

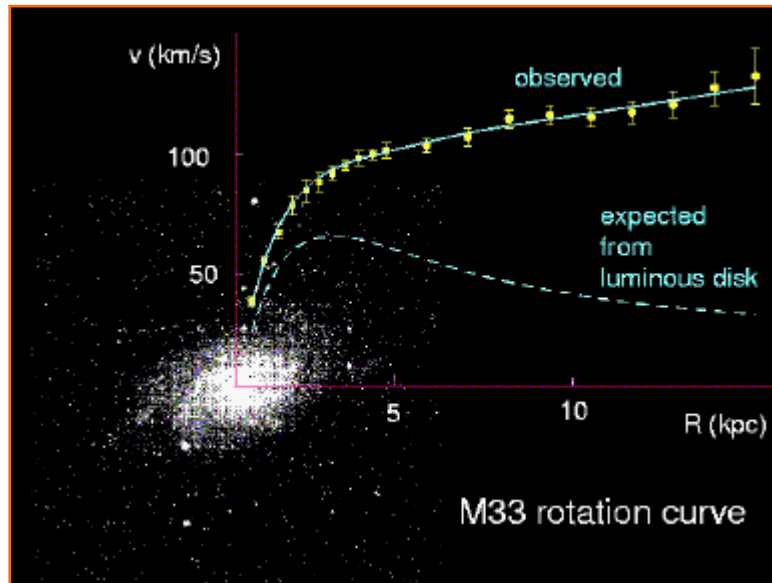


Prospective IN2P3/DAPNIA -Matière Noire-

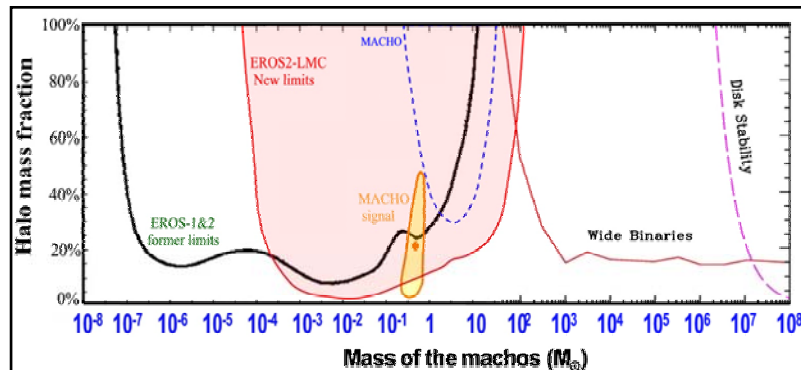
Alexandre Juillard IN2P3/CSNSM Orsay

- Préambule
- Recherche directe et indirecte : état des lieux général
- Prospective « française » dans le contexte mondial

Matière Noire galactique



- **Mesure dynamique (courbe rotation ...)**
 - Halo de Matière Noire baignant les galaxies
 - Densité locale : $\rho_{\text{DM}} \approx 0.3 \text{ GeV/cm}^3$

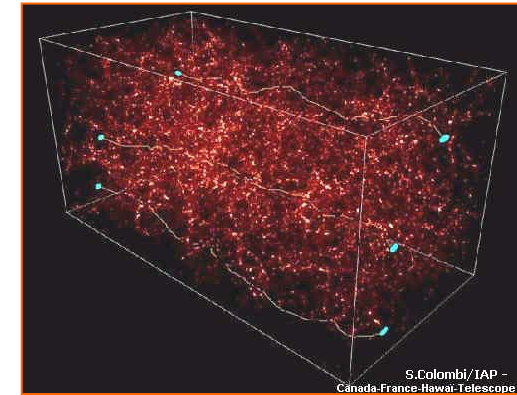
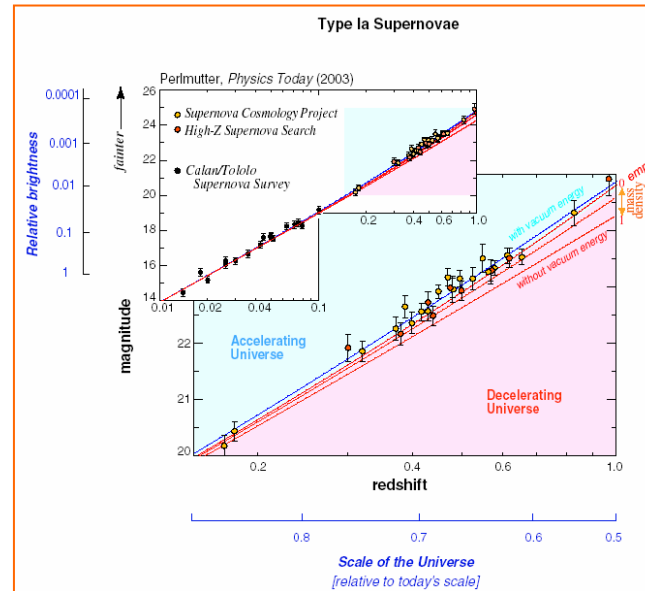
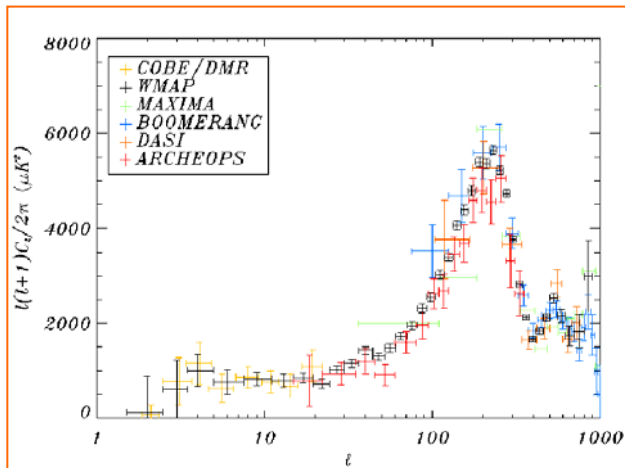
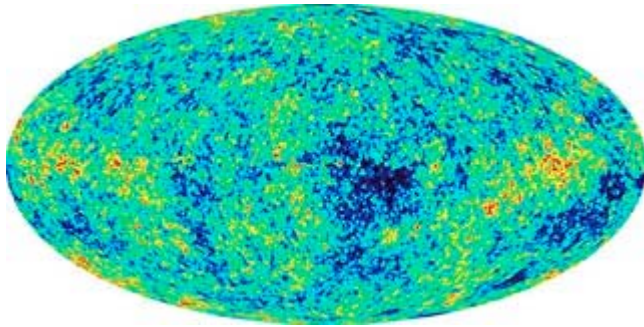


- **Matière Noire baryonique ?**
- **Mesure microlentille (EROS, MACHO...)**
 - MACHOs
 - Trous noirs
 - gaz froids ...

Ne suffisent pas : $< 15\%$

⇒ **Matière Noire non baryonique majoritaire**

Matière Noire aux échelles cosmologiques



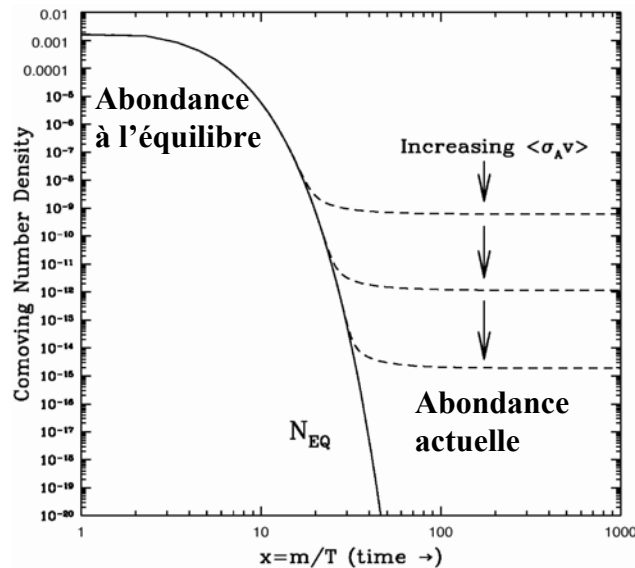
S.Colombi/IAP - Canada-France-Hawaii-Telescope

- Structure à grande échelle
- Simulation
- Anisotropie CMB
- SN IA
- Mesures dynamiques ...

Modèle de concordance :

- $\Omega_{\text{total}} \approx 1$
- $\Omega_{\lambda} \approx 0.7$
- $\Omega_{\text{matter}} \approx 0.3$
 - $\Omega_{\text{baryonique}} \approx 0.05$ (Rq: visible qq %)
 - $\Omega_{\text{matière noire chaude}} < 0.02$ (v)
 - $\Omega_{\text{matière noire froide}} \approx 0.25$ (...)

Candidats Matière Noire froide



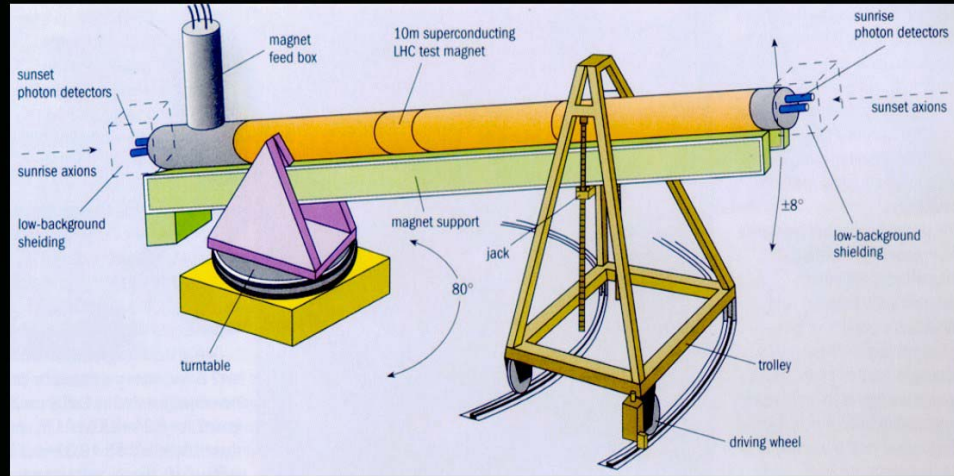
- WIMPs (Weakly Interactive Massive Particle) stables créés après le BB
 - $\Omega_{\text{WIMPS}} \propto (\sigma_{\text{anni}} v)^{-1}$
 - $\Omega_{\text{WIMPS}} \approx 0.3 \Rightarrow \sigma_{\text{anni}} \approx \sigma_{\text{électrofaible}} !$
- Candidat « naturel » : SUSY LSP neutralino χ
 - $m_\chi \approx 10 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$
 - $\sigma_{\chi\text{-nucléon}} \approx 10^{-6} \text{ pb} - 10^{-10} \text{ pb}$
 - cadre pour comparer différentes expériences
 - Recherche directe
 - Recherche indirecte (annihilation)
 - Recherche accélérateur : LEP, Tevatron, LHC...

Mais aussi...

- Axions : $m_\chi \approx 10^{-5} - 10^{-2} \text{ eV}$
 - Large Scale US Axion Search @ Lawrence Livermore National Laboratory
 - CAST @ CERN (participation DAPNIA pour Micromegas)
- Kaluza-Klein (LKKP stable) : $m \approx \text{TeV}$
- Wimpzilla : $m \approx 10^{12} \text{ GeV}$
- ...

CAST experiment

- ✓ Decommissioned LHC test magnet ($L=10\text{m}$, $B=9\text{ T}$)
- ✓ Moving platform (to allow up to 50 days / year of alignment)
- ✓ 4 magnet bores to look for X rays
- ✓ 3 X rays detector prototypes being used.
- ✓ X ray Focusing System to increase signal/noise ratio.



