

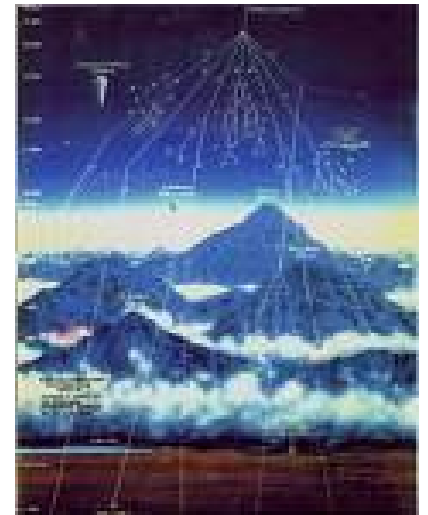
ASTROPARTICULE

Entre l'astrophysique et la physique
des particules

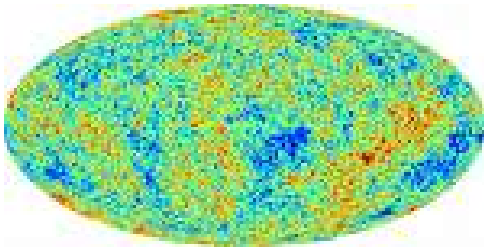


Définition

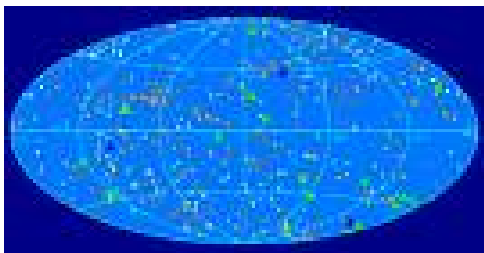
- La physique des particules étudie l'infiniment petit des constituants élémentaires de la matière.
- L'astrophysique s'intéresse à l'infiniment grand du ciel.
- L'astroparticule étudie le ciel avec les outils de la physique des particules (et les physiciens)



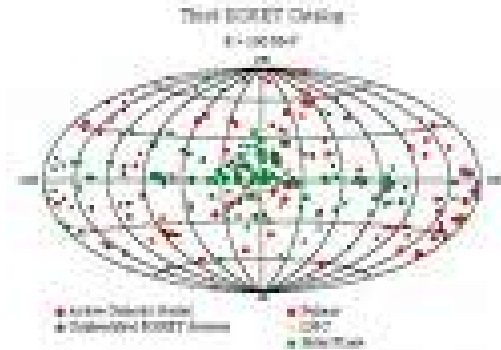
Cartes du ciel



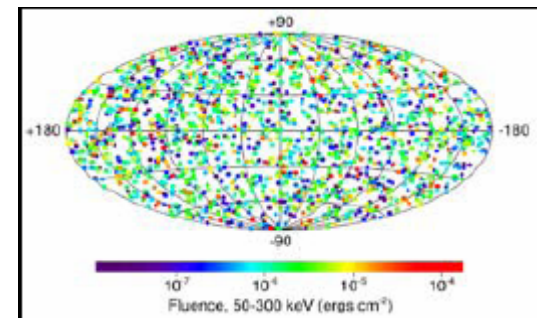
CMB 2,7 K



Visible



Egret MeV

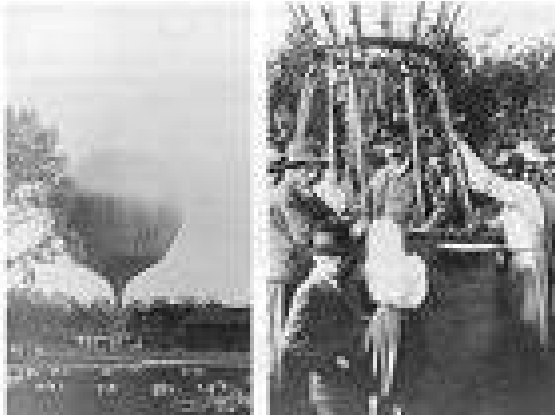


GRB

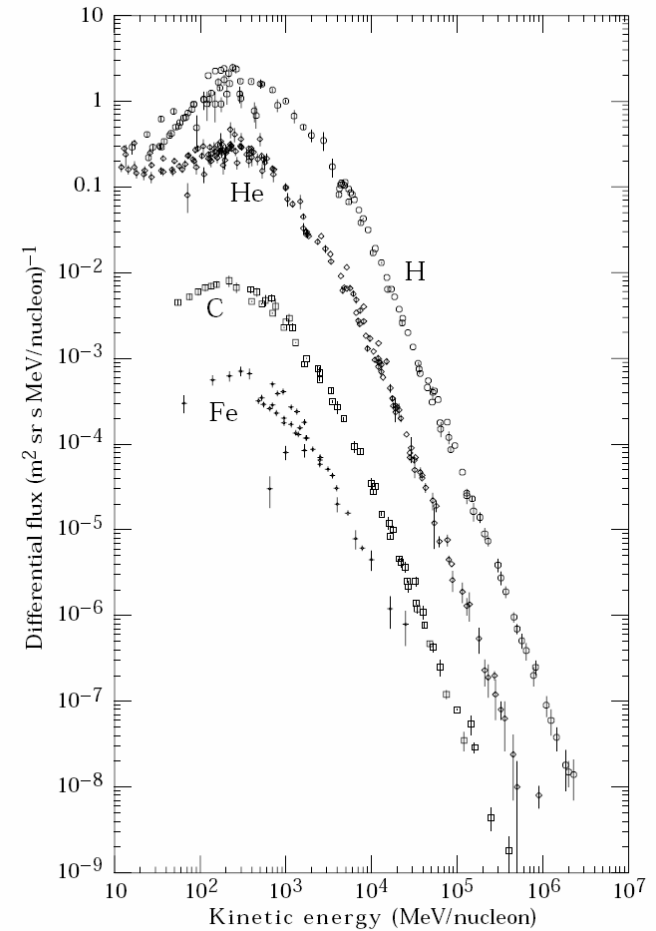
LES MESSAGERS

- Particules chargées: protons, noyaux
 - Photons de haute énergie
 - Neutrinos
 - Ondes gravitationnelles
-
- *Témoins de phénomènes astrophysiques souvent extrêmement violents*
 - *L'astroparticule continue l'étude commencée en 1912 des rayons cosmiques.*

Particules chargées, rayons cosmiques



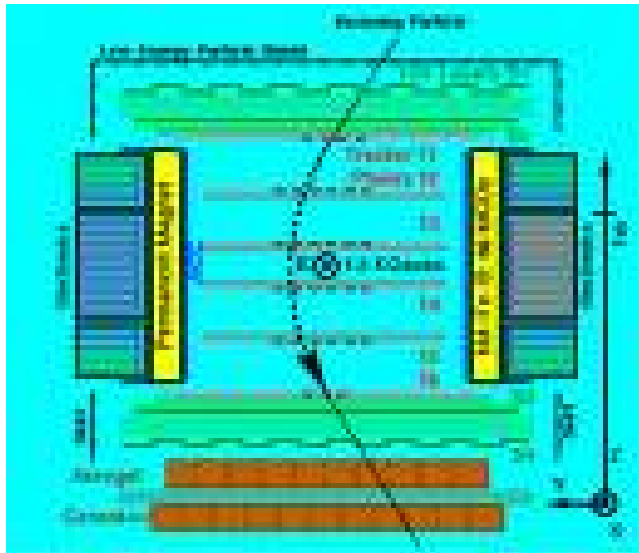
Champ magnétique : les rayons
chargés perdent leur direction



ROLE DE L'ATMOSPHERE

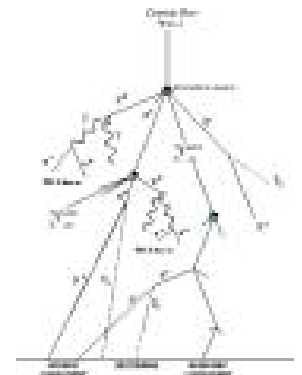
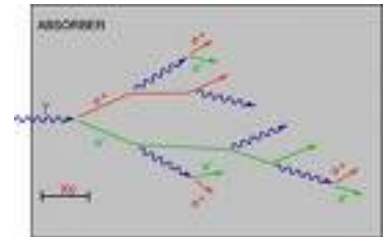
- *Les rayons cosmiques tombant sur nous sont essentiellement des muons. Nous en recevons 100 par m² chaque seconde.*
- *L'atmosphère sert de blindage contre le rayonnement primaire. Dans l'atmosphère se développent des gerbes engendrées par les particules initiales.*
- *Ainsi, pour avoir une connaissance directe des rayons cosmiques, il faut mesurer au-dessus de l'atmosphère (ballons ou satellites). Mais les tailles de détecteurs sont limitées au m², et ceci n'est possible que pour des flux suffisamment abondants, i.e. des énergies limitées.*
- *Aux hautes énergies, les flux sont faibles et la détection doit être faite au sol. Il faudra donc (en général) détecter une gerbe produite dans l'atmosphère.*

Alpha Magnetic Spectrometer



Les gerbes dans l'atmosphère

- L'atmosphère (10 km d'air à pression normale) est équivalente à 13 m d'eau.
- Les γ et e^+ , e^- donnent des gerbes électromagnétiques qui se développent suivant la longueur de rayonnement $X_0=300\text{m}$.
- Les protons et noyaux donnent des gerbes hadroniques caractérisées par la longueur d'interaction $\lambda=900\text{m}$.



Techniques de détection

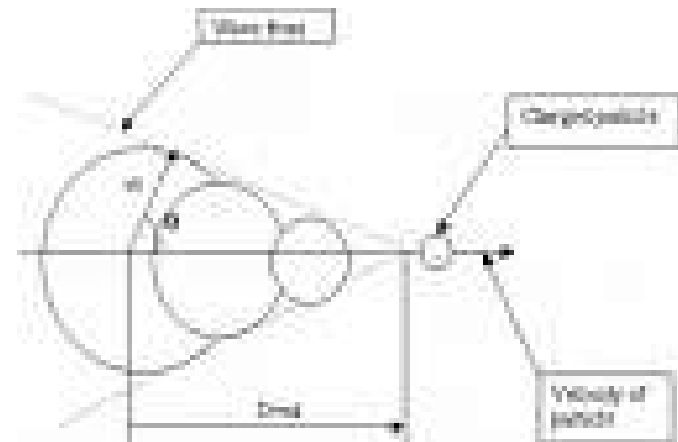
- À très hautes énergies des particules secondaires arrivent à terre (μ et e). On peut les détecter par un réseau de capteurs au sol.
- *Les particules chargées excitent les atomes d'azote de l'air qui produisent une lumière de fluorescence émise isotropiquement le long des trajectoires.*
- *Les particules chargées se propageant à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière émettent un rayonnement Cerenkov très collimé le long de la trajectoire.*
- Également ondes radio ou acoustiques

