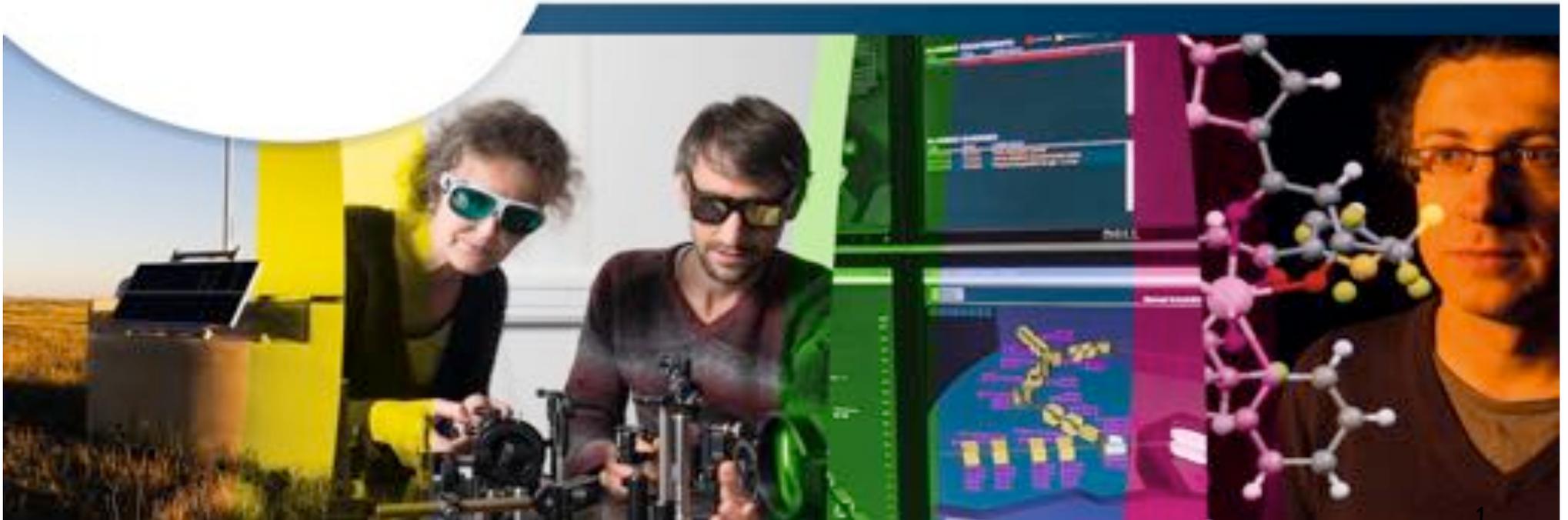




www.cnrs.fr

Détection de la Matière Noire de l'Univers

G. Chardin, CNRS



Matière noire, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



Matière noire...



Matière
pas noire...
Moins d'1% !

1930 : première découverte

Dès le début des années 1930, **Fritz Zwicky** avait noté que les **galaxies étaient souvent rassemblées en amas**.

Dans le grand amas de Coma ci-contre, il mesura les vitesses des galaxies...



Les **vitesse**s qu'il mesura étaient **énormes**.

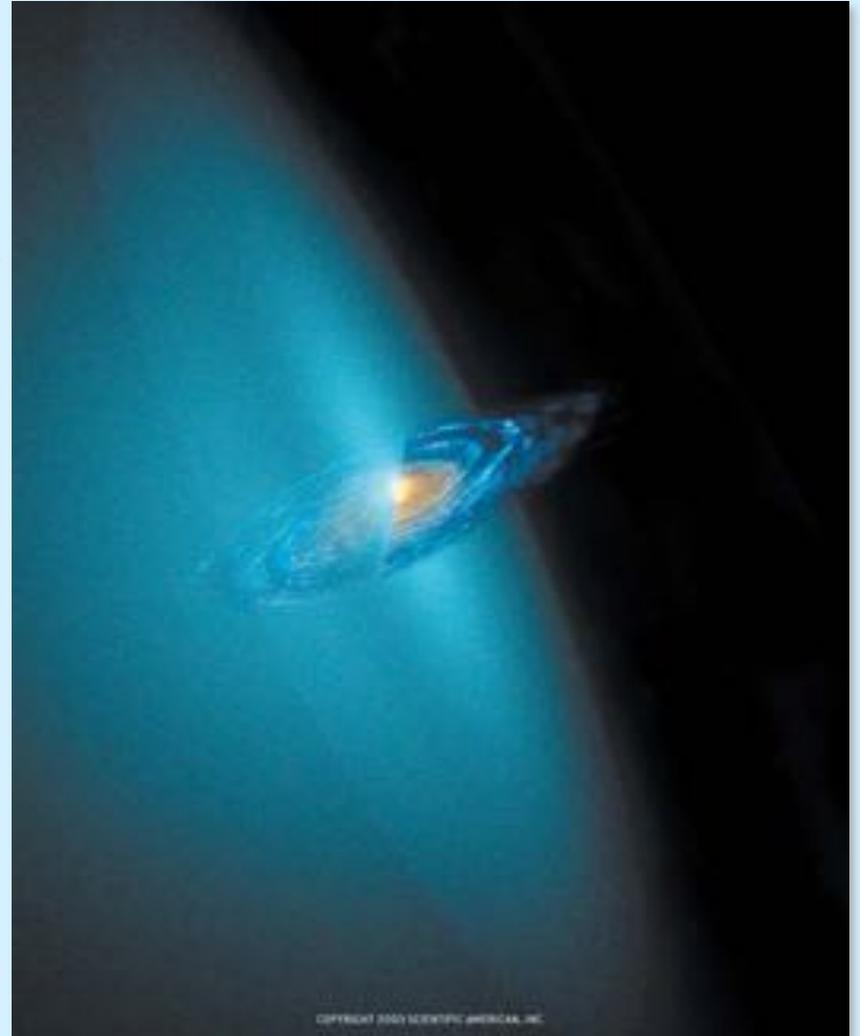
- **L'amas de galaxies** aurait dû **se disperser depuis longtemps**, sauf si **les étoiles ne représentent pas plus qu'un pour cent environ** de la masse de l'amas.

Matière noire galactique

Elle pourrait s'étendre sur un rayon 5 fois supérieur au rayon observable de la galaxie.

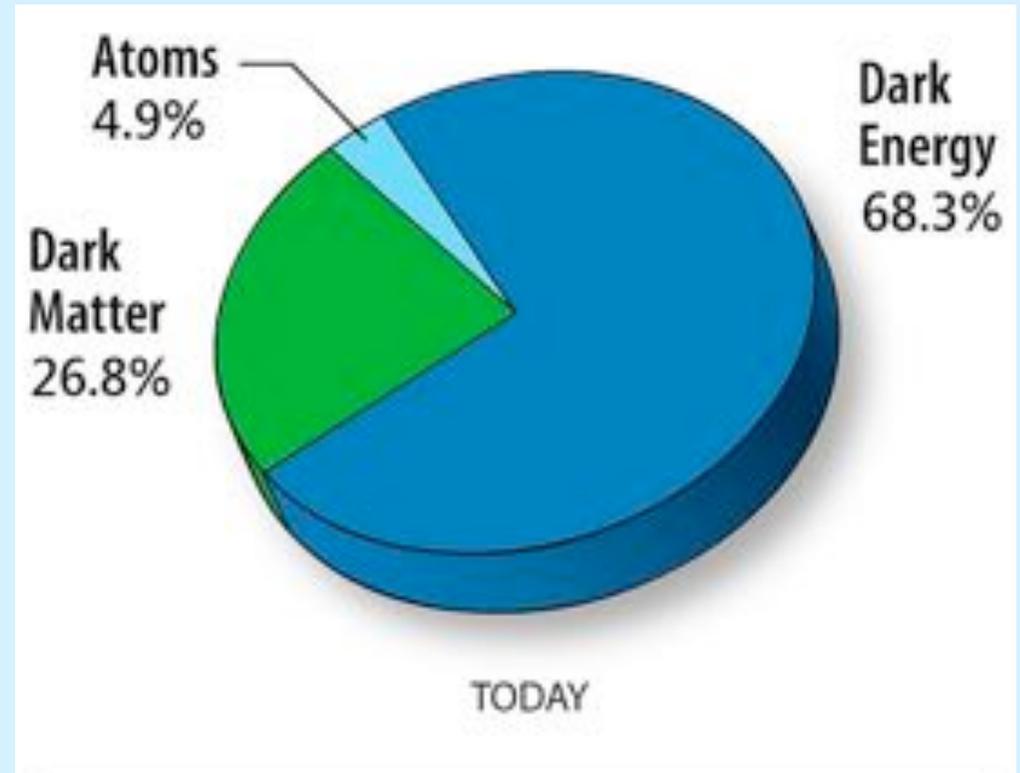
Mais de quoi est-elle constituée :

- gaz ?
- étoiles sombres ?
- particules exotiques ?



Mensurations univers par Planck

- Energie Noire $W_{DE} \approx 68.3 \%$
(avant Planck $\approx 73\%$)
- Matière Noire $W_{DM} \approx 26.8 \%$
(avant Planck $\approx 23\%$)
- Matière ordinaire (nucl.) $\approx 4.9 \%$
(avant Planck $\approx 4.3 \%$)
- Taux d'expansion univers
 $H_0 \approx 67.5 \pm 1 \text{ km/s/mpc}$ (avant Planck ≈ 70)
- Age de l'Univers : 13.8 milliards d'années

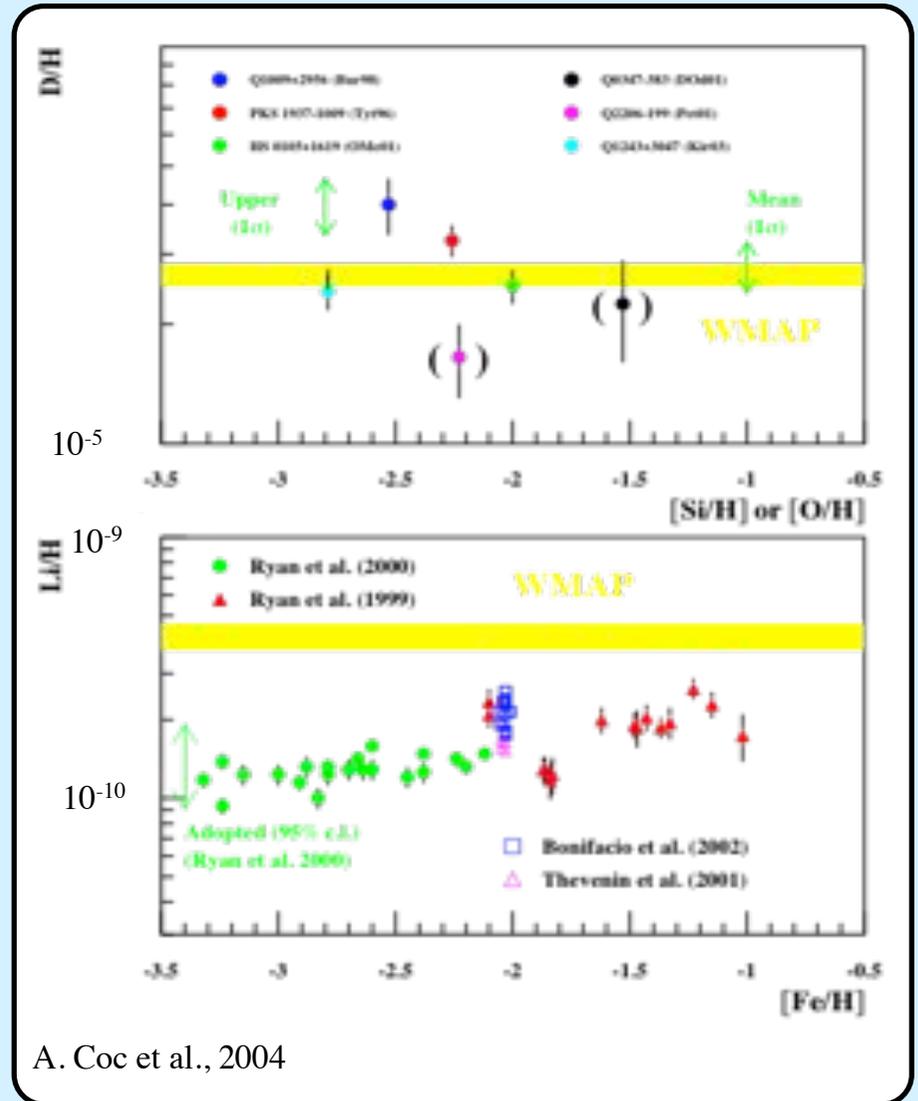
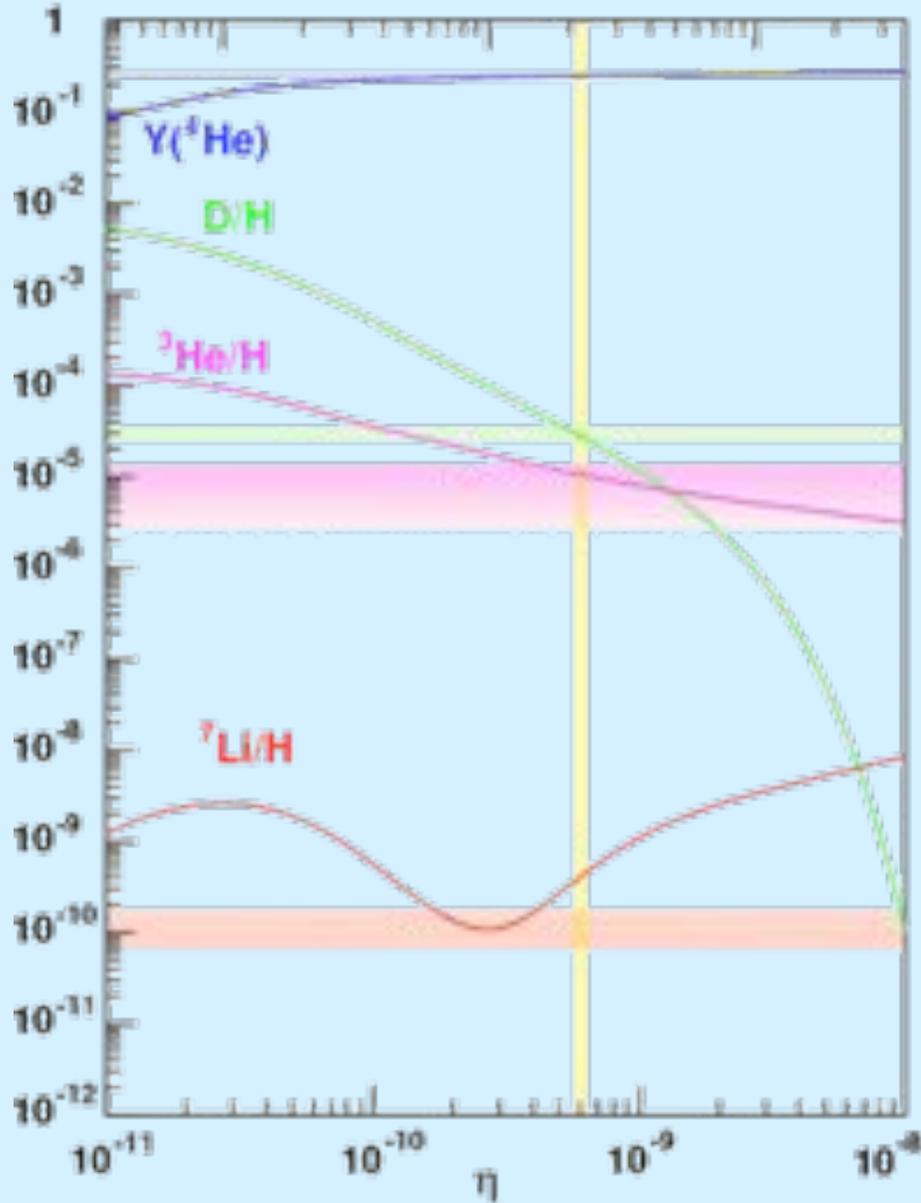


La matière dont nous sommes formés est très loin d'être majoritaire...

