

A detailed simulation of the cosmic web, showing a complex network of dark matter filaments in shades of blue and purple, with bright orange and yellow clusters of galaxies and star-forming regions. The background is filled with these intricate structures, creating a sense of depth and vastness.

# La masse manquante de l'Univers : à la recherche de la matière noire

19 Novembre 2016  
Les conférences du CPPM

Corinne Augier, IPNL  
UCBL et Université de Lyon, IN2P3/CNRS  
augier@ipnl.in2p3.fr

SIMULATIONS ILLUSTRIS

# Nous allons parler de matière noire



## Je vais vous montrer !

- 1- dans notre Univers, plus de 80% de la masse est invisible
- 2- on ne comprend notre Univers qu'avec 26% de matière noire : nécessaire pour former les amas de Galaxies, les Galaxies, notre Voie Lactée, notre Soleil, la Terre...

## Mais alors cette matière noire, c'est quoi ?

- 3- Euh... sans doute une particule... une nouvelle
- 4- Pour la trouver, les physiciens recherchent partout, dans leurs détecteurs, avec des accélérateurs, sur Terre, dans la mer ou dans la glace... voire même dans l'espace !

# Dunkle kalte Materie

Ou **matière sombre froide** !

C'est l'expression employée par **Fritz Zwicky** en 1933.

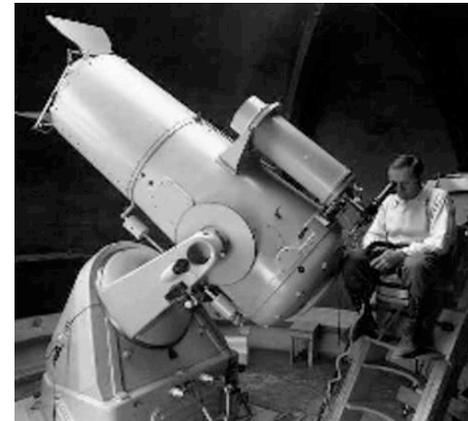


En 1933, Zwicky annonce qu'il a étudié l'amas de Galaxies de Coma.

**La masse totale mesurée pour l'amas est de 100 à 400 fois supérieure à la somme des masses des galaxies observables par la lumière qu'elles émettent !**

$$M_{\text{totale}} > M_{\text{visible}}$$

**Il existerait, au sein de l'amas du Coma, une masse non visible que Zwicky attribue à de la matière sombre froide !!**



# Dunkle kalte Materie

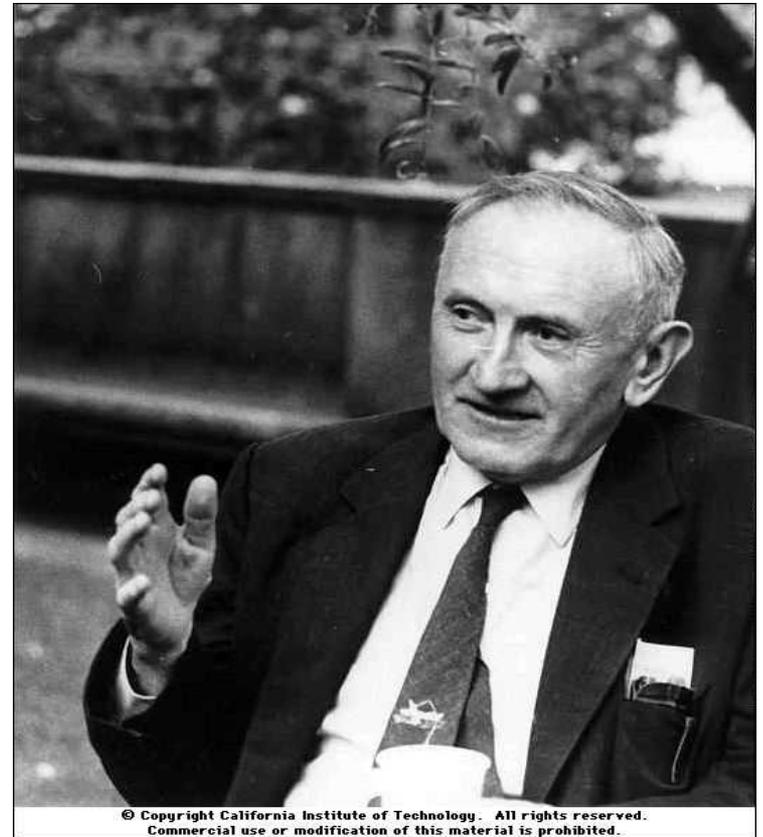
Ou **matière sombre froide** !

C'est l'expression employée par **Fritz Zwicky** en 1933.

Mais Zwicky est connu pour

- son caractère épouvantable
- ses idées farfelues comme
  - l'existence de supernovae
  - l'existence d'étoiles à neutrons...

**On comprend que presque personne ne s'y intéresse vraiment pendant plusieurs dizaines d'années !**



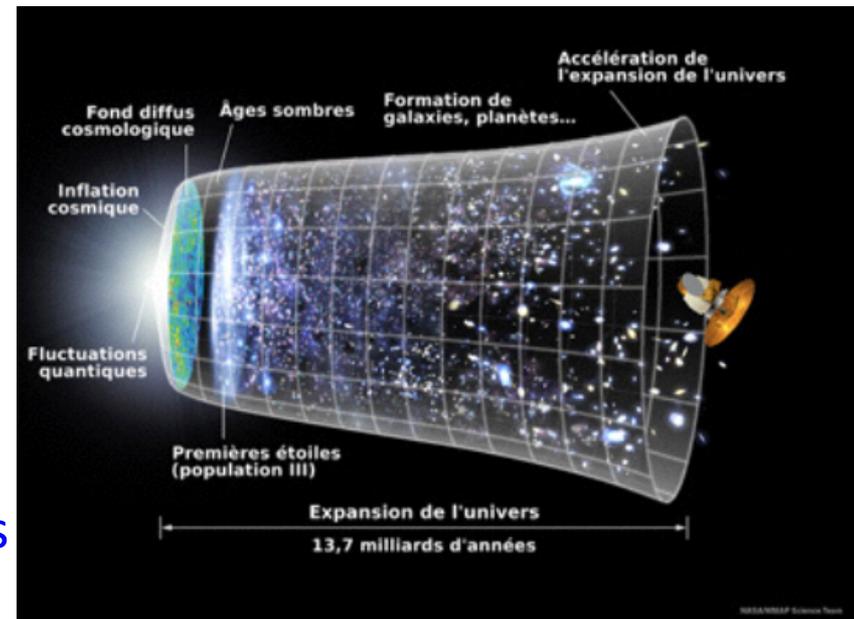
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

# Un peu d'histoire

La situation s'améliore vers 1970

- Théorie du Big-Bang acceptée
- Détecteurs de plus en plus précis
- Satellites d'observation X et radio

Les études des vitesses de rotation des Galaxies sont de plus en plus nombreuses et de plus en plus détaillées



La connaissance des amas de Galaxies se précise : confirmée par observation d'un intense rayonnement X, puis découverte des distorsions de la lumière par lentille gravitationnelle (arcs)

La cosmologie du Big-Bang se confirme, le mécanisme de formation des Galaxies par instabilité gravitationnelle est mis au point. Mais d'après certaines observations (CMB) : possible seulement si de 10 à 50 fois plus de masse invisible que de matière lumineuse !!

# 1970, matière noire dans les Galaxies



Vera Rubin et W. Kent Ford Jr. obtiennent nouvelles mesures de la rotation de la galaxie d'Andromède (ou M31).



Grâce aux progrès de la détection, la rotation a pu être mesurée plus loin du centre.

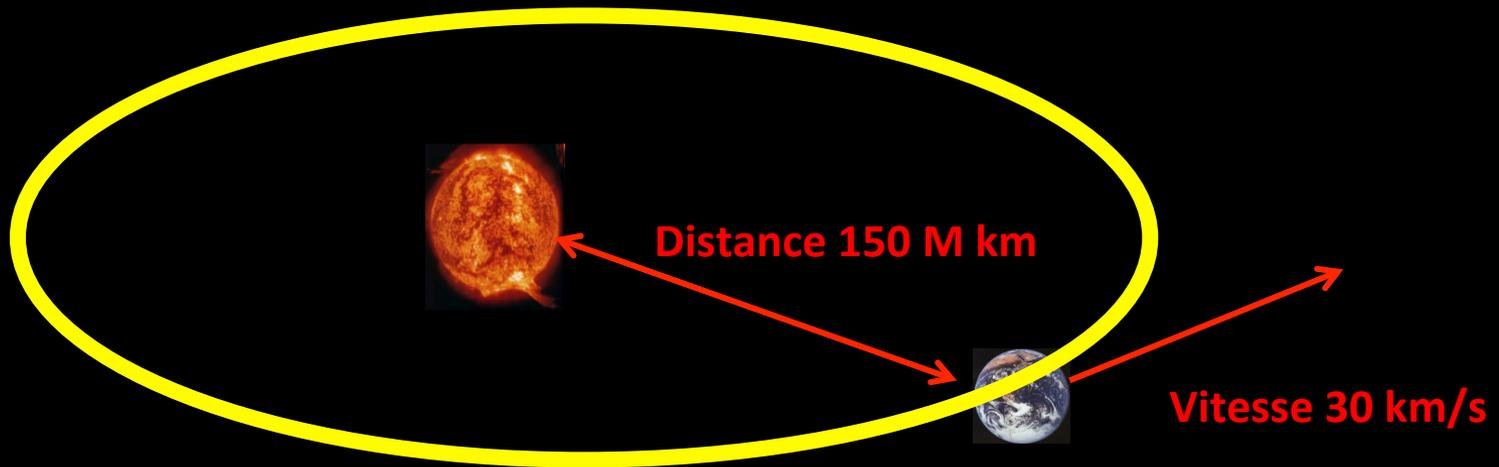
Ils obtiennent une mesure de la vitesse de rotation en fonction du rayon (courbe de rotation) et même au-delà de la matière visible.



# Vitesse de rotation des Galaxies

La vitesse de rotation dépend de la masse qui attire, et de la distance de cette masse

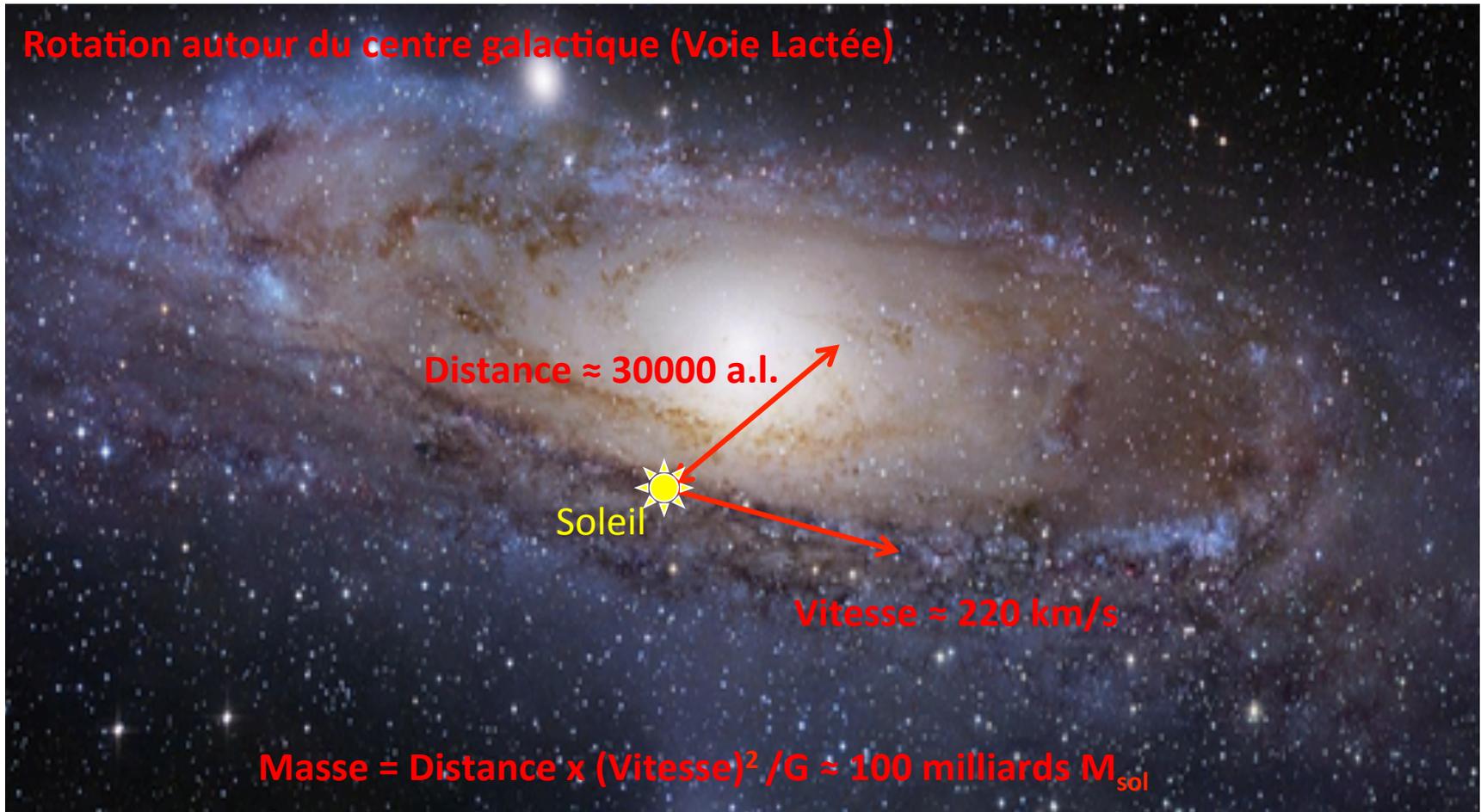
Rotation autour du centre du Soleil



$$\text{Masse} = \text{Distance} \times (\text{Vitesse})^2 / G = 1 M_{\text{sol}}$$

# Vitesse de rotation des Galaxies

La vitesse de rotation dépend de la masse qui attire, et de la distance de cette masse

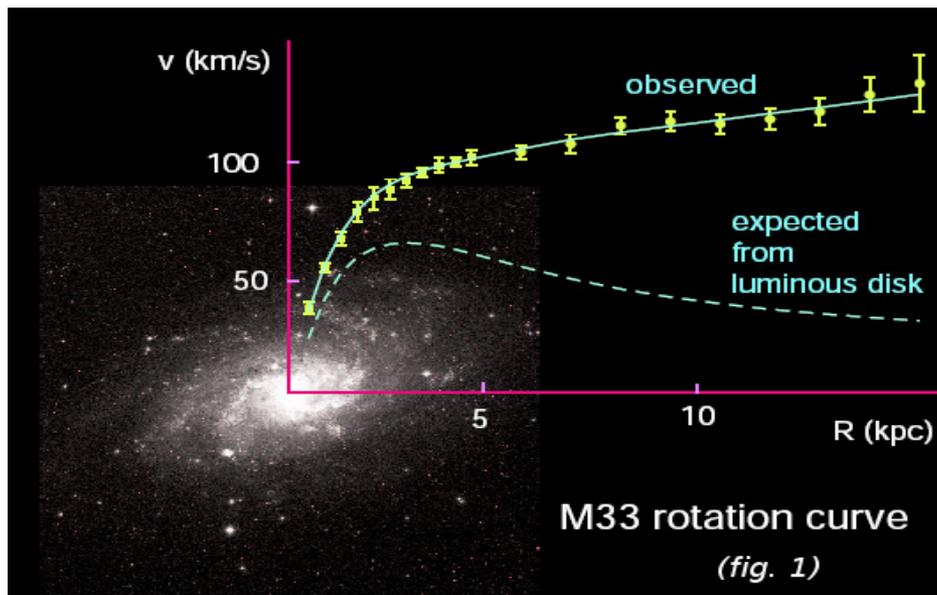


Masse des étoiles dans la Voie Lactée estimée entre 100 et 300 milliards  $M_{sol}$  : ok

# Vitesse de rotation des Galaxies

La vitesse devrait diminuer quand le rayon augmente au-delà de la matière visible mais ici ce n'est pas le cas.

**La Galaxie est plus lourde et plus grande que son disque lumineux !**



D'où vient cette masse ?

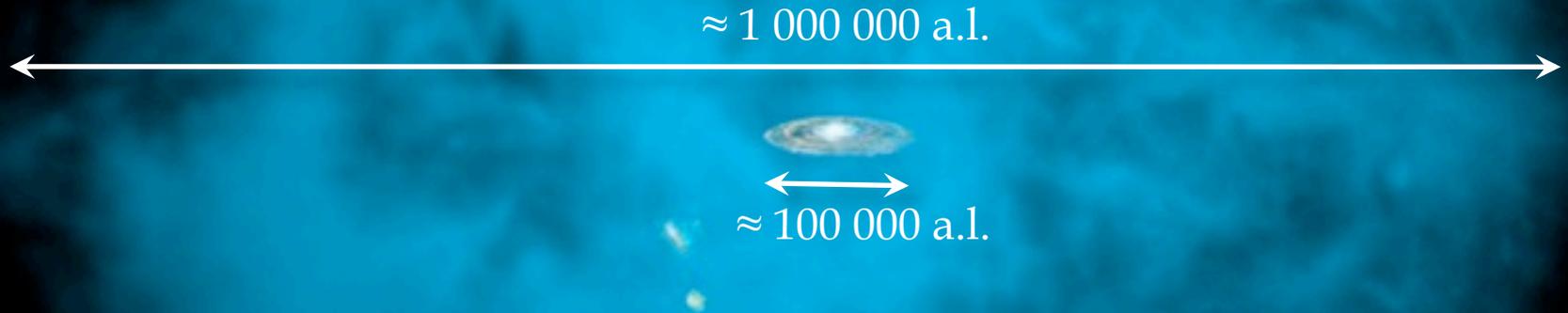


Masse totale de la Voie Lactée estimée à 1000 milliards  $M_{\text{sol}}$  ...

# Comprendre la vitesse constante ?

Un halo de matière sombre englobe la Galaxie.

Sa densité doit être inversement proportionnelle au rayon carré du halo

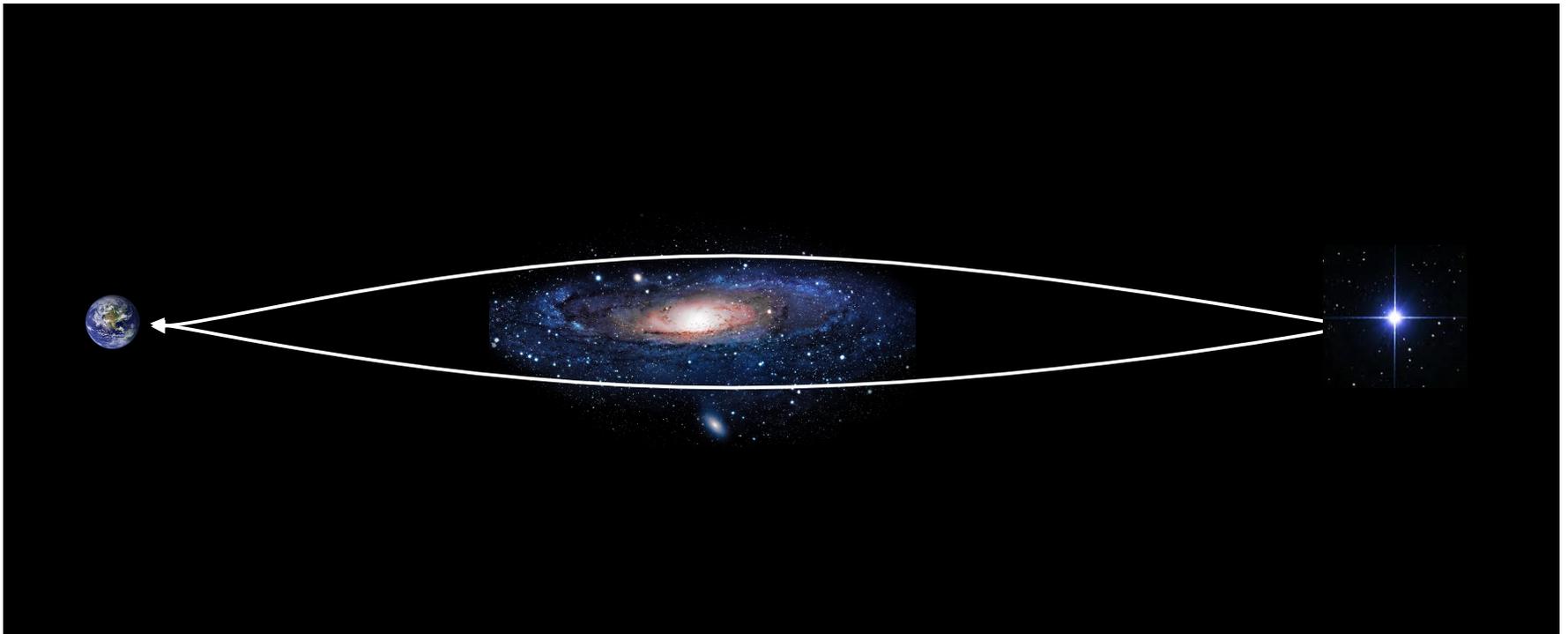


La masse du halo doit être significativement plus grande que la masse lumineuse.  
Son rayon doit être de l'ordre de 5 à 10 fois celui du rayon lumineux de la galaxie.