L'effet Cerenkov

Quand une particule chargée se propage à une vitesse $> c/n$

Émission d'une onde de choc EM

$$\cos \theta = 1 / \beta n$$



Radio-détection

Dans la gerbe, il se développe
une asymétrie $e^-/e^+ + B$ terre

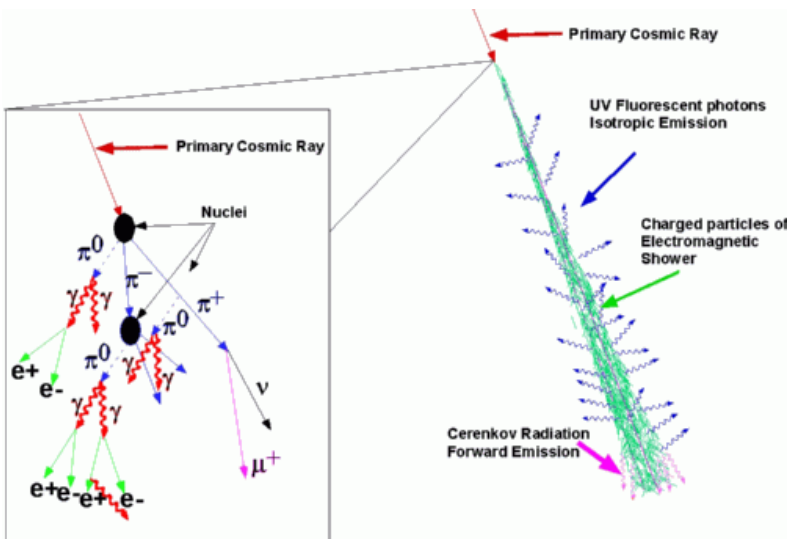
10 e^- pour 9 e^+

Équivalent à un courant bref

⇒ Onde radio

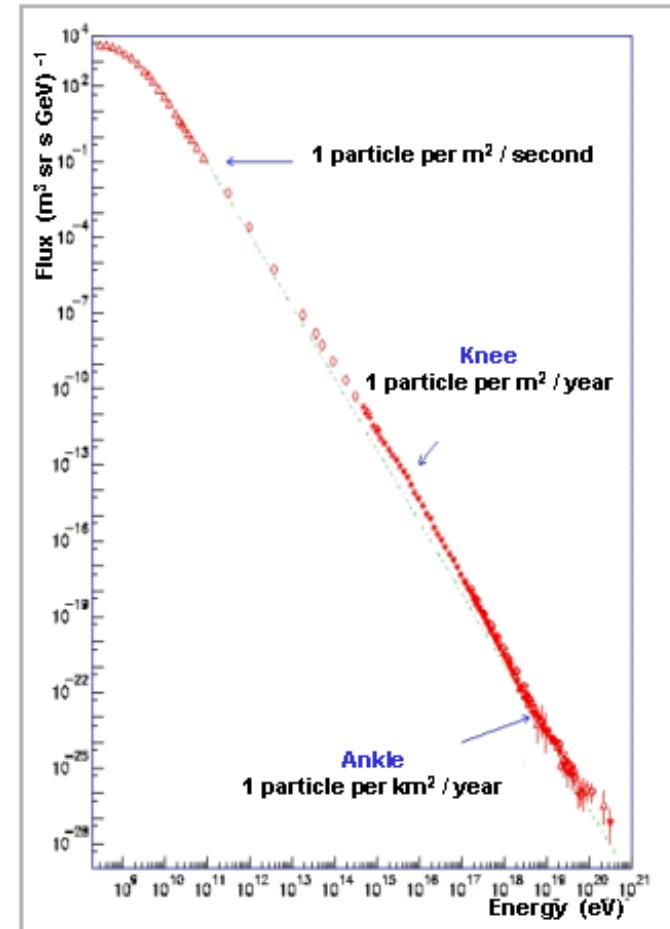
Signal détectable avec antennes

Codalema à Nançay

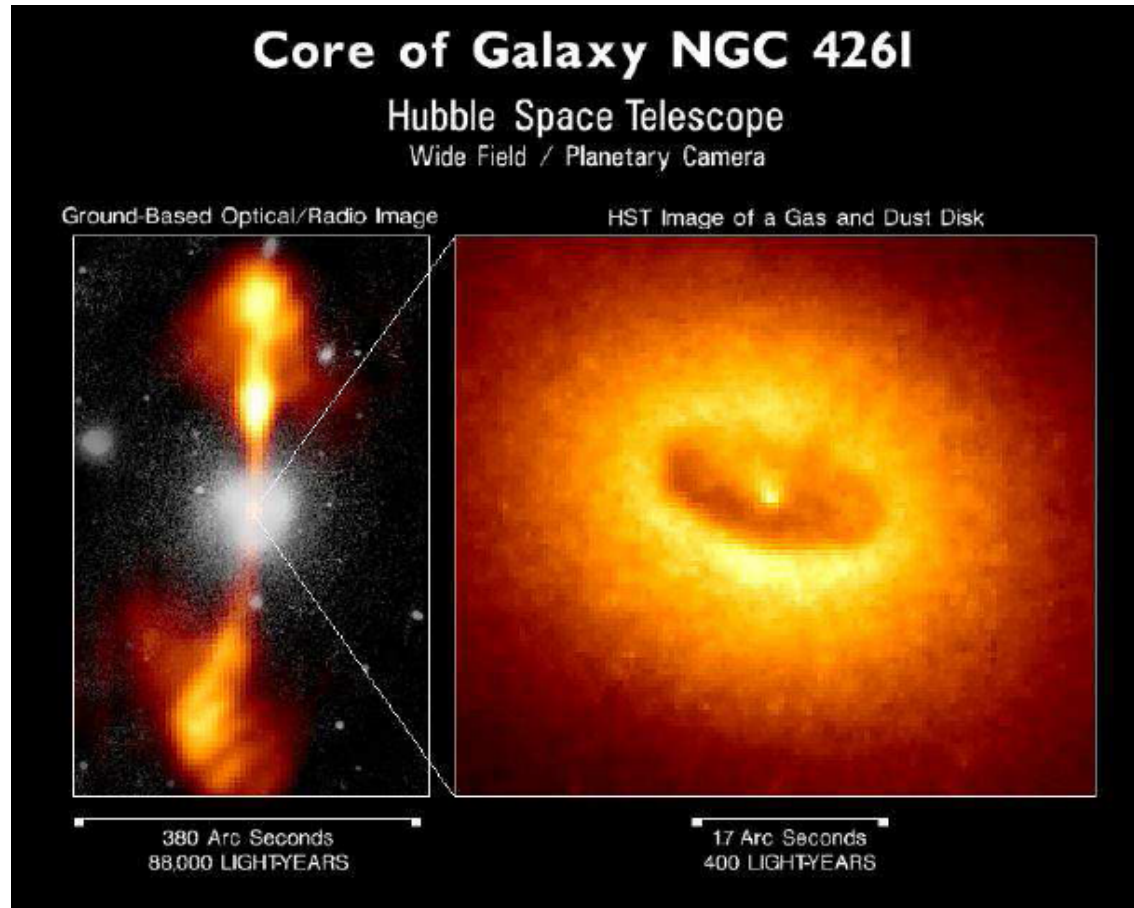


Les hadrons extrêmes

- Le spectre des protons (noyaux?) a été mesuré sur 30 ordres de grandeur jusqu'à des énergies macroscopiques de 10^{20} eV.
- À ces énergies ultimes le flux tombe à 1 particule par km^2 et par siècle!
- La coupure GZK (absorption par le fond cosmologique) devrait affecter la queue du spectre. Des résultats contradictoires exist(ai)ent.

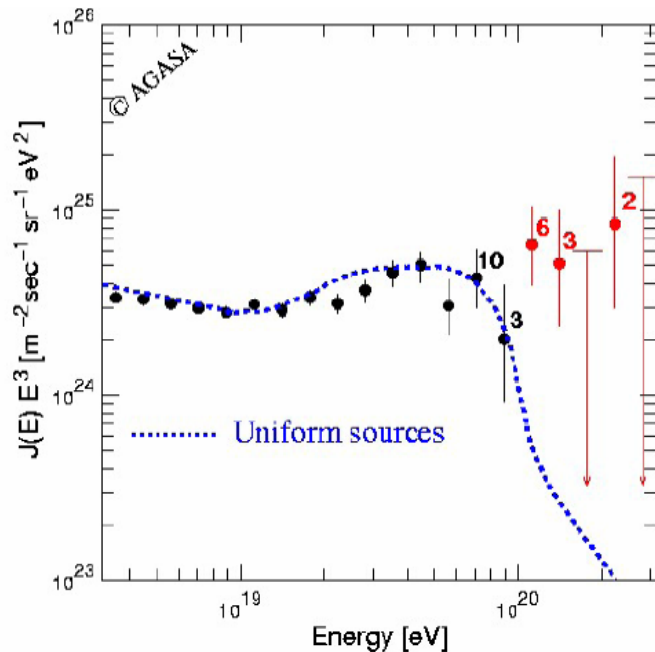


Des monstres dans le ciel

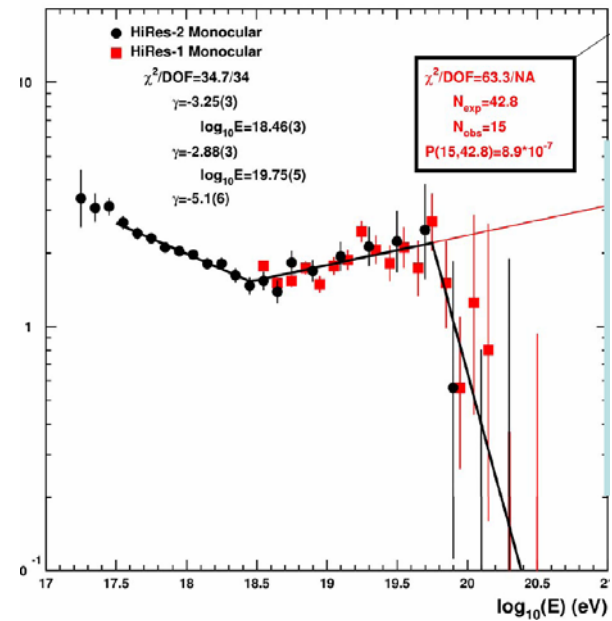


La coupure GZK

$$p + \gamma (2,7K) \Rightarrow \Delta^+ \Rightarrow p + \pi^0, \quad n + \pi^+$$



Agasa, 100 km²

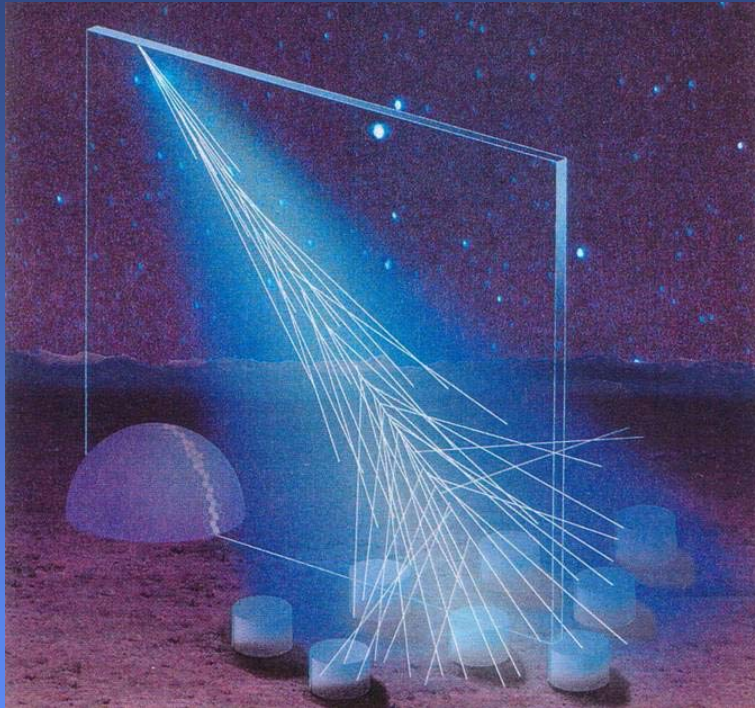


HiRes

L'observatoire Auger

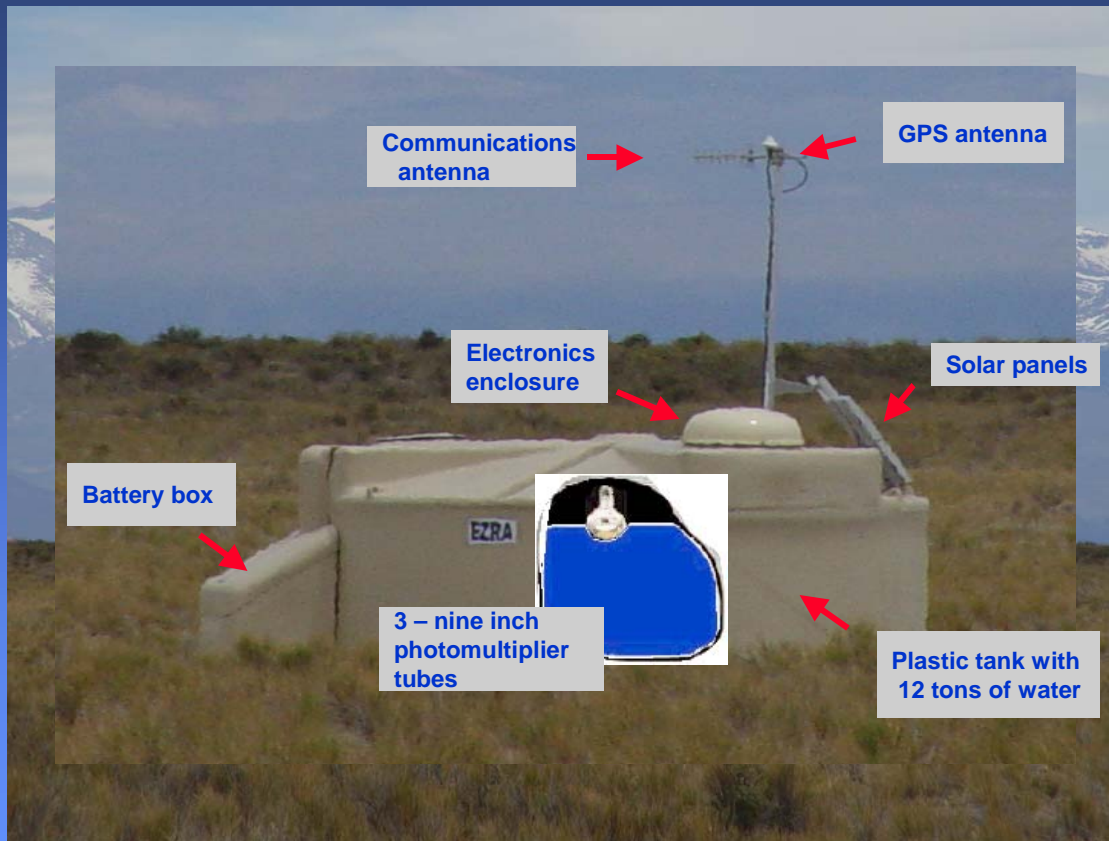
- À 10^{19} eV, une gerbe atmosphérique arrose au sol une superficie de plusieurs km^2 et donne 100 milliards de particules secondaires, essentiellement e^+ et e^- .
- *L'observatoire Auger, situé dans la pampa argentine, couvre 3000 km^2 d'un réseau de 1600 stations consistant en une cuve d'eau dans laquelle les particules traversant produisent la lumière Cerenkov.*
- En parallèle, 4 stations « œil de mouche » détectent la lumière de fluorescence émise le long de la gerbe. Cette technique est limitée aux nuits sans lune.

