



**Un poids-lourd entre dans l'arène
de la recherche directe de matière
noire :**

DEAP-3600

Pierre Gorel pour la collaboration DEAP



UNIVERSITY OF
ALBERTA

Dans les grandes lignes...

- La matière noire, *qu'es aquò?*
- Détecter la matière noire avec de l'argon.
- DEAP-3600: description, statut et premières données
- Futurs développements du projet

Rotation des galaxies spirales

- 1932: Jan Oort
- 1933: Fritz Zwicky
- ...

Vitesse de rotation trop importante pour la masse
d'étoiles estimée dans la galaxie

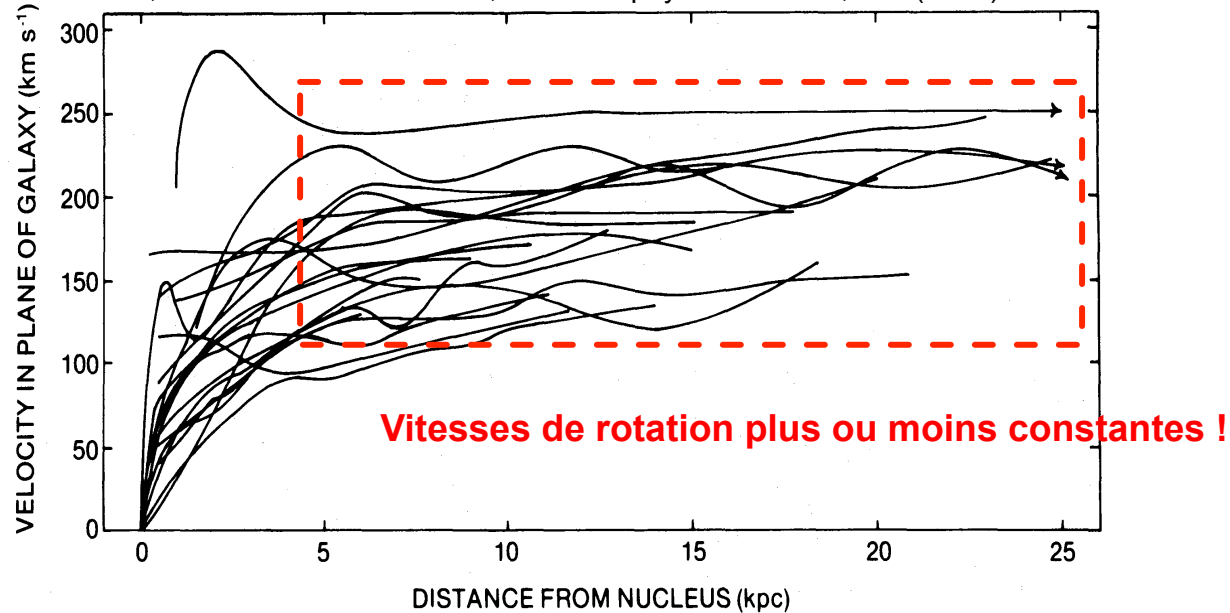
MAIS

Incertitudes trop grandes pour conclure

Rotation des galaxies spirales

- 1970-1980: Vera Rubin & Kent Ford

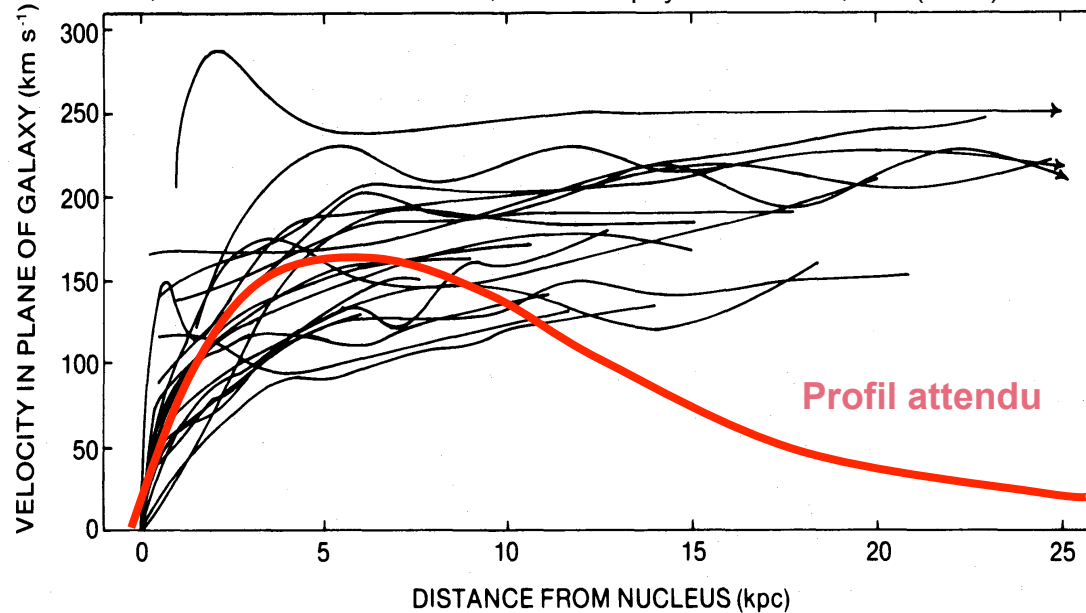
V. Rubin, K. Ford and N. Thonnard, The Astrophysical Journal, 238 (1980): 471-487



Rotation des galaxies spirales

■ 1970-1980: Vera Rubin & Kent Ford

V. Rubin, K. Ford and N. Thonnard, The Astrophysical Journal, 238 (1980): 471-487



- “Significant mass located at large R”
 - “The conclusion is inescapable that non-luminous matter exists beyond the optical galaxy”
- ou** ➤ La gravitation n’est pas comprise à cette échelle

MACHOs?

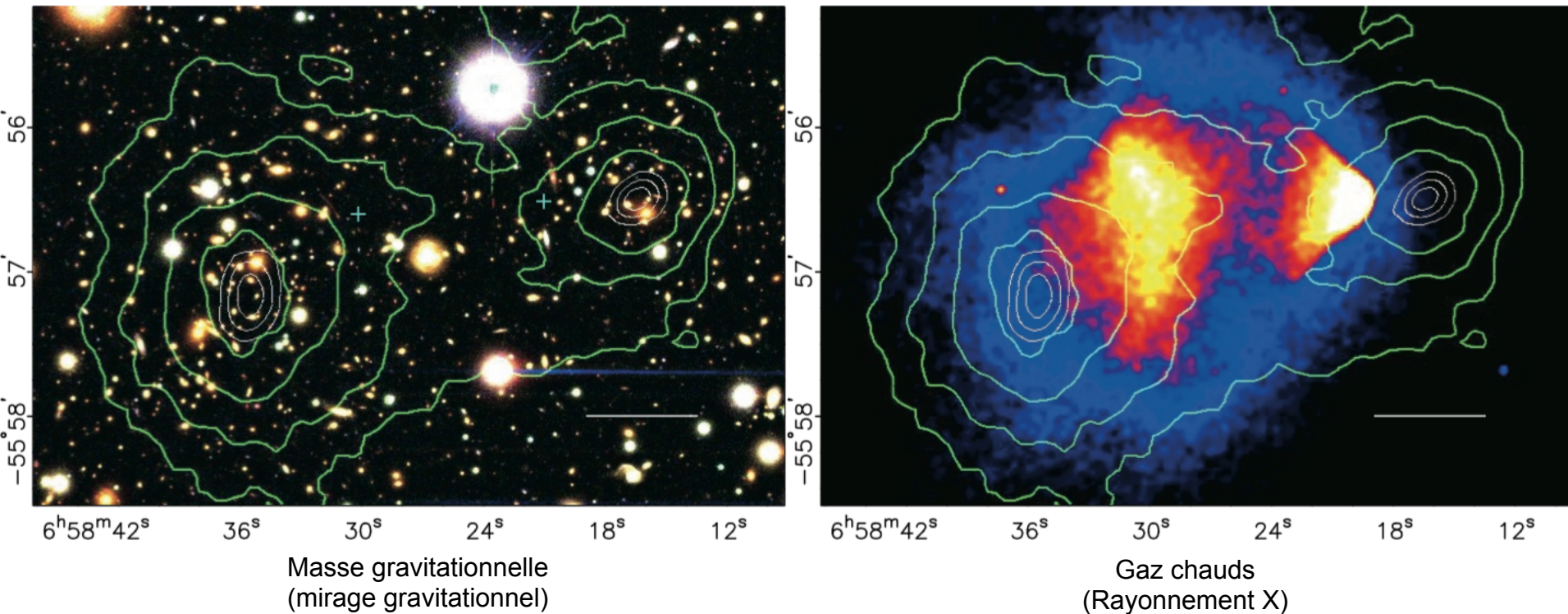
(Objets compacts dans le Halo Galactique)

- Trous noirs, étoiles à neutron, naines blanches et brunes
- Etudes par les projets EROS, MACHO, OGLE et AGAPE (microlentille gravitationnelle) + télescope Hubble
- Maximum 16% de la matière noire.
- Reste n'interagit pas avec la force électromagnétique.

Amas de la Balle

➤ Résultat de la collision de deux amas de galaxies

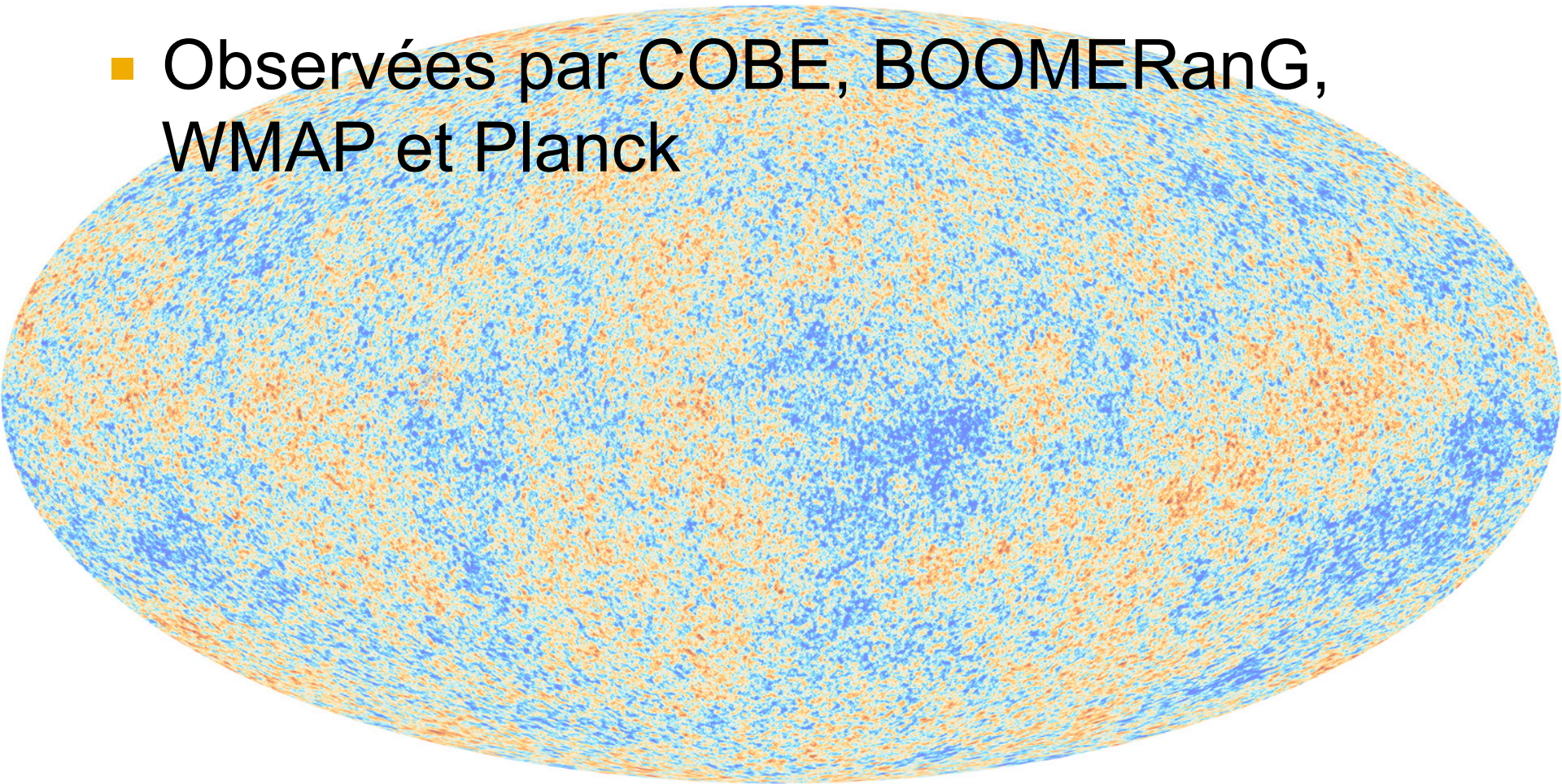
Clowe et al, The Astrophysical Journal, 648 (2006), 106-113



- Cohérent avec matière noire sans interaction électromagnétique
- Non expliqué par modèles alternatifs de la gravitation

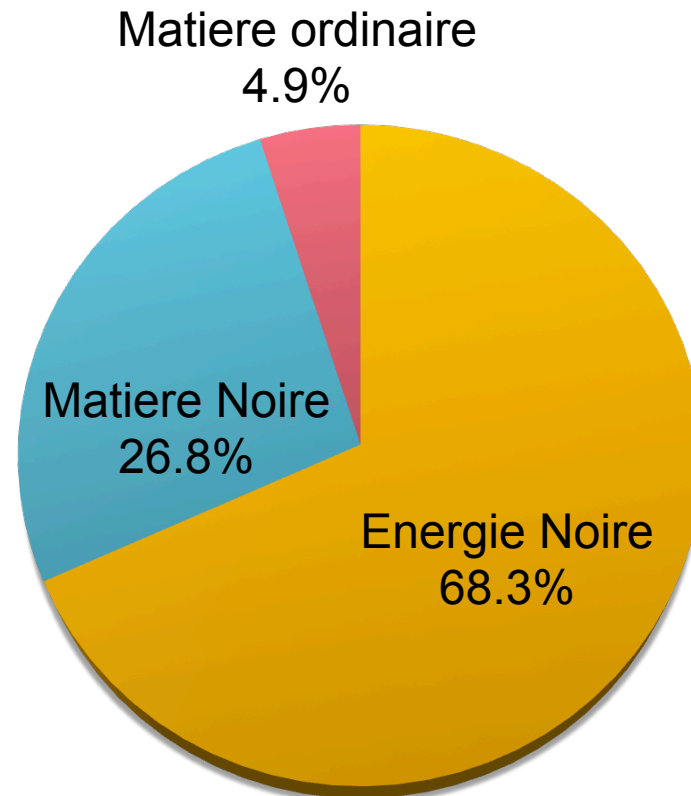
Fluctuations du fond diffus cosmologique

- Observées par COBE, BOOMERanG, WMAP et Planck



Fluctuations du fond diffus cosmologique

- Observées par COBE, BOOMERanG, WMAP et Planck
- Interprétations:



**Composition de l'univers
(Densité Masse/Energie)**

Planck 2013 Results

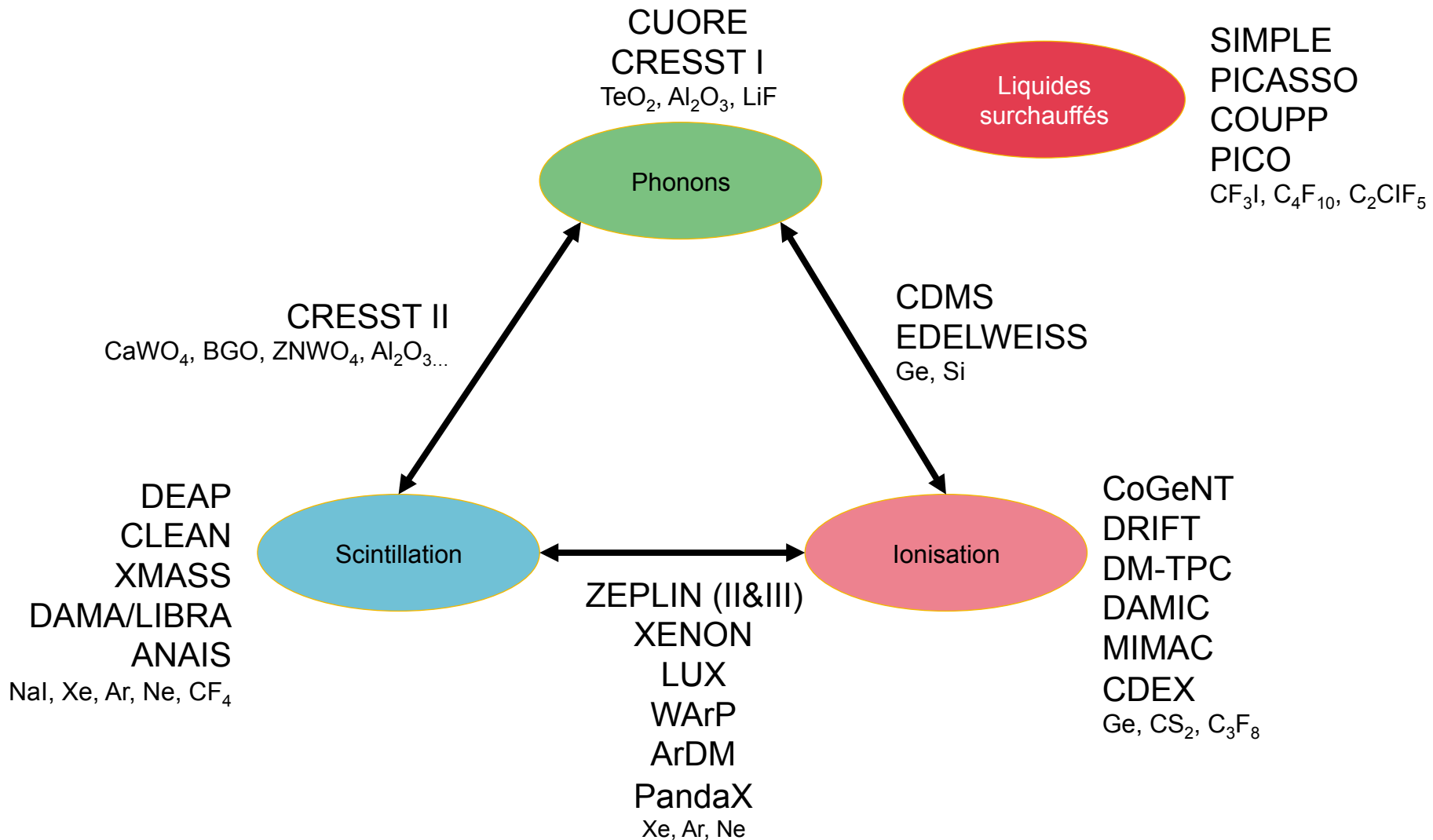
Particules possibles...