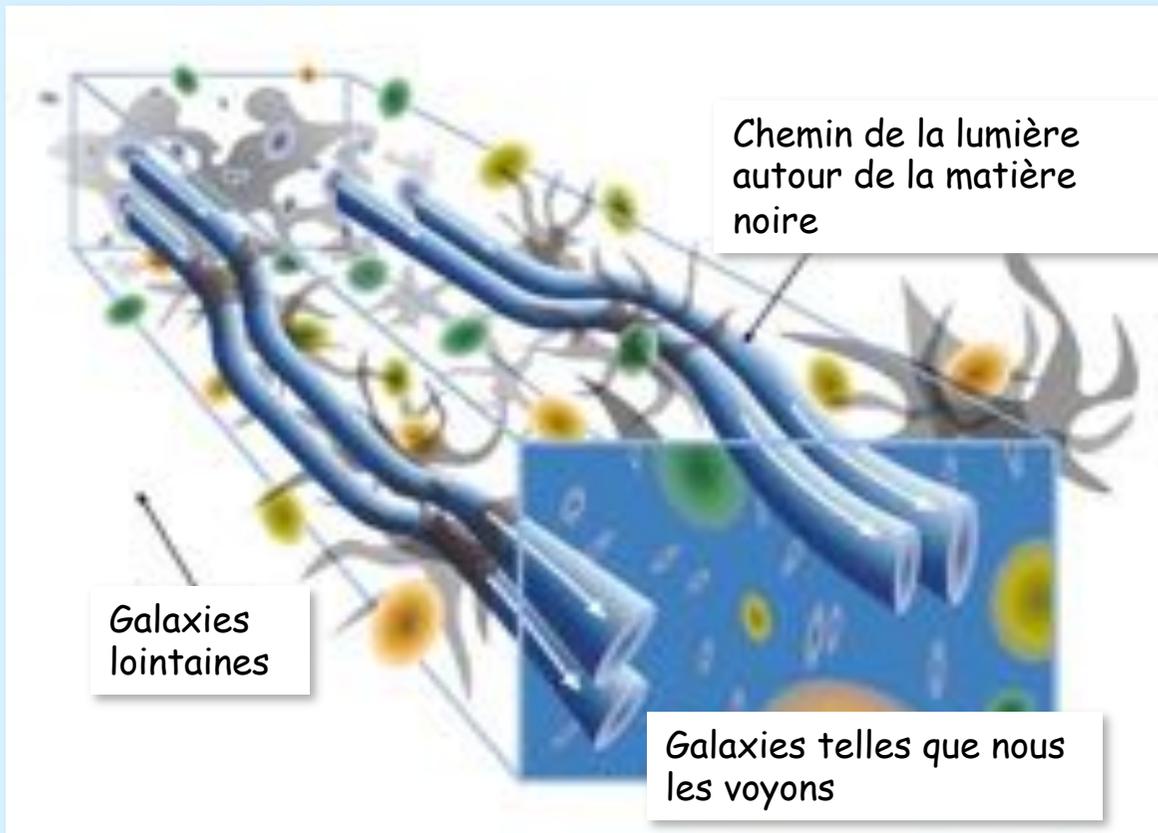


et la composition de l'Univers semble plus compliquée que nous ne le pensions.

Prédictions et observations



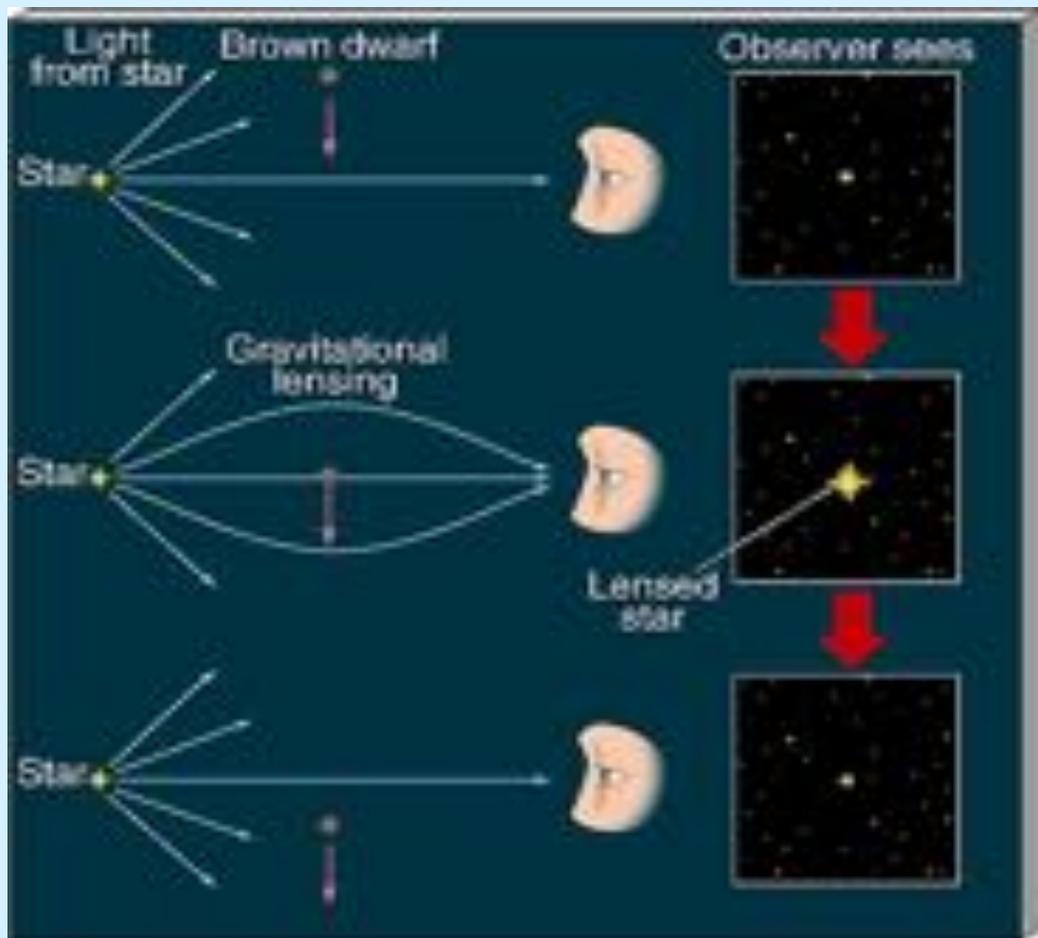
Détecter la matière par effet de lentille gravitationnelle... (1)



Les masses courbent
l'espace-temps
... donc déforment les
images, par exemple
de galaxies.

Cela permet de
**remonter aux masses,
même cachées.**

Détecter les étoiles sombres dans notre galaxie : microlentille gravitationnelle...

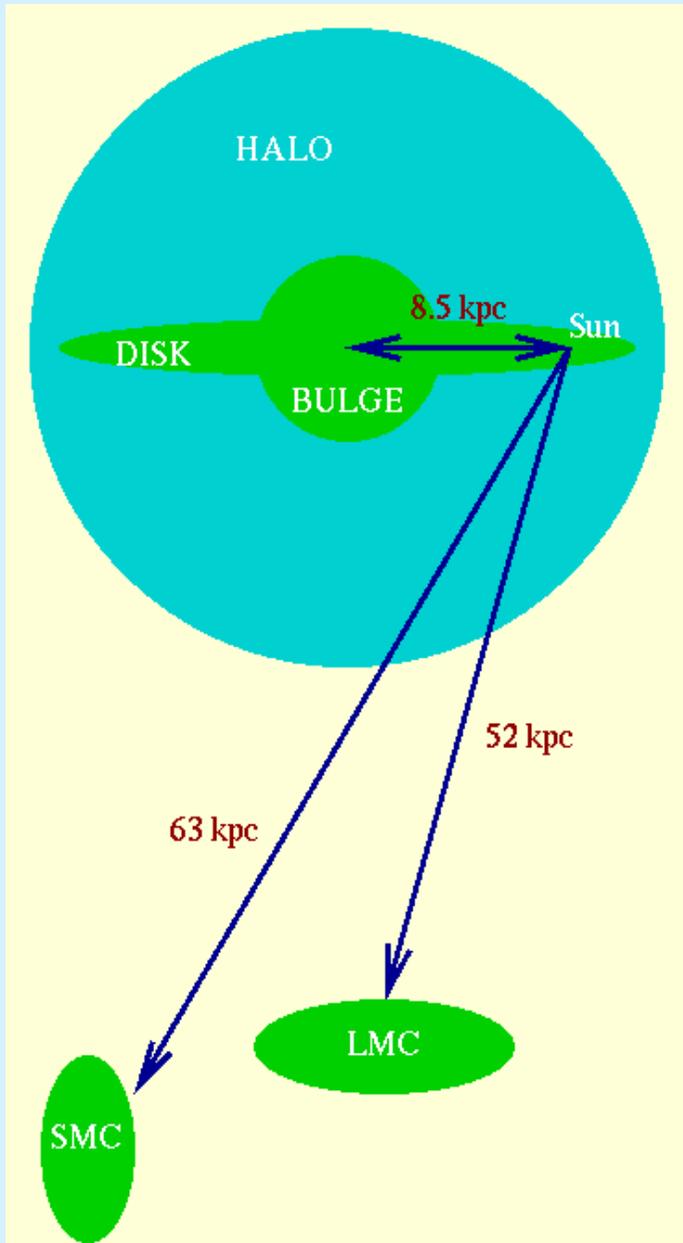


Une étoile a sur le ciel une image trop petite pour que l'on puisse mesurer sa déformation.

Mais si un objet massif passe sur le chemin entre nous et l'étoile, la luminosité apparente de l'étoile va augmenter, puis décroître...



EROS (France) et MACHO (USA)

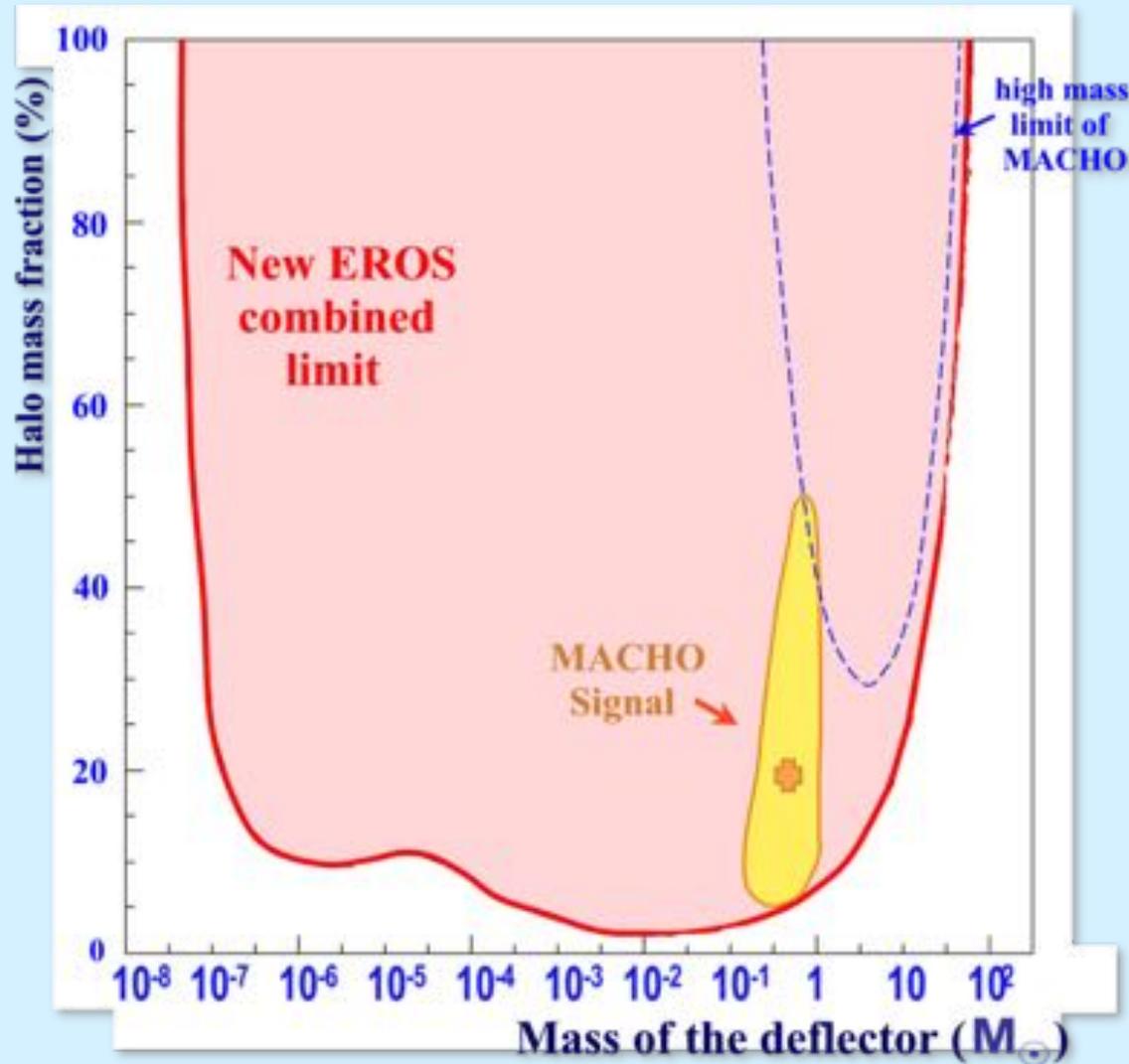


- 10 ans de mesures
- **des millions d'étoiles** observées dans les nuages de Magellan (SMC et LMC)

Résultat : les étoiles sombres ne représentent **pas plus de 5 à 10% au maximum** de la masse noire de notre galaxie.