The Design



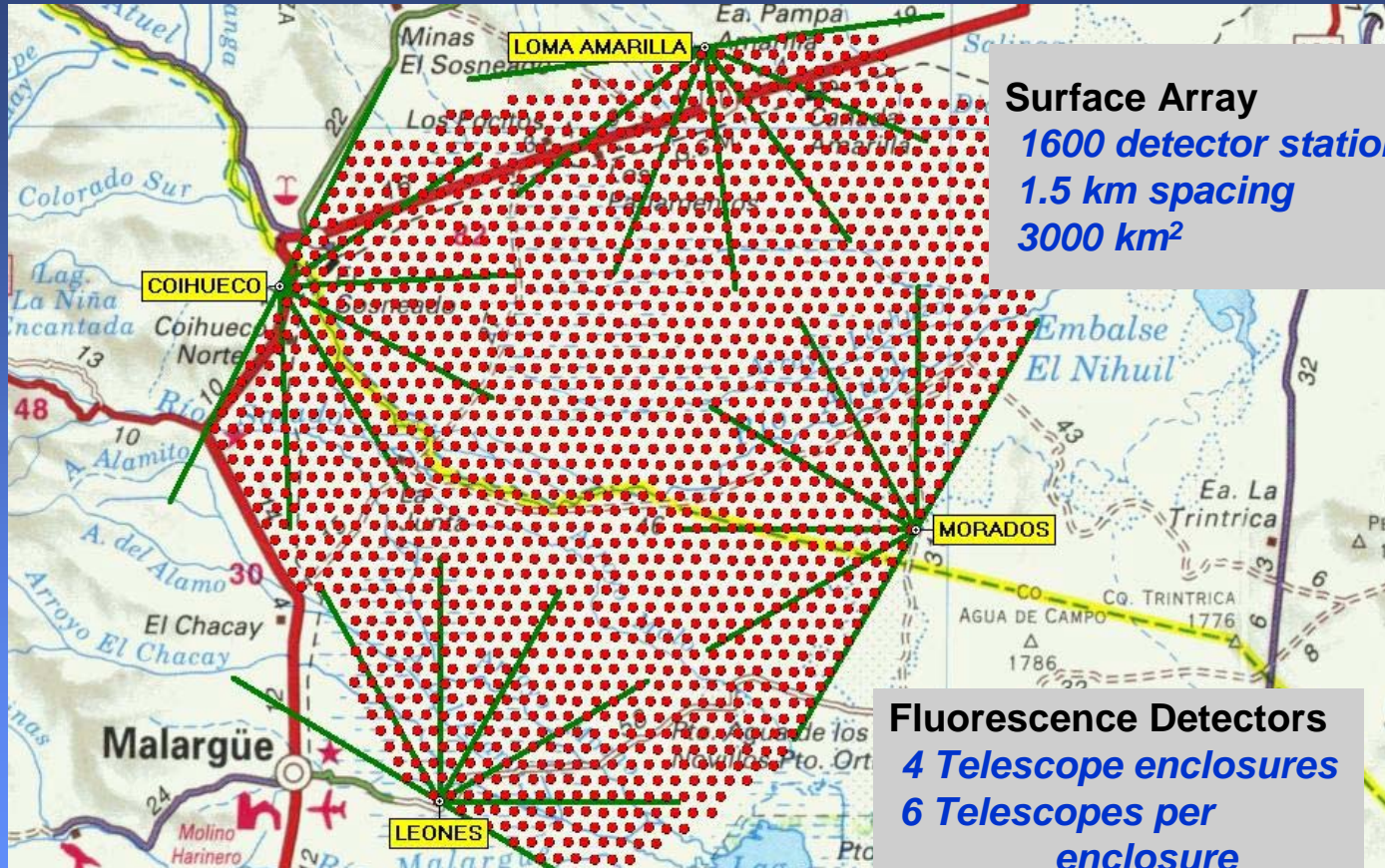
4

The Surface Array Detector Station



6

The Observatory Plan

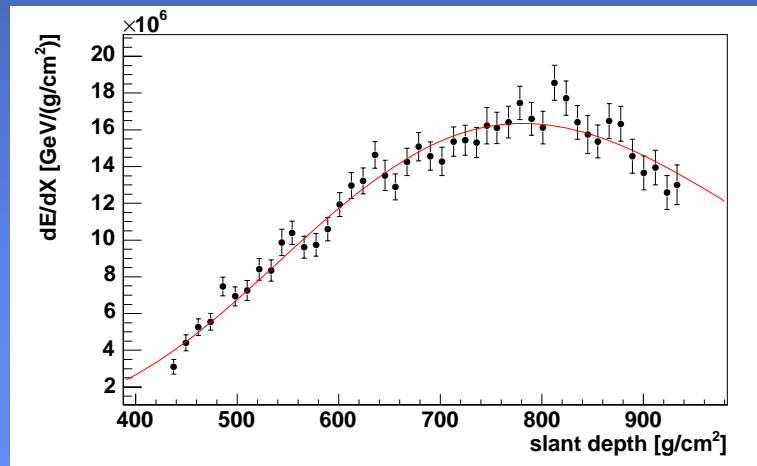
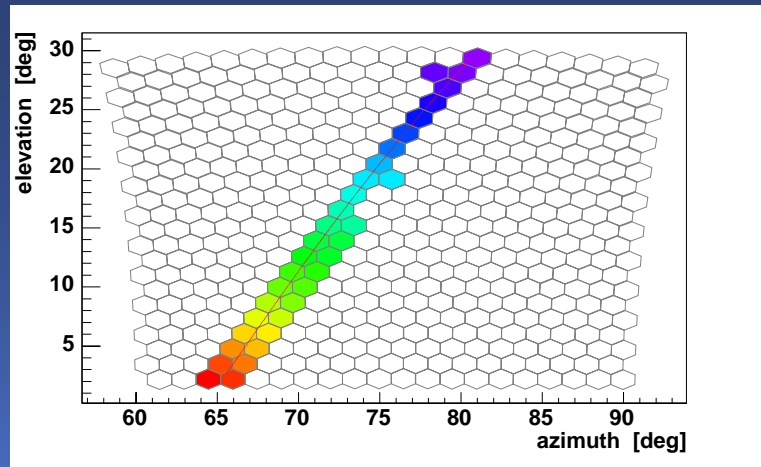
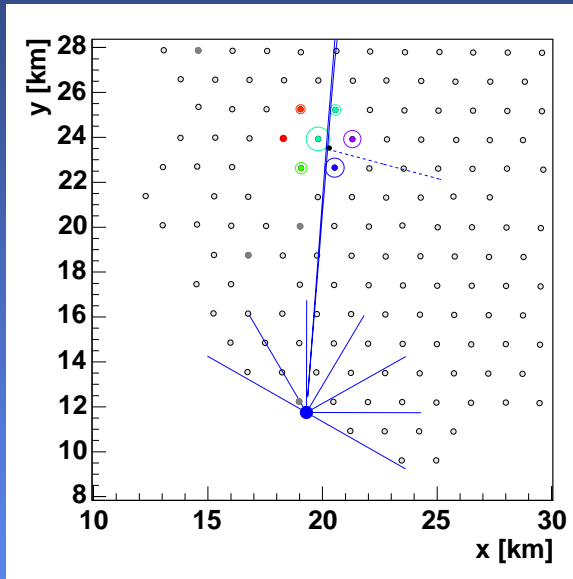


Surface Array
1600 detector stations
1.5 km spacing
3000 km²

Fluorescence Detectors
4 Telescope enclosures
6 Telescopes per enclosure
24 Telescopes total

Example Hybrid Event

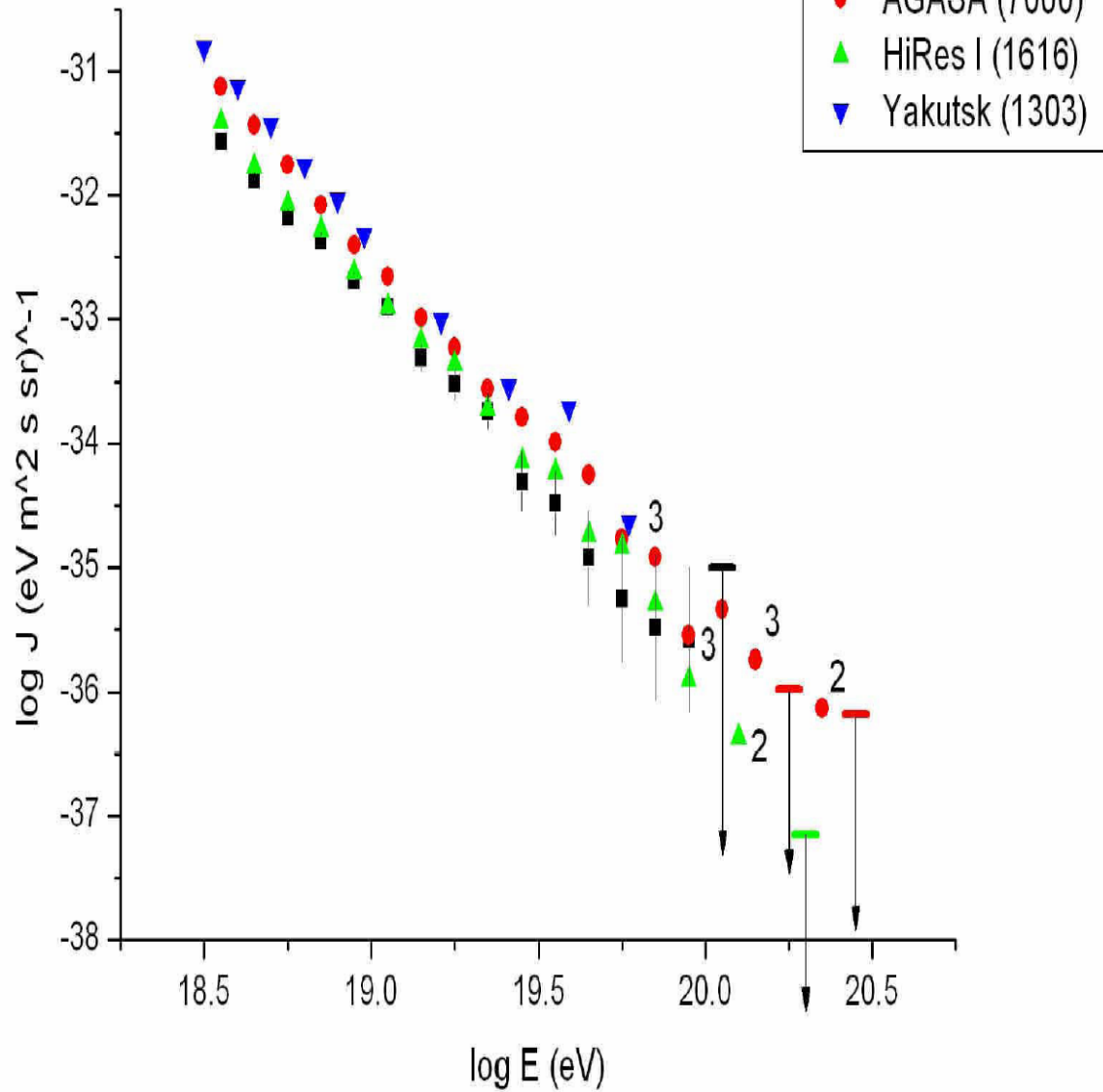
$\theta \sim 30^\circ$, $\sim 8 \text{ EeV}$



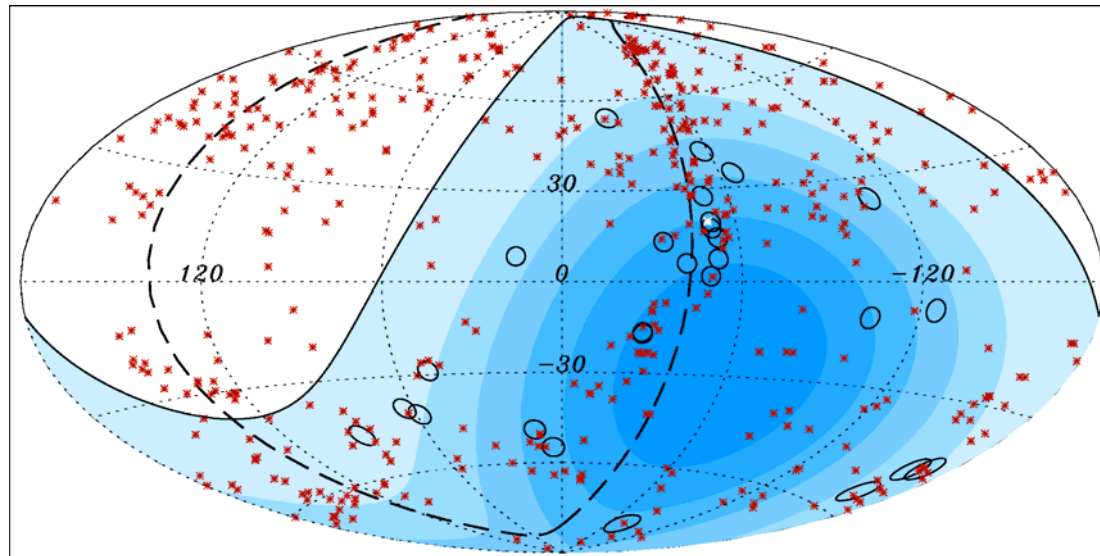
État de l'expérience

- Maintenant opérationnel, l'observatoire est champion en statistique.
- Deux ans de données, événements hybrides à 10^{20} eV sont observés.
- Un site nord est choisi pour une couverture complète du ciel.

Summary Spectrum above 2 EeV

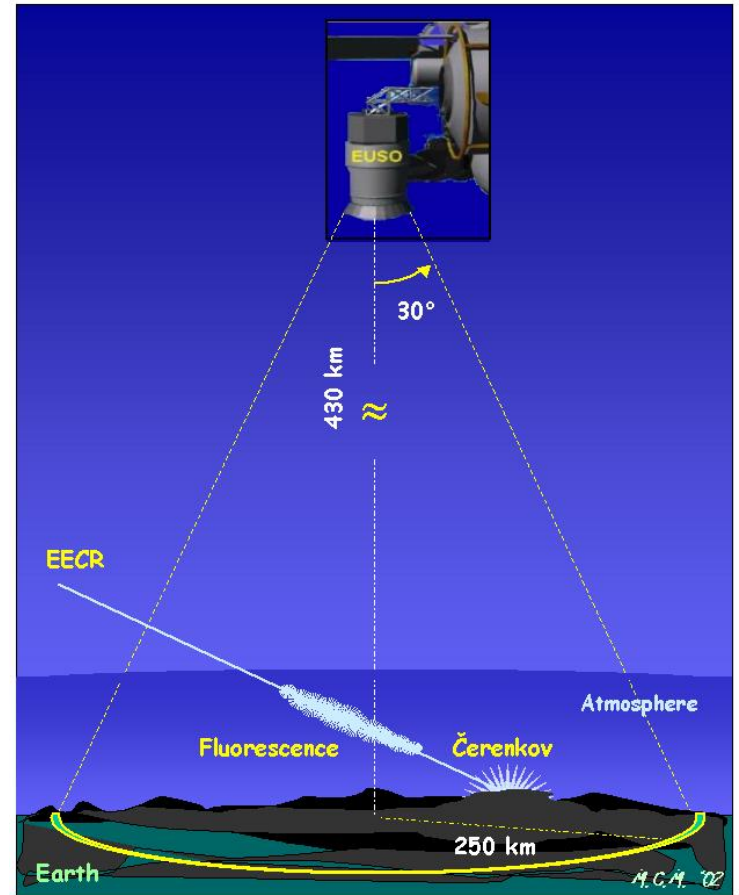
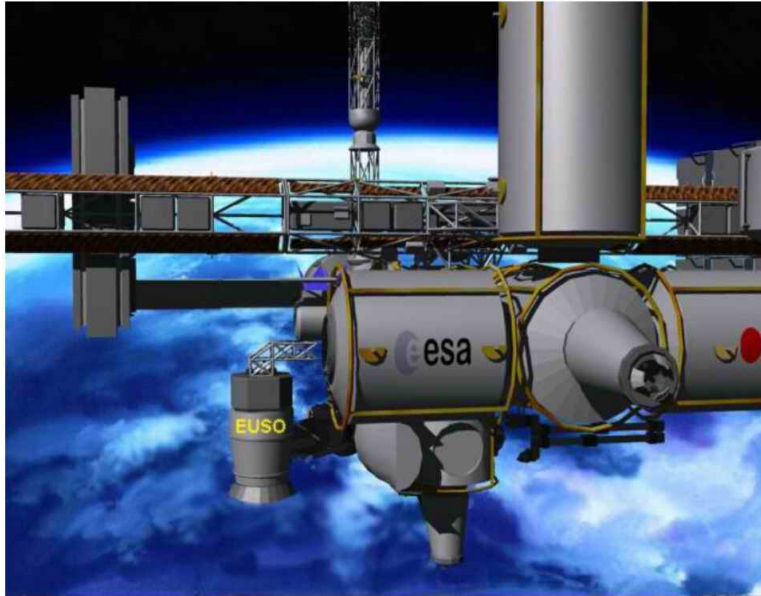


Corrélation avec les AGN



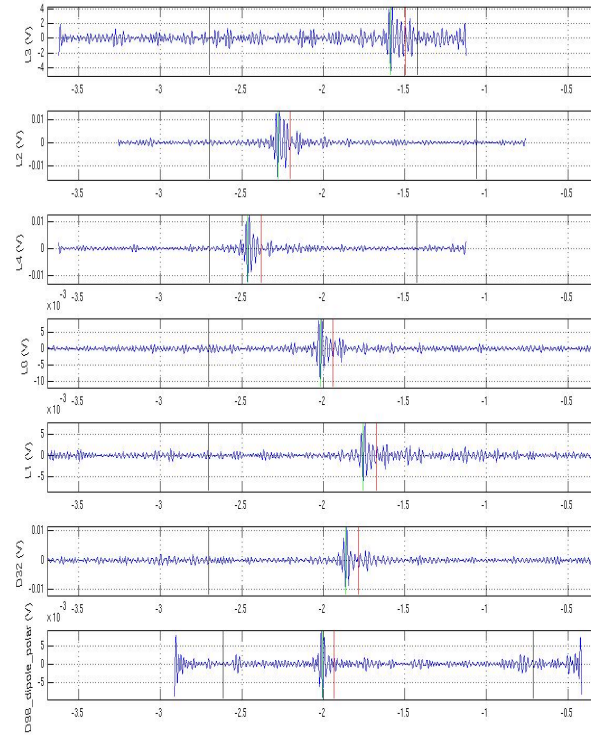
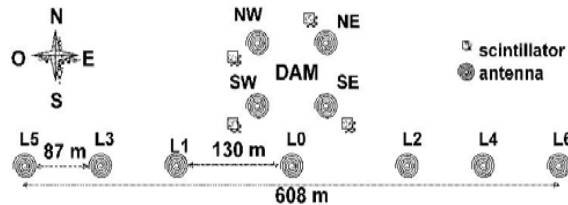
Le projet EUSO

- Pour couvrir des surfaces encore plus grandes, il faut un détecteur spatial.
- *Le projet EUSO propose un télescope sur la Station Spatiale, à 400 km d'altitude. Il est composé de lentilles de Fresnel et d'un plan focal.*
- Le télescope de grand angle examine une surface au sol de 200000 km².
- *Pour combattre le fond lumineux (1000 γ /m²/ns), le plan focal doit contenir 200000 tubes photomultiplicateurs.*
- Le seuil d'une telle détection par lumière de fluorescence est élevé, de l'ordre de 5 10¹⁹ eV.



