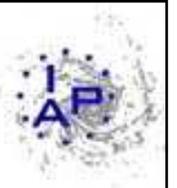


Éléments d' *astroparticules*

Martin Lemoine

Institut d'Astrophysique de Paris



▶ Deux objectifs principaux de l'astrophysique des particules :

- utiliser l'Univers comme un laboratoire de physique sub-atomique
- utiliser des techniques de physique des particules pour observer l'Univers extrême

▶ Plan :

1. Quelques aspects historiques / l'Univers comme laboratoire de l'infiniment petit :

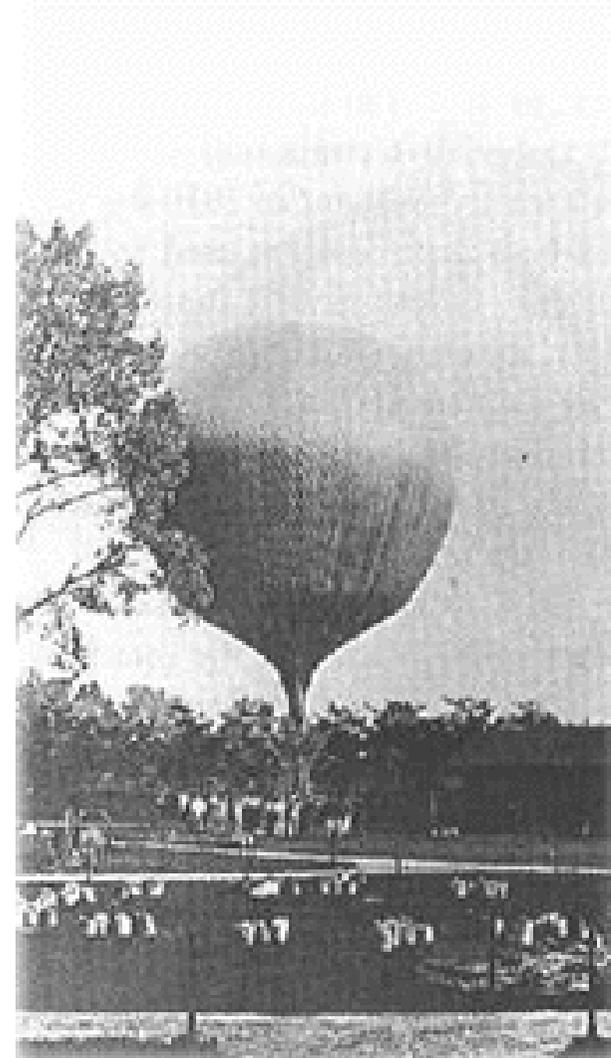
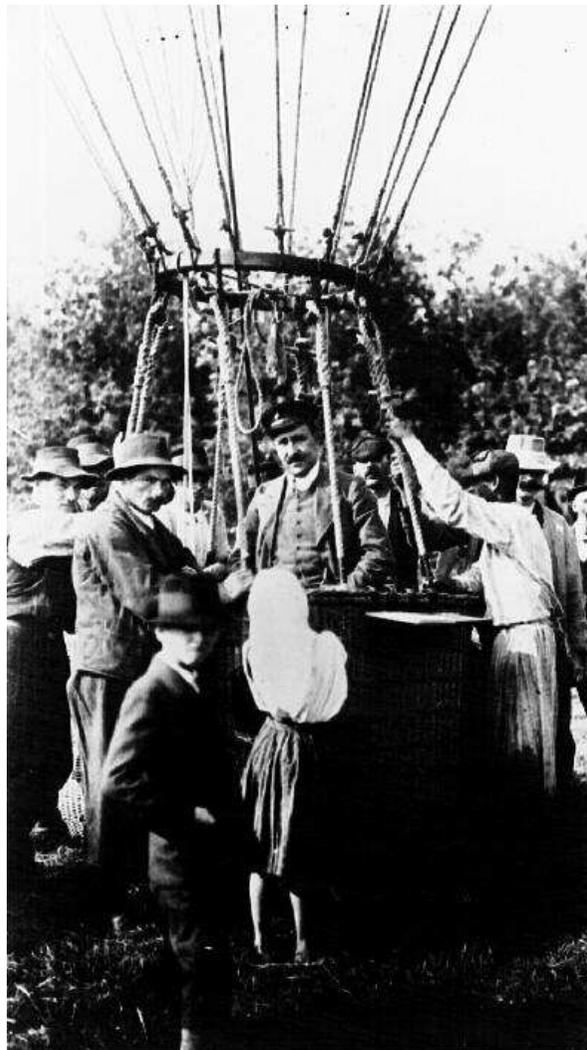
- rayonnement cosmique et particules élémentaires
- rayons cosmiques de très haute énergie
- physique de la matière noire
- physique des neutrinos
- cosmologie théorique (Univers primordial)

2. Astronomie de l'Univers extrême :

- rayons cosmiques de haute énergie
- photons de haute énergie
- neutrinos de haute énergie
- ondes gravitationnelles

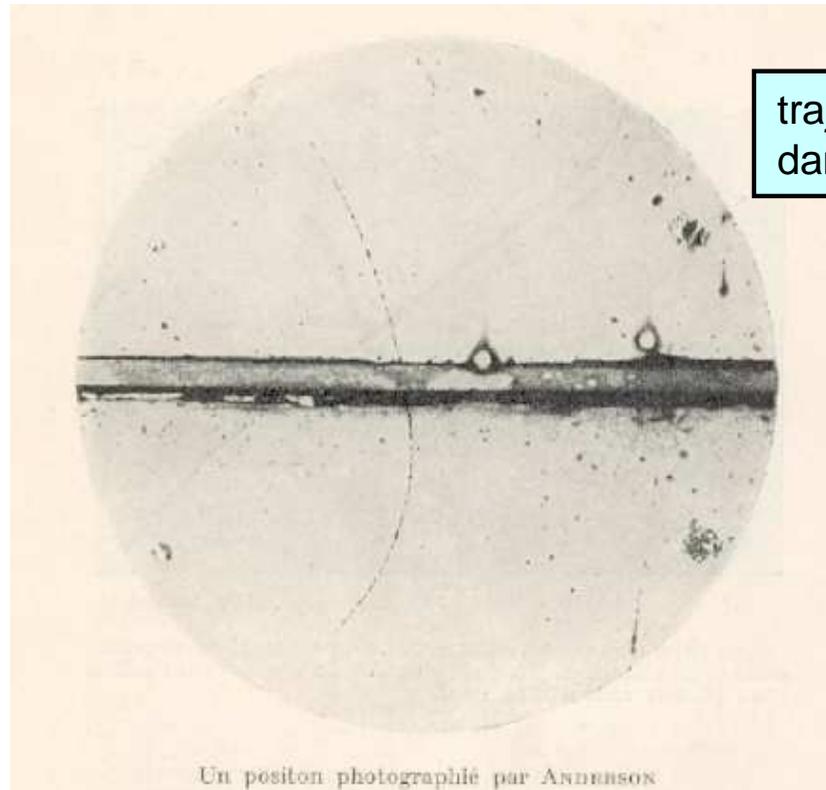
► Premiers pas de l'astrophysique des particules:

l'origine extra-terrestre du rayonnement (cosmique) est démontrée par les mesures d'intensité en fonction de l'altitude de V. Hess (1912) :



► Découverte du positron (C. Anderson 1932) :

- jusqu'à la fin des années ~40, les physiciens ne disposent pas d'accélérateurs de particules suffisamment puissants : le rayonnement cosmique fournit le faisceau qui permet de découvrir les premières particules.



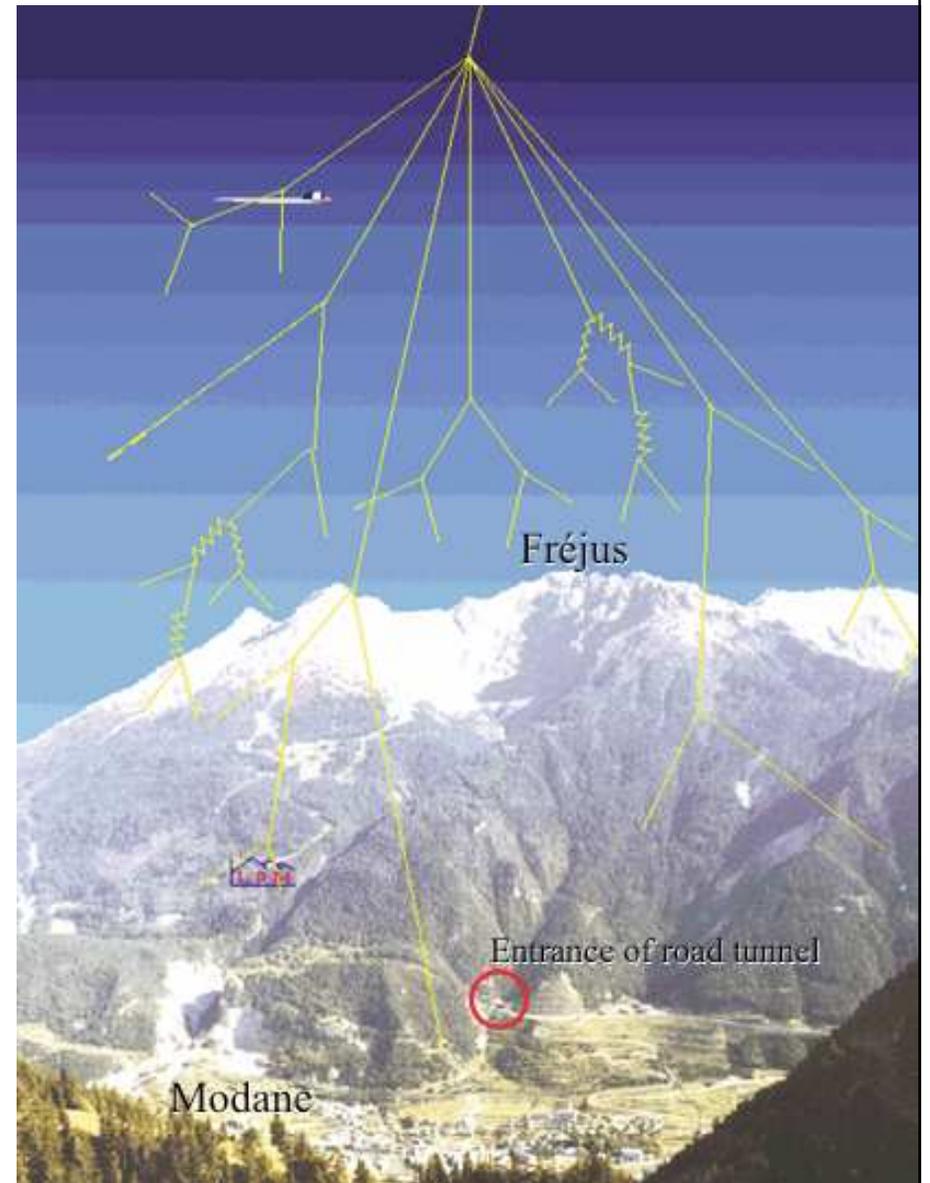
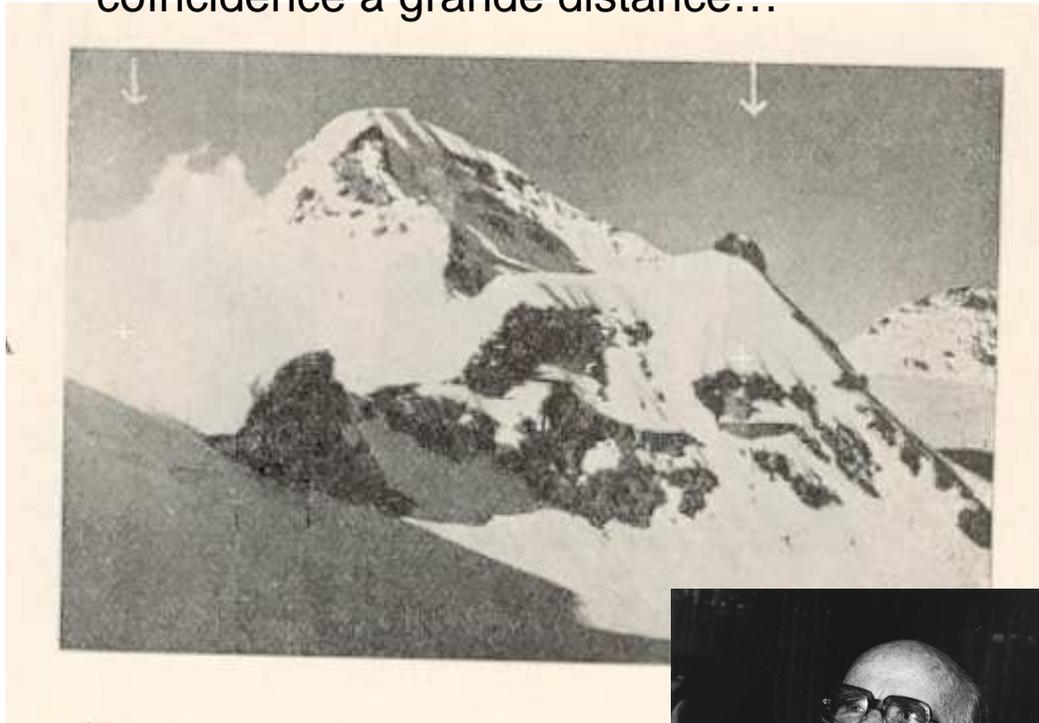
trajectoire de positron
dans une chambre à goutelettes

Un positon photographié par ANDERSON

- autres particules découvertes: muon (1936), pion (1947)
⇒ **l'Univers devient un laboratoire de physique sub-atomique**

► Grandes gerbes atmosphériques (P. Auger 1938) :

- Pierre Auger découvre les grandes gerbes atmosphériques grâce à des expériences de coïncidence à grande distance...

