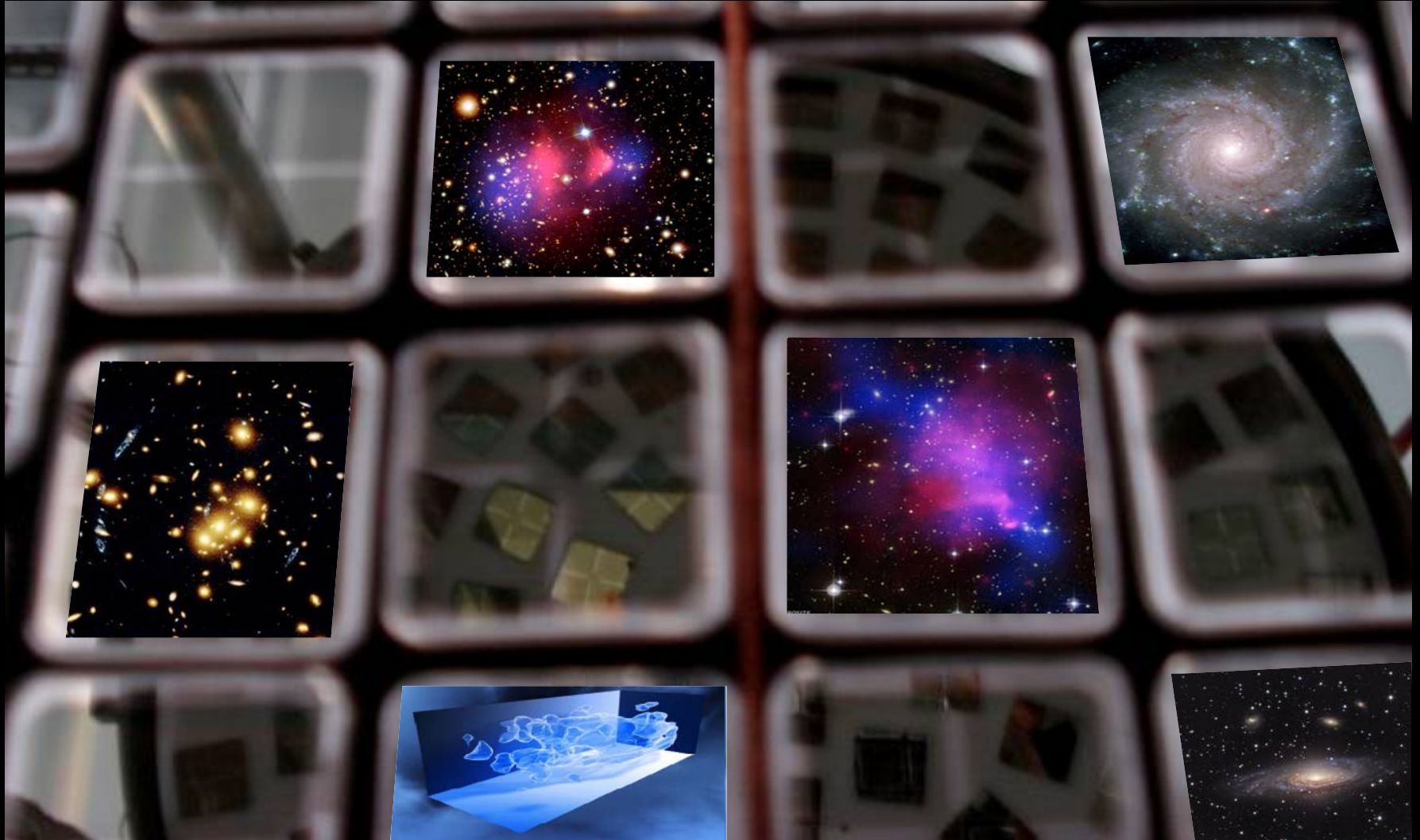


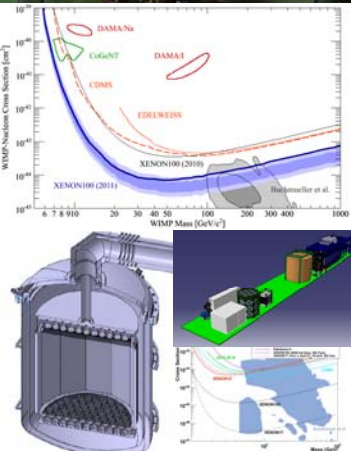
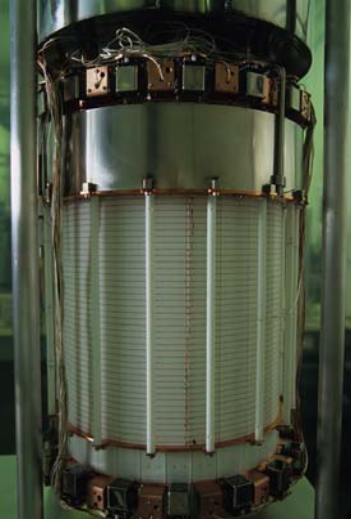
XENON100, à la recherche de la matière noire

Jacob Lamblin, Subatech - Collaboration XENON100



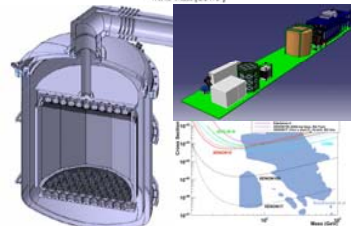
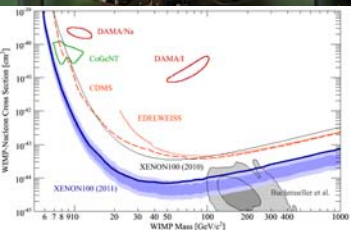
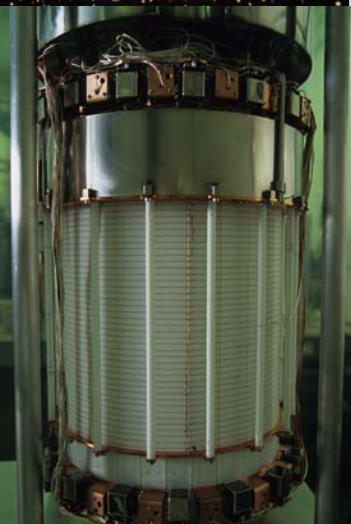
Séminaire LPNHE - 16 juin 2011

Plan



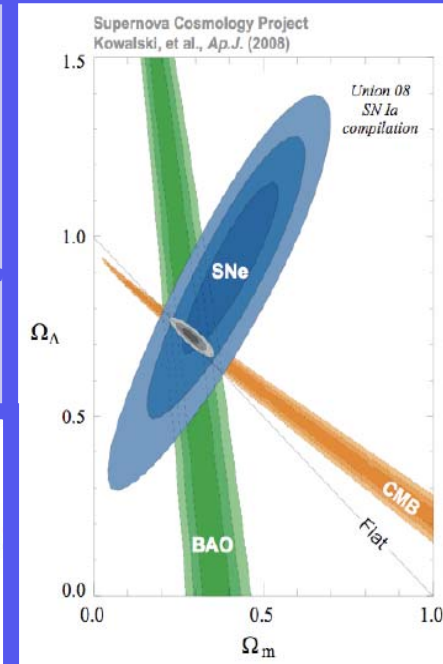
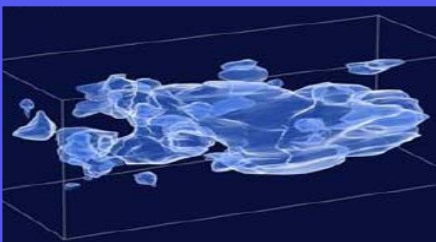
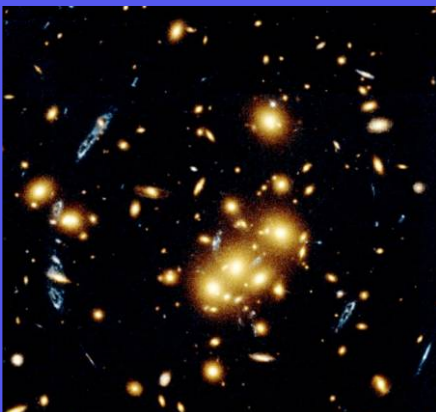
- Le WIMP : un candidat pour la matière noire
- Le détecteur XENON100
 - du xénon liquide comme cible de détection
 - une localisation tridimensionnelle
 - une mesure de l'énergie de recul
 - un très bas bruit de fond
- Les résultats actuels de XENON100
- La prochaine étape : XENONIT

Plan



- Le WIMP : un candidat pour la matière noire
- Le détecteur XENON100
 - du xénon liquide comme cible de détection
 - une localisation tridimensionnelle
 - une mesure de l'énergie
 - un très bas bruit de fond
- Les résultats actuels de XENON100
- La prochaine étape : XENON1T

3


$$\begin{aligned}\Omega_A &= 0.742 \\ \Omega_M &= 0.258 \\ \Omega_B &= 0.044\end{aligned}$$


Un WIMP qui n'a peur de rien

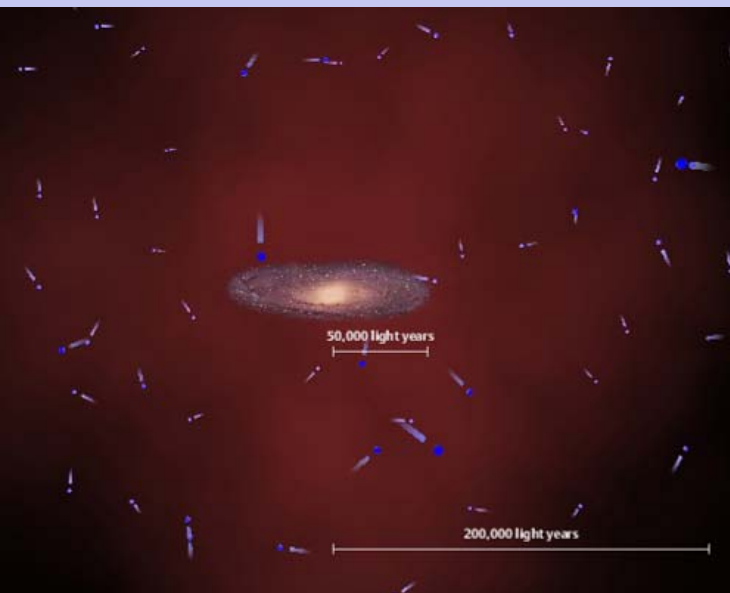
4

La matière noire doit être :
non-baryonique, neutre, stable,
massive (froide).

Un des scénarios favoris :

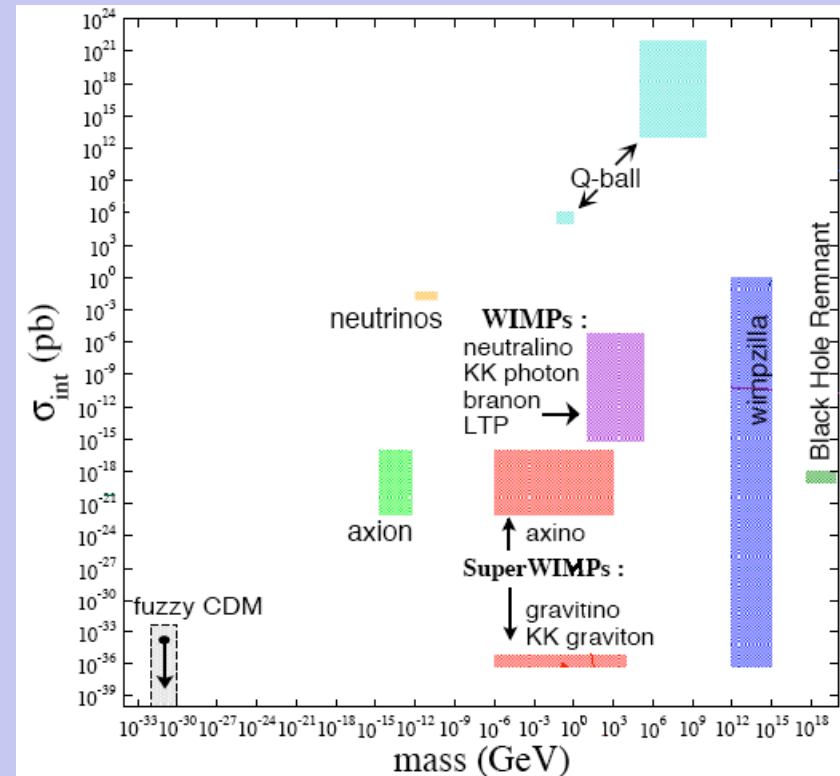
Weakly Interacting Massive Particle

Exemple : le neutralino



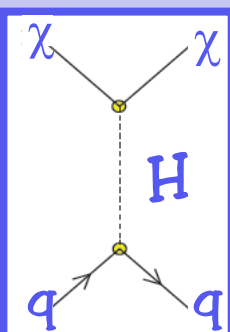
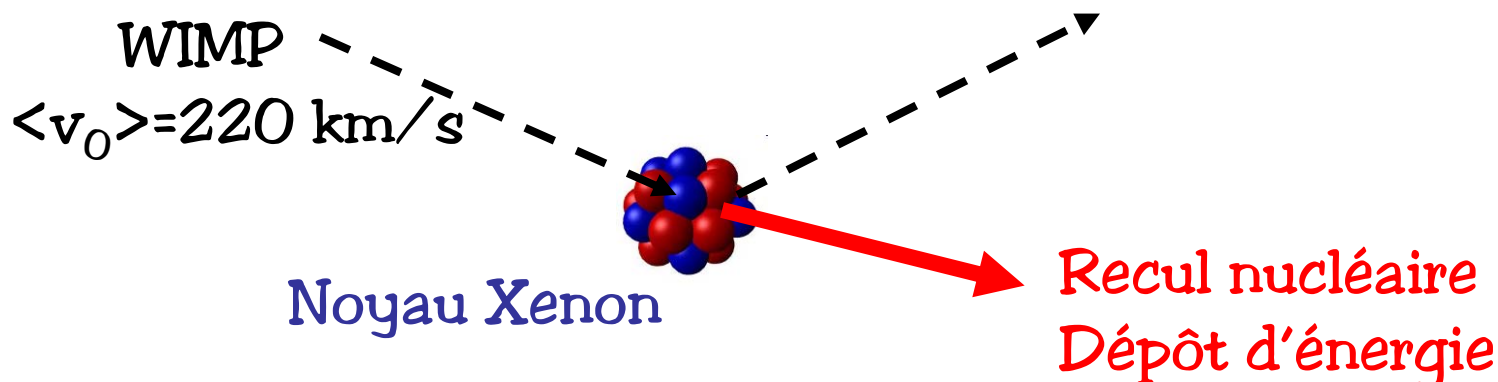
→ Répartis sous forme d'un halo
uniforme autour de la galaxie