COsmic ray DEtection Array with Logarithmic Electromagnetic Antennas

CODALEMA: COsmic ray DEtection Array with Logarithmic ElectroMagnetic Antennas



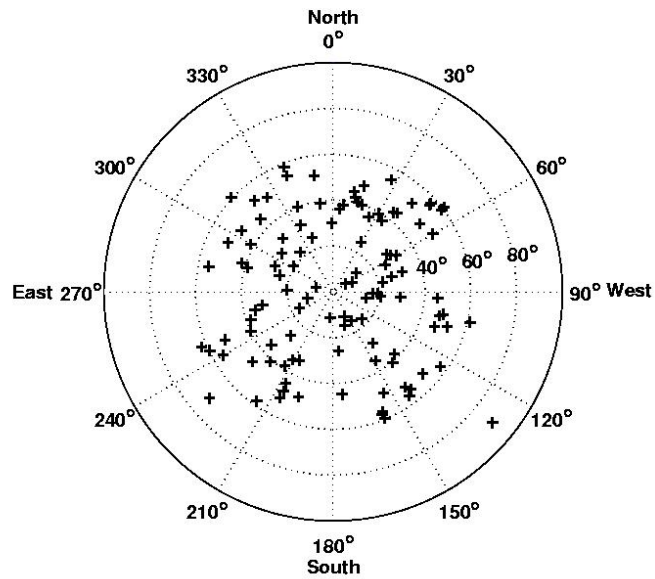
11 antennas, band-pass filtered (24-82 MHz)
608m East-West-, 120 m SW-SE lines
4-fold coinc.trigger from particle-detectors



Transient frequency analysis
D.Ardouin et al,
NIMA555 (2005) 148

$\times 10^{-6}$
 μs

ECRS2006

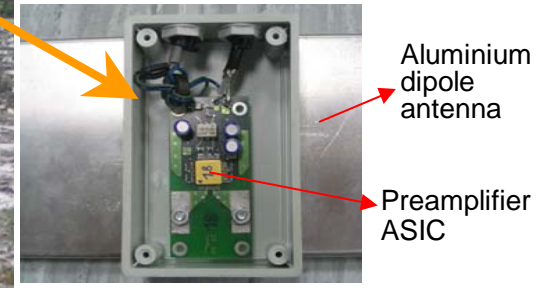
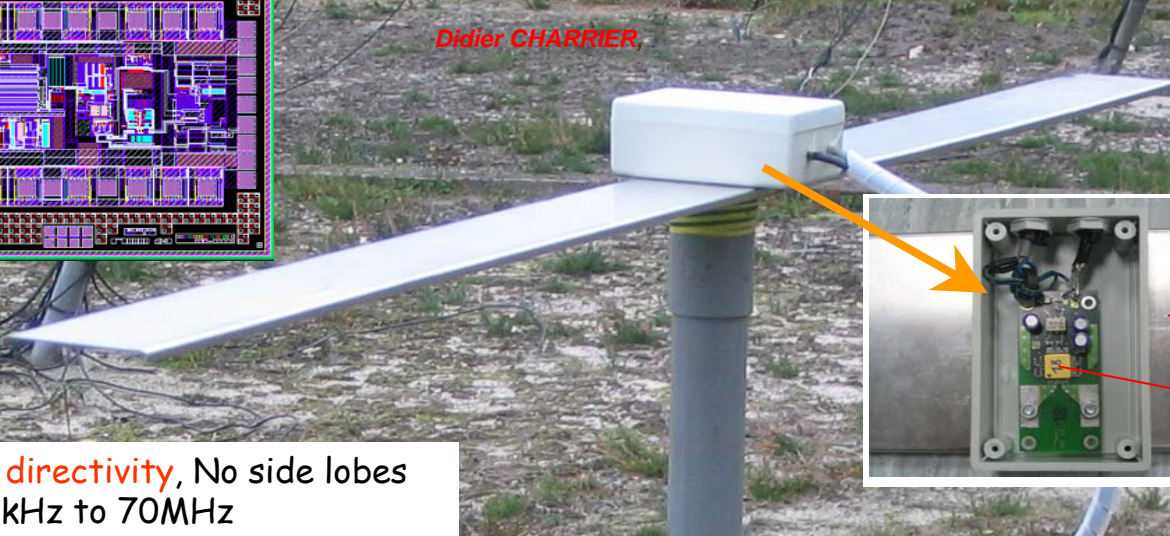
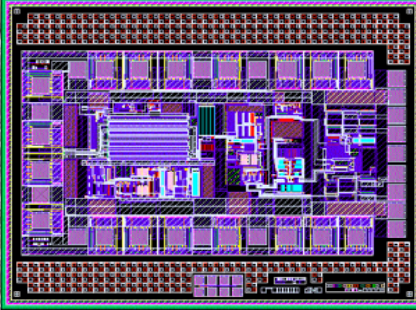


Reconstructed arrival directions
for EAS events with antenna
multiplicities ≥ 4

A dedicated LNA(ASIC)

The new active dipole antenna

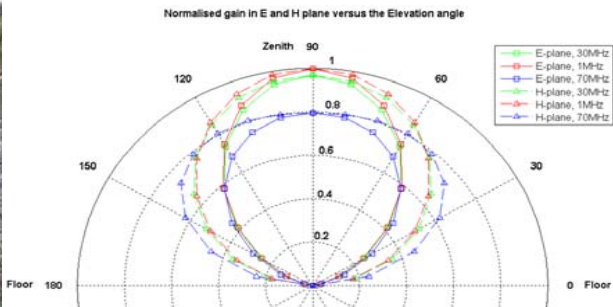
Didier CHARRIER,



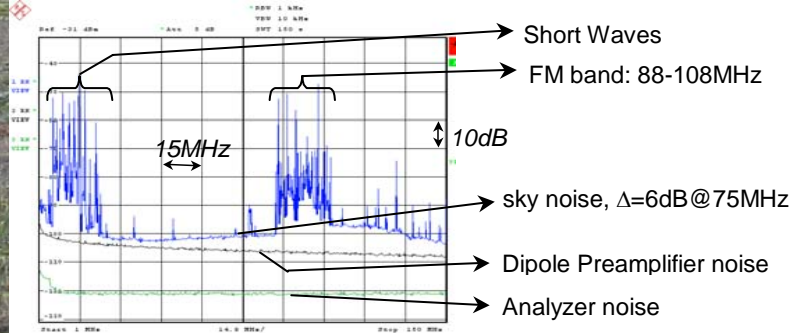
Constant directivity, No side lobes from 100kHz to 70MHz

-H-plane: half beamwidth=120°

-E-plane: half beamwidth=90°



High sensitivity and wide bandwidth



Spectrum measured from 1MHz to 150MHz at Nançay

Les particules neutres

Avantage: direction maintenue

Difficulté: beaucoup plus rares

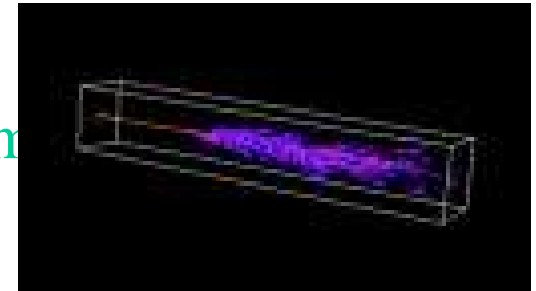
photons: on pointe vers une source

neutrinos: on se blinde contre les
autres cosmiques

Les photons de haute énergie

Les photons engendrent des gerbes EM

On observe la lumière Cerenkov dans l'air émise par les e^+ , e^- de la gerbe



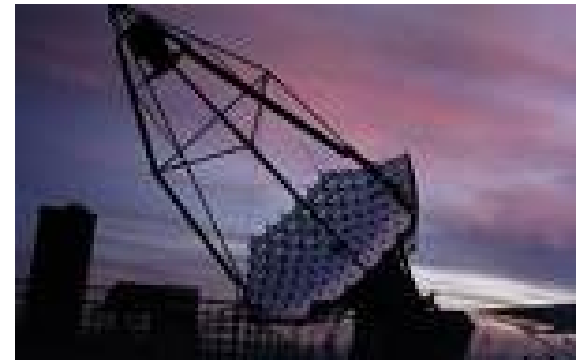
Cette lumière est collimée dans un angle de 10 mrad

Au sol on recueille des γ visibles qui arrosent un cercle de rayon ~ 120 m, dépendant peu de l'énergie

La densité de photons est proportionnelle à l'énergie, environ 200 photons par m^2 à 1 TeV

Les télescopes Cerenkov

- Plusieurs générations
- de télescopes ont été
- construites: Cat, Whipple,
- Cangaroo, Céleste...
- Le plus performant est le télescope Hess opérant en Namibie

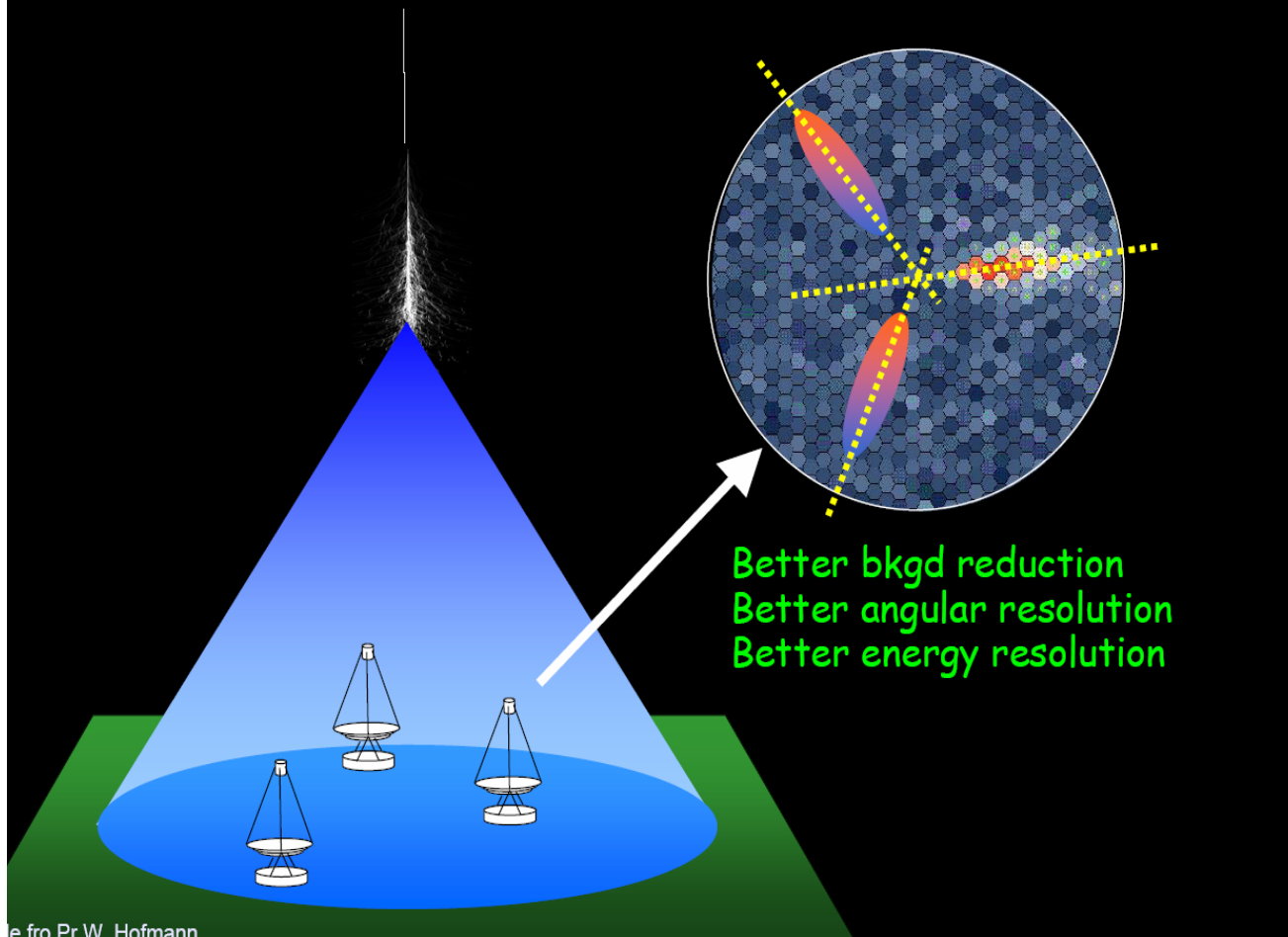


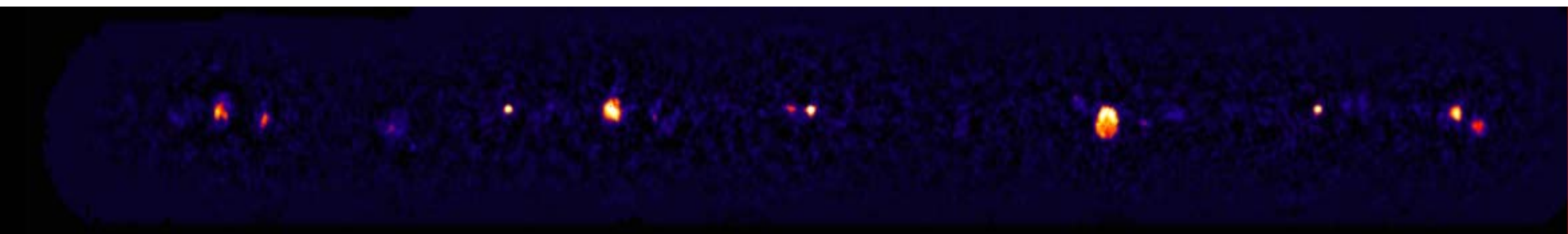
Le télescope HESS

- Quatre télescopes individuels, chacun visant le même objet.
- L'information permet de rejeter sur la seule forme les gerbes de hadrons par un facteur $\sim 300-400$.
- Hess a déjà observé plusieurs sources dans la gamme 100 GeV- multi TeV, en particulier le centre galactique.