2003 Micromegas data analysis from CAST

$$g < 1.4 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$$

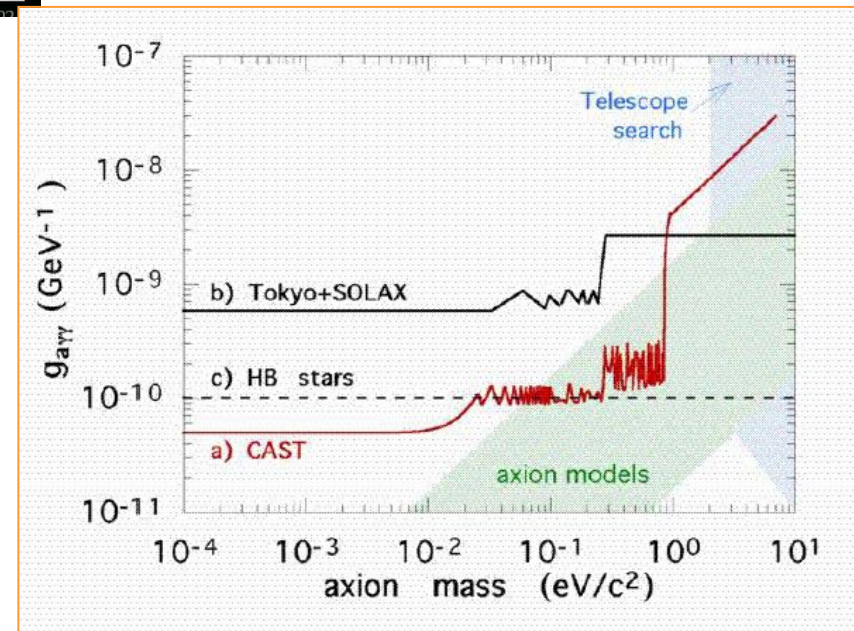
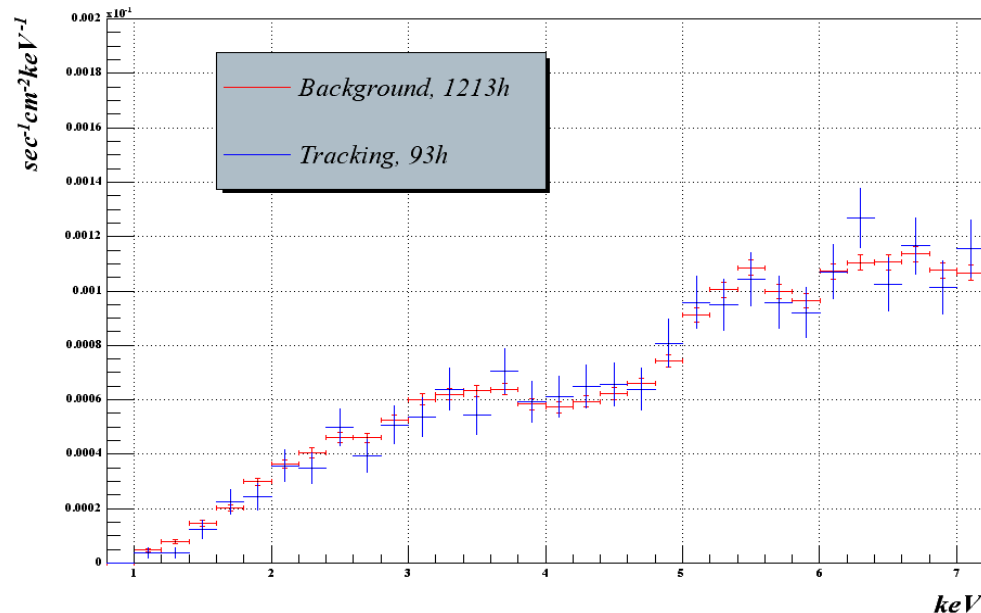
Limit from Tokyo Helioscope :

$$g < 5 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$$

The 2004 CAST limit

will be $< .8 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$

FADC Data



Recherche directe de WIMPs : Signatures diverses

Signal WIMPs = diffusion élastique sur noyau cible

(MSSM : $E_r \approx 10\text{keV}$,
taux interaction $< 1\text{ évts/kg/j}$)

- **Discrimination** reculs nucléaires (χ, n)-reculs électroniques (fond)
 - Quenching recul nucléaire (double mesure)
 - Constante de temps scintillation
 - dE/dx (PICASSO, SIMPLE (France))
- **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** (recul $\approx 10\text{nm}$ dans solide, DRIFT, RetD sur TPC à Grenoble MiMACHe3)

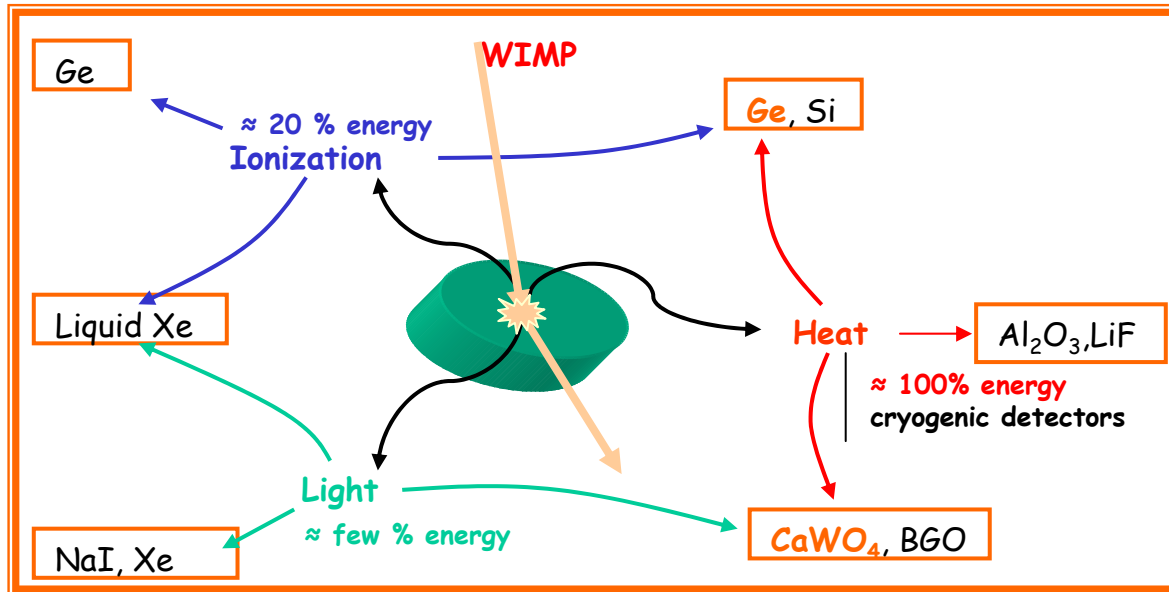
Contraintes



minimales

- Site souterrain (fond 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 ($> \text{an}$)
- Reproductibilité

Recherche directe de WIMPs : Techniques et expériences

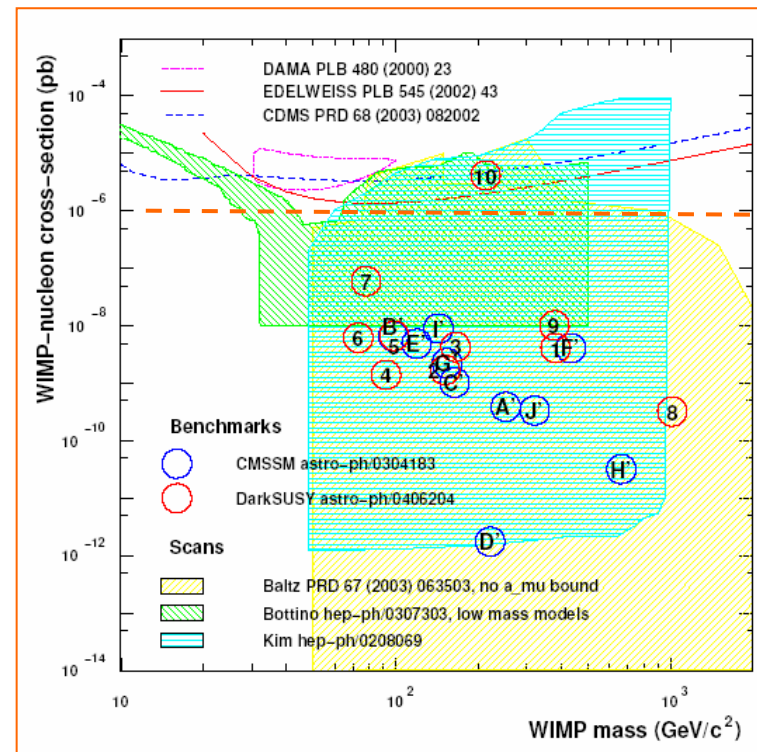
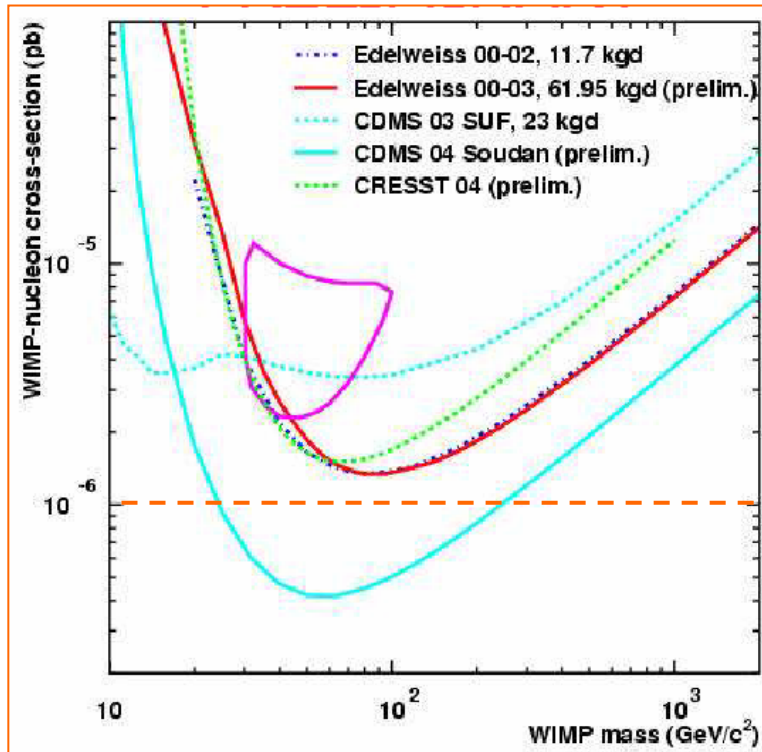


Plus (R&D)...

- Détecteur métastable à seuil :
 - SIMPLE (Fr), PICASSO
- TPC
 - DRIFT (GB), MiMACHe3 (fr)

Discrim.	Name	Location	Technique	Target	Status
None	CUORICINO	Gran Sasso	Heat	41 kg TeO ₂	running
	GENIUS-TF	Gran Sasso	Ionization	42 kg Ge in N ₂	running
	HDMS	Gran Sasso	Ionization	0.2 kg Ge diode	running
	IGEX	Canfranc	Ionization	2 kg Ge Diodes	stopped
Statistical	DAMA	Gran Sasso	Light	100 kg NaI	stopped
	LIBRA	Gran Sasso	Light	250 kg NaI	running
	NaIAD	Boulby mine	Light	65 kg NaI	running
	ZEPLIN-I	Boulby mine	Light	4 kg Liquid Xe	stopped
Event-by-event	CDMS-I	Stanford	Heat + Ionization	1 kg Ge + 0.2 kg Si	stopped
	CDMS-II	Soudan mine	Heat + Ionization	5 kg Ge + 1 kg Si	running
	CRESST-II	Gran Sasso	Heat + Light	0.6 to 9.9 kg CaWO ₄	running
	EDELWEISS-I (Fr)	Modane	Heat + Ionization	1 kg Ge	stopped
	EDELWEISS-II (Fr)	Modane	Heat + Ionization	10-35 kg Ge	starting
	ROSEBUD (Fr)	Canfranc	Heat + Light	0.2 kg BGO	running

Recherche directe de WIMPs : Résultats en 2004



Meilleurs résultats 2004 :

- 3 exp. cryogéniques !
- Typiquement limite $\sigma_{\chi\text{-nucléon}} \approx 10^{-6}$ pb

Valeurs SUSY :