Densité : $\rho_0 = 0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$



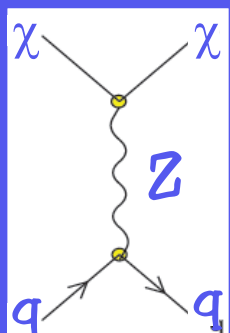
Principe de la détection directe

5



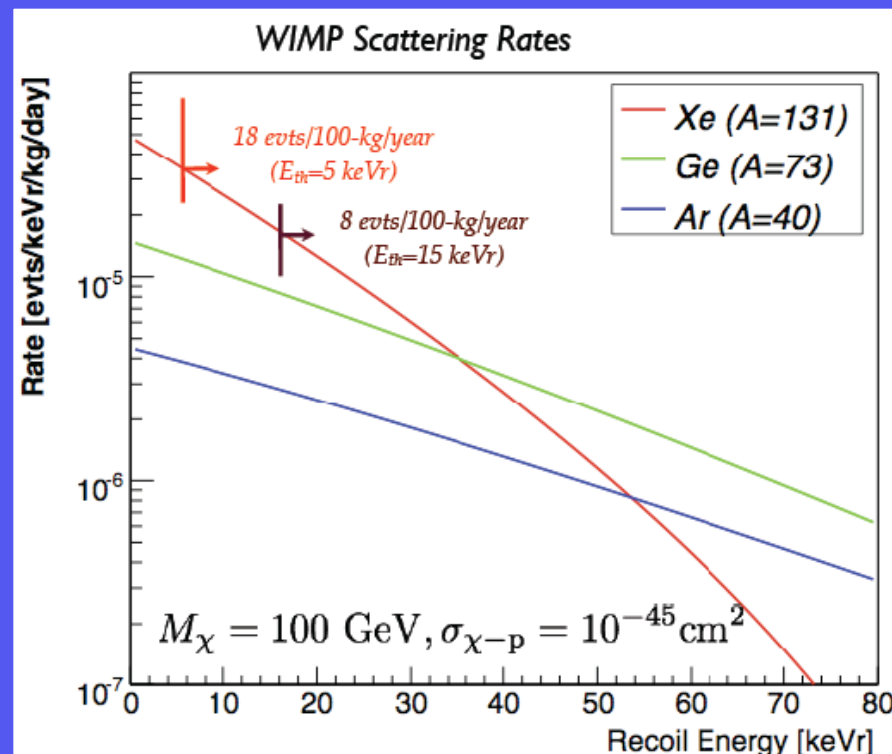
indépendant du spin (SI)

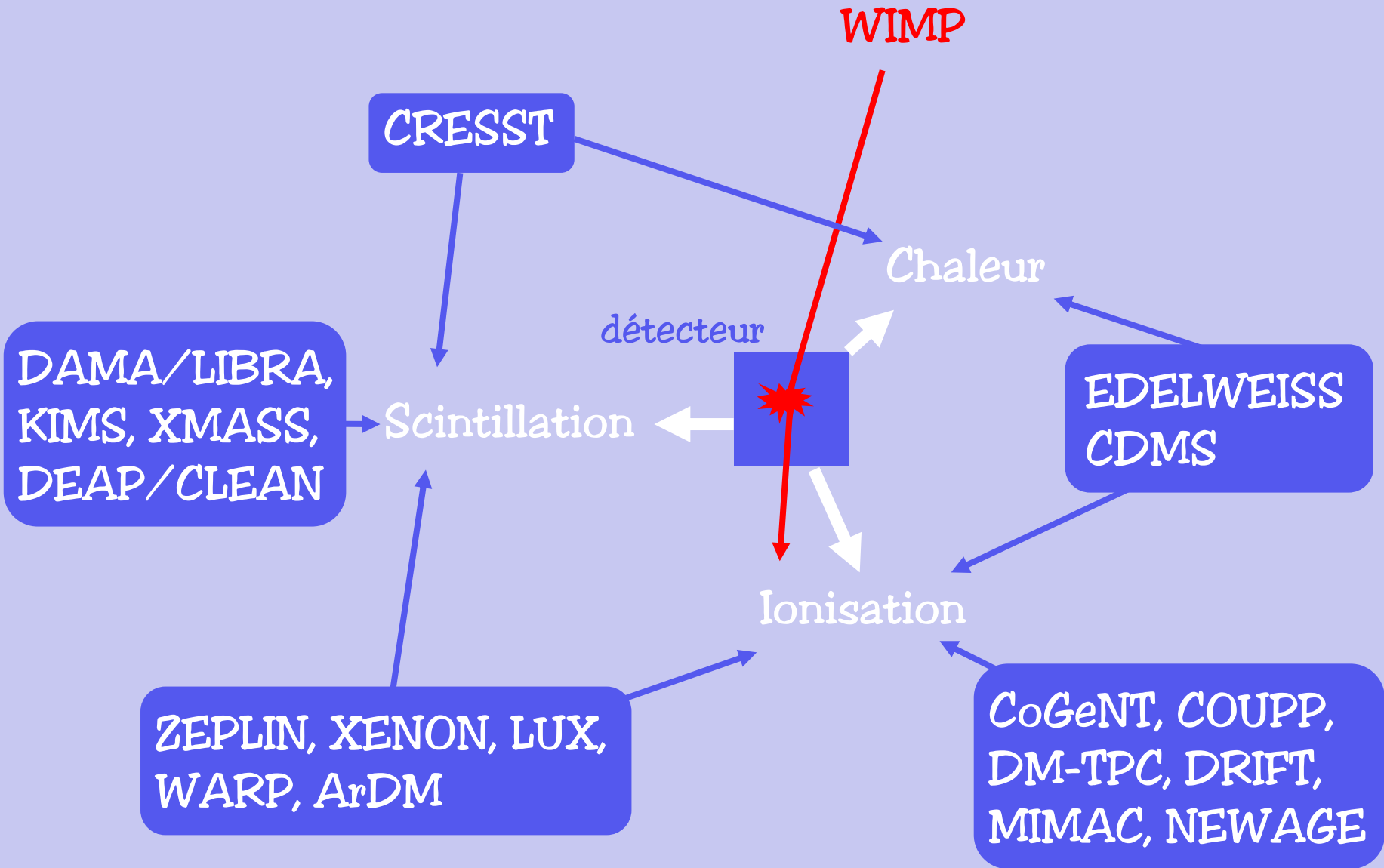
interaction possible avec tous
les nucléons du noyau
→ tous les noyaux concernés



dépendant du spin (SD)

interaction possible seulement
avec les nucléons non appariés
→ noyaux avec A impair





... un peu partout dans le monde ...

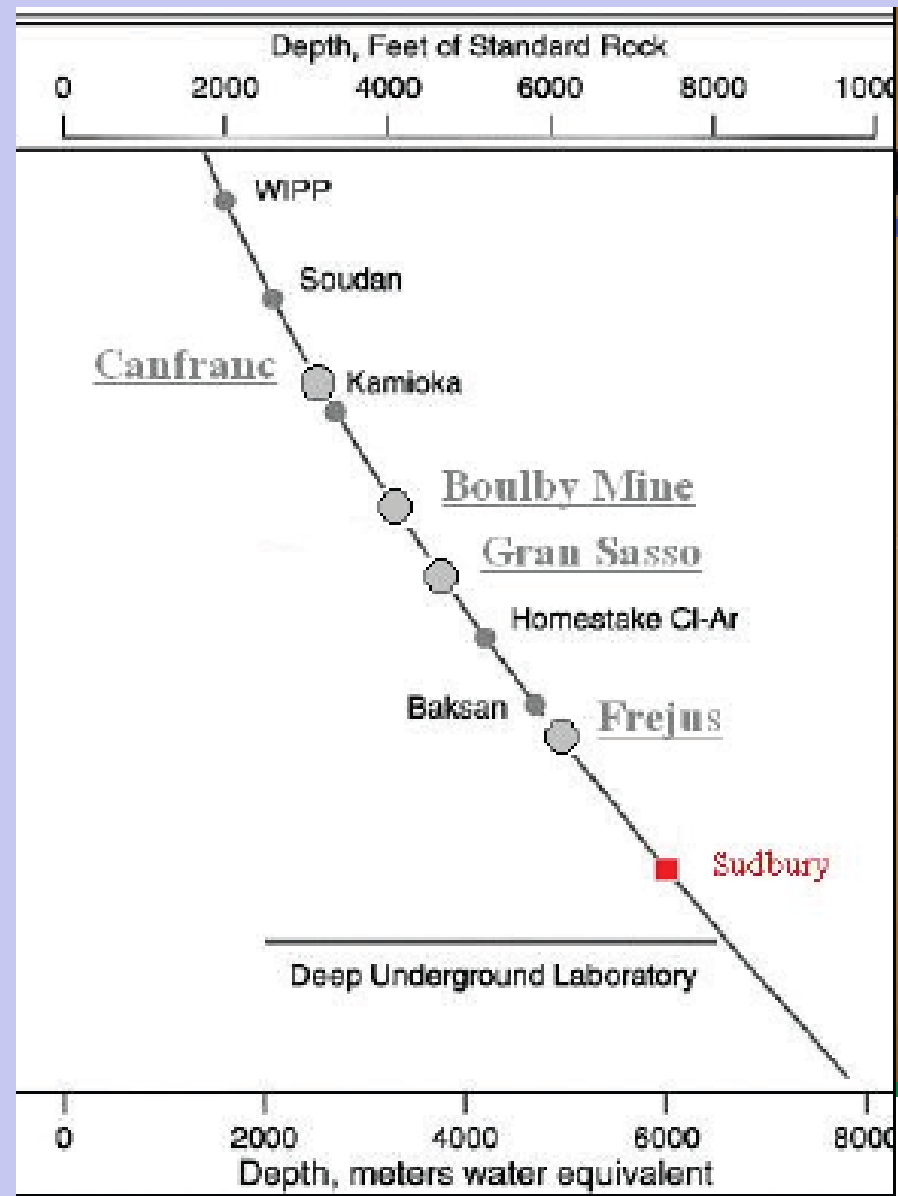
7



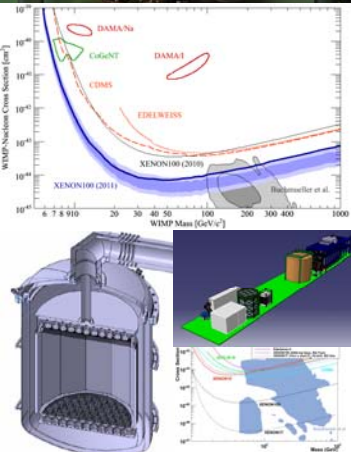
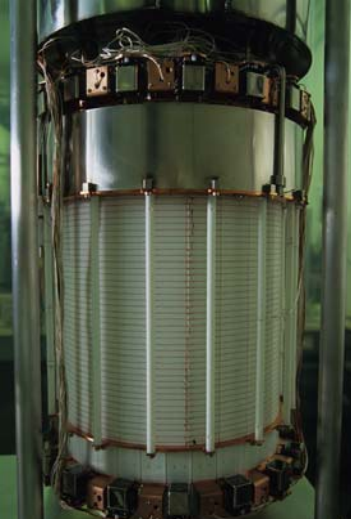
... à différentes profondeurs.

8

Laboratoire souterrain
pour se protéger des
rayons cosmiques



Plan



- Le WIMP : un candidat pour la matière noire
- Le détecteur XENON100
 - du xénon liquide comme cible de détection
 - une localisation tridimensionnelle
 - une mesure de l'énergie
 - un très bas bruit de fond
- Les résultats actuels de XENON100
- La prochaine étape : XENONIT

Le programme XENON

10

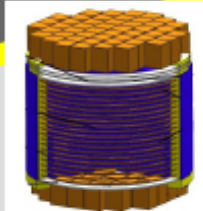
Xe
XENON
Dark Matter Project

XENON: A phased WIMP search program

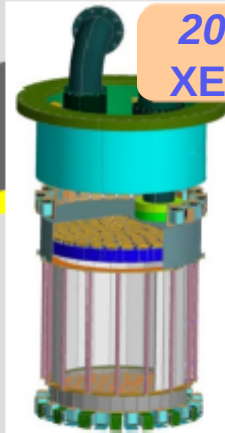


XENON
R&D

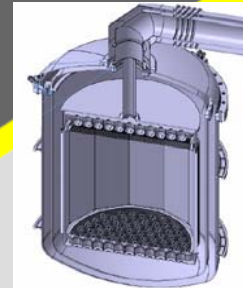
2005-2007:
XENON10



2007-2012
XENON100



2010-2015:
XENON1T



Columbia



Rice



UCLA



Zürich



Coimbra



LNGS



SJTU



Mainz



Bologna



Subatech



Münster



Nikhef



Heidelberg



Weizman

Bonne cible pour les WIMPs

- ✓ A élevé ($\langle A \rangle \sim 131$) $\rightarrow$ favorable pour interaction indépendante du spin
- ✓ $\sim 50\%$ d'isotopes impairs $\rightarrow$ interaction dépendante du spin possible
- ✓ 2 signaux $\rightarrow$ **discrimination des reculs nucléaires/électroniques**

Faible bruit de fond

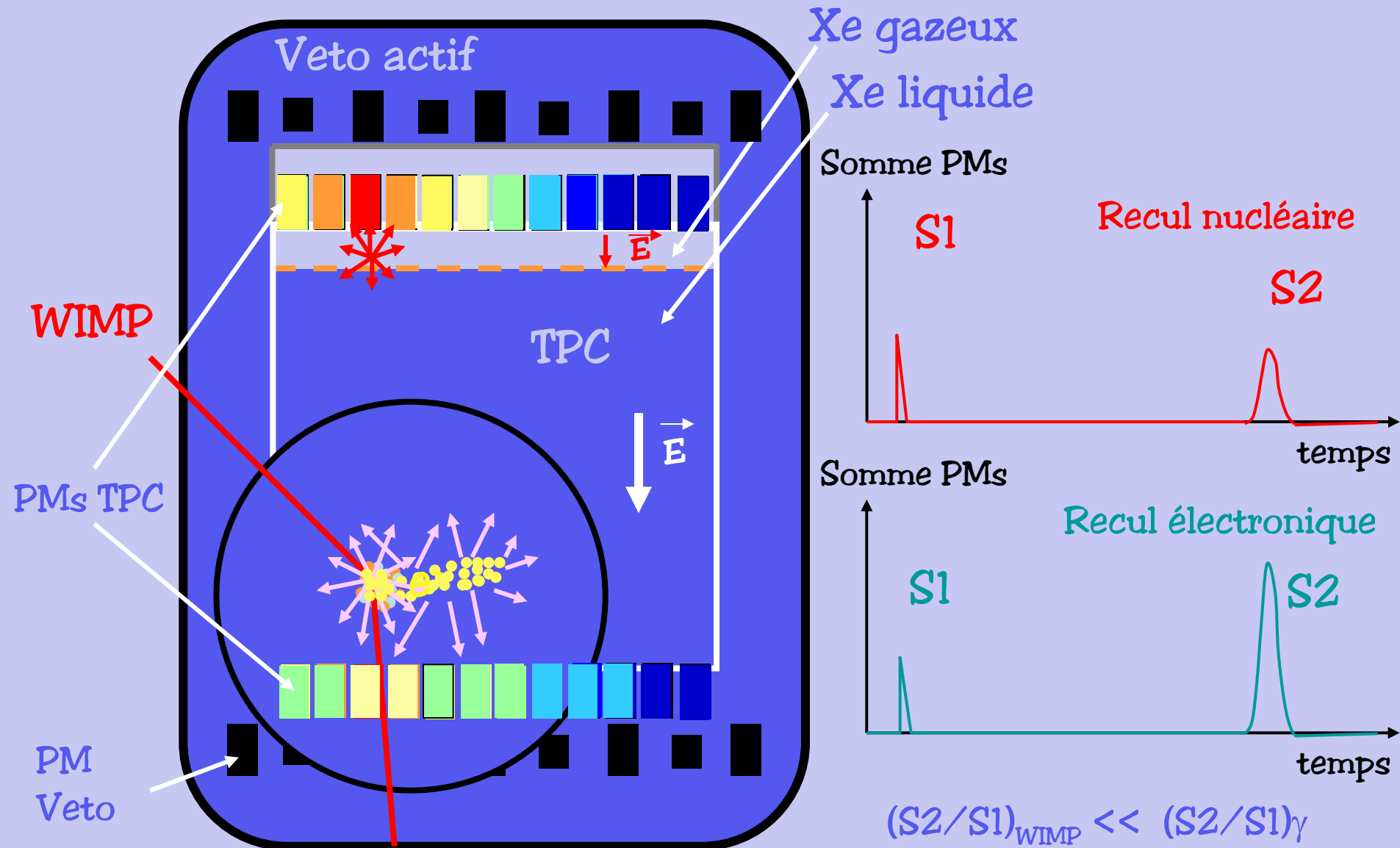
- ✓ Intrinsèquement pur (pas d'isotope radioactif à vie longue)
- ✓ Purification en Krypton au niveau du ppt
- ✓ Dense (3 g/cm^3) et volume important $\rightarrow$ **auto-blindage**