Mais où est donc le reste de cette matière noire ?

EROS (France) et MACHO (USA)

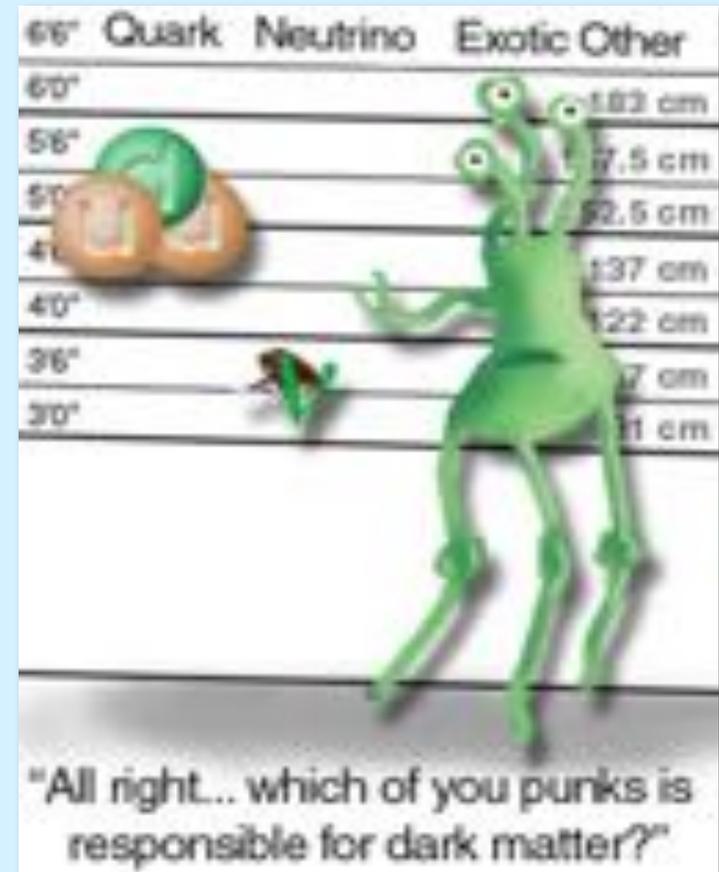


- 10 ans de mesures
- **55 millions d'étoiles** observées dans les nuages de Magellan (SMC et LMC)
- les étoiles sombres ne représentent **pas plus de 5 à 10% au maximum** de la masse noire de notre galaxie.

Pas de la matière ordinaire, mais alors quoi ?

- Le **neutrino** ? Non, neutrinos connus beaucoup trop légers
- Neutrinos (très) lourds exclus par le nombre de ses interactions
- De nouvelles particules, les **WIMPs** prédites par les théories ?

(WIMP = particule massive interagissant faiblement)

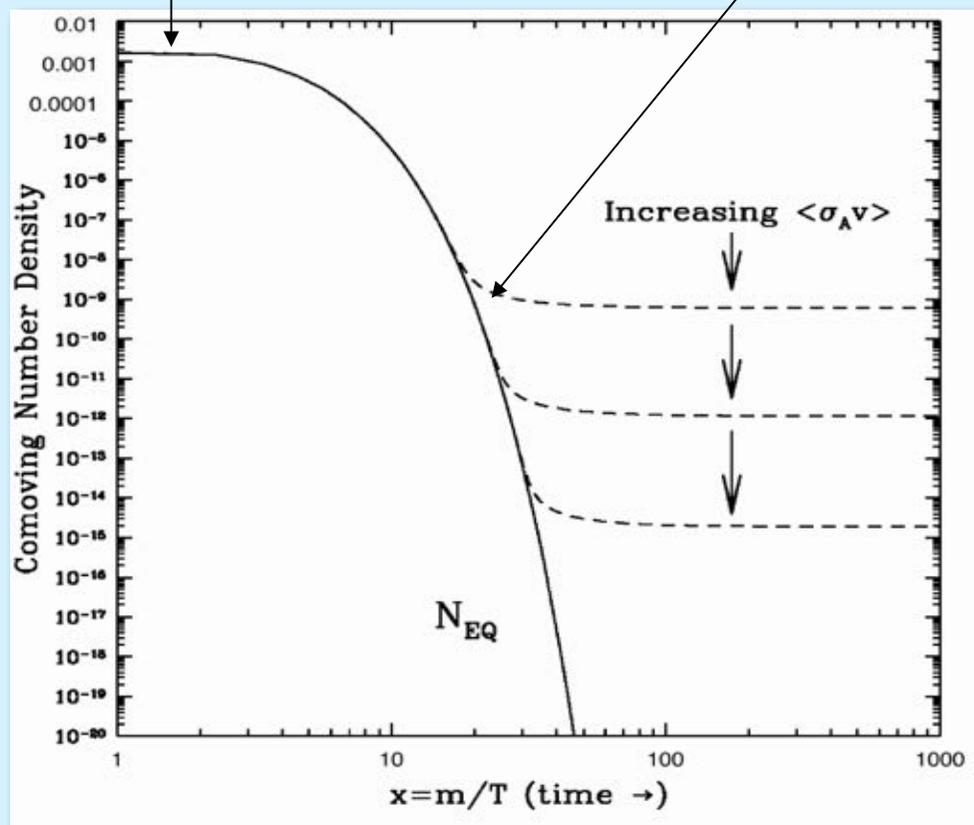


WIMPs: particules massives interagissant faiblement

- particules stables ou de grande durée de vie issues du Big Bang

Équilibre thermodynamique

Abondance finale



$$\Omega_\chi \propto \frac{1}{\langle\sigma_A v\rangle}$$

$$\sigma_A \approx \sigma_{weak}$$

Le miracle des "WIMPs"

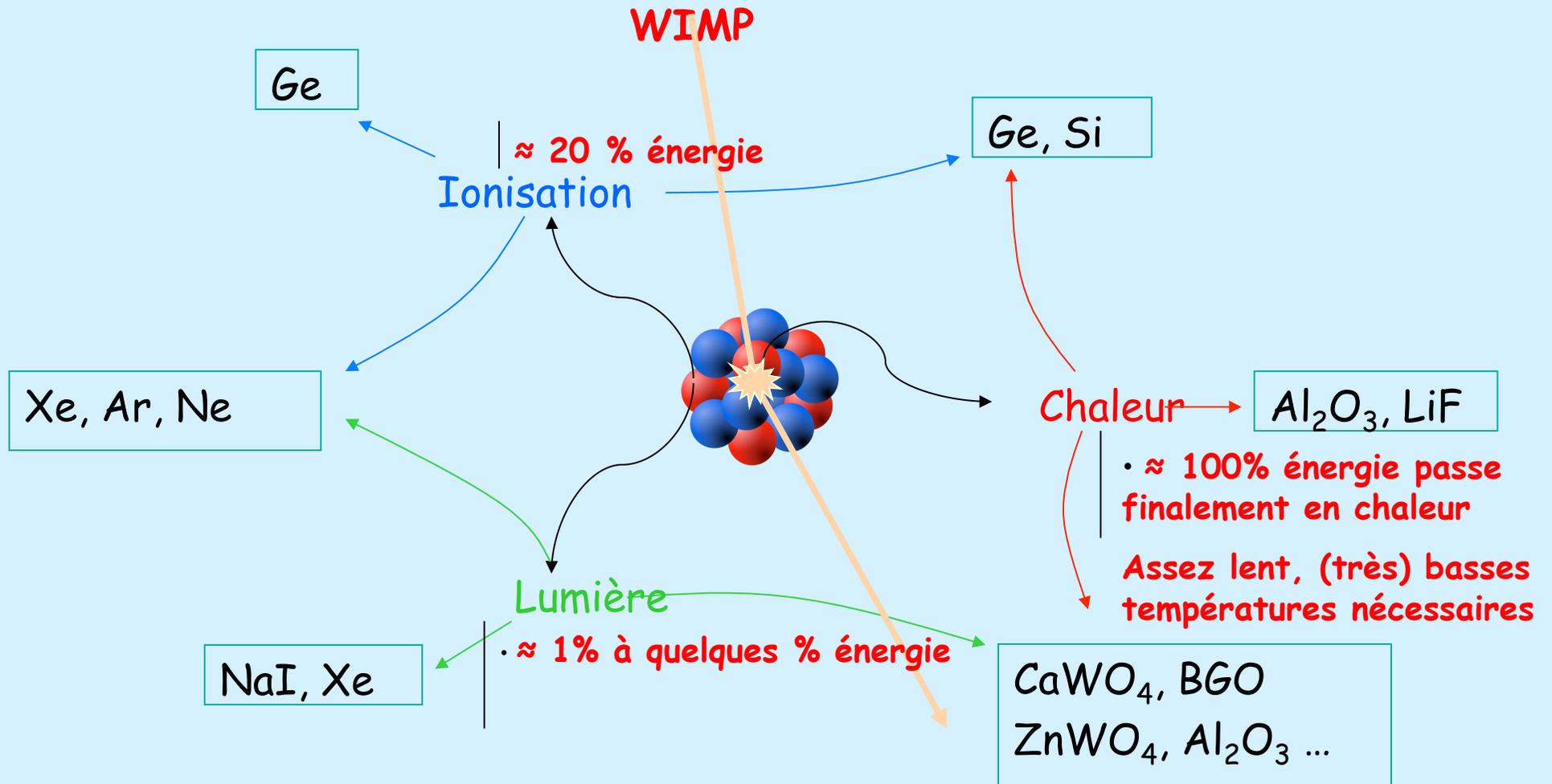
$M_W \approx 50-500$ GeV

$\langle v \rangle \approx 250$ km/s

$s \approx 10^{-6}-10^{-10}$ pbarn

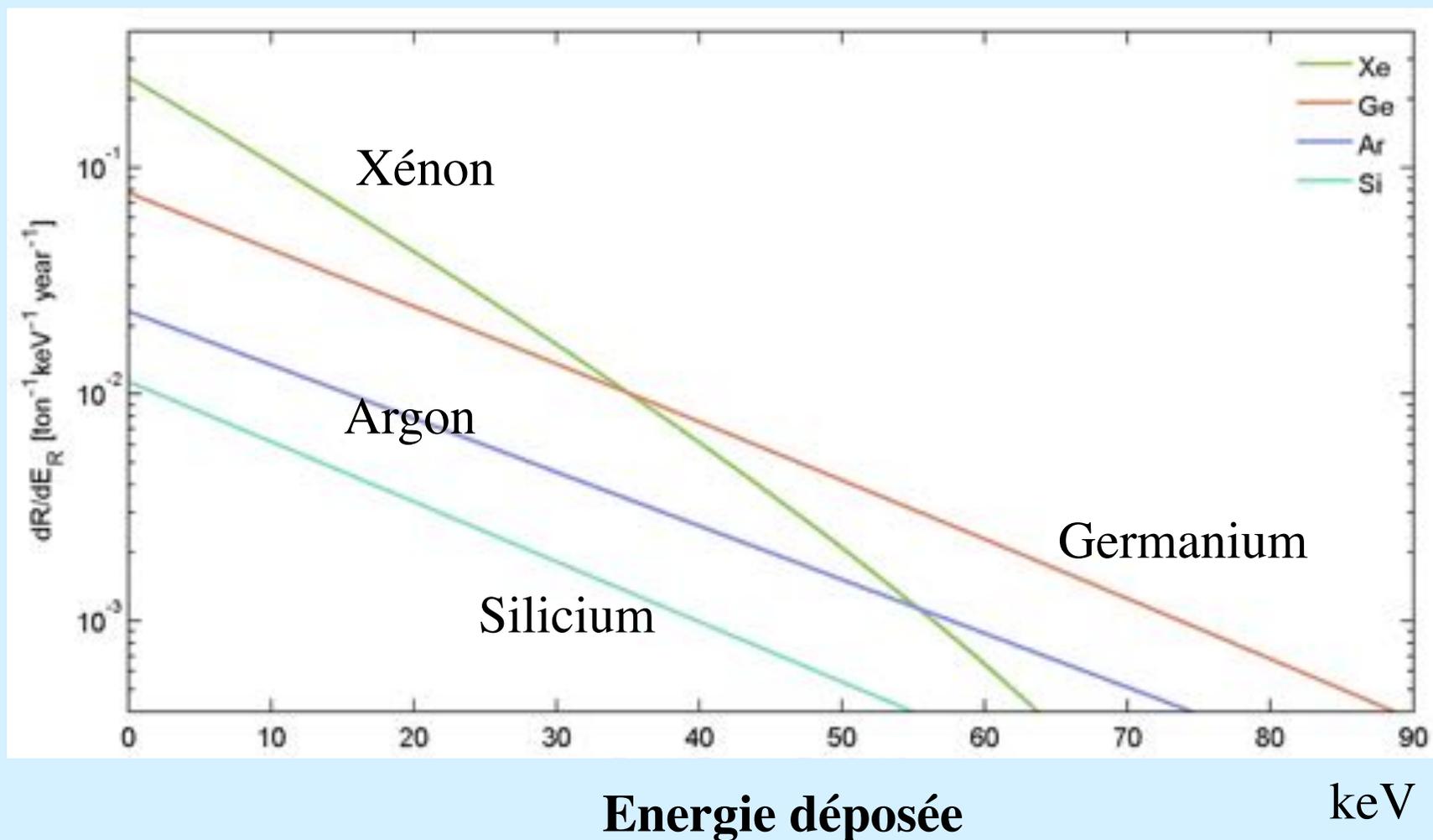
Méthode proposée Drukier et Stodolsky (1984)
(ainsi que Goodman et Witten (1985))

Techniques de détection "directes"



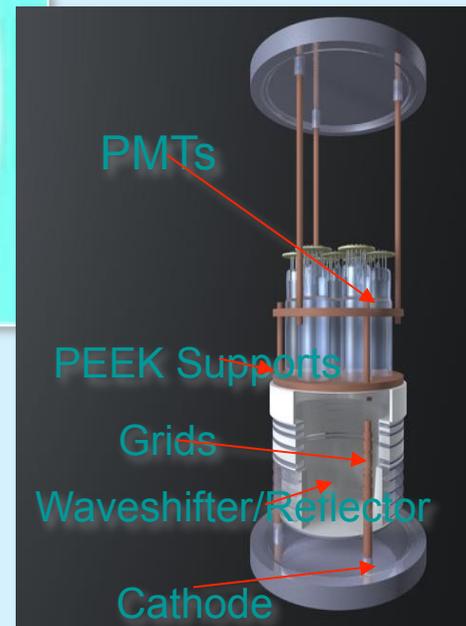
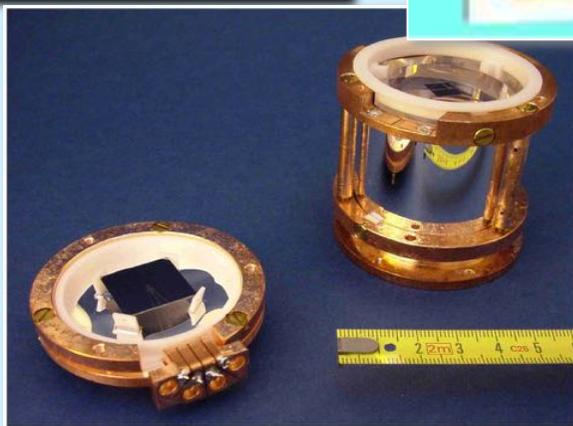
Quelle énergie déposée dans le détecteur ?