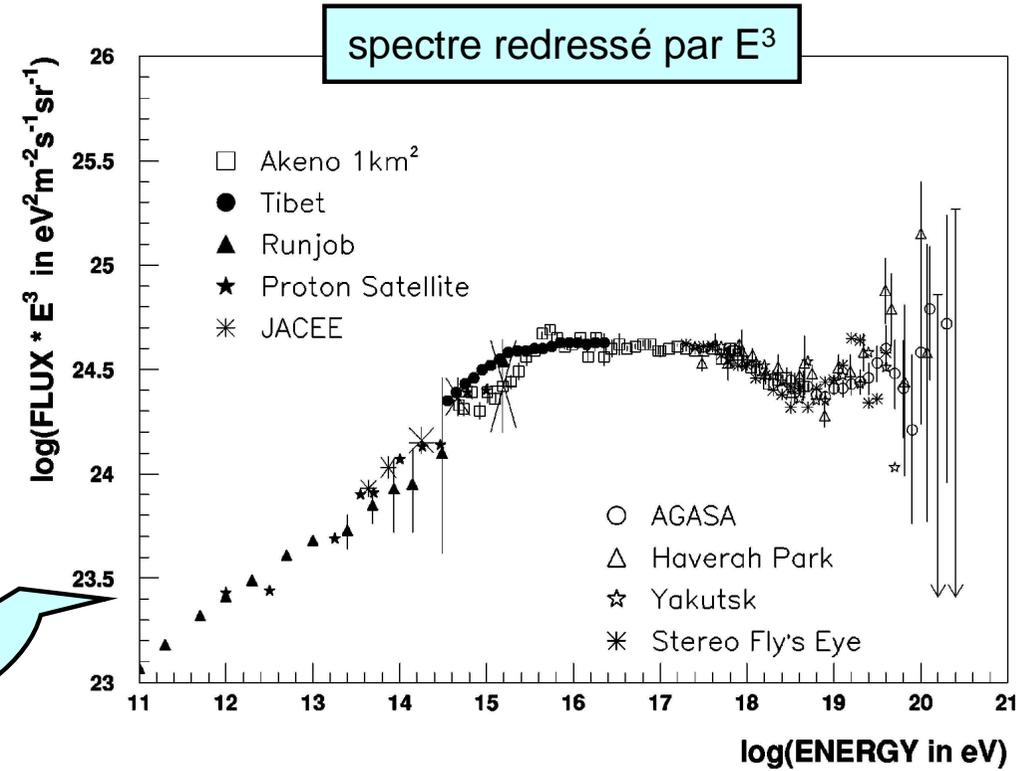
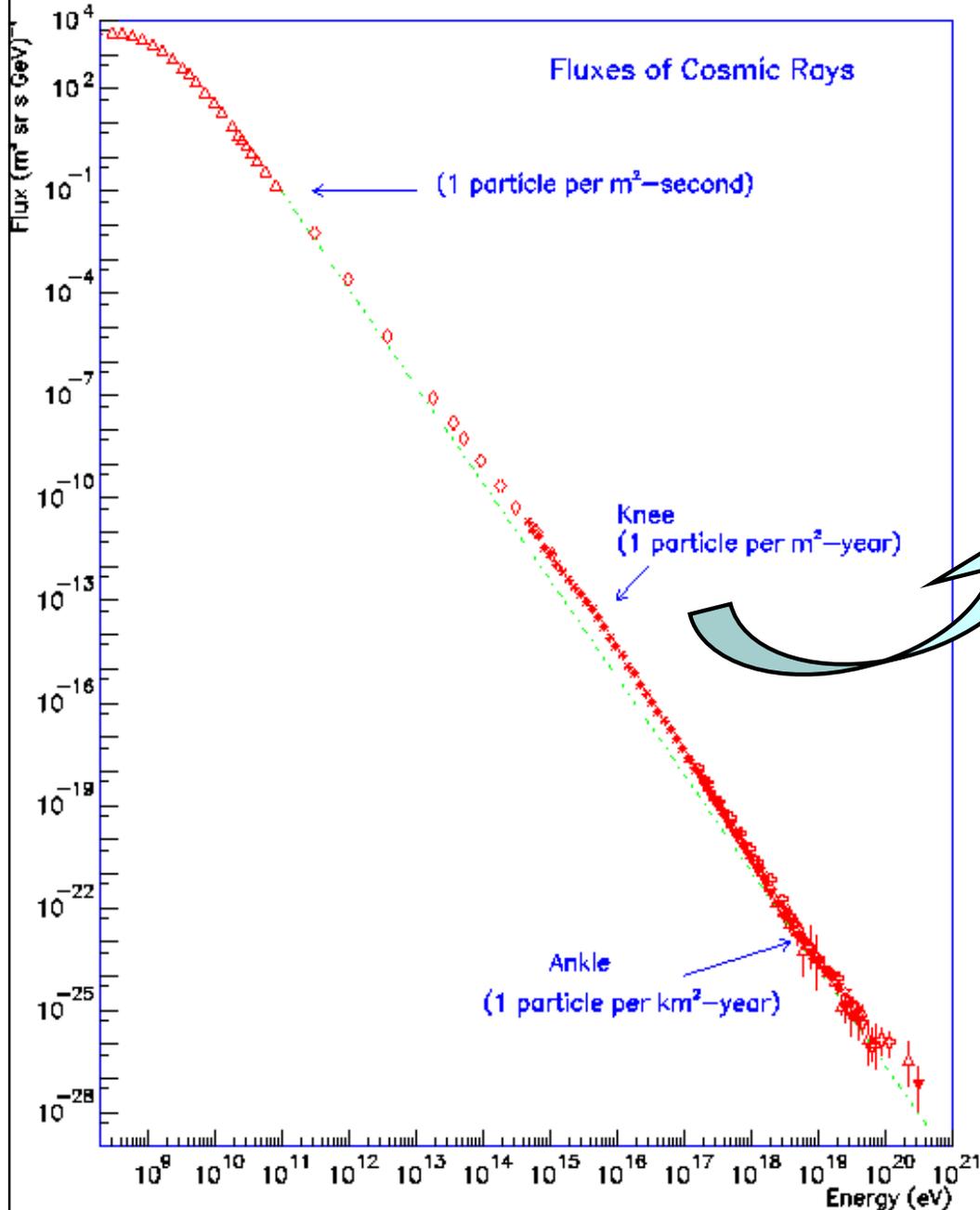


- la mesure et le comptage des énergies des particules recueillies indiquent que la particule primaire avait pour énergie : $E > 10^{15}$ eV !

Specre du rayonnement cosmique



► Specre actuel :



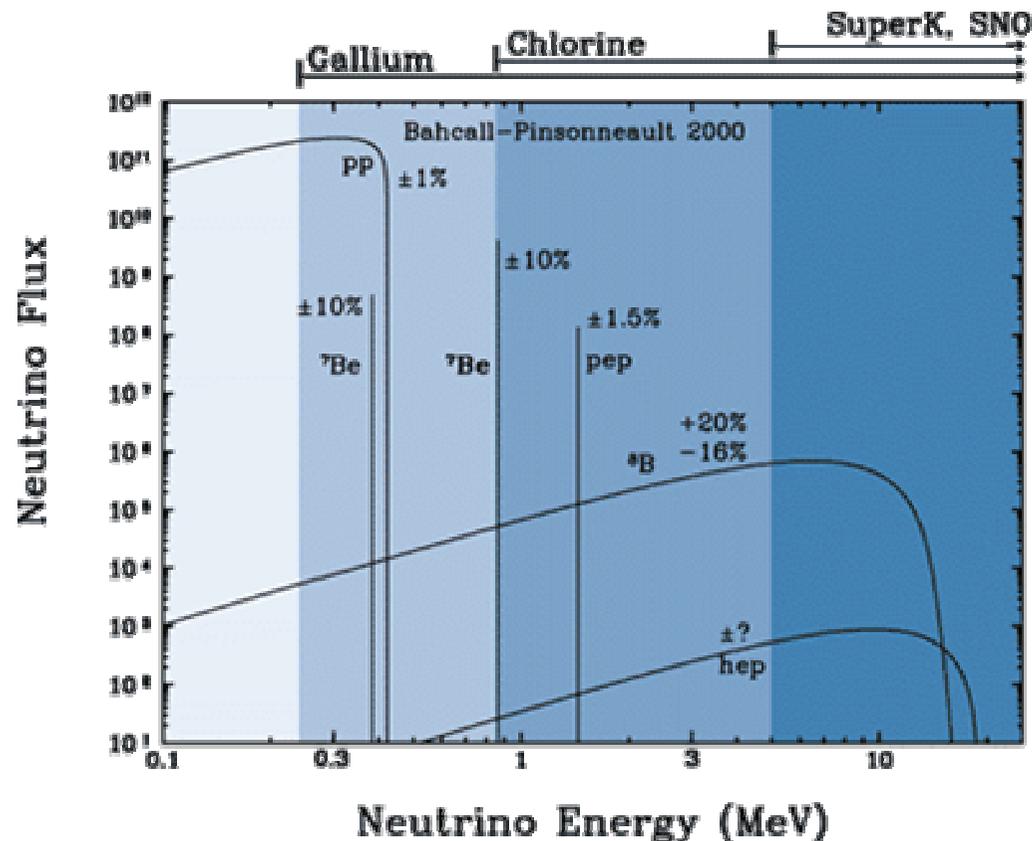
► Questions sur la nature et l'origine du RC:

- **quelles particules ?**
- **quelle(s) source(s) ?**
- **quel(s) mécanisme(s) d'accélération ?**

► Premières expériences de détection des neutrinos

... l'observation de neutrinos produits dans le cycle pp permet d'imager le cœur du Soleil ...

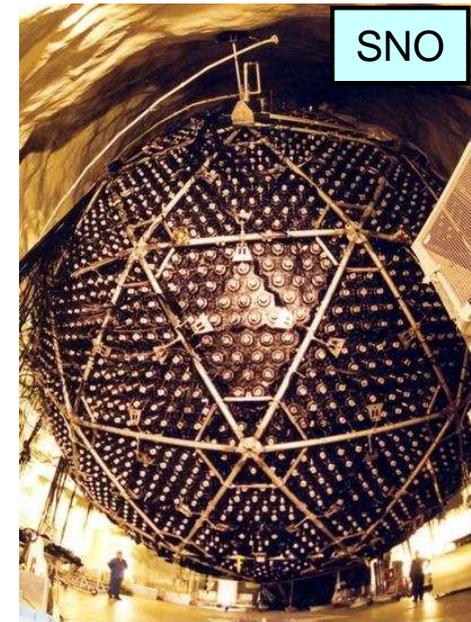
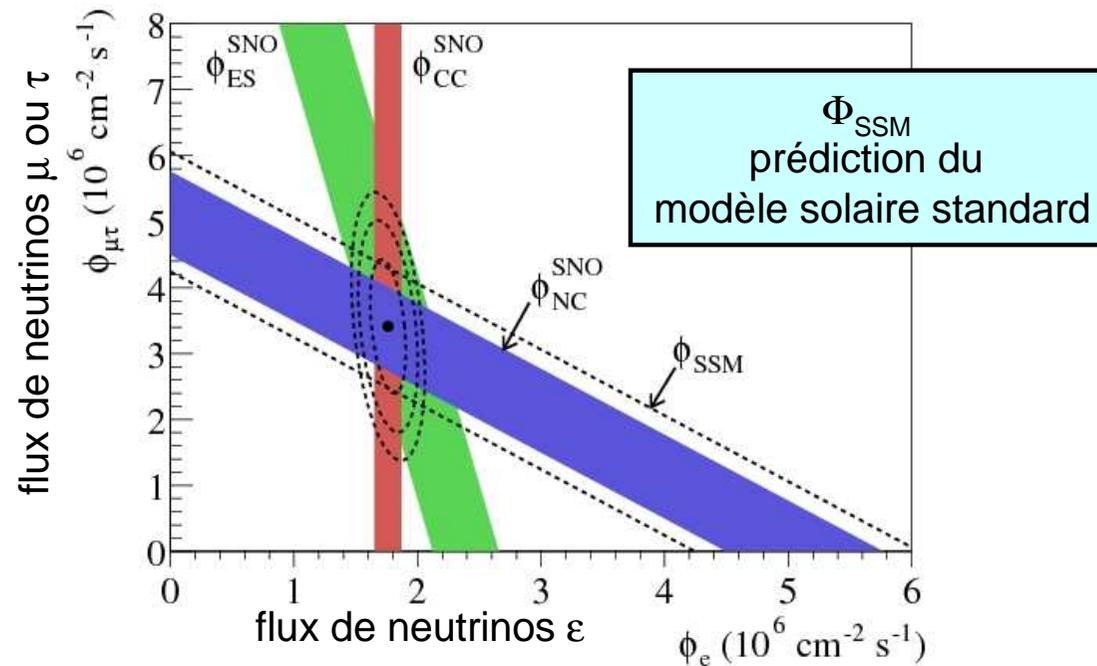
- Les premières expériences de R. Davis indiquent un déficit par rapport au signal attendu!