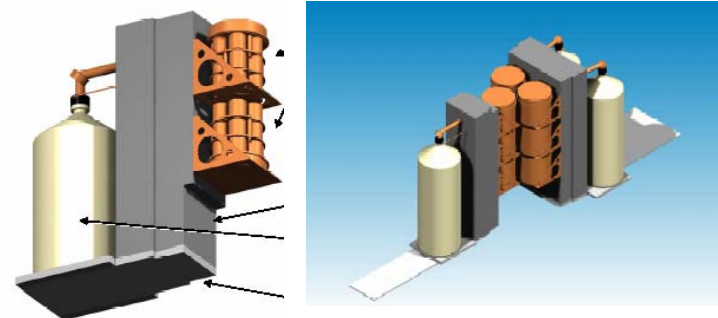
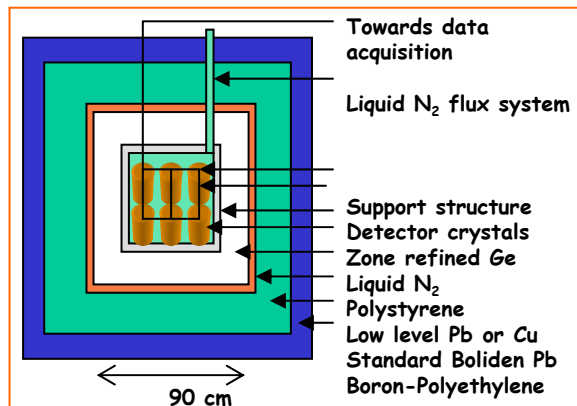
- $\sigma_{\chi\text{-nucléon}}$ « typique » 10^{-9} - 10^{-8} pb
 - quelques chocs par jour par tonne de détecteur
- Jusqu'à $\sigma_{\chi\text{-nucléon}} \approx 10^{-11}$ pb
 - quelques chocs par an par tonne de détecteur
- Pour couvrir largement :
 - Détecteurs ≈ 1 tonne
 - bas fond radioactif (meilleur fond actuel qq evt/kg/j)
 - Excellente discrimination (γ , α , β/n)

Recherche directe de WIMPs : Prospective Ge ionisation

- **France absente**
- Développement pour $^{76}\text{Ge}0\nu2\beta$
- Pionnier pour la Matière Noire (1985-90)
- Meilleurs fonds (IGEX, Heidelberg-Moscou)
 - qq evt/kg/j $\Rightarrow$ limite vers $\sigma_{\chi\text{-nucléon}} 10^{-5} \text{ pb}$



- **2 Projet : détecteur ≈ 1 tonne ^{76}Ge .**
Contrôle poussé fabrication (cosmogénèse) et environnement.
- **GENIUS :** Détecteur plongé dans N₂
Blindage N₂, but 10^{-3} evt/kg/j
- **MAJORANA :** Blindage Ge
Rejet des multiple par segmentation et analyse de forme (à basse énergie?)



- **Genius-TF @ Gran Sasso (fonctionne)**
 - 40kg Ge dans N₂
 - fond visé 0.1 evt.kg.j (gain 1/10)
 - Rq : en qq ans test modulation DAMA à 3σ (mais déjà exclu par EDELWEISS et CDMS)

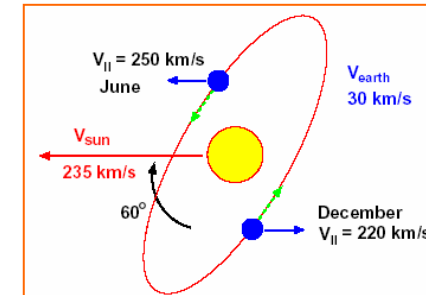
- **SEGA (1detect. Segm)**
 $\Rightarrow$ **MEGA (2detec. Segm.+16 detect)**
 $\Rightarrow$ **MAJORANA (qq 100 détec. enrichis +segmentés)**
- R&D pour instant...



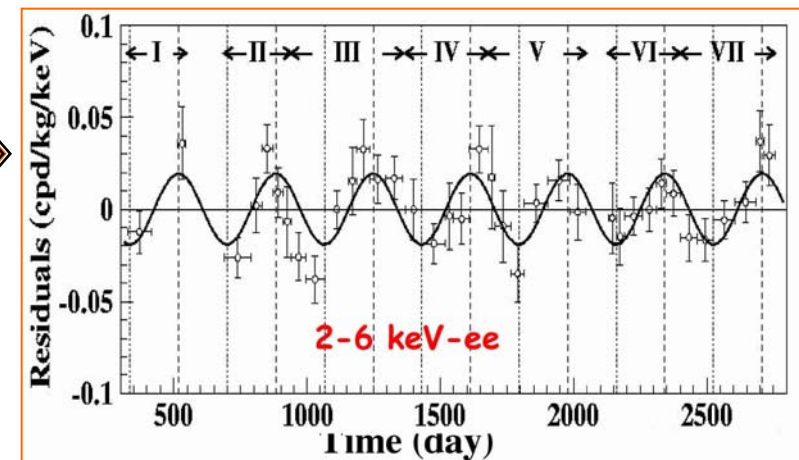
Peu efficace pour Matière Noire : pas de discrimination
 $\Rightarrow$ **Bolomètre Ge Ionisation+Chaleur**

Recherche directe de WIMPs : Prospective scintillateur NaI

- **France absente**
- NaI fortement étudié :
 - **DAMA, ANAIS, NAIAD, ELEGANT, SACLAY...**
- Analyse de forme pour rejet statistique mais pas à basse énergie $\Rightarrow$ **modulation annuelle du signal sur une grande masse** (très proche du seuil...20keV recul $\approx$ 10 photo e-)



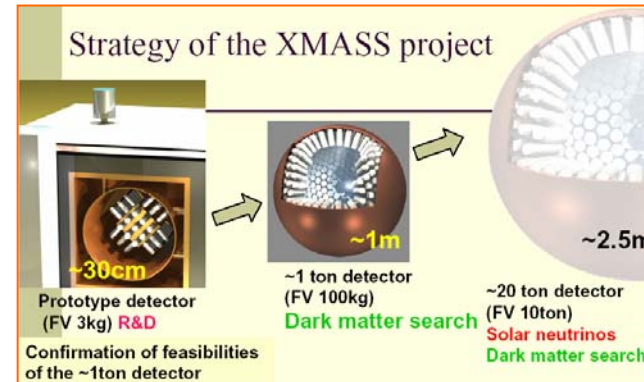
- **DAMA (100kg) : 107 000 kg.j sur 7 ans**
- **Annual modulation @ 6.3 σ**
 $\Rightarrow$ **signal WIMPs ???**
- **Paramètres standards**
 $\Rightarrow M_\chi = (52^{+10})$ GeV and $s_{\chi-N} = (7.2^{+0.4}) \cdot 10^{-6}$ pb
 $\Rightarrow \approx 1$ evt/kg/j dans Ge
 $\Rightarrow$ incompatible avec CDMS et EDELWEISS



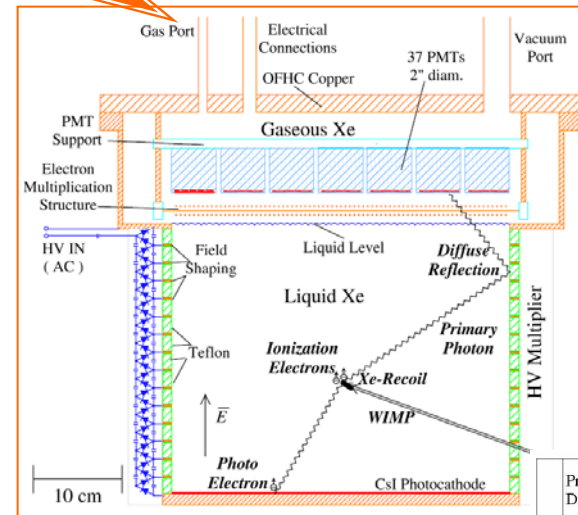
- **LIBRA (=DAMA II) avec 250kg NaI en cours....**
- **NAIAD (65kg Boulby), ANAIS (10 kg Canfranc, 100kg 2004 ?), ELEGANT (620kg Japan) toujours en cours,**
- **+ CsI ...**

Recherche directe de WIMPs : Prospective Xe, Ar, Ne Liquide

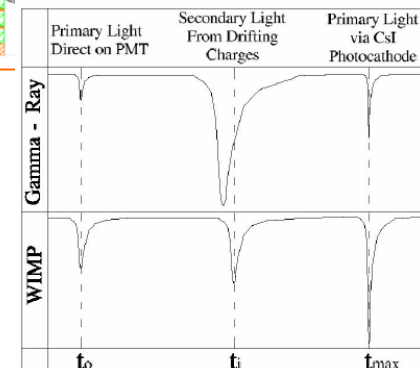
- **France absente**
- Forte activité depuis 5 ans
- **Masse importante facile à atteindre**
- Auto-blindage et définition volume fiduciel avec PMs
- Système double phase : mesure simultanée ionisation ; rejet actif du fond
- Analyse de forme



- **Xe liquide** ($A=131$ mais facteur de forme faible)
 - ZEPLIN : 3.2kg fid. @ Boulby (scint seule)
 - ZEPLIN II : R&D 6kg fid @ Boulby (scint +ioni)
 - XENON (USA): scint+ioni 10kg en marche (R&D), projet 100kg et une tonne
 - XMASS (Japon): scint100kg(3kgfid) (auto-blindage) en marche (R&D), projet 10 tonne
- **Ar liquide** ($A=40$) : WARP (Italie)
(test sur 2 kg, Projet 100kg)
- **Ne liquide** ($A=20$) **He liquide** ($A=4$): CLEAN
projet neutrino mais application possible MN



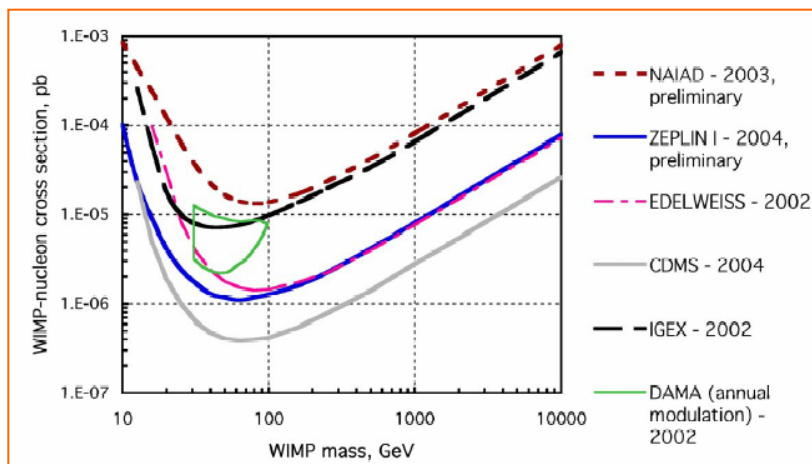
XENON : Principe discrimination
Recul nucléaire – recul électronique



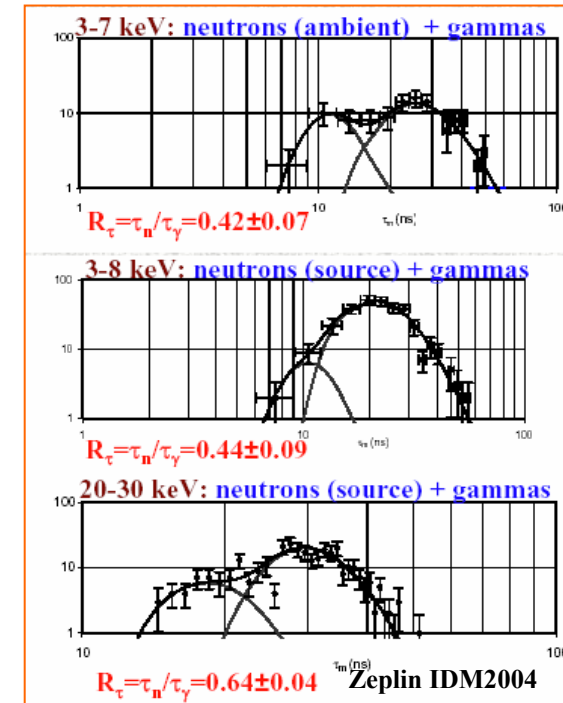
Recherche directe de WIMPs : Xe Liquide, Résultats ZEPLIN-I