Excellent milieu de détection

- ✓ Hauts rendements de scintillation et d'ionisation
- ✓ Relativement peu cher $\rightarrow$ échelle multi-tonnes possible
- ✓ Cryogénie accessible (-100°C)

Une TPC double-phase

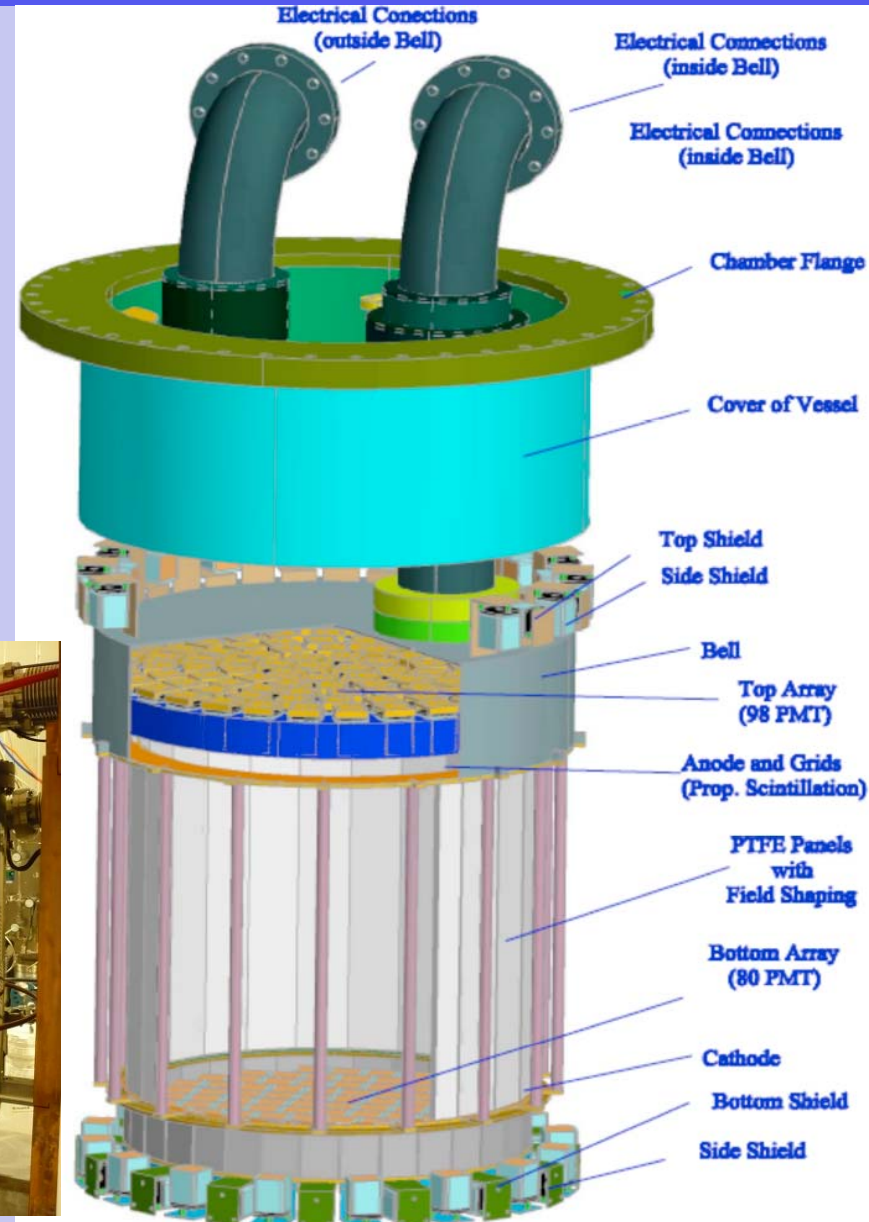
12

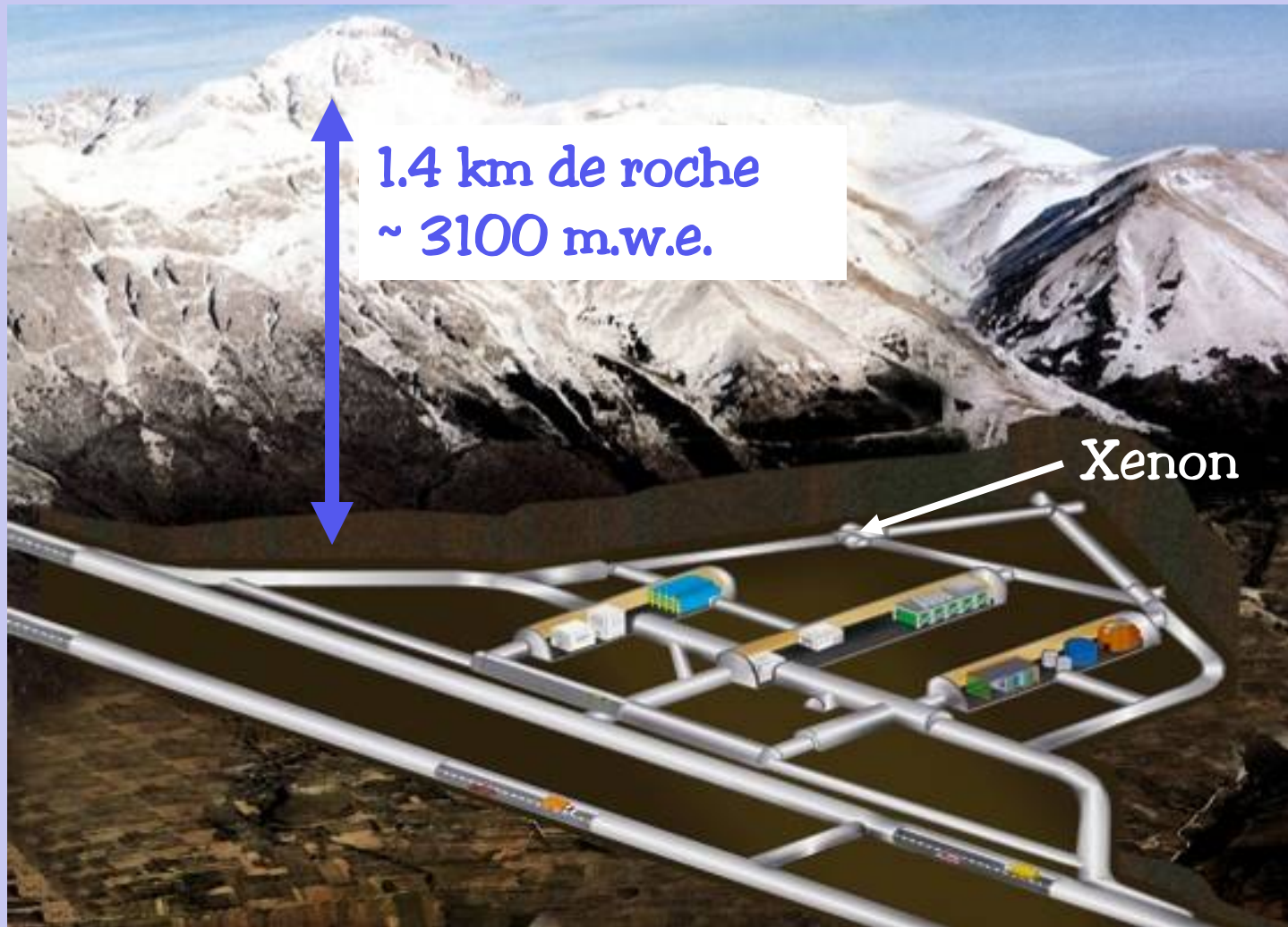


Design du détecteur XENON100

13

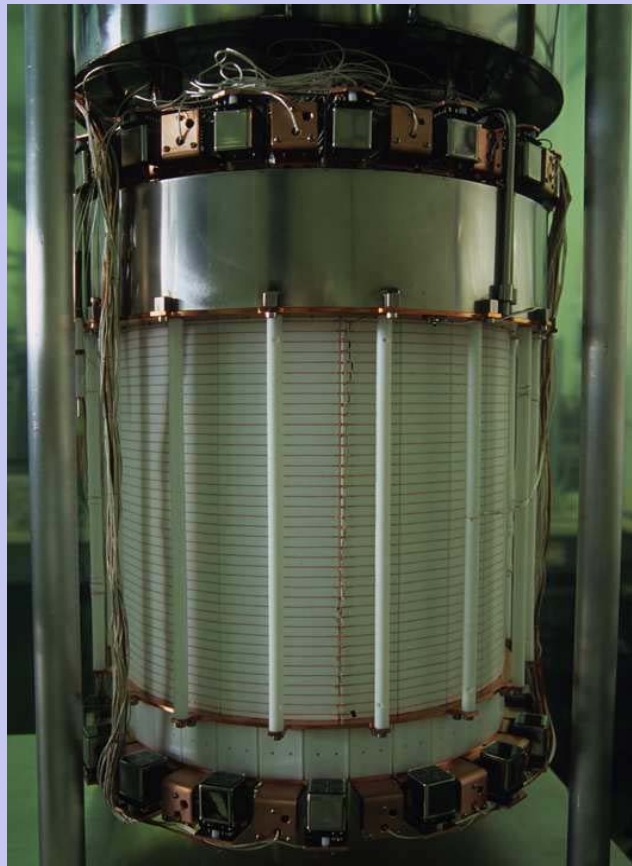
- ✓ 161 kg Xe au total, 62 kg dans la TPC
- ✓ TPC : 30 cm diamètre
30 cm hauteur
- ✓ Champ de dérive : 530 V/cm
- ✓ Téflon autour de la TPC pour améliorer la collection de la lumière
- ✓ Cryogénie à l'extérieur du blindage
→ Pulse Tube Refrigerator (160W)
- ✓ Constante circulation du xénon en phase gazeuse à travers un purificateur
- ✓ Blindage :
 - 20 cm plomb
 - 20 cm polyéthylène
 - 5 cm cuivre
 - + 20 cm eau sur 4 côtés



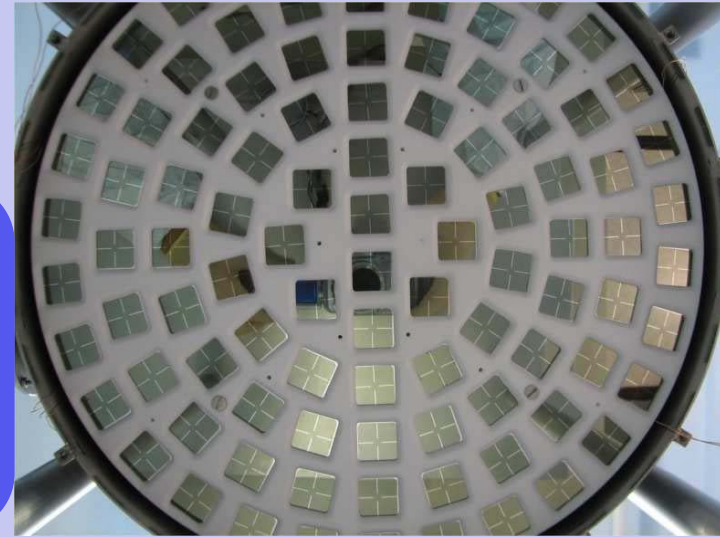


XENON100 is watching you

15

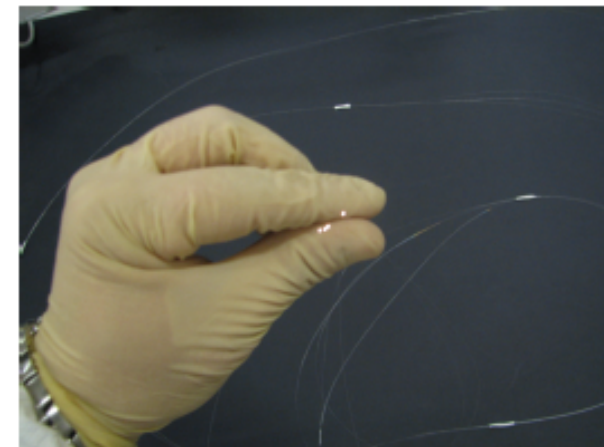
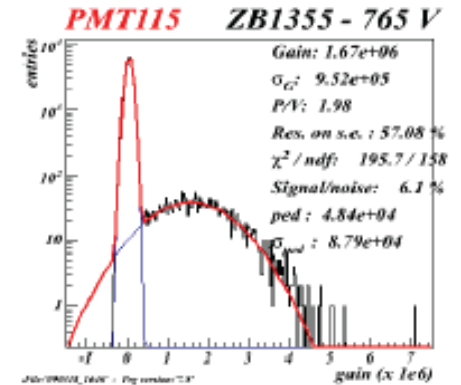
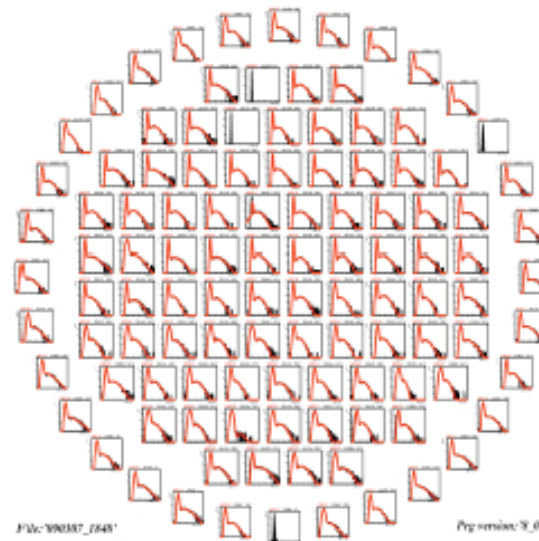
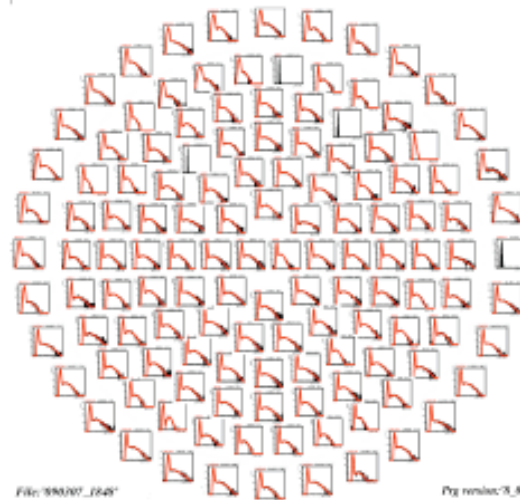
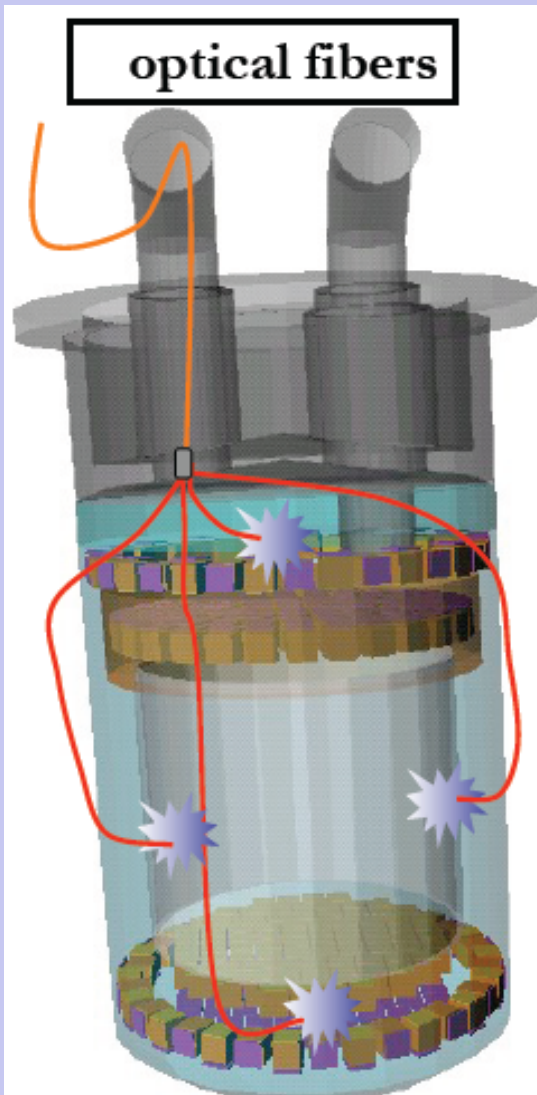


242 PMs 1"x1"
basse activité
(Hamamatsu R8520)
QE >32% à 175nm



Signaux numérisés
à 100 Ms/s
pendant 400 μ s et
codés sur 14 bits.