- quelle est l'origine de ce déficit :
 - difficulté de la mesure ?
 - erreur du modèle de structure solaire ?
 - erreur dans les sections efficaces ?
 - nouvelle physique dans le secteur des neutrinos ?

► Interprétation récente:

- **Toutes les expériences de détection de neutrinos confirment le déficit**
- SuperKamiokande (fin 90s) suggère l'existence de nouvelle physique : **oscillation entre neutrinos de saveurs différentes**
- Sudbury Neutrino Observatory (2001) confirme l'oscillation de neutrino $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$



- Résultat confirmé par KAMLand (expérience réacteur)

► Implications : **les neutrinos ont une masse, ils oscillent d'une espèce à l'autre !**

$$\Delta m_{12}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 / c^2$$

$$\theta_{12} = 32^\circ$$

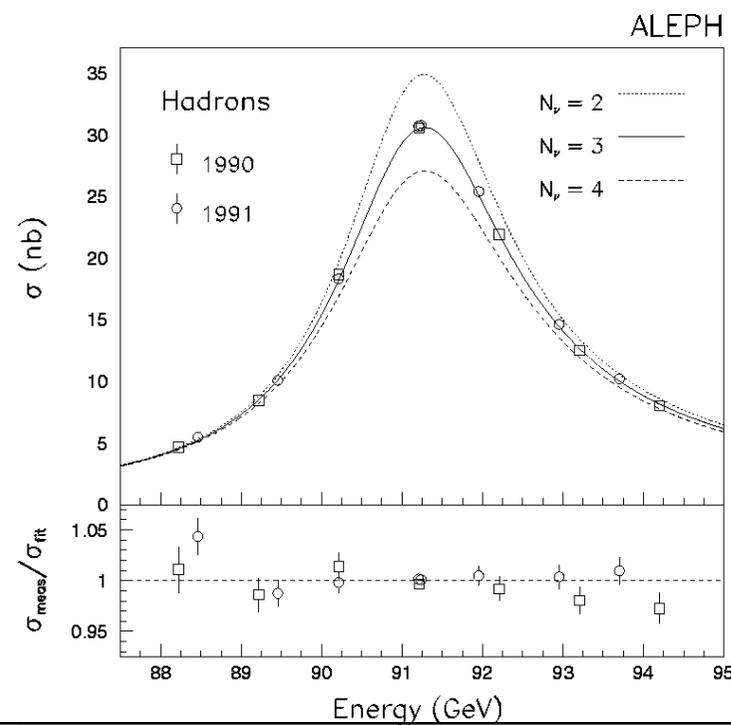
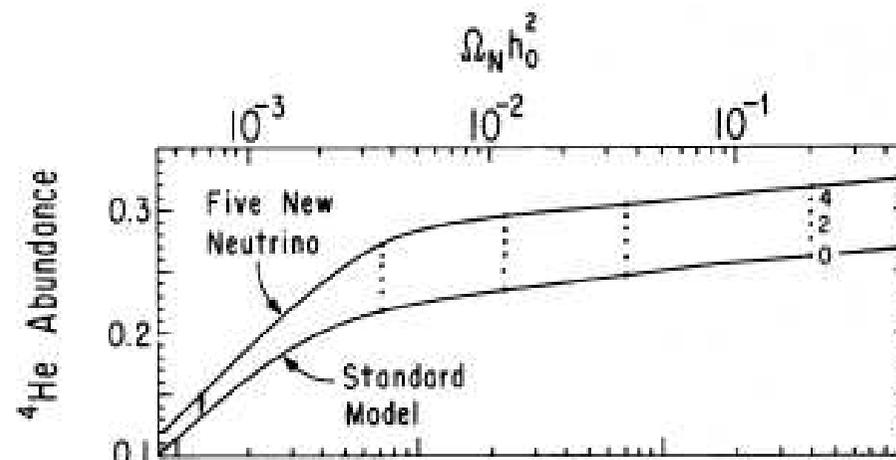
► Mesure du nombre de neutrinos à l'aide de contraintes cosmologiques:

- La comparaison des abondances primordiales des éléments légers aux prédictions du modèle de la nucléosynthèse primordiale permet de **mesurer le nombre de famille de neutrinos !**

Steigman, Schramm & Gunn 74
 Yang, Olive, Schramm, Steigman 79 :

$$\Omega_b h^2 = 0.02 \text{ et } Y_{\text{He4}} \simeq 0.25 \Rightarrow 3 \text{ neutrinos !}$$

- Le nombre de famille de neutrinos a pu être mesuré au LEP en ... 1989 !





► Contraintes cosmologiques actuelles sur la masse des neutrinos:

- Il est possible de mesurer la masse des neutrinos par leur contribution à la densité d'énergie totale :

$$\Omega_\nu = \frac{\sum_i m_i}{92.5 \text{ eV}}$$



- l'étude de la formation des grandes structures permet d'améliorer cette limite : les neutrinos se comportent comme de la matière noire chaude

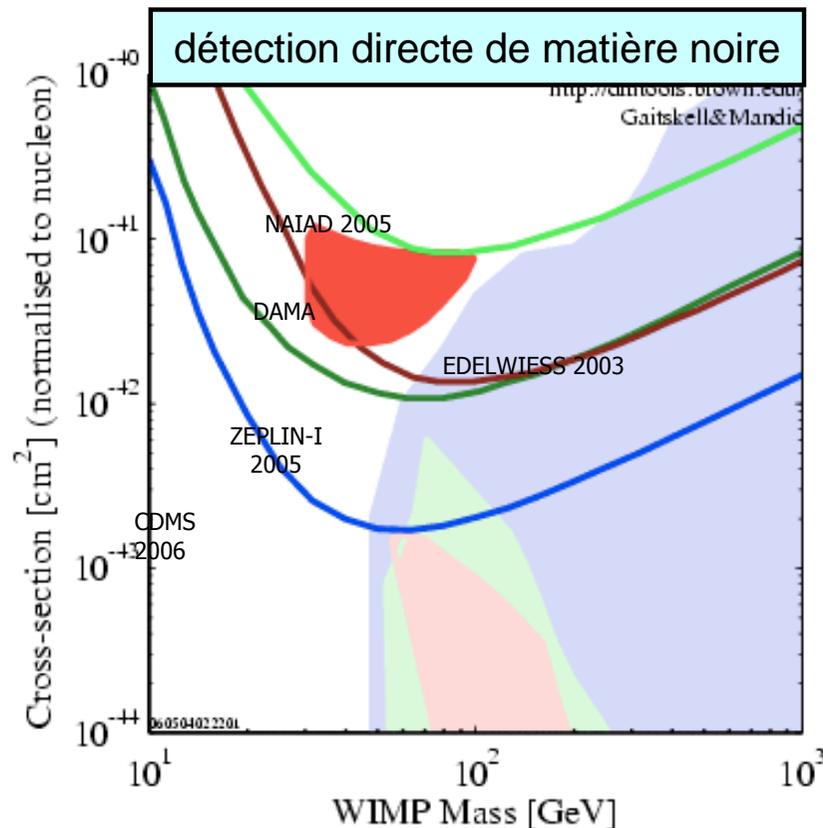
contraintes actuelles : $\sum_i m_i \leq 0.5 \text{ eV}$

(bien en deça des contraintes expérimentales terrestres !)

► Matière noire :

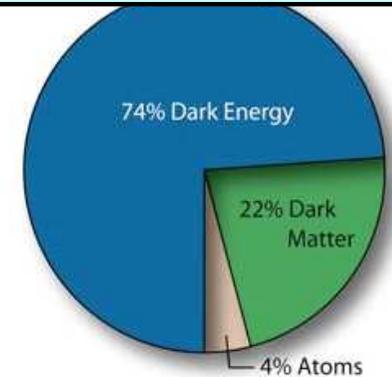
- La cosmologie observationnelle démontre l'existence de matière noire non baryonique :
 - mesures dynamiques : $\Omega_m \simeq 30\%$ (matière y compris noire et baryons)
 - nucléosynthèse primordiale : $\Omega_b \simeq 5\%$ (baryons seulement)

⇒ la matière noire est non-baryonique ! Quelle particule ?