# Effet de lentille gravitationnelle dans les amas de Galaxies

Déviatio*n* trajectoire de la lumière  
courbure espace-temps par objets massifs  
(relativité générale)

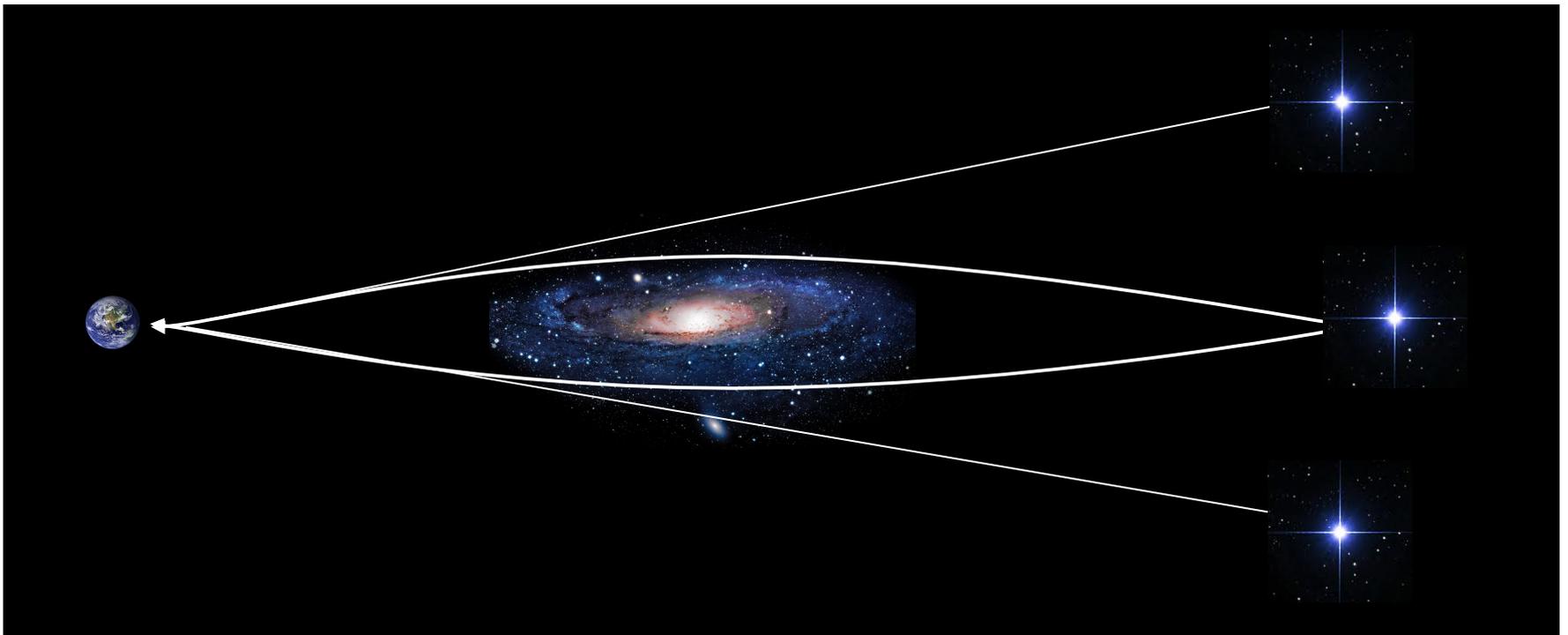
Prouve existence du halo de matière noire



# Effet de lentille gravitationnelle dans les amas de Galaxies

Déviatio*n* trajectoire de la lumière  
courbure espace-temps par objets massifs  
(relativité générale)

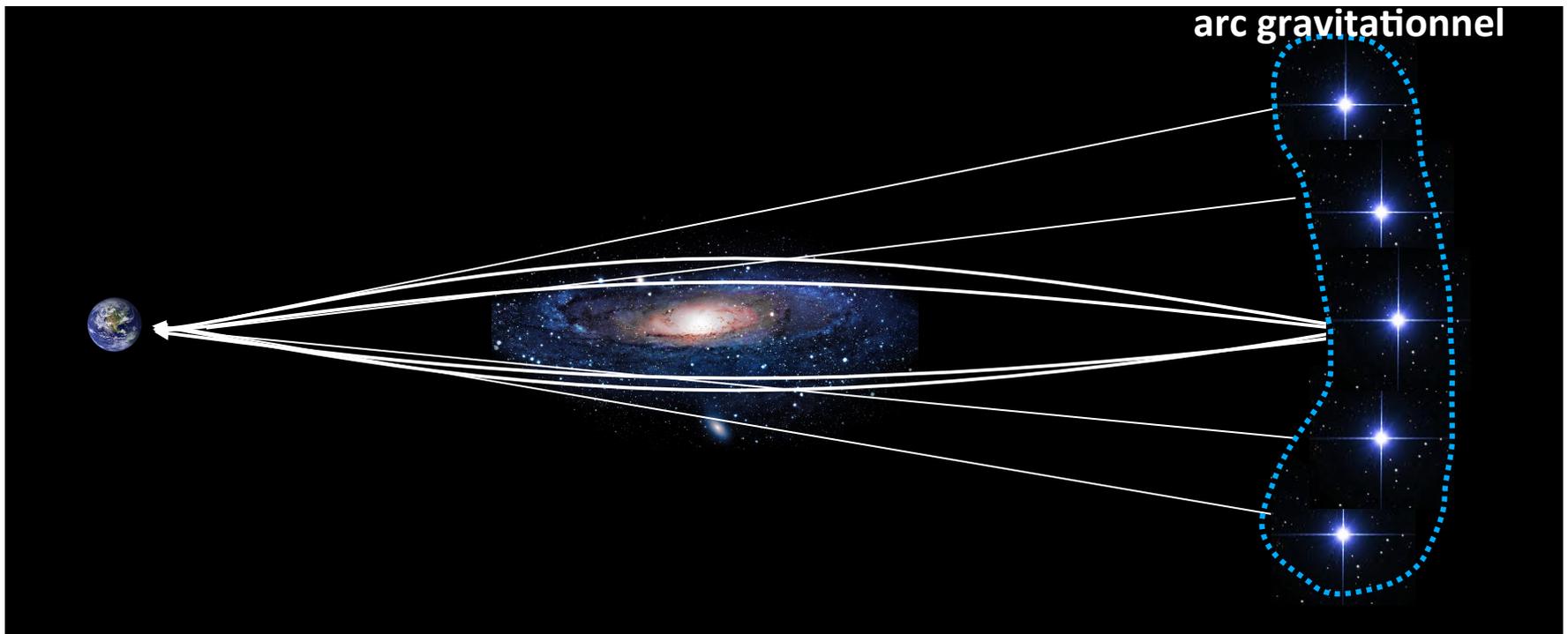
Prouve existence du halo de matière noire



# Effet de lentille gravitationnelle dans les amas de Galaxies

Déviations trajectoire de la lumière  
courbure espace-temps par objets massifs  
(relativité générale)

Prouve existence du halo de matière noire



# Effet de lentille gravitationnelle dans les amas de Galaxies



*Amas de galaxies Abell 1689 (HST)*

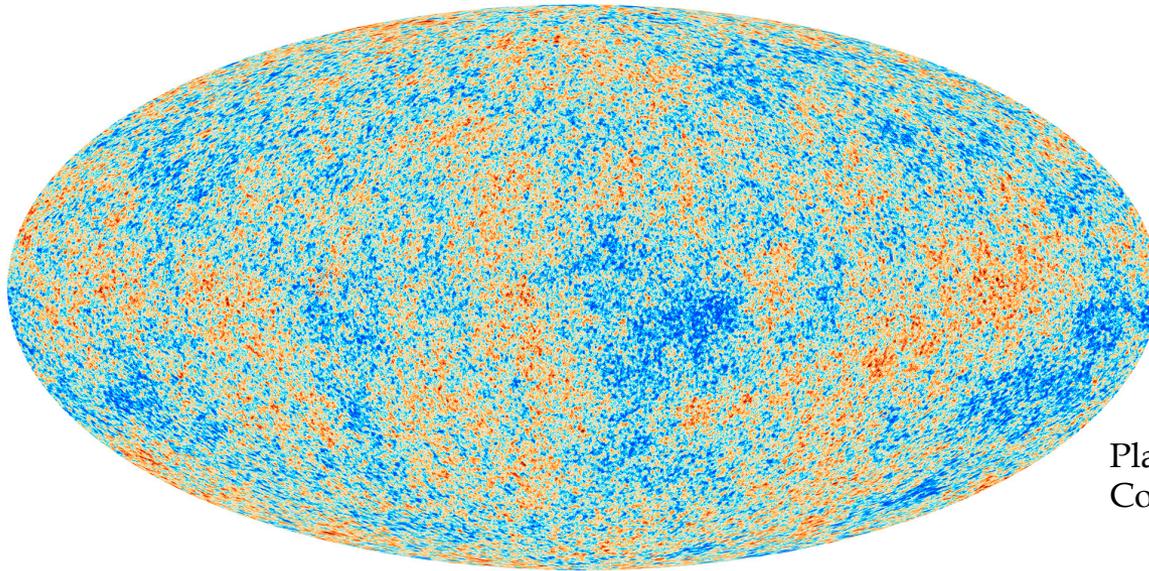
# Etude du fond diffus cosmologique (CMB)

## Le fond diffus cosmologique micro-ondes (Cosmic Microwave Background)

Rayonnement de photons émis 380000 ans après le Big-Bang.

Sa distribution est remarquablement **homogène** (d'un point à l'autre  $\approx 10^{-5}$  en valeur relative).

Les (très faibles) **inhomogénéités de densité de matière** dans le plasma primordial se traduisent par des **anisotropies de température** dans le spectre du CMB.



**Rayonnement du CMB  
mesuré par le satellite  
Planck et montrant les  
fluctuations relatives de  
température.**

Planck Collaboration, "Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters," arXiv:1502.01589.

**L'étude de ces anisotropies permet de déterminer la distribution de densité de matière environ 380000 ans après le Big-Bang.**

# Etude du fond diffus cosmologique

## Résultats de PLANCK 2015

L'Univers et sa composition ont bien changé depuis le Big-Bang et ils vont continuer à changer : notre Univers est en expansion

Inflation  
(pendant le Big-Bang)



3 minutes  
après le Big-Bang



380000 ans  
après le Big-Bang



2 milliards d'années  
après le Big-Bang

0.1% rayonnement, 0.1% neutrinos



Aujourd'hui

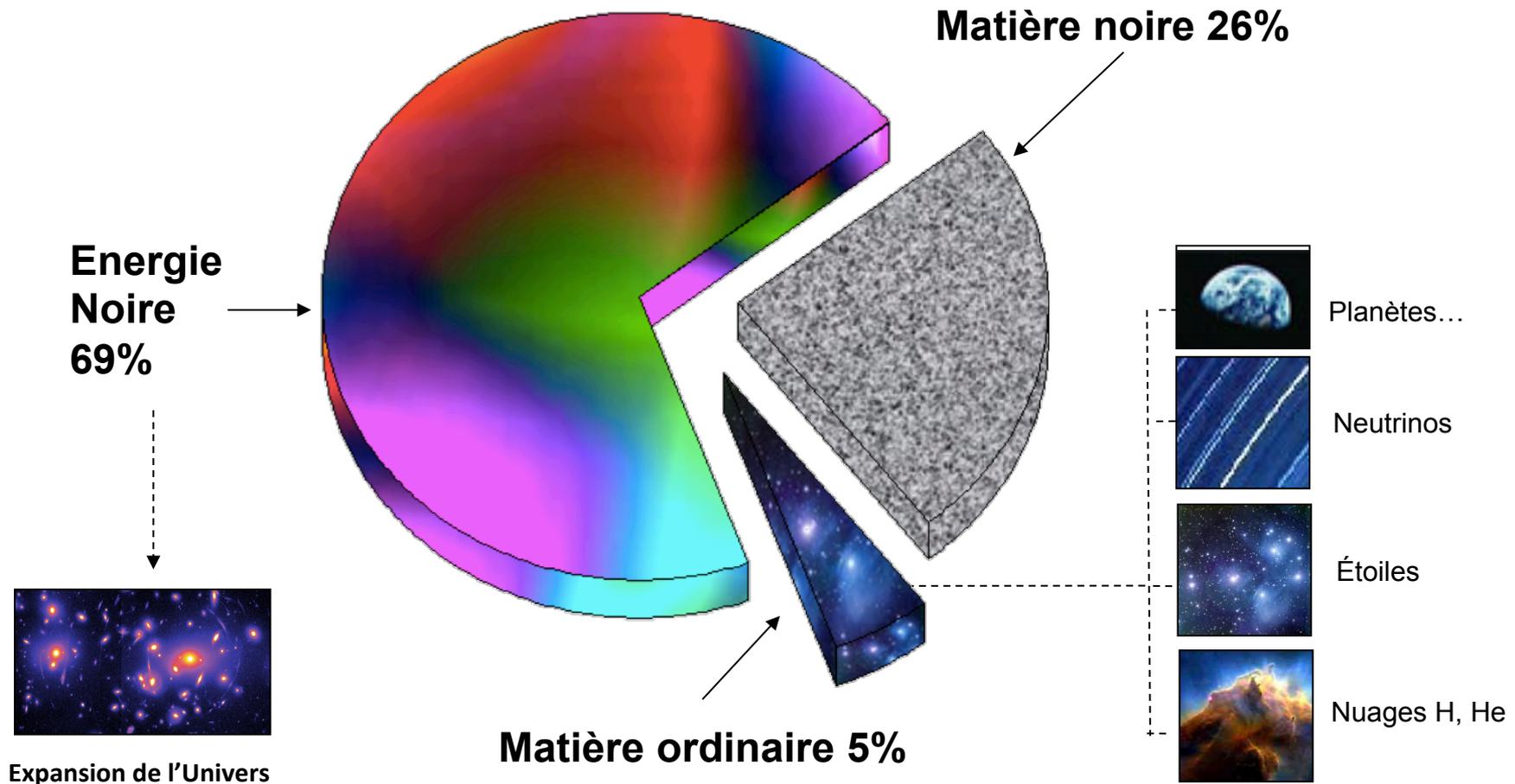


Dans 10 milliards  
d'années



# Une composition inattendue

## Résultats PLANCK 2015 : bilan énergie-matière de l'Univers



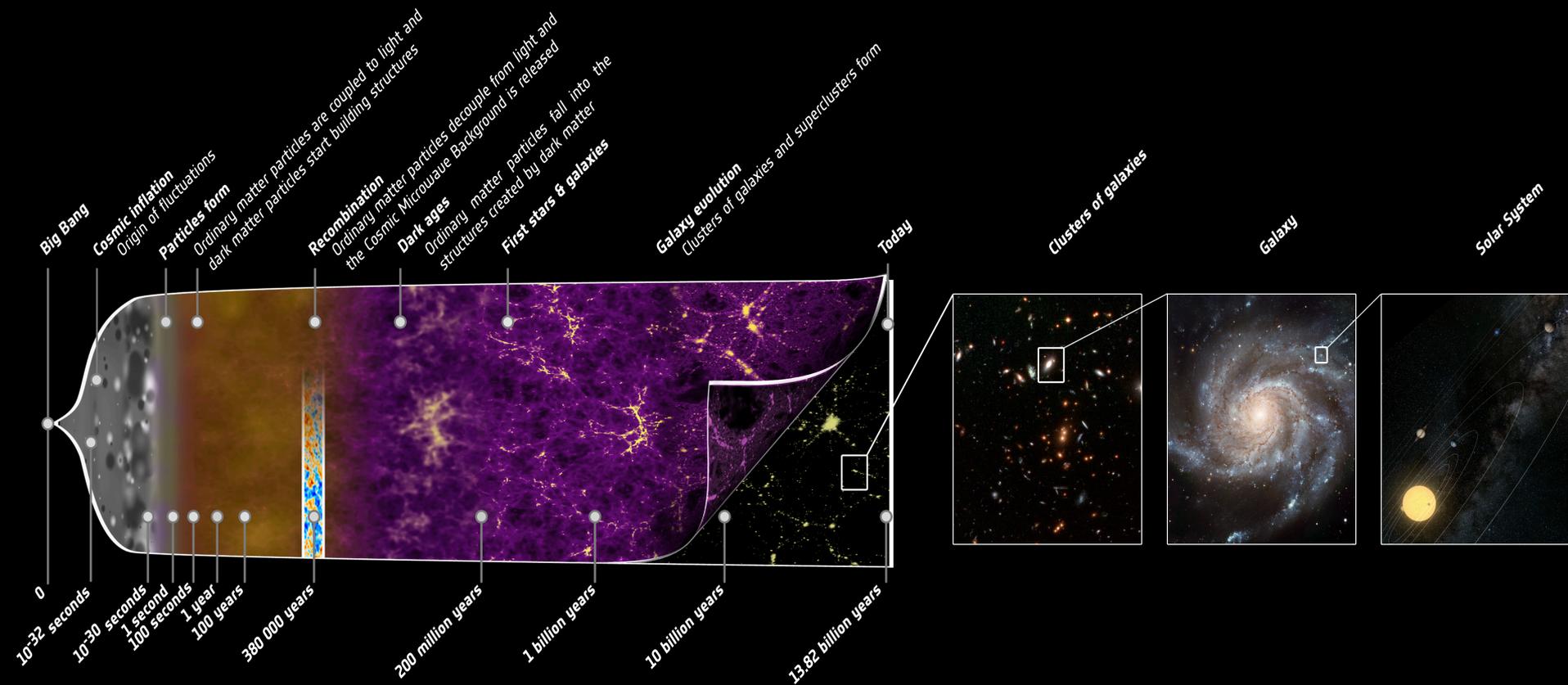
# Aller plus loin avec les simulations numériques

**ILLUSTRIS : Zoom, de 100 Mpc (échelle de la matière noire) à 10 kpc (échelle d'une galaxie spirale individuelle)** <http://www.illustris-project.org/media/>  
(avec 1 Mpc = 3,26 millions d'années-lumière =  $3 \times 10^{22}$  m = 30 milliards de milliards de km...)



# Aller plus loin avec les simulations numériques

## L'histoire de l'Univers par les simulations et les résultats du satellite Planck



# Aller plus loin avec les simulations numériques

## L'histoire de l'Univers par les simulations et les résultats du satellite Planck

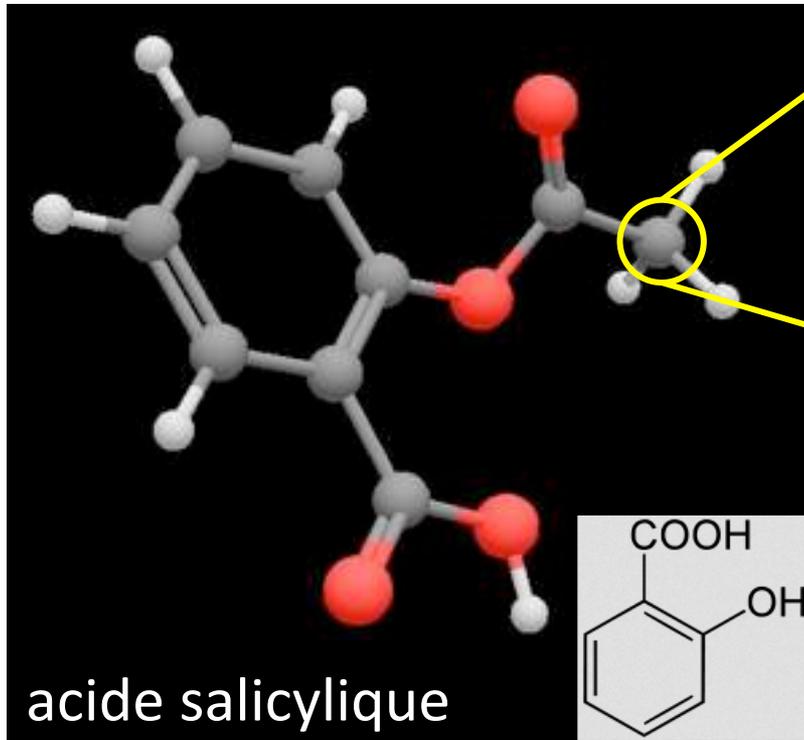
Arrête un peu !!  
Tu vois bien qu'il  
en fallait de la  
matière noire, et  
froide en plus !!



Fritz Zwicky (1933)

De la matière noire froide (non relativiste) :  
oui mais alors c'est quoi ????  
Une particule : mais laquelle ?

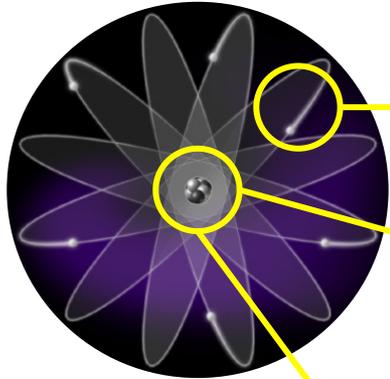
# Une molécule ? Un atome ?



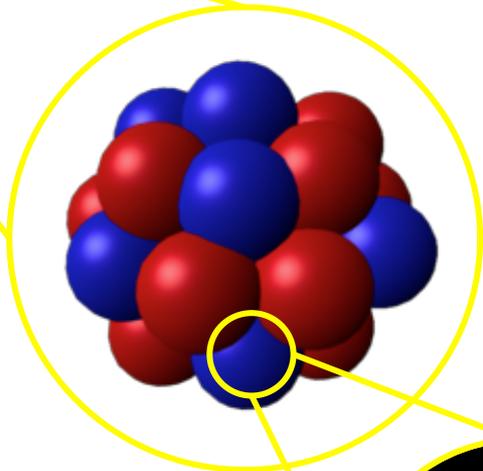
Exemple du Carbone 12 :  
 $^{12}\text{C}$  = 6 protons, 6 neutrons  
et 6 électrons

**Mais non : on a dit une particule !! Allons voir plus petit**

# Encore plus petit !



- ▣ Les électrons :
- ▣ des particules élémentaires



- ▣ Les noyaux :
- ▣ constitués des nucléons,
- ▣ protons & neutrons



Les quarks :  
toujours plus petits...  
et élémentaires aussi

**On se rapproche de l'élémentaire, enfin !**

# Les particules élémentaires



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

## INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte
infinie	Gravitation

<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

On connaît leur propriétés : et celles de la matière noire ?

# Carte d'identité de la matière noire froide

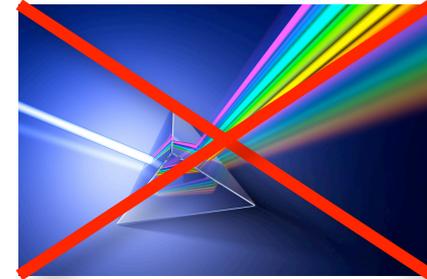
## ▣ Ce qu'on sait d'elle :

Elle a une masse (encore inconnue).