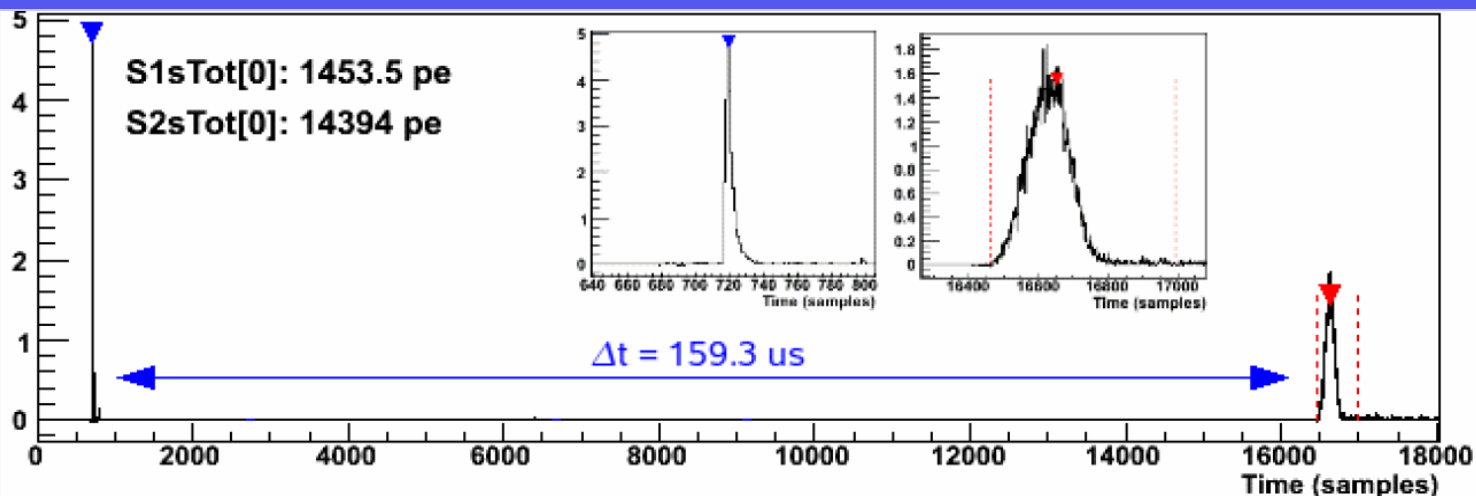


Reconstruction spatiale

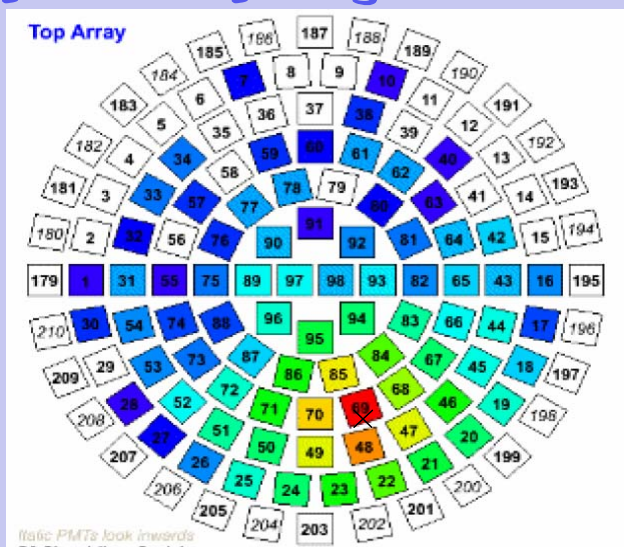
17

Coordonnée z
donnée par Δt

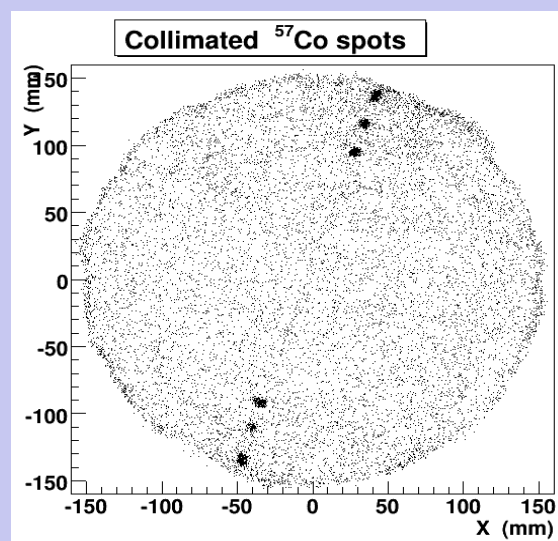
Résolution z
< 2 mm



Coordonnées x, y données
par la topologie du S2



Résolution déterminée par une
source de ^{57}Co collimatée



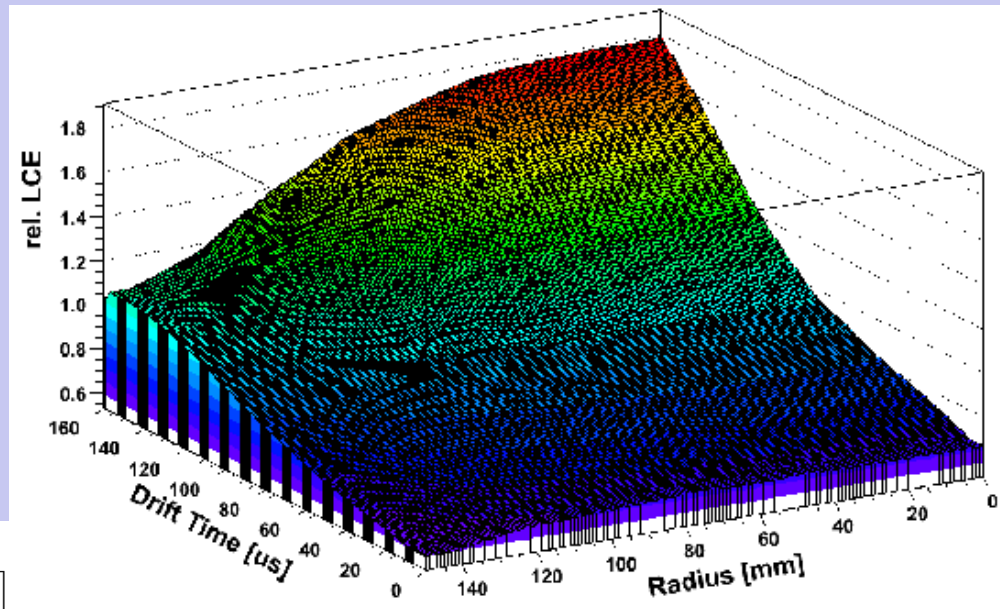
Résolution x, y
< 3 mm

Accord avec la
simulation MC

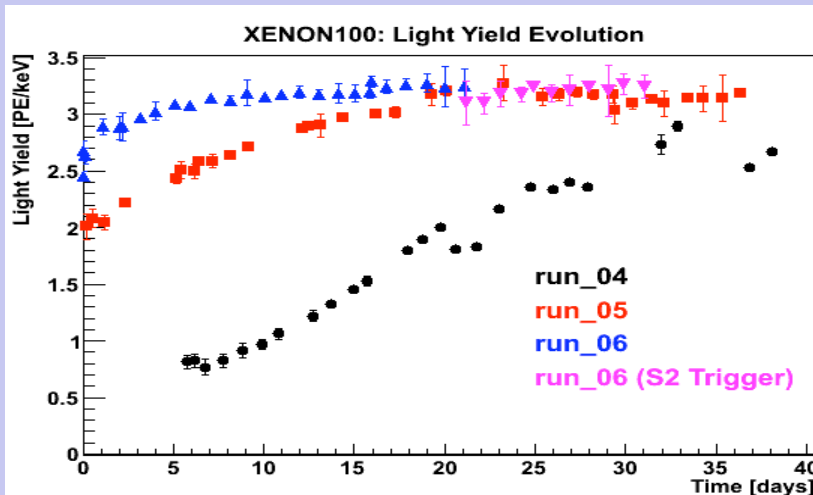
La collection du signal de scintillation primaire n'est pas uniforme (absorption, angle solide et réflectivité du téflon)

Étalonnage avec différentes sources à différentes énergies
→ varie de 0.6 à 1.8 en relatif

Rendement de scintillation
(avec champ électrique)
= 2.2 pe/keV à 122 keV

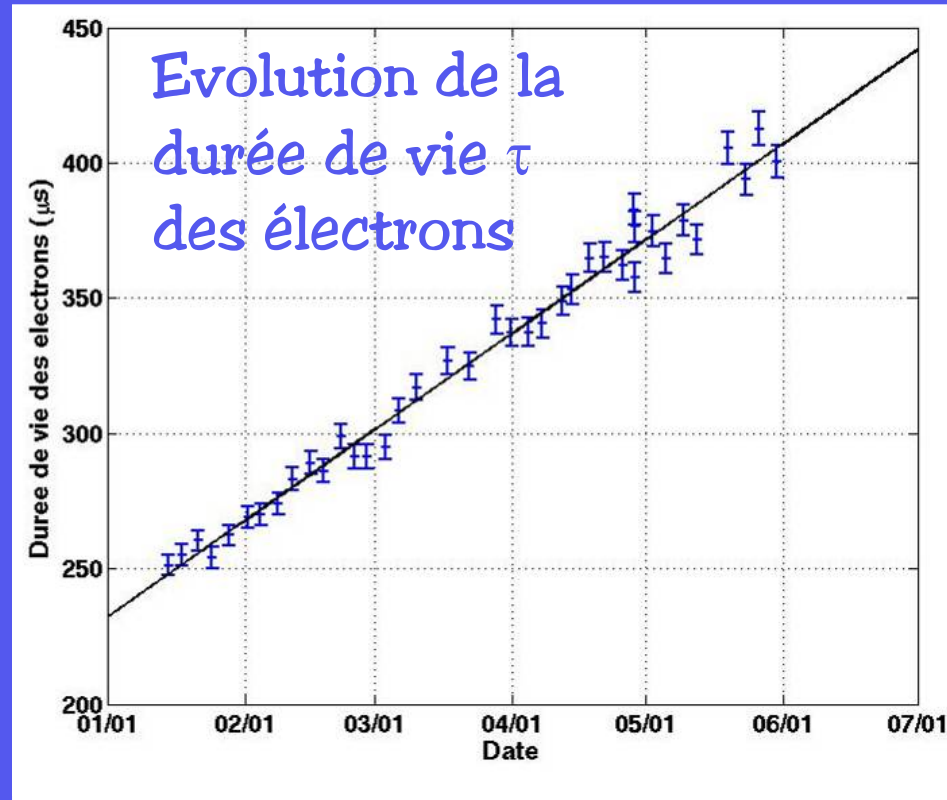
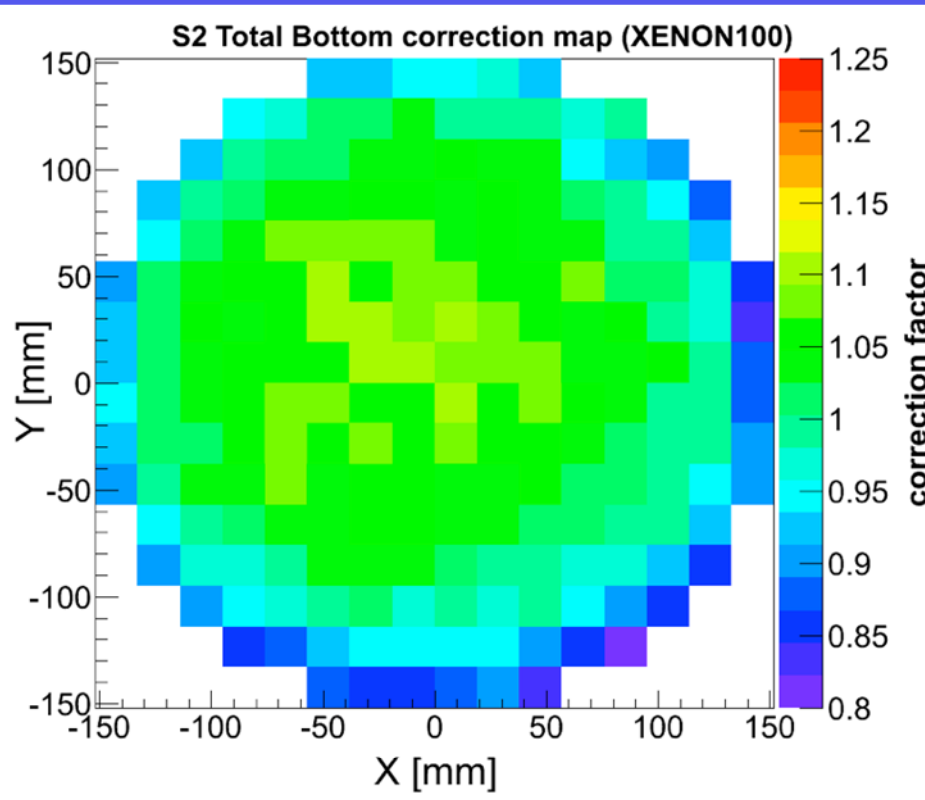


Absorption dépend de la quantité d'impureté
→ maximum atteint après quelques jours de circulation