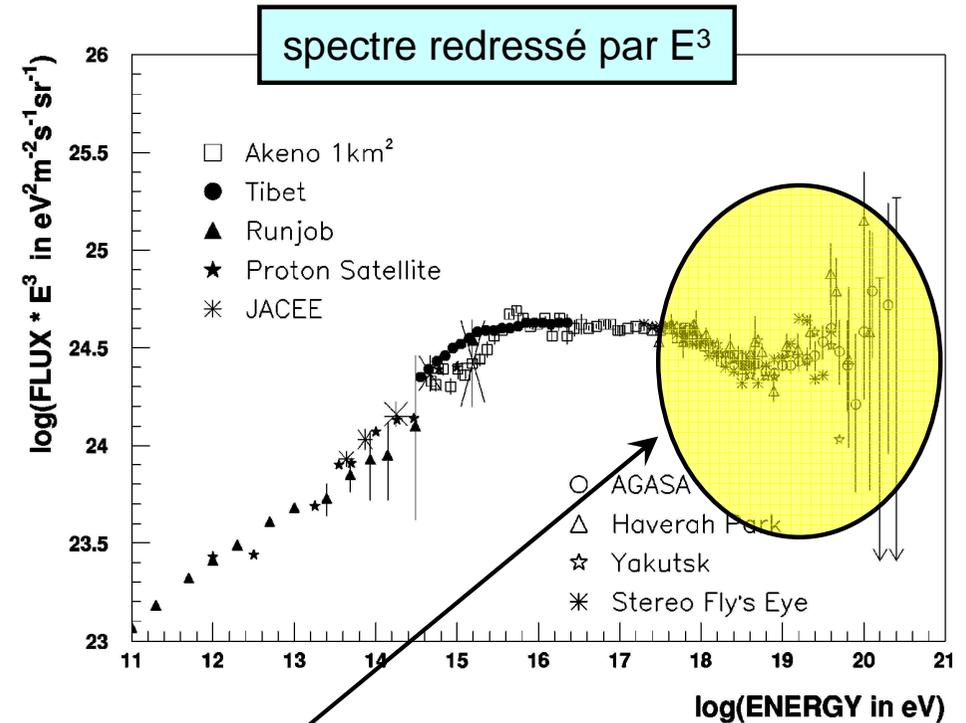
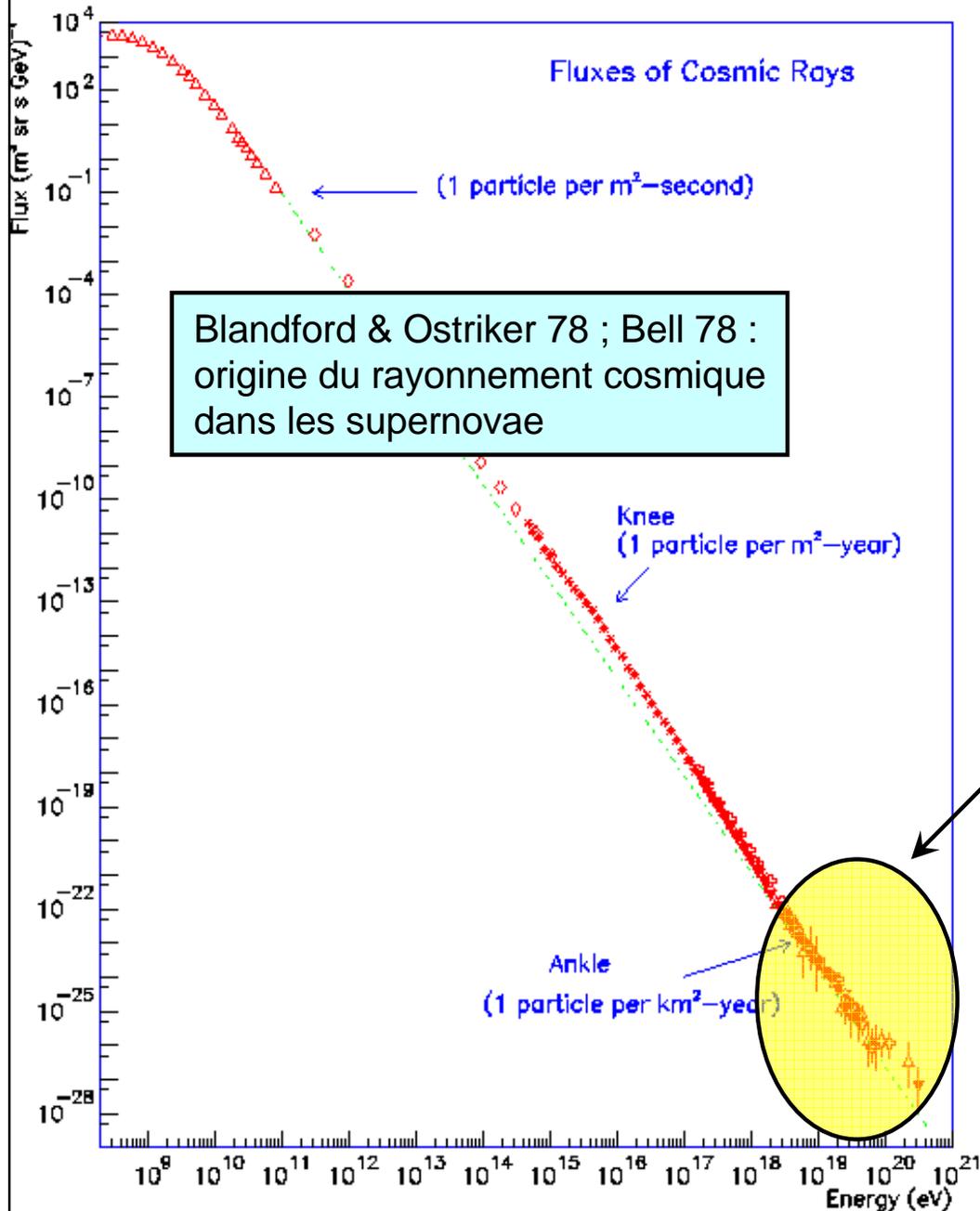
Edelweiss

camembert cosmique



2. Astrophysique de l'Univers extrême

... et toujours les mêmes questions !

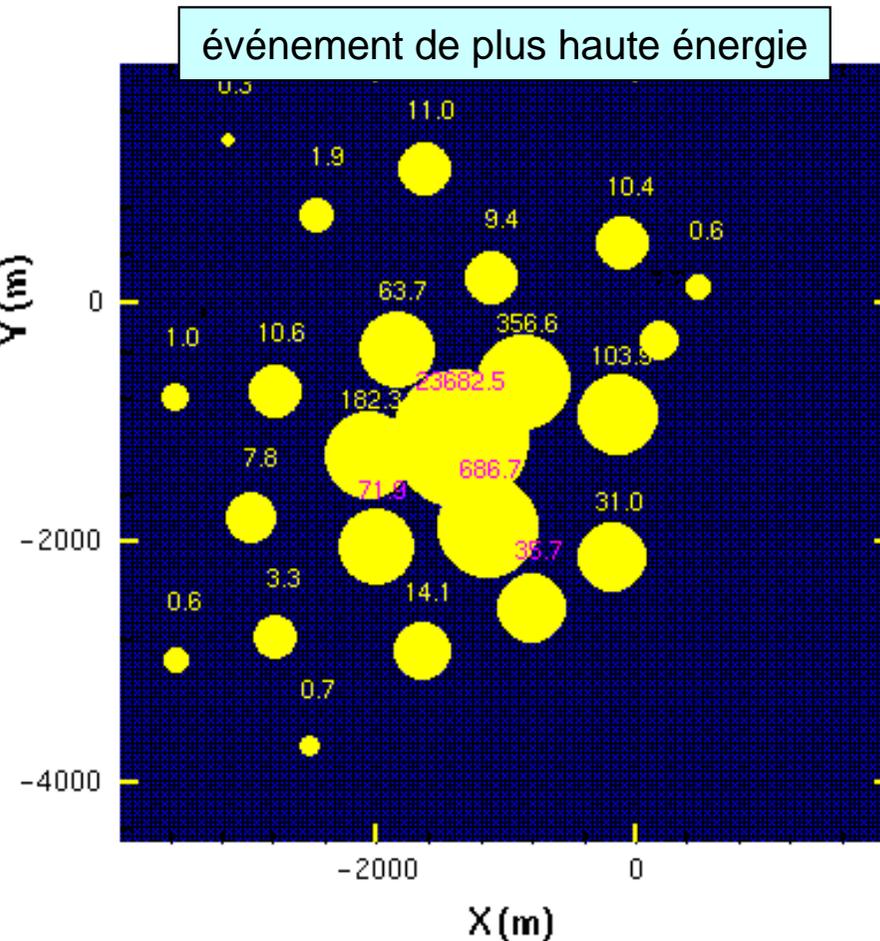
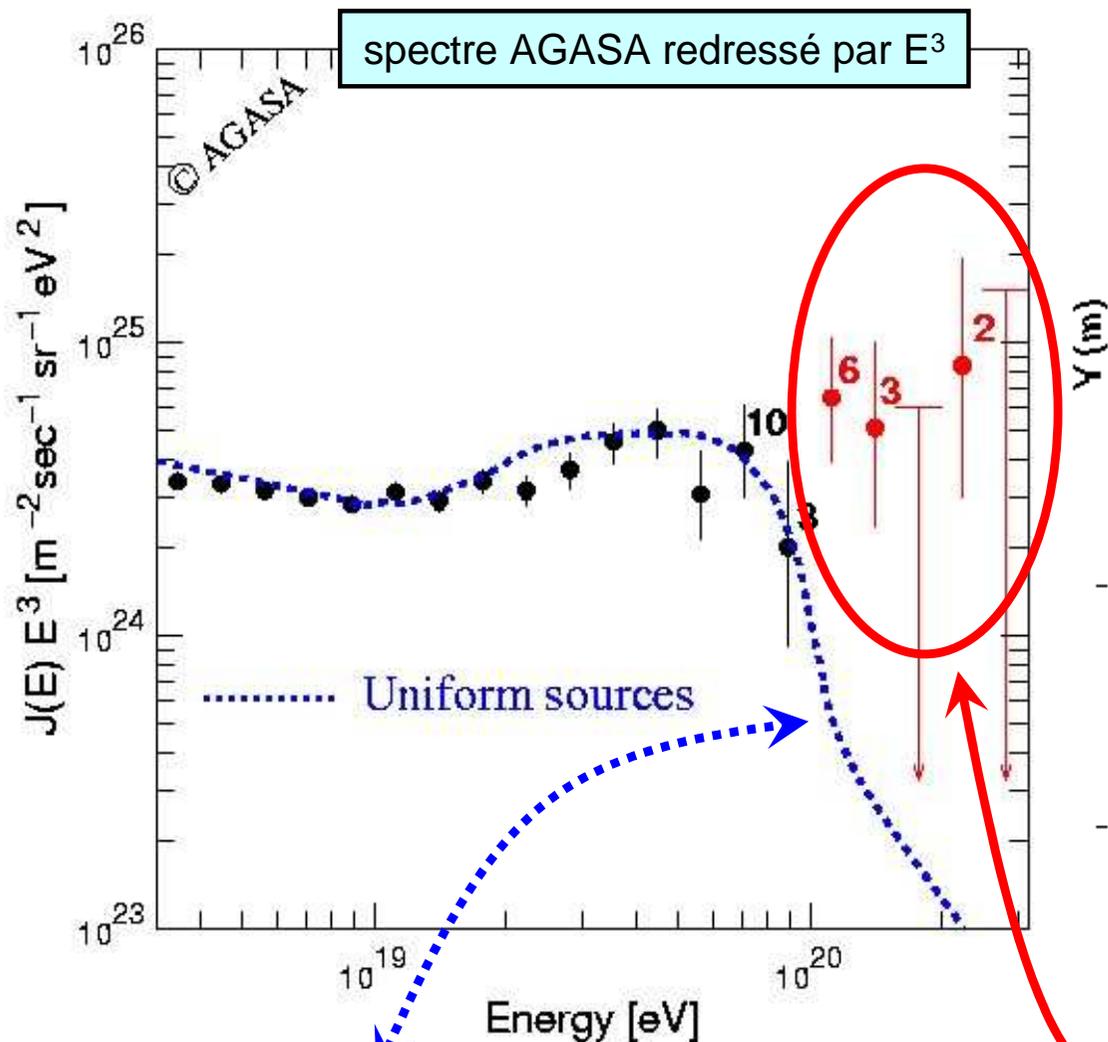


rayons cosmiques
UHE

► Questions :

- **quelles particules UHE (E > 10¹⁵ eV)?**
- **quelle(s) source(s) ?**
- **quel(s) mécanisme(s) d'accélération ?**

- Détection des grandes gerbes par détecteurs au sol puis reconstruction théorique



signal attendu d'une population de sources situées à des distances cosmologiques...

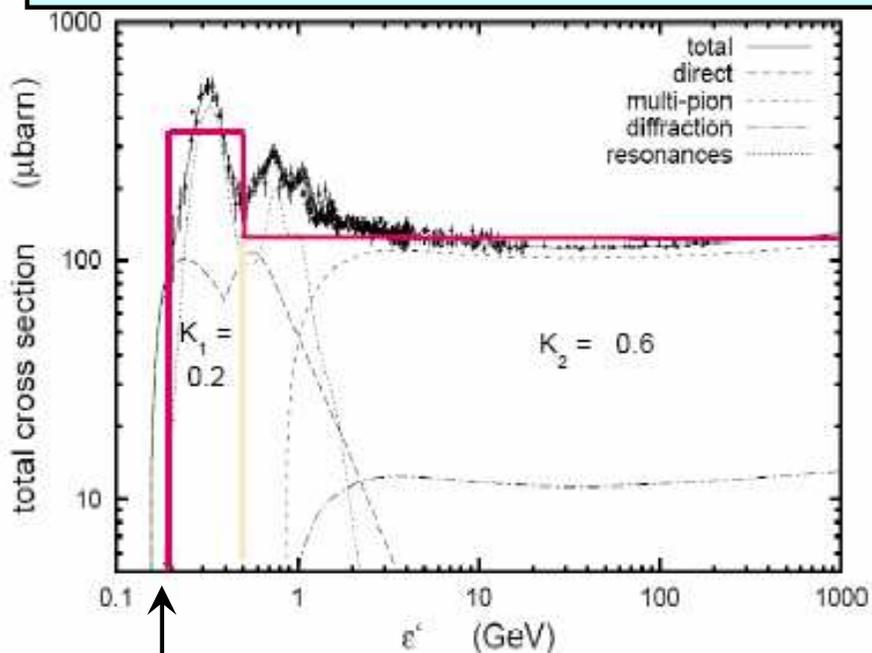
le mystère : les événements trans-GZK !

► Pourquoi une coupure à haute énergie:

- o Les protons d'énergie supérieure à $\simeq 6 \times 10^{19}$ eV perdent leur énergie en interagissant avec les photons du CMB pour produire des pions: $N + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow N' + \pi$

... les photons du CMB d'énergie $\langle E_\gamma \rangle \sim 10^{-3}$ eV dans notre référentiel apparaissent comme des photons gamma dans le référentiel au repos du proton UHE !