Attention : échelle verticale logarithmique !



Candidat naturel pour les WIMPs : la particule supersymétrique la plus stable

Un WIMP ne laisse une énergie
appréciable que si elle choque un
noyau, pas un électron

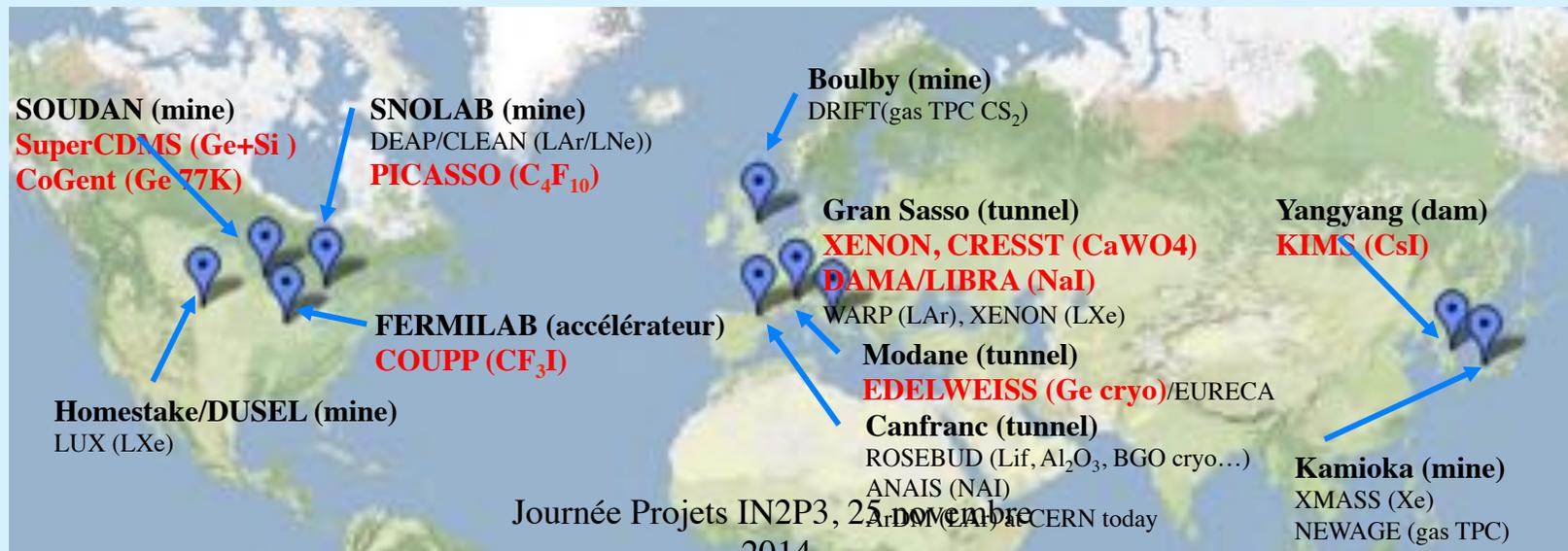


Quelle énergie déposée dans le détecteur ?

- Une énergie assez faible : qq keV à qq 10s keV (par rapport à la radioactivité ambiante)
- Un taux très faible d'interactions (de l'ordre de ≈ 1 /tonne/an/keV)
- Des milliards de fois plus faible que le taux de radioactivité naturelle dans le corps humain...
- Collision sur noyau et pas sur électron comme radioactivité ambiante

Recherche directe de WIMPs: la compétition internationale...

- XENON-100 @ Gran Sasso (et XENON-1ton)
- LUX @ Homestake (Dakota du Sud)
- EDELWEISS-III (cryo Ge @ Fréjus)
- SuperCDMS @ Soudan Mine, @ SNOLab
- DarkSide, ArDM (liquid argon)
- CRESST-II (cryo CaWO_4 , ZnWO_4) @ Gran Sasso
- XMASS @ Japan
- DAMA/LIBRA (NaI, Xe) @ Gran Sasso
- SIMPLE, PICASSO, MACHe3
- Future experiments: XENON-nton, GEODM, EURECA, LZ (LUX-ZEPLIN), DARWIN

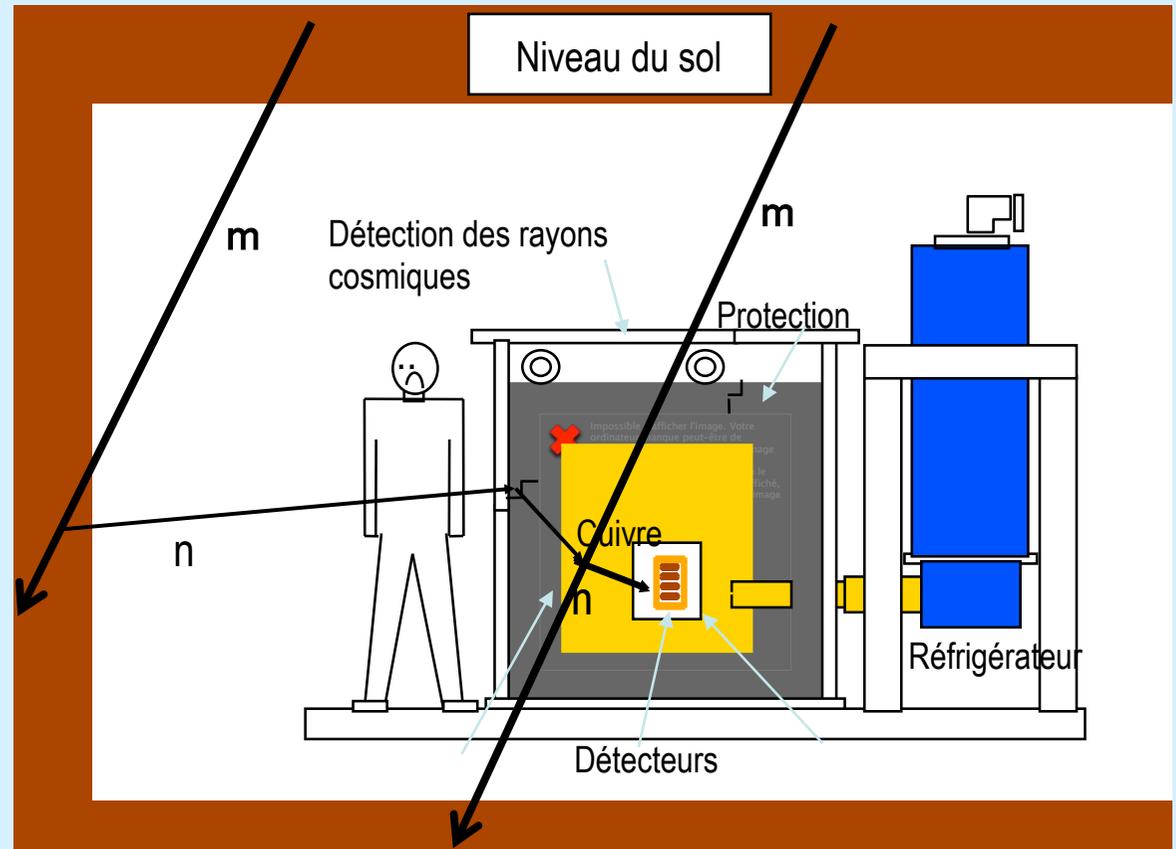


Détecter les WIMPs (1)

Détecter les WIMPs est très difficile, en raison de leur faible interaction avec la matière : **moins d'un choc par an et par kilogramme.**

Limites à la détection :

- **rayonnement cosmique,**
- **radioactivité induite** par les rayons cosmiques et radioactivité naturelle.

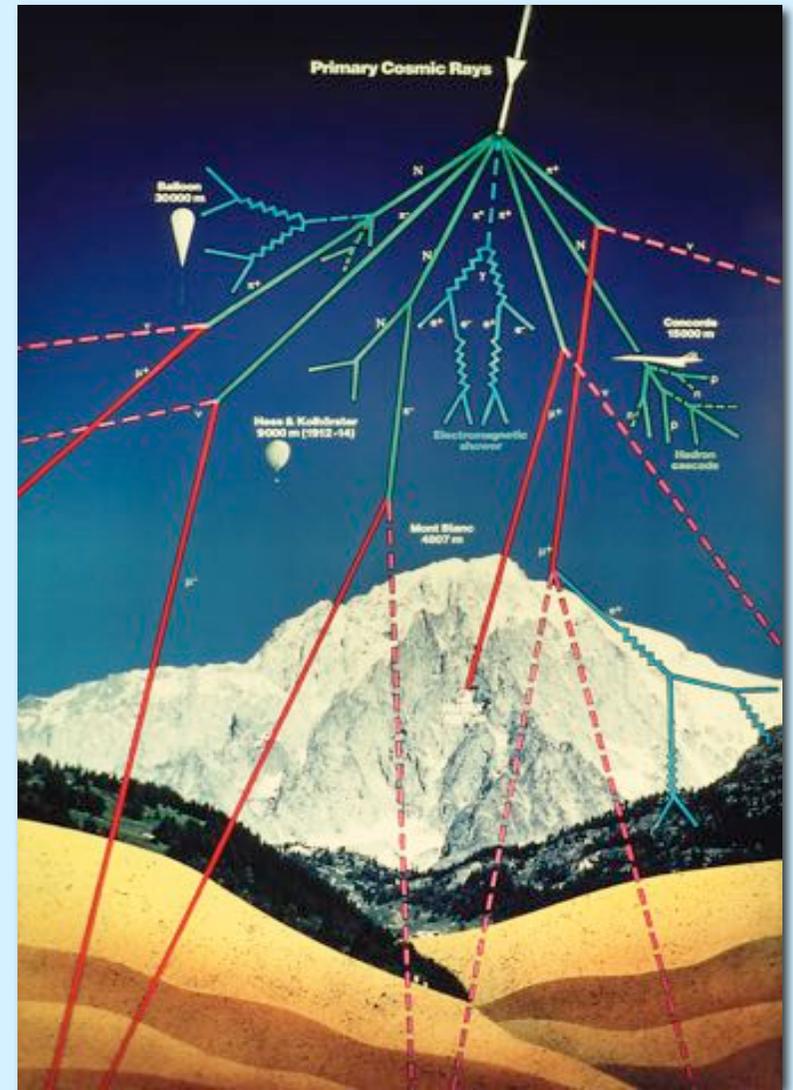


Toutes les expériences compétitives sont maintenant installées dans un site souterrain.

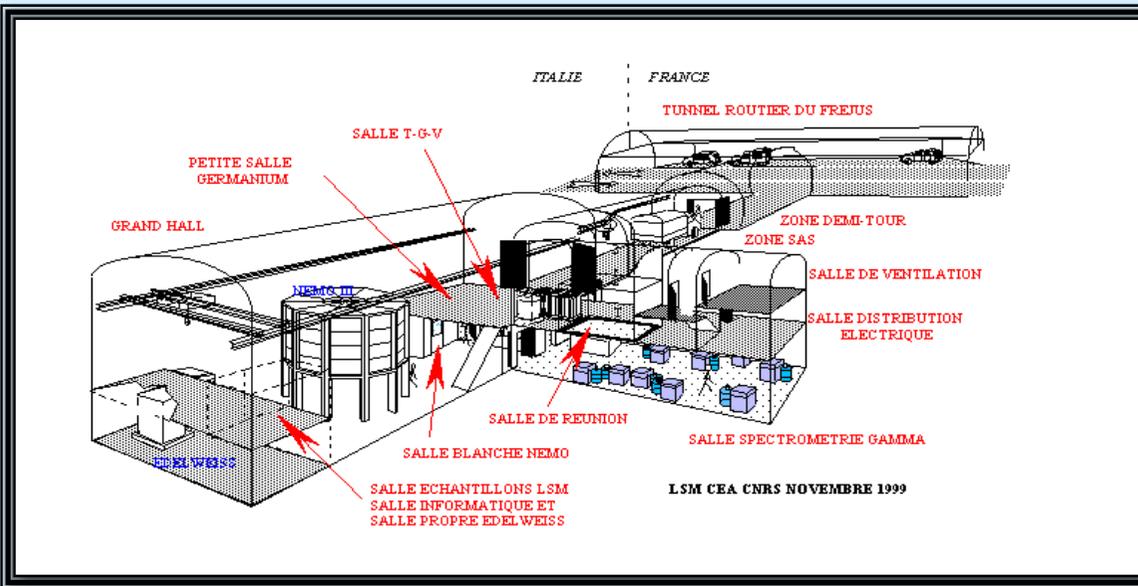
Détecter les WIMPs (2)

Pour améliorer la sensibilité des expériences, il faut :

- s'abriter sous une montagne pour se **protéger des rayons cosmiques** (100 par seconde traversent notre corps au niveau de la mer),
- se protéger de la radioactivité naturelle des roches,
- purifier à l'extrême les matériaux des détecteurs.



EDELWEISS et CDMS



L'expérience française EDELWEISS est abritée sous plus de 1600 m de roche, dans les Alpes.

Le laboratoire souterrain de Modane. Moins d'un millionième des rayons cosmique parviennent à l'atteindre.

Son concurrent américain CDMS est abrité dans la mine de fer de Soudan (États-Unis).