Systems of Cherenkov telescopes



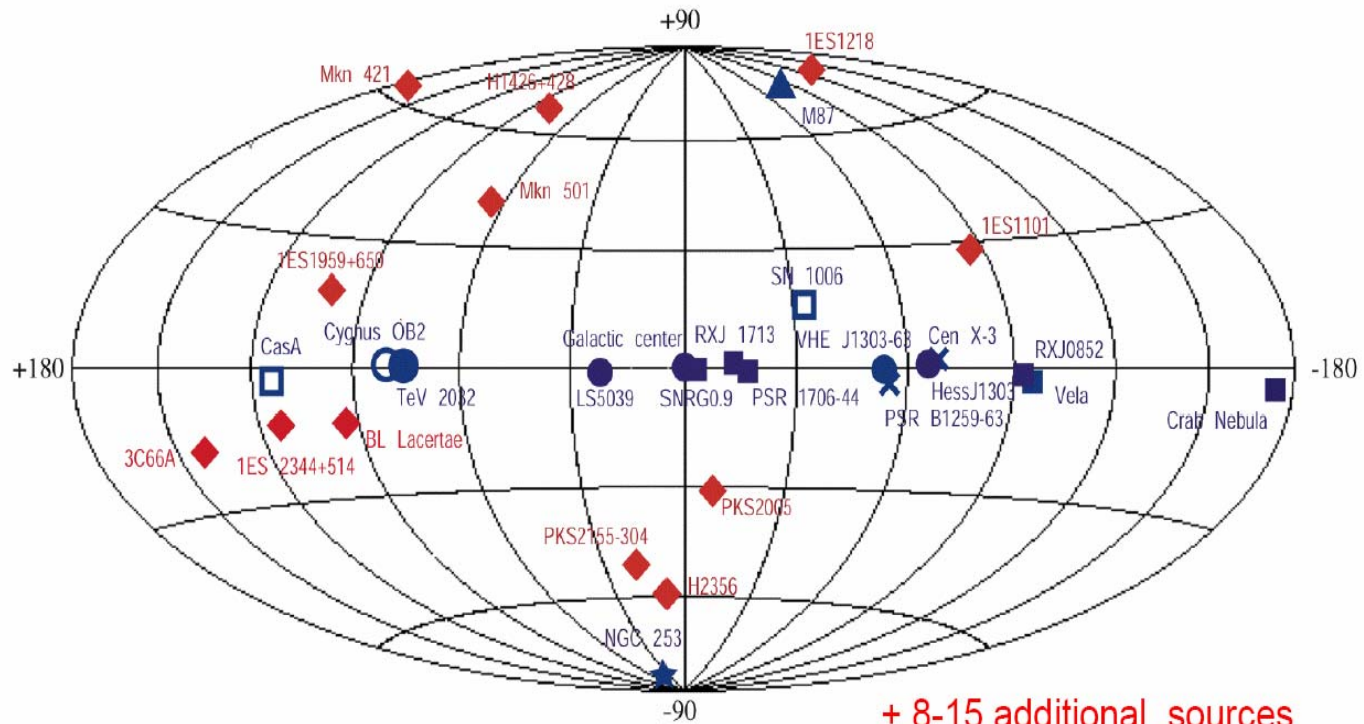


+ 30°

- 30°

VHE Gamma Sources ($E > 100 \text{ GeV}$)

(Status August 2005)



+ 8-15 additional sources
in galactic plane.

Galactic Coordinates

- | | | | |
|--------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| ■ = Pulsar/Plerion | □ = SNR | ★ = Starburst galaxy | ○ = OB association |
| ◆ = AGN (BL Lac) | ▲ = Radio galaxy | × = XRB | ● = Undetermined |

Les neutrinos

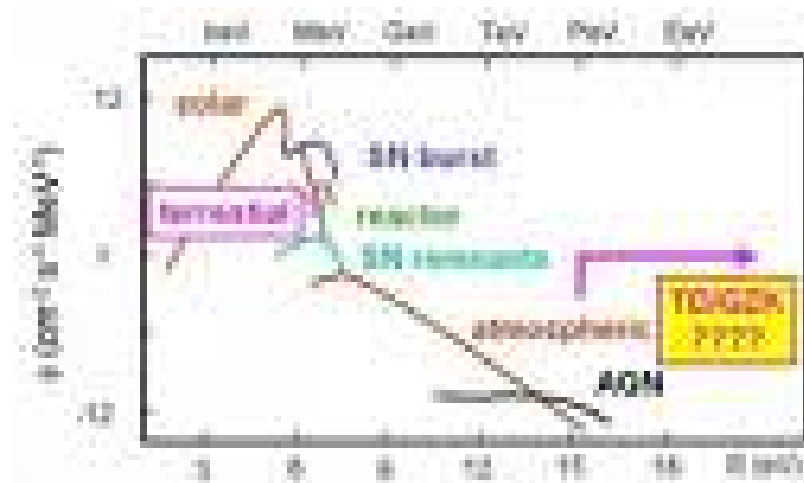
- Astroparticules « par excellence », car les protons subissent les champs magnétiques et sont absorbés au-dessus de la coupure GZK. Les photons sont aussi absorbés par le fond I.R.
- Seuls les neutrinos peuvent provenir indemnes des confins de l'Univers, mais leur faible probabilité d'interaction nécessite des détecteurs très massifs.

Les sources astro de neutrinos

- Le soleil produit 10^{38} ν_e par seconde.
- Une supernova de type II (SN1987) émet 10^{58} neutrinos en 10 secondes.
- Les gerbes atmosphériques résultent en un flux de neutrinos à hauteur de $100/\text{m}^2/\text{s}$.
- Accélérateurs et réacteurs produisent intensément des neutrinos.
- Le Big Bang a laissé des neutrinos cosmologiques à hauteur de $300/\text{cm}^3$ dans tout l'espace actuel.
- On recherche des neutrinos d'énergie extrême provenant de cataclysmes dans l'univers.

Spectre des neutrinos

Ces diverses sources de neutrinos se répartissent en des gammes d'énergie assez bien caractérisées.

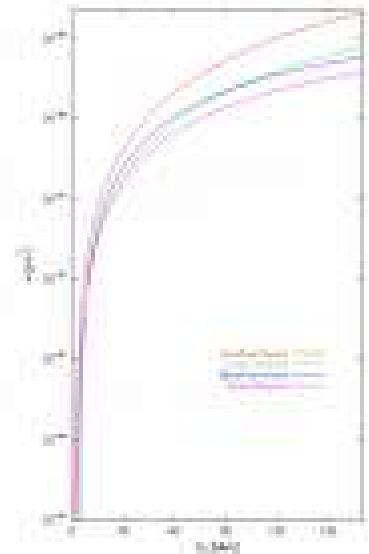
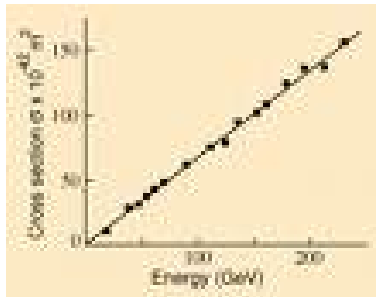


Section efficace d'interaction

$$\sigma = 0,7 \cdot 10^{-38} * E \text{ (GeV) cm}^2$$

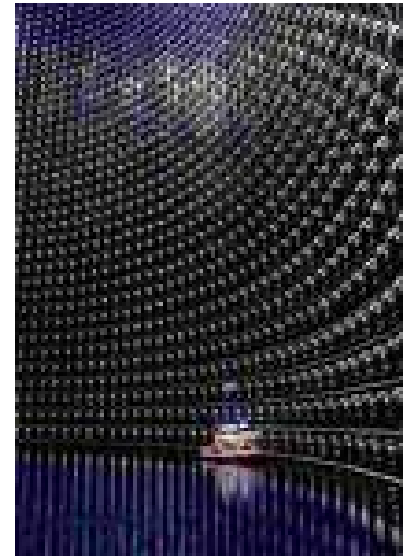
Solaires: 1/1 milliard dans la terre

Terre opaque au-dessus de 10^{15} eV



Un détecteur: SuperKamiokande

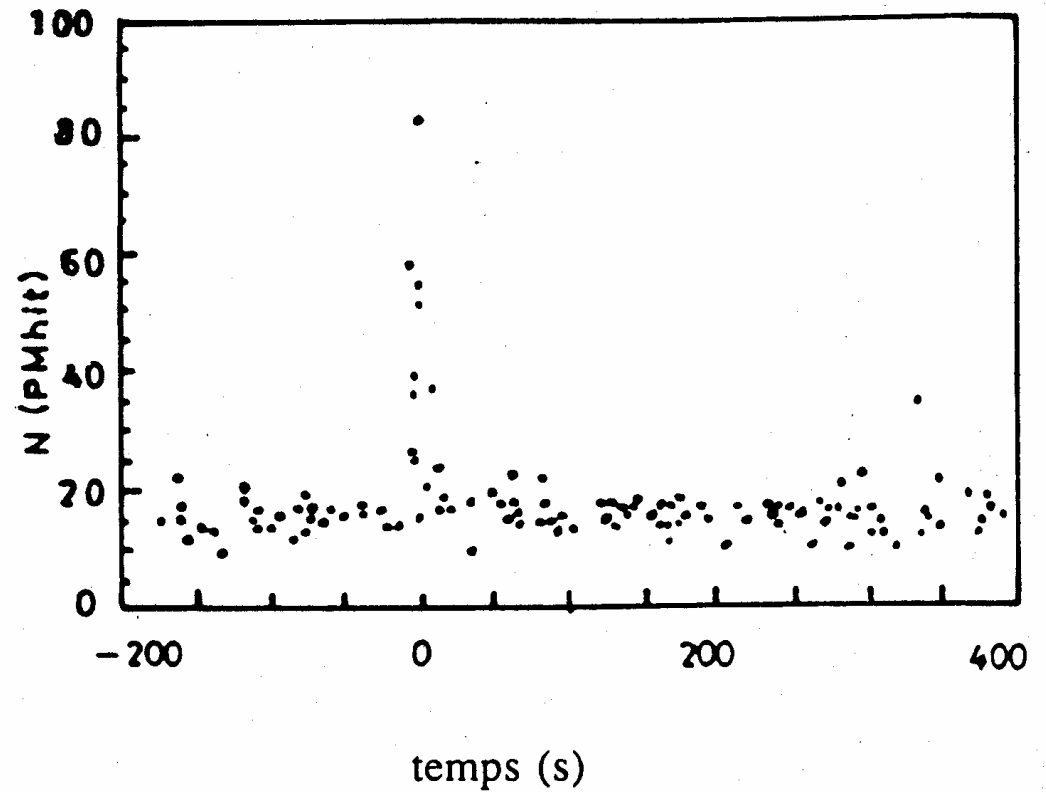
- Construit sous une montagne japonaise, SuperK est une immense cuve emplie de 50 kilotonnes d'eau purifiée, vue par 11000 photomultiplicateurs géants.
- Dans l'eau, les particules chargées émettent la lumière Cerenkov. Pour des électrons le seuil est de 5 MeV.
- SuperK a étudié les neutrinos solaires et les neutrinos atmosphériques.