- Sensibilité annoncée 10^{-6} pb à $M_\chi = 52$ GeV
⇒ Soustraction du fond >99% indispensable
- Résultats présentés depuis 2 ans mais non publiés
- Analyse statistique floue
- ≈ 2 p.e./keV_{ee} (zone WIMPS < 10 keV_{ee})
- Résolution FWHM $2.8\sqrt{E}$ (100% à 60 keV_{ee}...)
- Pas de calibration neutron à basse énergie (zone WIMPs)
: les neutrons ne sont pas visible !!
- Calibration avec neutron « ambient » !
- Aucune calibration neutron en site souterrain

⇒ important manque de données de base.
⇒ Risque de discréditer les autres projets Xe avec discrimination



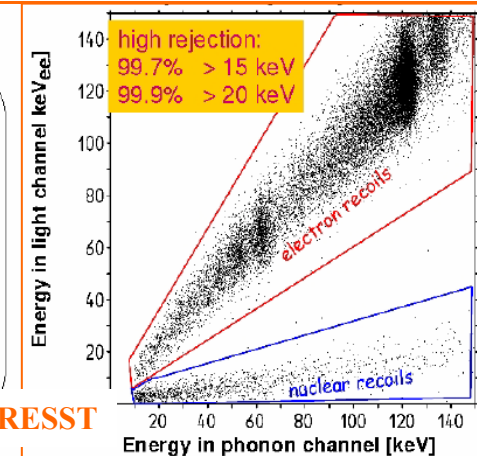
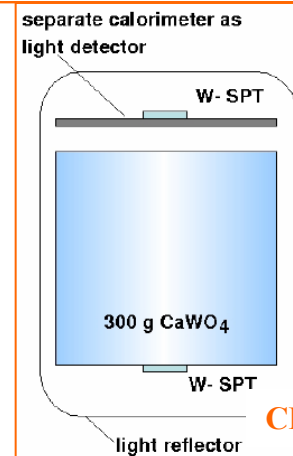
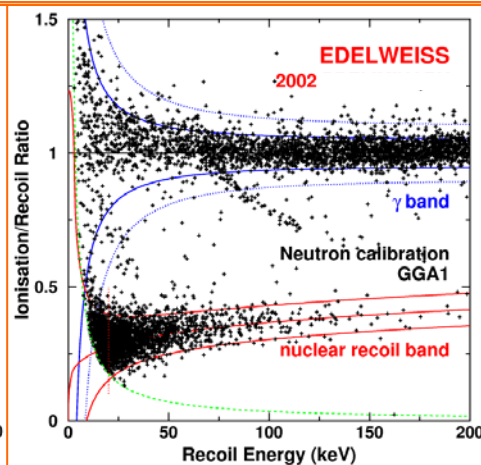
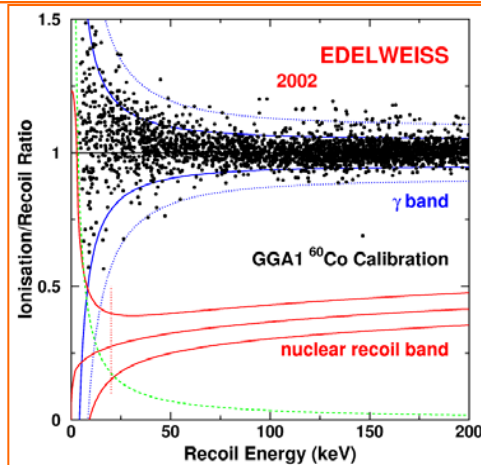
Calibration (en surface) (IDM2004)



Revue des expériences et projets européens de recherche de Matière Noire
(janvier 2005 Barcelone) par ApPEC PRC.

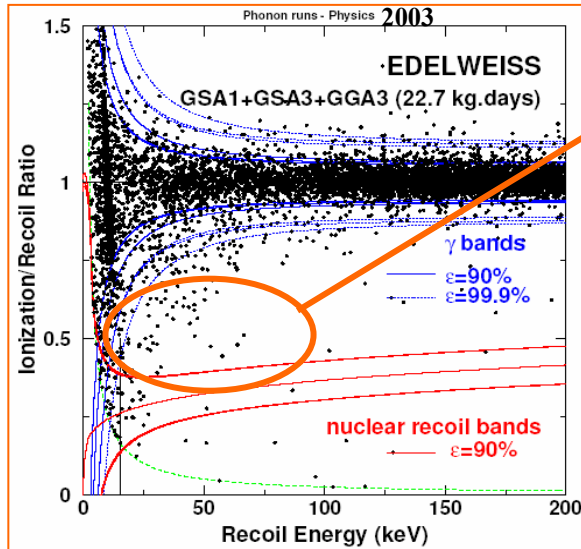
Recherche directe de WIMPs : Bolomètres avec discrimination

- France présente depuis le début au LSM (1992) : CEA-DAPNIA-DRECAM / CNRS-IN2P3-INSU-SPM
- EDELWEISS-II @ LSM :
 - EDW-I (1kg Ge) stoppé mars2004
 - EDW-II (10kg Ge fin 2005, 35kg possibles)
- CDMS-II @ Soudan :
 - 1er run (0.75kg Ge + 0.3kg Si° stoppé Août 2000
 - 5kg Ge+1kg Si en 2005
- CRESST-II @ Gran Sasso :
 - 1er run (0.6kg CaWO_4) stoppé mars2004
 - phase 10kg CaWO_4 débute en 2005
- R&D française sur cristaux luminescents IAS (ROSEBUD@Canfranc) et IPNL
⇒ Al_2O_3 , BGO, CaWO_4 ...



Discrimination $\gamma/n > 99.9\%$

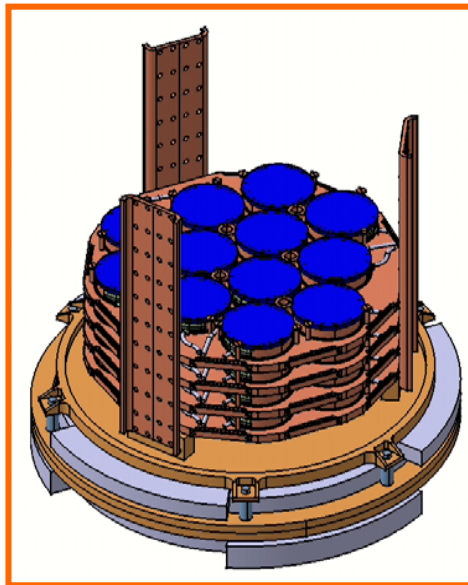
Recherche directe de WIMPs : Prospective EDELWEISS-II



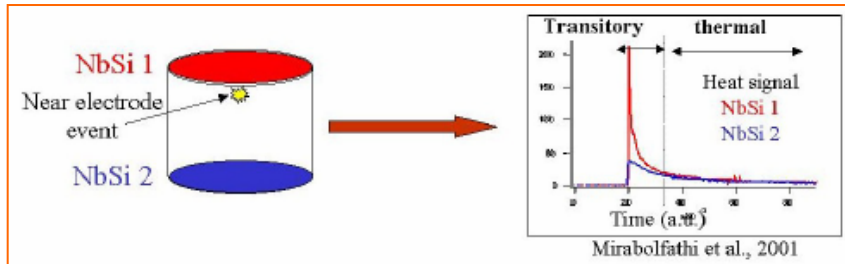
- Problème potentiel EDW-II : événements de surface (diminue la discrimination)
- R&D localisation des événements par voies rapide ionisation
- EDW-II : 21 bolomètres NTD + 7 équipés de couches minces thermométriques NbSi : rejet des événements de surface par mesure phonons hors d'équilibre (idem CDMS)



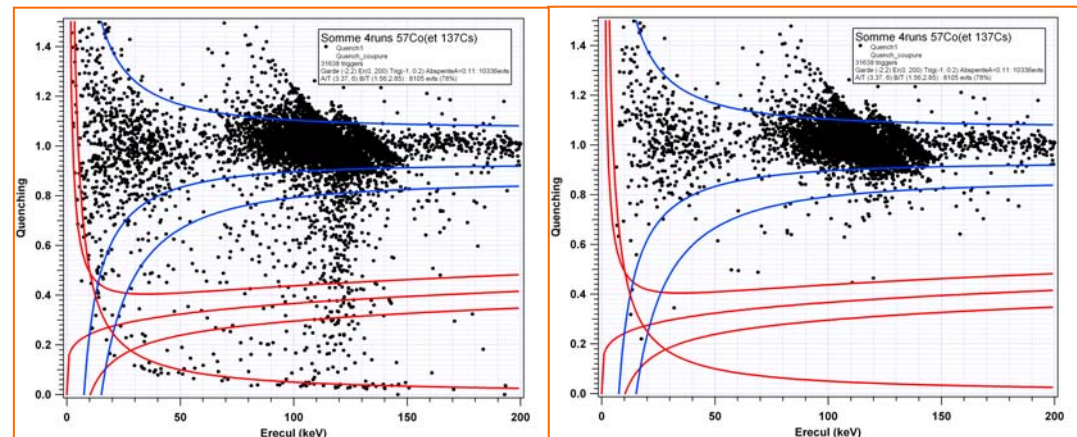
EDW-I



EDW-II

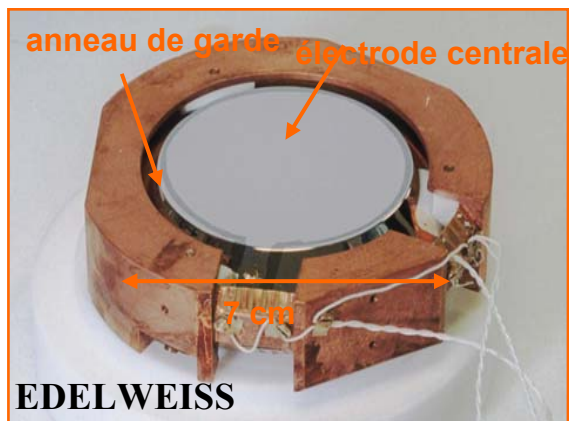


Test Bolomètre Ge/NbSi au LSM :

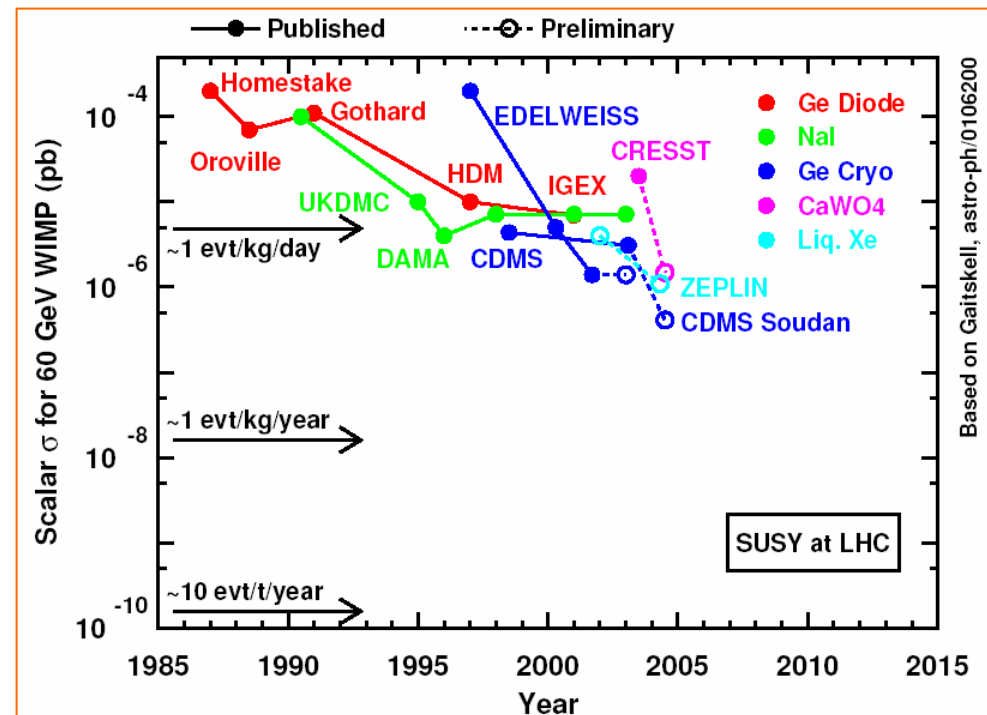
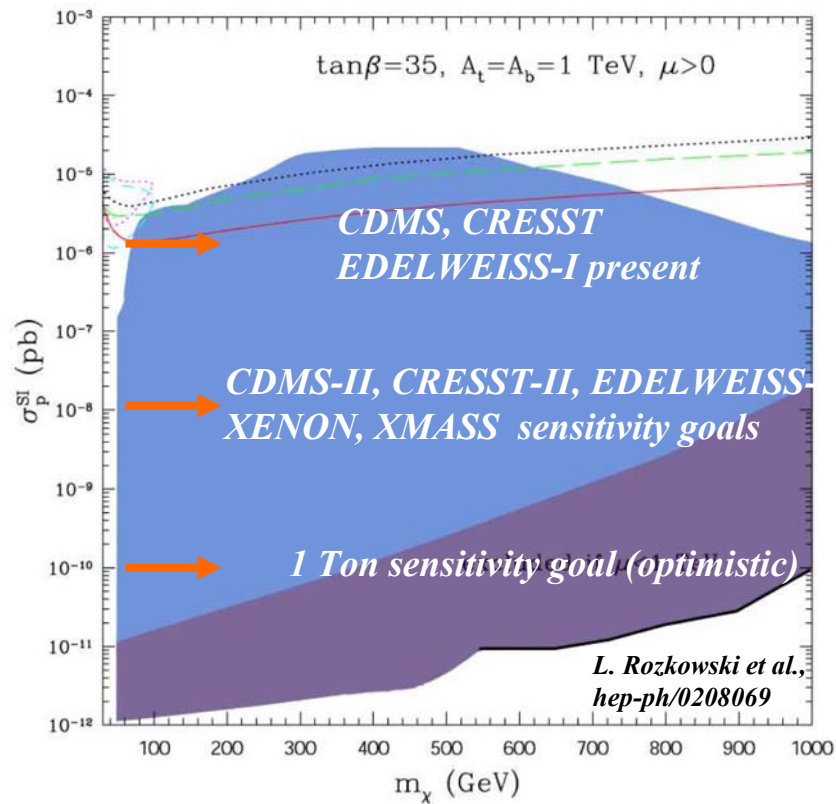