Elle interagit par interaction gravitationnelle.

Elle n'interagit pas par interactions électromagnétique ou forte.

Elle a une faible énergie cinétique ( $v \approx c/1000 \approx 300 \text{ km/s}$ )



# Les particules élémentaires



## Conclusion

La matière noire ne correspond à aucune des particules élémentaires connues !!

Terre  $10^7$  m

Soleil  $10^9$  m

Galaxie  $10^{21}$  m



Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

**LIGGS**

Manifestation du ...  
la matière, ce ...  
leur masse. Il ...  
re interactions

Désintégrations ...  
ctives  $\beta^+$  et  $\beta^-$  de ...  
noyaux instables

ité, magnétisme, ...  
ésion des atomes ...  
molécules, chimie

sion des protons, ...  
ns et des noyaux, ...  
nergie nucléaire

Gravité, pesanteur, ...  
système solaire, galaxies



# Carte d'identité de la matière noire froide

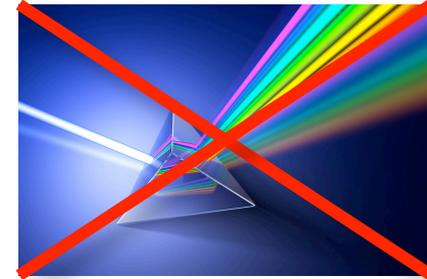
## ▣ Ce qu'on sait d'elle :

Elle a une masse (encore inconnue).

Elle interagit par interaction gravitationnelle.

Elle n'interagit pas avec les interactions électromagnétique et forte.

Elle a une faible énergie cinétique ( $v \approx c/1000 \approx 300 \text{ km/s}$ )



## **Parmi tous les autres : le WIMP, un candidat bien apprécié** (Weakly Interacting Massive Particle)

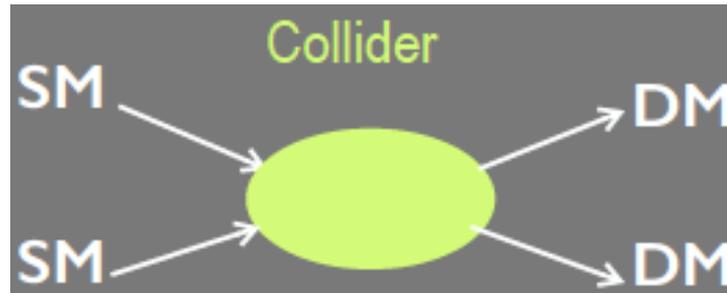
Il interagit aussi par interaction faible.

Il a la bonne densité « relique » : le nombre suffisant au bon moment pour expliquer toutes les observations !

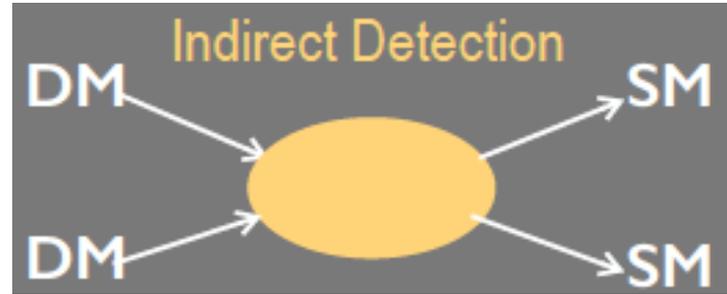


Si les WIMPs interagissent avec la matière,  
on peut les détecter !!!

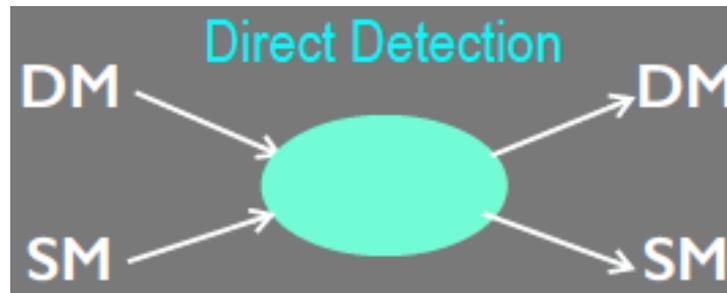
# Comment détecter les WIMPs ?



Production de nouvelles particules en accélérateur :  
 $SM + SM \rightarrow DM + DM + \{SM\}$   
avec  $\{SM\}$  = au moins une particule du modèle standard.



Détection indirecte = annihilation de matière noire :  
 $DM + DM \rightarrow SM + SM$



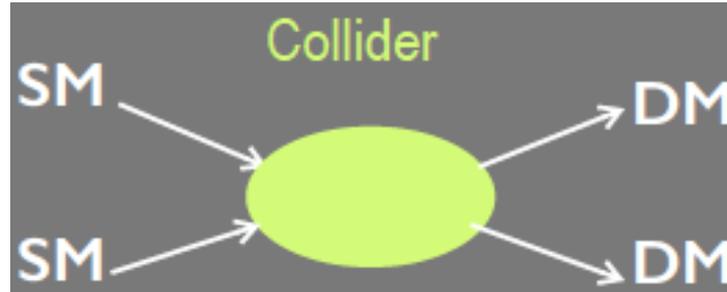
Détection directe = interaction de matière noire par diffusion élastique sur noyau :  
 $DM + SM \rightarrow DM + SM.$

## OUI MAIS :

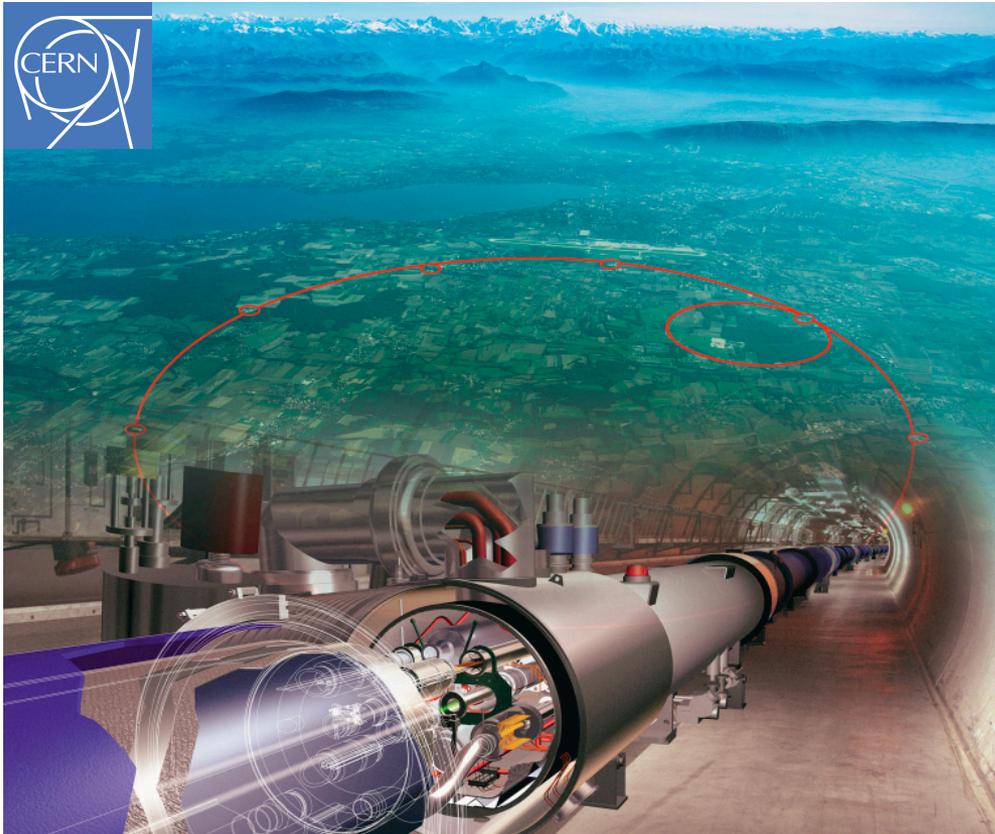
Les WIMPs sont très nombreux dans notre Voie Lactée : on attend un flux de l'ordre de 100000 WIMPs / seconde /  $cm^2$  sur Terre !

Mais interaction faible donc très peu d'interactions avec la matière (très faible section efficace) : de 1 à 100 détections/ tonne / an par exemple en détection directe suivant  $M_{WIMP}$

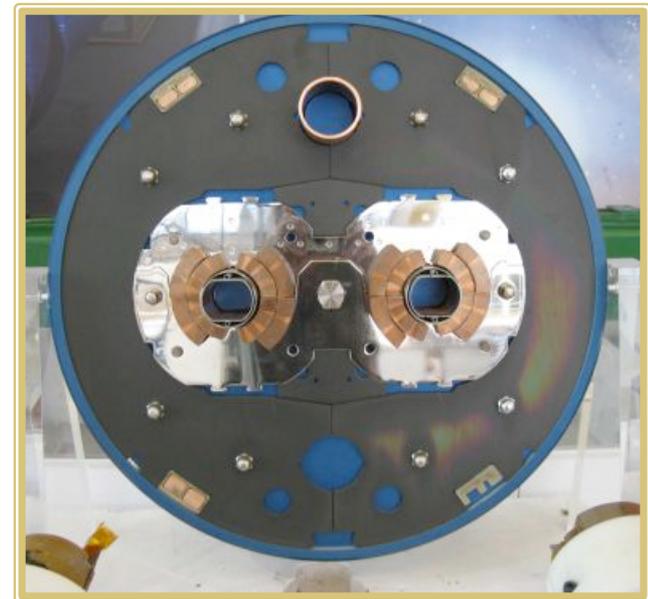
# Production en collisionneur



Production de nouvelles  
particules en accélérateur :  
 $SM + SM \rightarrow DM + DM + \{SM\}$   
avec  $\{SM\}$  = au moins une  
particule du modèle standard.

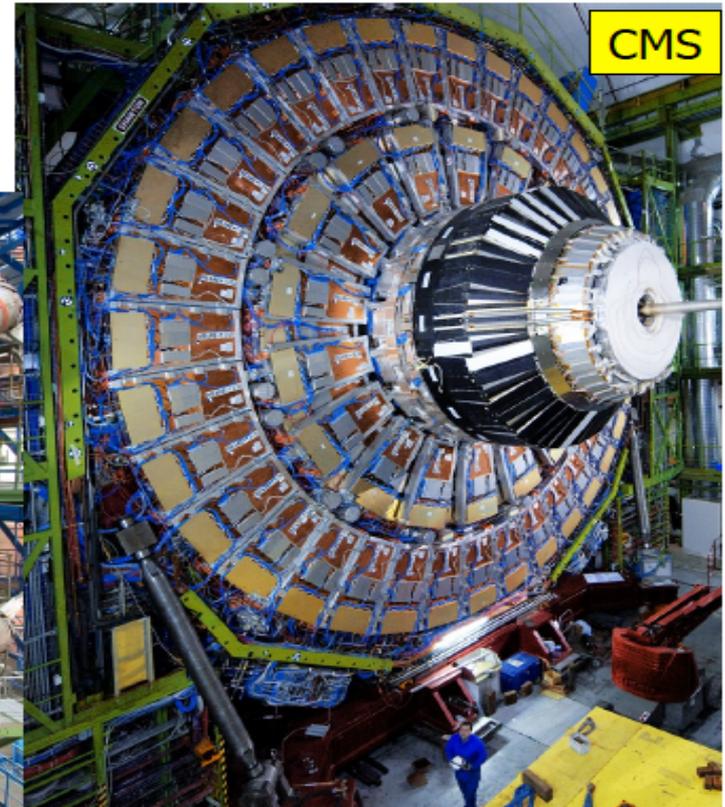
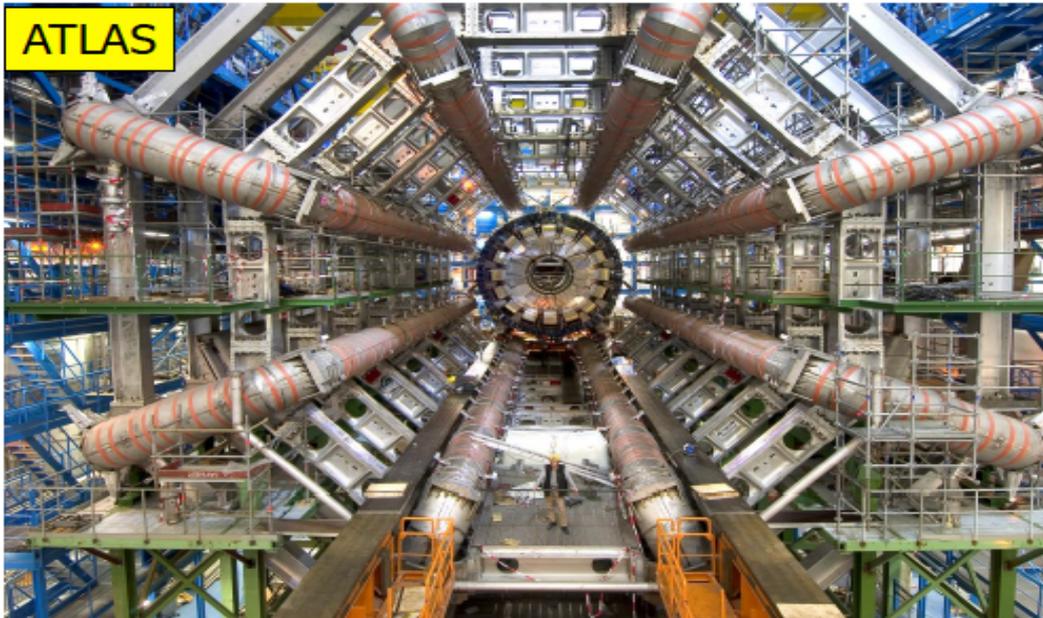


Par exemple au CERN à Genève, dans  
les détecteurs ATLAS et CMS du LHC  
(Large Hadron Collider)



# Recherche de WIMPs dans ATLAS et CMS

- Enregistrent toutes les particules du SM (sauf les neutrinos = énergie manquante)
- Problème : les WIMPs sont invisibles car ils n'interagissent pas dans les détecteurs : donc on cherche leurs produits d'annihilation)



**Le LHC fonctionne depuis 2010.**

**Découverte du boson de Higgs en 2012 (prix Nobel 2013).**

**L'énergie augmente régulièrement, pour atteindre les 7 TeV par faisceau.**

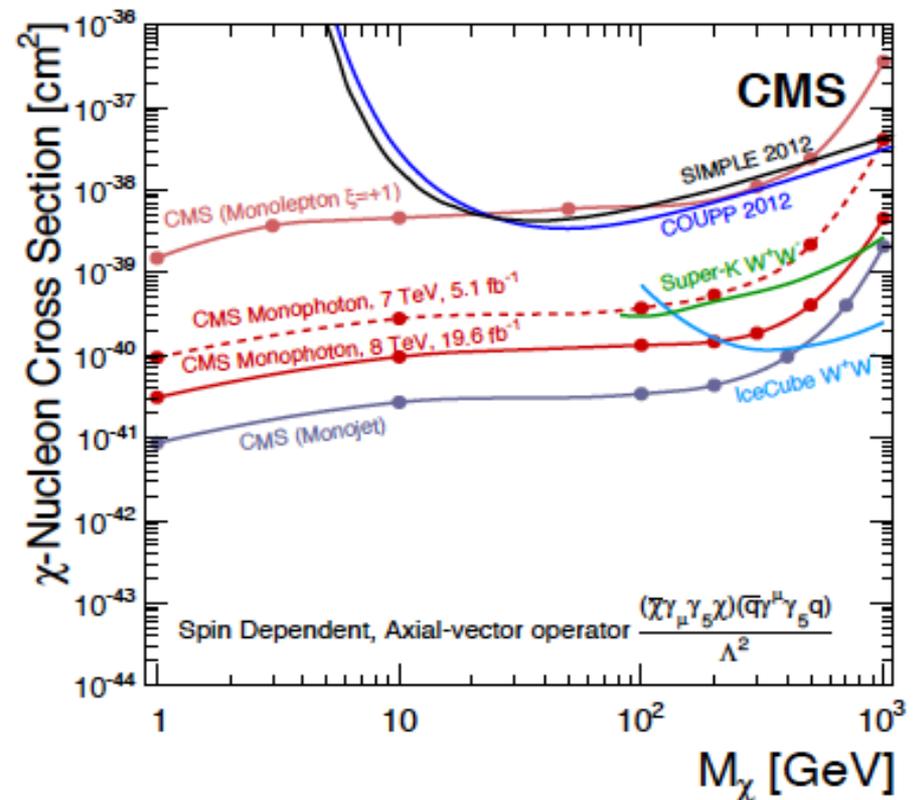
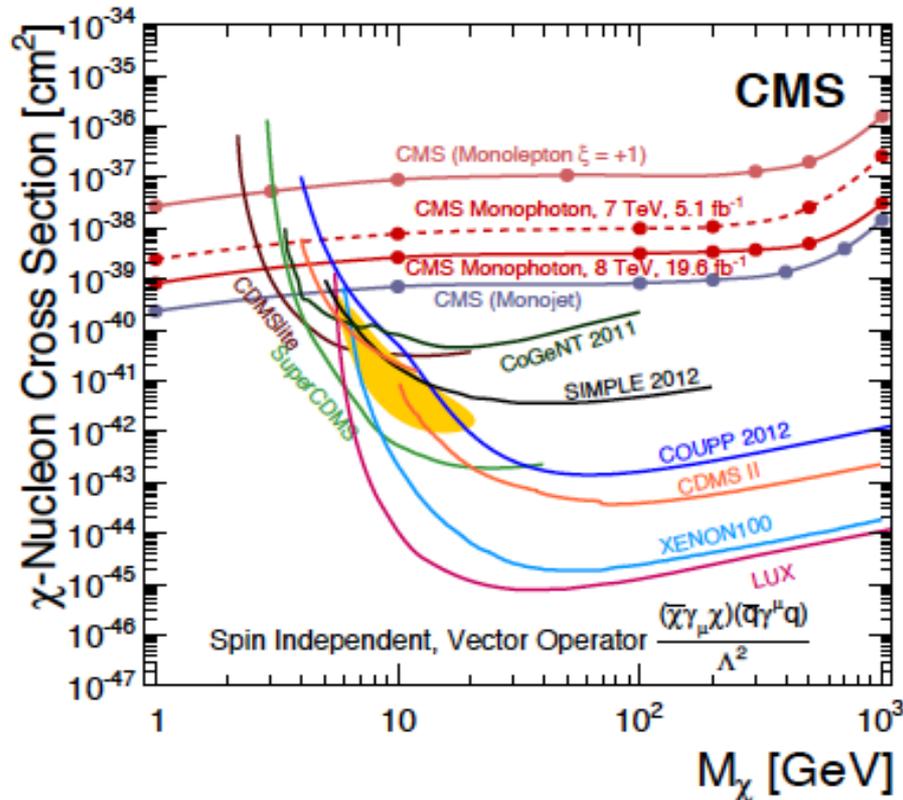
# Recherche de WIMPs dans ATLAS et CMS

Pas d'autres nouvelles particules trouvées

Donc aucune qui pourrait être la matière noire ! A suivre...

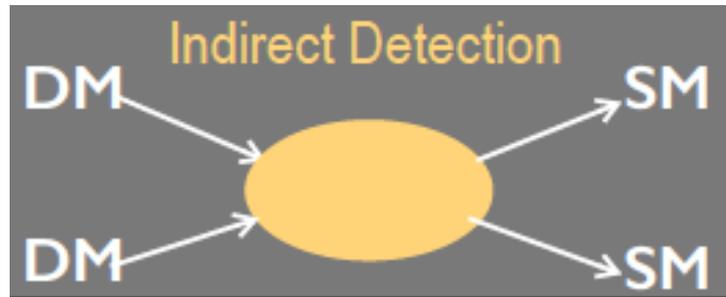
Exemple de résultats obtenus qui se comparent à ceux des expériences de détection directe

Section efficace d'interaction de WIMPs en fonction de la masse du WIMP



Ce sont des limites : au dessus des courbes, on n'a rien trouvé et si les WIMP existent, ils sont en dessous !

# Détection indirecte des WIMPs

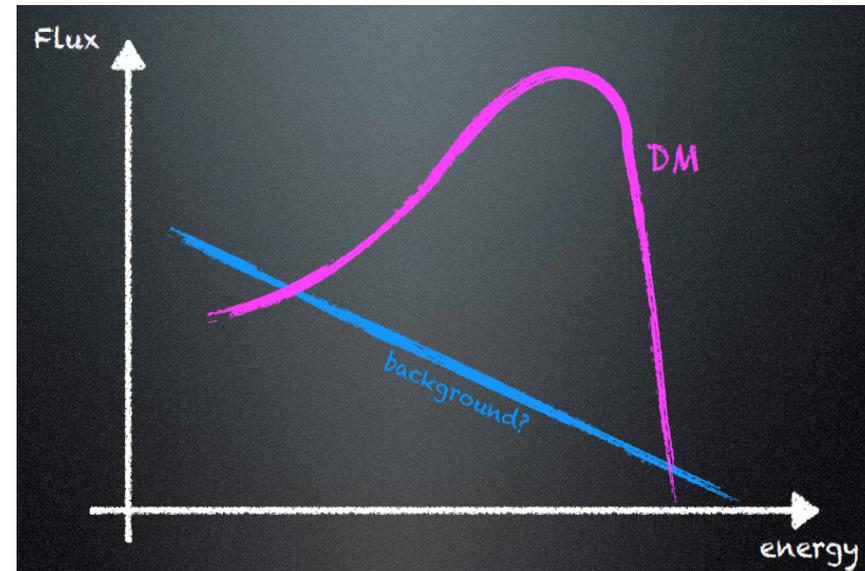


Détection indirecte =  
annihilation de matière noire :  
 $DM + DM \rightarrow SM + SM$

On cherche dans l'espace ou sur Terre des excès de particules dans la Voie Lactée et provenant du halo de matière noire : en provenance du halo, venant du centre galactique, en provenance du Soleil qui capture la matière noire, etc...