Neutrinos de SN1987

Kamiokande 1000
tonnes d'eau

23 février 1987

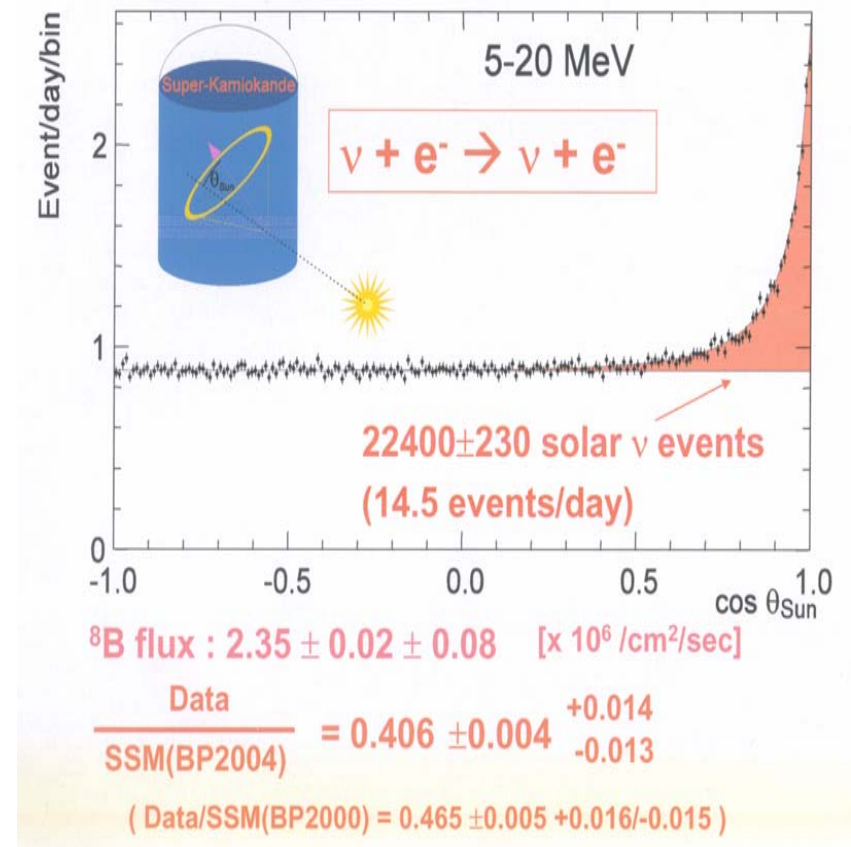


Les neutrinos solaires

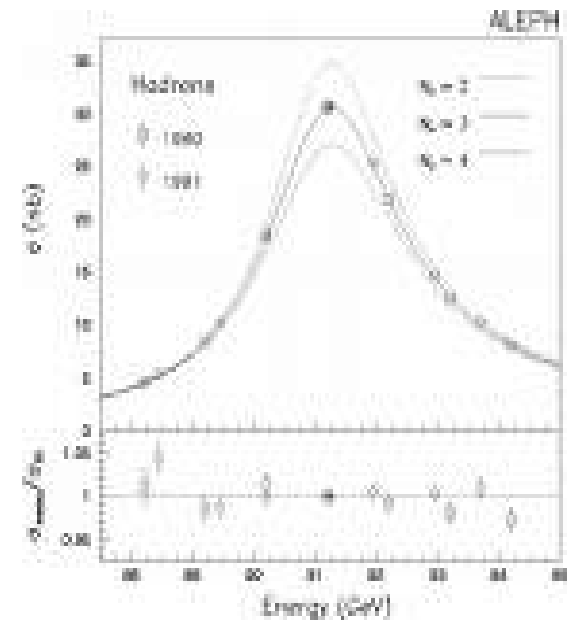
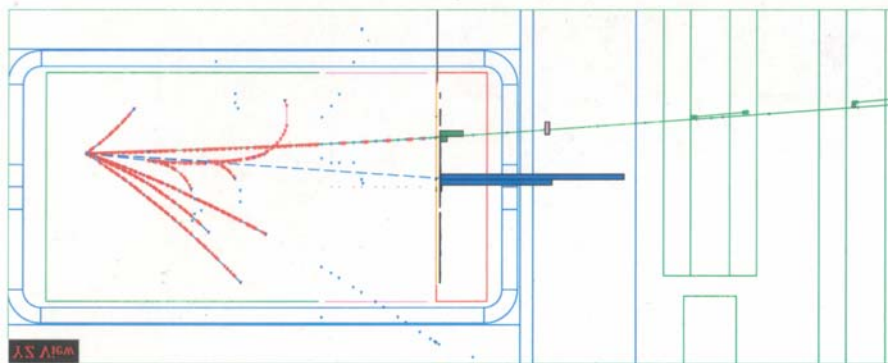
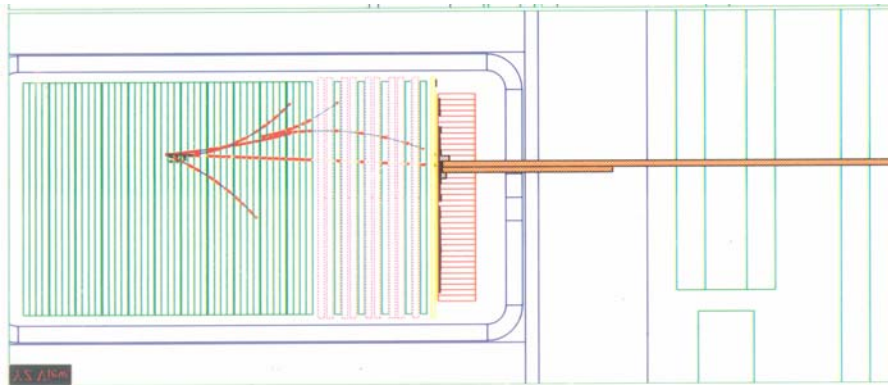
- Ils proviennent principalement de la réaction de fusion: $4p \Rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 27 \text{ MeV}$.
- Connaissant la luminosité du soleil, on en déduit le flux de 60 milliards/cm²/s qui arrivent à la surface de la terre.
- Les neutrinos de la chaîne principale ont une énergie limitée à 430 keV, mais des neutrinos jusqu'à 15 MeV sont produits par des processus secondaires.

Détection dans SuperK

- En 1500 jours, SuperK détecte 22000 événements quand 48000 étaient prédits.
- C'est le problème du déficit des neutrinos solaires d'abord mis en évidence par Homestake puis confirmé par Gallex.

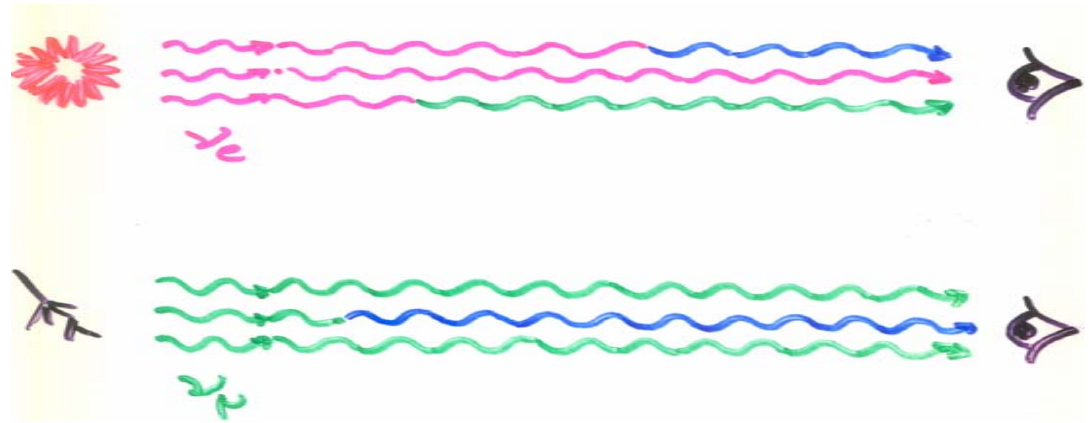


Les trois neutrinos



Oscillations?

- Le déficit peut s'expliquer par le changement spontané des ν_e du soleil pendant leur propagation en neutrinos d'autres types ν_μ ou ν_τ puisque les premiers détecteurs ne voient que les ν_e .



$$P = \sin^2 2\theta \sin^2(\pi R/\Lambda)$$

$$\Lambda = 2,5 E \text{ (GeV)} / \delta m^2 \text{ (eV}^2\text{)}$$

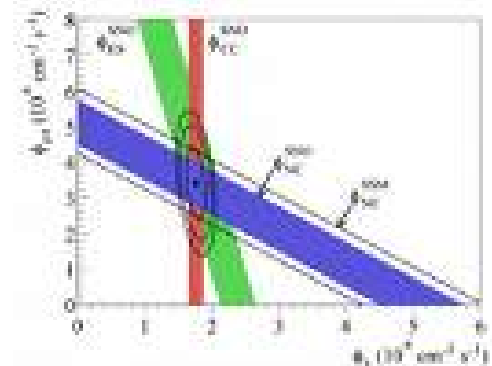
$$\delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$$

L'expérience SNO

- La cible consiste en 1000 tonnes d'eau lourde D_2O .
- SNO mesure séparément le flux de ν_e , et le flux de l'ensemble des types.



- Accord entre flux total et la prédiction, les ν_e ne représentent que 1/3 du total

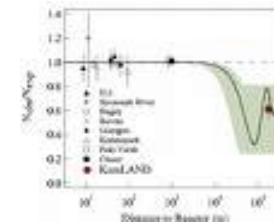
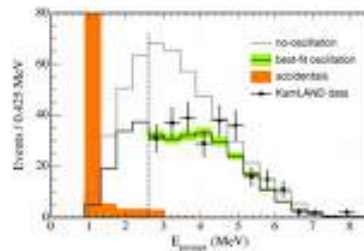
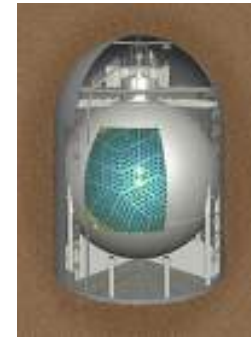


La confirmation par Kamland

Neutrinos des réacteurs japonais (et coréens)