- Particule Massive Interagissant Faiblement (WIMP)
 - Prédite par Super Symétrie
 - Pourrait constituer la totalité de la matière noire
- Axions
 - Prédite par une solution à la violation CP en QCD
- Neutrinos stériles
 - Explication de la masse faible du neutrino

Quête du Graal WIMP

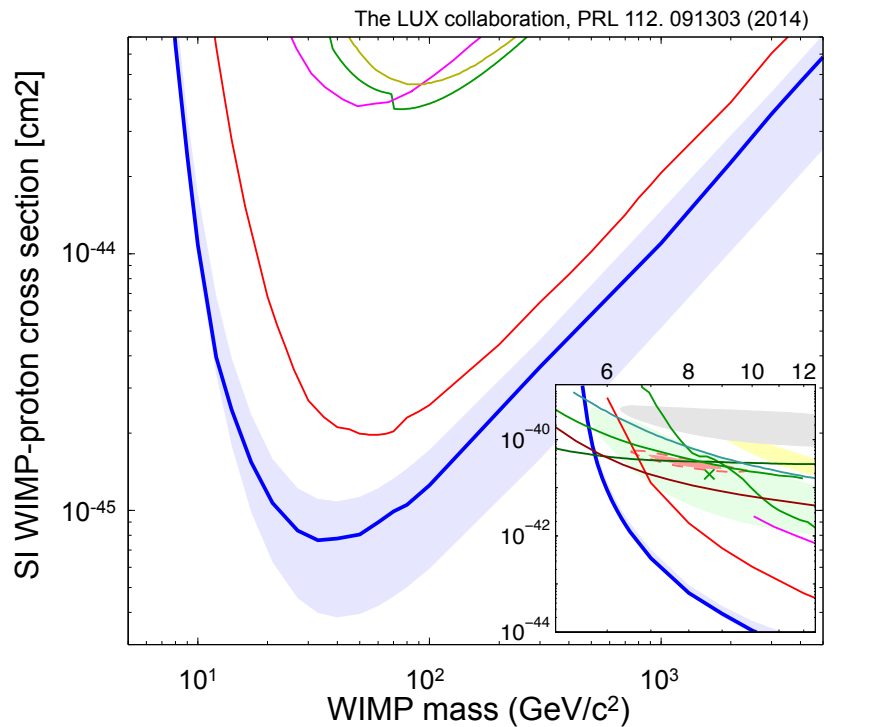
- Détection directe
 - Collision élastique WIMP-noyau.
- Détection indirecte
 - Annihilation au centre de la galaxie/du Soleil.
- Création en accélérateur
 - Recherche de masse manquante.

Techniques de détection directe



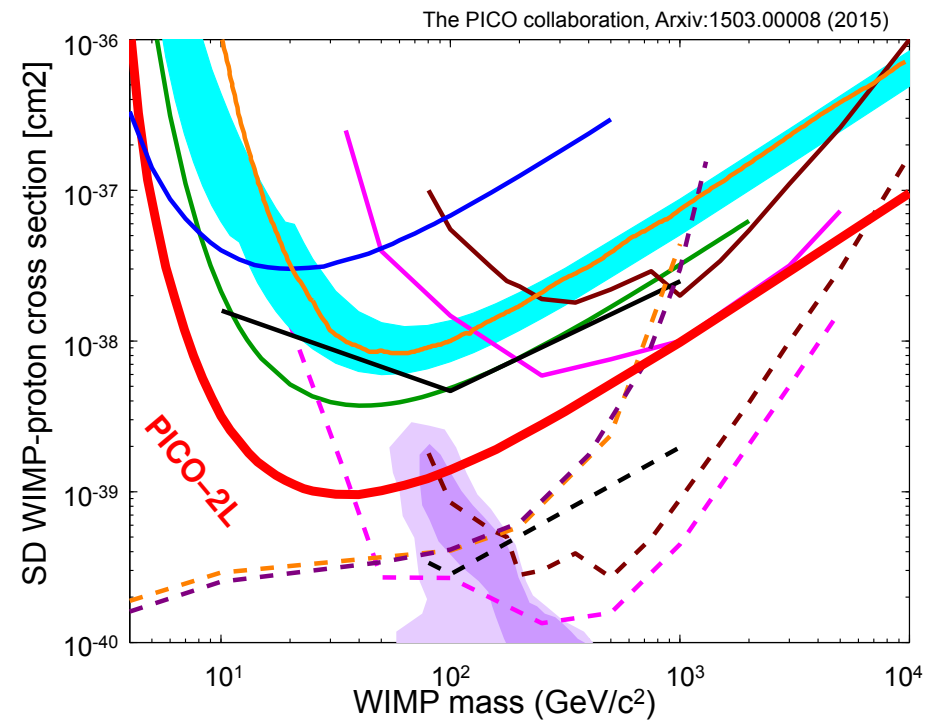
La situation à l'heure actuelle

SPIN INDÉPENDANT



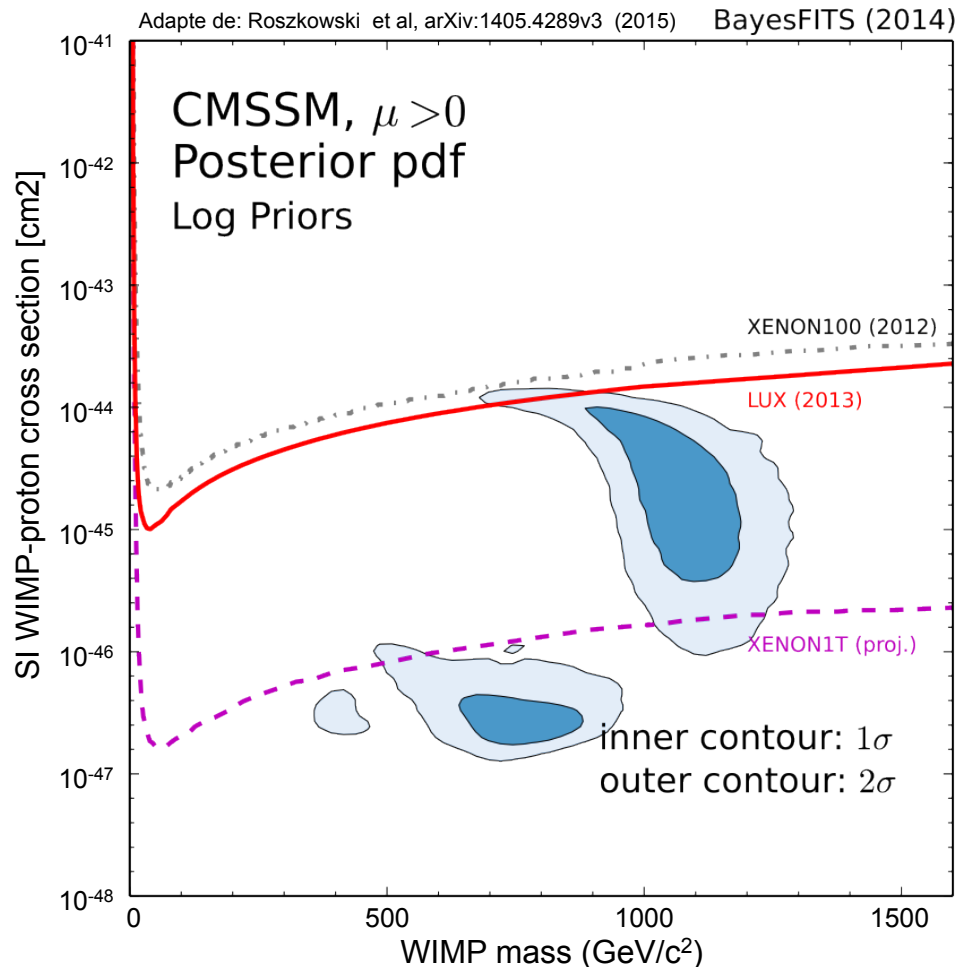
- | | | |
|------------------------|----------------------|--------------------|
| — LUX (85.3 days) | — ZEPLIN-III | — 95% CDMS II (Si) |
| — XENON-100 (225 days) | — CDMSlite | — 90% CRESST II |
| — Edelweiss II | — XENON-10 (S2-only) | — DAMA/LIBRA |
| — CDMS II | — SIMPLE | |

SPIN DÉPENDANT



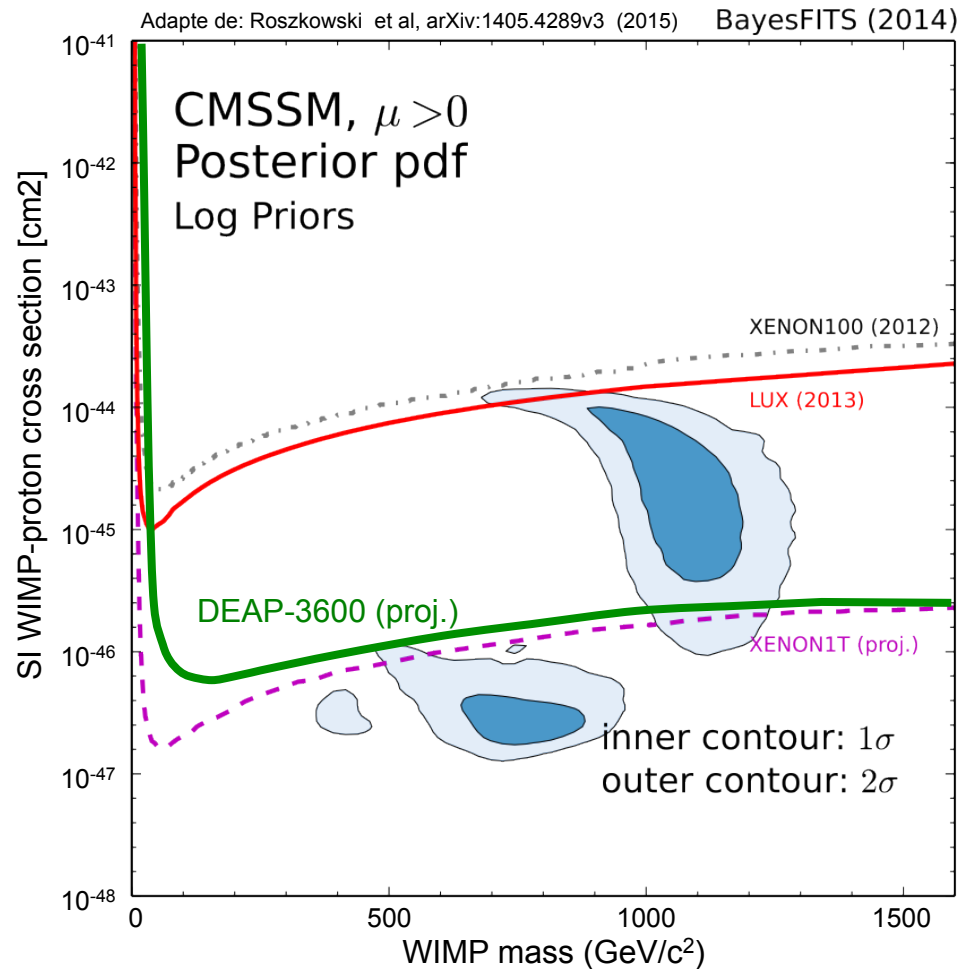
- | | | |
|-------------|----------------------------|---------------------------|
| — COUPP | — IceCube (to W^+W^-) | — SuperK (to W^+W^-) |
| — PICASSO | — IceCube (to $b\bar{b}$) | — SuperK (to $b\bar{b}$) |
| — SIMPLE | — ANTARES (to W^+W^-) | — CMS |
| — XENON-100 | — ANTARES (to $b\bar{b}$) | — ATLAS |
| | | — cMSSM Model |

Prédictions théoriques



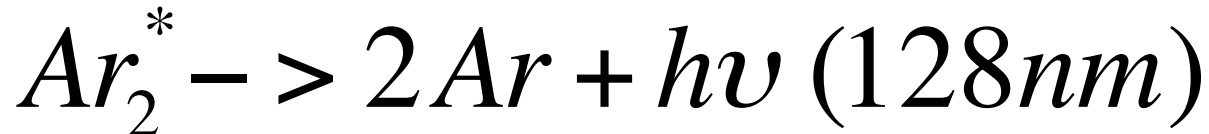
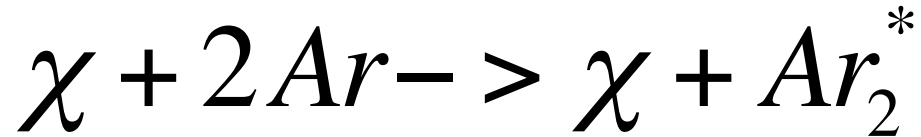
- 1 GeV-10 GeV
 - Prédiction par modèles complexes.
- 100 GeV-1 TeV
 - Favorisé par extensions simples du modèles Standard (cMSSM, p9-MSSM, ...)

$10^{-46} \text{cm}^2 @ 100 \text{GeV}$



3000 kg/année
sans bruit (Argon)

Argon liquide: un bon scintillateur pour le WIMP



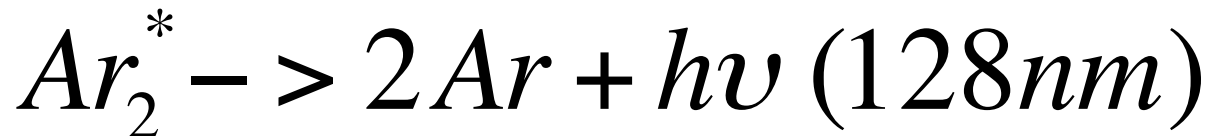
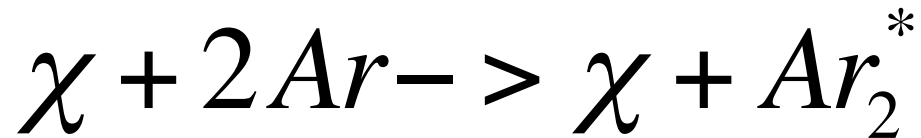
Avantages:

- Facile à purifier
- Transparent à la scintillation
- 40 photons/keV
- Z relativement grand

Inconvénients:

- Requiert un matériau fluorescent

Bruit intrinsèque



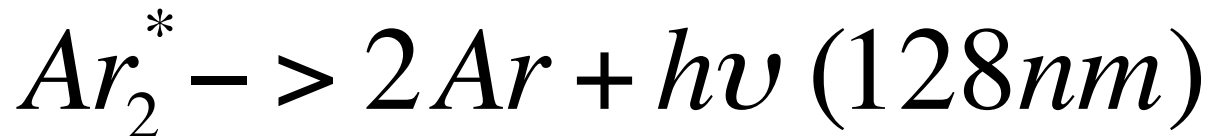
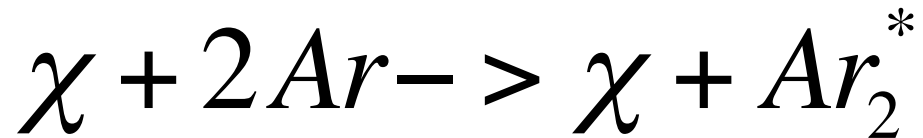
Avantages:

- Facile à purifier
- Transparent à la scintillation
- 40 photons/keV
- Z relativement grand

Inconvénients:

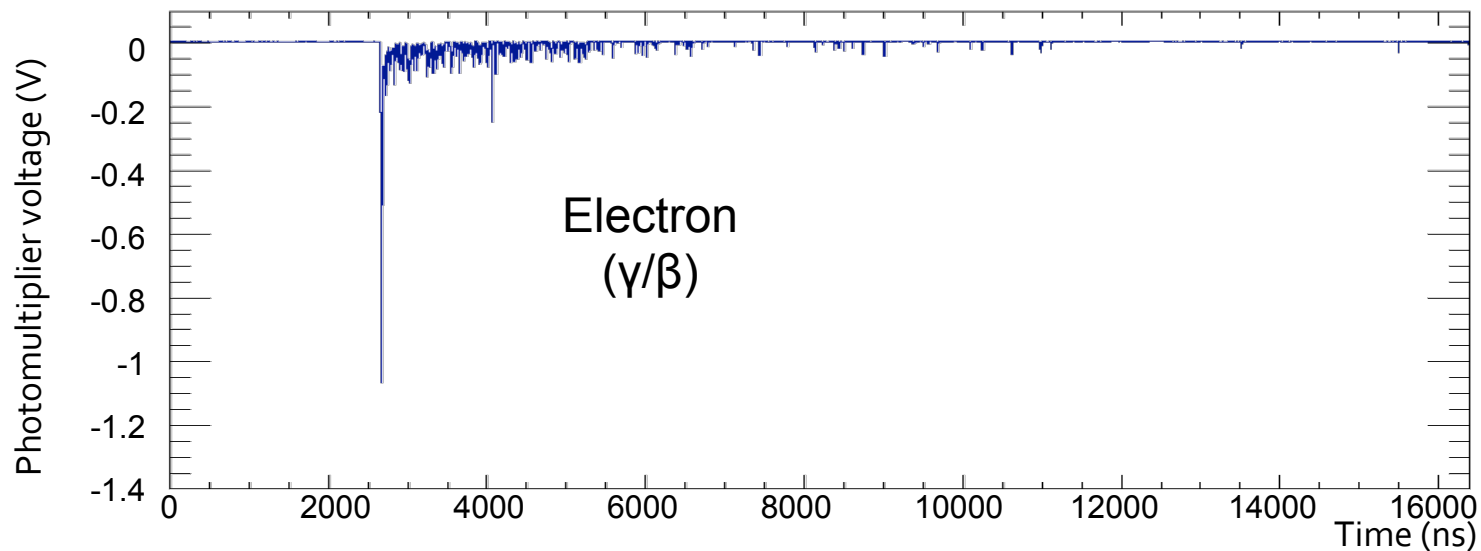
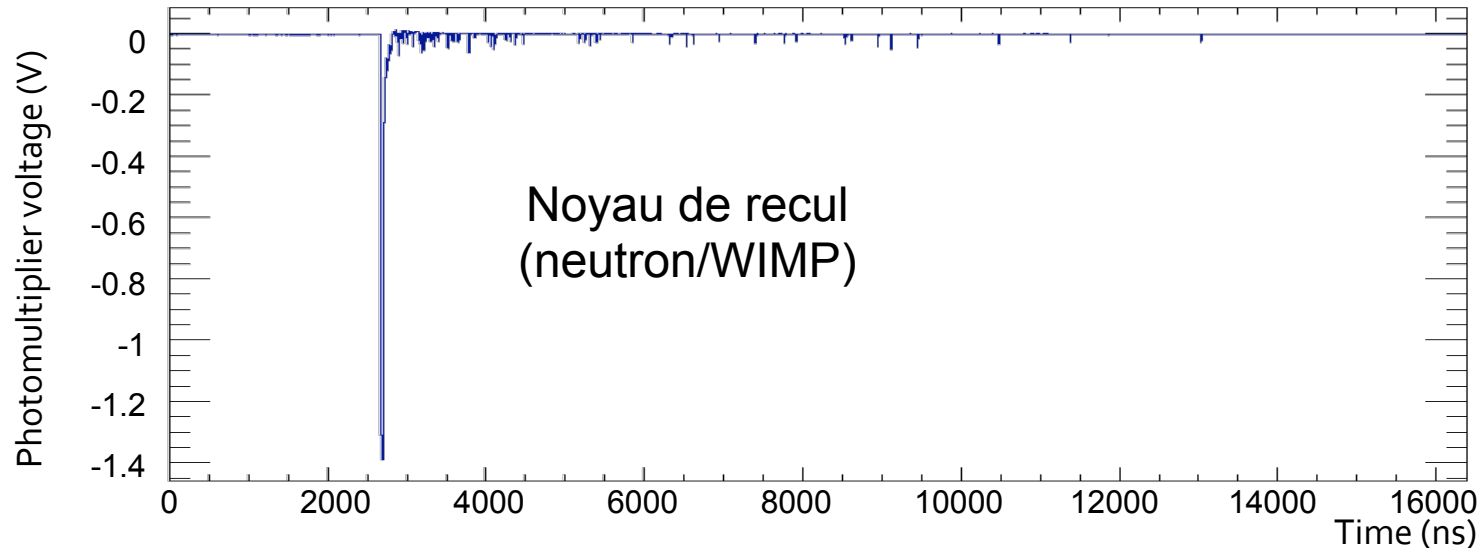
- Requier un matériau fluorescent
- Argon Naturel:
1Bq/kg ^{39}Ar (β^- , 565keV)

Scintillation dépend de la particule incidente

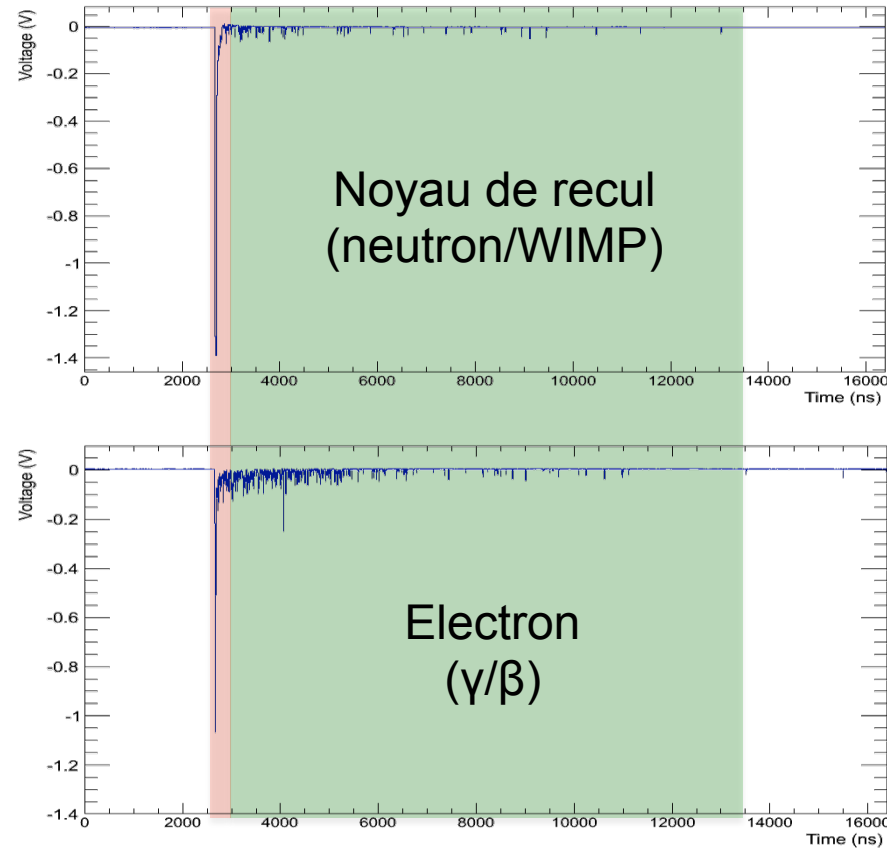


Etat de l'excimère (Constante de temps)	Singulet (~7ns)	Triplet (~1.6µs)
Electron	23%	67%
Noyau de recul	75%	25%

Discrimination par la forme du signal (PSD)



Argon PSD: Fprompt

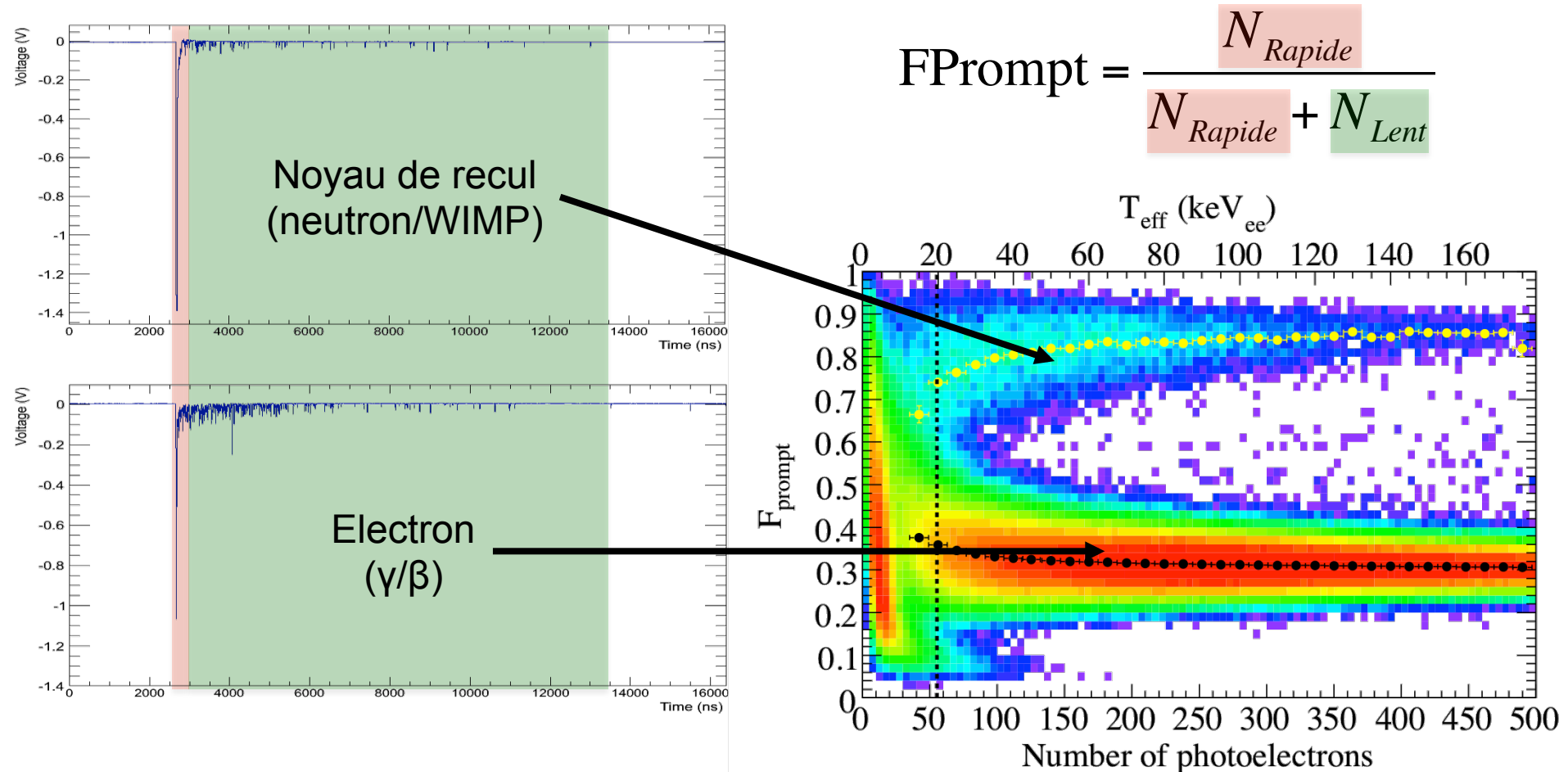


$$F_{\text{Prompt}} = \frac{N_{\text{Rapide}}}{N_{\text{Rapide}} + N_{\text{Lent}}}$$

Rapide: -50ns → 150ns

Lent: 150ns → 10μs

Séparation noyau de recul / e⁻



$$F_{\text{Prompt}} = \frac{N_{\text{Rapide}}}{N_{\text{Rapide}} + N_{\text{Lent}}}$$

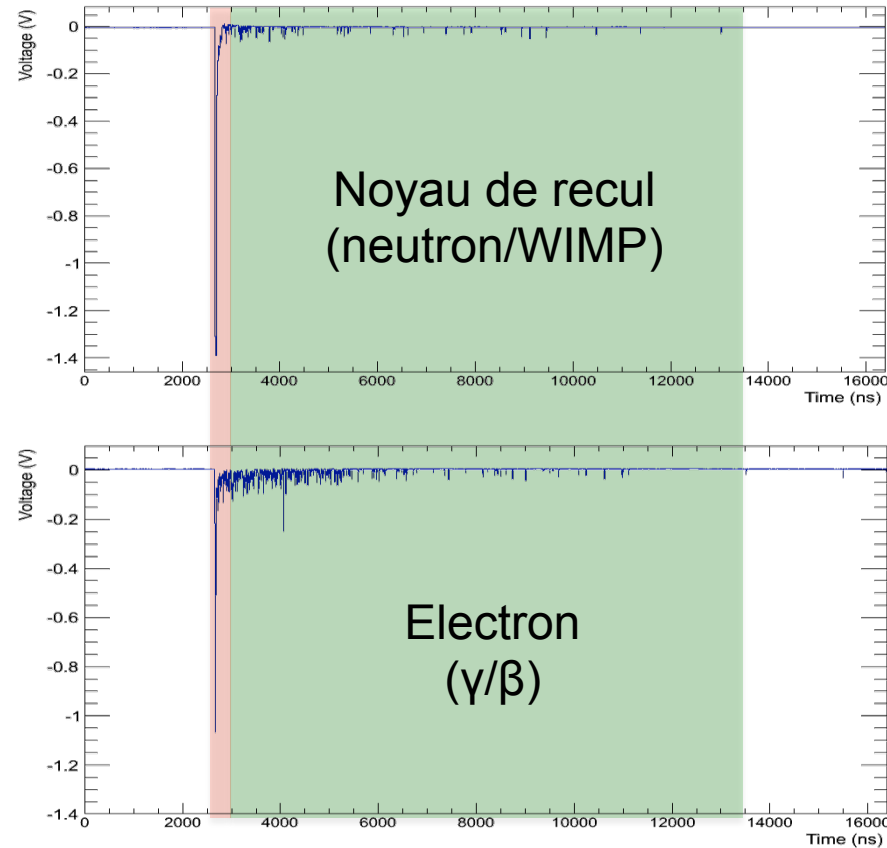
$T_{\text{eff}} (\text{keV}_{\text{ee}})$

arXiv:0904.2930

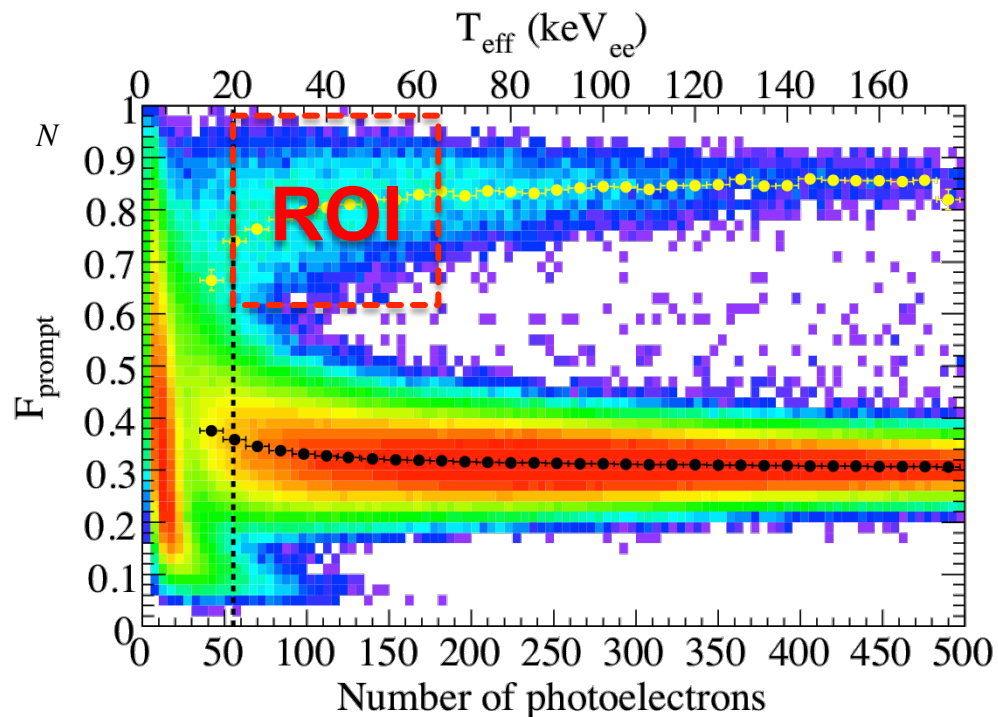
$$N_{\text{PE}} = \text{Energie} \times \text{Rendement lumineux} \times \eta_{\text{Collecte}} \times \eta_{\text{Detection}}$$

Infiltration dans ROI

→ Seuil de detection



$$F_{\text{Prompt}} = \frac{N_{\text{Rapide}}}{N_{\text{Rapide}} + N_{\text{Lent}}}$$



arXiv:0904.2930

$$N_{\text{PE}} = \text{Energie} \times \text{Rendement lumineux} \times \eta_{\text{Collecte}} \times \eta_{\text{Detection}}$$

1000 kg masse active

→ 3 années sans bruit

Bruit externe

→ Elimination

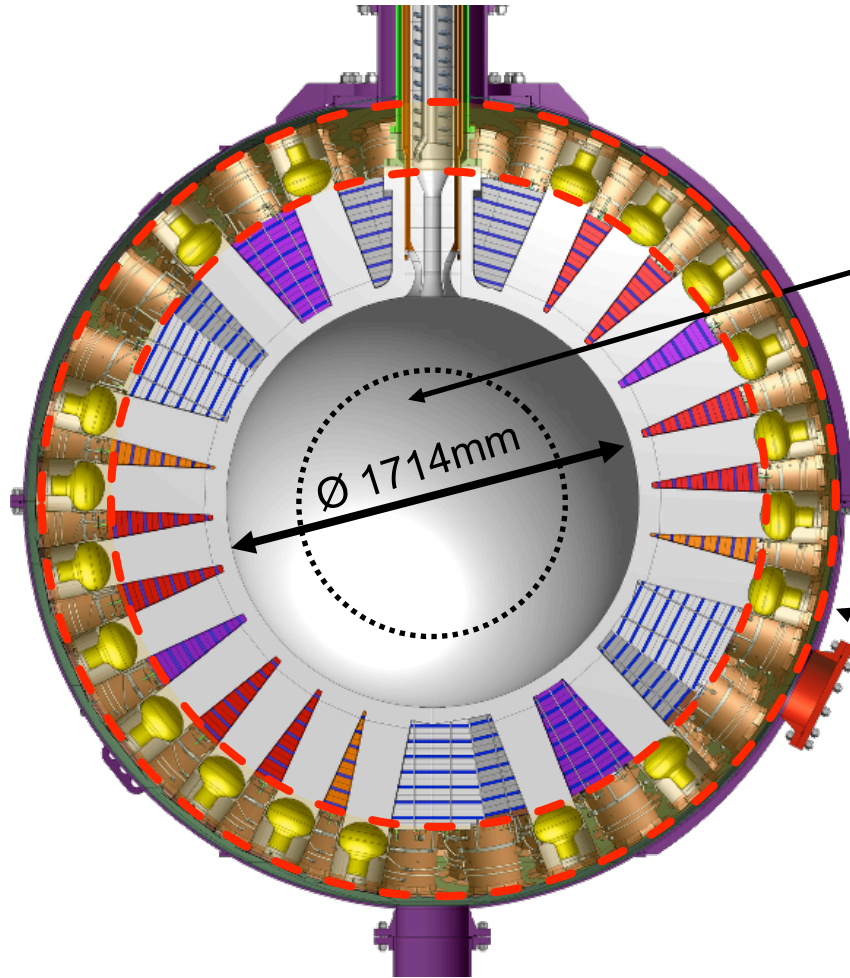
- Neutron < 2 pBq/kg
 - Sélection matériaux
 - Blindage
- α (surface) < 0.2 mBq/m²
 - Elimination de la source
 - Fiducialisation