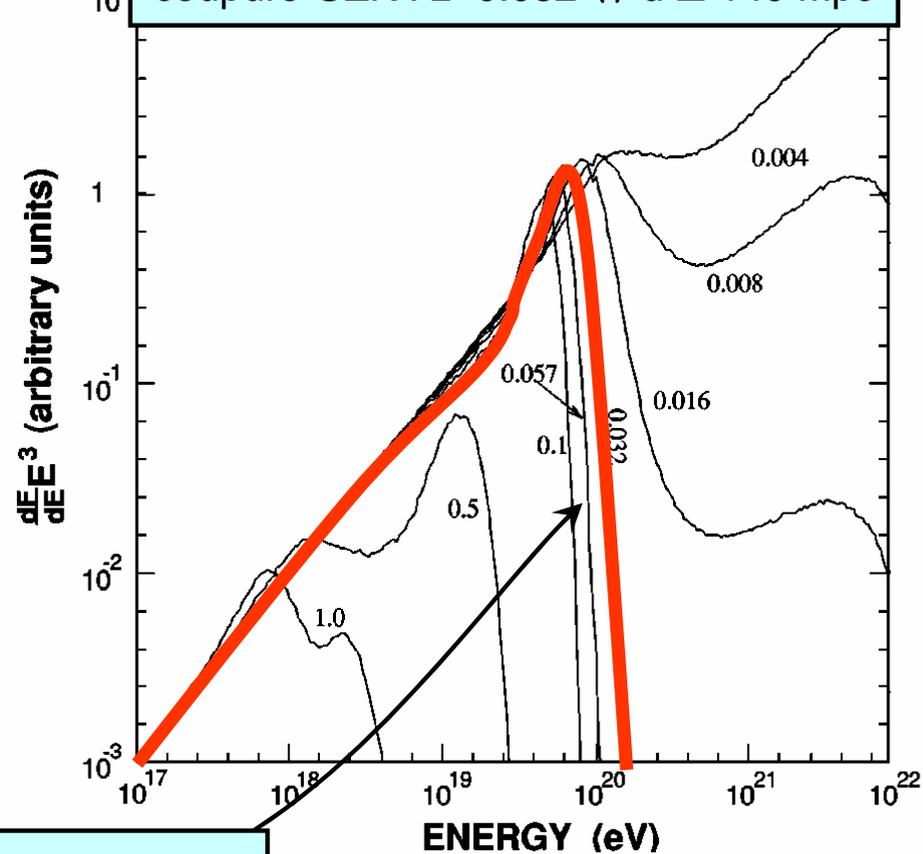
section efficace dans le référentiel du proton



seuil de production du pion : $m_\pi = 140$ MeV

seuil de production du pion : $6 \cdot 10^{19}$ eV dans notre référentiel

coupure GZK : $z=0.032 \Leftrightarrow d \simeq 140$ Mpc



Production de particules UHE par des défauts topologiques?



► De la physique nouvelle pour expliquer les événements trans-GZK :

- Les défauts topologiques, s'ils existent dans l'Univers aujourd'hui, peuvent produire des particules d'énergies $E \sim m_{\text{GUT}} c^2 \sim 10^{25}$ eV par désexcitation ... ce qui génère une cascade électromagnétique ...

nucléons + CMB \rightarrow pions + ...

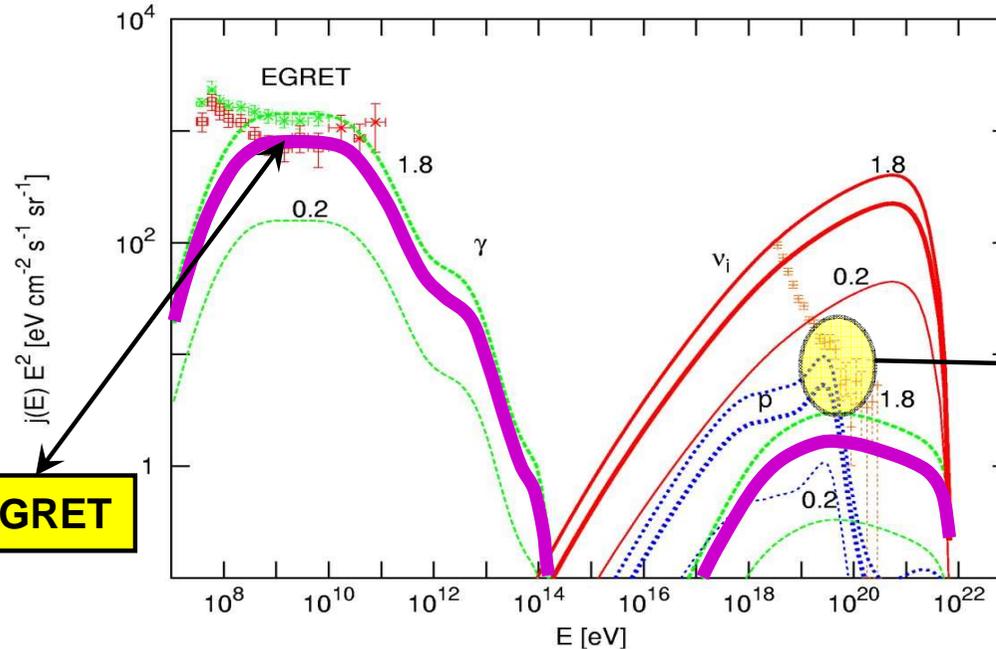
pions \rightarrow photons, neutrinos + e^+e^-

photons + fonds diffus $\rightarrow e^+e^-$

e^+e^- + fonds \rightarrow photons

cascade
e.m.

- contraintes actuelles :



contraintes EGRET

événements
trans-GZK



► Quelle est l'origine des particules d'énergie $\gtrsim 10^{18}$ eV ?

- Meilleurs candidats pour l'accélération : sursauts gamma et radio-galaxies

... ces sources sont situées à des distances cosmologiques

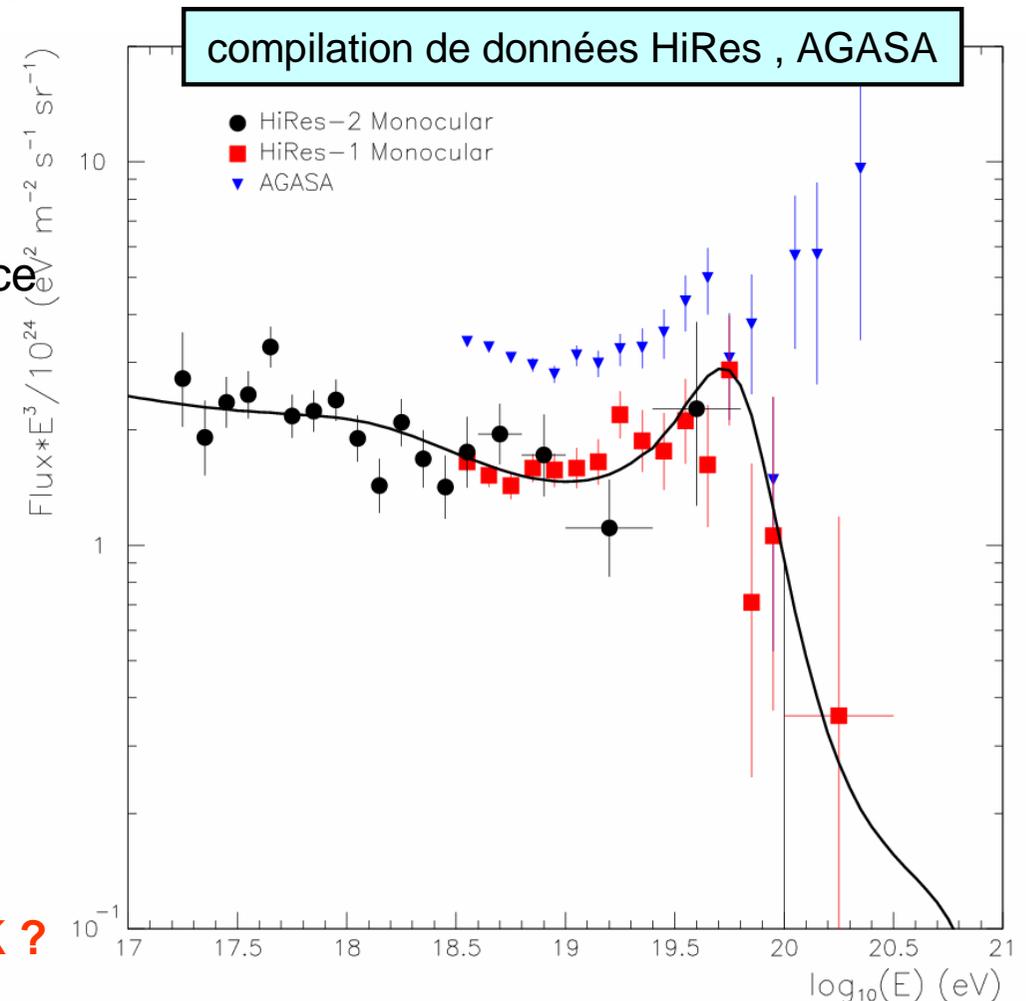
⇒ **la coupure GZK devrait être visible !**

- expérience High Resolution Fly's Eye: observation de la lumière de fluorescence émise par les atomes de l'atmosphère lors du passage de la gerbe
⇒ profil de la gerbe

cette expérience « voit » une coupure GZK

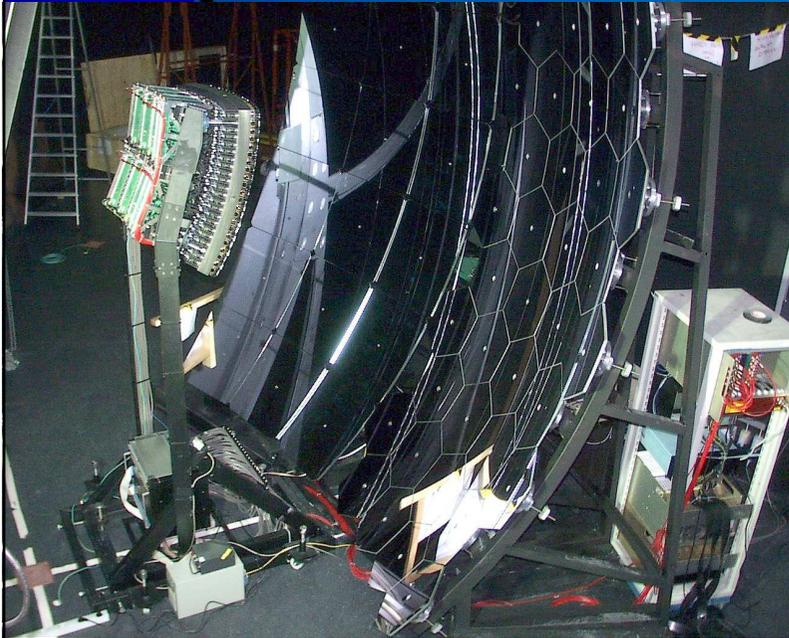
► Une nouvelle question :

existe-t-il des événements trans-GZK ?