Problème : on veut mesurer le flux dans les détecteurs de particules connues (gammas, neutrinos, etc...), qui sont déjà présentes partout... mais on ne voudrait que celles produites par l'annihilation de matière noire !!!

C'est difficile : gros bruit de fond astrophysique !!



# HESS et HESS II

## High Energy Spectroscopic System

- En Namibie, dans les Khomas Highlands.
- But : détecter les sources de gammas de haute énergie.
- 4 télescopes de 12 m de diamètre + 1 télescope de 28 m.

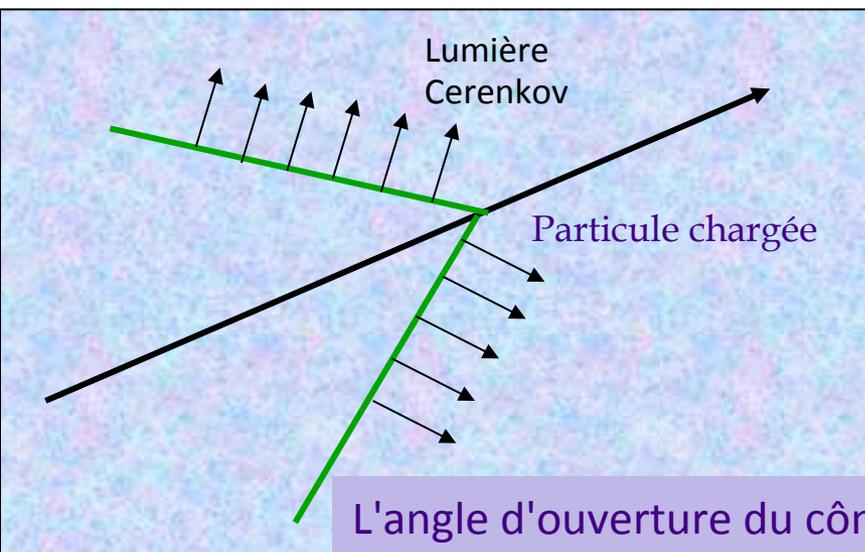


# L'effet Cerenkov ou Cherenkov ou Tchérénkov

La vitesse de la lumière dans un milieu transparent dépend de son indice de réfraction

Une particule chargée qui traverse un milieu avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu crée une onde de choc

L'onde de choc se manifeste par une **émission lumineuse bleue tout au long de la trajectoire de la particule**



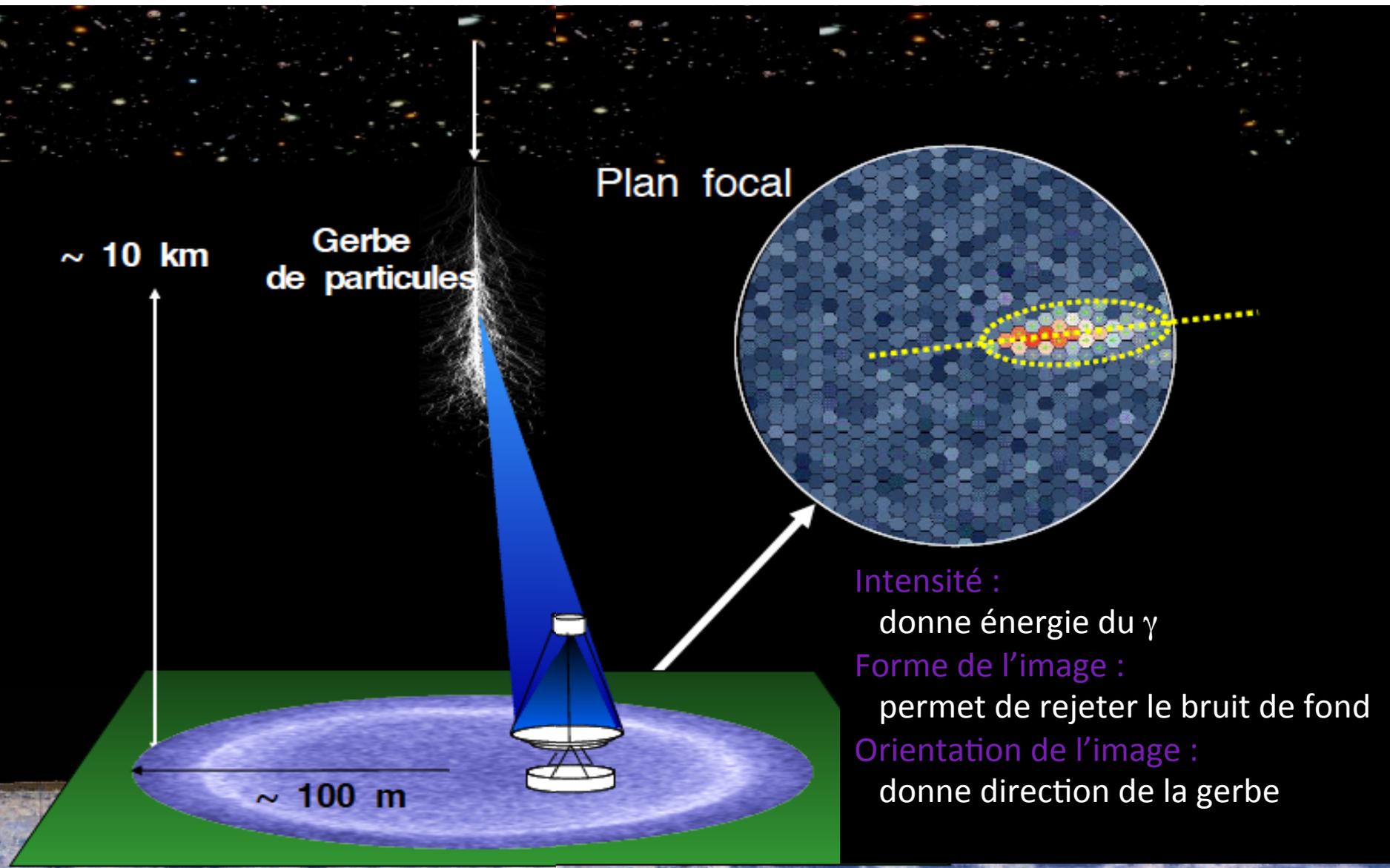
L'angle d'ouverture du cône lumineux dépend de la vitesse de la particule



Source: <http://www.physlink.com/ae219.cfm>

# Principe de détection :

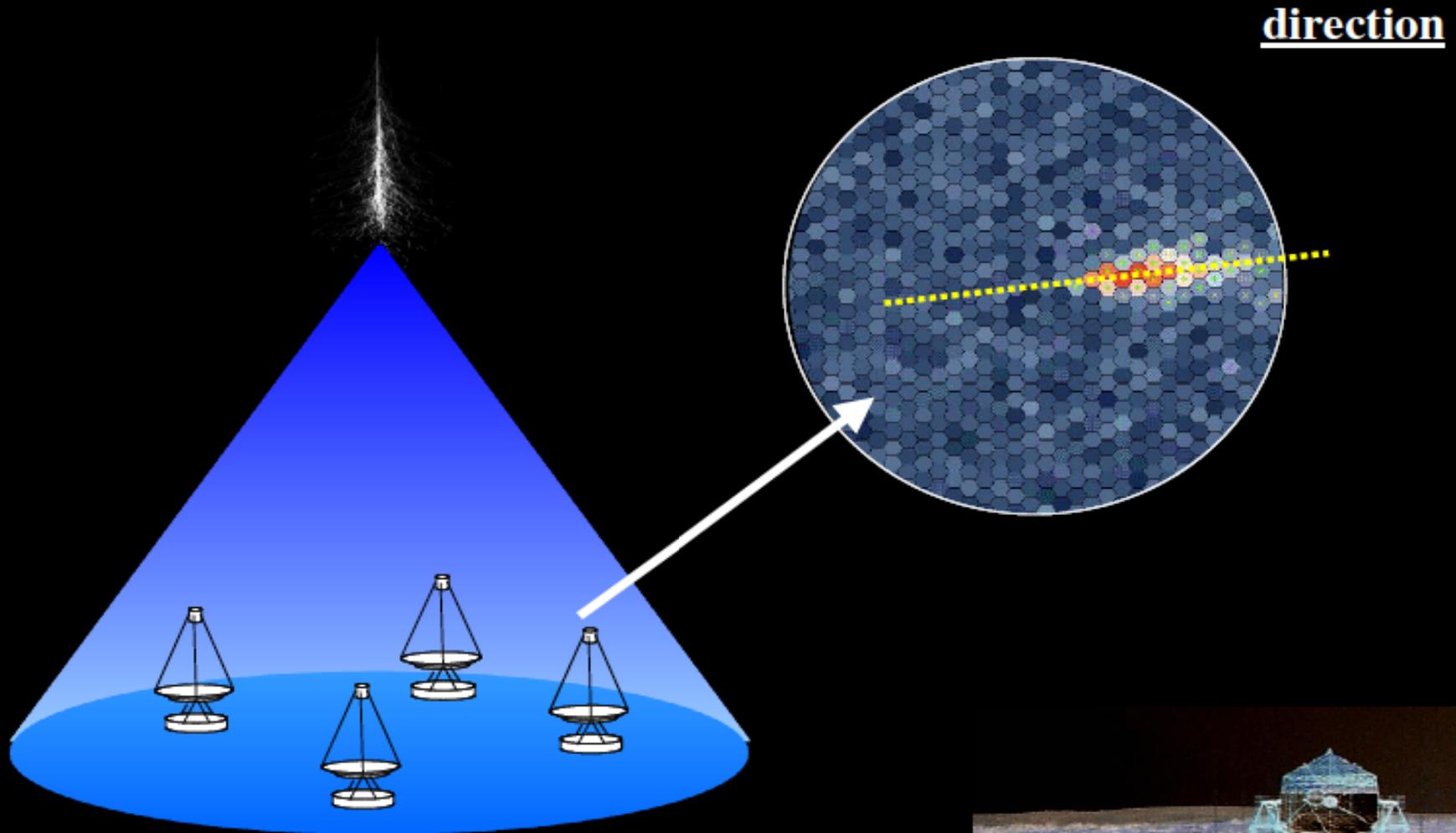
## la lumière Cerenkov dans les télescopes gammas de HESS



- Intensité :  
donne énergie du  $\gamma$
- Forme de l'image :  
permet de rejeter le bruit de fond
- Orientation de l'image :  
donne direction de la gerbe

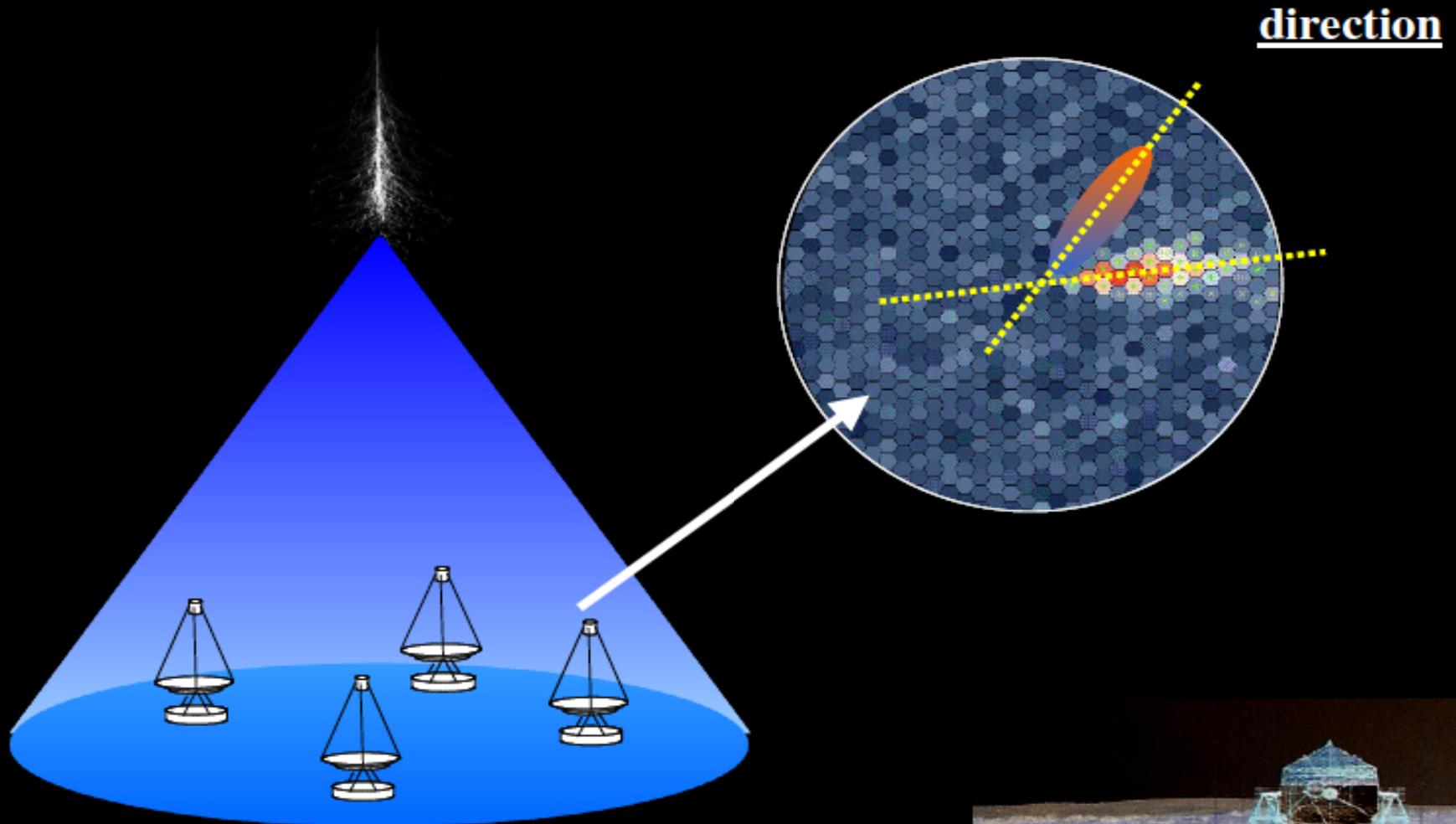
# Principe de détection :

la lumière Cerenkov dans les télescopes gammas de HESS



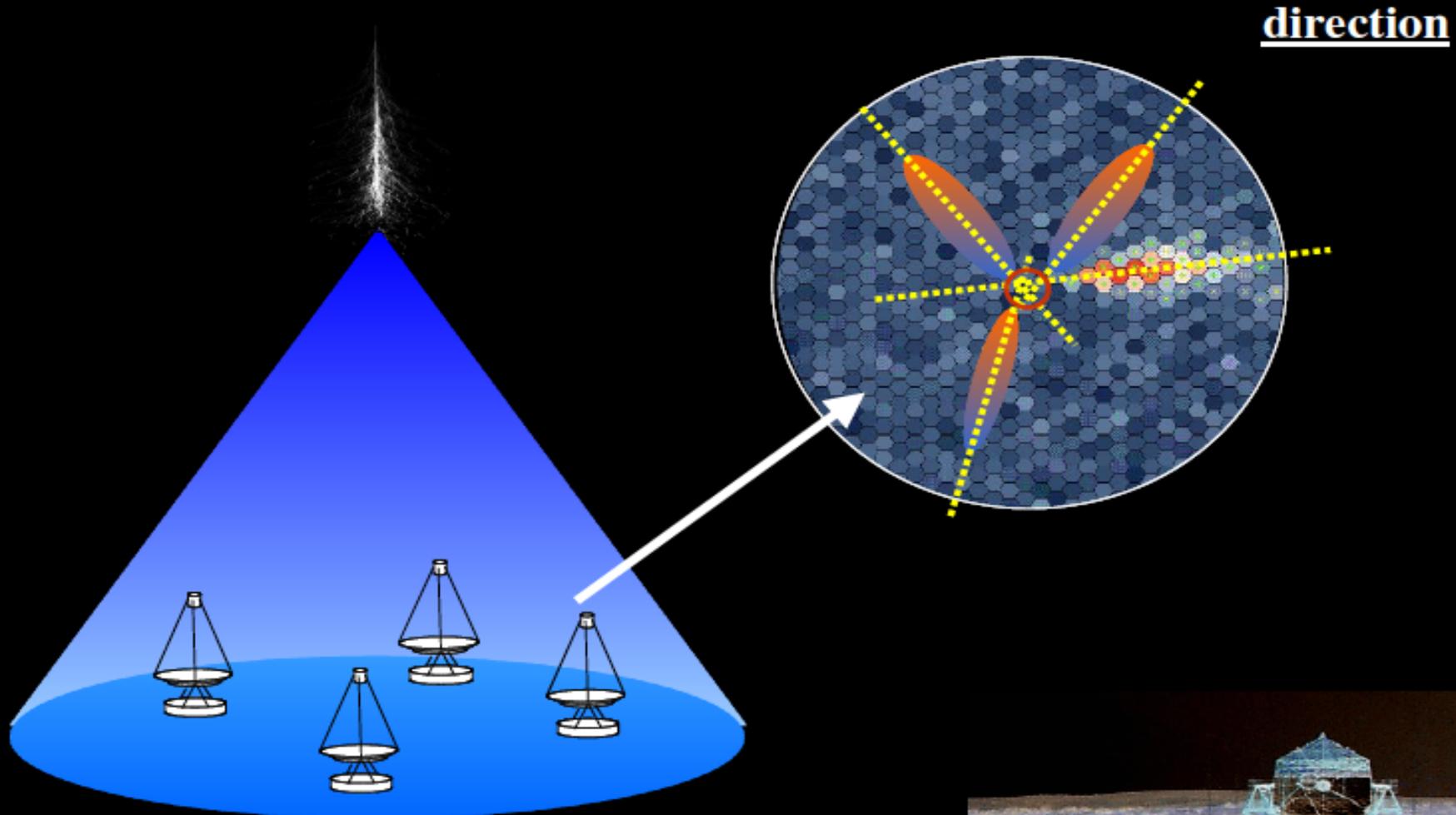
# Principe de détection :

la lumière Cerenkov dans les télescopes gammas de HESS



# Principe de détection :

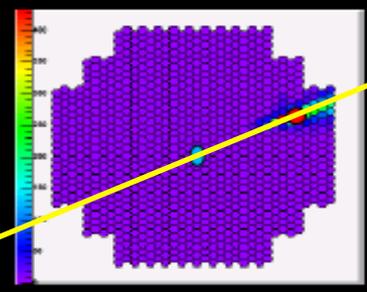
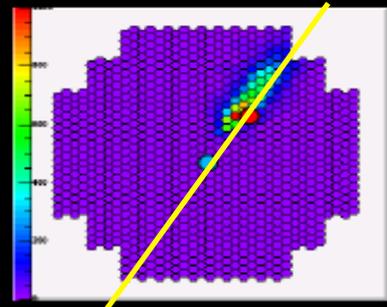
la lumière Cerenkov dans les télescopes gammas de HESS



# Principe de détection :

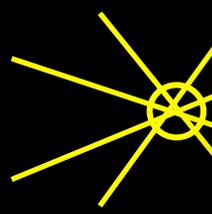
la lumière Cerenkov dans les télescopes gammas de HESS

## Stereoscopie: point d'impact de la gerbe au sol

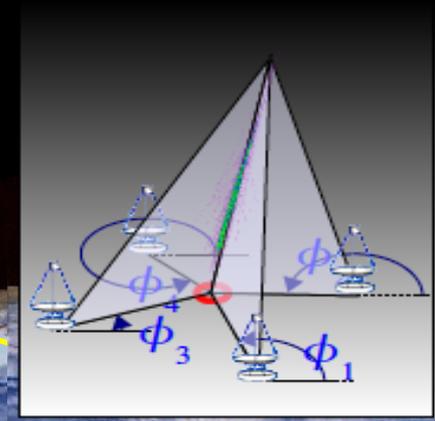
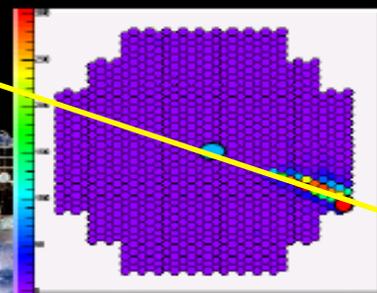
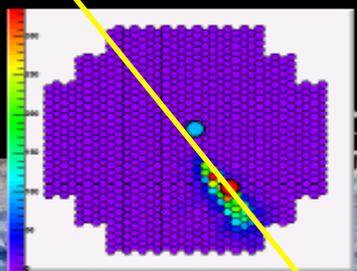