Bruit interne

→ Discrimination

- β/γ (1 Bq/kg ³⁹Ar)
 - Rejection: 10^{10}
 - Optimisation PSD
 - Maximisation de la collecte/détection de la lumière (>8 PE/keV)

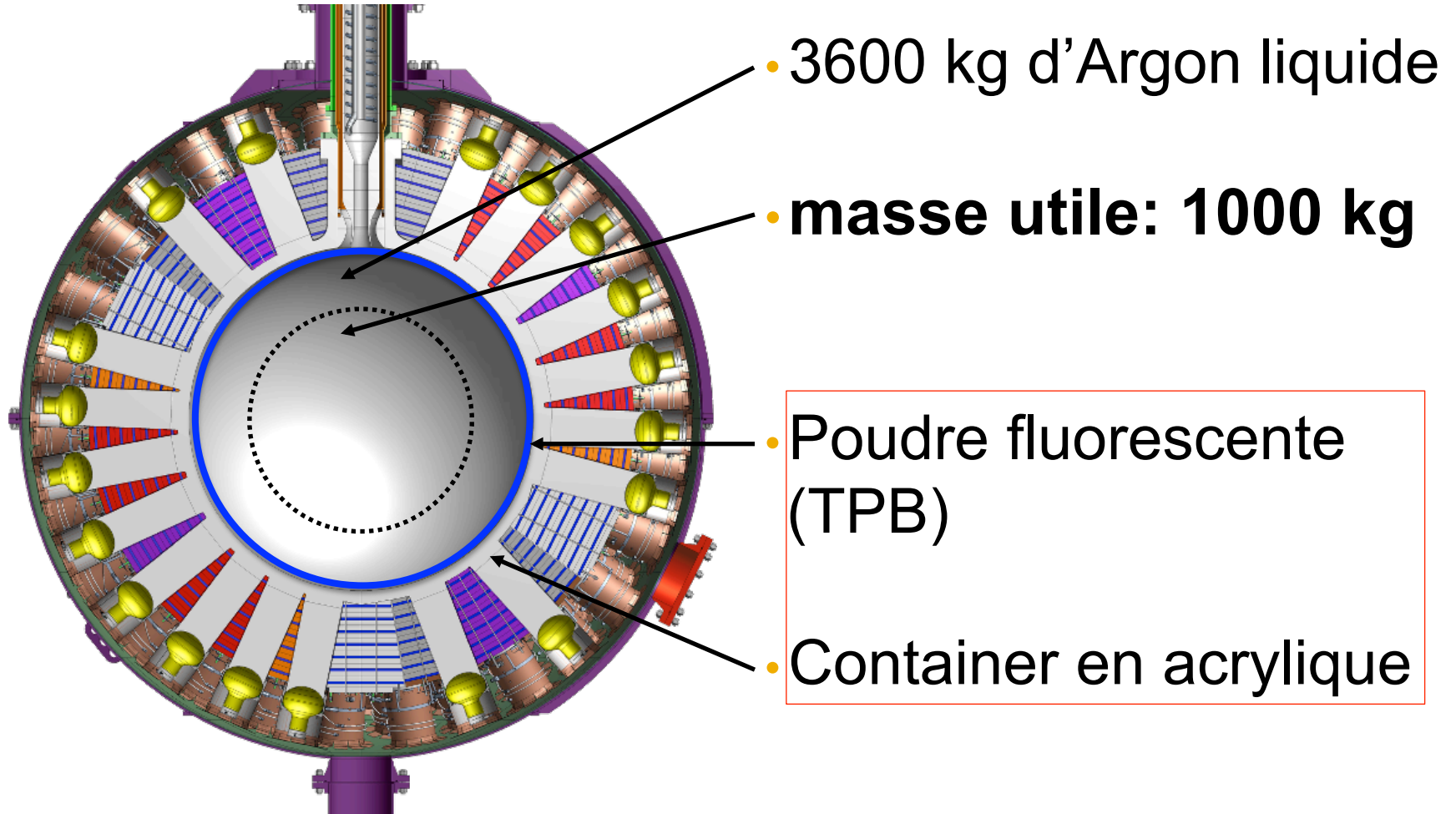
Détecteur sphérique, phase unique



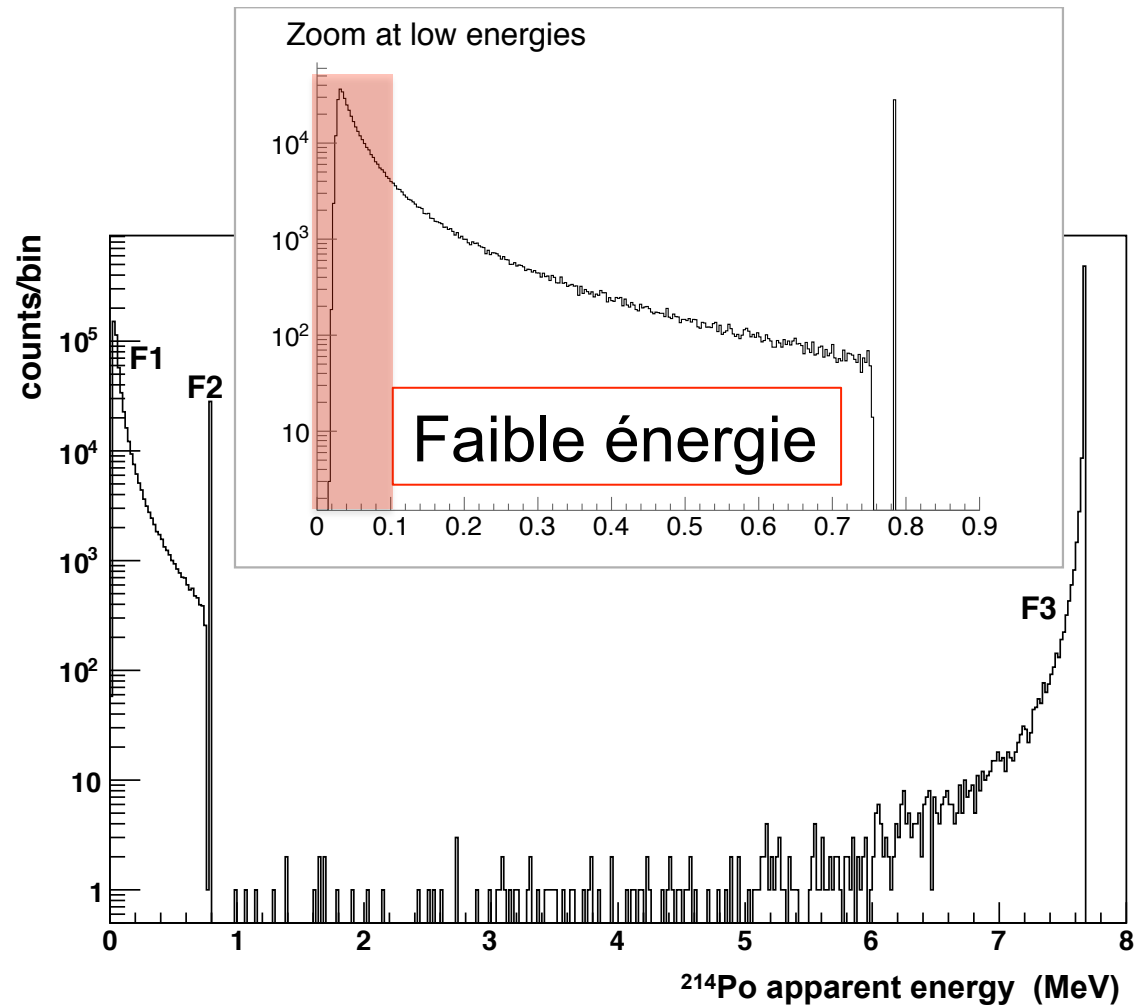
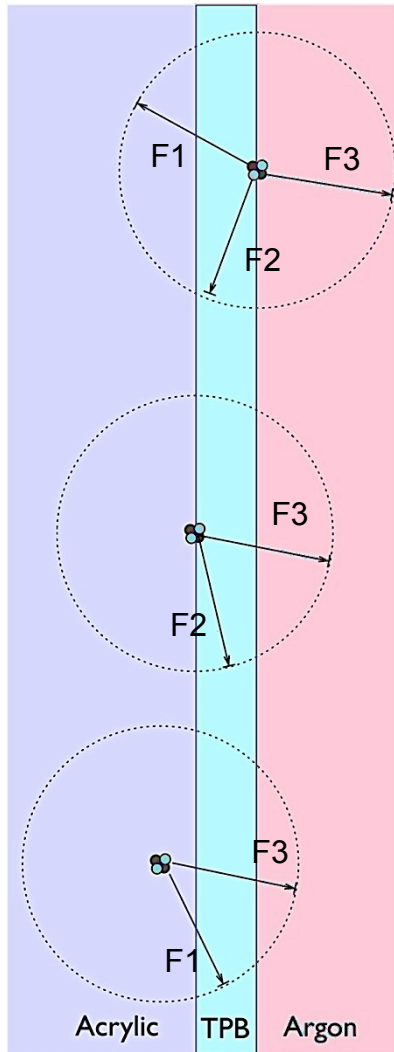
- masse utile: 1000 kg

- Couverture photomultiplicateurs: 75%

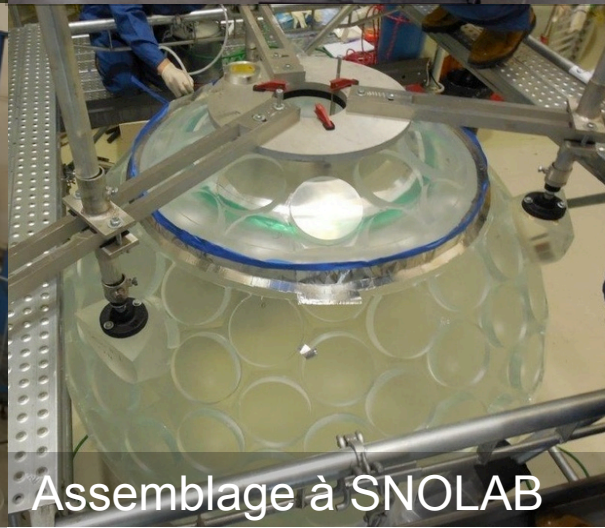
Fiducialisation du détecteur



α de surface (Infiltration ROI)



Container en acrylique pur



- Contamination par le radon inventoriée à chaque étape
- Vaisseau ventilé avec de l'air à contenance faible en radon

Collage des guides de lumière (acrylique)



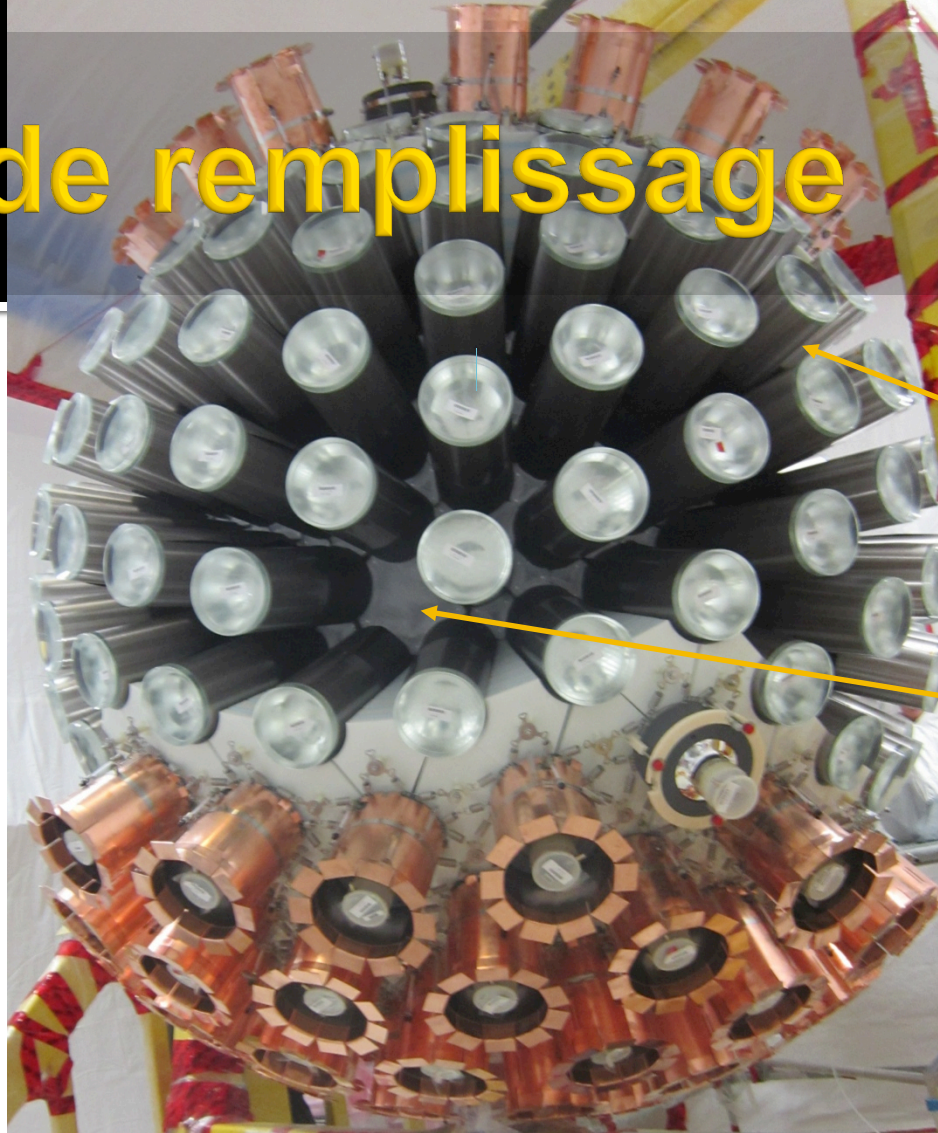
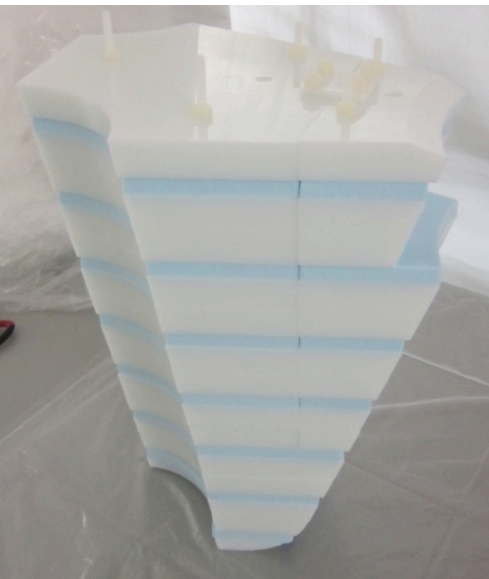
Elimination du bruit

- Blindage contre les neutrons
- Pas de support additionnel

Optimisation de la détection

- Atténuation $> 1\text{m}$
- Améliore la collecte de lumière

Blocs de remplissage



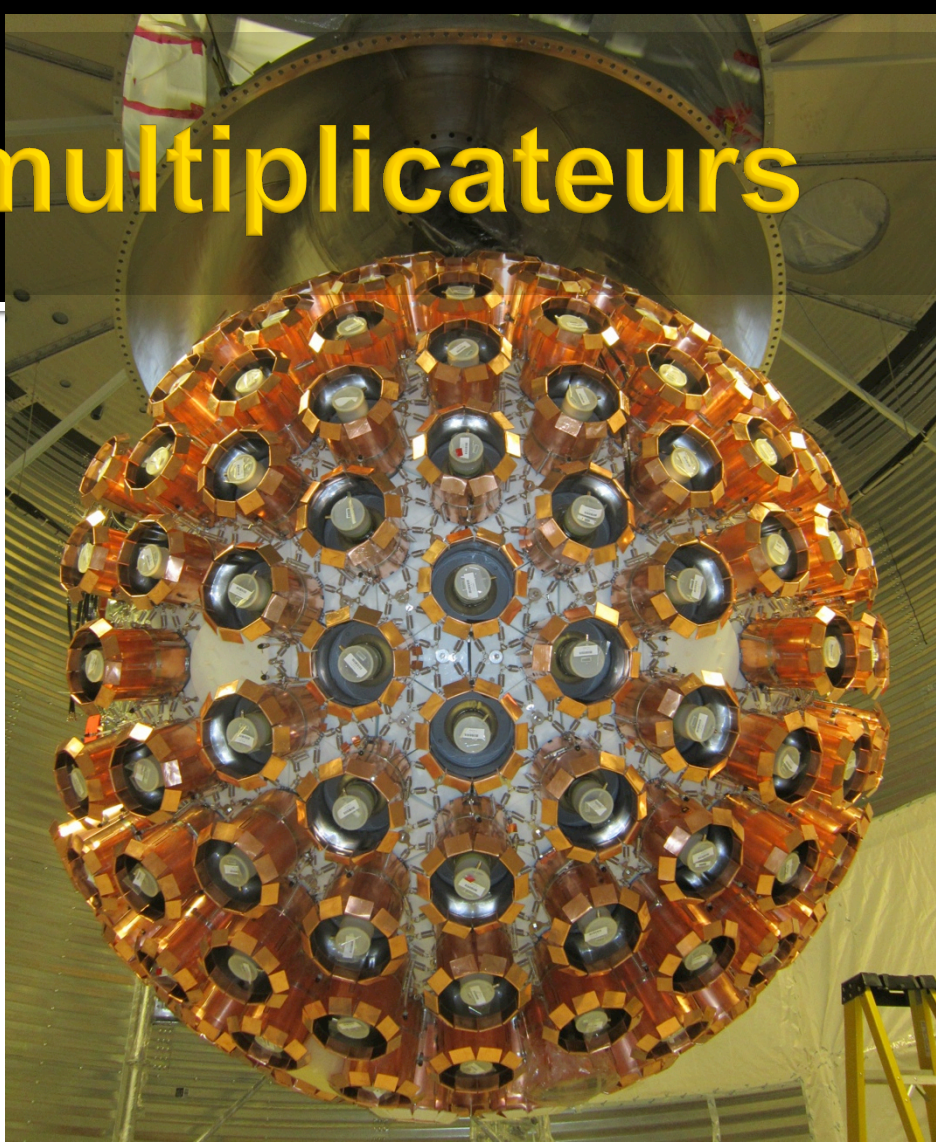
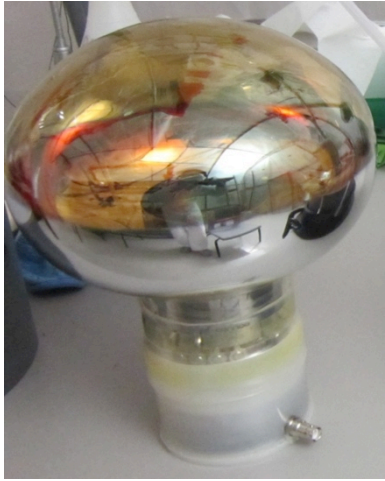
Réflecteurs
spéculaires