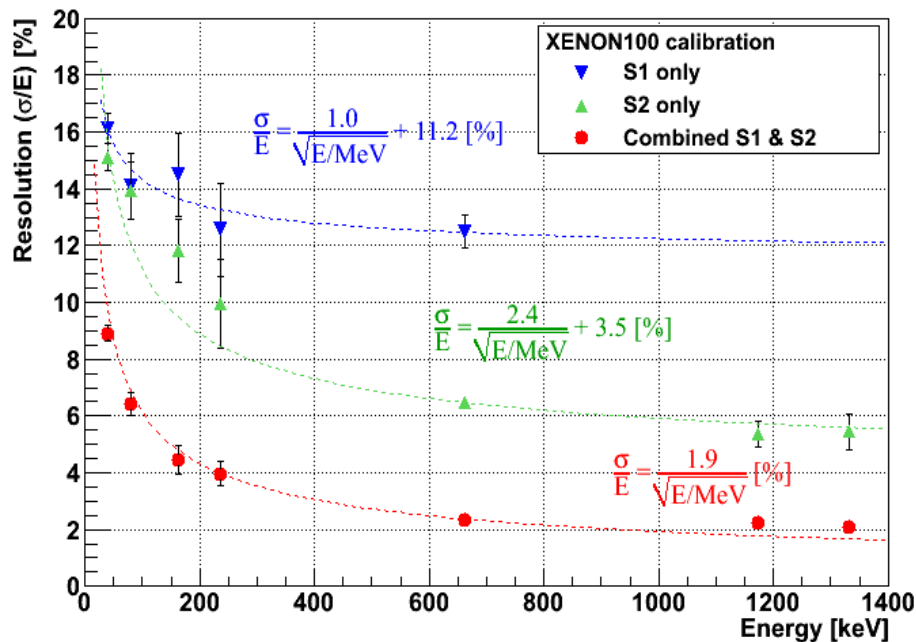
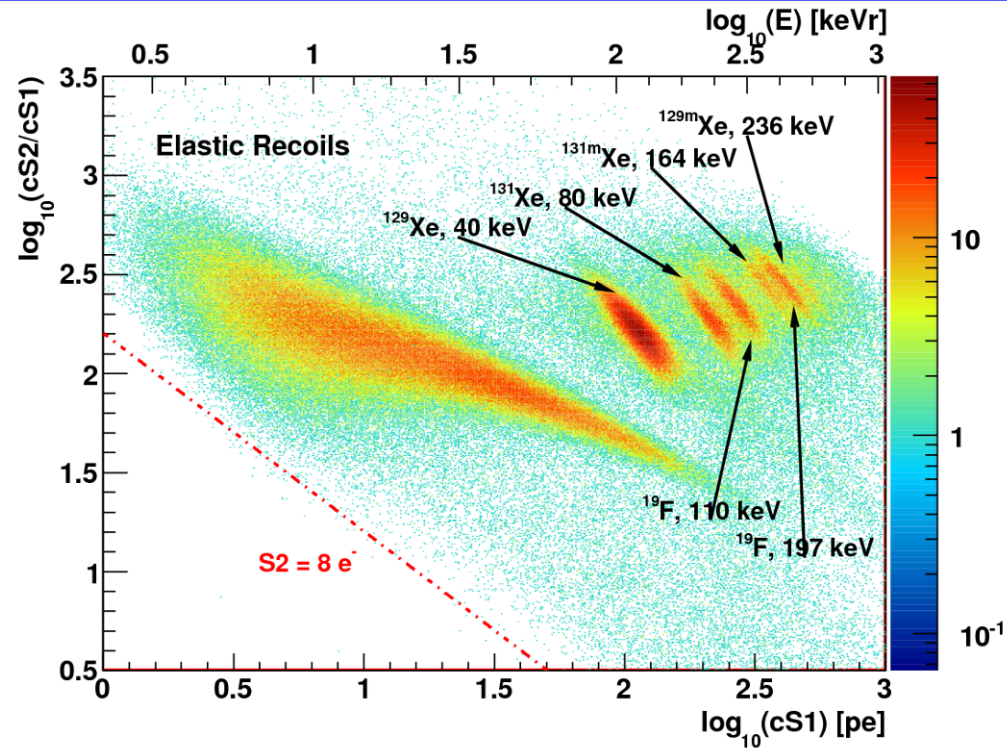


Le signal de scintillation secondaire est affecté par :

- une différence de collection de la lumière en fonction de x et y
- l'absorption des électrons lors de la dérive



Etalonnage à l'aide de plusieurs sources : ^{137}Cs , ^{60}Co et AmBe (neutrons)
 → $^{129\text{m}}\text{Xe}$, $^{131\text{m}}\text{Xe}$ et diffusion inélastique (pics à 40 et 80 keV)



Résolution en combinant S1 et S2 = 2.2% à 662keV

Energie de recul nucléaire

$$E_{nr} = \frac{S1}{LY_{nr}(E_{nr})} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{Signal mesuré [pe]} \\ \text{Rendement de scintillation} \\ \text{pour un recul nucléaire [pe/keV]} \end{array}$$

Quenching nucléaire à champ électrique nul :

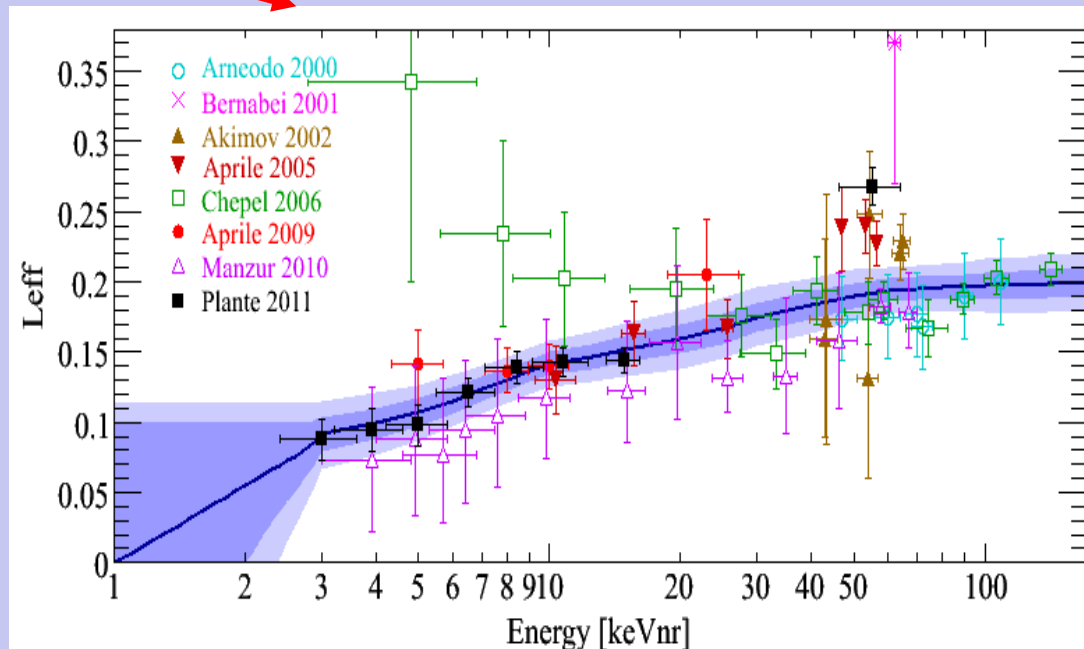
$$LY_{nr}(E_{nr})_{\vec{E}=\vec{0}} = L_{eff}(E_{nr}) \times LY_e(122\text{keV})_{\vec{E}=\vec{0}}$$

Quenching dû au champ électrique :

$$\begin{cases} LY_e = S_e \times (LY_e)_{\vec{E}=\vec{0}} \\ LY_{nr} = S_{nr} \times (LY_{nr})_{\vec{E}=\vec{0}} \end{cases}$$

$$E_{nr} = \frac{1}{L_{eff}(E_{nr})} \frac{S1}{LY_e} \frac{S_e}{S_{nr}}$$

LY_e et S_e @ 122 keV



Simulation GEANT4

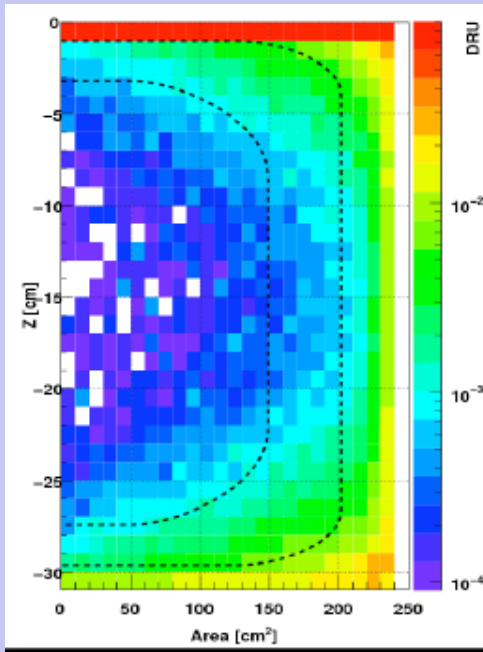


Tous les matériaux présents dans le détecteur ont été sélectionnés et mesurés avec un détecteur dédié au LNGS = GATOR (détecteur germanium)

arXiv:1103.5831

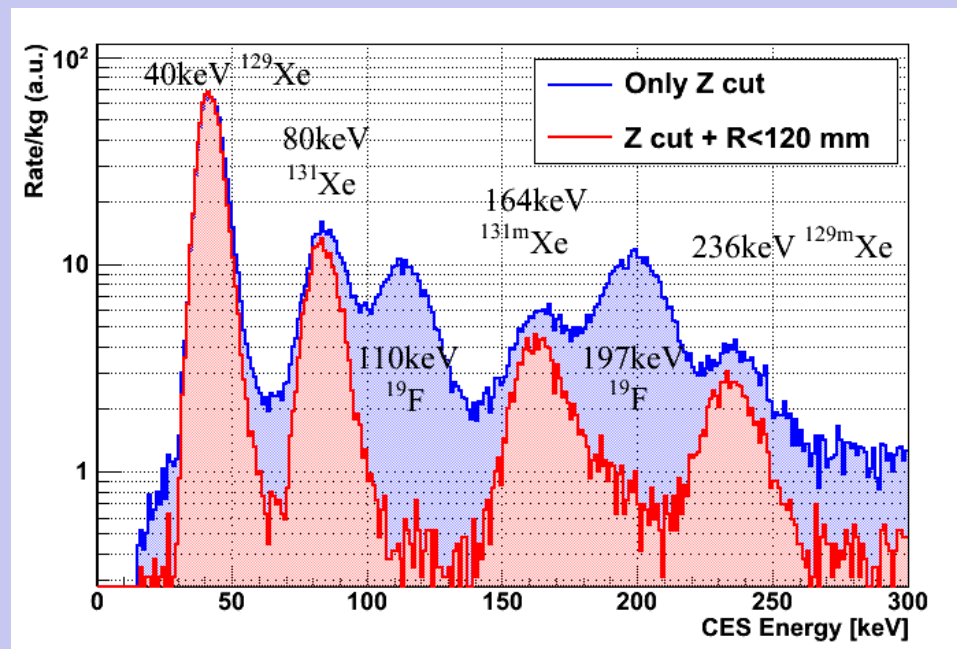
Component	Amount	Total radioactive contamination in materials [mBq/amount]				
		²³⁸ U / ²²⁶ Ra	²³² Th	⁶⁰ Co	⁴⁰ K	other nuclides
Cryostat and 'diving bell' (316Ti SS)	73.61 kg	121.46	147.23	404.87	662.52	¹³⁷ Cs: 41.14
Support bars (316Ti SS)	49.68 kg	64.58	144.07	69.55	352.73	
Detector PTFE	11.86 kg	0.71	1.19	0.36	8.89	
Detector copper	3.88 kg	0.85	0.62	5.21	0.78	
PMTs	242 pieces	60.50	111.32	181.50	1972.30	
PMT bases	242 pieces	38.72	16.94	2.42	38.72	
TPC resistor chain	1.5×10 ⁻³ kg	1.11	0.57	0.12	7.79	
Bottom electrodes (316Ti SS)	0.23 kg	0.43	0.45	2.14	2.36	^{108m} Ag: 2.67
Top electrodes (316Ti SS)	0.24 kg	0.85	0.43	1.73	1.16	
PMT cables	1.80 kg	0.85	1.97	0.37	18.65	
Copper shield	2.1×10 ³ kg	170.80	24.69	6.59	80.26	²¹⁰ Pb: 1.7×10 ⁸ ²¹⁰ Pb: 1.4×10 ¹⁰
Polyethylene shield	1.6×10 ³ kg	368.0	150.4	-	1120.0	
Lead shield (inner layer)	6.6×10 ³ kg	4.3×10 ³	3.6×10 ³	7.2×10 ²	9.6×10 ³	
Lead shield (outer layer)	27.2×10 ³ kg	1.1×10 ⁵	1.4×10 ⁴	2.9×10 ³	3.8×10 ⁵	

Distribution spatiale du bruit de fond

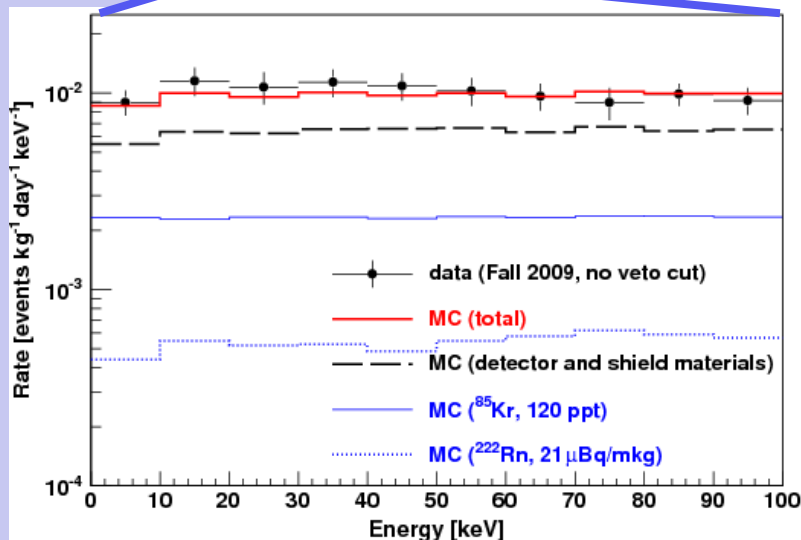
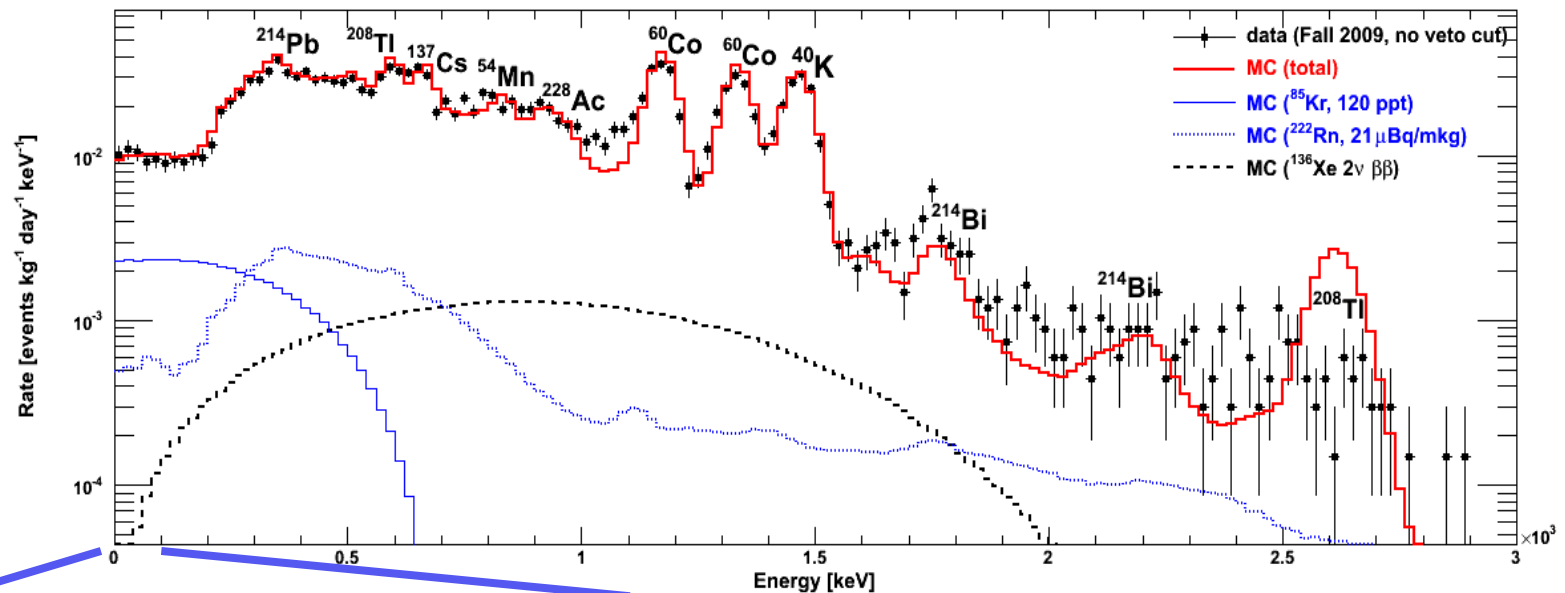


Bruit de fond situé principalement sur les bords
→ **utilité de définir un volume fiduciel**