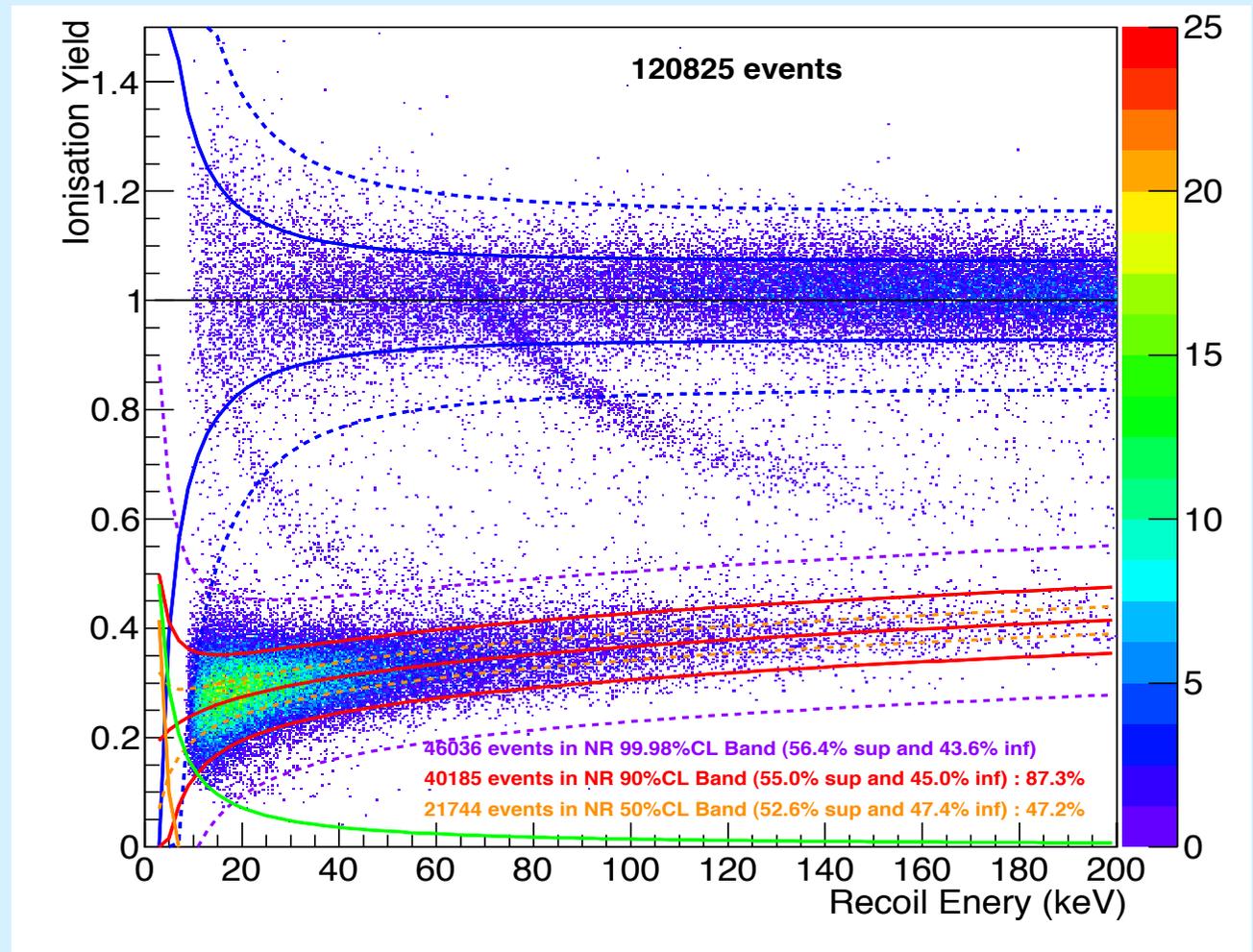


Le cas du germanium (EDELWEISS, SUpErCDMS)

Source rayons gamma
(radioactivité standard)

Source neutrons
(reculs nucléaires)

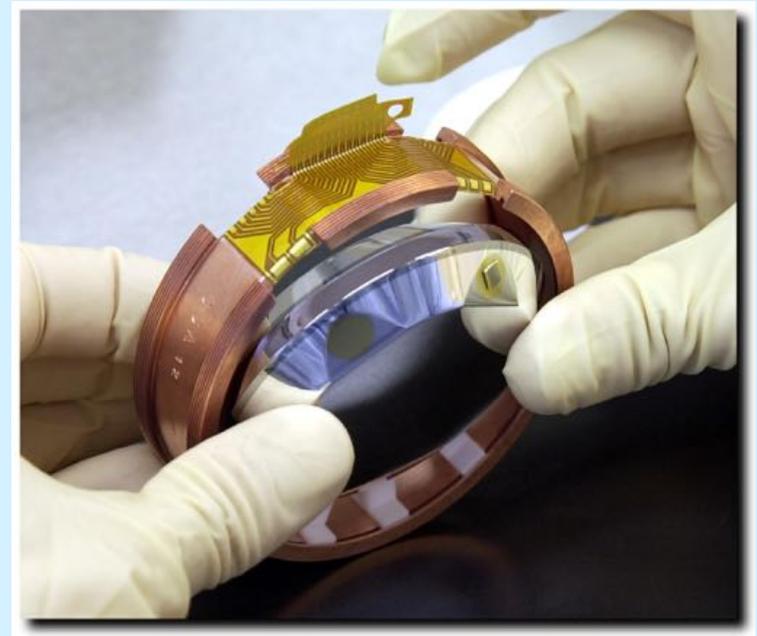
**Séparation quasi parfaite
($> 99.999\%$)**



Les détecteurs d'EDELWEISS (2)

Dans le détecteur : des matériaux extrêmement purs (germanium, cuivre, teflon), une température d'un centième de degré absolu, une élévation de température d'environ un millionième de degré...

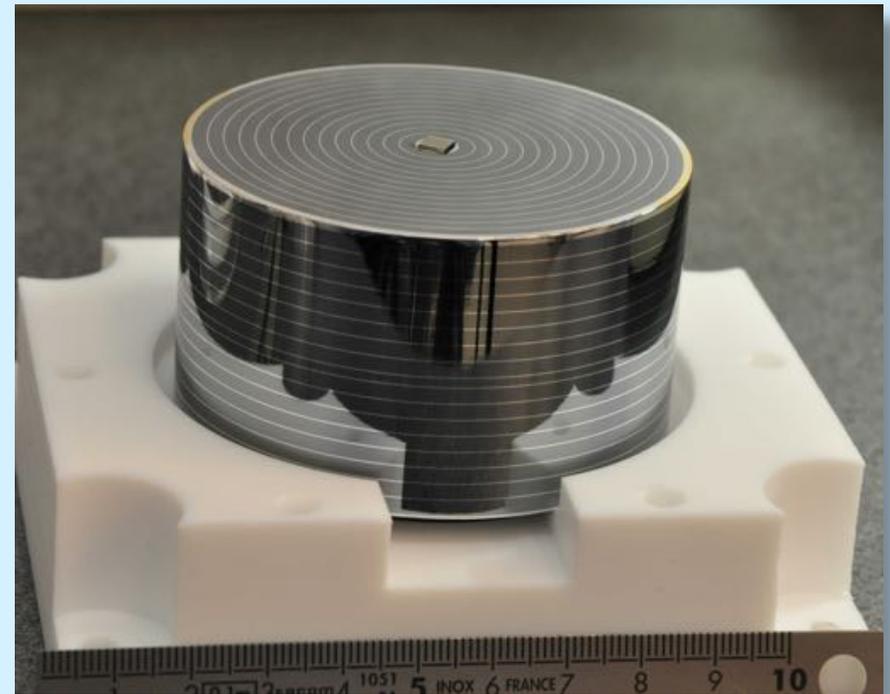
Les expériences explorent aujourd'hui le cœur du domaine des WIMPs...



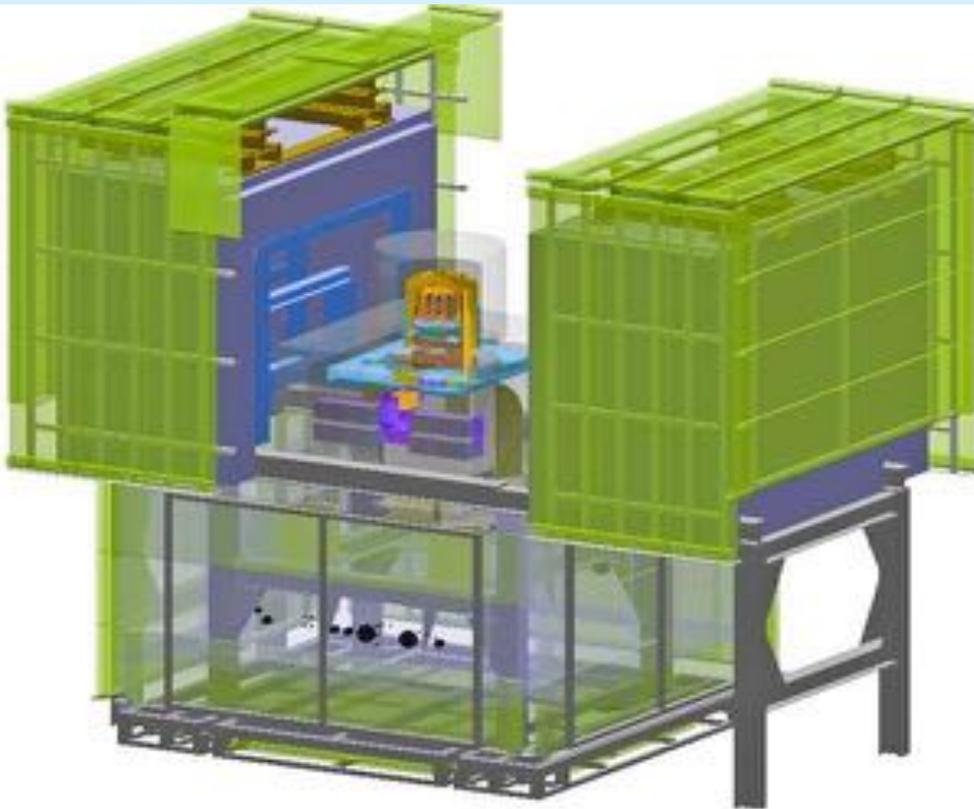
Premier détecteur 320 grammes en germanium de l'expérience EDELWEISS-II

Les détecteurs d'EDELWEISS (2')

L'un des endroits les plus froids et les mieux protégés de l'Univers...

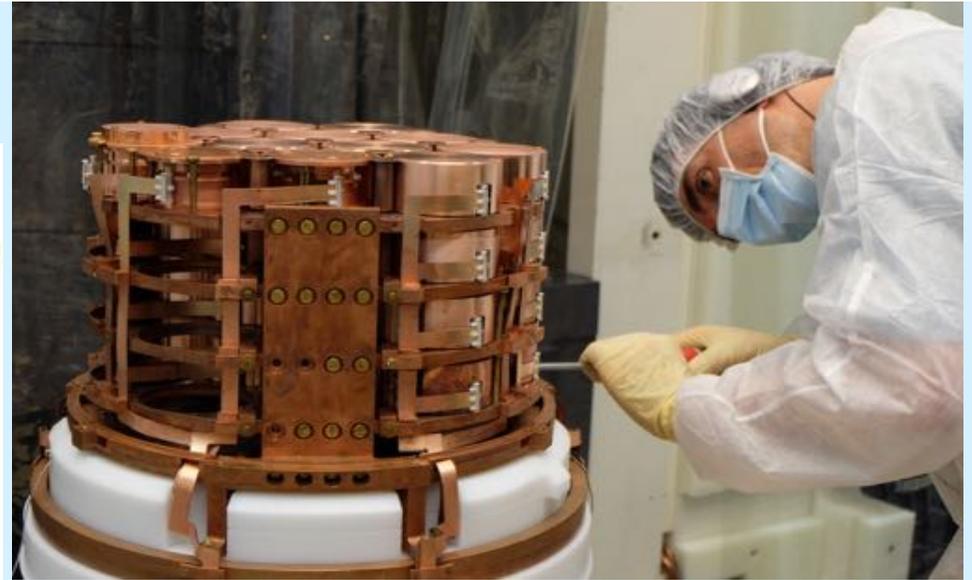


Détecteur en germanium de 800 grammes de l'expérience EDELWEISS.