Recherche directe de WIMPs : Prospective bolomètre avec discr.

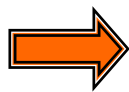
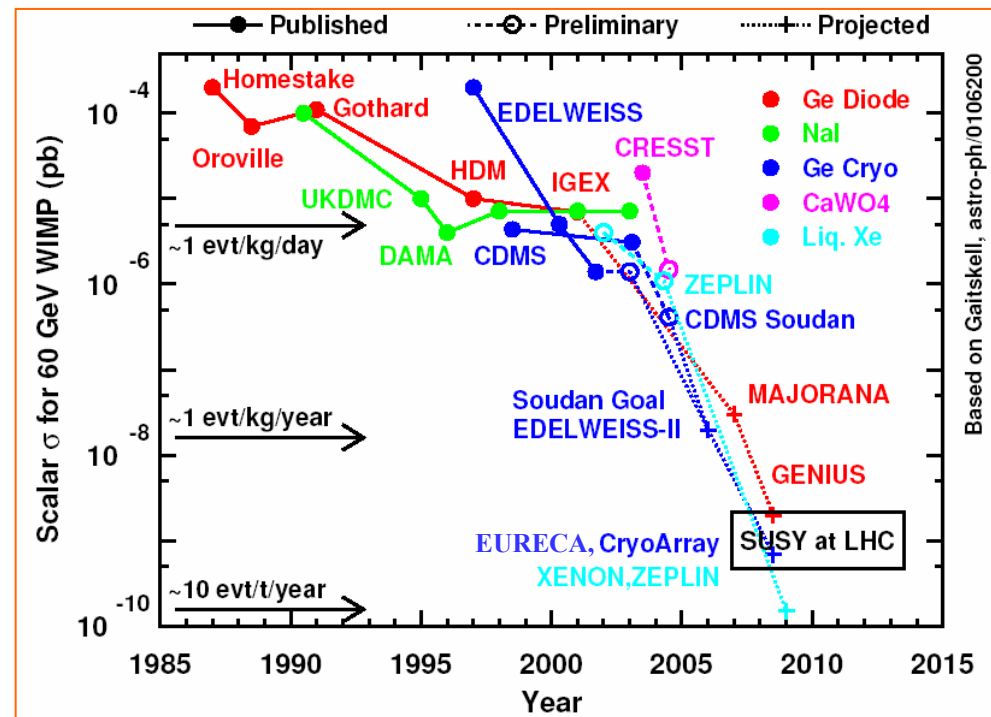
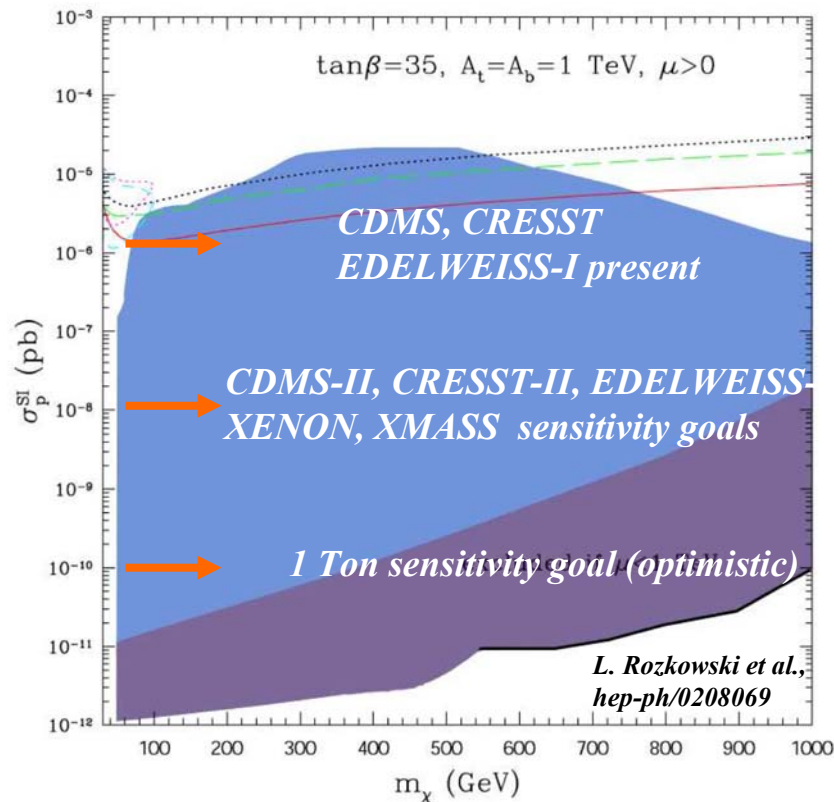
- **CDMS :** *Ge et Si (dépendance A^2 , spectre Wimps et $n \neq$)*
 - CDMS-III
 - **CryoArray ($\approx$ tonne)**
- **EDELWEISS, CRESST :** *techniques différentes (ionisation-chaleur/lumière-chaleur), noyaux différents : forte synergie*
 - EDELWEISS-II, CRESST-II
 - **Projet commun $\approx$ tonne (EURECA)**
« European Underground Rare Event search with Calorimetric/Cryogenic Arrays of detectors »
 - Design Study examinée en jan.2005 par ApPEC PRC



Recherche directe de WIMPs : Bilan prospective recherche directe



Recherche directe de WIMPs : Bilan prospective recherche directe



Signal WIMPs avant LHC ?

Recherche indirecte de WIMPs : Signatures diverses

- Dans la suite WIMPs = χ neutralino MSSM
- Collisions : les WIMPs perdent de l'énergie :
qd $v_\chi < v_{\text{échappement}}$ **capture gravitationnel**
 $\Rightarrow$ **Concentration WIMPS dans zone dense (Terre, Soleil, CG)**
- χ : Majorana $\rightarrow$ annihilation
- **Recherche indirecte $\Rightarrow$ détection produit d'annihilation**

- γ en provenance du
 - **halo galactique**
 - **centre galactique**
- ν en provenance de
 - **Terre**
 - **Soleil**
 - **Centre Galactique**
- $\bar{p}, \bar{D}, e^+$ en provenance du **halo**

- Mais flux difficile à déterminer précisément :
 - **structure du halo**
 - **structure du CG**
 - **taux capture, annihilation**
 - **Paramètres SUSY** ...

Recherche indirecte de WIMPs : Signal γ , principe

- **Monochromatique**
 - $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$ $E_\gamma = m_\chi$
 - $\chi\chi \rightarrow \gamma Z$ $E_\gamma = m_\chi - m_Z^2/4m_\chi$

⇒ directionnalité, signature claire, flux faible et forte dépendance à la structure du halo
- **Continuum**
 - $\chi\chi \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow \gamma\gamma$

⇒ énergie plus faible, flux plus important mais signature moins claire...



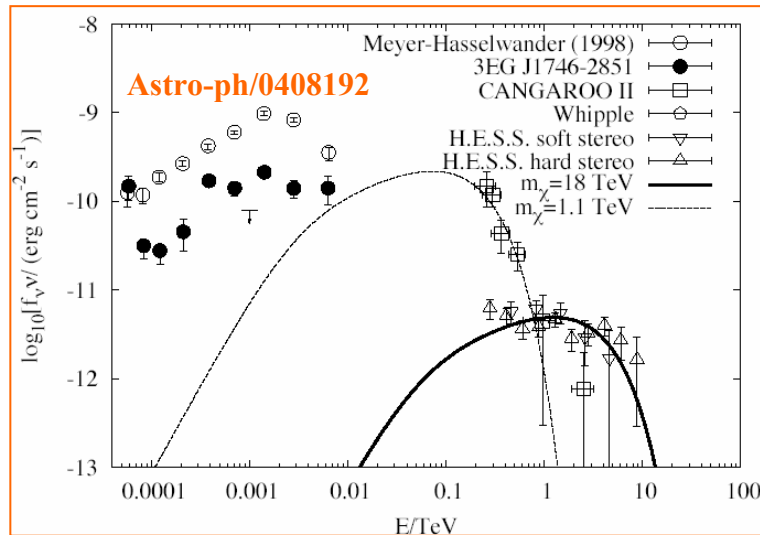
- **Mesure par Télescopes Cherenkov Atmosphérique**
- **France bien présente**
 - CAT (0.2-20TeV) et CELESTE (50-300GeV)
 - HESS (Namibie, 4 télescopes en marche depuis début 2004, seuil ≈ 100 GeV)
forte implication IN2P3
 - HESS-II en projet (seuil plus bas)

- CANGAROO-III (Australie-Japon) : 4 télescopes
- VERITAS (US) : 4 télescopes (1 aujourd'hui)
- MAGIC (All-Esp Canaries), projet MAGIC-II

- **Mesure spatiale**
- INTEGRAL (>2003) : (15keV-10MeV) énergie faible pour SUSY, part. fr.
- AGILE (2005) : (20MeV-30GeV) Italie
- GLAST (2007) : (10MeV-100GeV) participation française
- AMS-II : participation française



Recherche indirecte de WIMPs : Signal γ résultats & perspectives



- Signal continuum γ centre galactique (Cangaroo, HESS)
- Fit Matière Noire Multi-TeV (...)
 $\Rightarrow$ Illustre bien la difficulté de mise en évidence sans signature claire
- 511 keV e⁺e⁻ observation INTEGRAL
 Matière Noire légère : $m \approx 1\text{-}100 \text{ MeV}$?