Réflecteurs diffus

Elimination du bruit

- Polyéthylène (blanc) & polystyrène (bleu)
- Blindage contre les neutrons

Photomultiplicateurs



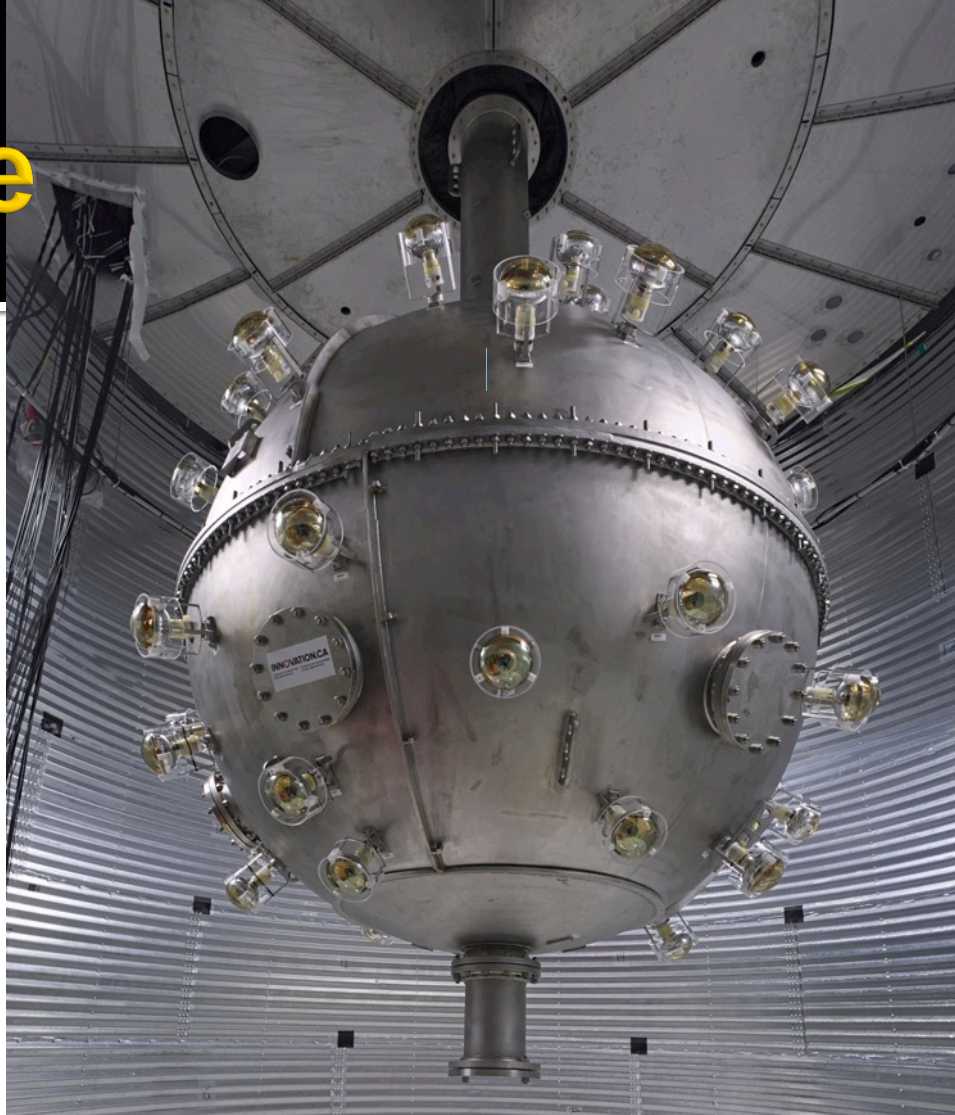
Elimination du bruit

- 50 cm de plastique
- $2.6 \times 10^5 n \rightarrow 0.14 n$ (ROI)

Optimisation de la détection

- Hamamatsu R5912 HQE (efficacité 32%)

Citerne



Elimination du bruit

- $\varnothing 7.9\text{m} \times 7.6\text{m}$ citerne remplie d'eau ultra-pure
- Veto contre les Muons (48 PMTs)

DEAP-3600
MiniCLEAN

PICO
DEAP-1
DAMIC

HALO

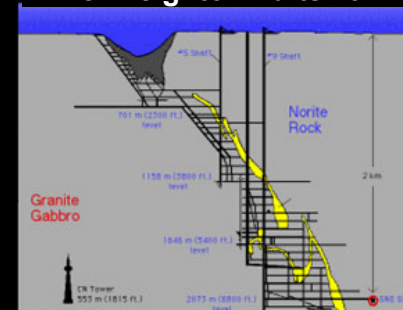
PICASSO
COUPP
SuperCDMS (proj)

SNO+

Mine
Sas
Espace blanc (Classe 2000)

Atelier
Labo de Chimie
Station de lavage
Douches/vestiaires
Salle de repos
Filtres/échangeur thermique

Vale
Mine Creighton Puits #9



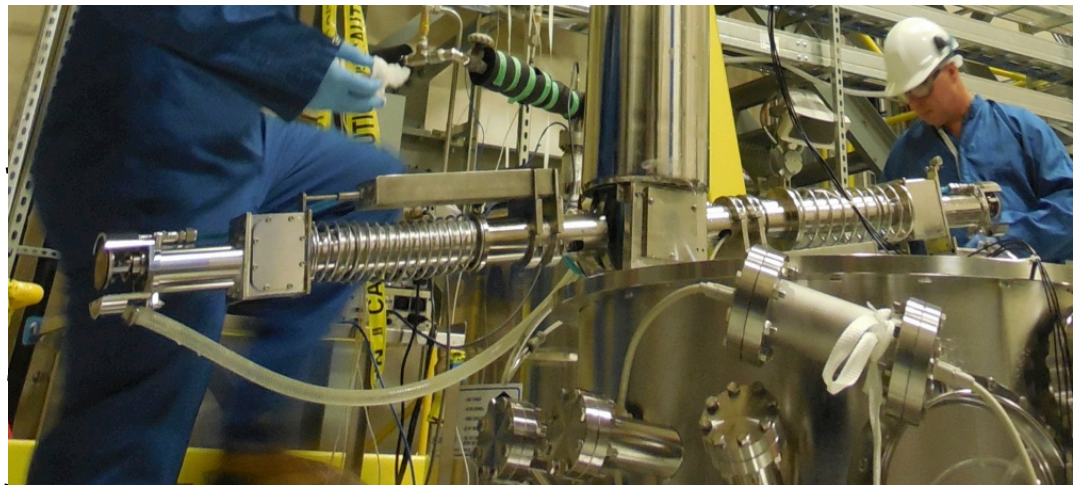
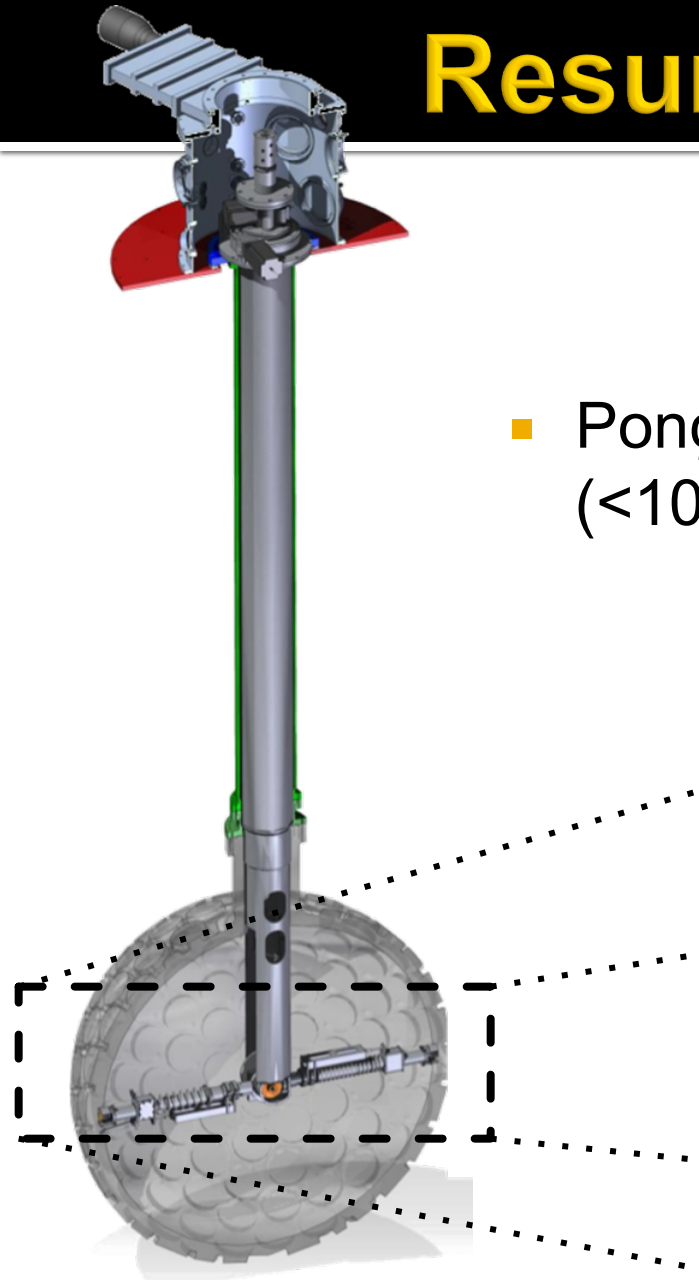
SNO+LAB
MINING FOR KNOWLEDGE
CREUSER POUR TROUVER... L'EXCELLENCE

A 2073 m de profondeur (6010 mwe) => **0.27 muon/m²/jour**

A day at SNOLAB: <http://www.youtube.com/watch?v=sZPLcv-ASwc>
SNOLAB Virtual Tour: <https://www.snolab.ca/facility/vr-tour>

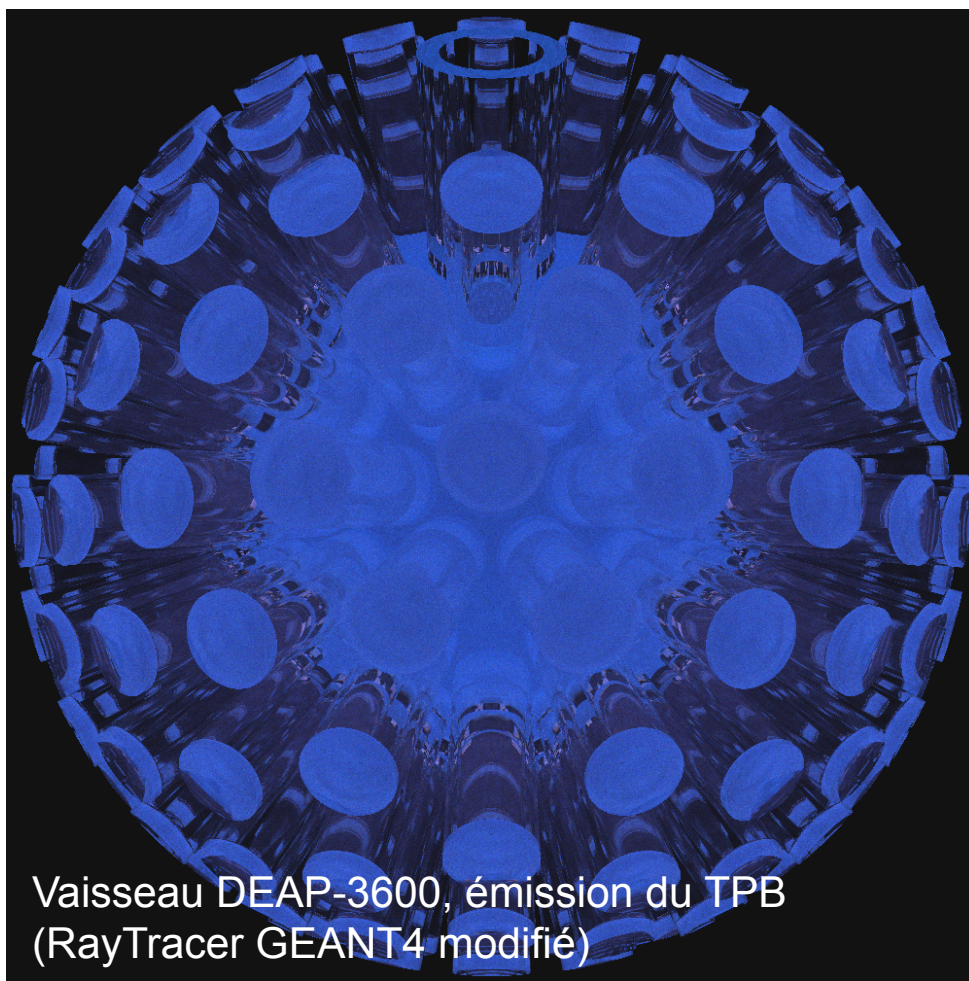
Elimination du bruit de fond: Resurfaceur

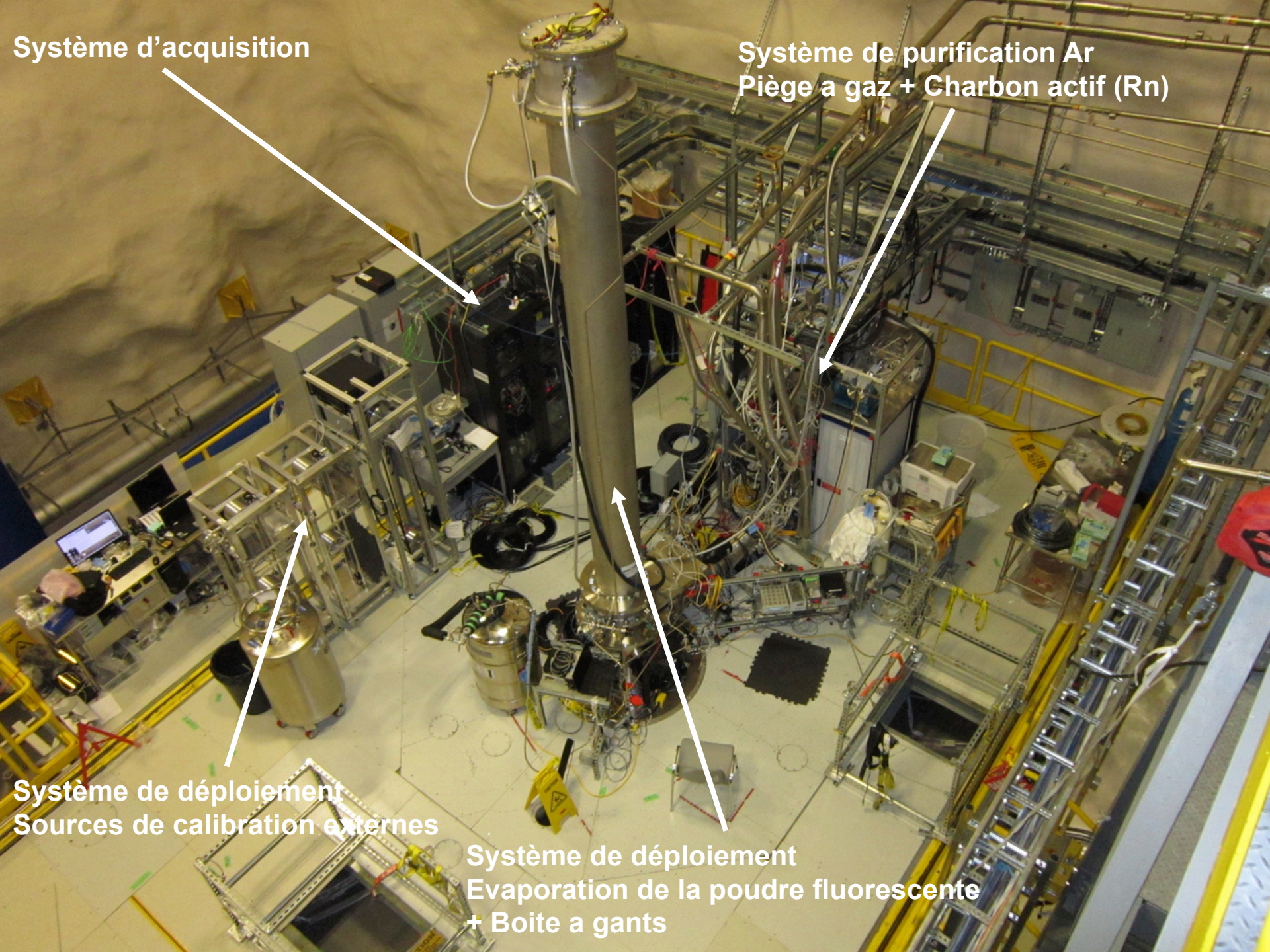
- Ponçage: 400 μm de la surface intérieure ($<10^{-19}\text{g/g}$ of ^{210}Pb)



Depot fluorescent (TPB)

$\sim 128 \text{ nm (UV)} \rightarrow \sim 400 \text{ nm (Bleu)}$





Système d'acquisition

Système de purification Ar
Piège a gaz + Charbon actif (Rn)