● Position de la source

● Centre de gravité de l'image



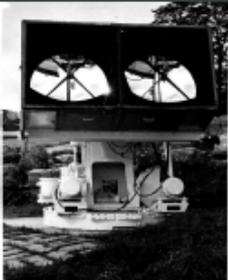
Traces au sol



# Beaucoup de télescopes gammas au sol



1962 :  
First ACT

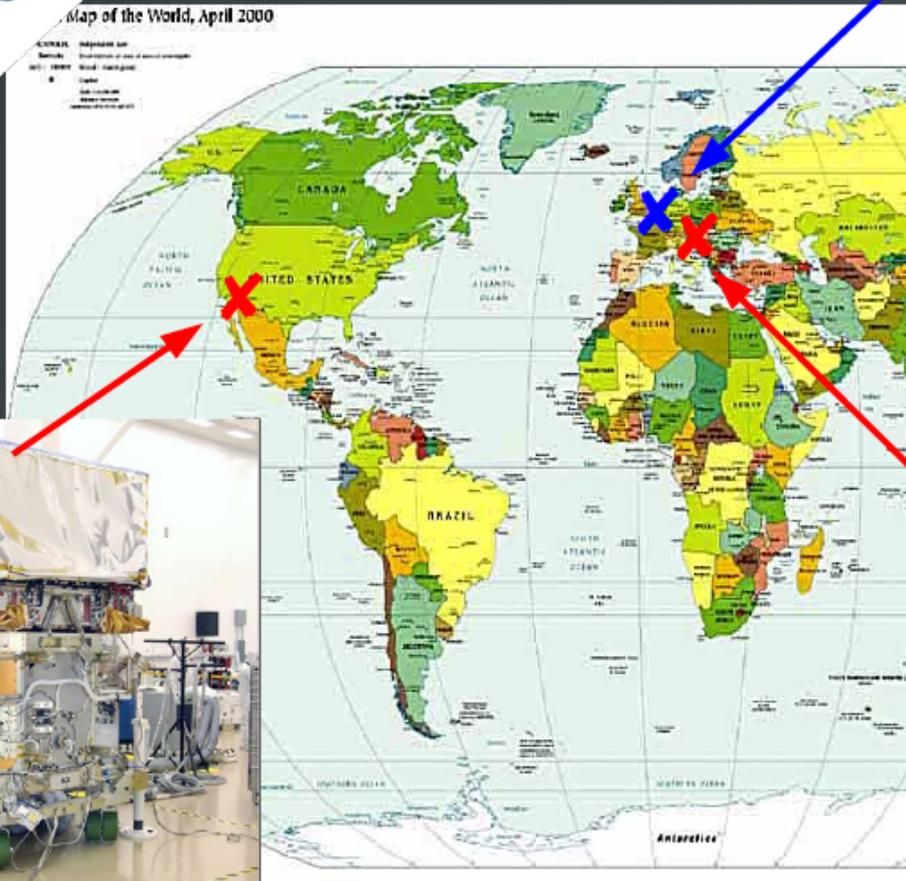
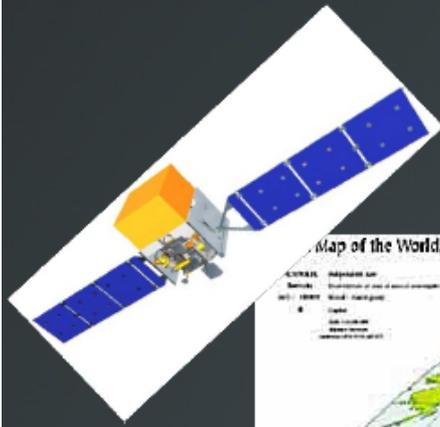


Future  
(former)  
experiments



# Et d'autres dans l'espace !

## Gamma-ray space observatory

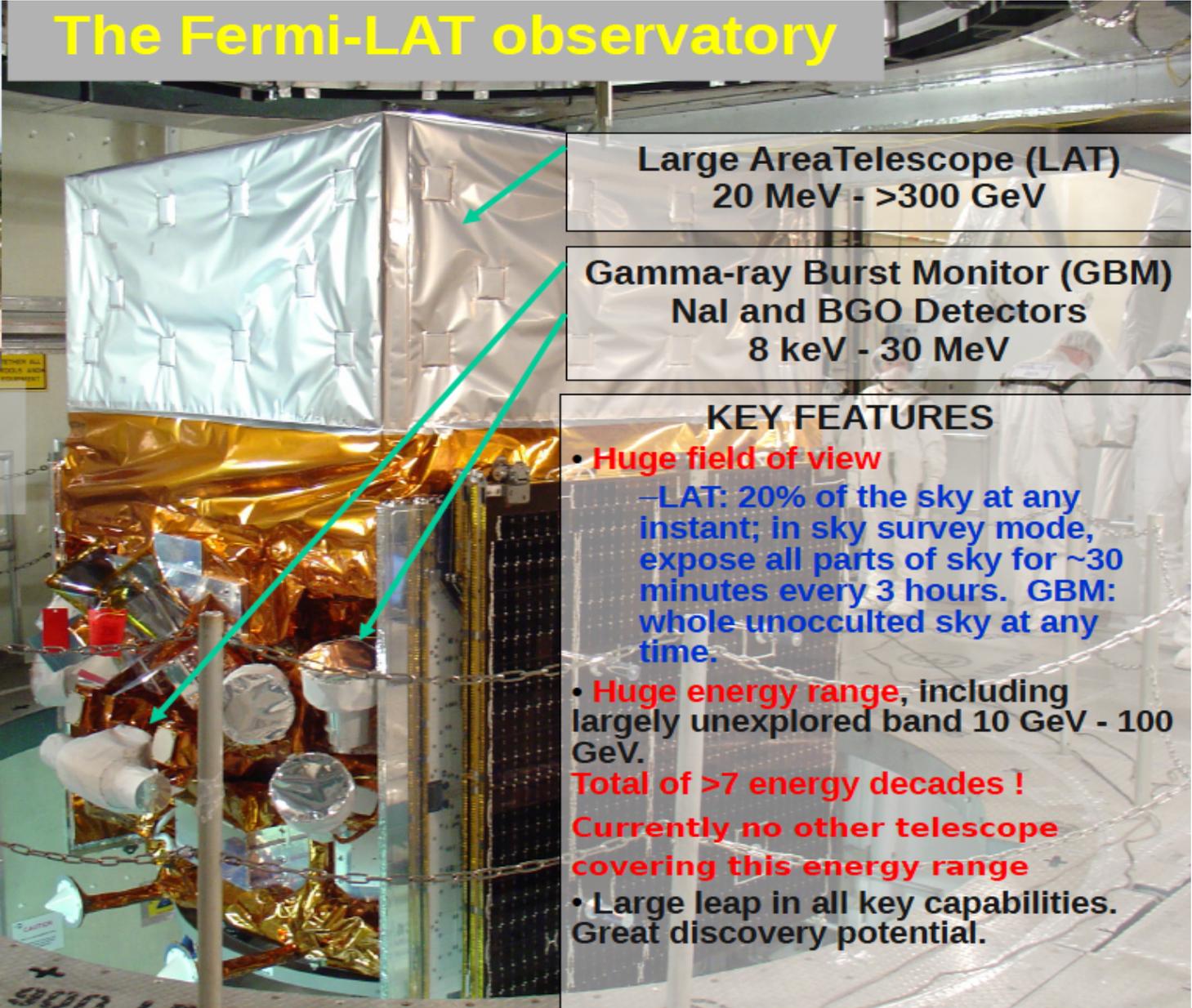


# Et d'autres dans l'espace !

## The Fermi-LAT observatory



Launch :  
June 11 2008  
Nominal operations:  
Aug 4 2008



Large Area Telescope (LAT)  
20 MeV - >300 GeV

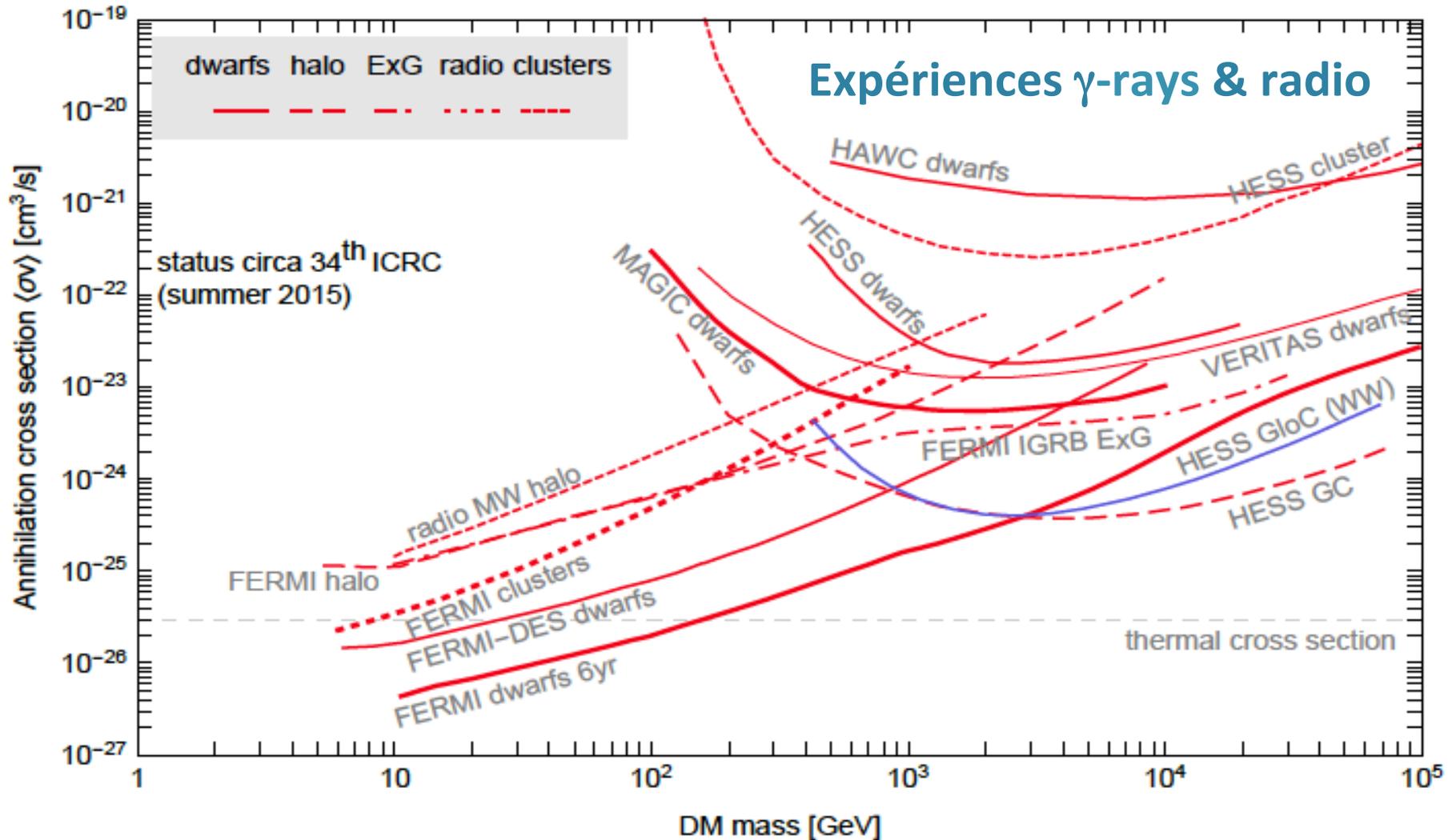
Gamma-ray Burst Monitor (GBM)  
NaI and BGO Detectors  
8 keV - 30 MeV

### KEY FEATURES

- **Huge field of view**
  - LAT: 20% of the sky at any instant; in sky survey mode, expose all parts of sky for ~30 minutes every 3 hours. GBM: whole unocculted sky at any time.
- **Huge energy range**, including largely unexplored band 10 GeV - 100 GeV.  
**Total of >7 energy decades !**  
**Currently no other telescope covering this energy range**
- Large leap in all key capabilities. Great discovery potential.

# Contraintes actuelles par les différentes expériences

Section efficace d'annihilation de WIMPs en fonction de la masse du WIMP



# Principe de base d'un télescope à neutrinos

## Effet Cerenkov dans la mer ou dans la glace

Des milliers de modules optiques  
Seuil de détection  $\approx 1$  TeV

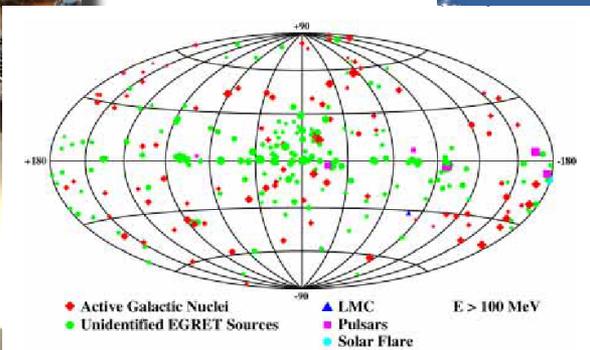
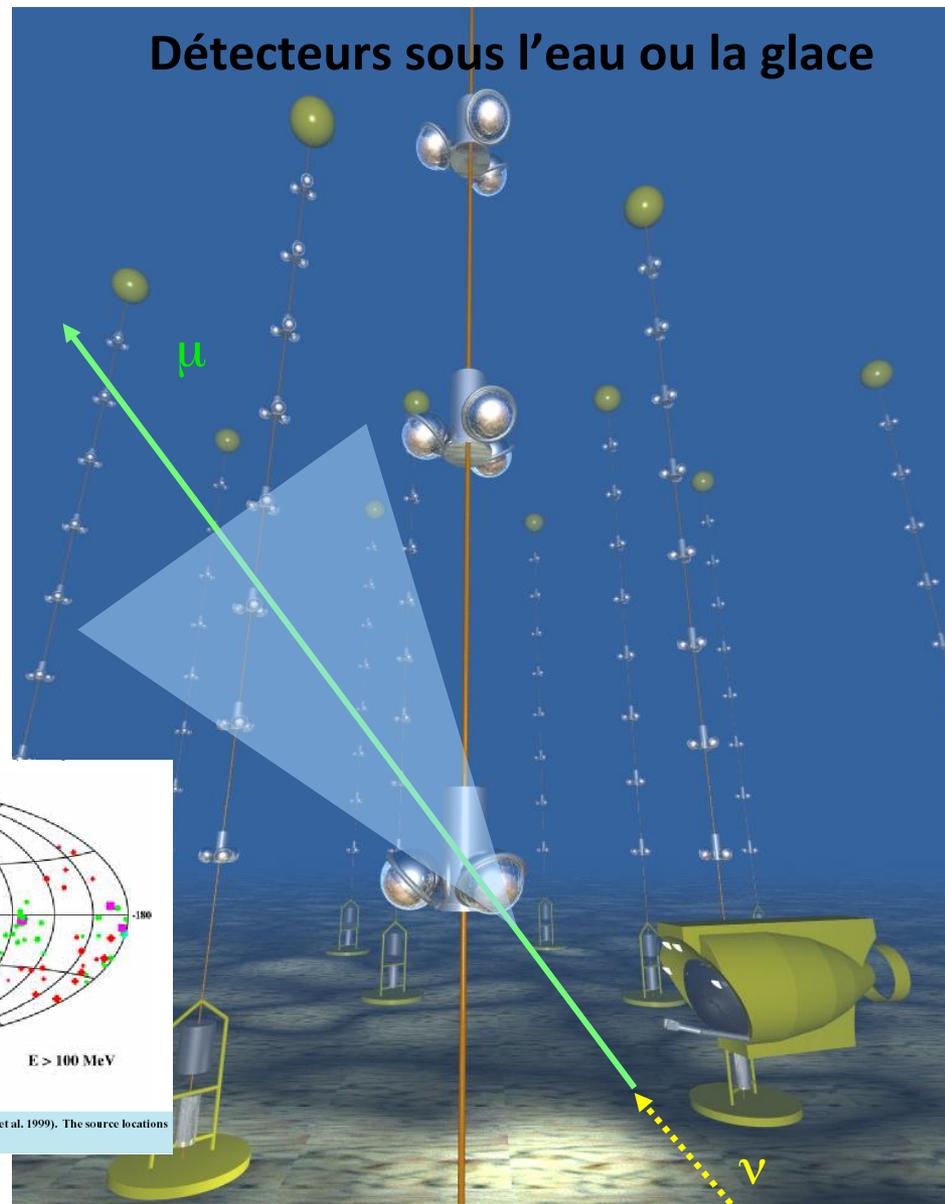
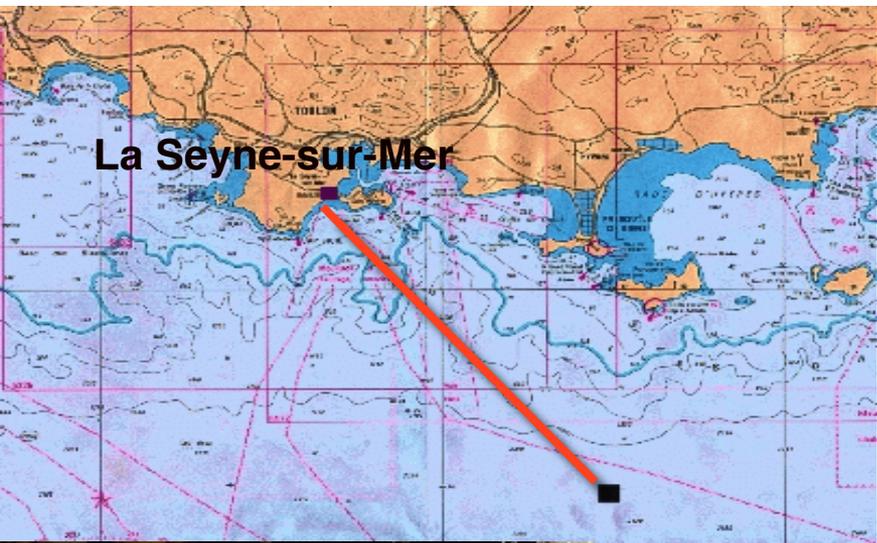


Figure 4-1 Third EGRET Catalog of high-energy gamma-ray sources (Hartman et al. 1999). The source locations are shown in Galactic coordinates.

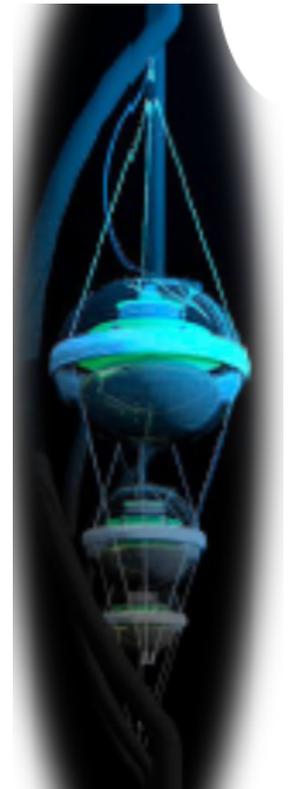
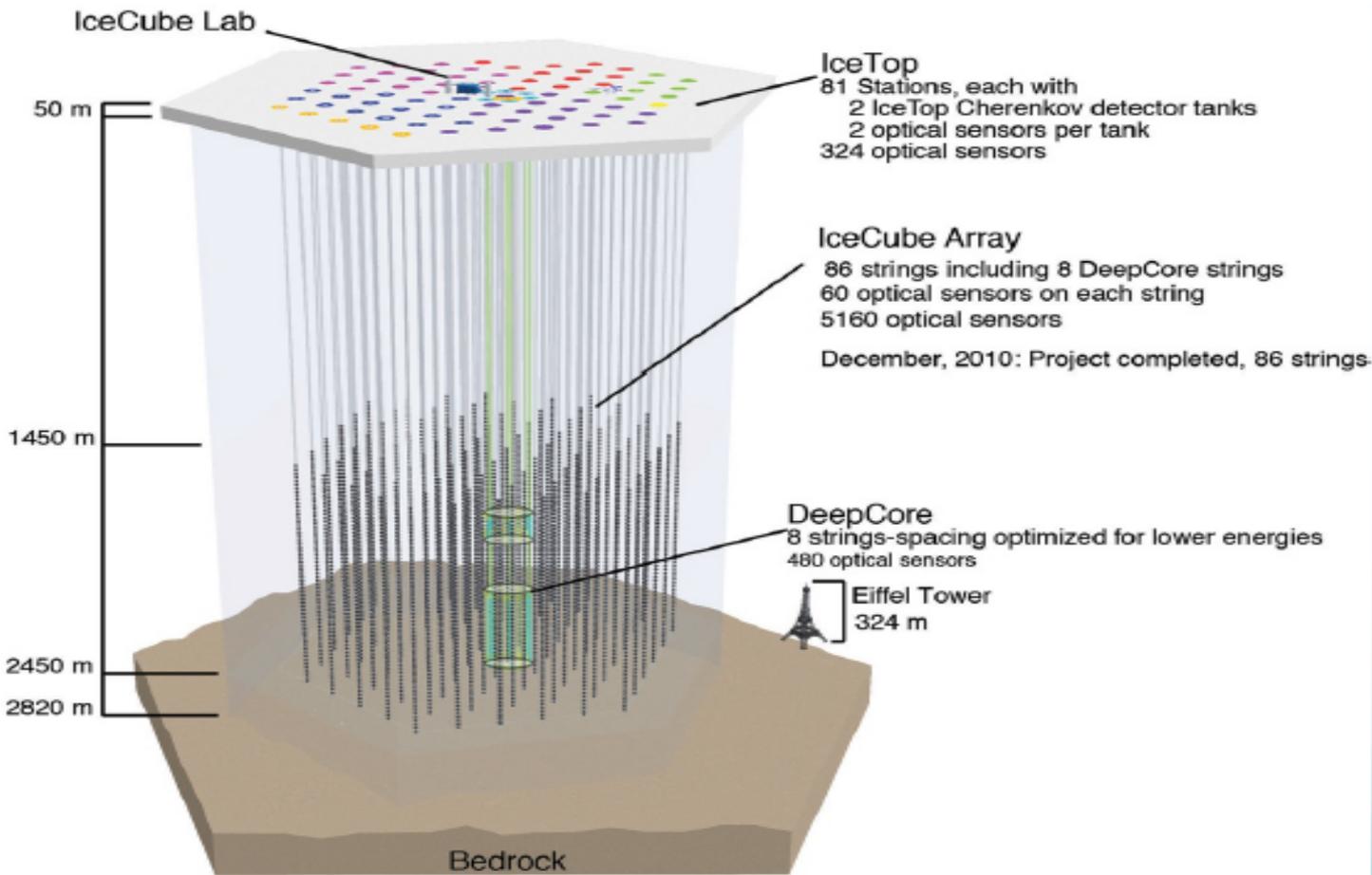
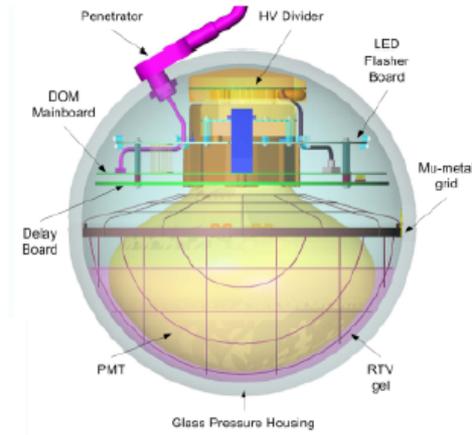
# Les grands télescopes à neutrinos : ANTARES

**IceCube, le plus grand télescope à neutrinos du monde, au Pôle Sud**

*InIce : 86 lignes (achevé en 2010),  $\approx 1 \text{ km}^3$  de volume de détection*