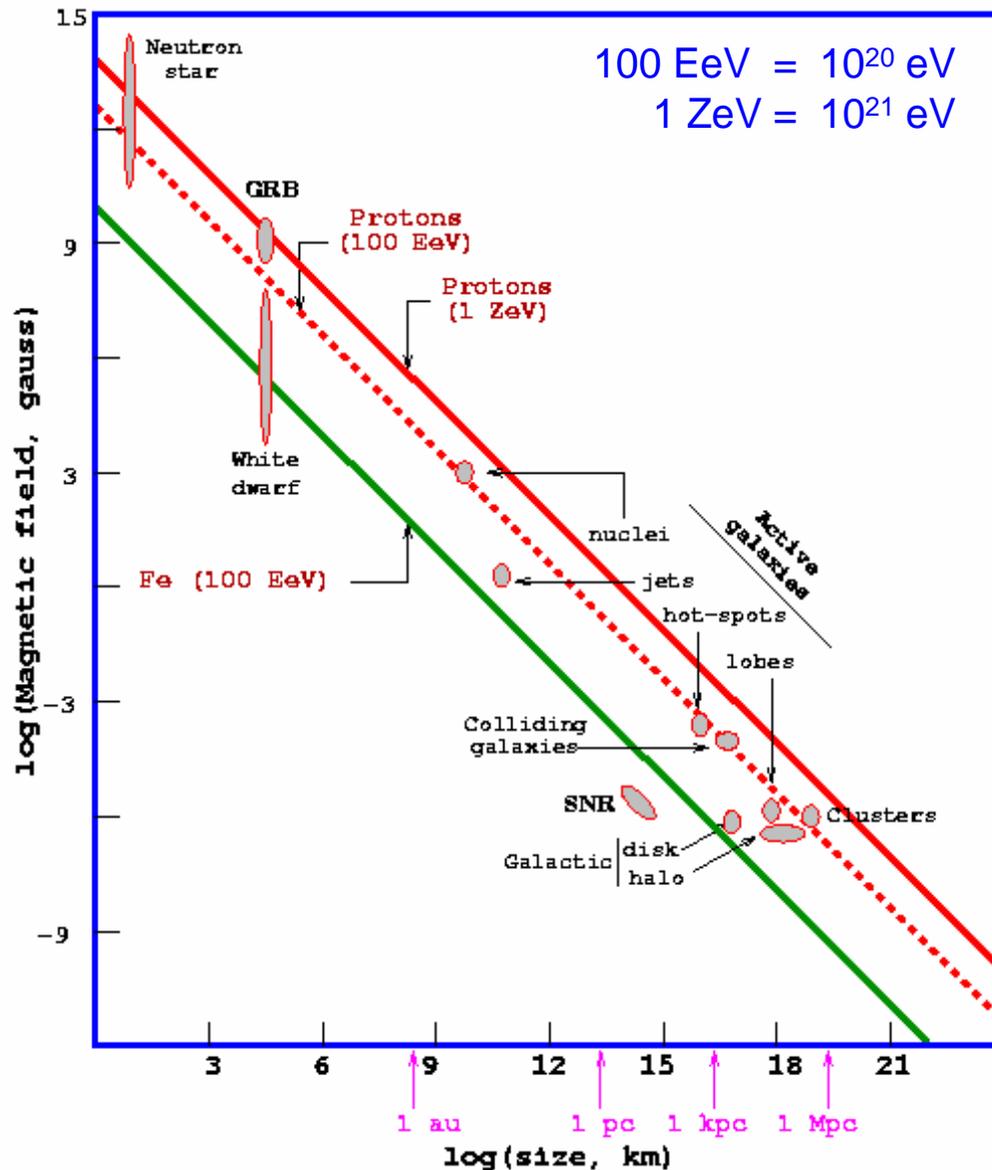
L I M I T E D E L ' A T M O S P H È R E

Observatoire Pierre Auger :
combinaison des deux techniques
(sol, fluorescence)



► Accélération de particules dans les sources :

pour identifier la source, on a recours à un critère simple sur le moteur d'accélération :



- l'accélération peut avoir lieu tant que la particule est confinée dans l'accélérateur :

$$r_L \equiv \frac{E}{ZeB} \leq L$$

$$\Rightarrow E_{\max} \approx 10^{20} \text{ eV } \Gamma Z B_{\mu\text{G}} L_{100\text{kpc}}$$

- une condition plus réaliste :

$$T_{\text{acceleration}} \leq T_{\text{sortie}}, T_{\text{perte}E}$$

⇒ sources possibles:
sursauts gamma, radio-galaxies, ...

► Questions ouvertes:

- quelle source et quel mécanisme d'accélération :

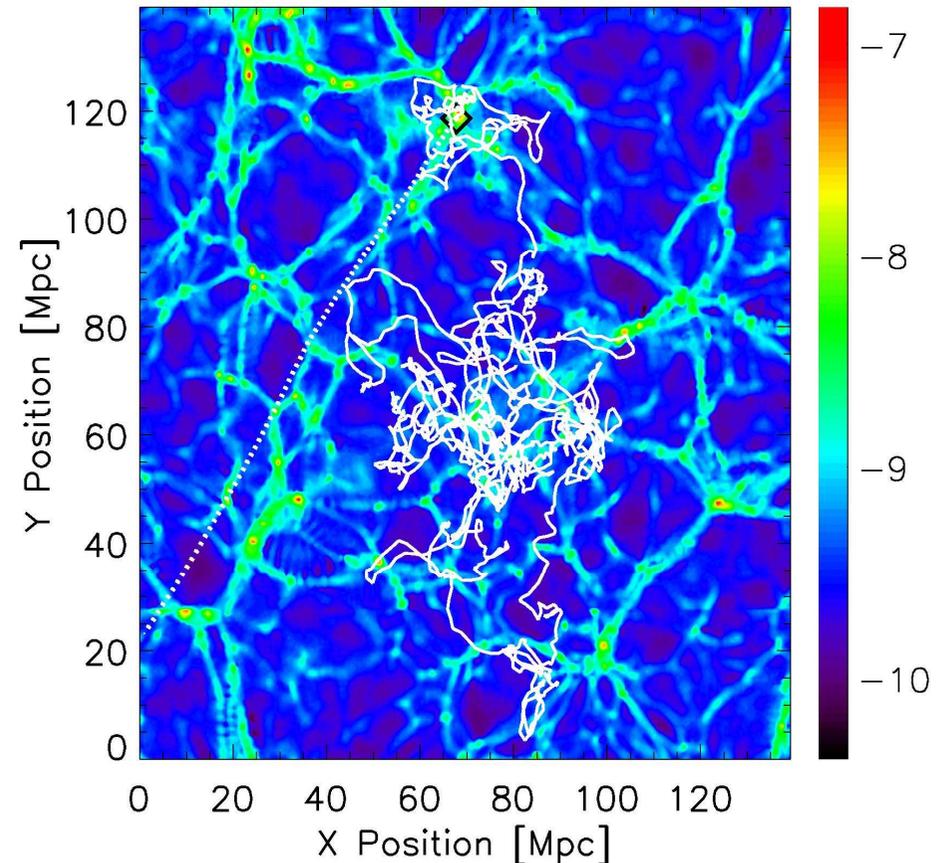
sursauts gamma : chocs relativistes non collisionnels

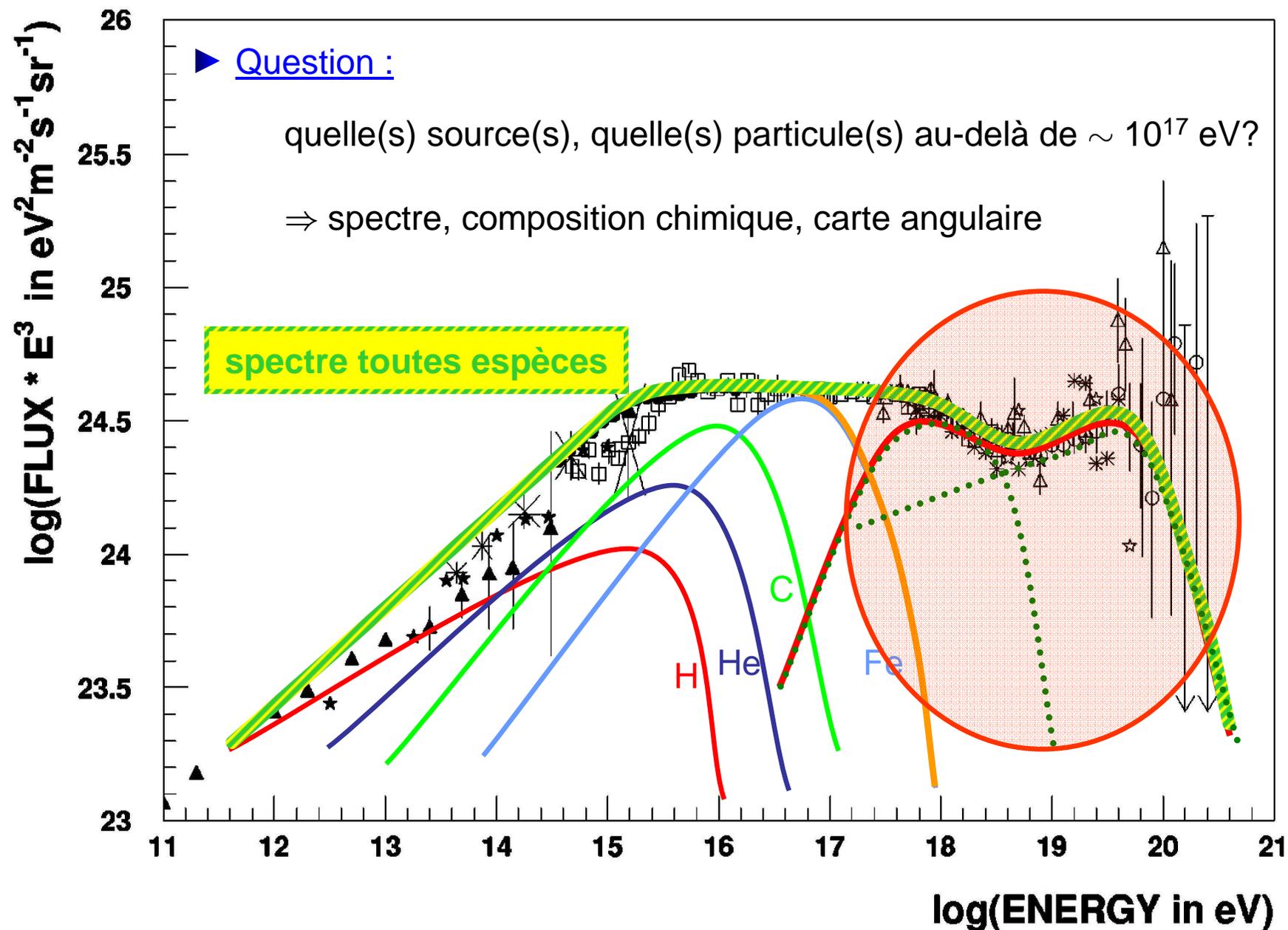
radio-galaxies : accélération dans les jets, dans les points chauds, quelle RG ?

- et les événements trans-GZK ?

- pourquoi ne voit-on pas de contrepartie ?

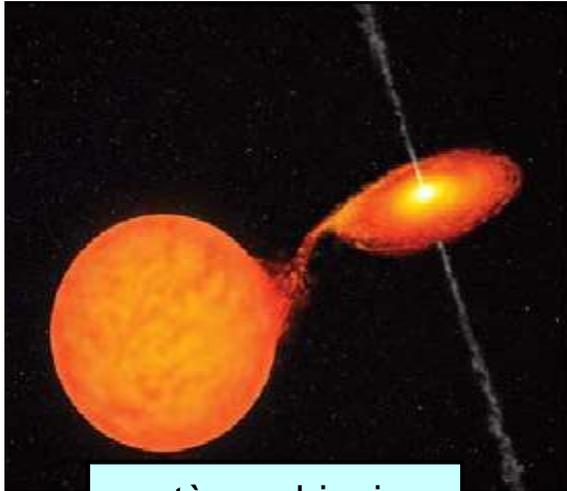
(quels sont les effets des champs magnétiques extra-galactiques sur les trajectoires? \Leftarrow SKA)





► Question essentielle :

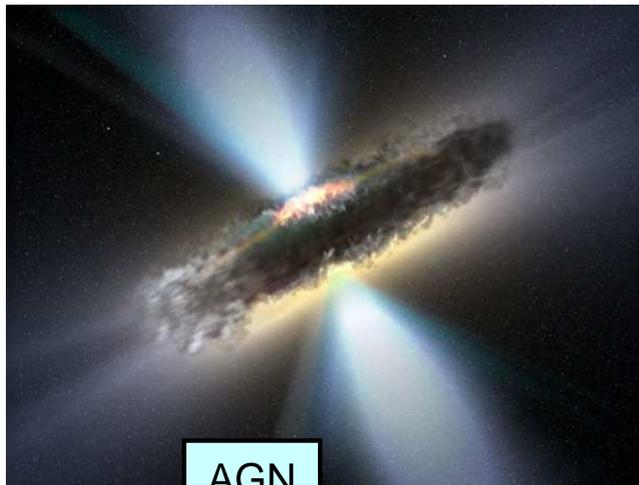
quelle est l'origine du rayonnement non-thermique observé :
synchrotron, inverse Compton, ... ?