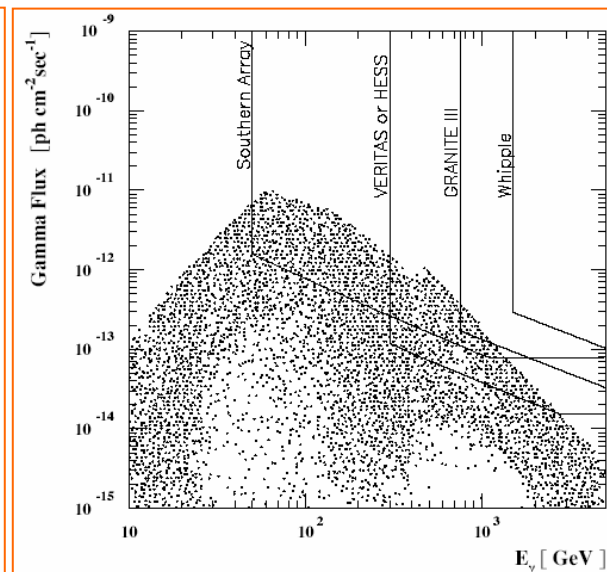
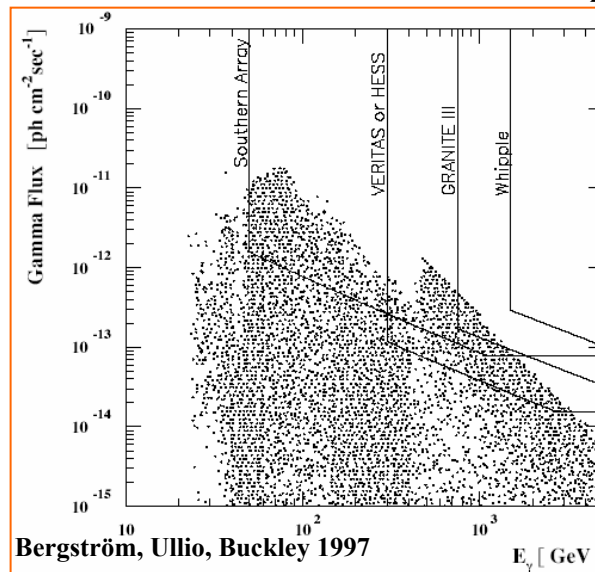
Sensibilité Télescope Cherenkov

Signal $\gamma\gamma$

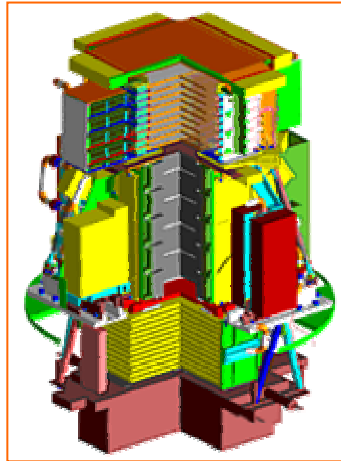
NFMWHalo profile $\Delta\Omega 10^{-5} \text{ sr}$

Signal $Z\gamma$

- Perspective d'observation importante pour 10ans
- Bonne complémentarité GLAST-Télescope sols
- Mais forte dépendance du flux aux modèles de Halo...



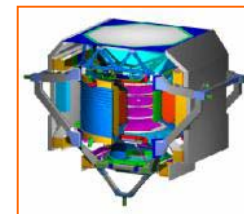
Recherche indirecte de WIMPs : Signal particules chargées



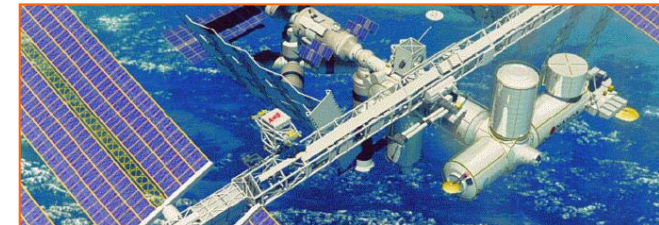
PAMELA

- $\chi\chi \rightarrow \bar{p}, \bar{D}, e^+$
- France présente (AMS)
- Détection difficile :**
 - Pas de directionnalité
 - Fond peu connu et souvent dominant
 - Pas de signatures claires
 - Modèles de diffusion complexes
 - Pertes d'énergie dans le milieu
 - coeff. Diffusion
 - réaccélération, champ magnétique

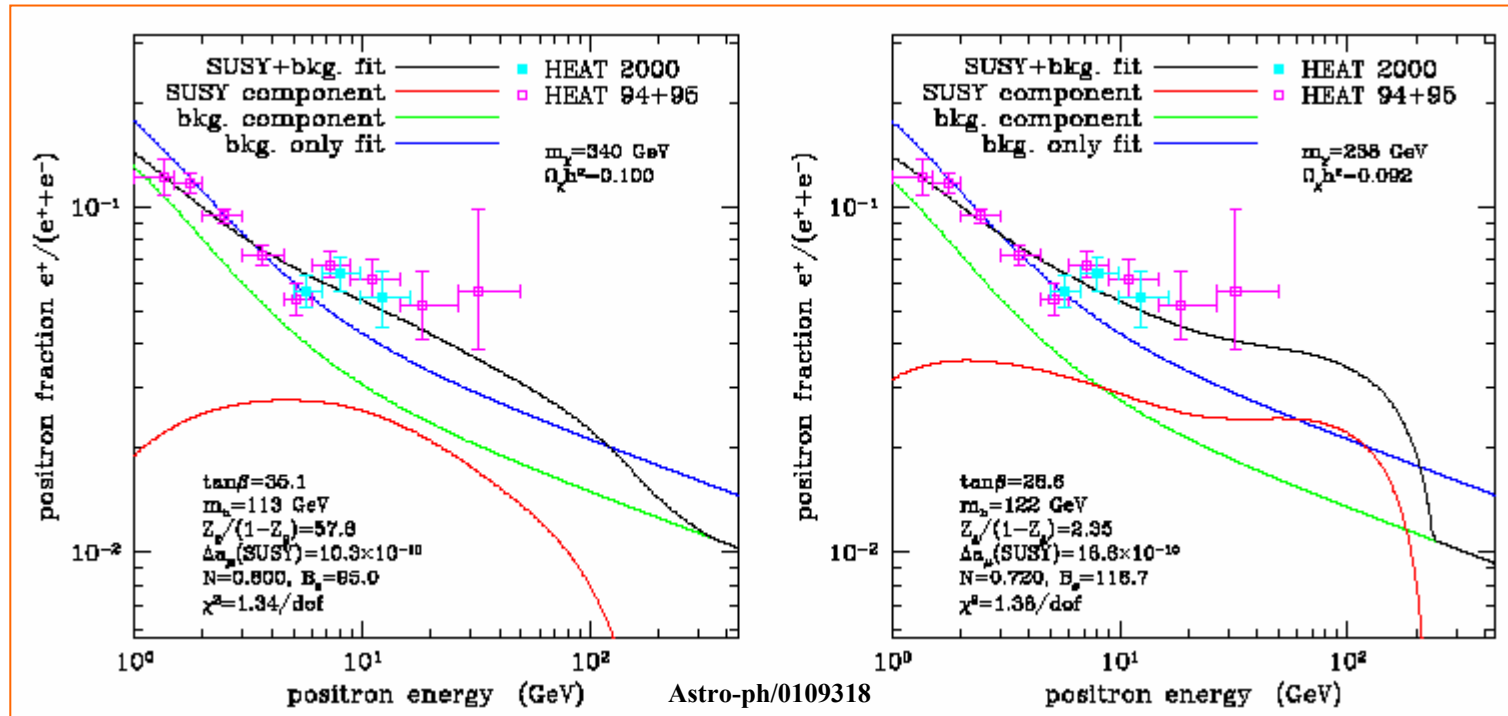
- Manips 1ère génération :
 - AMS-I (part. IN2P3, Navette 98)
 - HEAT (Ballon US 94-2000)
 - CAPRICE (Ballon Italie 94-98)
 - BESS (Ballon US-Japon 93-98)
- Manips futures :
 - AMS-II (part. IN2P3, ISS 2005)
 - CALET (Japon, ISS 2010)
 - PAMELA (Ballon Italie 94-98)
 - GAPS (projet US, ballon et satellite)



AMS@ISS



Recherche indirecte de WIMPs : Signal particules chargées



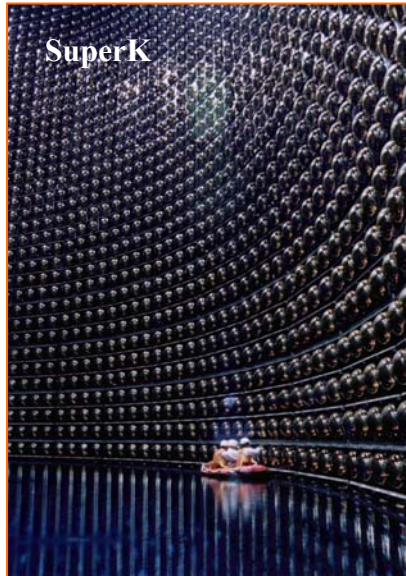
Ex : excès positron HEAT :

- Fit MSSM possible mais « boost factor » $\gg 30 \dots$
- pas d'évidence claire
- Signaux intéressants en complément d'autres (γ , ν , directe ...)



Futur ??

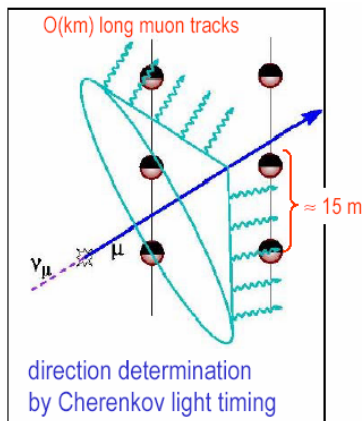
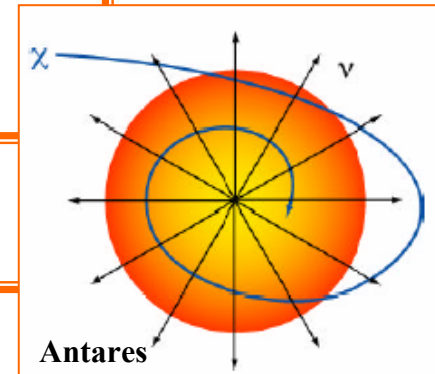
Recherche indirecte de WIMPs : Signal ν



- $\chi\chi \rightarrow \nu\dots$

Détection :

- flux de μ ascendants produit par interactions pendant la traversée de la Terre.
- Détection d'un excès de flux en provenance des zones denses (Terre, Soleil, CG)
- Grosse incertitude dans les flux (idem γ)



Expériences actuelles

- SuperKamiokande
- BAIKAL (Ru-All)
- AMANDA
- ANTARES (fr)
- NESTOR (Gr)
- NEMO (projet It.)

projets futur

- ⇒ Hyperkamiokande (Mtonne ↔ SK 50kt)
- ⇒ Megatonne Europe
- ⇒ 0.01-1 km³
- ⇒ ICECUBE (km³) en 2010
- ⇒ projet commun km³
- Design Study acceptée (6ème PCRD)

Recherche indirecte de WIMPs : Meilleurs résultats

WIMP indirect searches : best present limit from Super-K

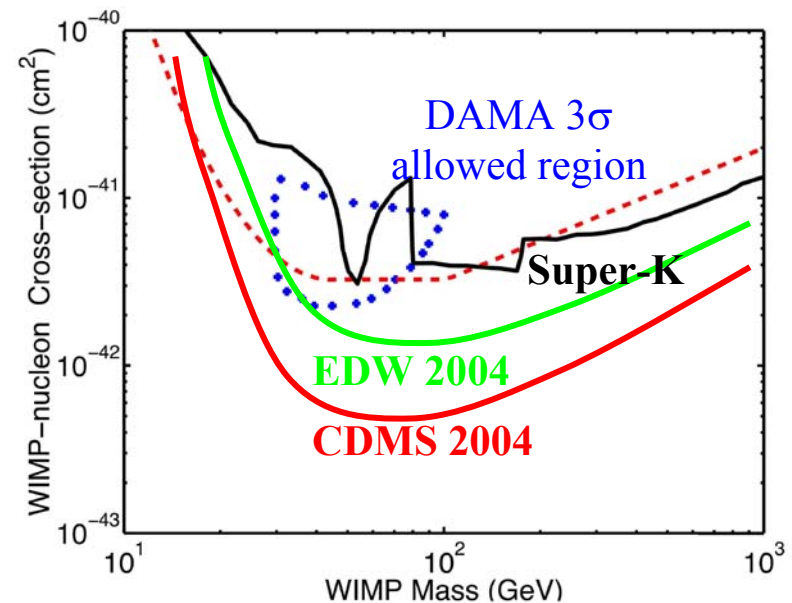


Super-Kamiokande:

50 kT water Cherenkov detector
(22.5 kT fiducial)
11146 inward-facing 20 in. PMTs
1885 outward-facing veto PMTs