*DeepCore : 8 lignes, en configuration dense*

*IceTop : détecteurs de surface pour étudier les gerbes atmosphériques*



# Les grands télescopes à neutrinos : ANTARES

**ANTARES, un télescope à neutrinos en mer Méditerranée**

*12 lignes, détecteur achevé en 2008,  $\approx 0,02 \text{ km}^3$  de volume de détection*

*2450 m de profondeur, au large de Toulon*

*ANTARES = prototype pour la génération suivante de taille kilométrique : détecteur KM3NeT*

25 étages/ligne  
3 PMTs 10"/étage  
885 PMTs

14.5 m

350 m

100 m

$\sim 70 \text{ m}$

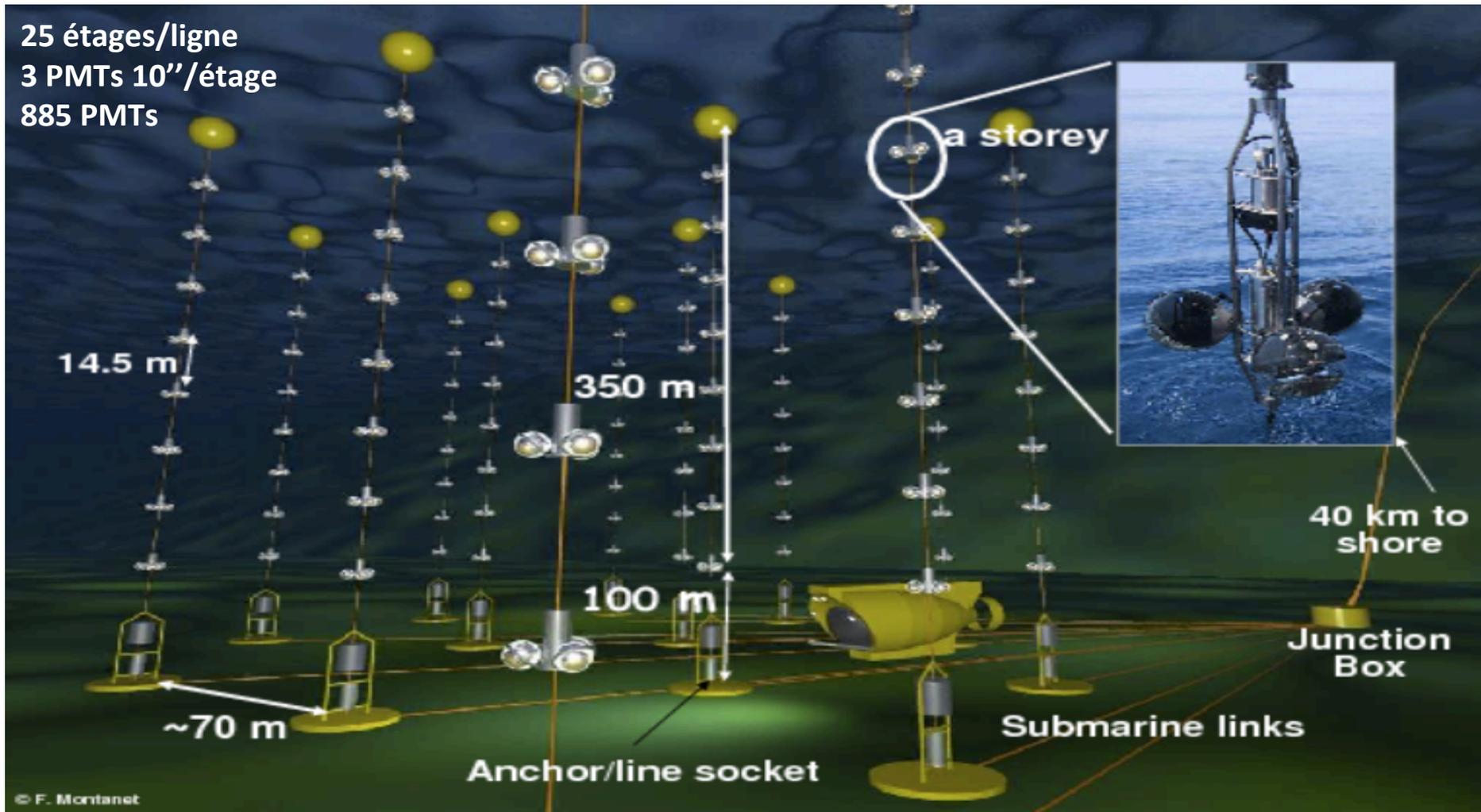
a storey

40 km to shore

Junction Box

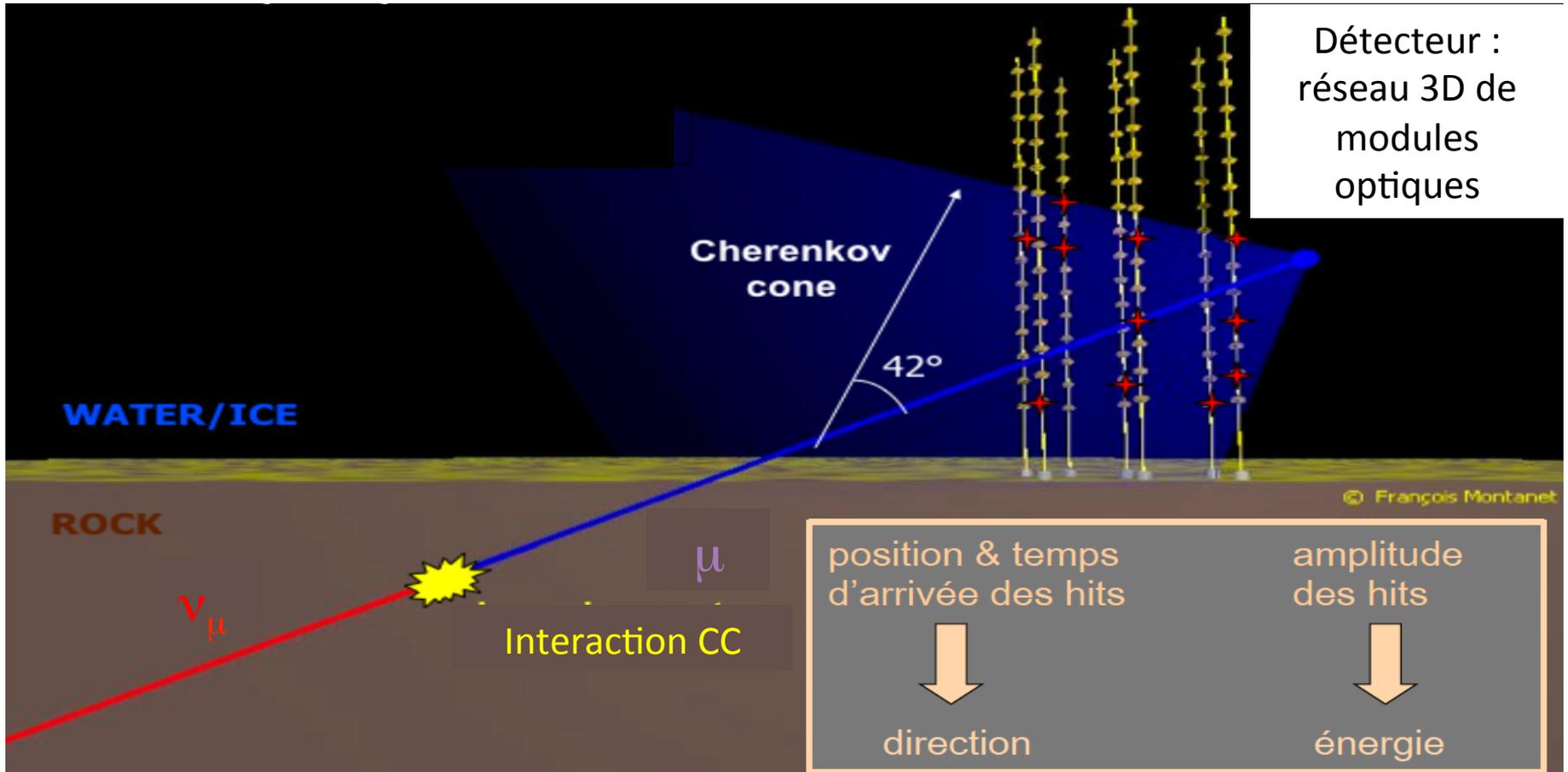
Submarine links

Anchor/line socket



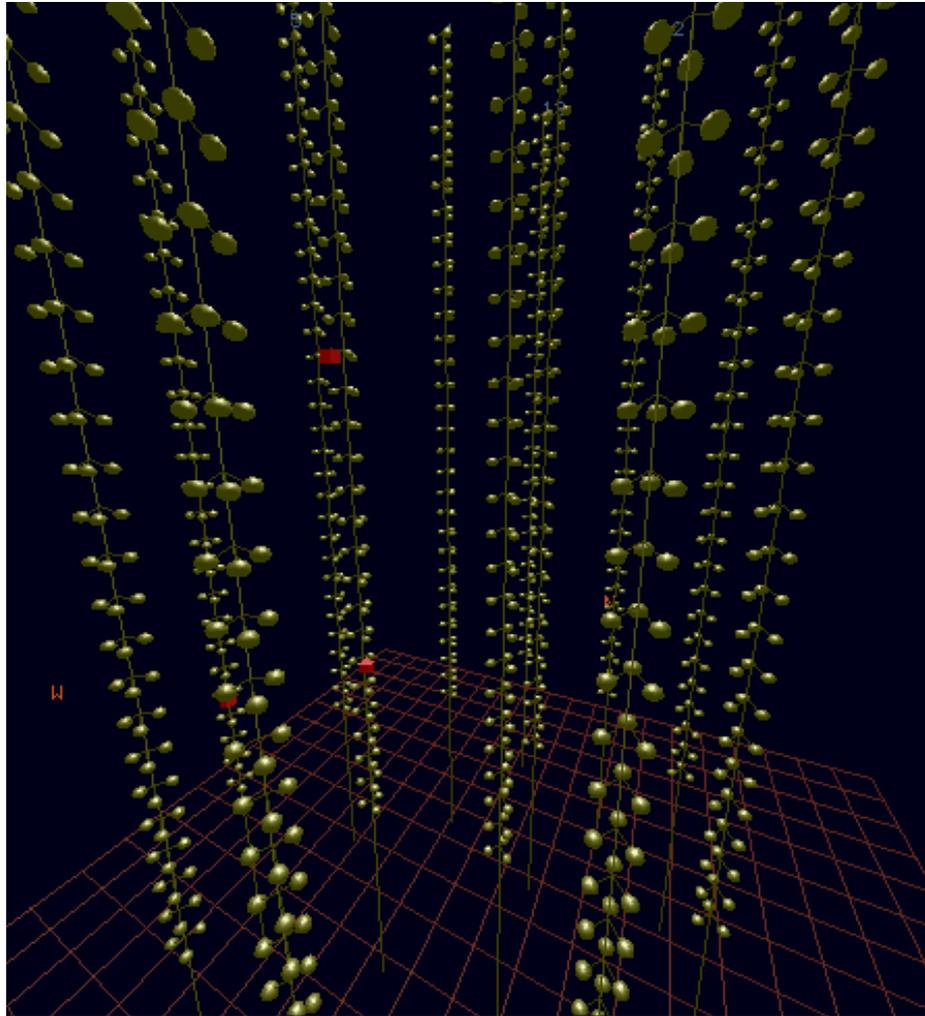
# La lumière Cerenkov mesurée par ANTARES

Le volume de détection doit être un milieu transparent et suffisamment grand (km<sup>3</sup>)



Reconstruction de la trajectoire du muon, donc de celle du neutrino initial

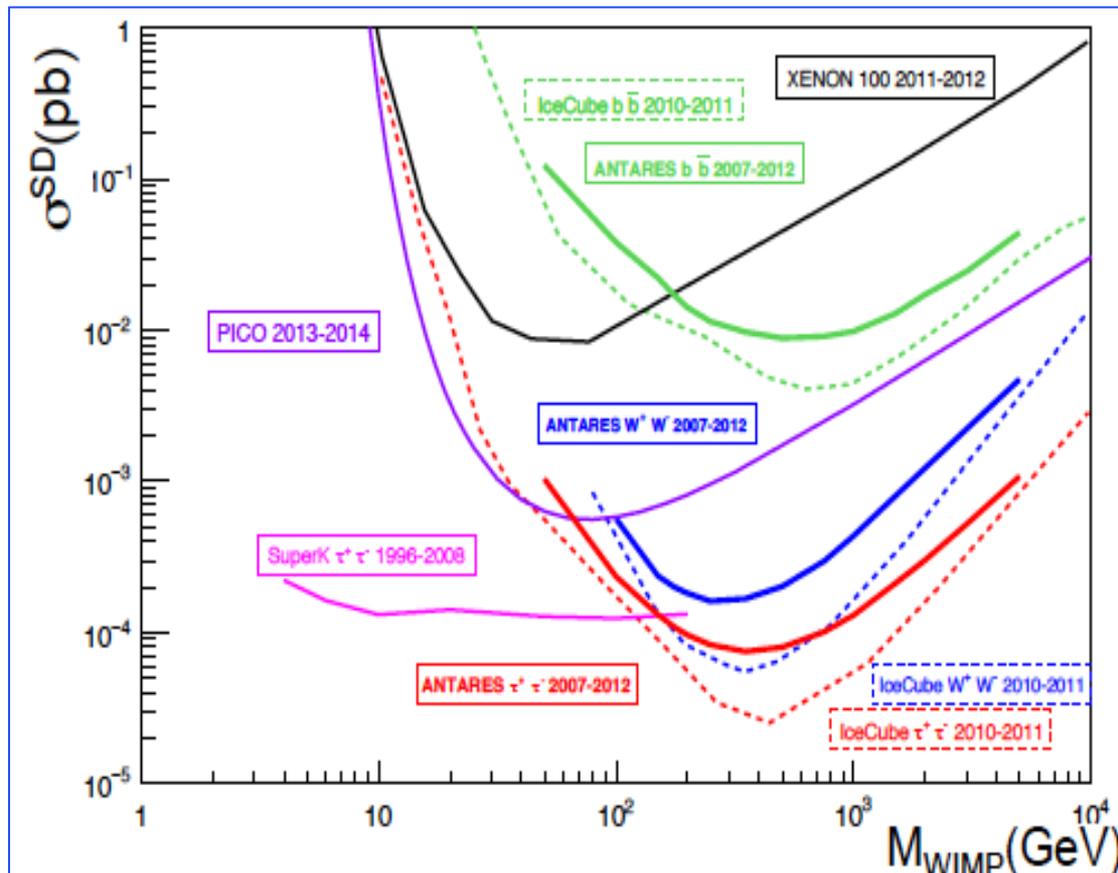
# La lumière Cerenkov mesurée par ANTARES



# Exemple de résultats d'ANTARES et IceCube

## Recherche de matière noire en provenance du Soleil

### Section efficace d'interaction de WIMPs en fonction de la masse du WIMP

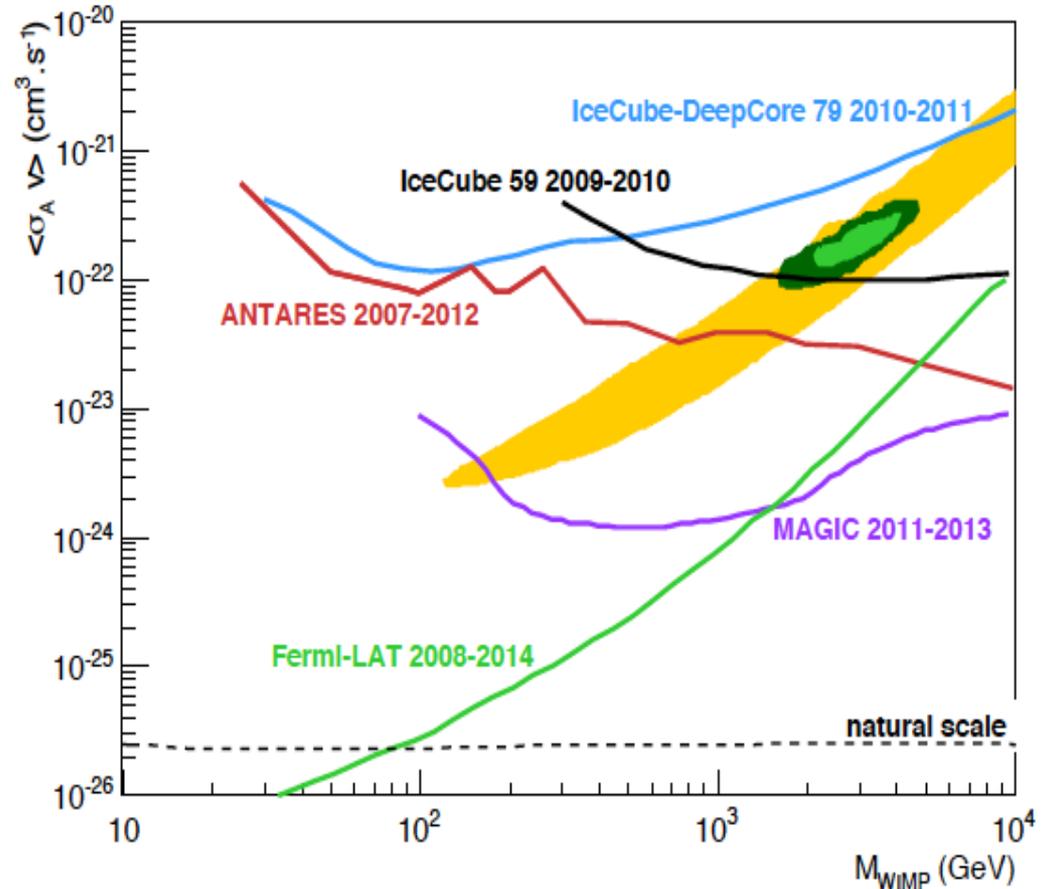
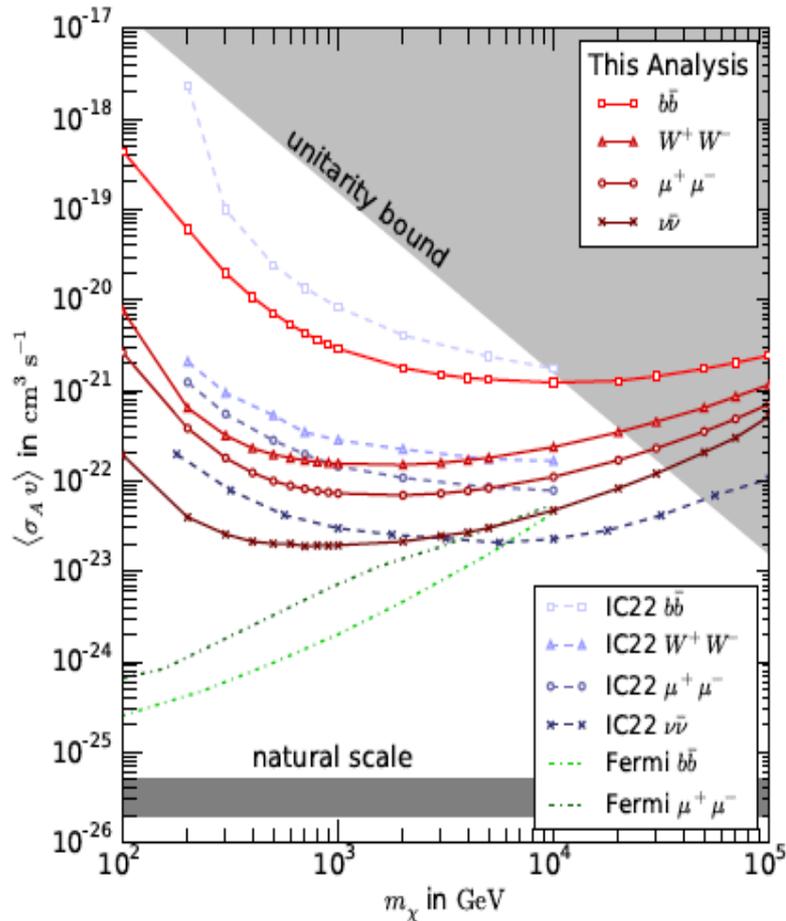