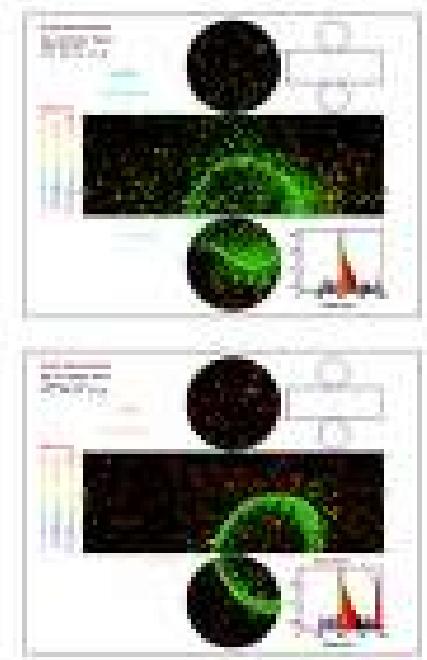
Distance moyenne 180 km

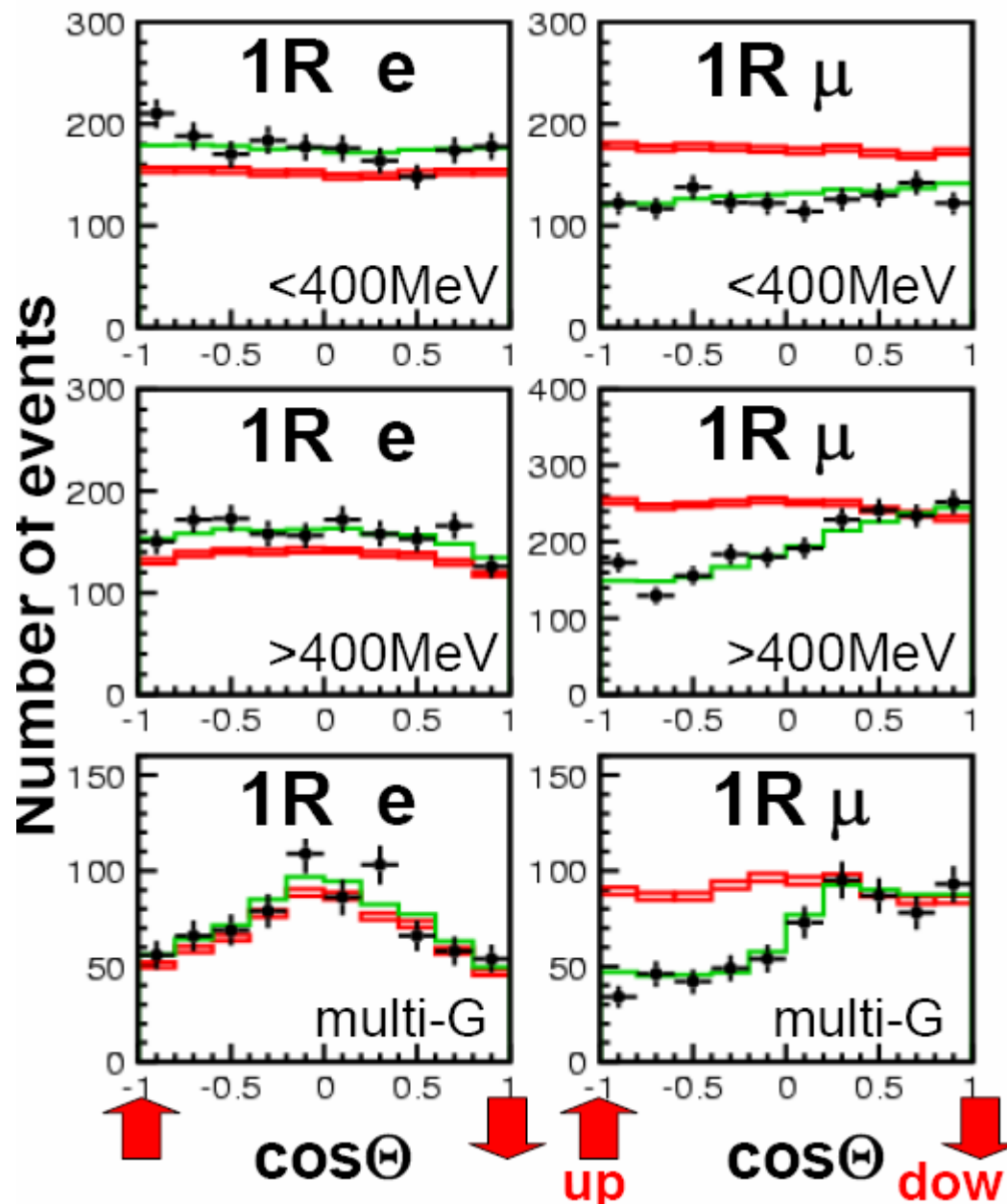
Des neutrinos terrestres oscillent

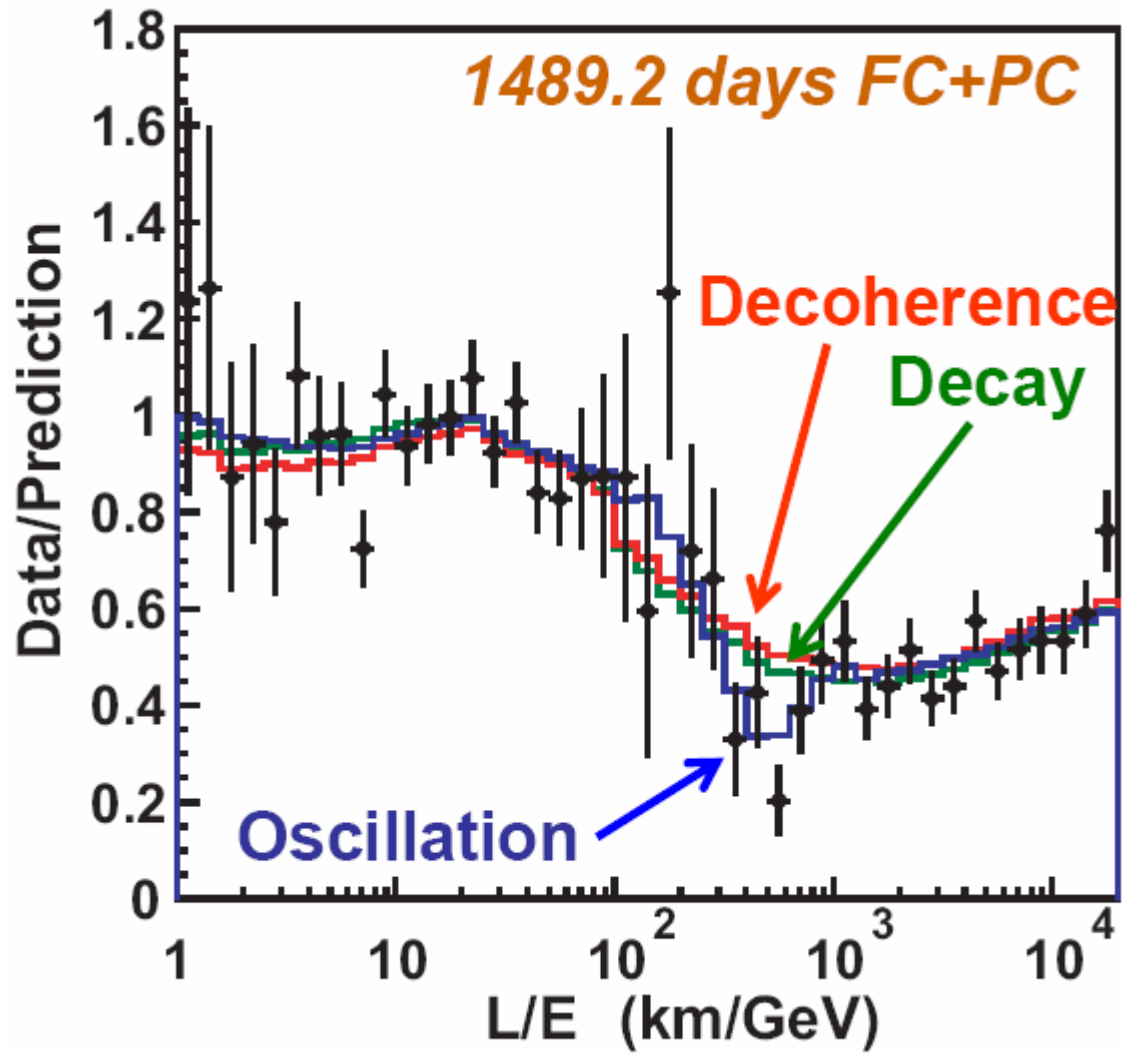


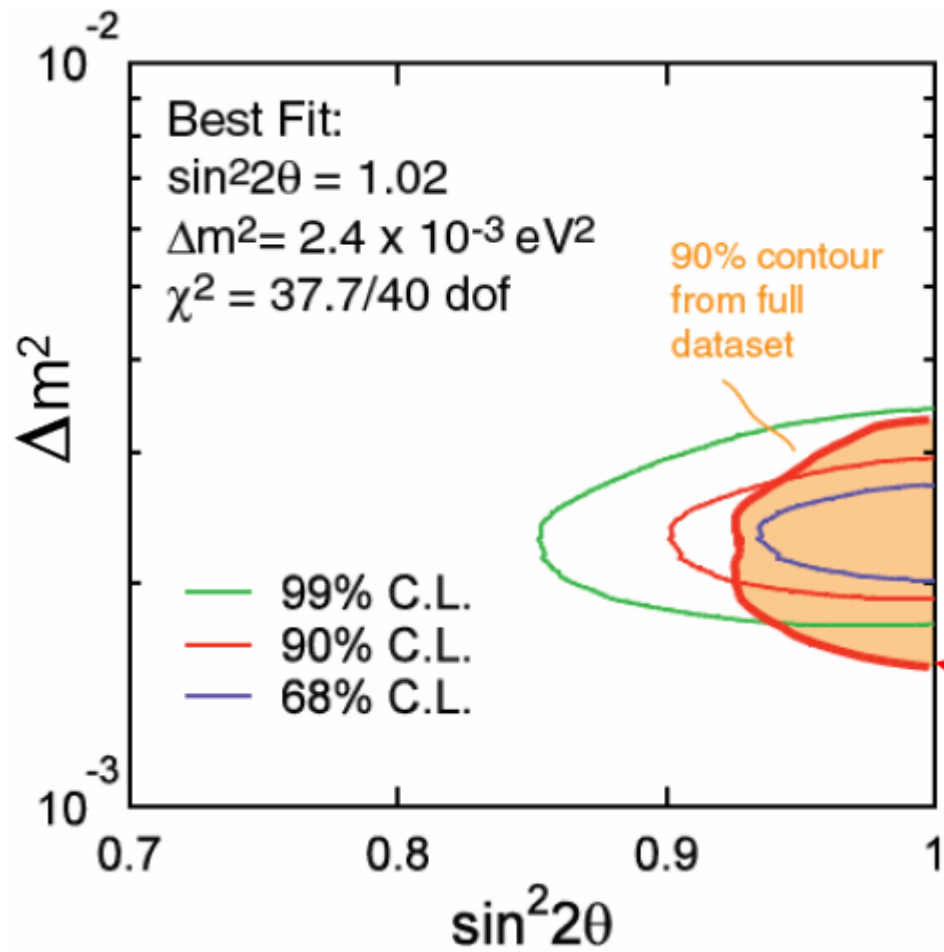
Les neutrinos atmosphériques

- Nouvelle indication d'oscillations.
- À la source 2 ν_μ pour 1 ν_e venant de tous les horizons. Énergies, quelques 100 MeV.
- SuperK distingue e et μ
- La distribution azimutale des ν_μ montre un déficit pour les neutrinos ayant traversé la terre, ceux ayant parcouru des milliers de km avant détection.

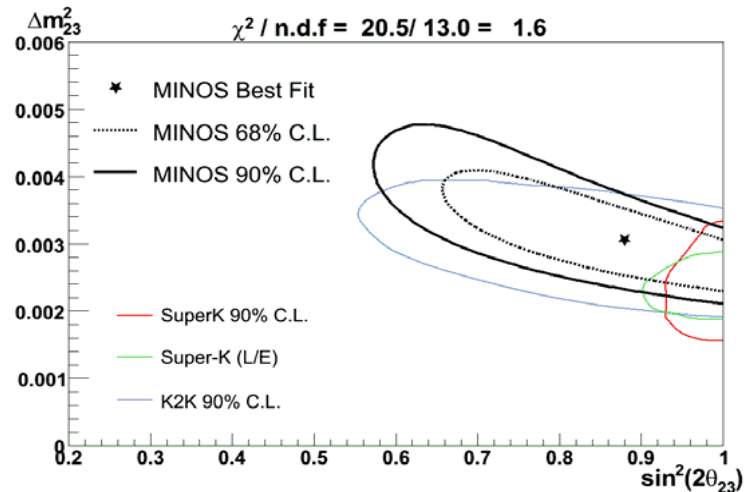
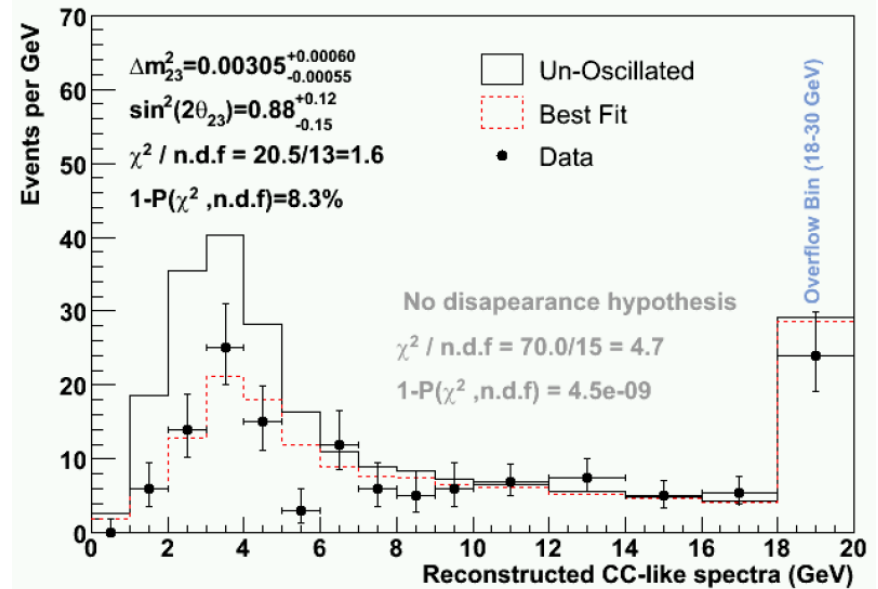








Confirmation de Minos



Importance des oscillations

- Les oscillations ne sont possibles qu'entre neutrinos massifs.
- Mais les oscillations ne fixent qu'une différence de masses carrées.
- Les résultats de neutrinos solaires (confirmés par KamLand) donnent:
 $\delta m^2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$.
- Les neutrinos atmosphériques (confirmés par Minos) donnent:
 $\delta m^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$.
- *Le modèle standard minimum des particules supposait des neutrinos sans masse, la découverte des oscillations demande donc d'aller au-delà.*

La masse des neutrinos

- Dans le scénario le plus simple (hiérarchique) de masses, on obtient:
 - $m(\nu_\tau) \sim 50 \text{ meV}$
 - $m(\nu_\mu) \sim 9 \text{ meV}$
 - avec un ν_e de masse plus petite.
- *Le plus pesant des neutrinos aurait une masse 2 milliards de fois plus faible que celle du proton. Le modèle du Big Bang prédit environ 3 milliards de fois plus de neutrinos que de hadrons. Ainsi la masse totale des neutrinos serait de l'ordre de la masse totale de toutes les étoiles.*

Le futur proche

- Affinement des mesures auprès d'accélérateurs. Minos à Fermilab et Opéra qui observe un faisceau produit au Cern, à 730 km de distance (Gran Sasso)
- Mesure du dernier angle de mélange θ_{13}
 - DoubleChooz, Daya Bay, T2K
- Recherche de la violation de CP. Leptogenèse.

L'astronomie des neutrinos

- La carte du ciel en émetteurs de neutrinos est encore très pauvre: le soleil et, pendant 10 s de février 1987, une supernova.
- Les prédictions ne sont pas contraignantes, on espère une émission par explosion de supernovae, par l'activité de centres de galaxies (AGN). Des modèles spéculatifs prédisent d'autres contributions.
- Une contribution presque certaine provient de l'effet GZK d'interactions de protons primaires avec le fond cosmologique qui donnent des pions et donc des neutrinos par désintégration.
- Pour progresser, il faut construire des détecteurs 10000 fois plus massifs que SuperK.
- Ceci n'est possible qu'en instrumentant un milieu naturel: glace de l'Antarctique ou eau de la mer.

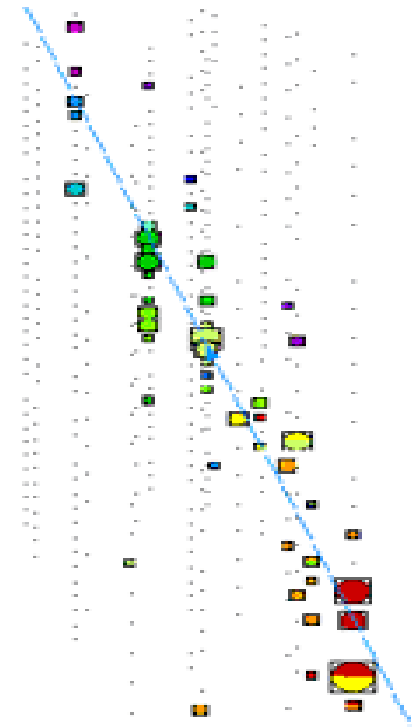
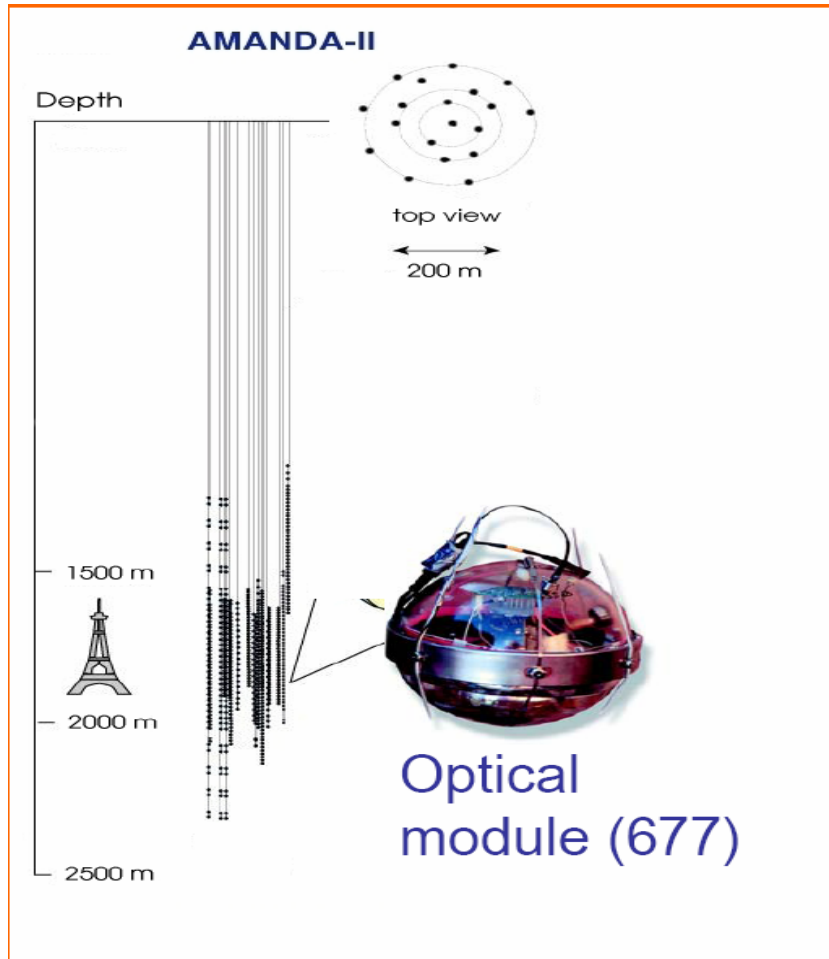
La détection des neutrinos VHE

- La section efficace d'interaction croît avec l'énergie quoique non linéairement.
- L'oscillation permet de penser que les 3 types de neutrinos arrivent en égal flux.
- *Les μ ou τ produits peuvent traverser une grande quantité de matière: des km pour les μ dans la terre, jusqu'à 30 km pour les τ qui sont moins affectés par le bremsstrahlung.*