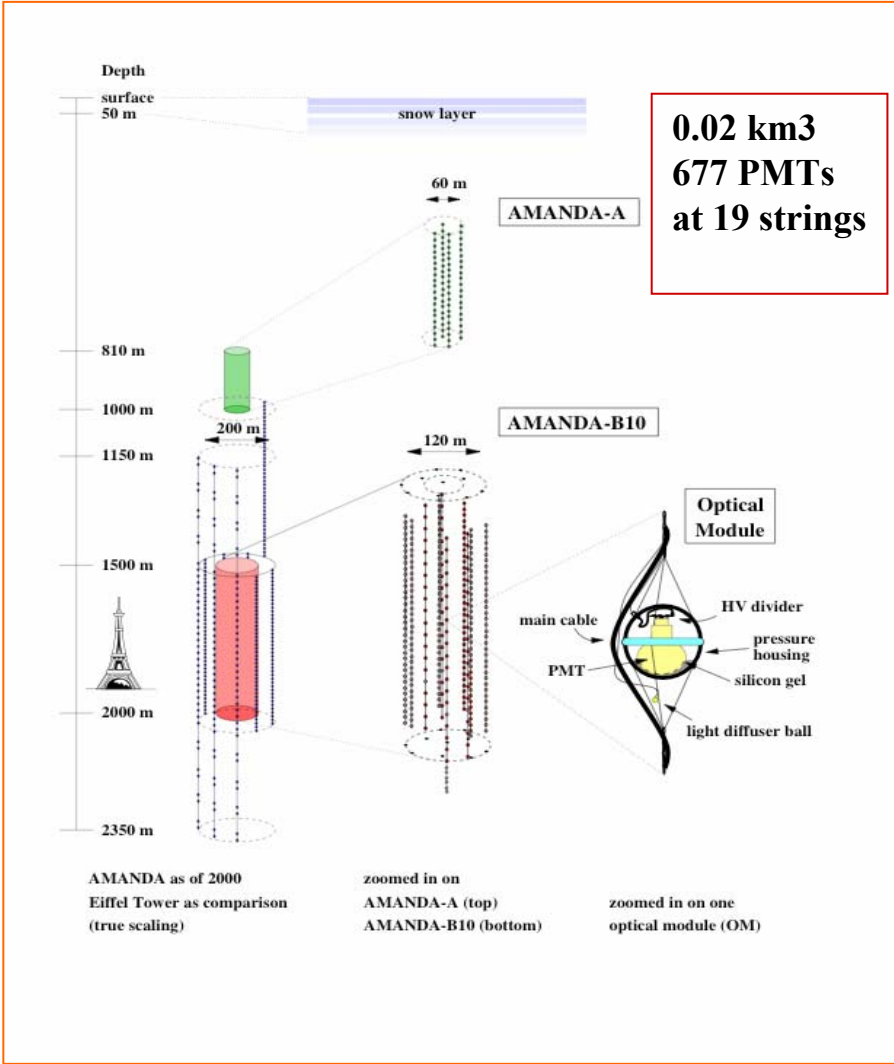
Combined analysis for sun,
earth and galactic center:
**no excess over atmospheric
neutrino expectation** in any
cone angle.

Conservative limit within a
factor ≈ 5 -10 of CDMS

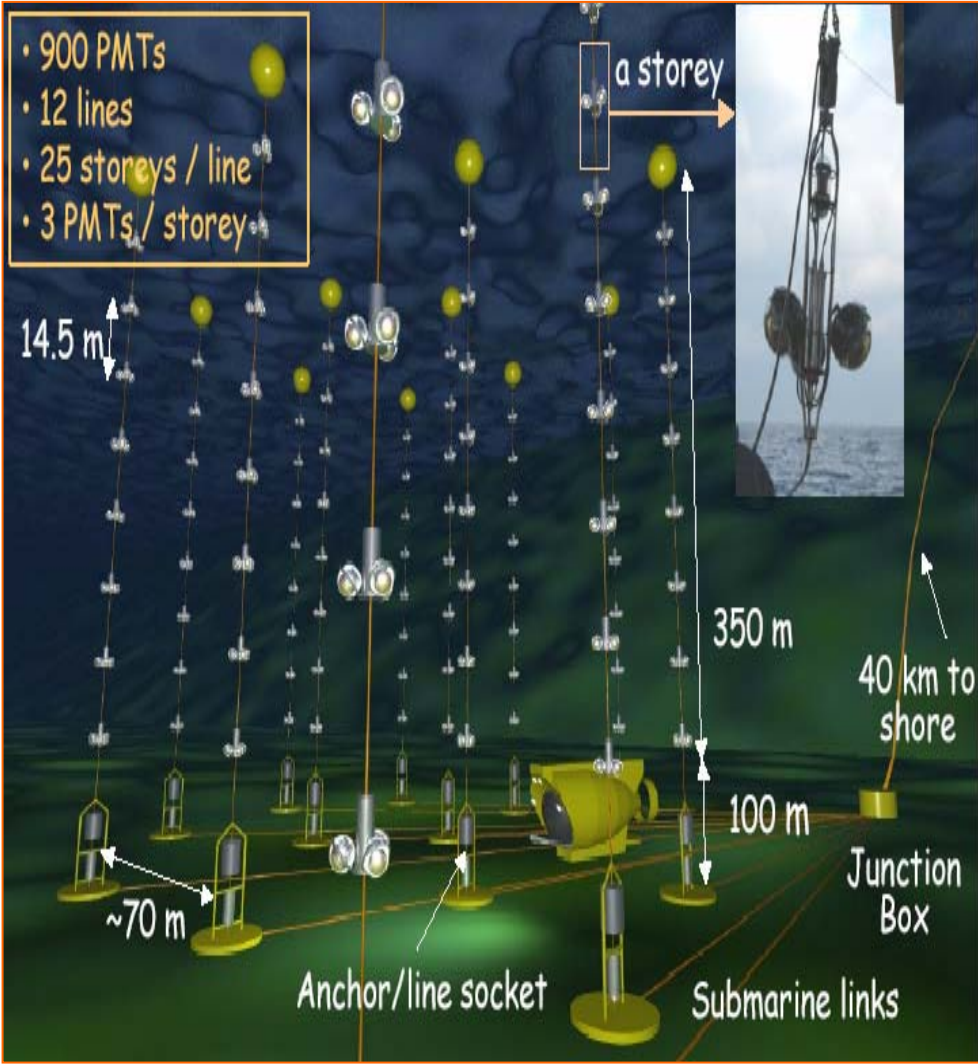


Recherche indirecte de WIMPs : détecteur ν 0.1 km^3

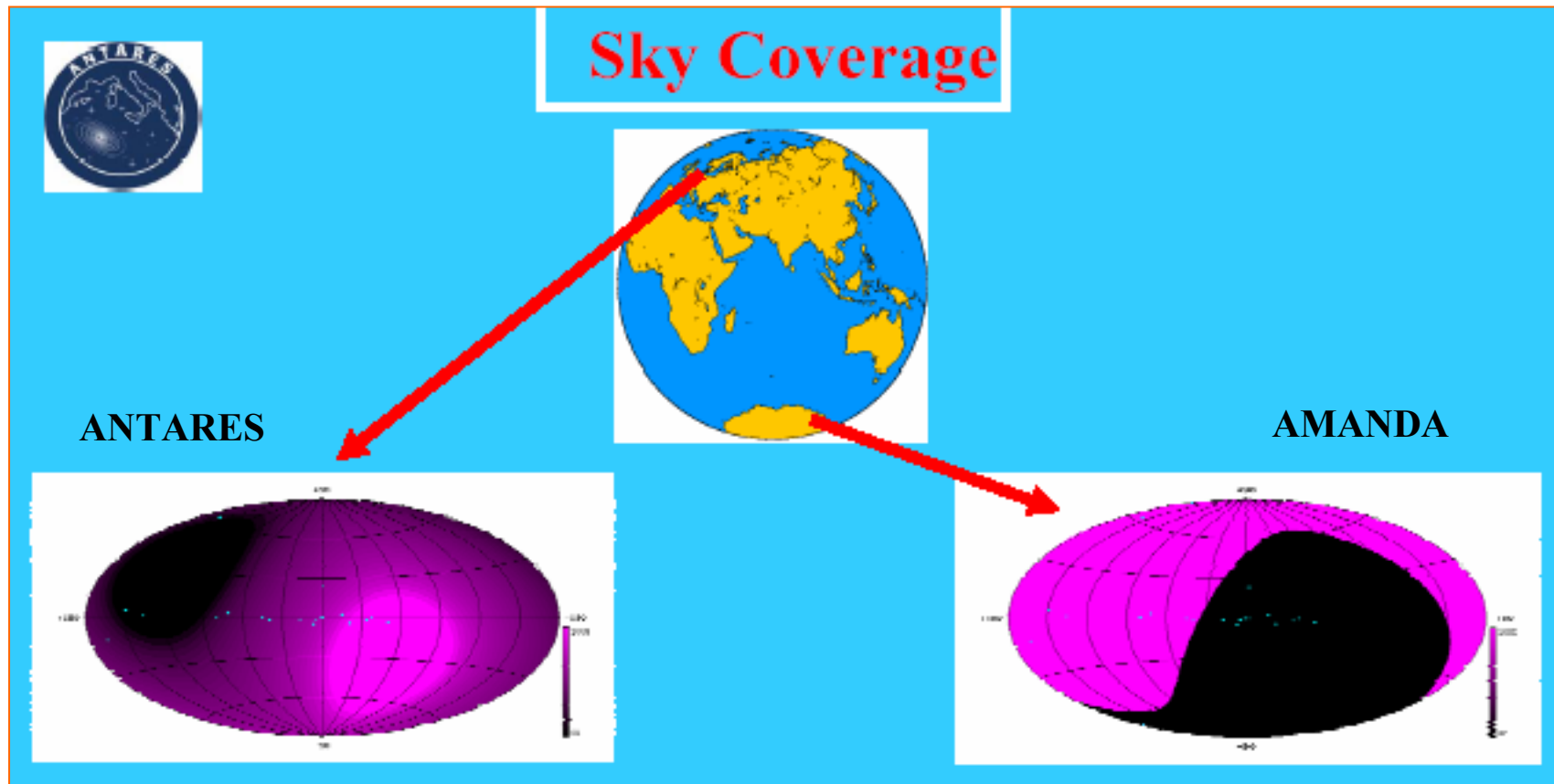
AMANDA-II : 2003-



ANTARES 0.1 km² → 2006-07



Recherche indirecte de WIMPs : détecteur ν 0.1 km^2



- Bonne complémentarité
- ANTARES : $3.6 \pi \text{ sr}$ avec $1.6 \pi \text{ sr}$ commun AMANDA
- ANTARES : CG visible 70% du temps

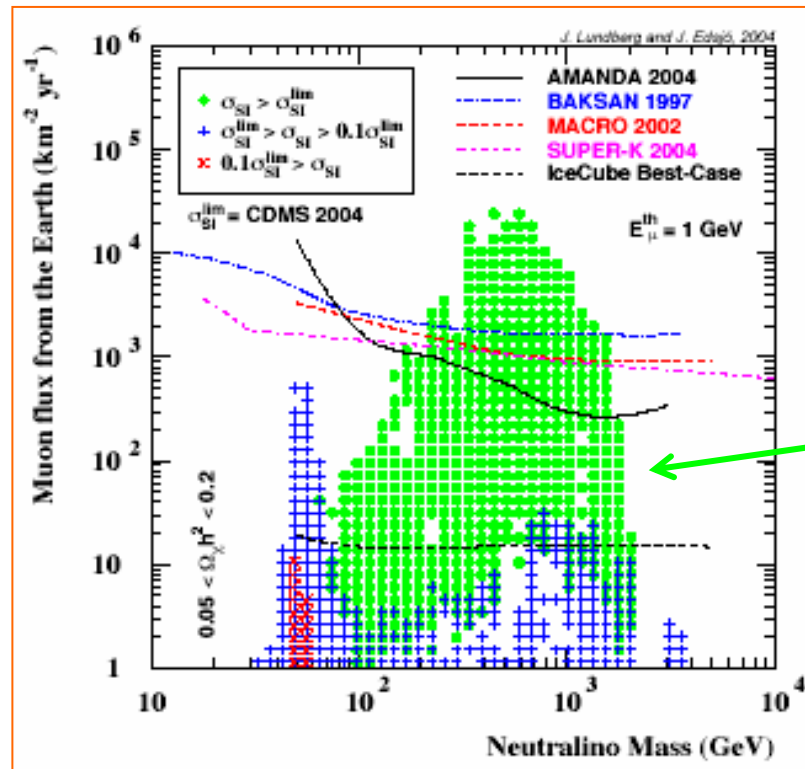
Recherche directe/indirecte: flux μ de la Terre

- Interaction χ avec noyaux lourds (Fe, Ni) : couplage SI dominant (A^2 grand)...
- Caractéristiques halo interviennent comme en recherche directe : comparaison aisée
- Taux capture et annihilation fortement réduit par la capture solaire ?