EDWIII Geant4 model

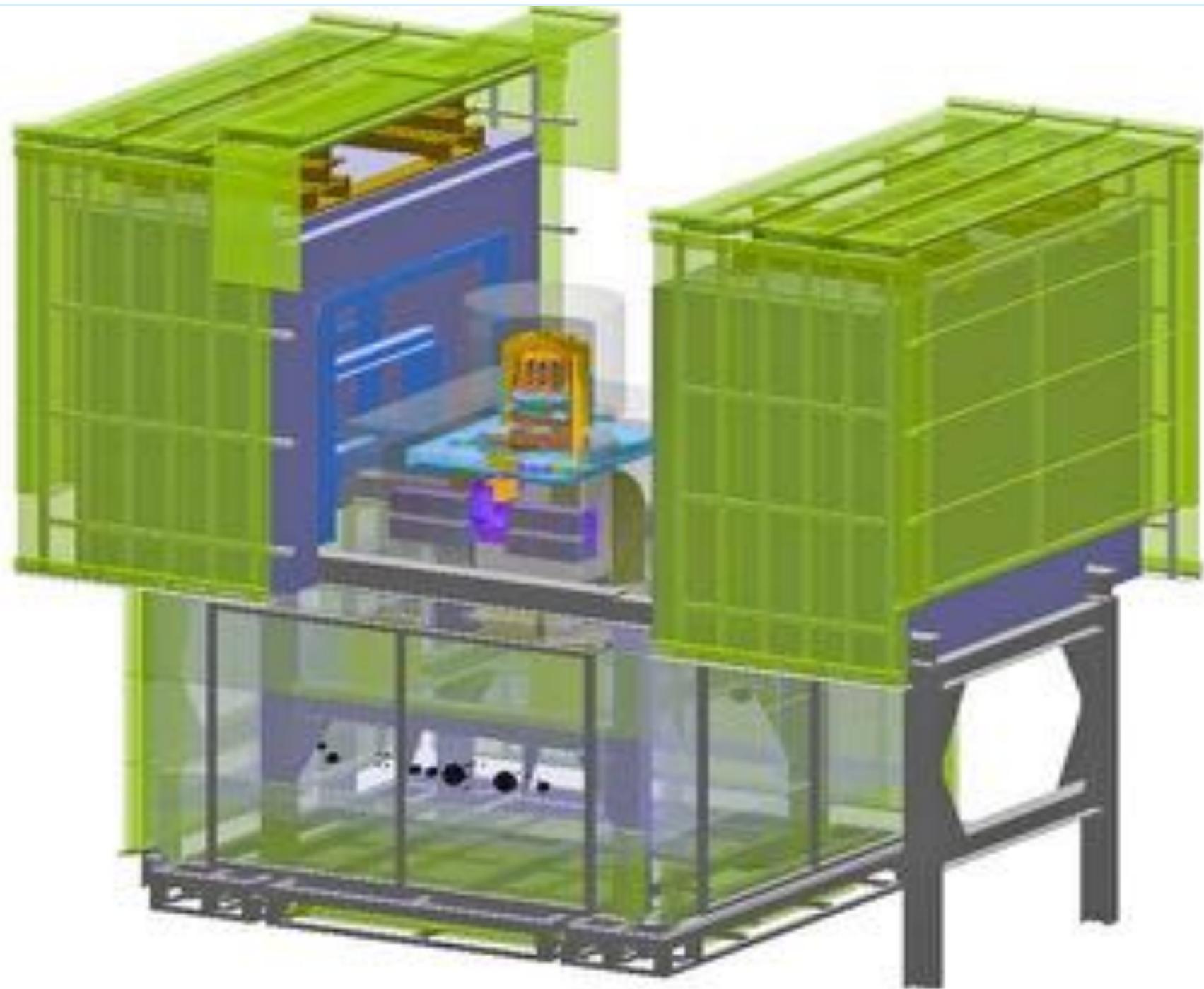
Nov 2014



Installation de 36 détecteurs FID800 au LSM

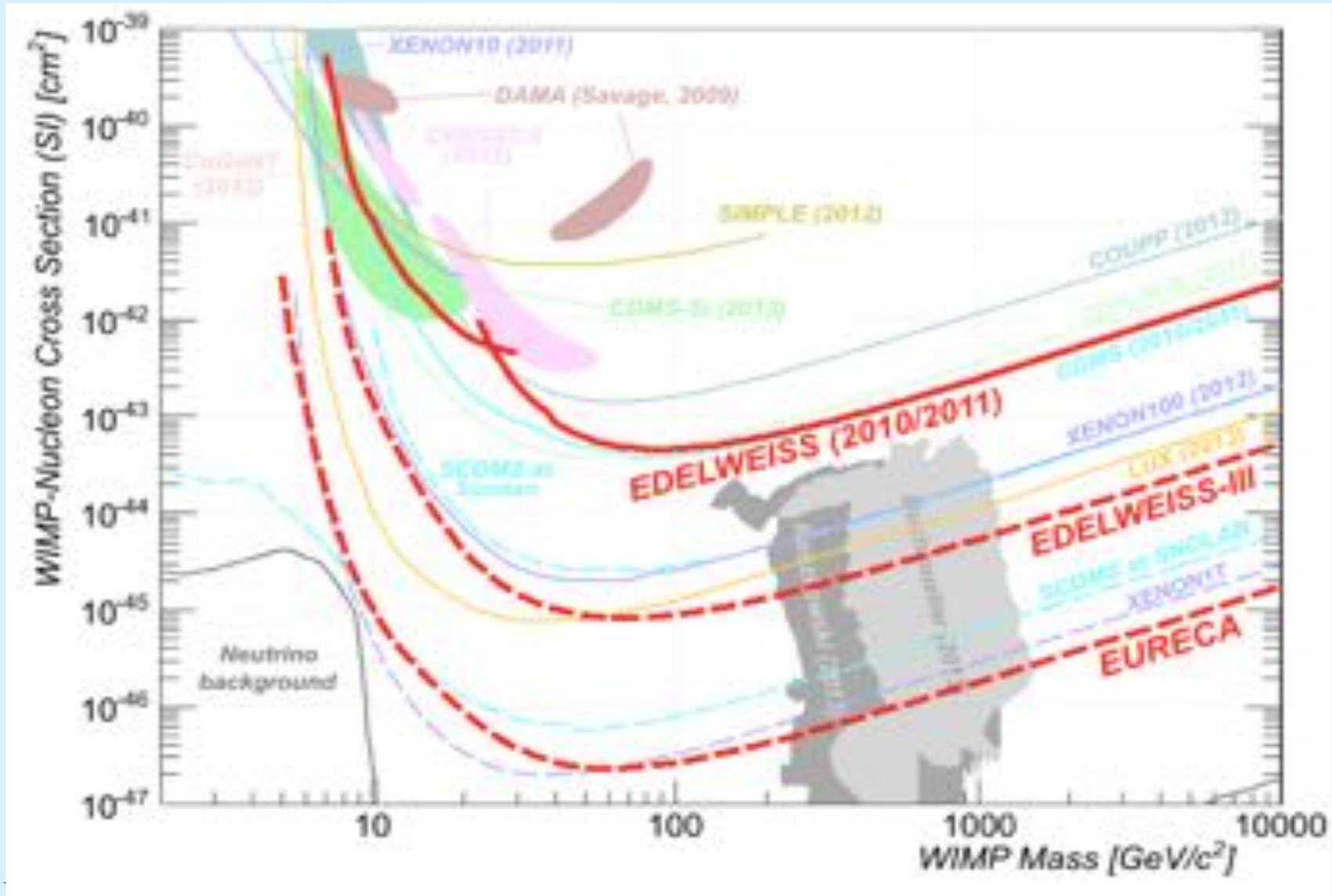


EDELWEISS

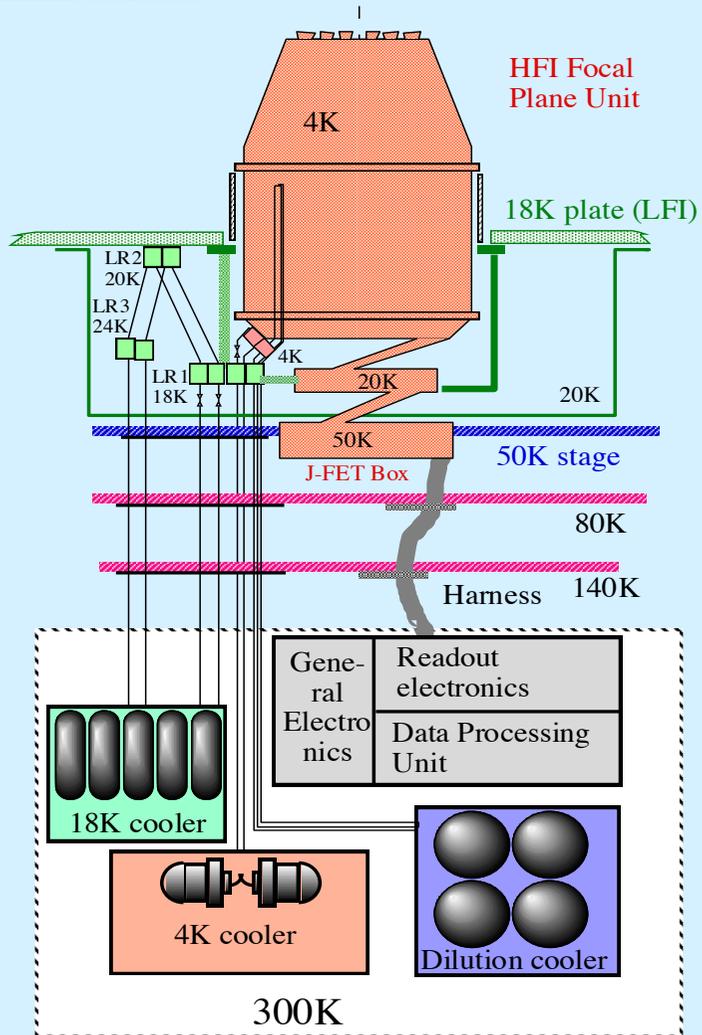


Sensibilité de détection WIMPs: EDELWEISS-III (vs. LUX)

<1 evt total background estimated for 3000kg.d eff. exposure



(Courtesy ...)



50K : Satellite (V-Groove)

20K : JPL (US) / LPSC (Grenoble)

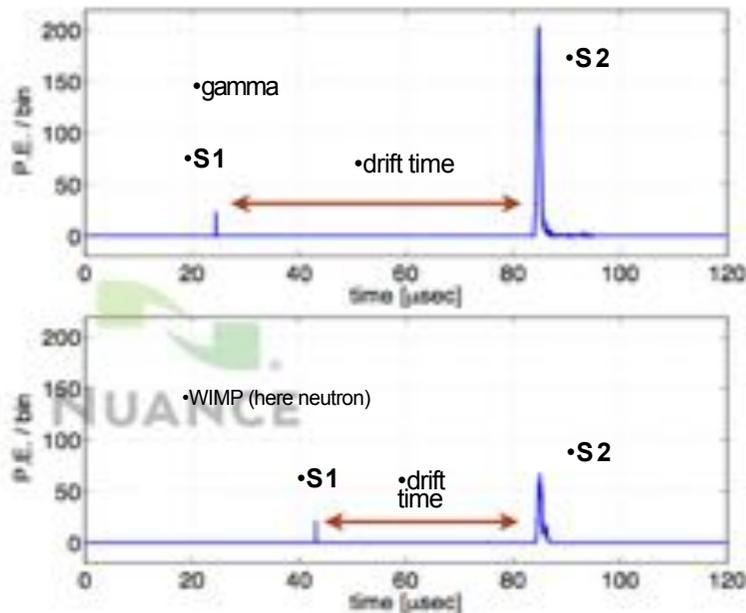
4K : RAL (UK)

Dilution 0.1K : CNRS / CNES / Air Liquide

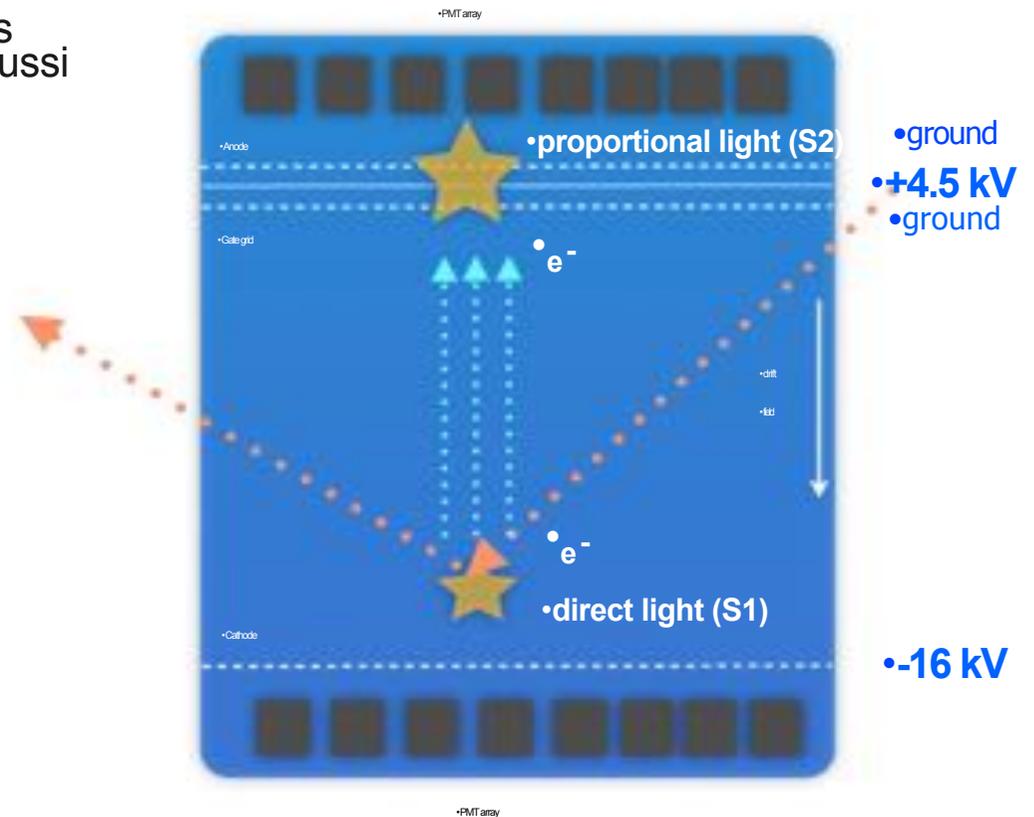
• Chambre à projection temporelle xénon liquide

- Une interaction de particule dans le liquide produit un signal lumineux faible mais très rapide (S1)
- Des charges électriques sont produites dans l'interaction et on les fait dériver jusqu'à la surface
- On les extrait ensuite du liquide ; les charges produisent alors un signal S2 plus lent mais aussi plus fort

$$\bullet (S2/S1)_{WIMP} \ll (S2/S1)_{Gamma}$$



- Xe (A=131); $\lambda = 178 \text{ nm}$
- résolution en position :
- <3mm in x-y; < 0.3 mm in z