Exemple: Calibration AmBe

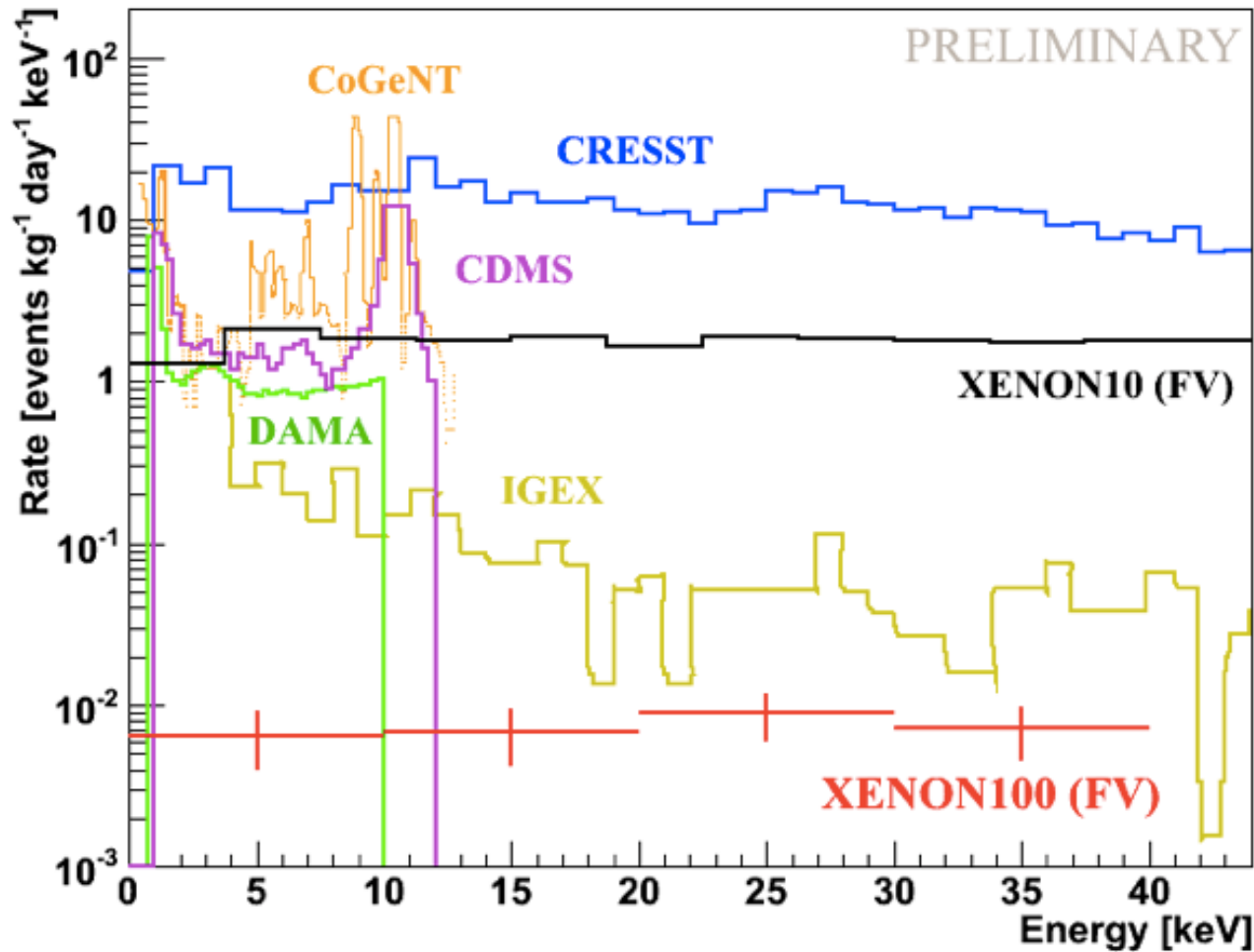


Spectre en énergie (sans cut sur le veto)



Pas d'ajustement entre MC et données (sauf pour ⁸⁵Kr et ¹³⁷Cs)
→ le bruit de fond est globalement compris

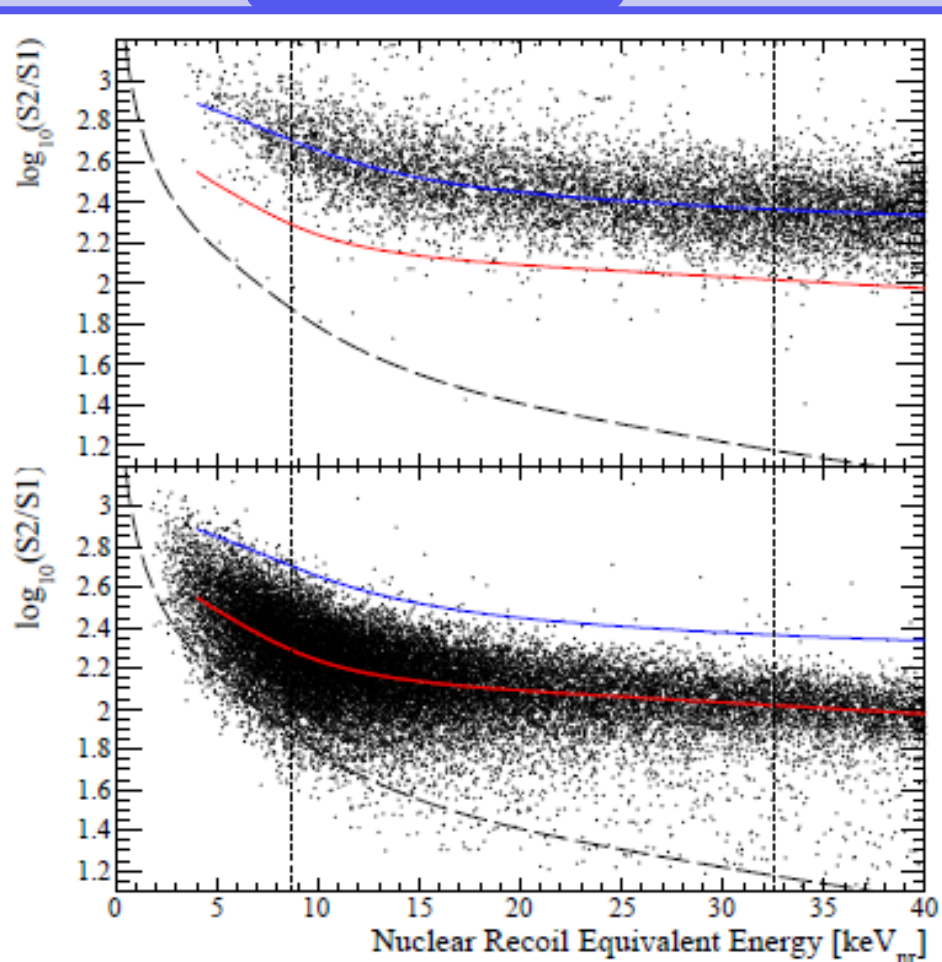
Phys. Rev. D 83, 082001 (2011)



Un WIMP dans une botte de foin

27

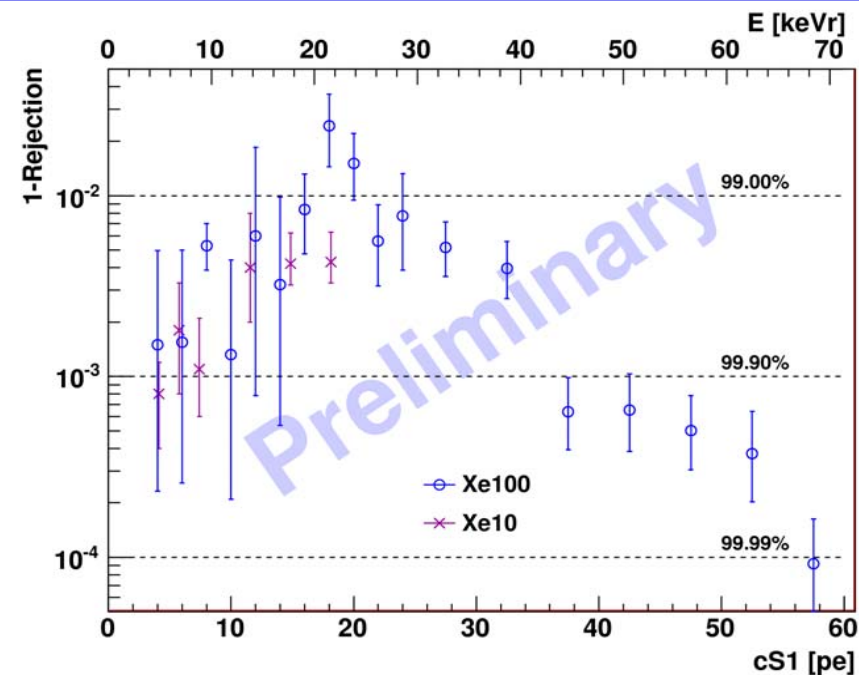
Source ^{60}Co



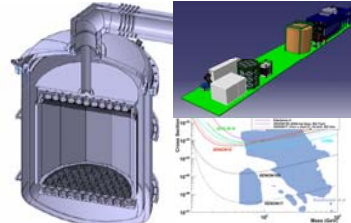
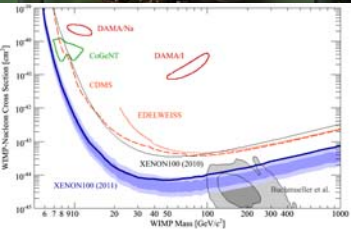
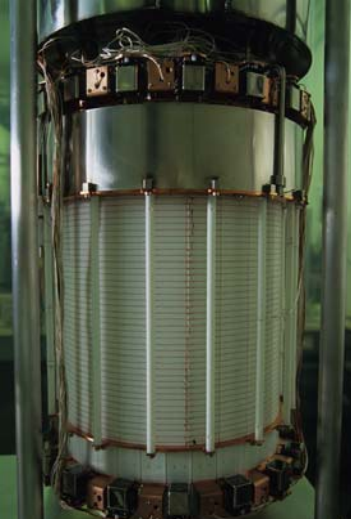
Source neutron AmBe

S2/S1 permet de distinguer
entre reculs électroniques (γ , β)
et reculs nucléaires (WIMP, n)

Efficacité de la coupure



Plan

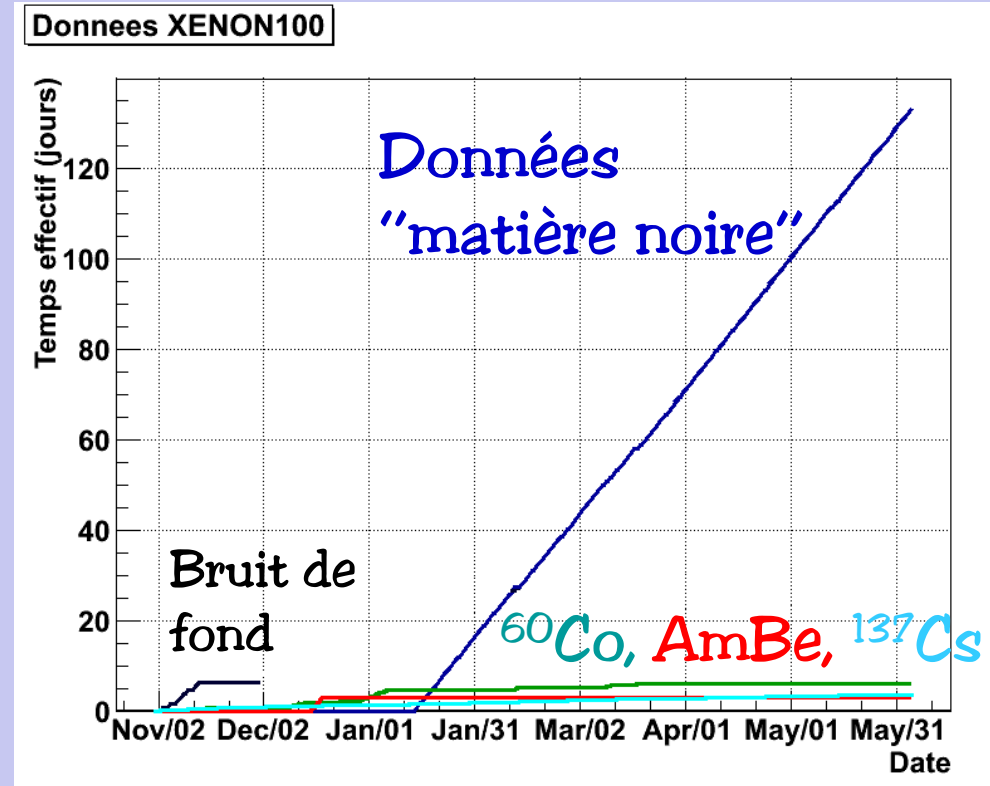


- Le WIMP : un candidat pour la matière noire
- Le détecteur XENON100
 - du xénon liquide comme cible de détection
 - une localisation tridimensionnelle
 - une mesure de l'énergie
 - un très bas bruit de fond
- Les résultats actuels de XENON100
- La prochaine étape : XENONIT

Première recherche de la matière noire entre janvier et juin 2010 en mode "aveugle" : ~100 jours.

Étalonnages réguliers avec les sources ^{137}Cs et ^{60}Co .

Un étalonnage avec la source AmBe fin 2009.



→ tous les résultats qui suivent sont obtenus avec ces données

Analyse "matière noire"

30

Analyse "aveugle" = coupures définies en utilisant uniquement les données en-dehors de la zone WIMP (en-dessous de la quantile 10% de la distribution des reculs électroniques) + Calibrations

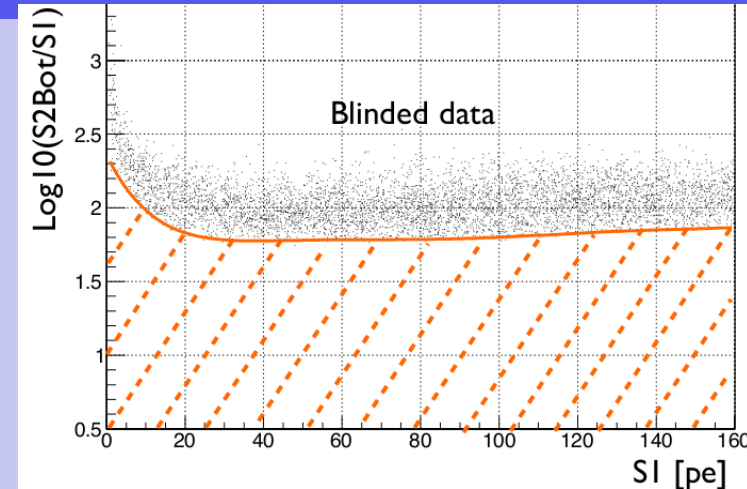
Coupures

Qualité des données : - sélection des périodes avec détecteur stable
- rejet des périodes avec bcp de bruit électronique

Événements physiques : - S1 vu par au moins 2 PMs
- $S2 > 300$ pe
- rejet du bruit électronique

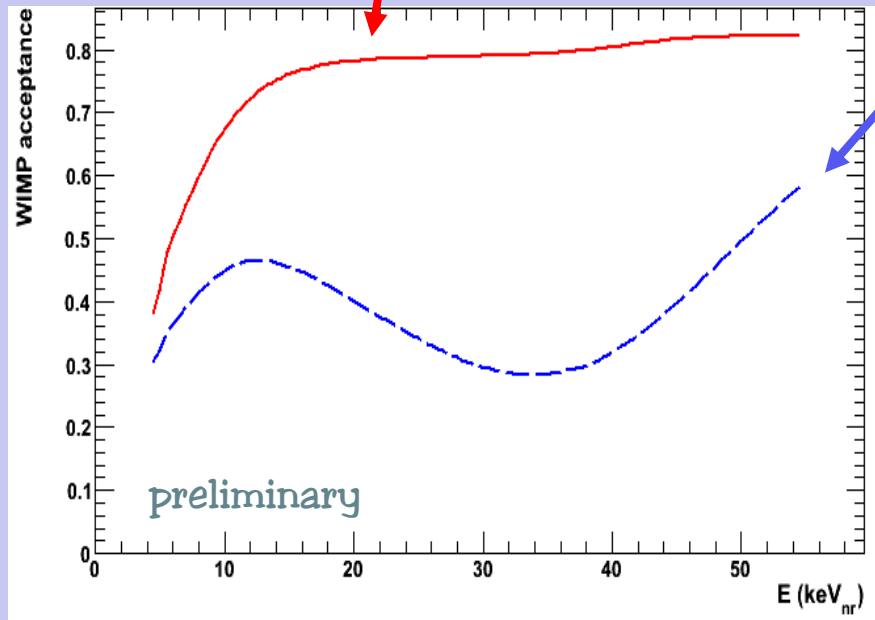
Interaction unique : - 1 S1 et 1 S2
- pas de coïncidence avec le veto
- topologie des PMs S1
- topologie des PMs S2 (bonne reconstruction xy)