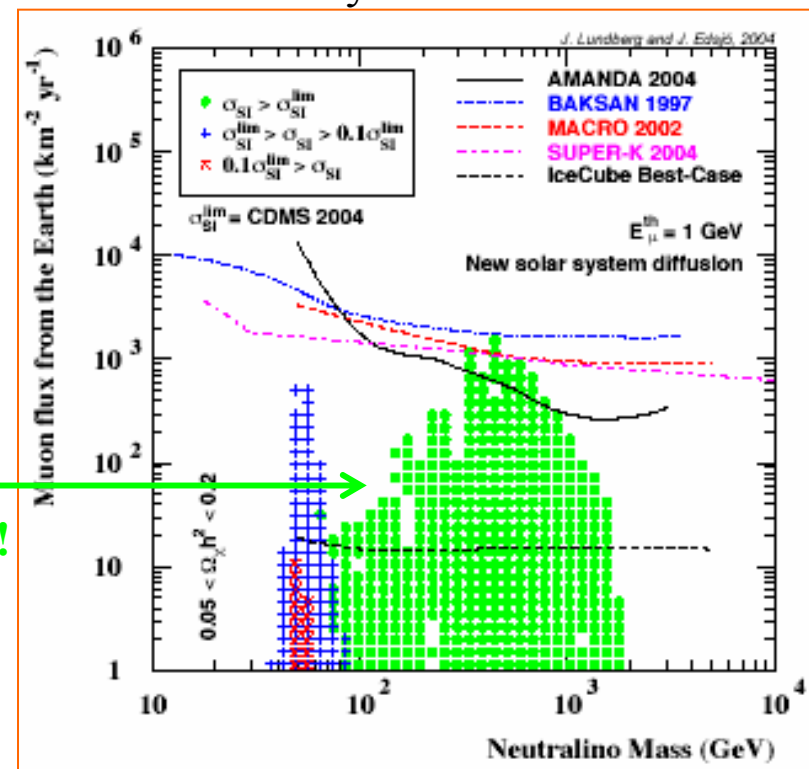
(J. Lundberg, J. Edsjö PRD69(2004) 123505)

$\Rightarrow$ Recherche indirecte non compétitive

Modèle usuel



Avec influence système solaire

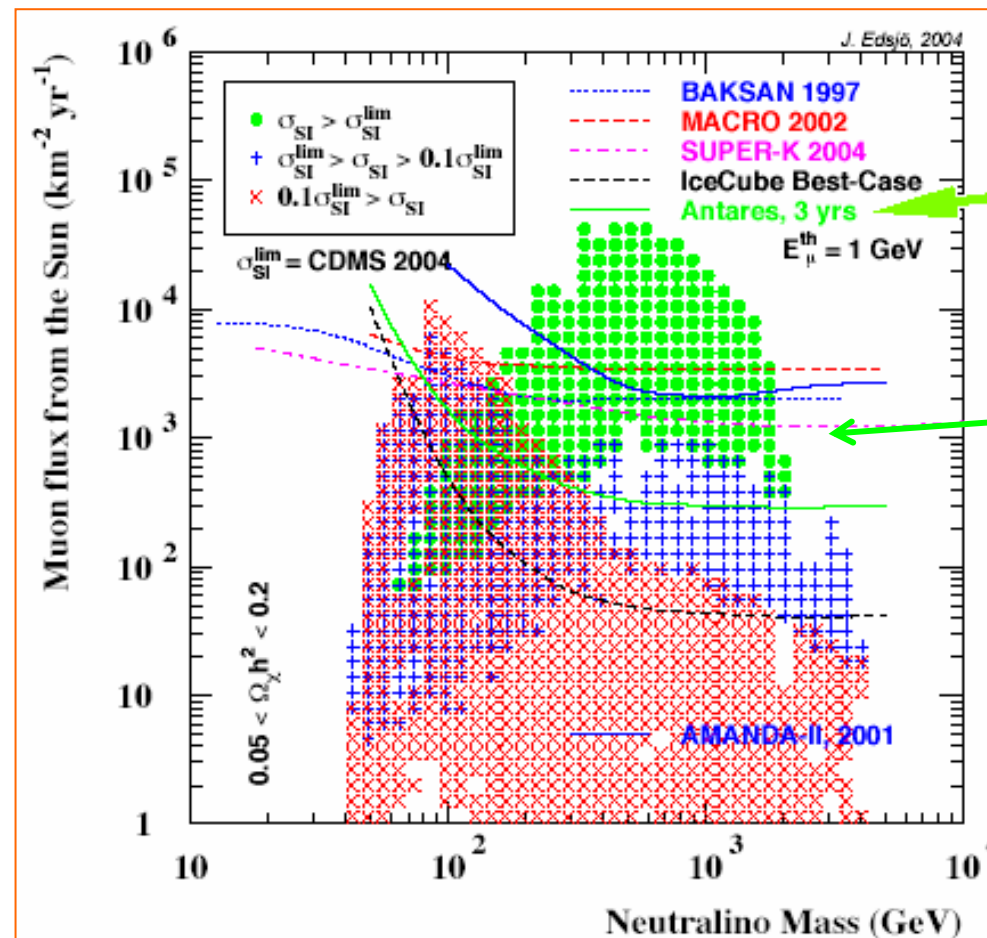


J. Edsjö IDM2004

Recherche directe/indirecte: flux μ du soleil

- Interaction χ avec protons : couplage SD dominant ...
 - Recherche directe avec noyaux plus lourds: comparaison plus difficile
- $\Rightarrow$ Recherche indirecte fortement complémentaire**

J. Edsjö IDM2004



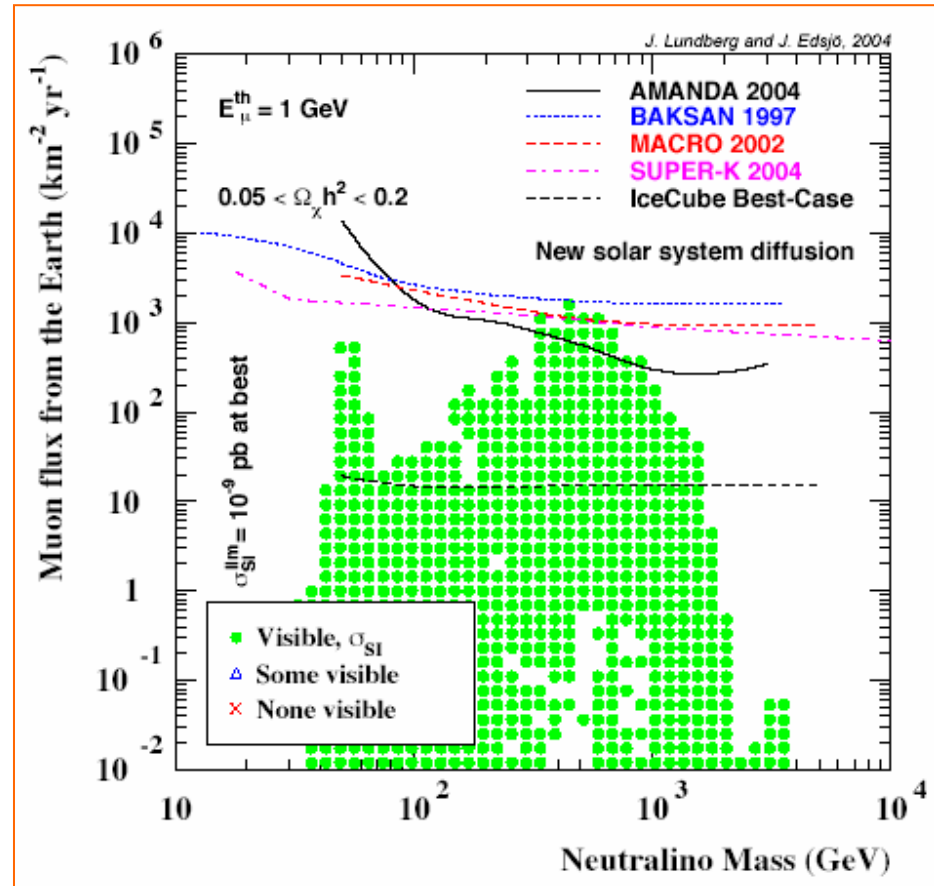
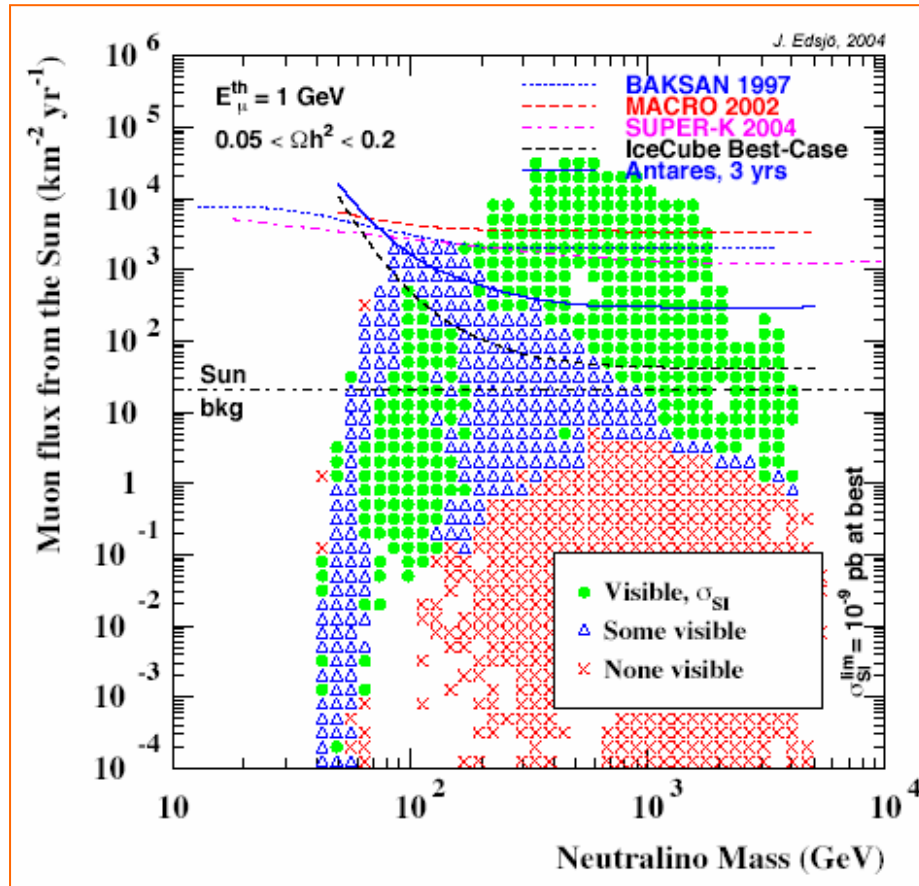
exclu
par
CDMS

Recherche directe/indirecte: flux μ , prospective

Soleil

J. Edsjö IDM2004

Terre



- Comparaison avec expérience recherche directe sensible à 10^{-9} pb

Conclusion

- **France présente en recherche directe et indirecte**
Les 2 approches sont **fortement complémentaires** (SD et SI) et **nécessaires**
- Aujourd'hui bien placée mais :
Effort humain et financier important à faire pour les gros projets de prochaines générations pour suivre la course
 - EURECA, HESS-II, ν 1-km³
- Ne pas oublier le **soutien à la R&D instrumentale en amont** :
Résultats souvent demandés pour être financé : paradoxal...
ex: matrices de bolomètres sont d'un intérêt majeure pour la cosmologie (CMB, IR, X, cf talks suivants) et pourtant le soutien commence seulement à être important $\Rightarrow$ retard important de la France (or LETI)
- **Défis à 10ans ambitieux**
 $\Rightarrow$ mise en évidence Matière Noire et contraintes sur les modèles (SUSY et cosmologique) en // avec production au LHC