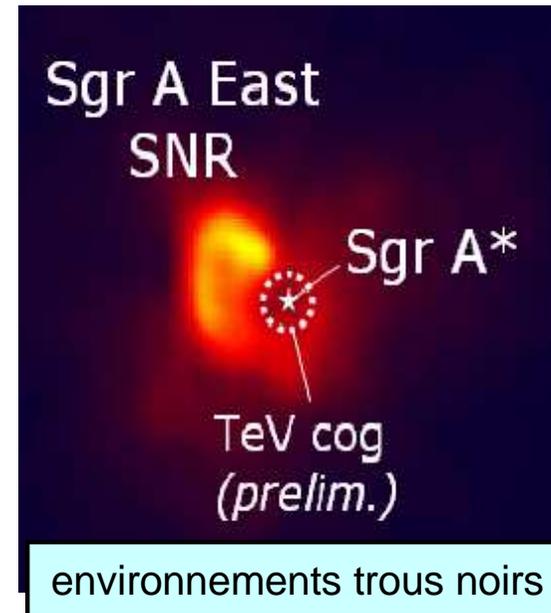
systemes binaires



restes de supernovae



AGN

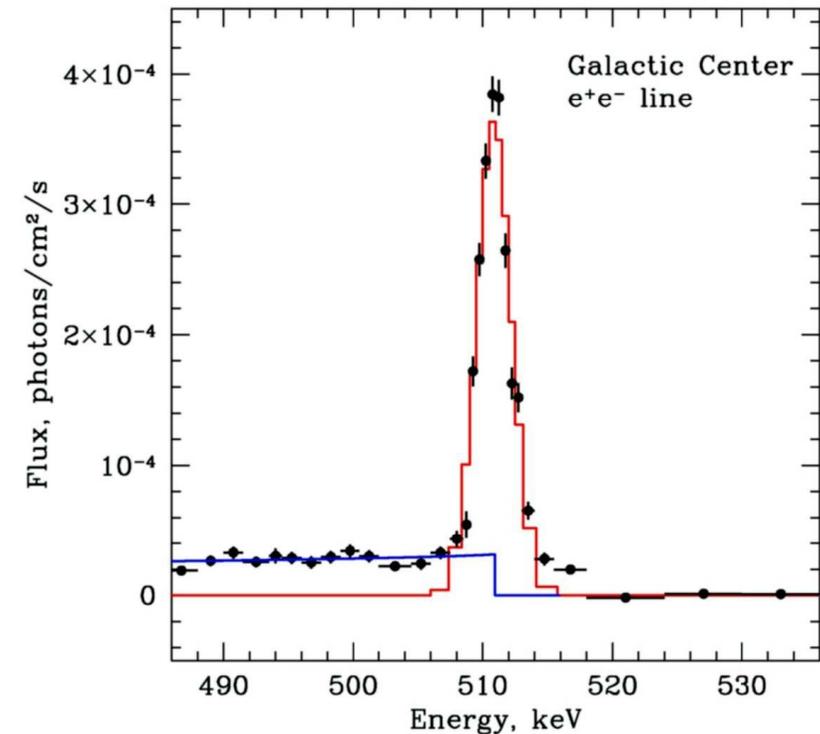
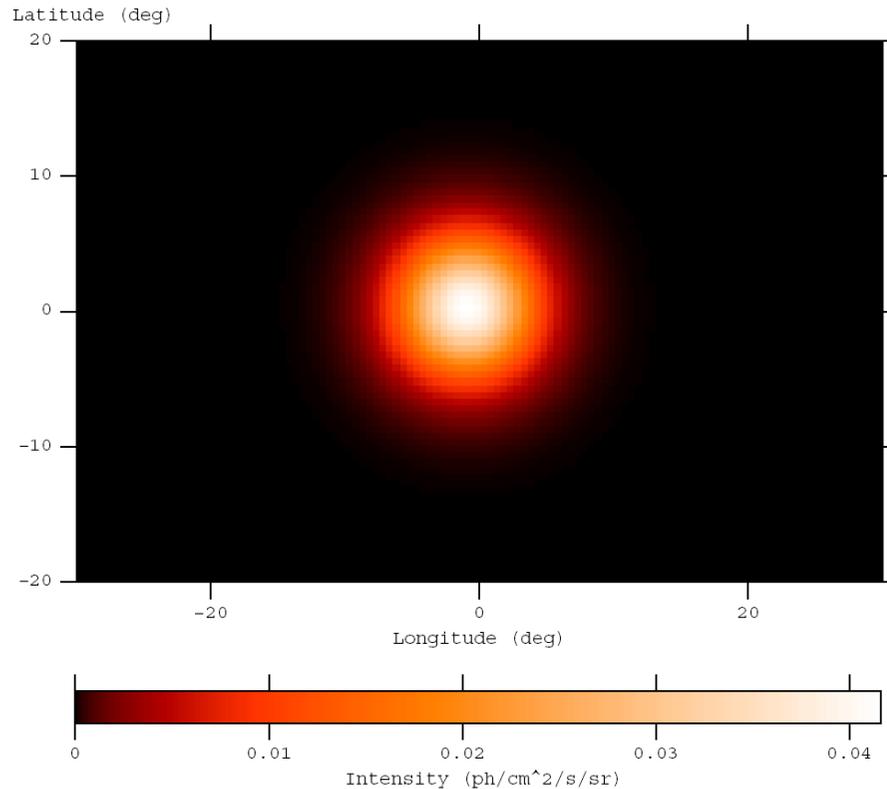


Raie d'annihilation e^-e^+ au centre galactique



► Domaine du MeV :

- un résultat inattendu de Integral : la découverte d'une zone d'émission à 511 keV (raie d'annihilation électron-positron) centrée sur le bulbe galactique.

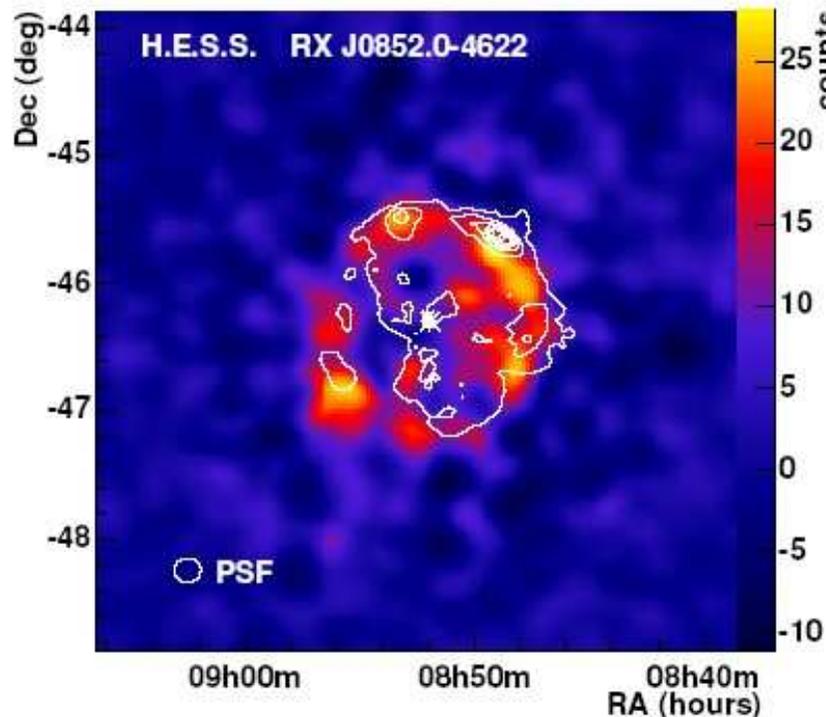


► Origine des positrons :

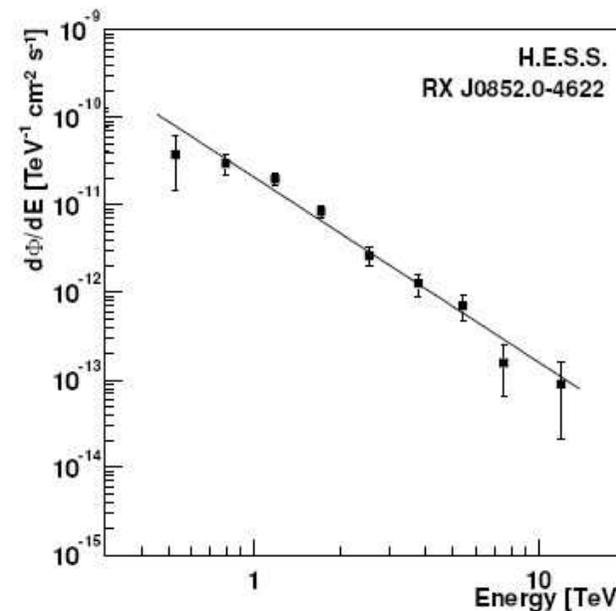
annihilation de matière noire? \Rightarrow **matière noire légère !?**

radioactivité β^+ ? \Rightarrow **quelle source ??**

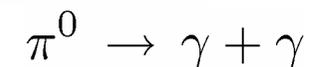
- Observations HESS : mesure de la lumière Cerenkov émise par la gerbe e.m.



carte TeV + contours X

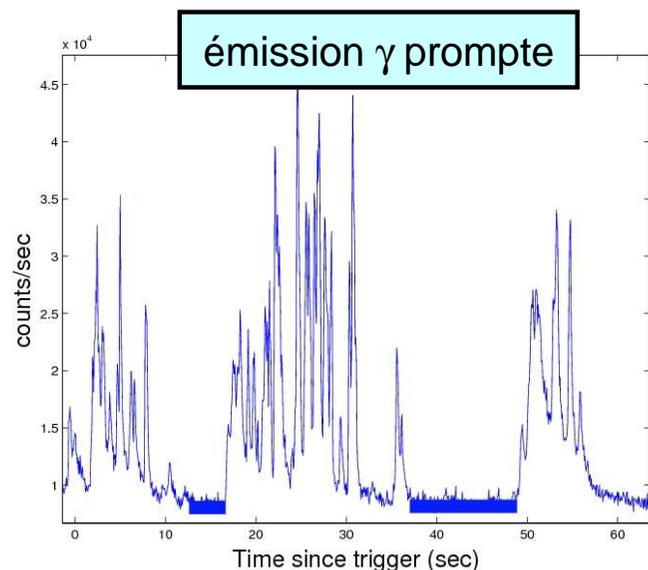


modèle d'émission hadronique par collisions inélastiques : $p + p \rightarrow \pi^0 + \dots$

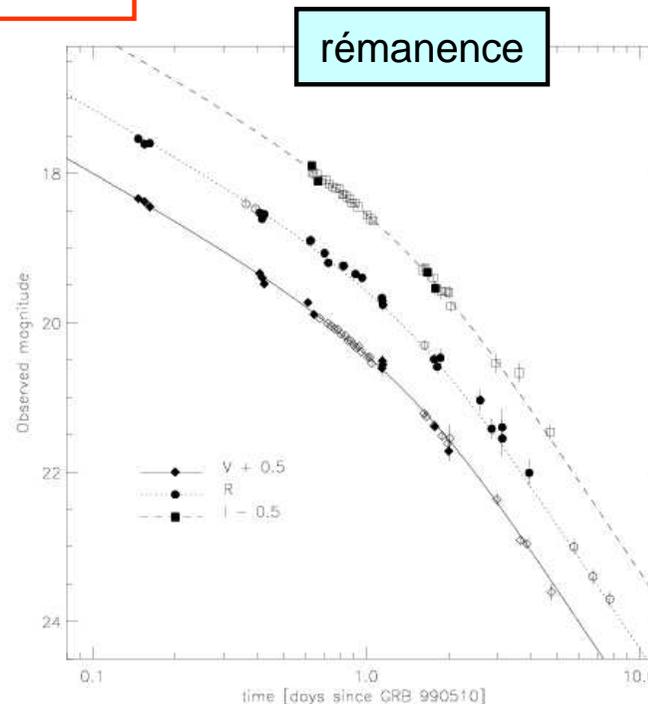


⇒ accélération de p jusqu'à > 100 TeV !

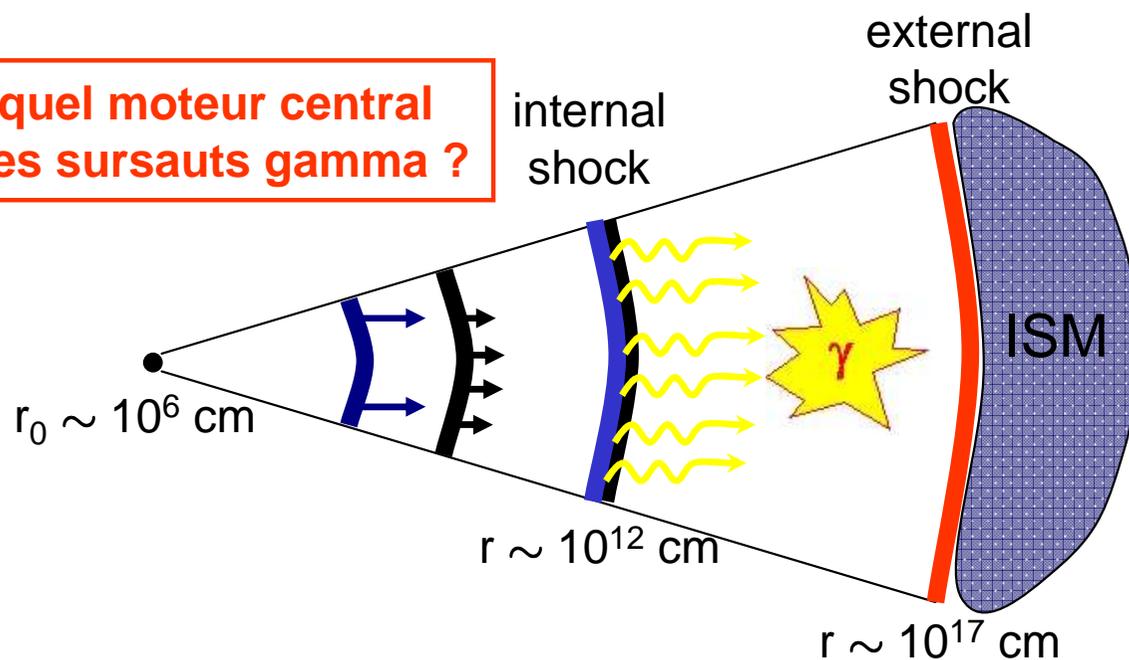
► Sursauts gamma :



quel mécanisme d'émission gamma?



quel moteur central des sursauts gamma ?