Fiducial volume = - event inside the inner volume (48 kg)

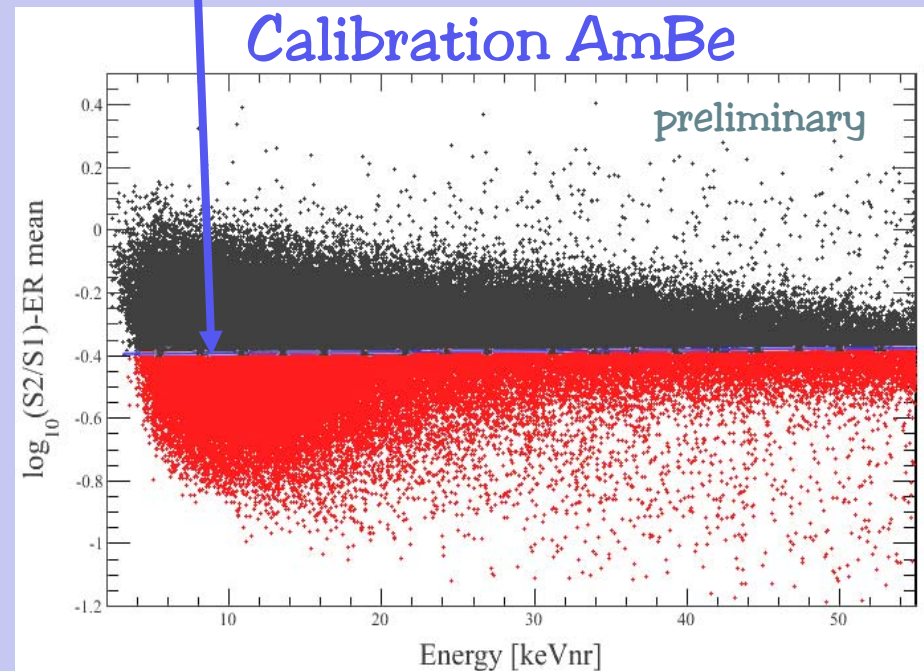


+ 1 coupure à
posteriori pour
rejeter du bruit
électronique

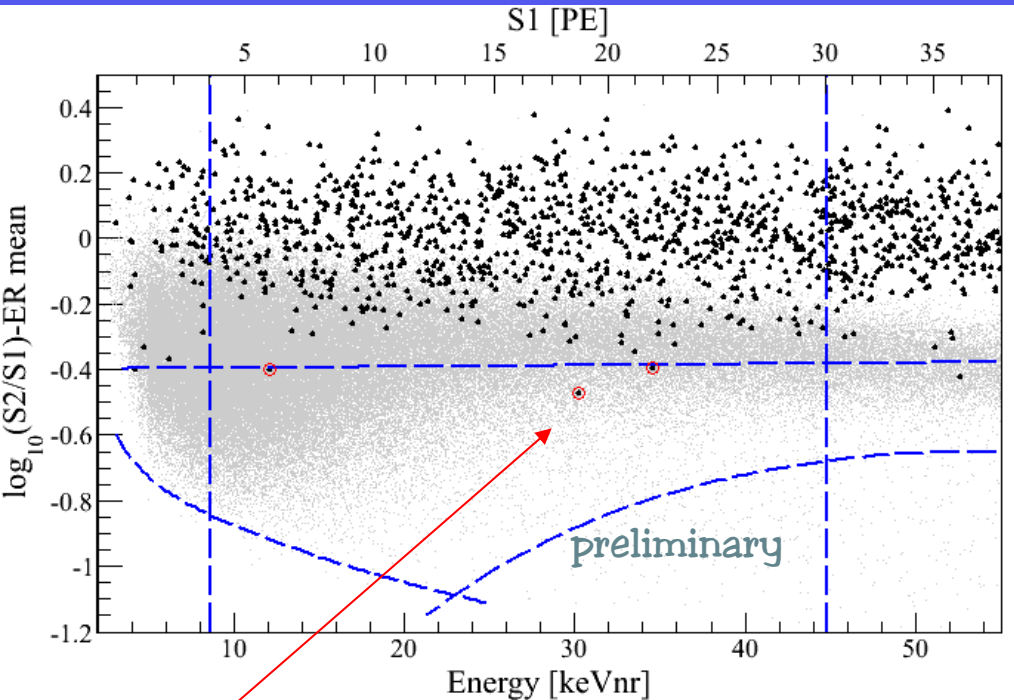
Acceptance de toutes les coupures sauf S2/S1



Acceptance des reculs nucléaires pour un rejet des reculs électroniques à 99.75%



Calibration AmBe



3 événements dans la zone
de recherche des WIMPS

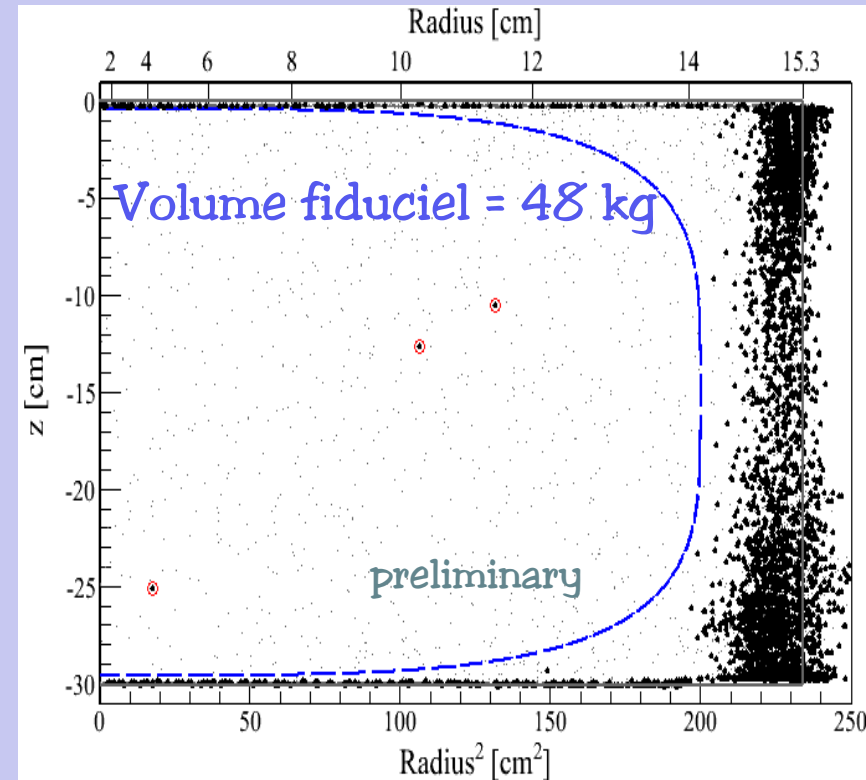
Bruit de fond prédit = 1.8 ± 0.6

=> Pas d'observation de WIMP

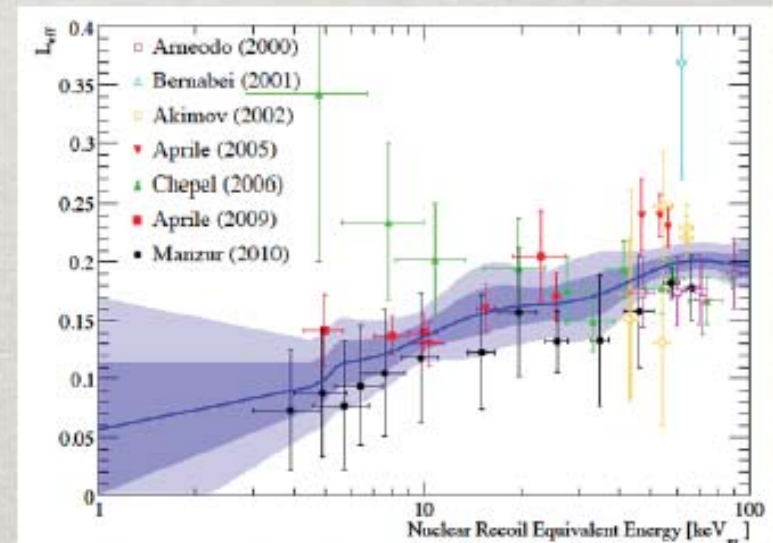
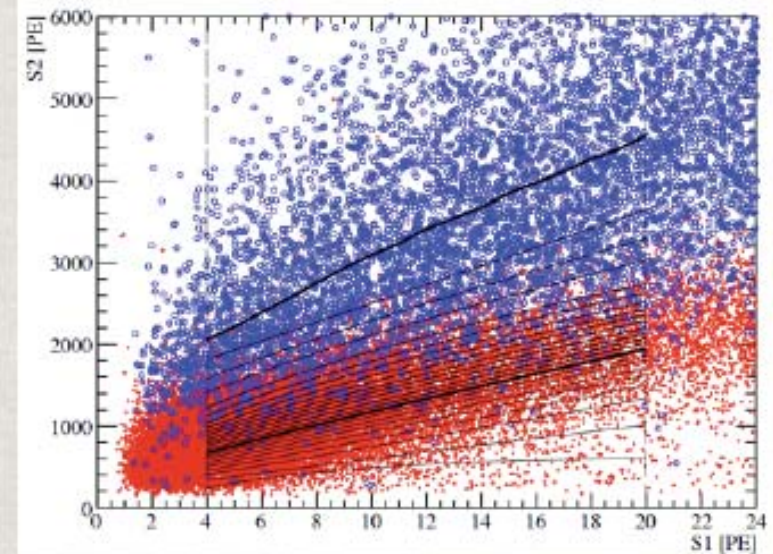
arXiv:1104.2549, soumis à PRL

Bruit de fond (dans le volume fiduciel)

Calibration reculs nucléaires



- * The basic idea is to use existing measurements such as ^{60}Co gamma calibration and AmBe neutron calibration as control measurements in side bands.
- * The calibration data is used to measure the fraction of Gamma background and expected signal in a given band
- * Uncertainties in the energy scale due to L_{eff} are also taken as side band measurements with a wide uncertainty in the low recoil energy range
- * Astrophysical uncertainties are naturally built into the model.
e.g. v_{esc} is taken as a measurement with $v_{\text{obs}} = 544 \text{ km/s}$ ($498 \text{ km/s} < v_{\text{esc}} < 608 \text{ km/s}$) (Smith et. al. arxiv:astro-ph/0611671)



* σ par of interest
unknown total BG

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_1(\sigma, N_b, \epsilon_s, \epsilon_b, \mathcal{L}_{\text{eff}}, v_{\text{esc}}; m_\chi) \times \mathcal{L}_2(\epsilon_s) \times \mathcal{L}_3(\epsilon_b) \times \mathcal{L}_4(\mathcal{L}_{\text{eff}}) \times \mathcal{L}_5(v_{\text{esc}}).$$

$\sigma(m_\chi)$ - WIMP cross section

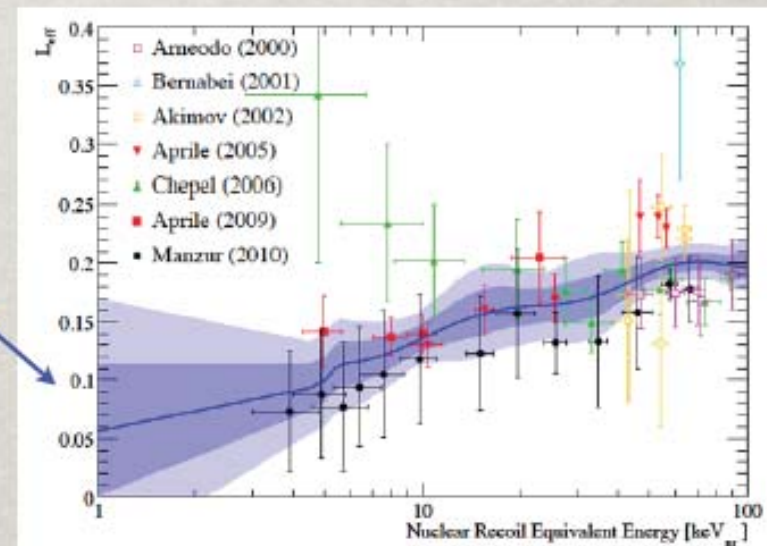
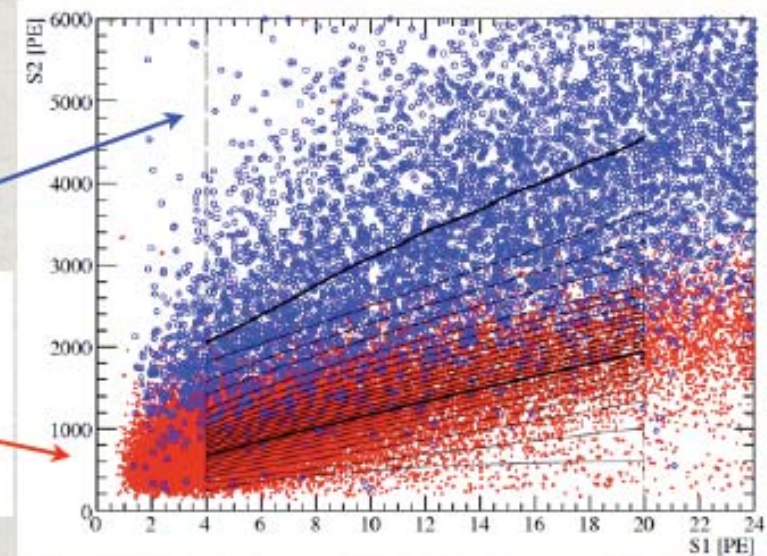
ϵ_b - fraction of BG

ϵ_s - fraction of signal

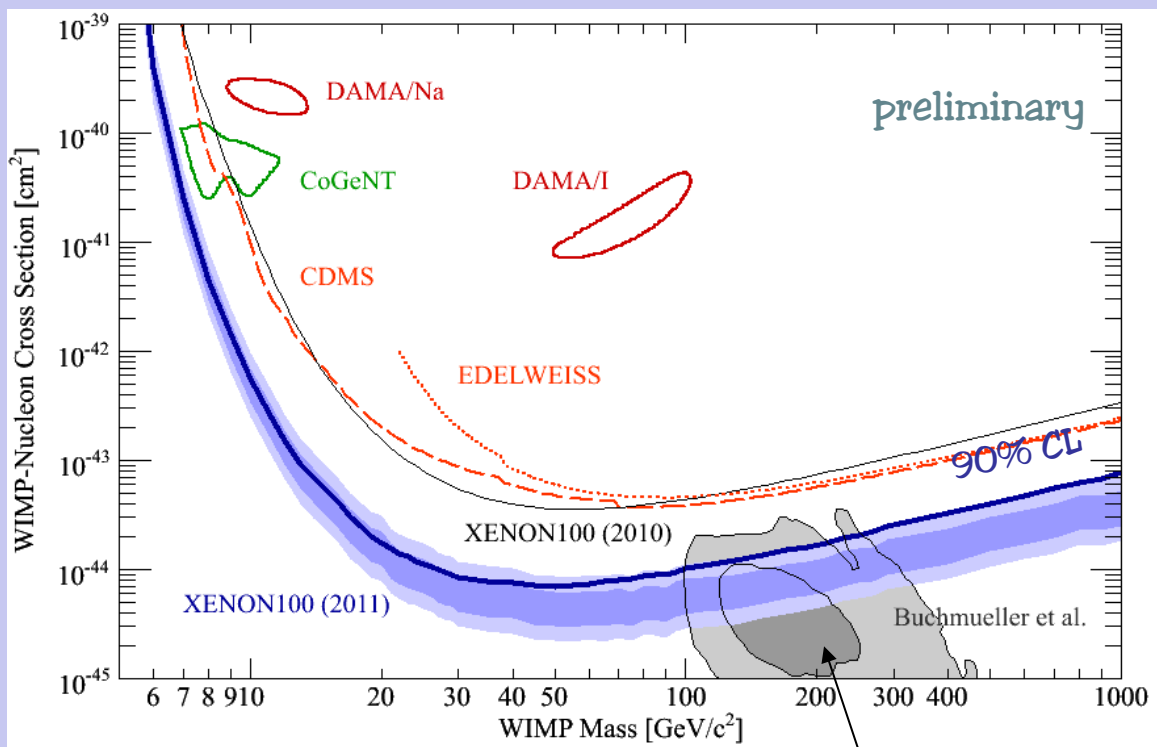
v_{esc} - escape velocity

$\mathcal{L}_{\text{eff}}$ - energy calibration

[arXiv:1103.0303](https://arxiv.org/abs/1103.0303)