Au Pole Sud

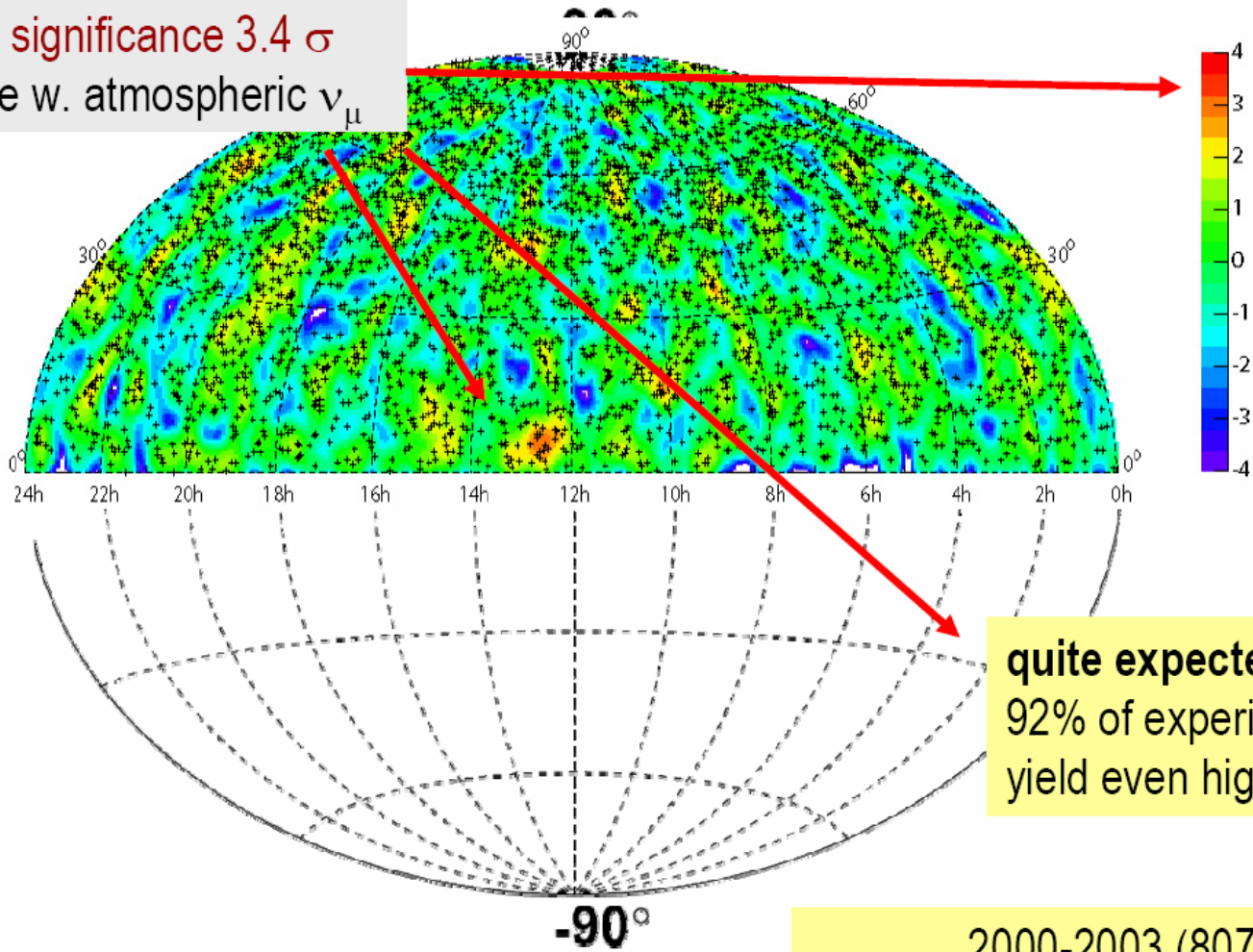
- Des câbles portant des photomultiplicateurs sont descendus dans des trous profonds creusés dans la glace.
- La technique est à nouveau fondée sur la lumière Cerenkov produite par les muons traversant la glace.
- AmandaB a déjà donné des résultats en neutrinos atmosphériques avec un volume instrumenté de 500 m de haut et 100 m de section.
- Un détecteur de 1 km³ est en construction.(à moitié complet)
- *Un tel dispositif observe l'hémisphère nord car les muons cosmiques descendant sont trop nombreux et empêchent la détection 4π .*

Amanda



Maximum significance 3.4σ
compatible w. atmospheric ν_{μ}

Preliminary



quite expected ...
92% of experiments would
yield even higher maximum

cluster search radius
between $2.25^\circ - 3.75^\circ$ w.r.t.
the declination

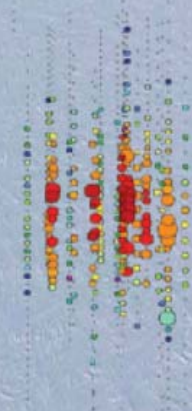
2000-2003 (807 days)
3329 μ from northern hemisphere
3438 μ expected from atmospheric ν_{μ}

New South Pole Station

First IceCube string

IceCube Laboratory

1400m
2400m



1500 m

AMANDA

2000 m
[not to scale]

ANTARES

- Antarès utilise l'eau de la Méditerranée comme cible. L'eau a l'avantage de permettre une meilleure résolution angulaire.
- Des filins ancrés à 2,5 km au fond de la mer portent 30 niveaux de 3 PM espacés de 15m.
- Une surface couverte de 100 m par 100 m est opérationnelle (6 filins).
- *Complémentarité: Situé au nord, Antarès pourra observer l'hémisphère sud.*

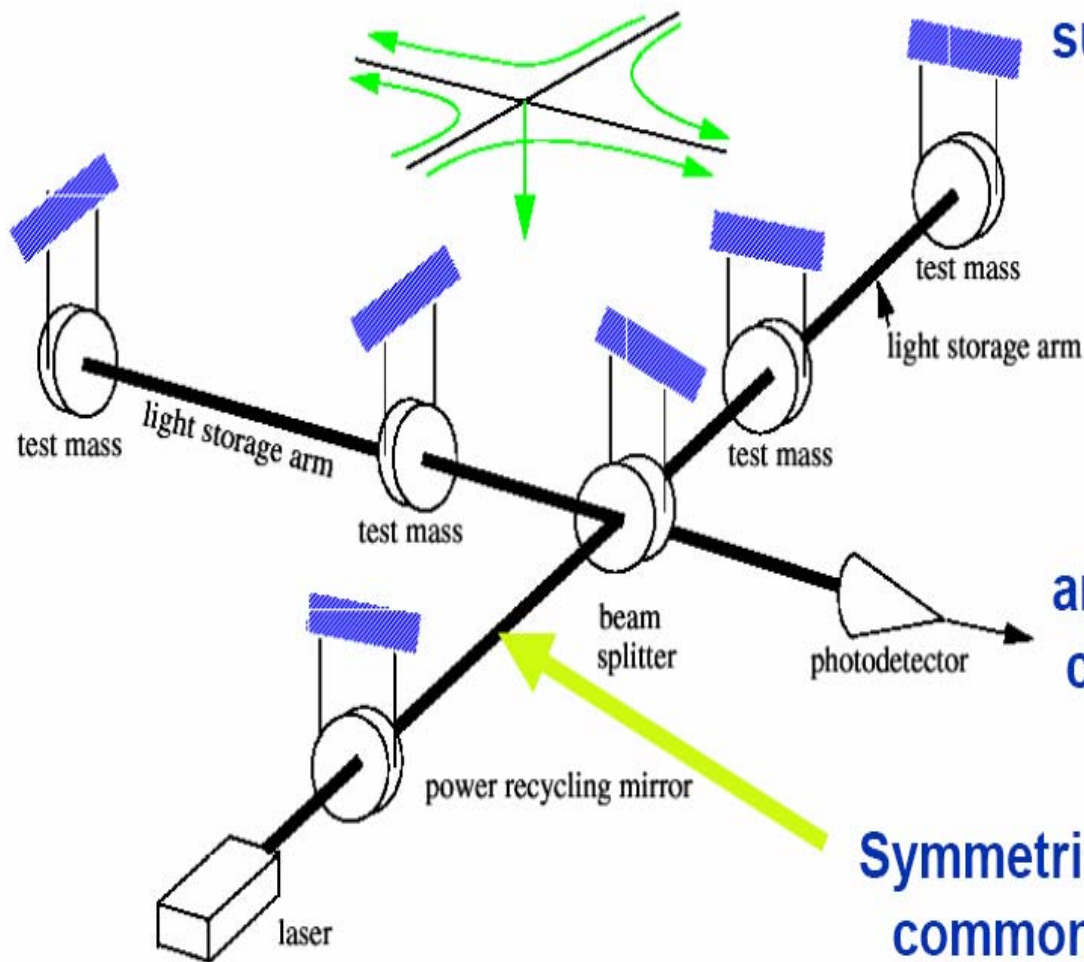
LIMITATIONS

- Grands volumes, mais encore statistique limitée.
- Détection efficace des muons et taus de haute énergie et information angulaire assez bonne.
- Mais la terre est opaque au-dessus de 10^{14} eV.
- Auger ou EUSO permettent de chercher des neutrinos rasant, à partir de 10^{17} eV et 10^{19} eV.
- D'autres techniques sont à l'étude: ondes radio ou sonores.
- *Ondes radio déjà tenté: Rice au Pole Sud, observation de la lune. A venir, Anita, Codalema*

Les Ondes Gravitationnelles

Observation très différente d'événements astrophysiques.

- À l'arrivée sur terre, déformation de l'espace-temps qui résulte en une variation des longueurs, différentes dans 2 directions orthogonales.
- Détection basée sur l'utilisation d'un interféromètre, dispositif optique très sensible dans lequel on suit la frange noire d'une interférence entre deux faisceaux provenant de la même source.
- Le but est de détecter une variation de longueur de 10^{-21} , pratiquement 10^{-18} m pour une longueur de 3 ou 4 km.



suspended mirrors mark inertial frames

$$x/L = \lambda/Lb\sqrt{N\tau}$$

$$\lambda = 10^{-6} \text{ m}$$

b passages ~100

N quanta/s 300W $10^{21}\gamma/s$

τ temps d'intégration 10^{-2} s

antisymmetric port carries GW signal

Symmetric port carries common-mode info

VIRGO

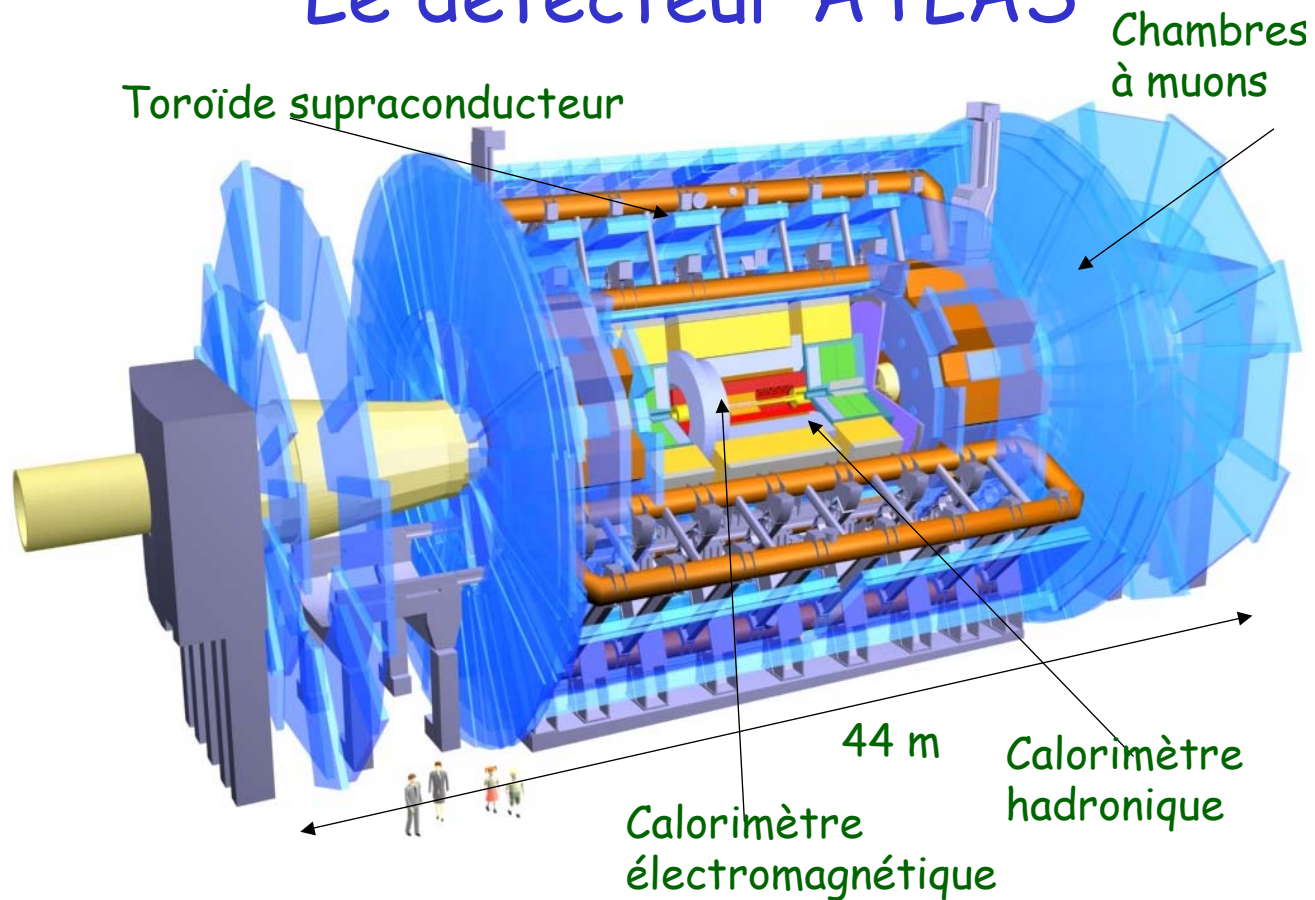
Interféromètre franco-italien construit près de Pise

- Deux bras de 3 km contiennent 300W soit 10^{21} photons d'un laser recyclé de 1000 nm.
- Toutes les techniques utilisées poussées à l'extrême: vide sur de très grands volumes, planéité des miroirs au nm, bruits sismiques amortis.
- L'observation débute



La masse noire !

Le détecteur ATLAS





A quoi ça sert, tout ça?

- « Ces petites lumières, madame, sont de grands soleils, mais si éloignés de nous qu'ils ne paraissent pas plus gros qu'une tête d'épingle, pontifie le droguiste.
- Eh bien, vrai !
 - Et il y en a qui sont si loin qu'on ne les voit pas, ajoute l'adjudant.
 - Alors, comment qu'on sait qu'i z'existent ? demande Mme Dominique.
 - On les voit avec des lunettes et plus les lunettes sont grosses, plus on en voit. Les astronomes en comptent comme ça des millions et des millions, répond monsieur Pic très documenté sur cette question par l'abbé Morue.
 - C'est beau, la science ! s'exclame Suzy.
 - Moi, j'veux être astronome ! s'écrie Clovis, pris d'un enthousiasme subit.
 - Ça doit pas être un métier qu'enrichit son homme, pense à haute voix Dominique.
 - Autrefois, dit Mme Pic, qui avait réussi à se taire dix minutes, on ne comptait pas toutes ces étoiles et on vivait plus heureux.
 - Ça n'a pas de rapport, déclare Peter.
 - Oui, à quoi ça sert l'astronomie ? interroge Mme Cloche, s'engageant sur une nouvelle piste.
 - Ça sert absolument à rien » lui répond Saturnin.

R. Queneau Le chiendent

CONCLUSION