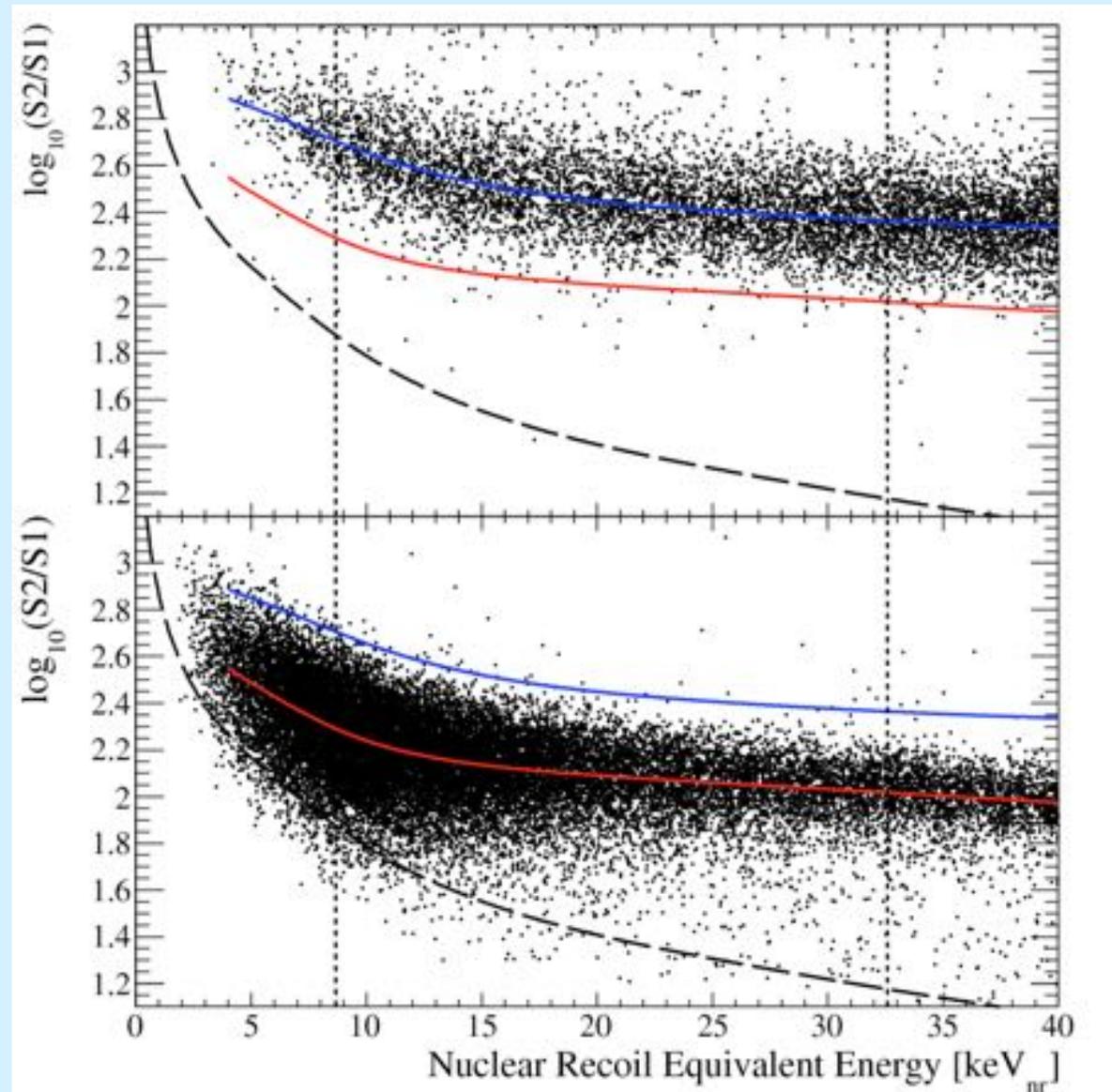


Le cas du xénon liquide

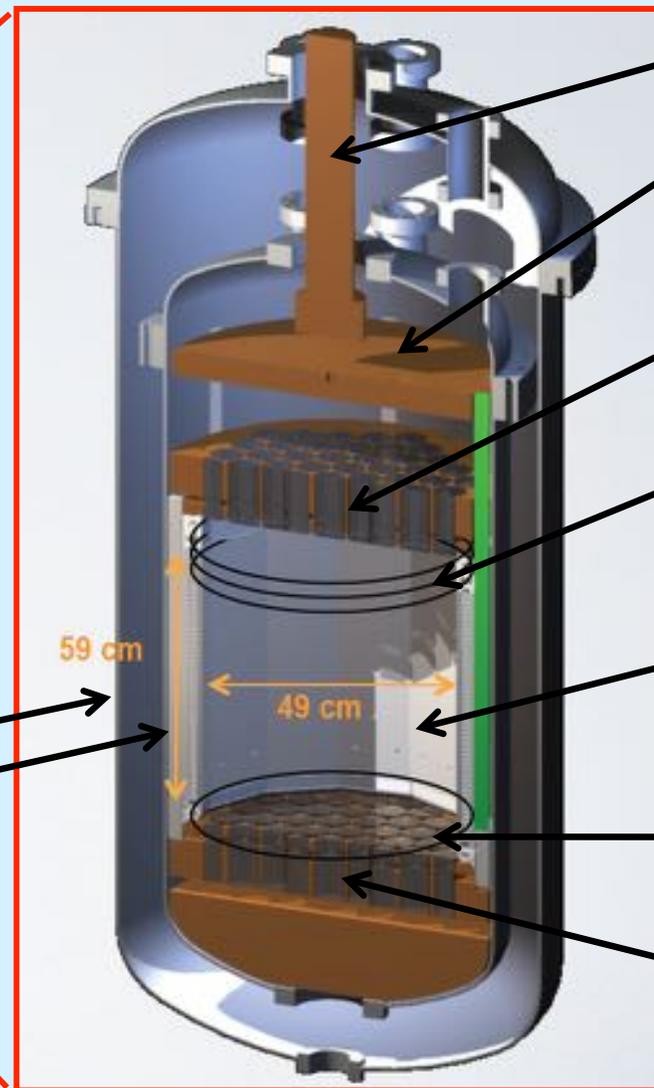
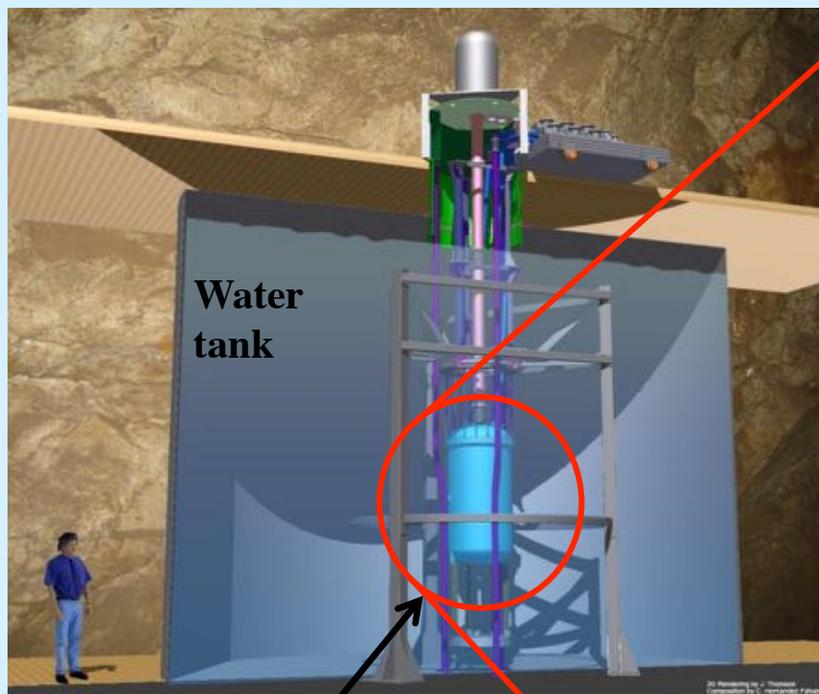
Source rayons gamma
(radioactivité standard)

Source neutrons
(reculs nucléaires)

**Séparation assez nette
mais pas parfaite**



L'expérience LUX (Dakota du sud, USA)



Thermosiphon

Ecran cuivre

Photomultiplicateurs

Anode

Réflecteur PTFE

Cathode

Photomultiplicateurs

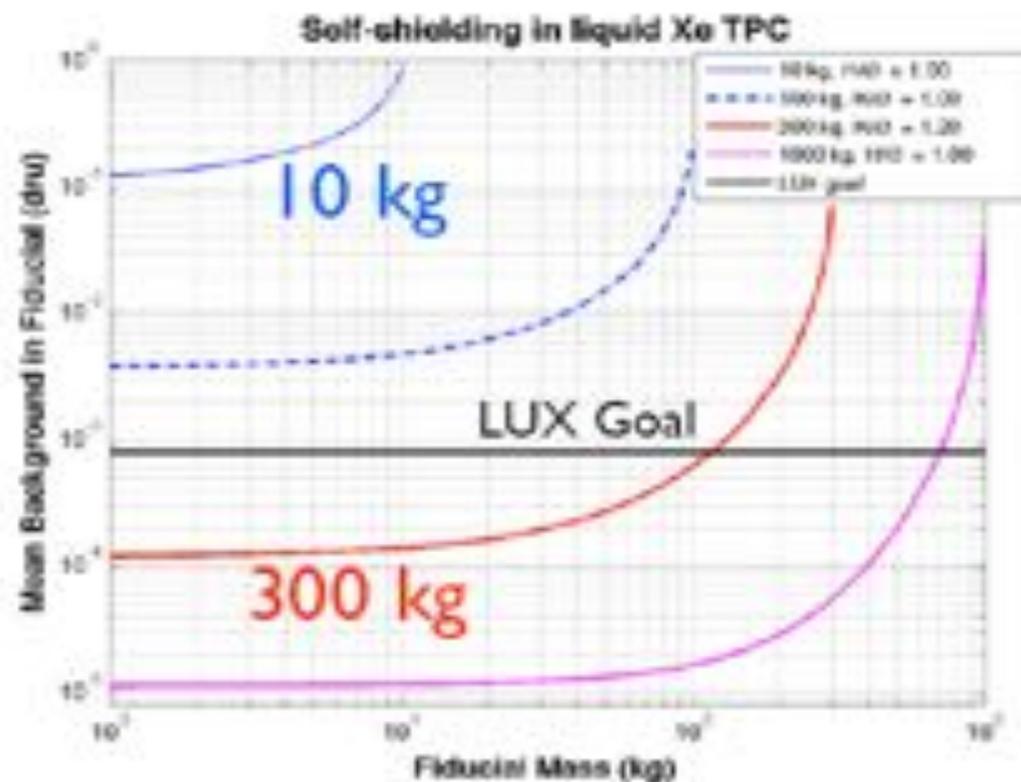
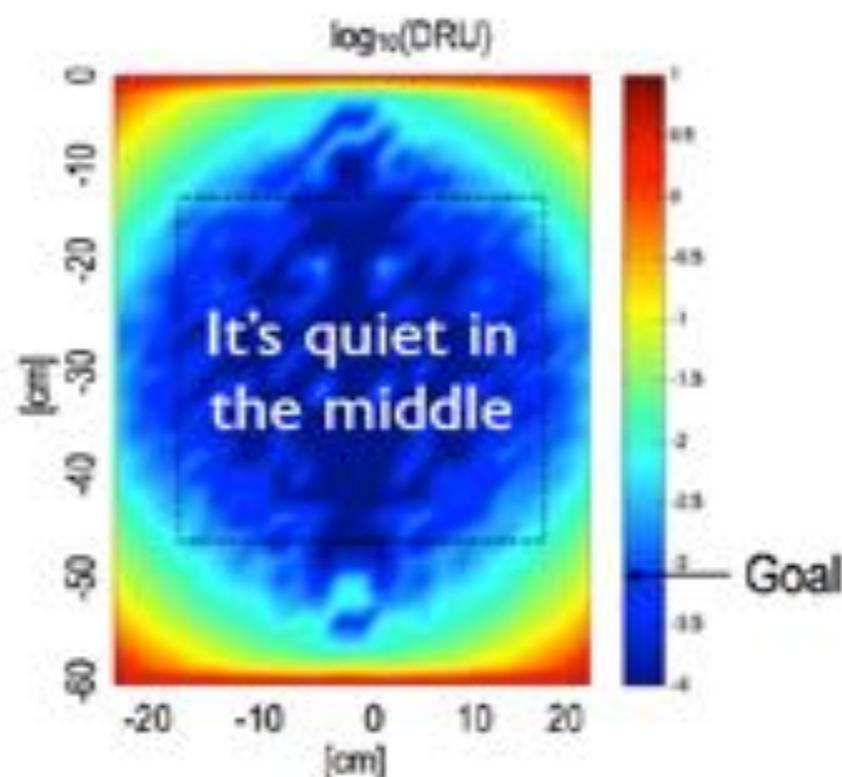
Outer cryostat

Inner cryostat

- 370 kg xénon
 - 300 kg région active
 - 100 kg région cible WIMPs
- 122 PMTs 2"
- Cryostat titane basse radioactivité

LUX et XENON100: liquide double phase



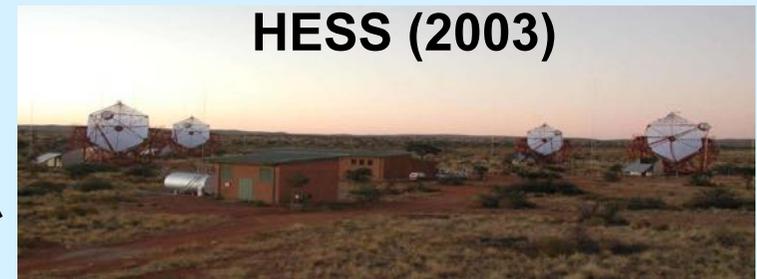
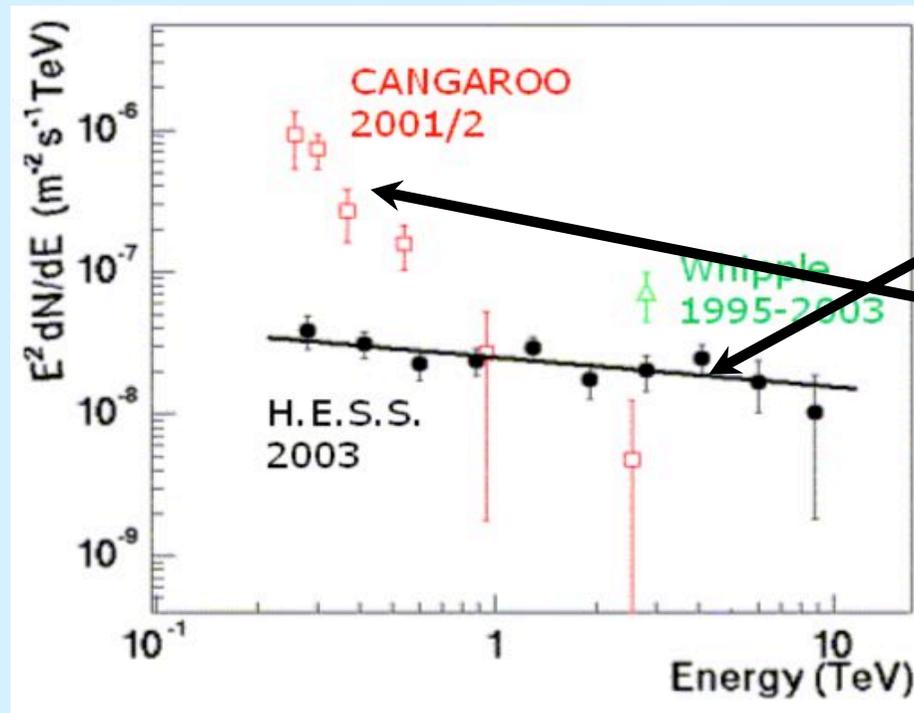


- LXe is a dense target at 3 g/cm^3
- Self-shielding allows this technology to **greatly** benefit from scaling up

Détection de l'annihilation des WIMPs: observer le rayonnement gamma

Trop d'alertes différentes = pas de signal crédible

PAMELA, ATIC, Cangaroo, HEAT, INTEGRAL, EGRET, AMS...



Surprise : la gravité répulsive !

Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes, visibles à plusieurs centaines de millions d'années-lumière : elles peuvent servir d'**étalon de lumière**.

En les utilisant, on a découvert en 1998 que **l'expansion de l'Univers s'accélère sous l'effet d'une gravité répulsive** dans laquelle plus des **2/3 de l'énergie de l'Univers** semblent résider.