Système de déploiement
Sources de calibration externes

Système de déploiement
Evaporation de la poudre fluorescente
+ Boite a gants

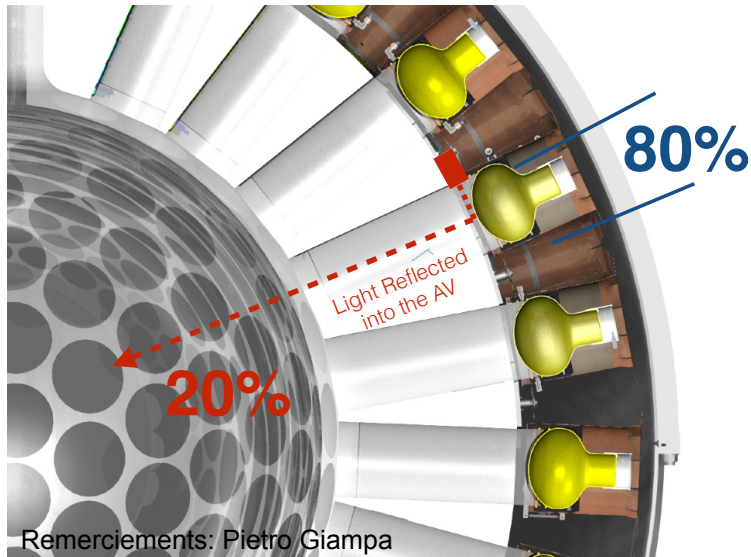
Systemes cryogeniques



Programme de calibration

Outils de calibration	Optique	Calibration de l'énergie	Reconstruction de la position	Stabilite du detecteur
DEL, laser	✓	✓		✓
Source Gamma (^{22}Na)		✓	✓	✓
Source Neutron (AmBe)		✓	✓	✓
Radioactivité intrinsèque (^{39}Ar , gammas de U & Th)	✓	✓	✓	✓

Calibration optique

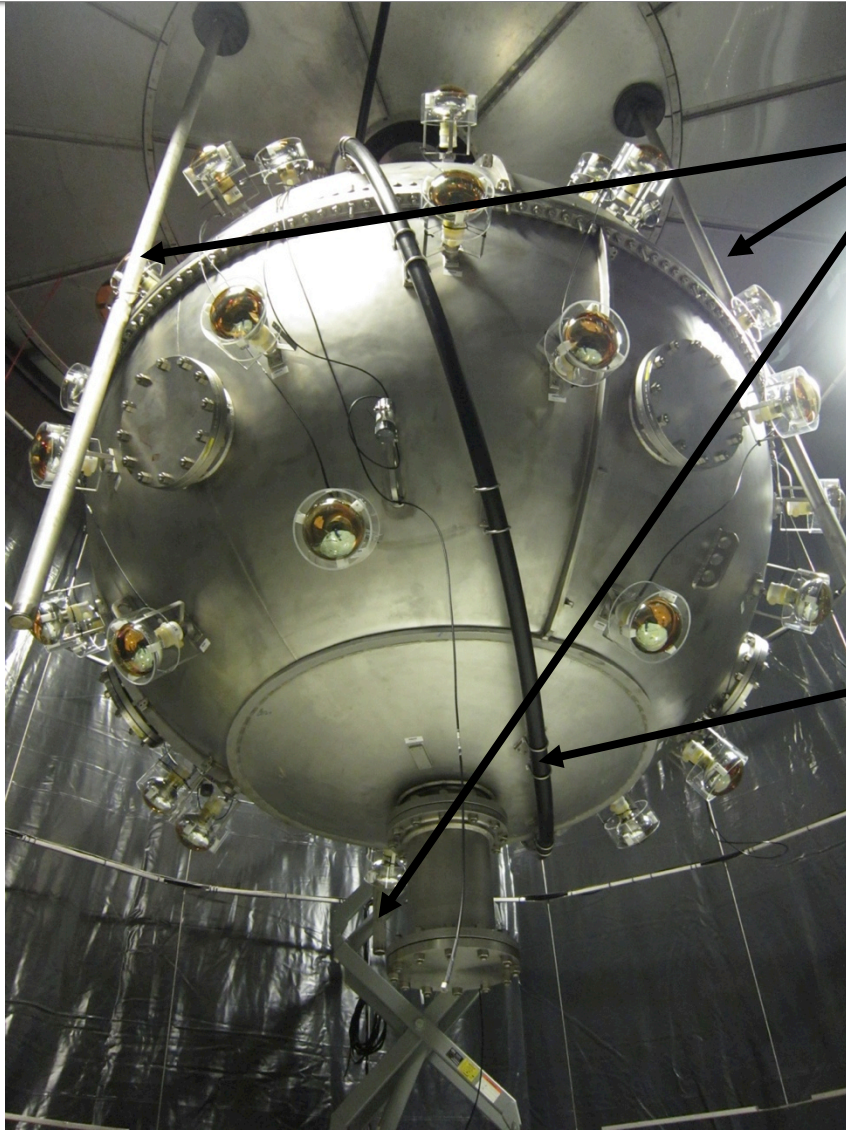


- 20 guides de lumière avec fibre optique
 - Impulsion (laser-DEL): quelques ns
 - λ : 425nm



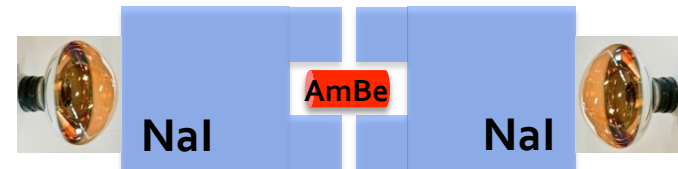
- Laserball:
 - Impulsion (laser): $< 1\text{ns}$
 - λ : 378 nm, 405 nm ou 444 nm

Tubes de calibrations



3 tubes verticaux

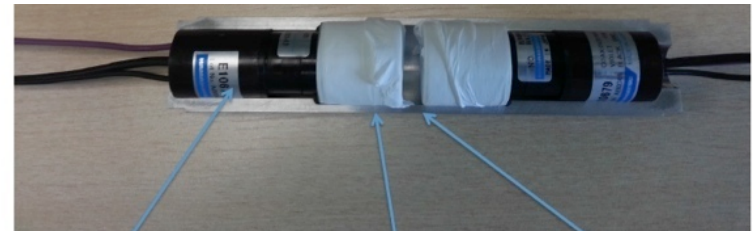
➤ AmBe (~ 5000 neutrons/s)



Remerciements: Joseph Walding

1 tube autour de l'enceinte:

➤ 3,7 MBq Na^{22} (γ , 511 keV)



Remerciements: Joseph Walding

LYSO crystal

PMTs + sockets

Space for the source

Acquisition (sélection)

- Argon naturel: 1Bq/kg Ar^{39} (β^- , 565keV)
→ **3.6kHz dans DEAP-3600**
- Sélection: Energie & PSD
 - Trigger: somme analogique des 255 canaux
→ estimation grossière
 - 'EventBuilder': analyse du signal digital
→ estimation plus fine

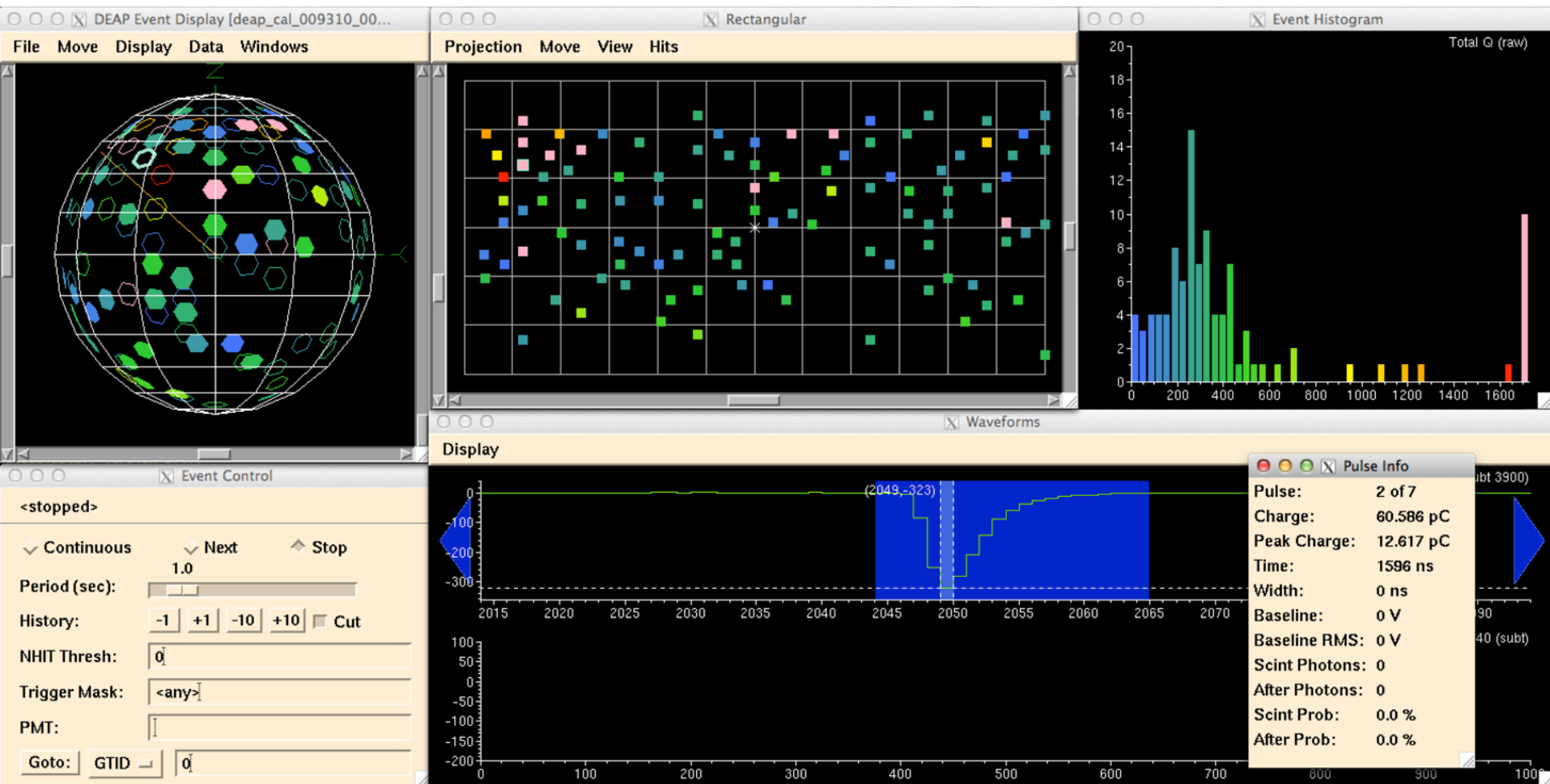
Acquisition (numérisation)

- Signal conditionné et amplifié avant numérisation
- CAEN V1720 @ 250MHz
 - Energie faible (WIMP)/forte amplification
 - Comptage photoélectrons & résolution temporelle
- CAEN V1740 @ 62.5MHz
 - Energie large (α de surface)/faible amplification

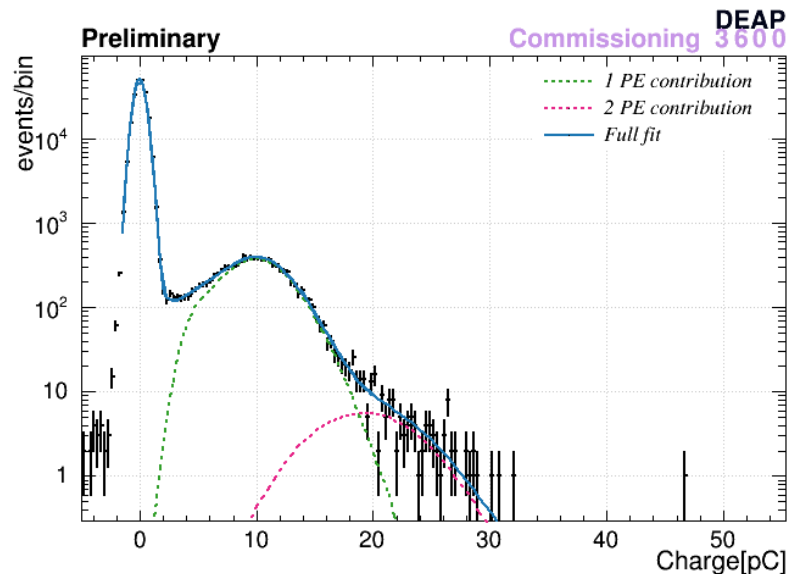
Derniers 100m...

- Mise en service des systèmes.
- Poudre fluorescente bientôt déposée
- Citerne en phase de finition.
- Début de la prise de données dans quelque mois
- « Leading sensitivity » à la fin de l'année