Meilleure limite pour une interaction dépendante du spin

# Exemple de résultats d'ANTARES et IceCube

Recherche globale : matière noire du halo galactique ou du centre galactique

## Section efficace d'annihilation de WIMPs en fonction de la masse du WIMP

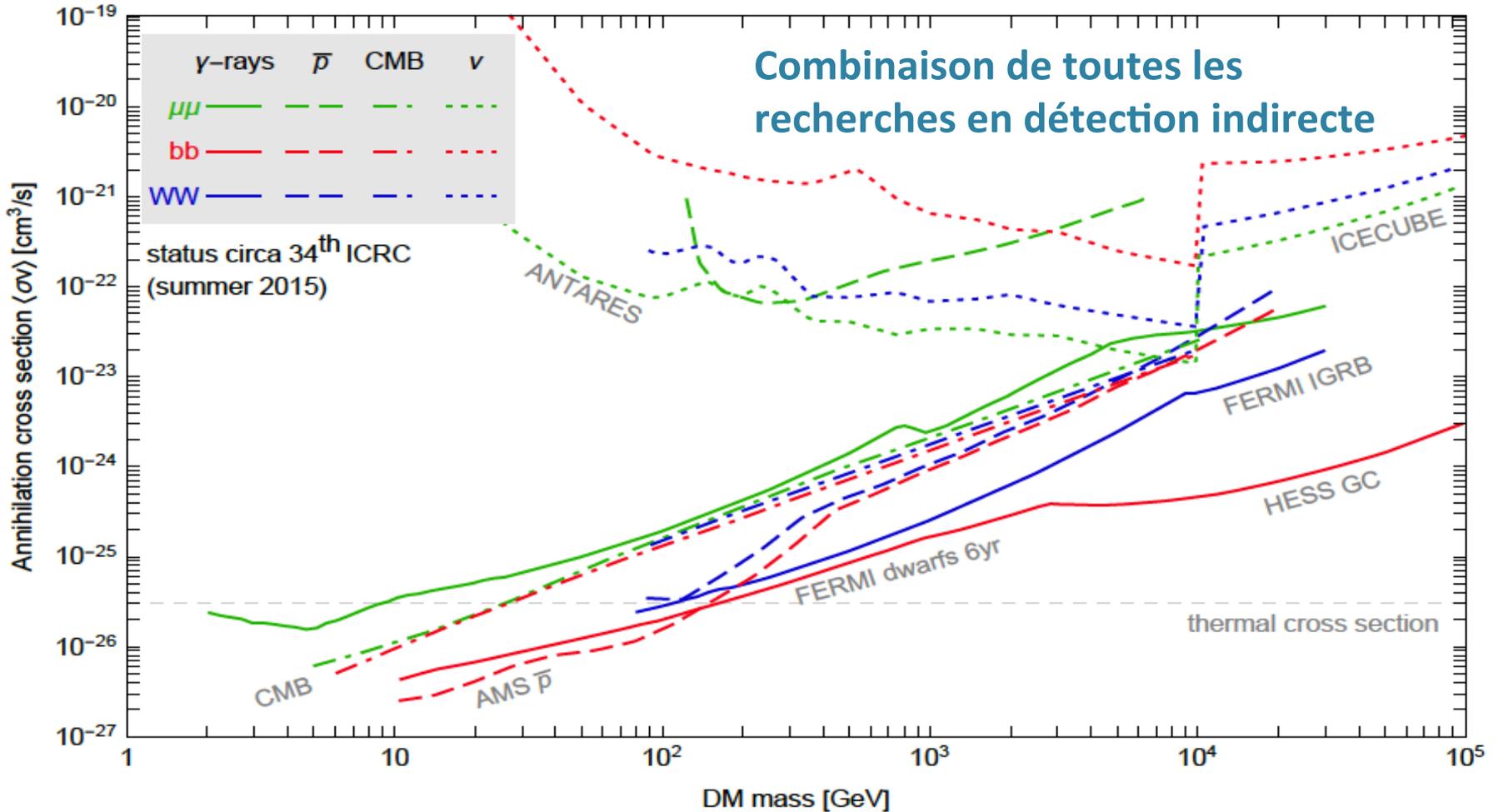


IceCube  
DM du Halo Galactique

ANTARES (canal  $\tau^+\tau^-$ )  
DM du Centre Galactique

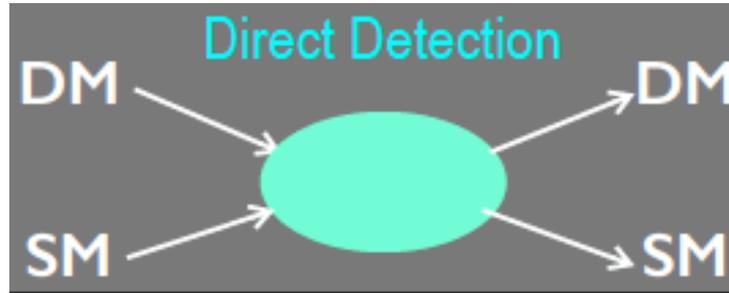
# Les résultats combinés en détection indirecte

## Section efficace d'annihilation de WIMPs en fonction de la masse du WIMP



Toujours des limites, pas de signal donc pas de découverte de matière noire sous forme de WIMP pour l'instant

# Détection directe des WIMPs



Détection directe = interaction de matière noire par diffusion élastique sur noyau :  
 $DM + SM \rightarrow DM + SM$ .

Mesure de l'énergie de recul du noyau après la collision avec le WIMP

Interaction faible = peu probable donc difficile à détecter

**Il faut une grande masse de détecteur pour augmenter la chance de les voir.**

L'énergie associée au recul du noyau est très faible

**Il faut des détecteurs précis, capables de mesurer une petite quantité d'énergie donc bas seuil en énergie**

Difficile avec de gros volumes...

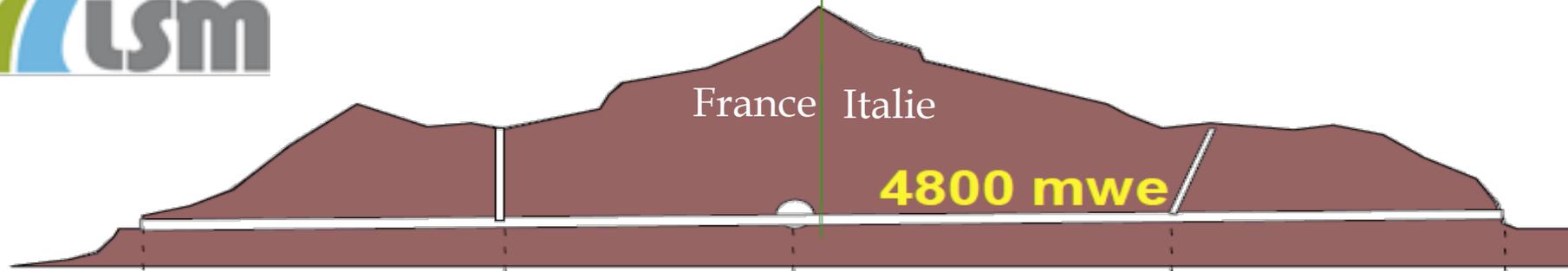
**Problème : il y a pleins de particules qui déposent de l'énergie dans la matière dans cette même gamme recherchée (bruit de fond)**

# Entrée du tunnel du Fréjus (Modane)

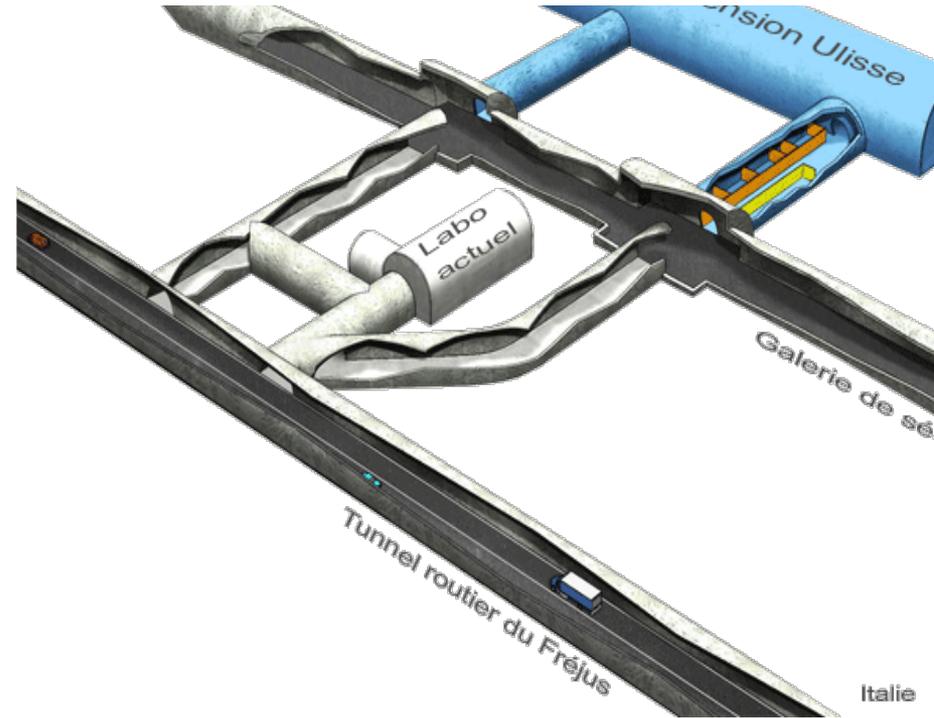
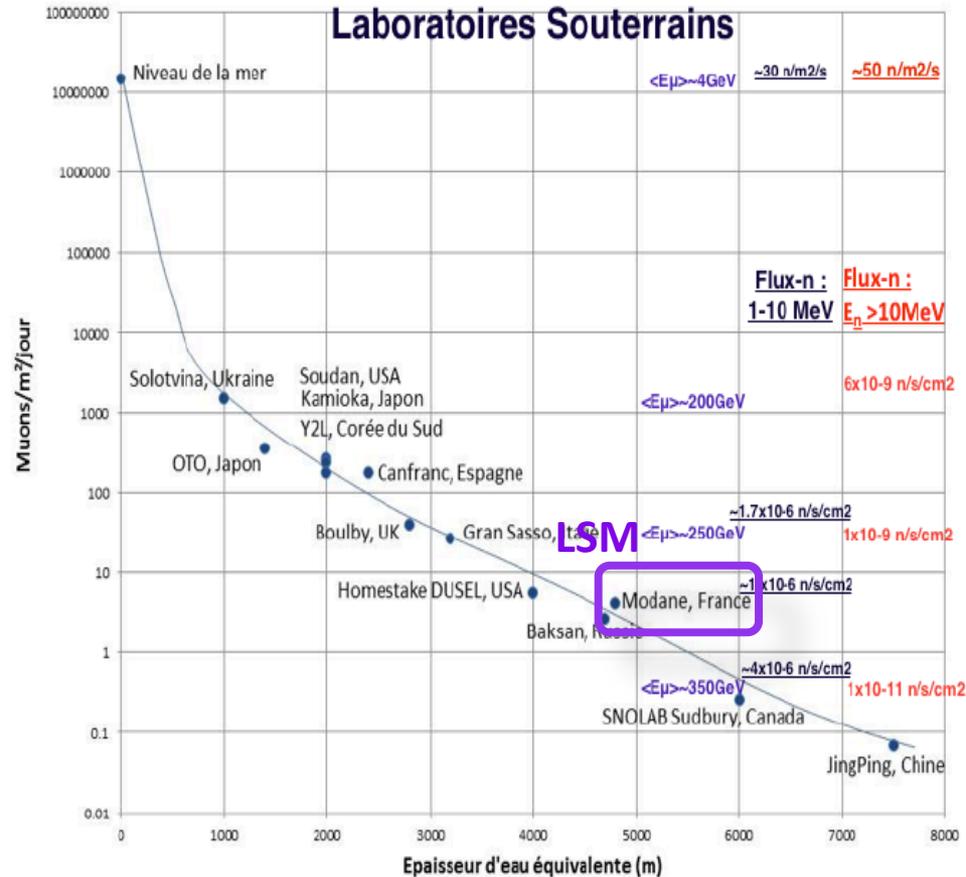




# Bienvenue au Laboratoire Souterrain de Modane



## Laboratoires Souterrains



Protection contre les muons : flux de muons  $5 \mu/\text{m}^2/\text{jour}$  ; dehors un million de fois plus !!

# Un autre ennemi : la radioactivité naturelle

## ▣ Quelques ordres de grandeur

1 litre d'eau de pluie	0.3 à 1 Bq
1 litre d'eau de mer	10 Bq
1 litre de lait	80 Bq
1 kg de poisson	100 Bq
1 kg de café	1000 Bq
1 homme (70kg)	7000 Bq (dont ~4500 Bq dus au $^{40}\text{K}$ des os, le reste est dû au $^{14}\text{C}$ )
1 kg de sol granitique	8000 Bq
1 kg de minerai d'uranium	25 millions Bq
Radio-isotope pour les diagnostics médicaux	70 millions Bq
1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés	10 000 milliards Bq
1 source radioactive médicale	100 000 milliards Bq

1 Bq = 1 désintégration/seconde



# La meilleure protection : les blindages

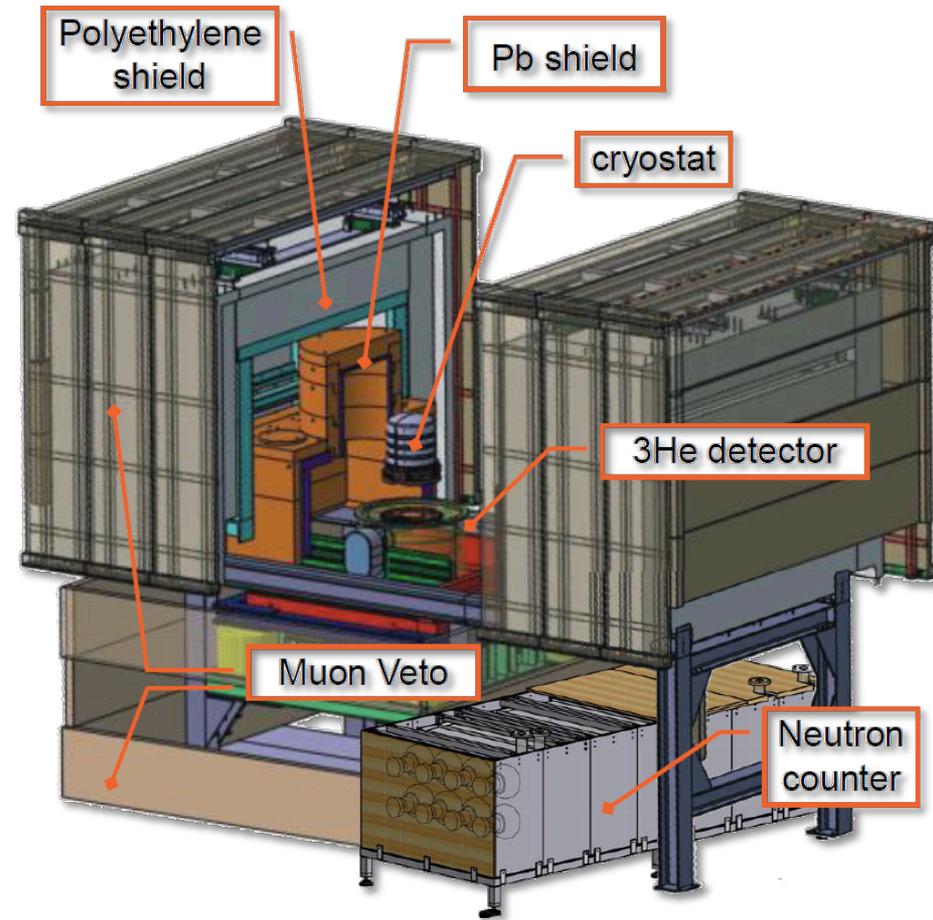
## Des blindage passifs

- Plomb
- Plomb Archéologique
- Polyéthylène



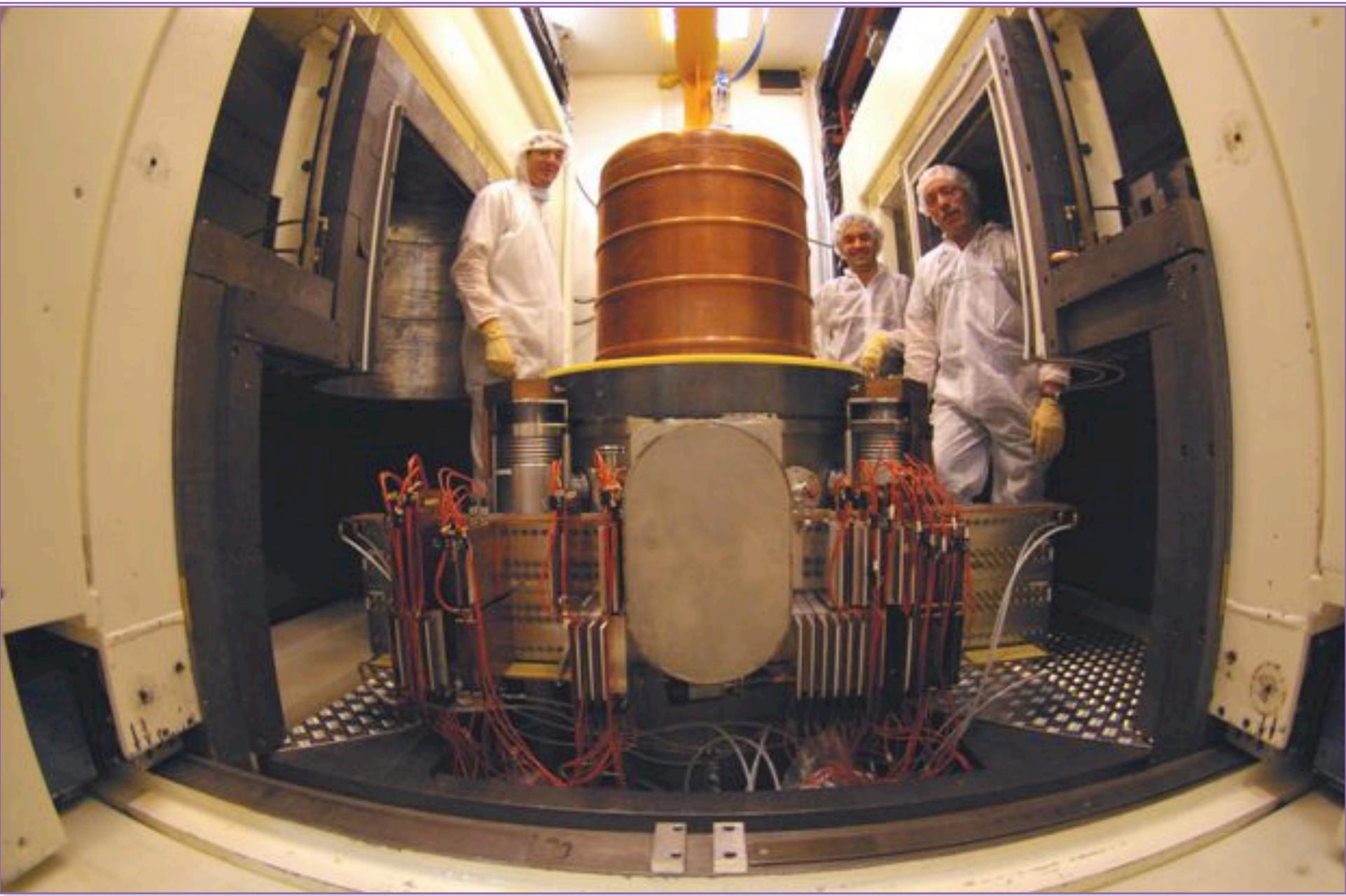
## Des blindage actifs

- Vétu muon
- Les détecteurs eux-mêmes par discrimination entre signal et bruit de fond



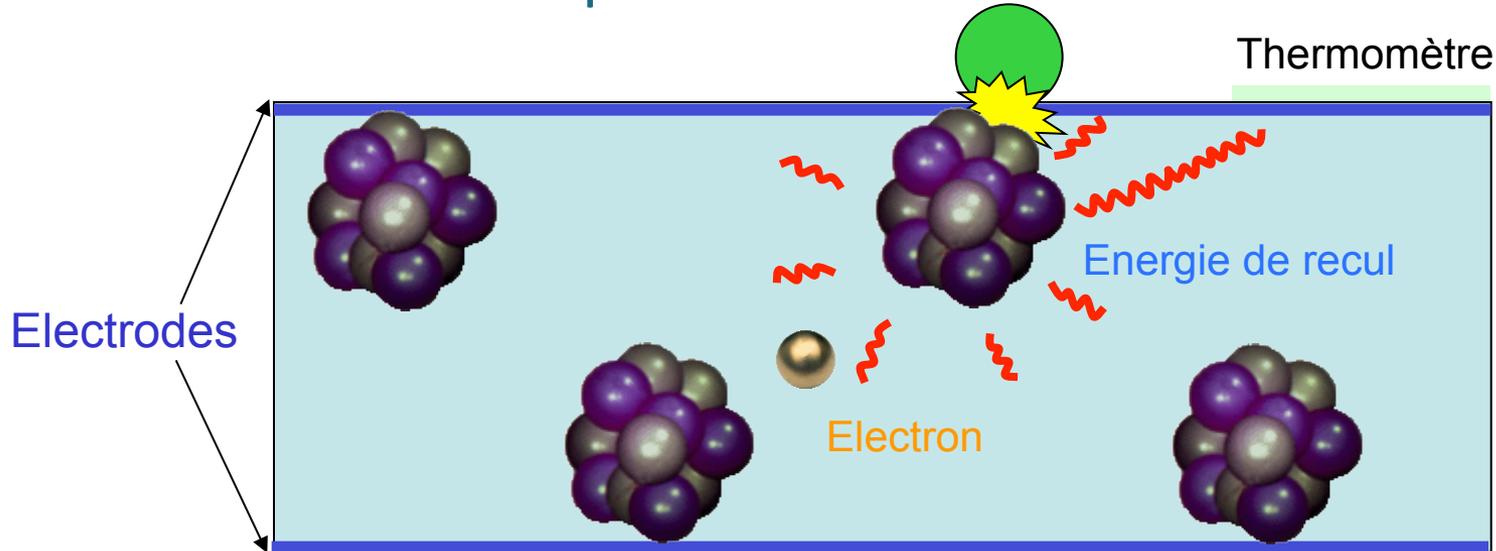
L'exemple d'EDELWEISS  
(Expérience pour détecter les  
WIMPs en Site Souterrain)