Mais qu'est-ce que cette gravité répulsive ?



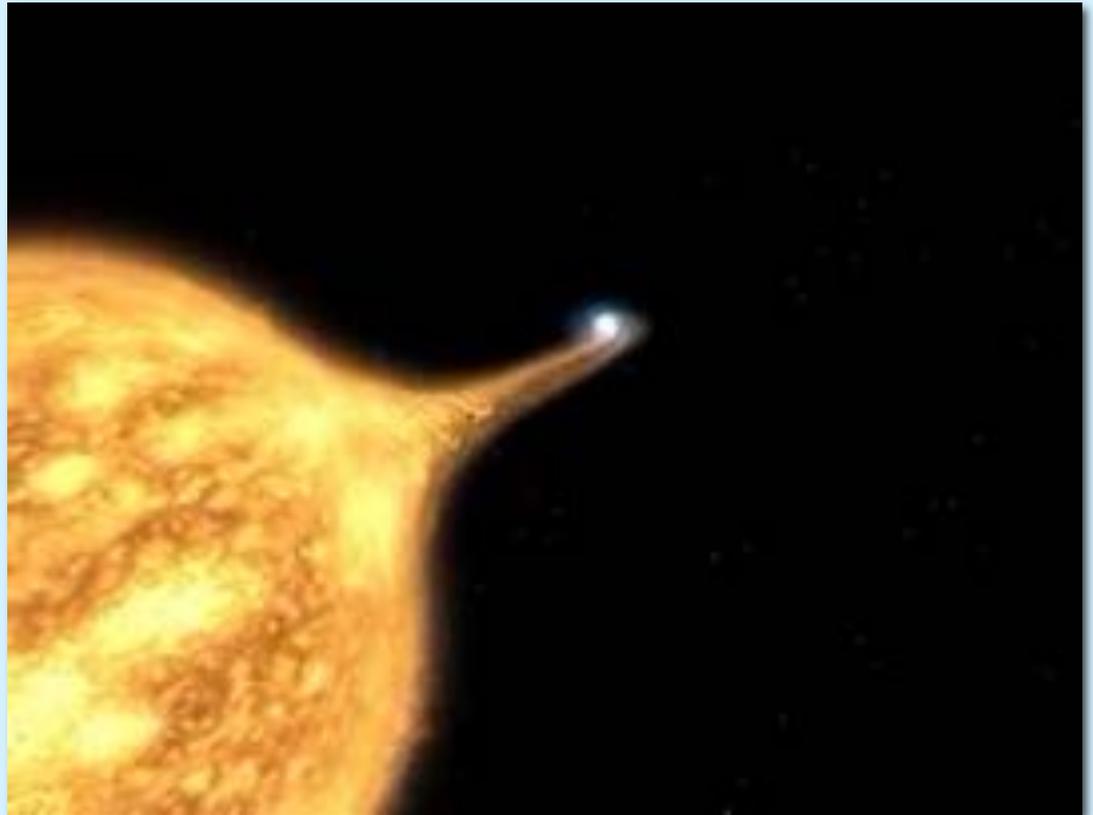
La dernière explosion proche de supernova, dans le nuage de Magellan, a été observée en 1987

Surprise : la gravité répulsive !

Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes.

Les supernovae de **type 1a** (cf. ci-contre) ont une luminosité très reproductible.

Cela permet de les utiliser comme des « **chandelles-standard** » jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière...

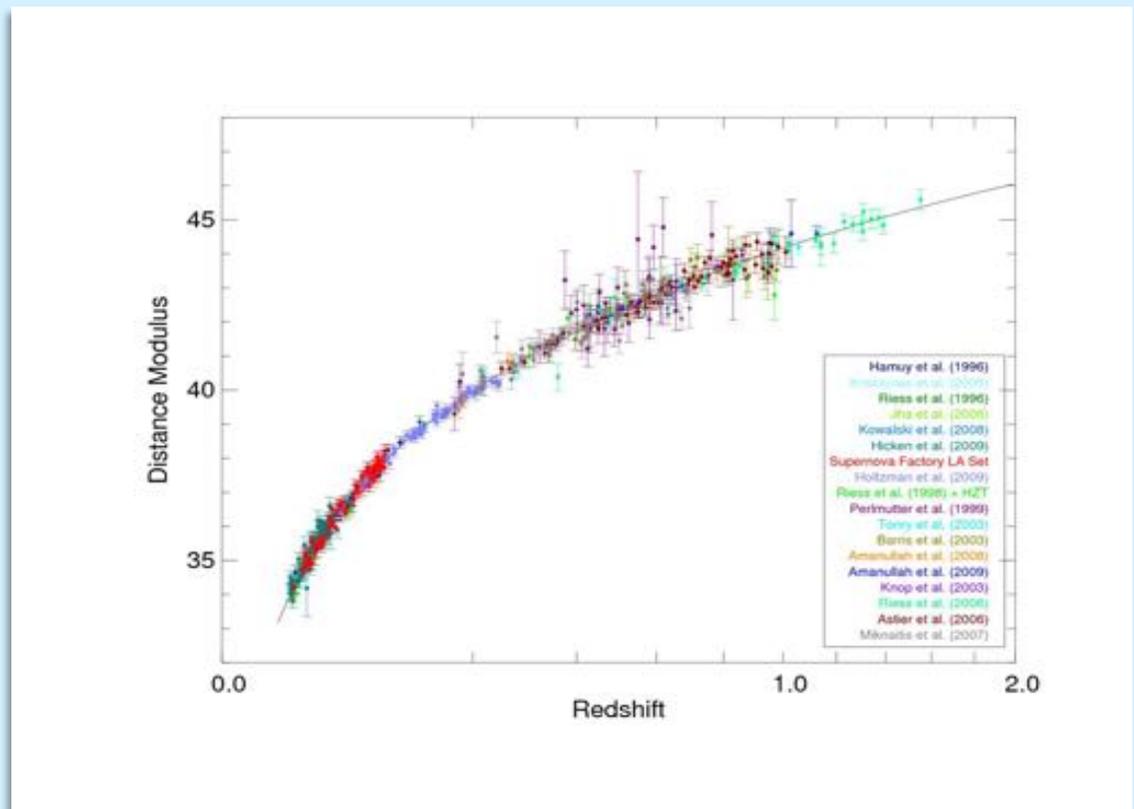


Surprise : la gravité répulsive (Energie Noire) !

Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes.

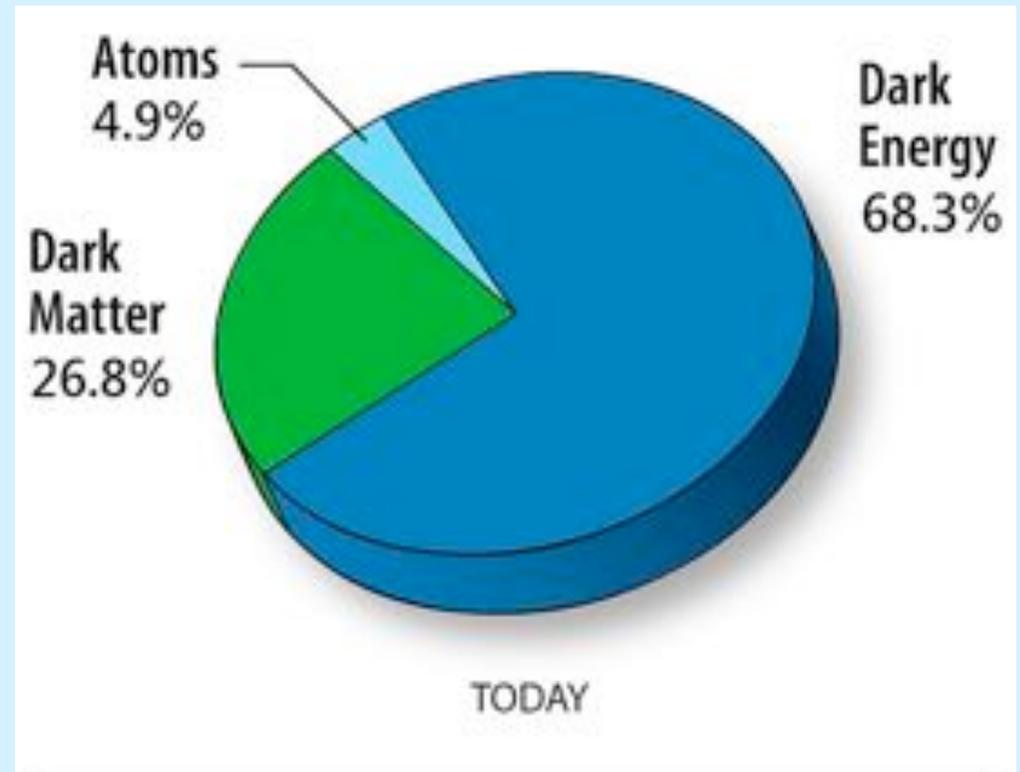
Les supernovae de **type 1a** (cf. ci-contre) ont une luminosité très reproductible.

Cela permet de les utiliser comme des « **chandelles-standard** » jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière...



Rappel : mensurations univers par Planck

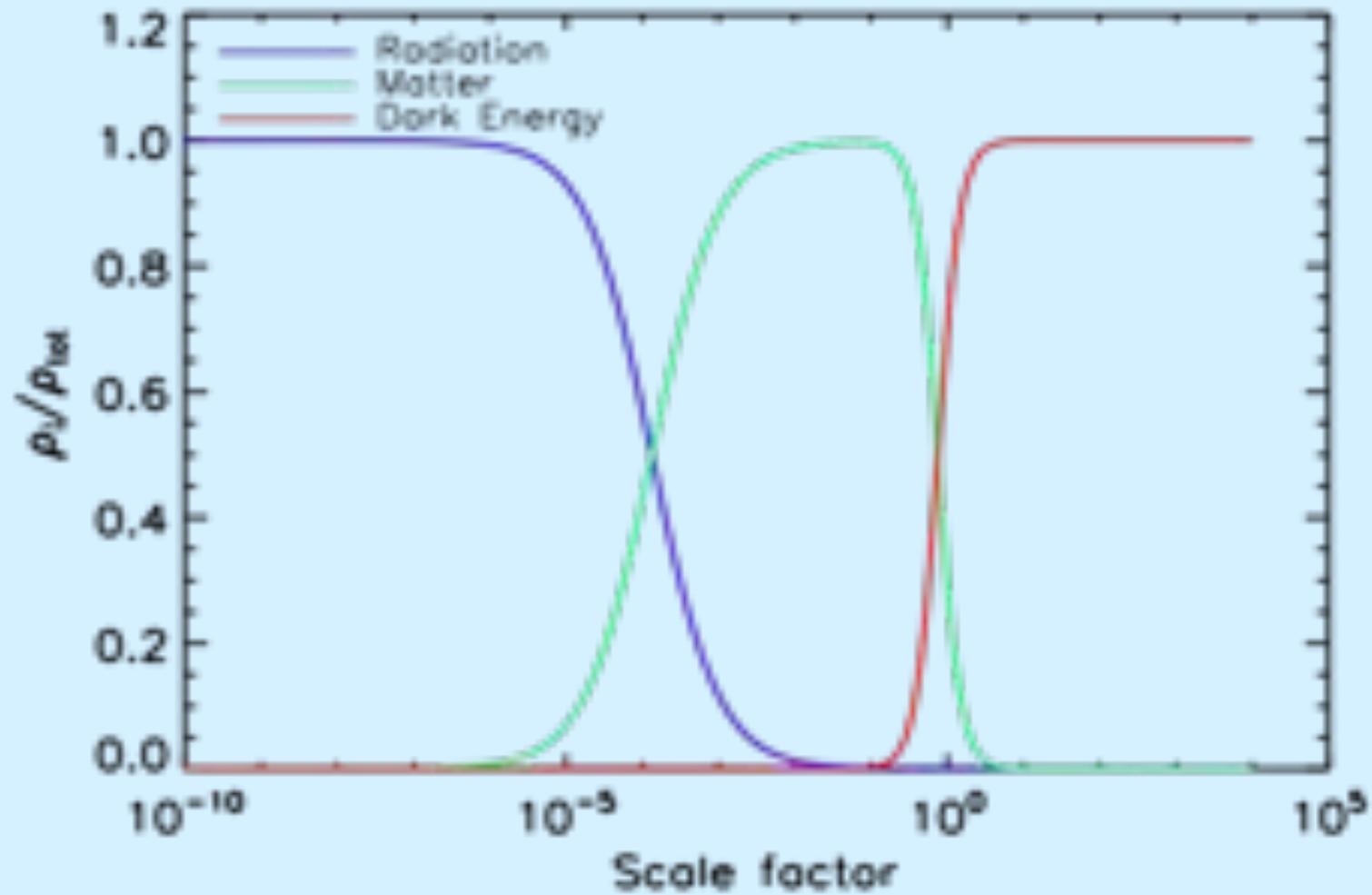
- Energie Noire $W_{DE} \approx 68.3 \%$
(avant Planck $\approx 73\%$)
- Matière Noire $W_{DM} \approx 26.8 \%$
(avant Planck $\approx 23\%$)
- Matière ordinaire (nucl.) $\approx 4.9 \%$
(avant Planck $\approx 4.3 \%$)
- Taux d'expansion univers
 $H_0 \approx 67.5 \pm 1 \text{ km/s/mpc}$ (avant Planck ≈ 70)
- Age de l'Univers : 13.8 milliards d'années



Conclusions partielles...

- Les expériences les plus récentes en cosmologie (Planck, Supernovae, structures, ...) indiquent que notre Univers contient environ 30% de matière. dont seulement 4.9% est fait de matière nucléaire habituelle (soit $\approx 16\%$ de la matière)
- Un candidat naturel pour la matière noire non ordinaire est le neutralino de la supersymétrie
- Mais ni au LHC (production directe), ni dans les laboratoires souterrains, on ne voit de preuve de cette matière non standard
- A mon sens, la découverte de ce qu'on appelle l'Energie Noire affaiblit le cas de la Matière Noire sous forme de WIMPs, la rendant moins naturelle

Un univers finalement très peu naturel...



Conclusions partielles (*ff*)...

- Les expériences futures de détection directe de la Matière Noire, ainsi que les expériences auprès du LHC à énergie de 13 TeV (au lieu de 7 TeV) permettront peut-être de détecter enfin des particules de Matière Noire
- Même si les mesures cosmologiques sont aujourd'hui d'une grande précision, il est possible que notre description d'un Modèle Standard en termes de Matière Noire et d'Énergie Noire soit fautive
- Dans l'attente de cette compréhension, l'approche des scientifiques est de tester la cohérence de ce Modèle Standard cosmologique et d'en chercher les failles...