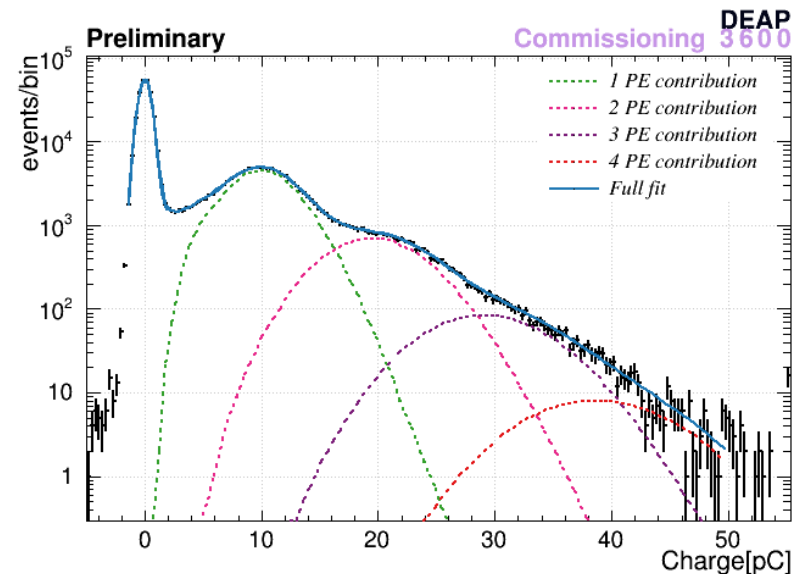
Injection de lumière



Injection de lumière

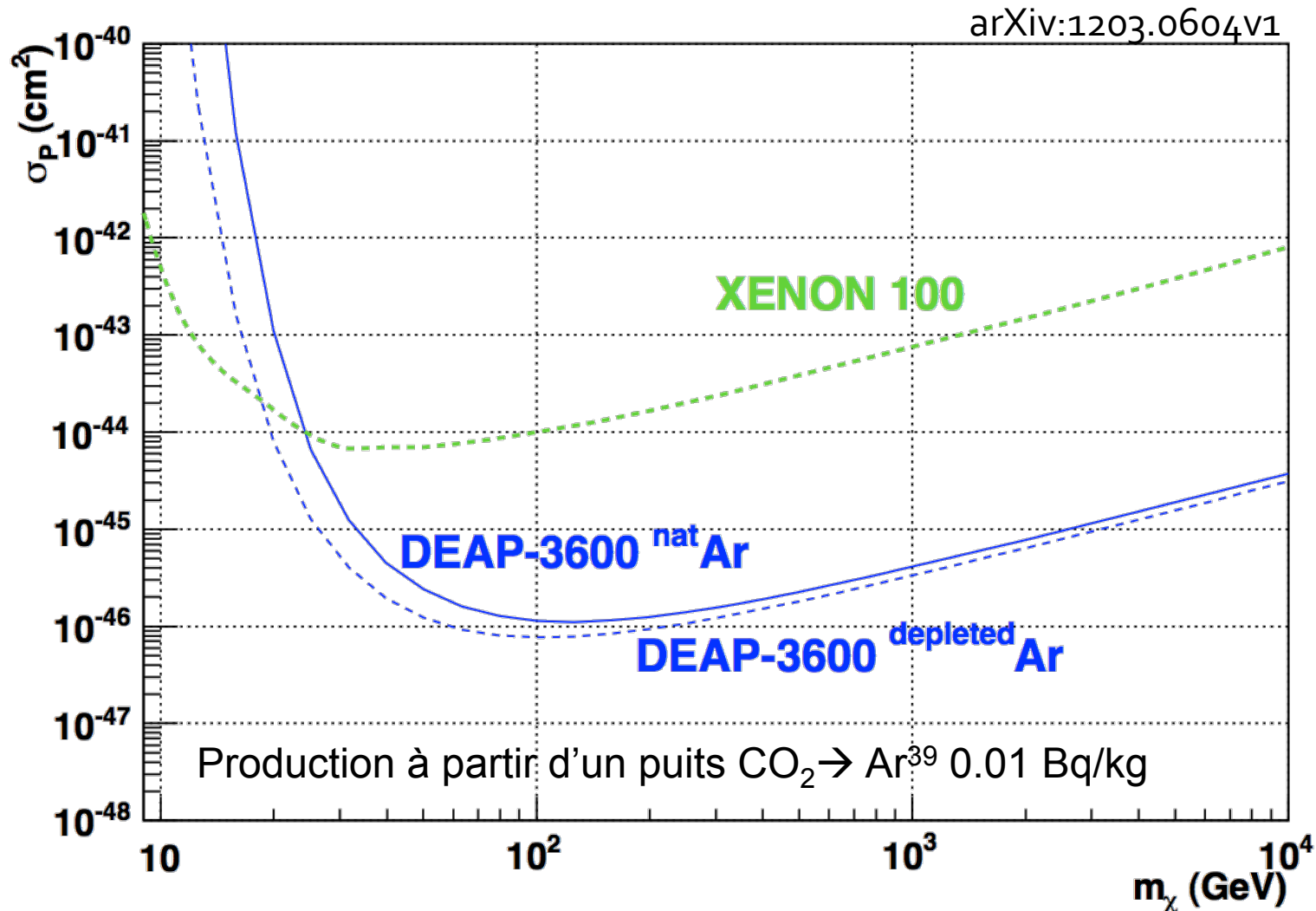


Faible intensite:
Photo-electrons unique
presque exclusivement



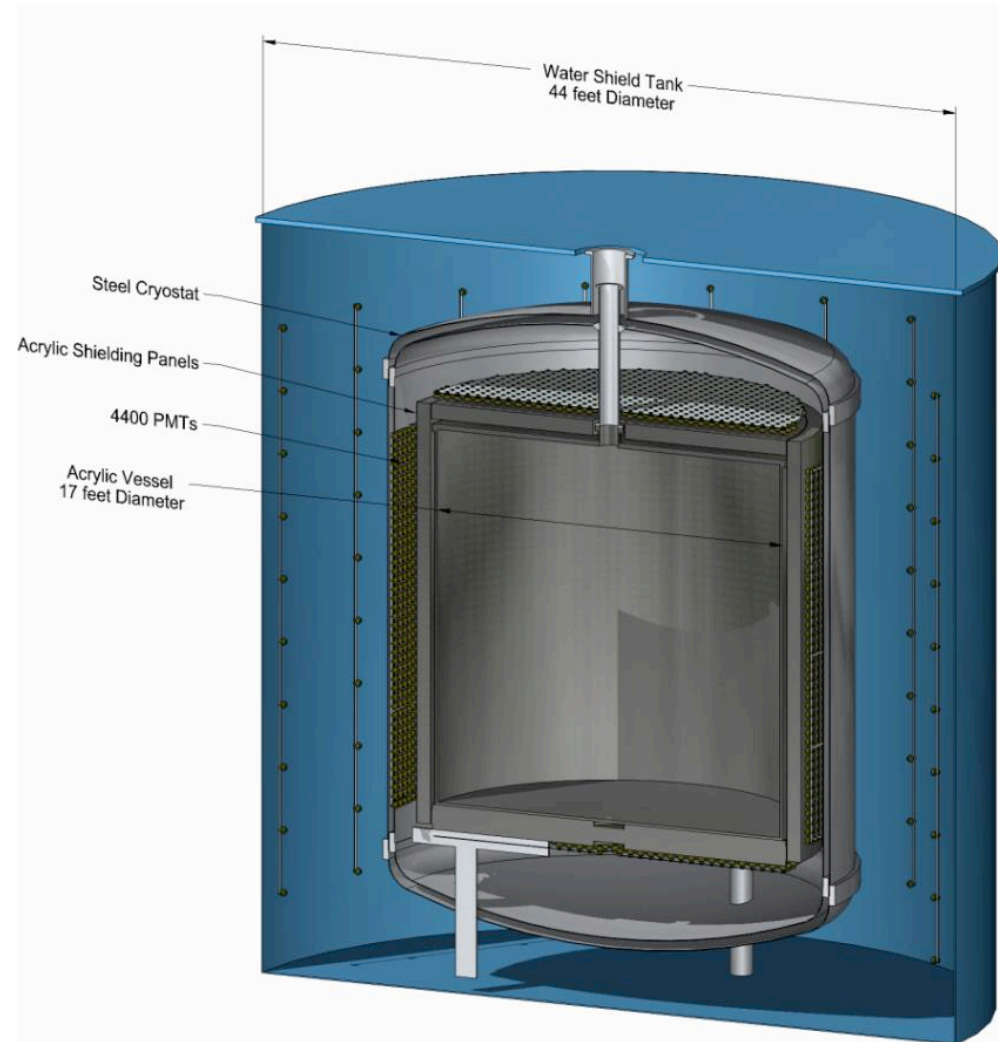
Forte intensite:
Multiples photon-electrons

Argon appauvri



→ Collaboration avec Princeton (DarkSide)

Détecteur de 50 tonnes



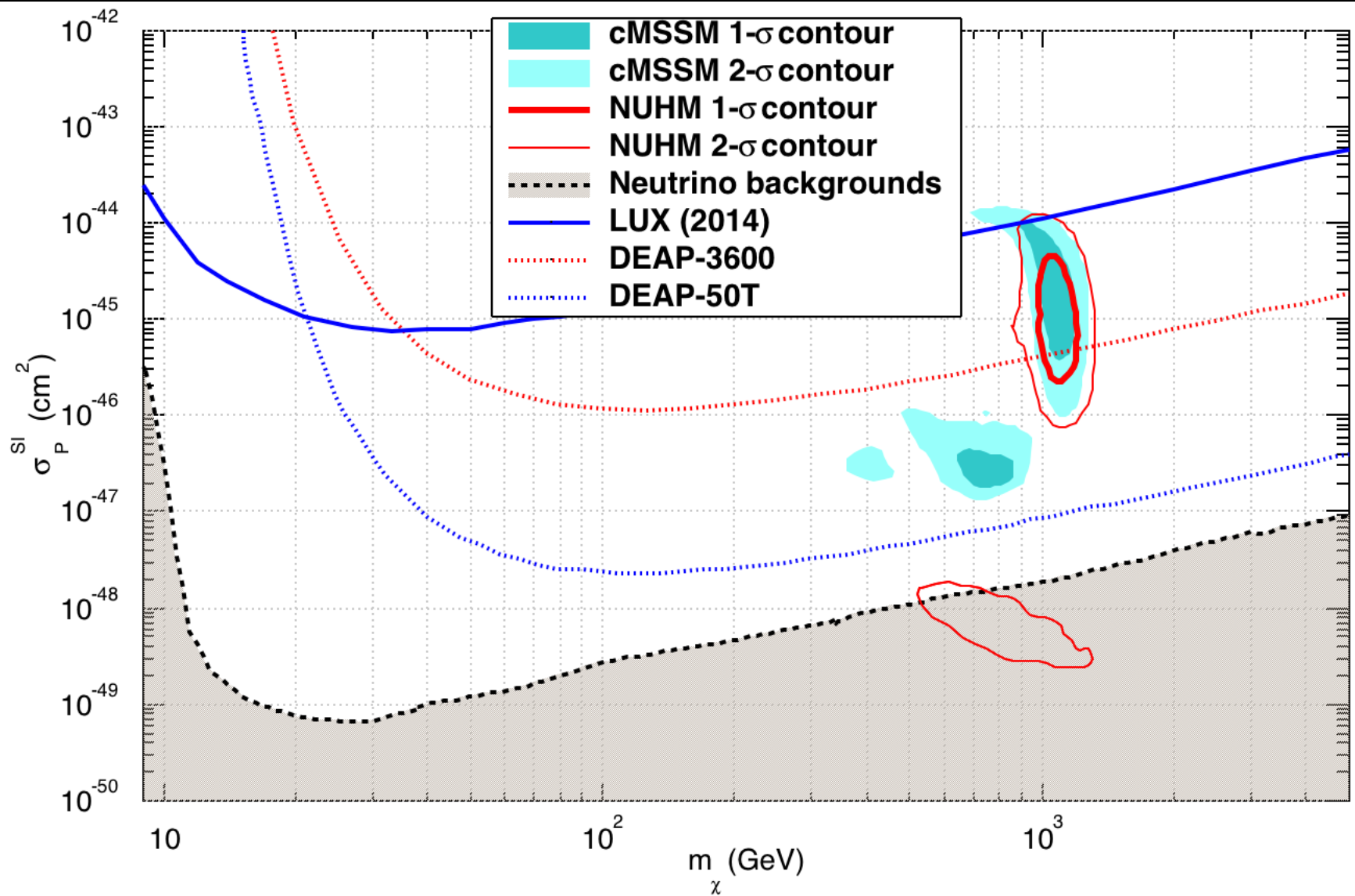
Phase liquide unique:

Meilleure reconstruction
à large échelle

Meilleure séparation du
bruit

Argon appauvri requis

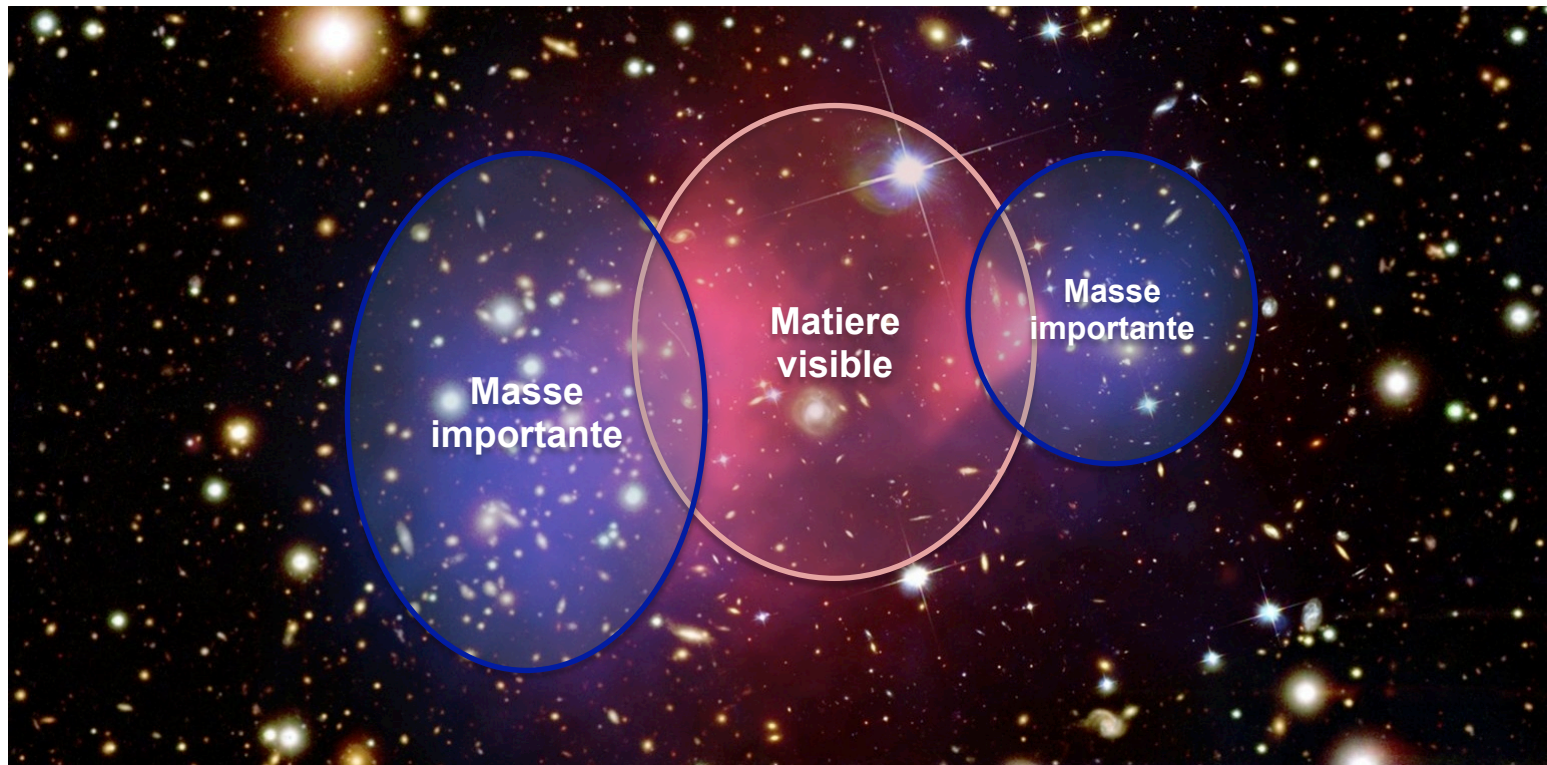
Limites avec 50T





Amas de la Balle

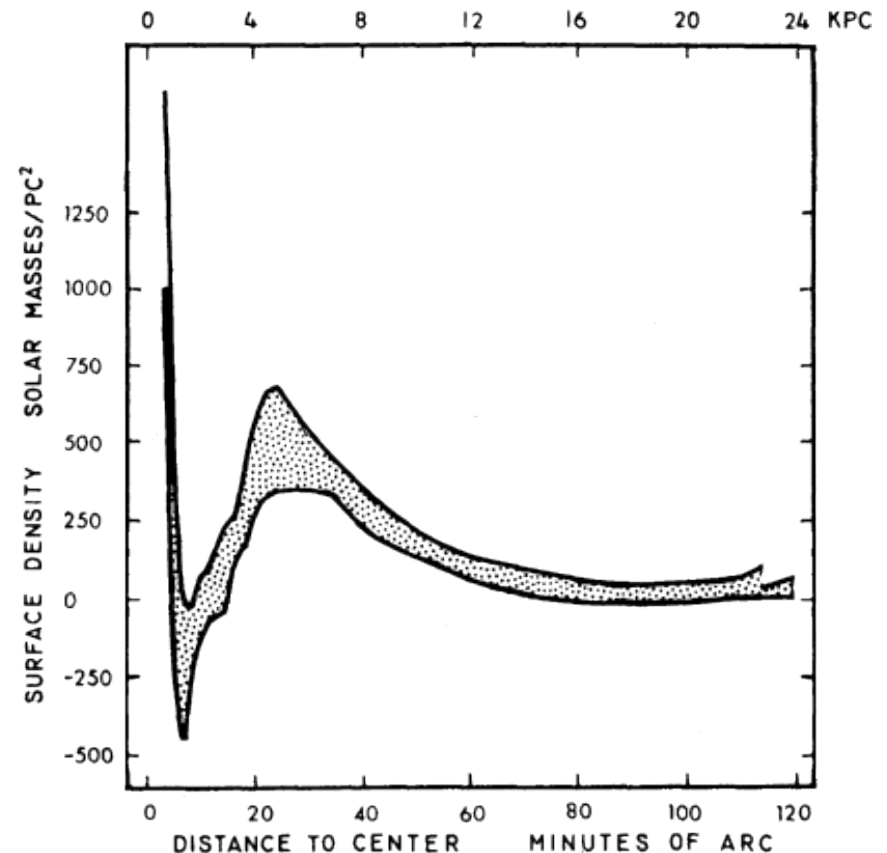
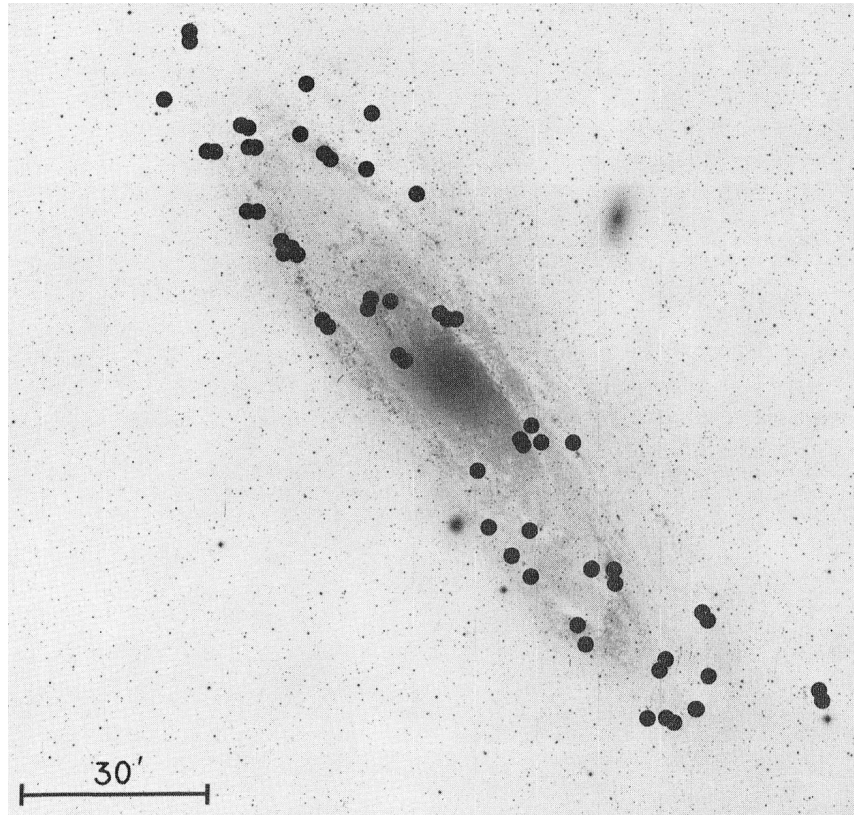
- Résultat de la collision de deux amas de galaxies



- Cohérent avec matière noire interagissant faiblement
- Non expliqué par modèles alternatifs de la gravitation