# EDELWEISS



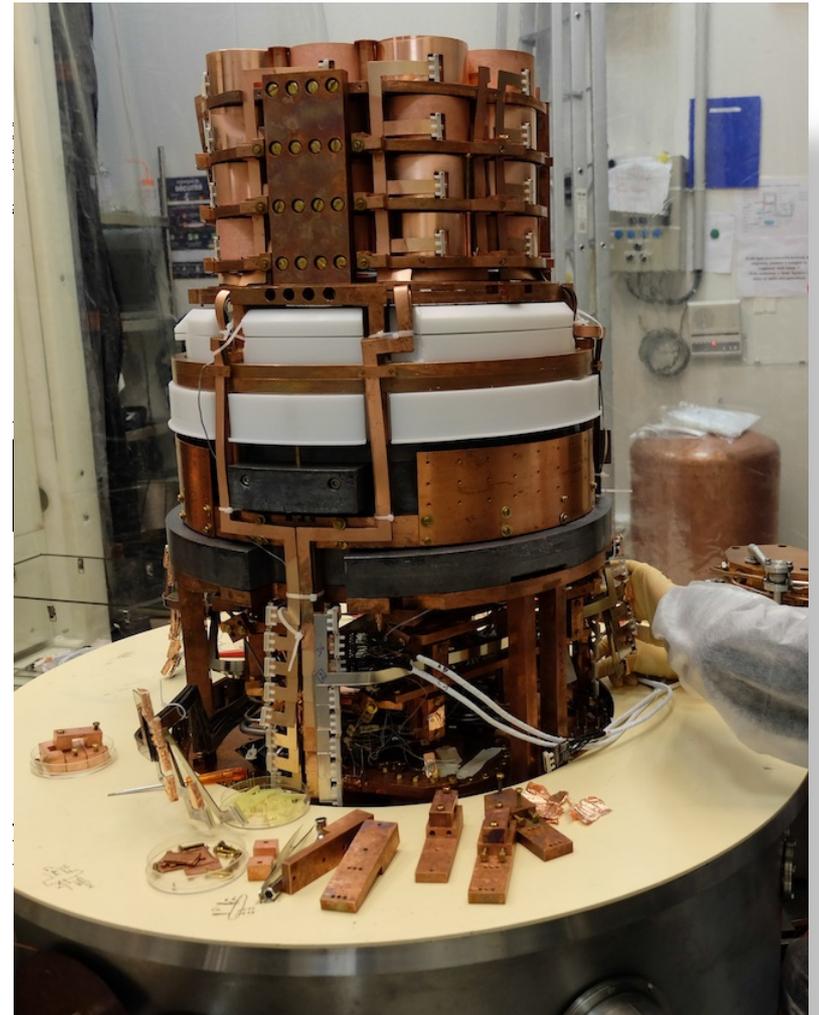
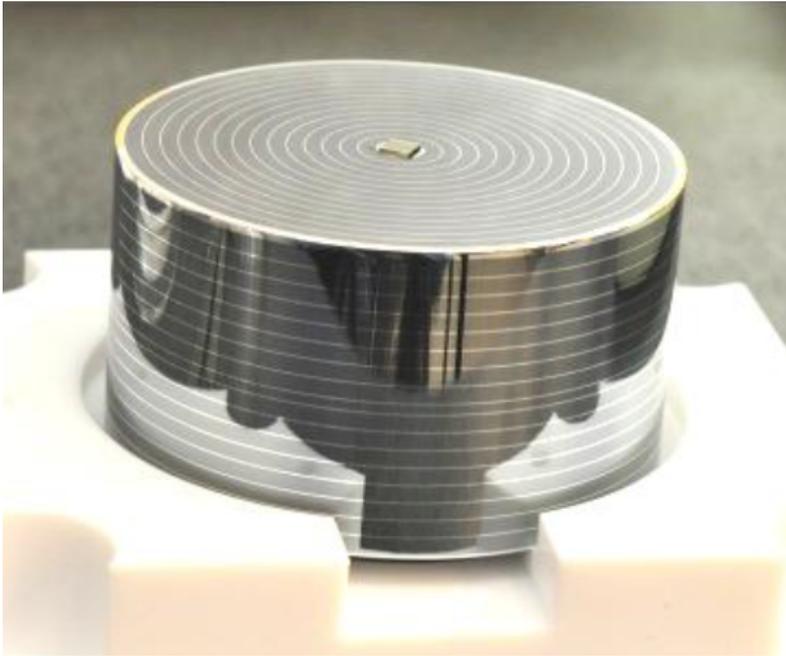
# Principe de détection des WIMPs

- Principe : on va détecter leur **collision avec les atomes de Germanium** de notre détecteur = bolomètre cryogénique.
- La chaleur produite est mesurée par un thermomètre (≈μK) :  $\Delta T$  proportionnel au rapport énergie/conductance
- Le déplacement du noyau ionise le milieu, et les électrons créés sont récupérés sur des électrodes.



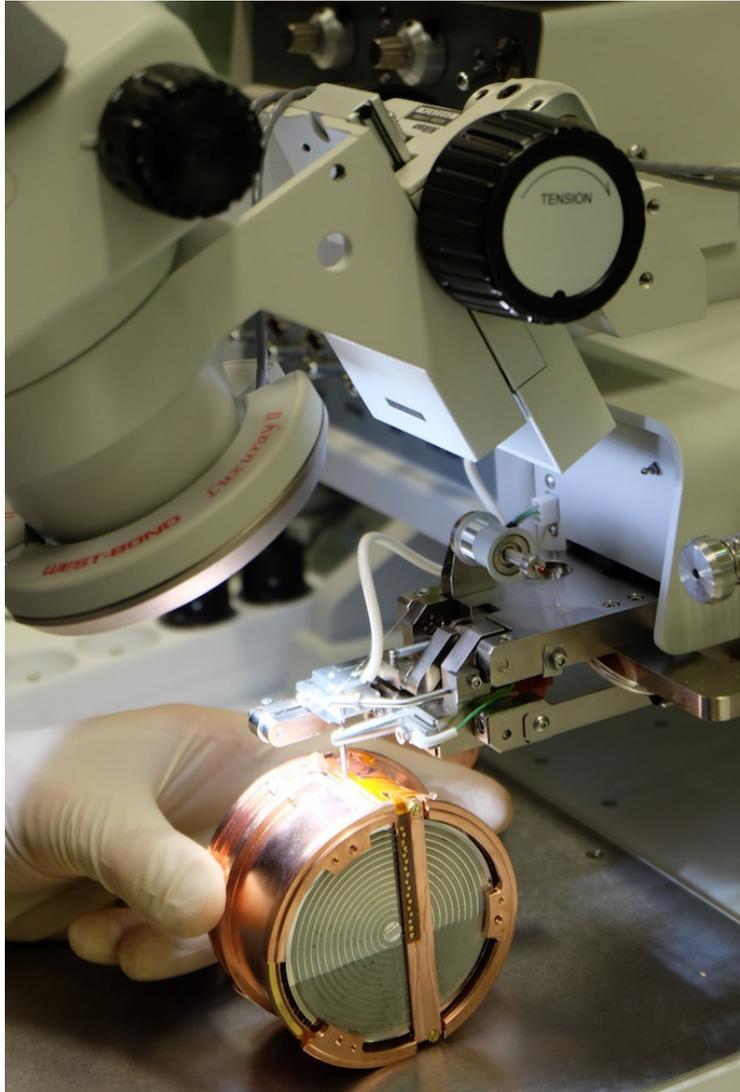
Double mesure pour séparer signal attendu et bruit de fond radioactif

# Les bolomètres d'EDELWEISS



- ▣ 820 à 890 g et volume utile > 650 g
- ▣  $T = 18 \text{ mK} = - 273,132^\circ\text{C} \text{ !!!!!}$
- ▣ Détecteurs placés dans un cryostat pour les maintenir à très très basse température...

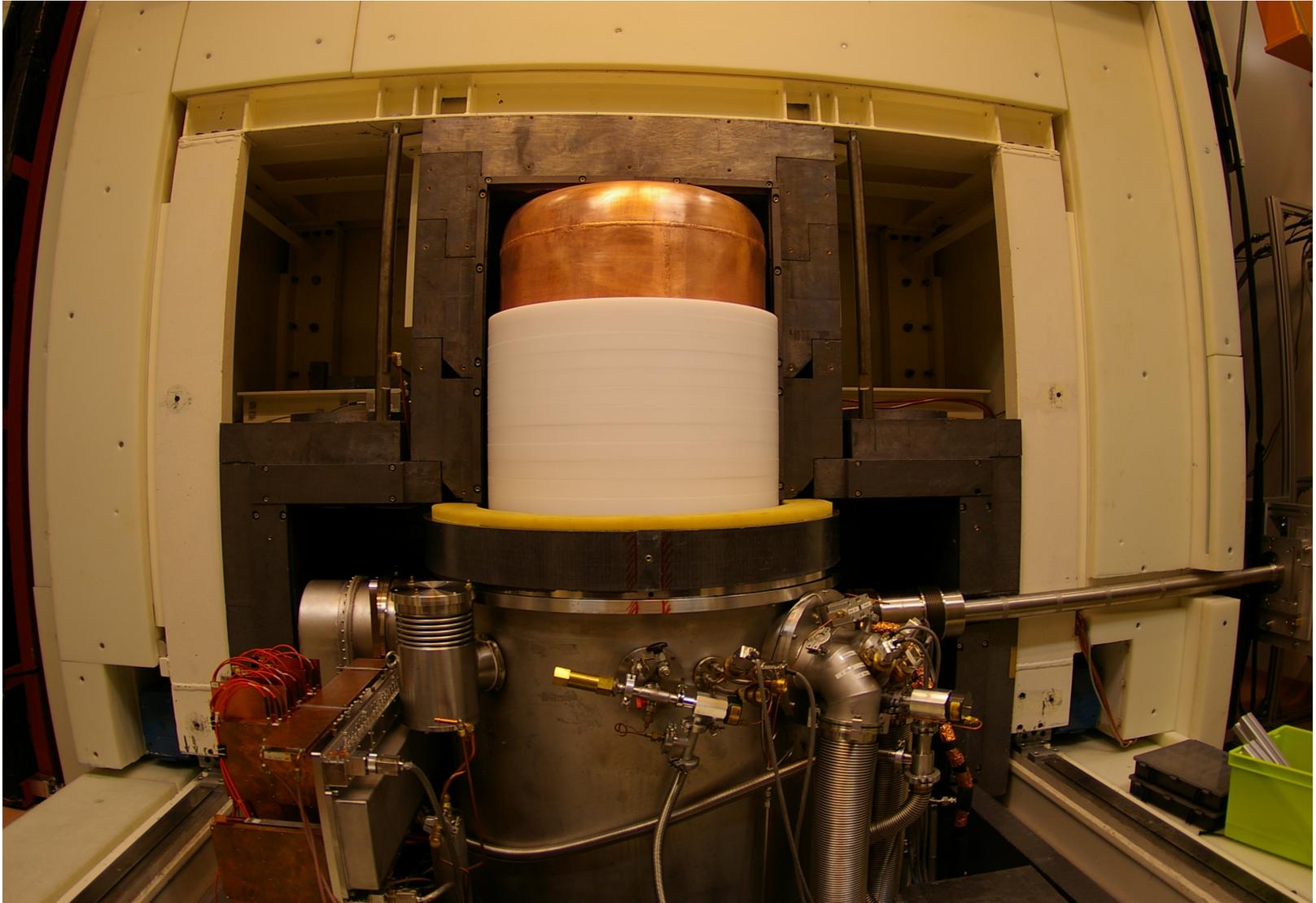
# Préparation des détecteurs



# Installation des détecteurs



Tout est fermé : les détecteurs sont installés et attendent les WIMPs !



# Comprendre un Q-plot

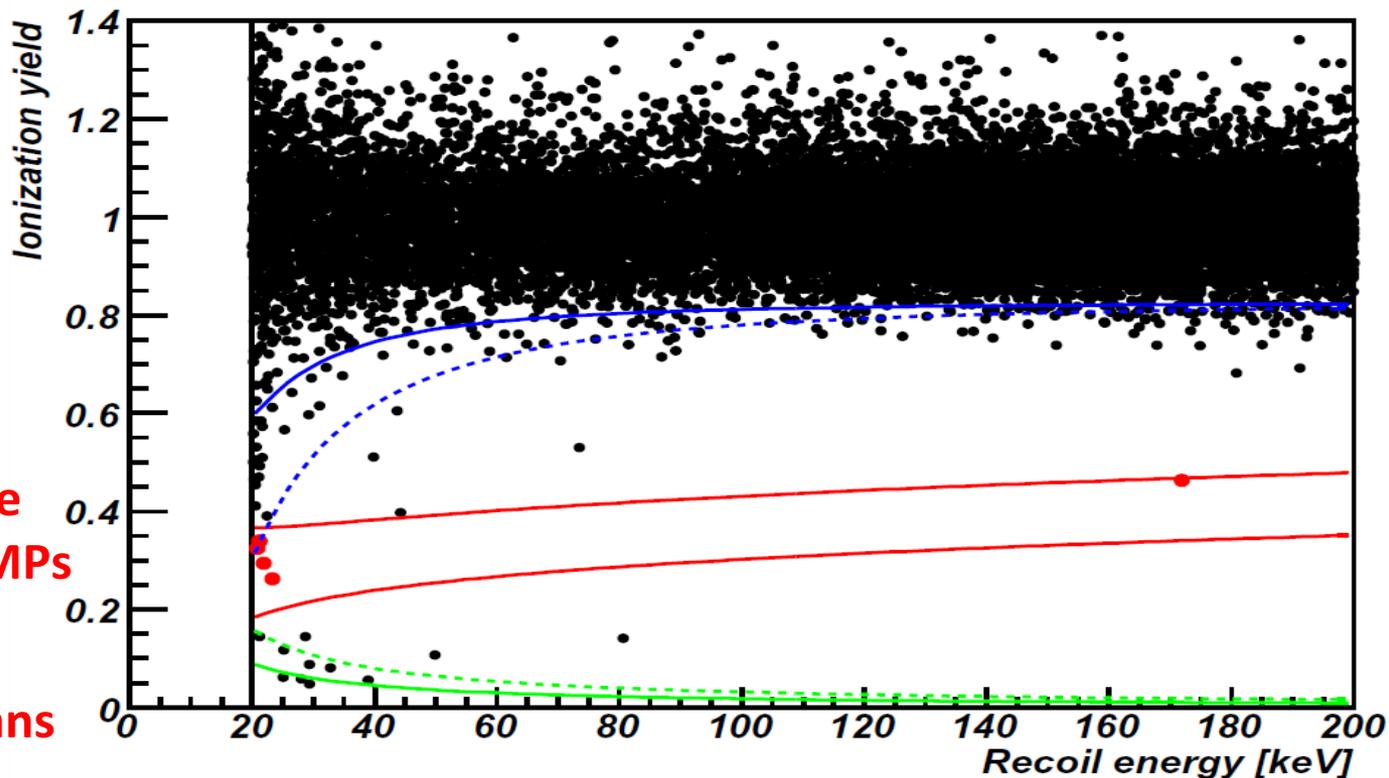
Q = taux d'ionisation (ionization yield)

Q = rapport d'énergies obtenues à partir des 2 signaux mesurés : ionisation (électrodes) et (chaleur) température

10 détecteurs de 400 g, et 1 an de mesure, donc une exposition de 384 kg.jours

La zone entre les 2 courbes rouges : celle où on attend les WIMPs

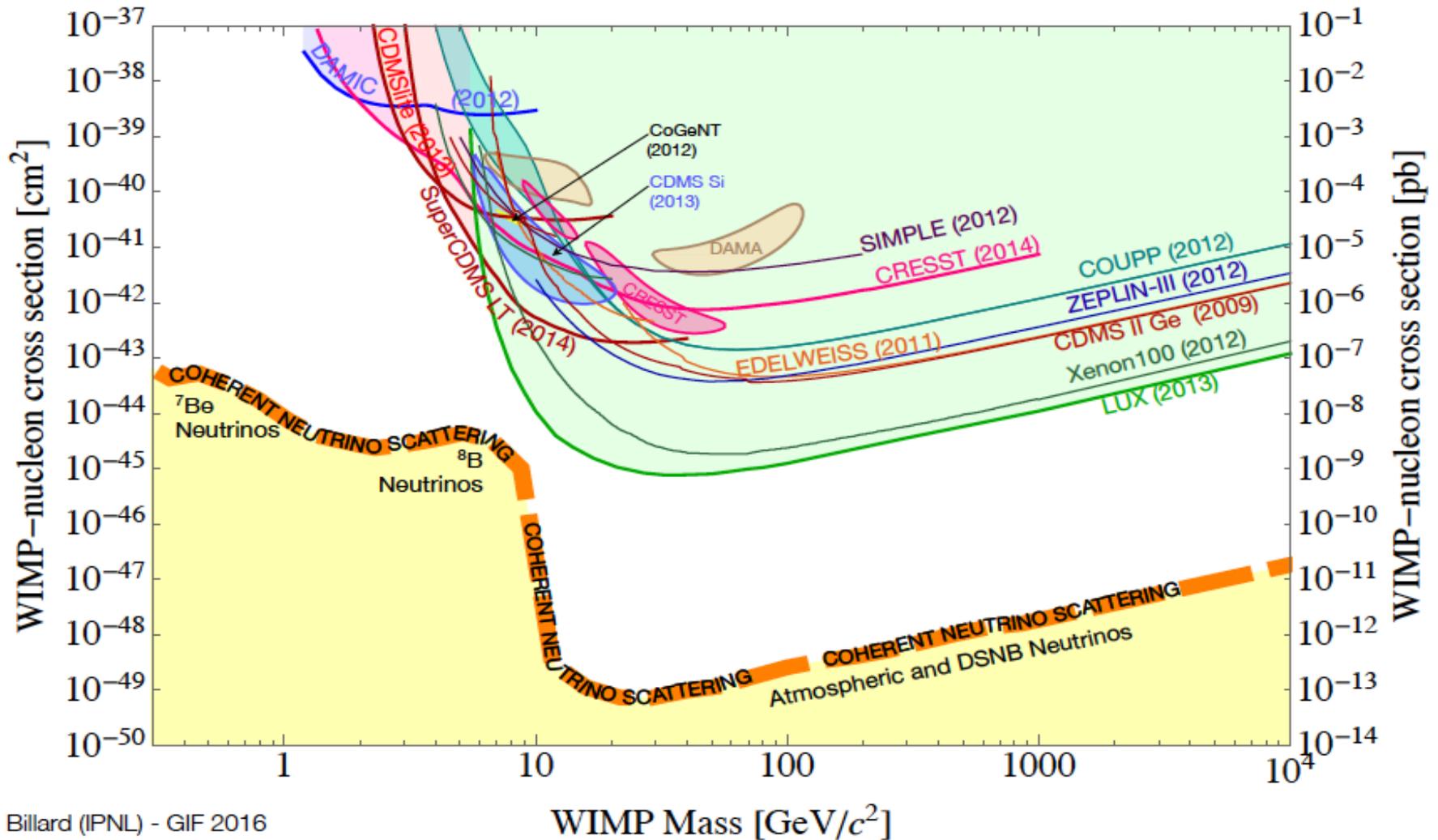
5 événements potentiels WIMPs dans la bande



Mais 3 événements de bruit de fond attendus (simulations) = 0.9 gammas, 0.3 électrons, 1.8 neutrons. **Compatible statistiquement : donc pas de WIMPs !!**

# Résultats en détection directe

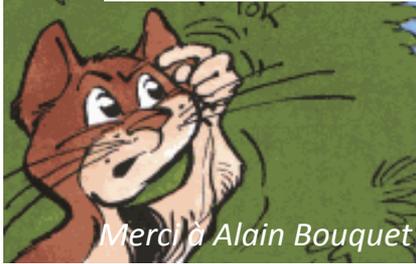
Section efficace d'interaction de WIMPs en fonction de la masse du WIMP



Billard (IPNL) - GIF 2016

Limites obtenues par plusieurs expériences pour une interaction dépendante du spin  
Pas de découverte de matière noire sous forme de WIMP pour l'instant

De la matière noire ?  
Bon d'accord...



# Conclusions

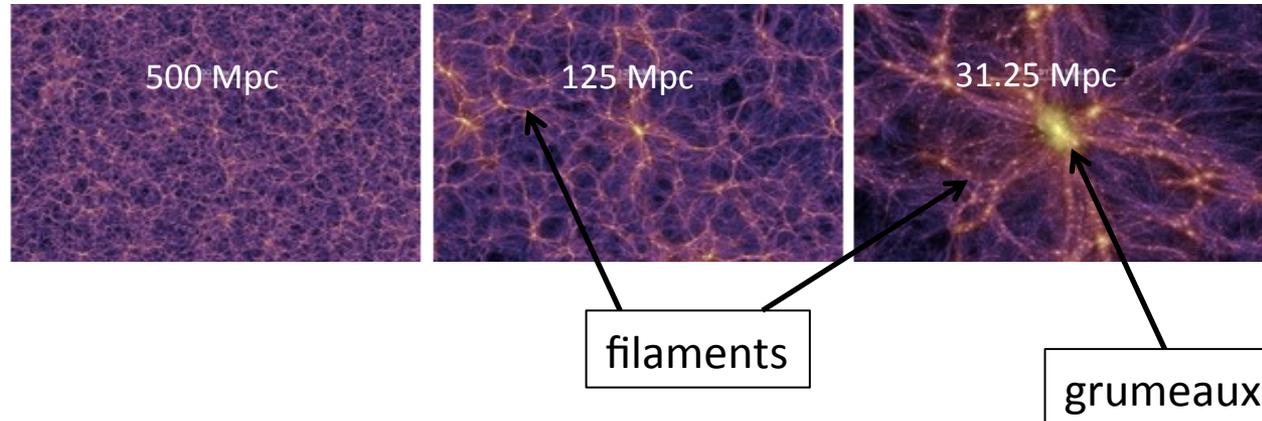
- **Pour l'instant toujours pas de WIMPs** : certaines expériences ont prétendu trouver un signal mais non confirmé par les autres
- En détection indirecte dans l'espace, on a un excès de positrons par exemple mais trop tôt pour interpréter : l'excès pourrait être dû à d'autres objets astrophysiques que les WIMPs
- Il existe **bien d'autres expériences** que je ne vous ai pas montrées
- Il existe bien d'autres études et **bien d'autres candidats possibles**
- Ces recherches sont réalisées par **plusieurs dizaines d'expériences partout dans le monde**

**Mais la matière noire existe... et nous allons continuer à la chercher !**

Merci de votre attention ...

# Aller plus loin avec les simulations numériques

Redshift  $z = 0$  (  $t = 13.6$  milliards d'années après Big-Bang : MAINTENANT )



## Distribution de la matière noire obtenue par la simulation Millenium à très haute résolution

Redshift  $z = 18.3$  (  $t = 210$  millions d'années après Big-Bang )



<http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

Montre la formation des structures de matière noire depuis les perturbations de densité initiales jusqu'aux plus grands halos actuels.

- Même échelle pour les 2 valeurs de  $z$
- De gauche à droite, zoom x 4 à chaque fois.
- En haut  $z = 0$  (maintenant)
- En bas  $z = 18.3$  donc 210 millions d'années après le Big-Bang

# Encore une petite simulation

<http://www.illustris-project.org/media/>

**ILLUSTRIS** : matière noire (gauche) et matière visible (droite) : cube = 100 Mpc de côté  
(avec 1 Mpc = 3,26 millions d'années-lumière =  $3 \times 10^{22}$  m = 30 milliards de milliards de km...)