100.9 jours effectifs, 48 kg



arXiv:1104.2549, soumis à PRL

Nouvelles mesures de Leff
(Plante et al, 2011 arXiv:1104.2587)

Vitesse WIMPs :

$$v_0 = 220 \text{ km/s}$$

$$v_{esc} = 544 \text{ km/s}$$

Contraintes du LHC

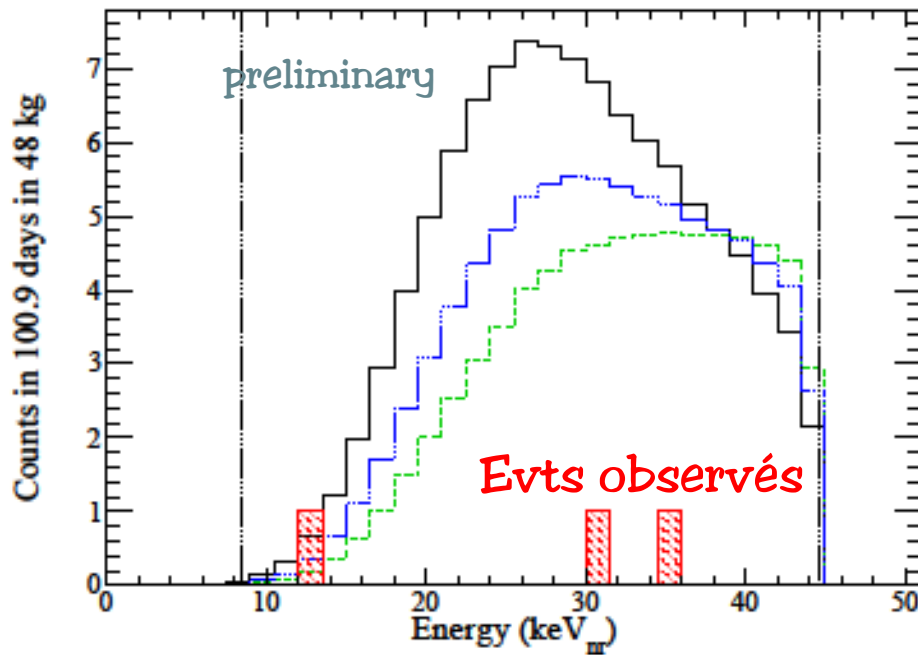
Meilleure limite sur la section efficace SI : $7 \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$ à $50 \text{ GeV}/c^2$

Nous commençons à explorer la zone prédite pour les candidats SUSY

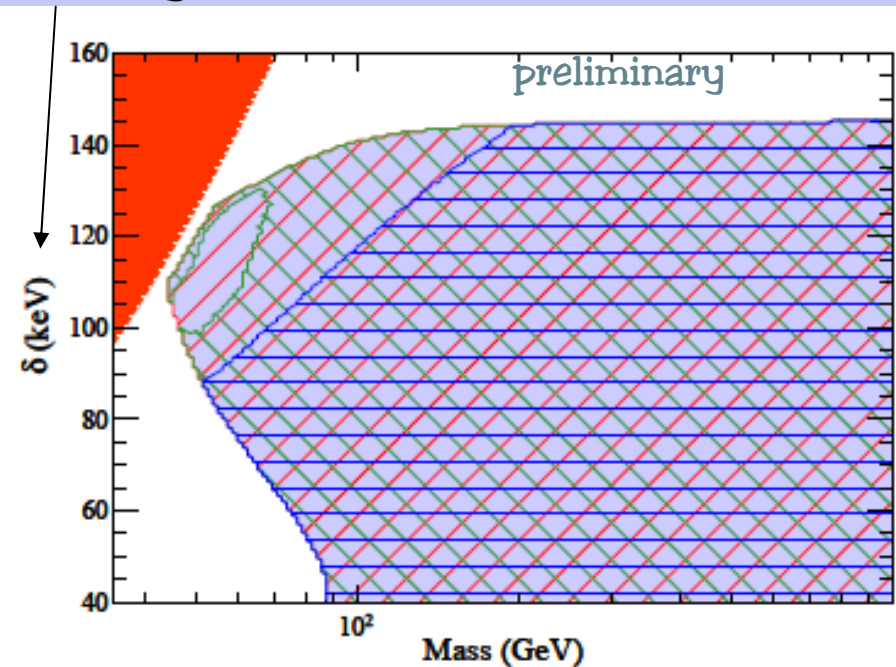
Interaction inélastique : $\chi + \text{Xe} \rightarrow \chi^* + \text{Xe}$

Mécanisme évoqué pour expliquer les observations de DAMA

Spectres attendus d'après DAMA



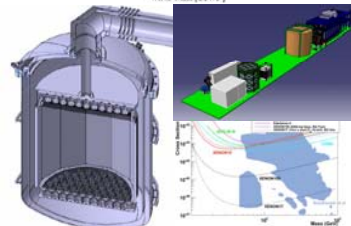
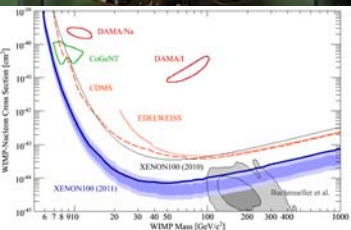
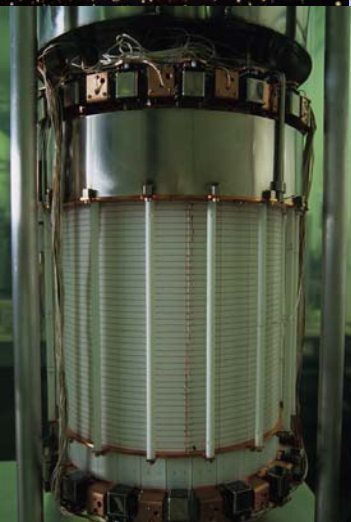
Energie état excité



=> exclusion de la zone DAMA à 90% CL

arXiv:1104.3121

Plan



- Le WIMP : un candidat pour la matière noire
- Le détecteur XENON100
 - du xénon liquide comme cible de détection
 - une localisation tridimensionnelle
 - une mesure de l'énergie
 - un très bas bruit de fond
- Les résultats actuels de XENON100
- La prochaine étape : XENON1T

Un nouveau design...

38

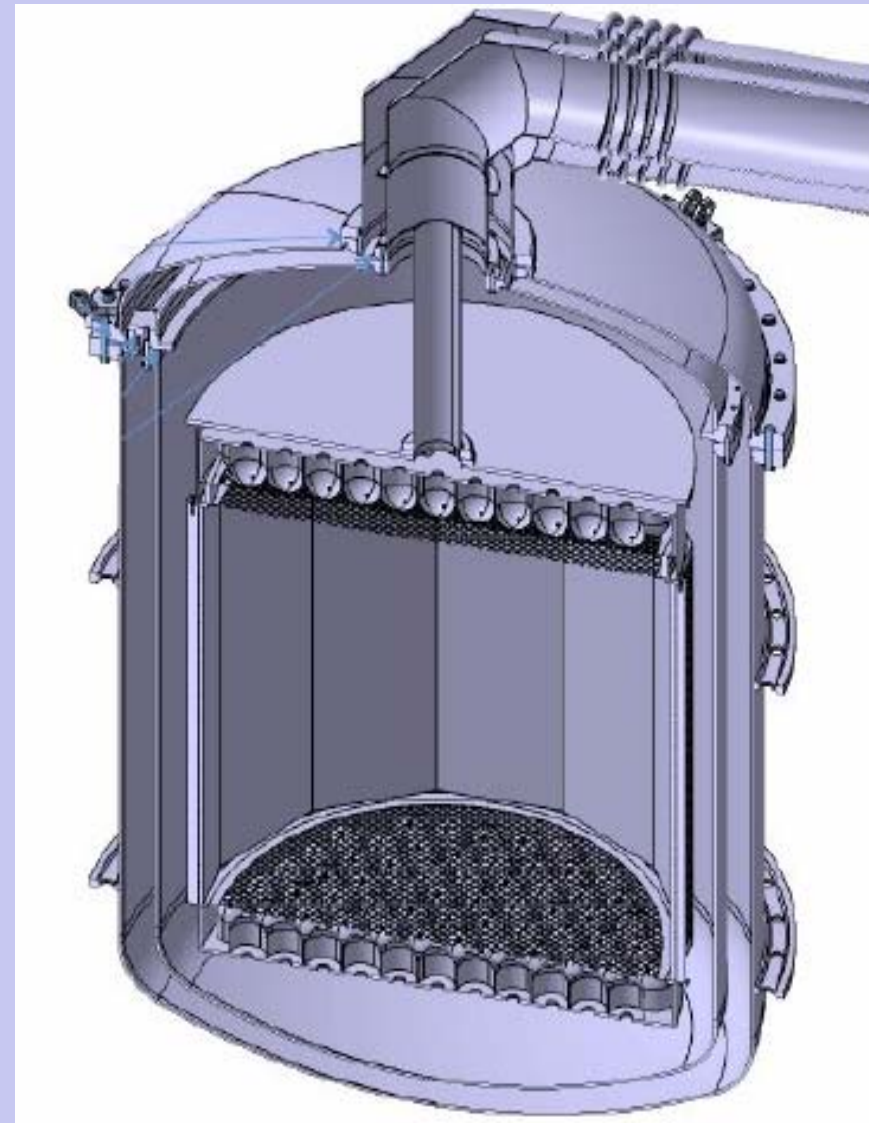
1 T de Xe dans le volume fiduciel,
2,4 T au total.

Améliorations prévues :

- ✓ Cryostat basse activité (Ti et Cu)
- ✓ Nouveaux PMs basse activité = QUPID
- ✓ Remplissage et récupération en phase liquide (responsabilité de Subatech)



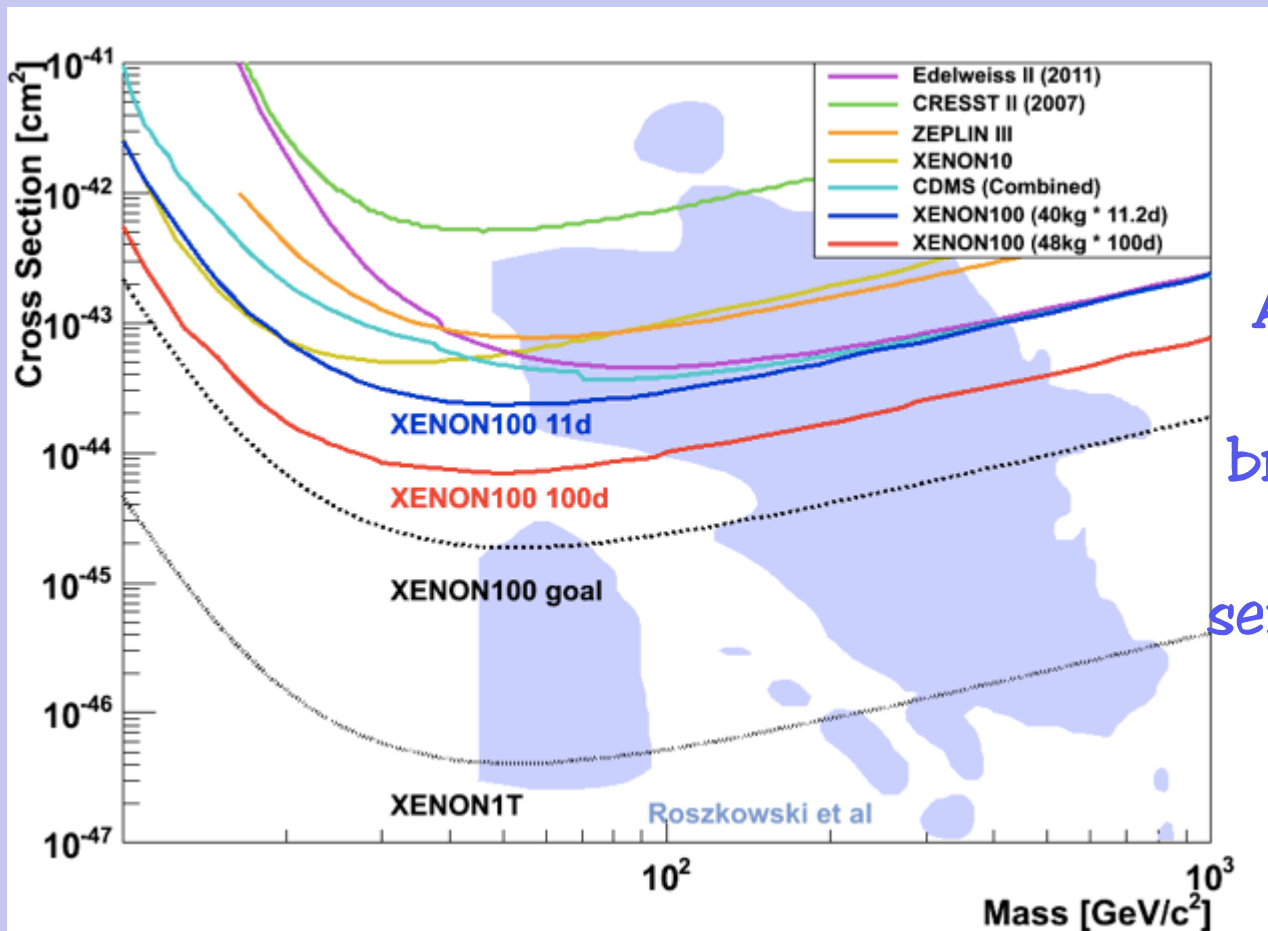
→ Coût total du projet ~10M\$



Hall B du LNGS

A 3D schematic diagram of the LNGS facility layout. The layout is shown on a green base. From left to right, the components are: a small blue and white structure, a large white rectangular building, a tall black lattice tower, a small white and black structure, a large orange cylindrical tank (highlighted with a dashed white circle), and a long blue structure with multiple white cylindrical tanks on top. The text 'Hall B du LNGS' is written in white at the top left.

Objectif : moins de 0.1 événement de bruit de fond par an et par tonne dans le volume fiduciel



Après une année sans aucun événement de bruit de fond, XENON1T pourra atteindre une sensibilité de $\sim 3 \cdot 10^{-47} \text{ cm}^2$

- ✓ XENON100 a atteint un niveau de bruit de fond exceptionnellement bas
- ✓ Après 100 jours effectifs de données, pas d'observation de WIMP
=> meilleure limite actuelle
- ✓ Acquisition en cours après une réduction du taux de Krypton et un abaissement du seuil S2
=> objectif : 1 an de données
- ✓ Prochaine phase XENON1T déjà en cours de préparation
=> prévue pour 2012-2013