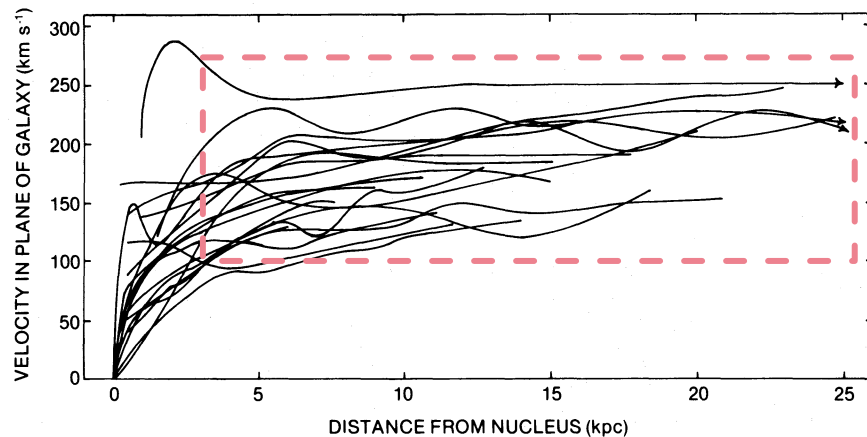
Rotation des galaxies spirales

- 1970-1980: Vera Rubin & Kent Ford



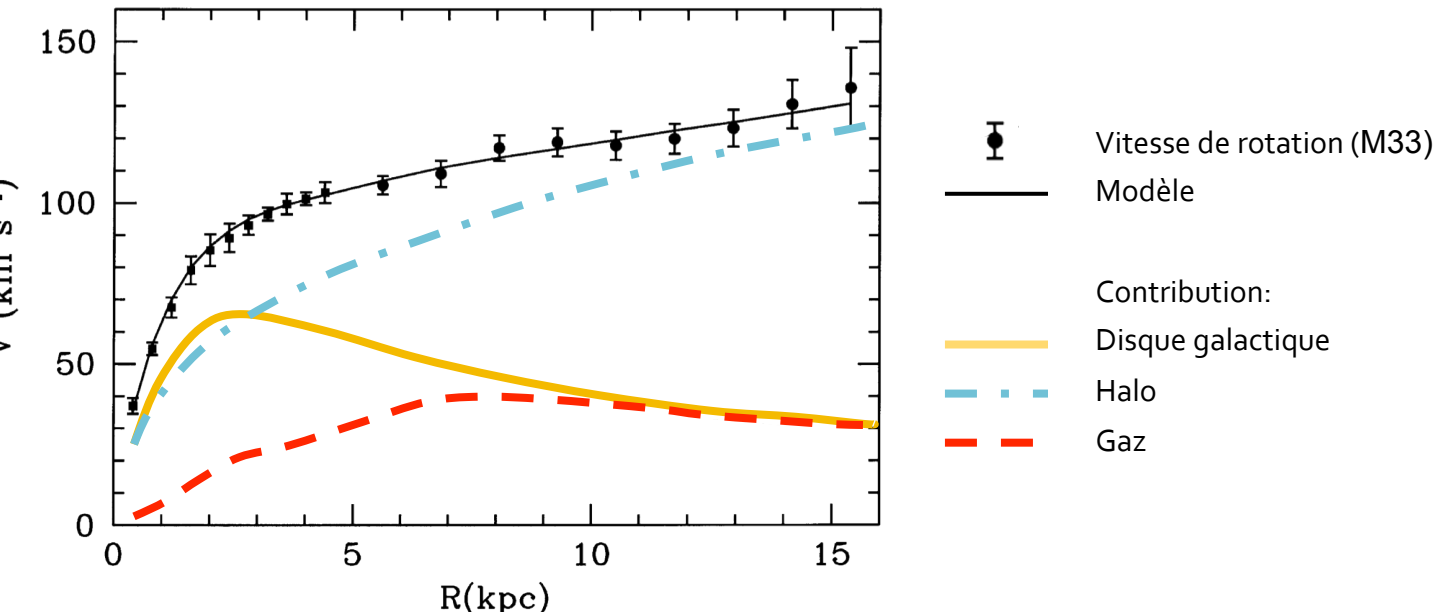
Rotation des galaxies spirales

V. Rubin, K. Ford and N. Thonnard, The Astrophysical Journal, 238 (1980): 471-487



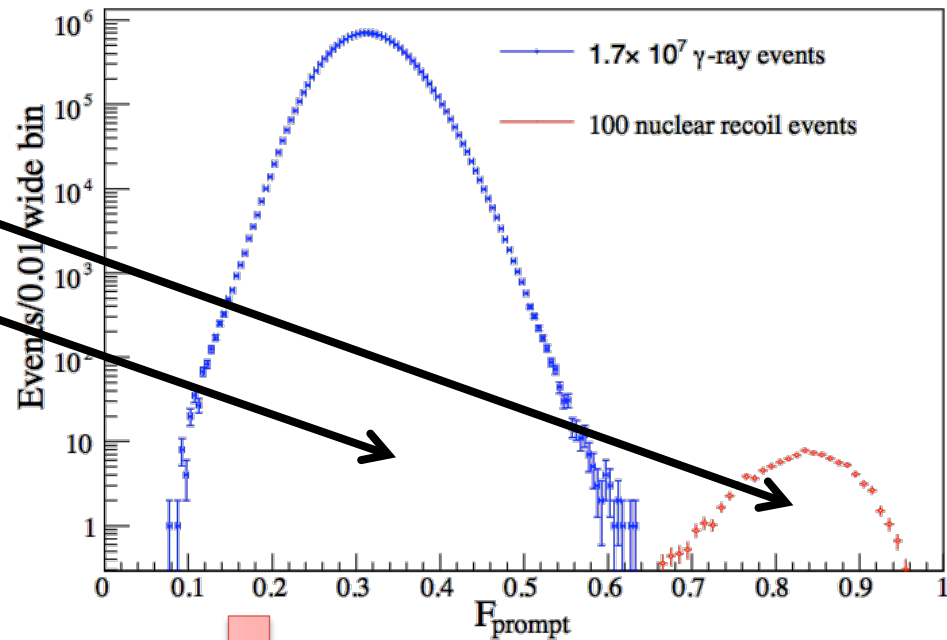
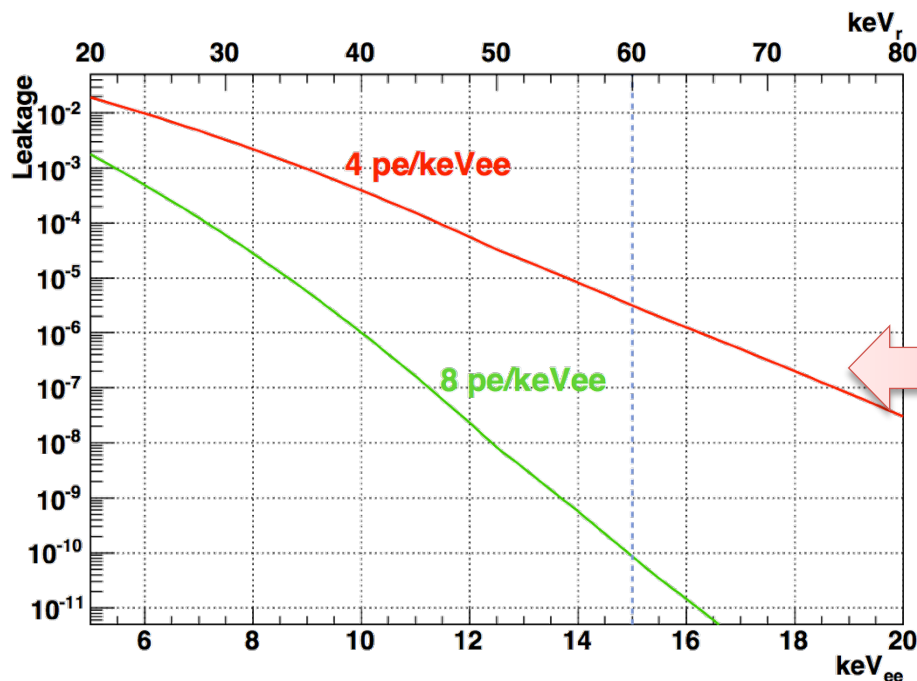
- "Significant mass located at large R"
- "The conclusion is inescapable that non-luminous matter exists beyond the optical galaxy"

E. Corbelli and P. Salucci, Mon. Not. R. Astron. Soc. 311 (2000), 441-447



PSD evaluation

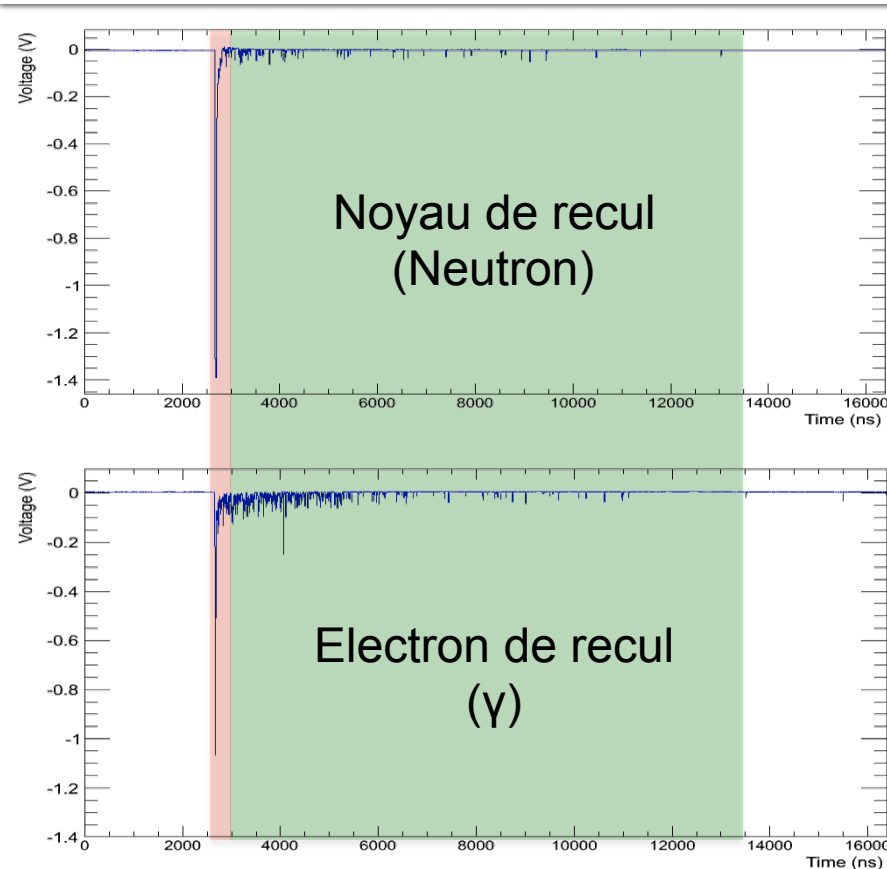
- High F_{Prompt} :
AmBe source
- Low F_{Prompt} :
 ^{22}Na tagged source



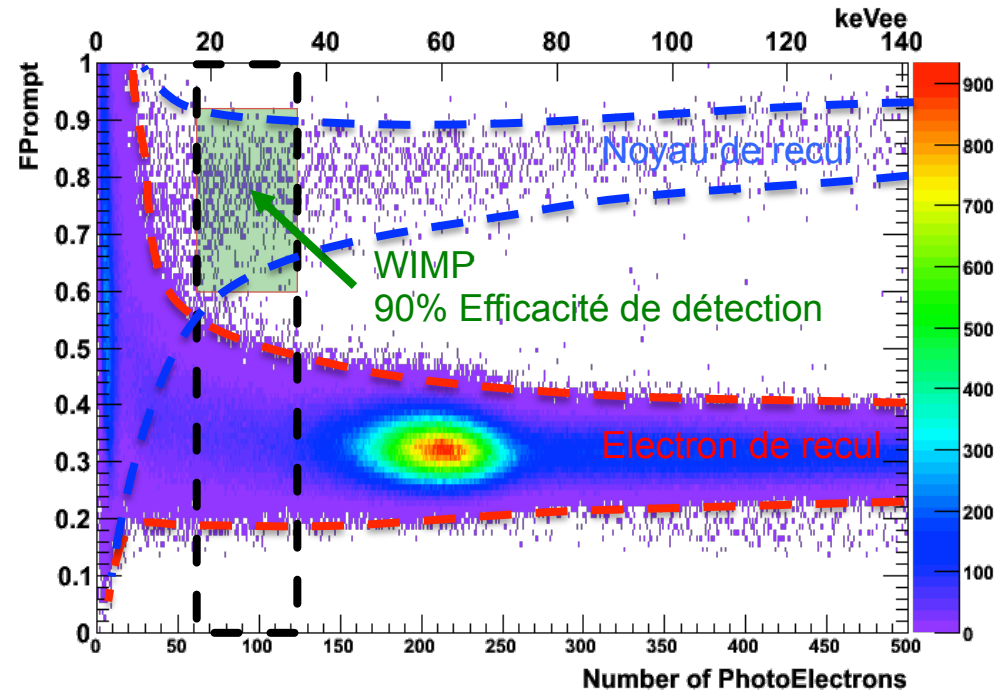
Simple statistical model

Model predicts 10^{-10} at 60keV_r
with 8 PE/keV

Discrimination



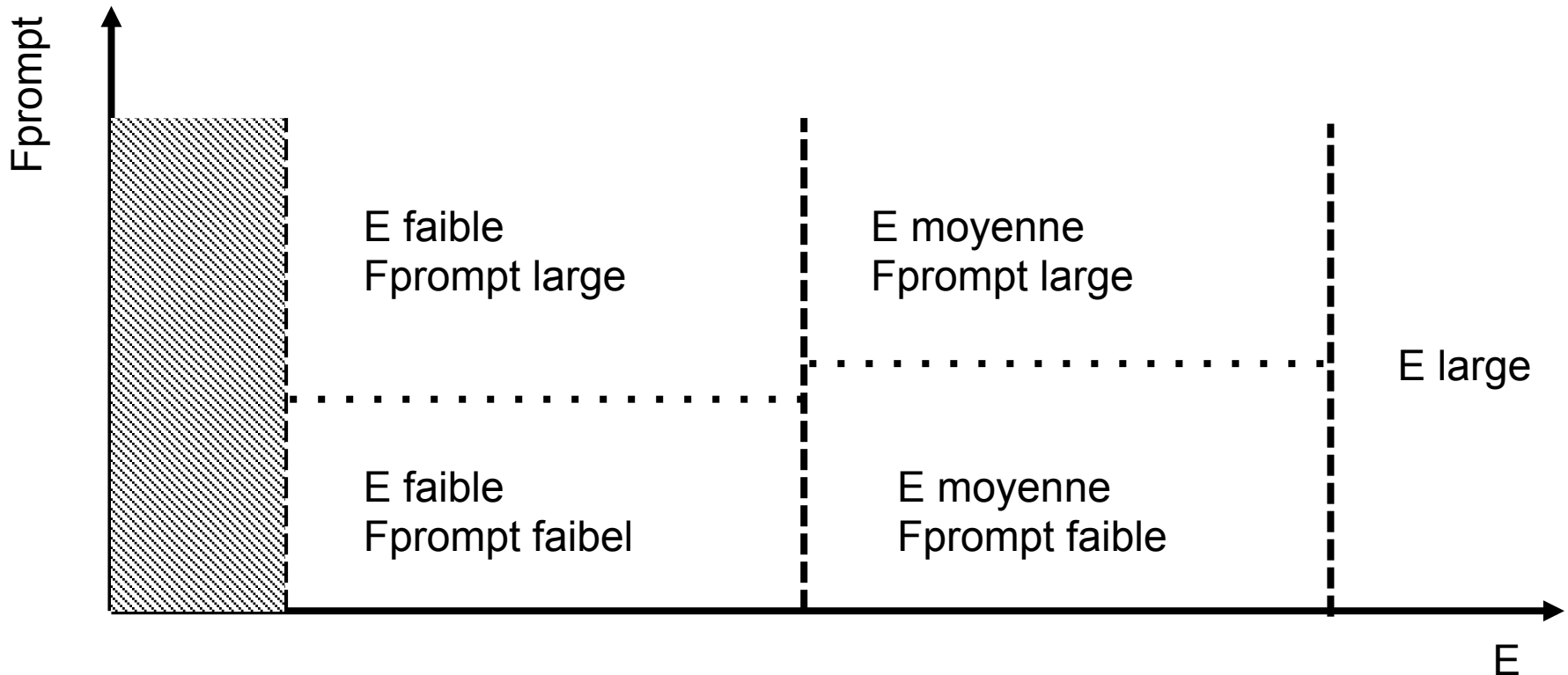
Prompt : 0-150ns
Late: 150ns-10μs



$$FPrompt = \frac{N_{prompt}}{N_{prompt} + N_{Late}}$$

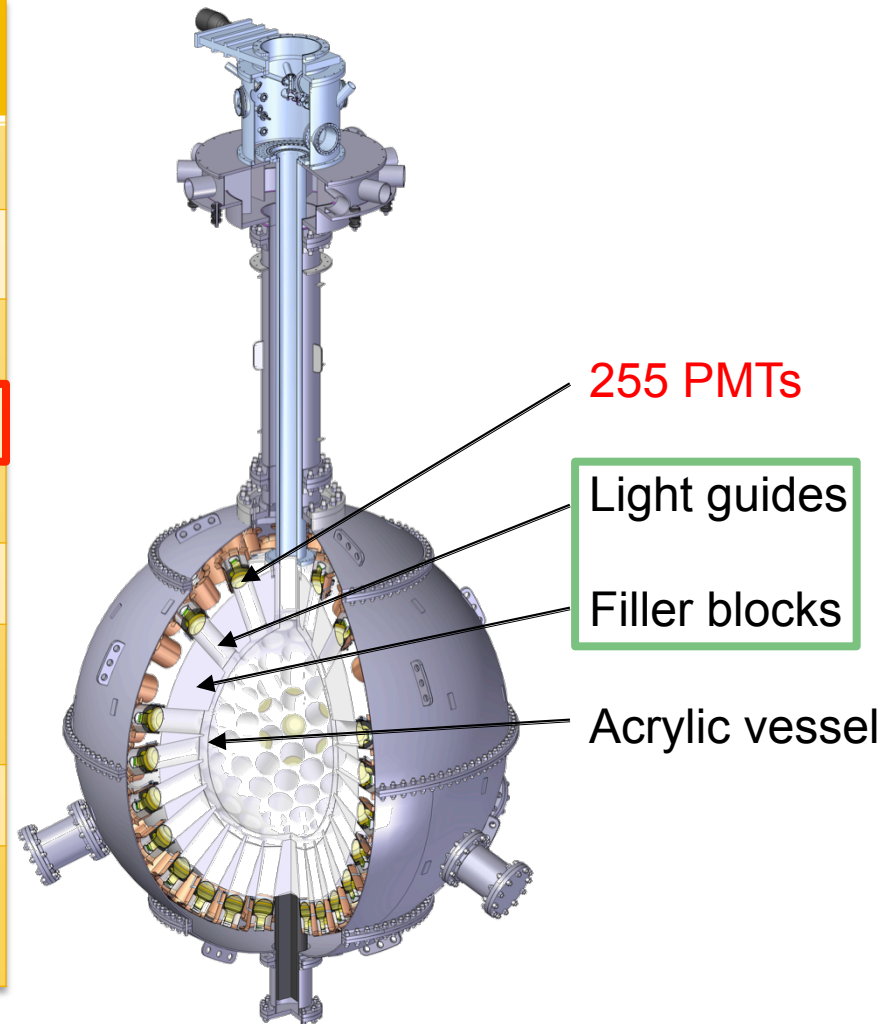
Systeme d'acquisition (trigger)

Somme analogique des 255 canaux
→ Estimation grossiere E & Fprompt



Review: Neutron backgrounds

(In 3 years)	# of neutrons (produced)	Events in ROI
Acrylic vessel	<44 (Ge γ -assay)	<0.096
Light guides	<127 (Ge γ -assay)	<0.015
Filler blocks	<173 (Ge γ -assay)	<0.034
PMTs	2.6×10^5	0.140
PMT mounts	7565	0.010
Rn emanation	<44	<0.081
Rn deposition (3 months UG)	38	0.010
Other sources		0.04
Total	<2.7×10^5	<0.35



Courtesy: Koby Dering

Background targets

3 Ton-year in fiducial volume and Region of Interest (ROI)

Background	Target
Radon in argon	< 1.4 nBq/kg
Surface α 's (tolerance using conservative position resolution)	< 0.2 mBq/m ²
Surface α 's (tolerance using best position resolution)	< 100 mBq/m ²
Neutrons	< 2 pBq/kg
β/γ , dominated by ³⁹ Ar	< 2 pBq/kg
Total Backgrounds	< 0.6 events