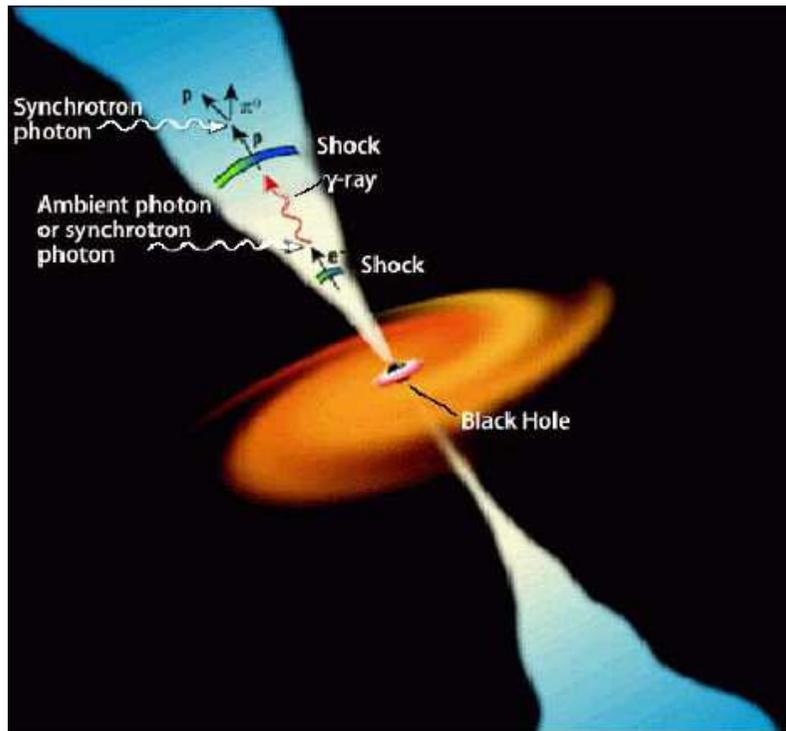


quelle physique des chocs non collisionnels relativistes ?

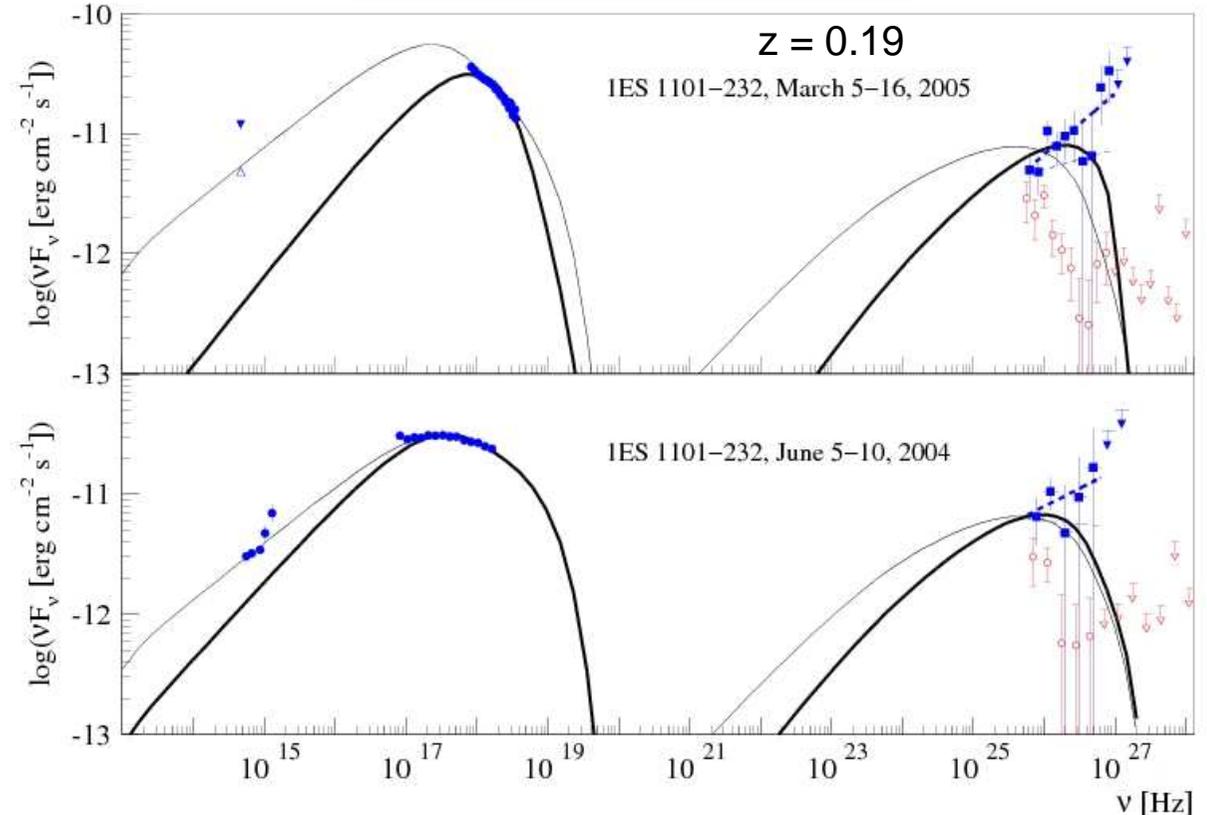
quel rôle des sursauts gamma dans l'évolution cosmique?

► Environnements de trous noirs massifs, jets :

quel mécanisme d'extraction d'énergie ?



quelle physique des disques d'accrétion ?

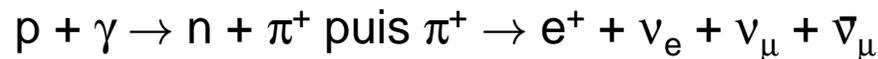


quel mécanisme d'émission à haute énergie ?

o indices observationnels :

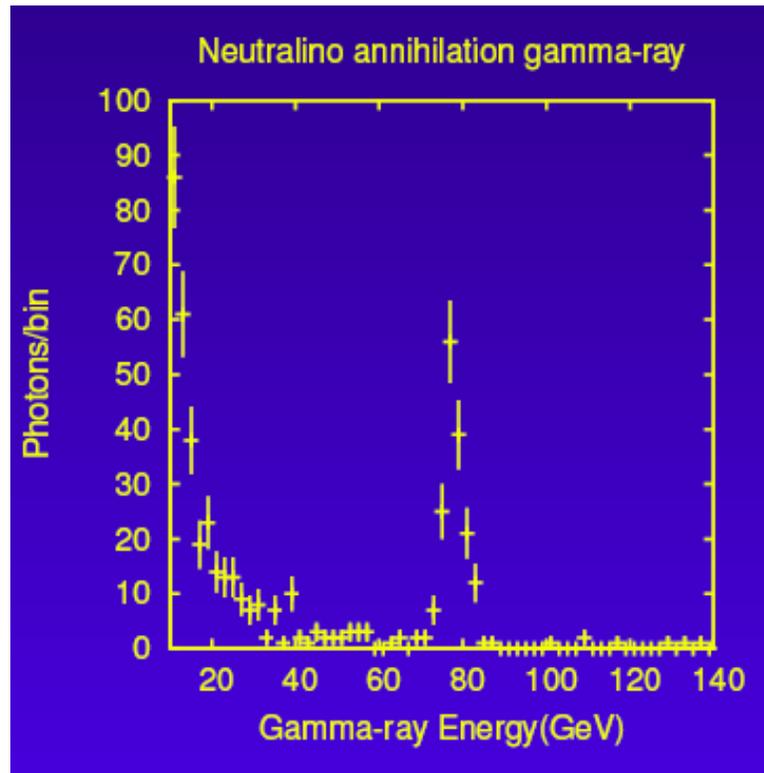
- observation multi-longueur d'onde + multi-messagers (neutrinos)

- **modèle hadronique → neutrinos**



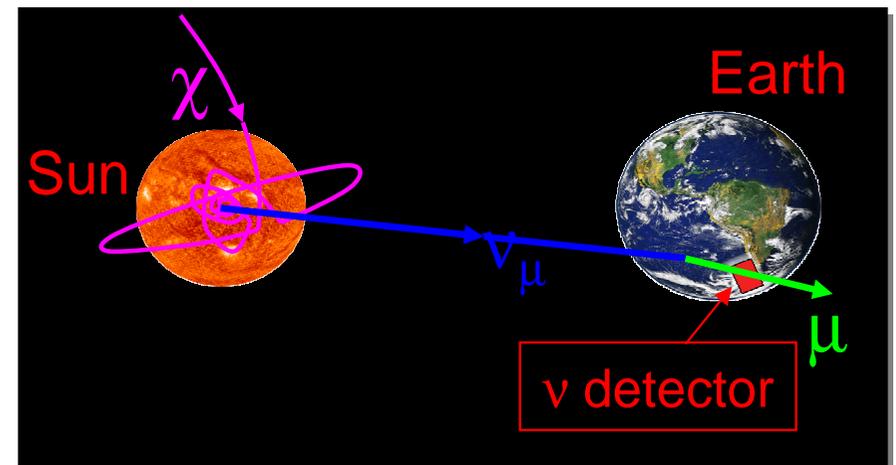
- **modèle leptonique : pas de neutrinos**

- Possibilité de détecter la matière noire par des signaux indirects ::



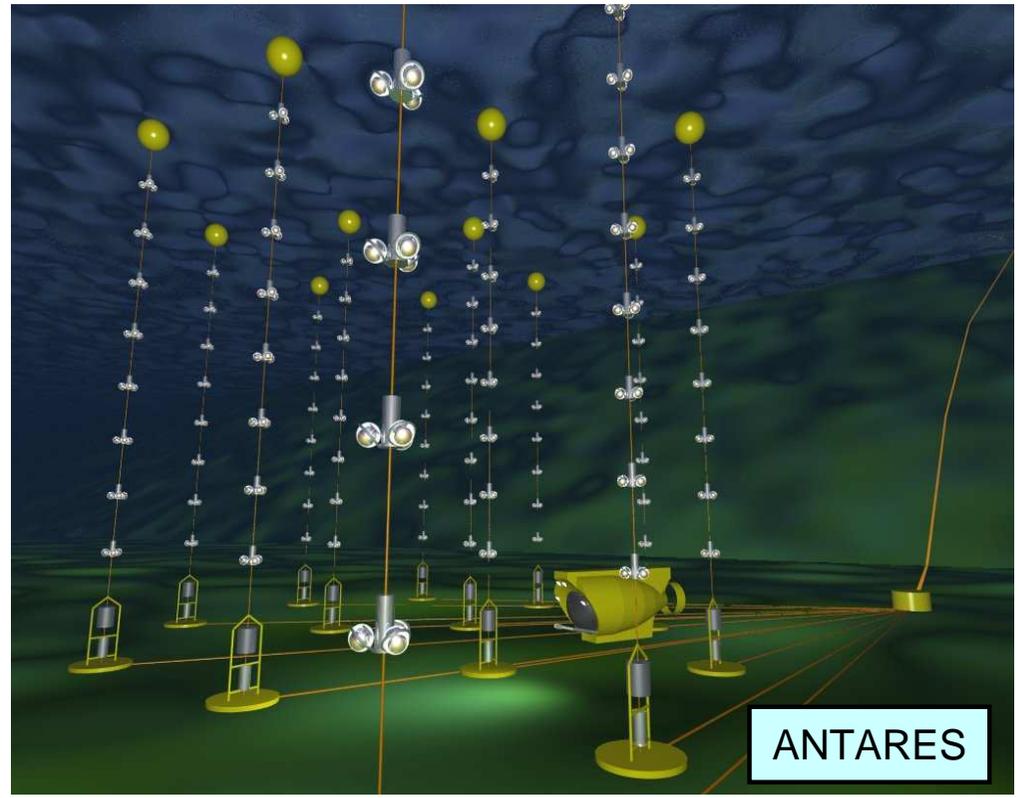
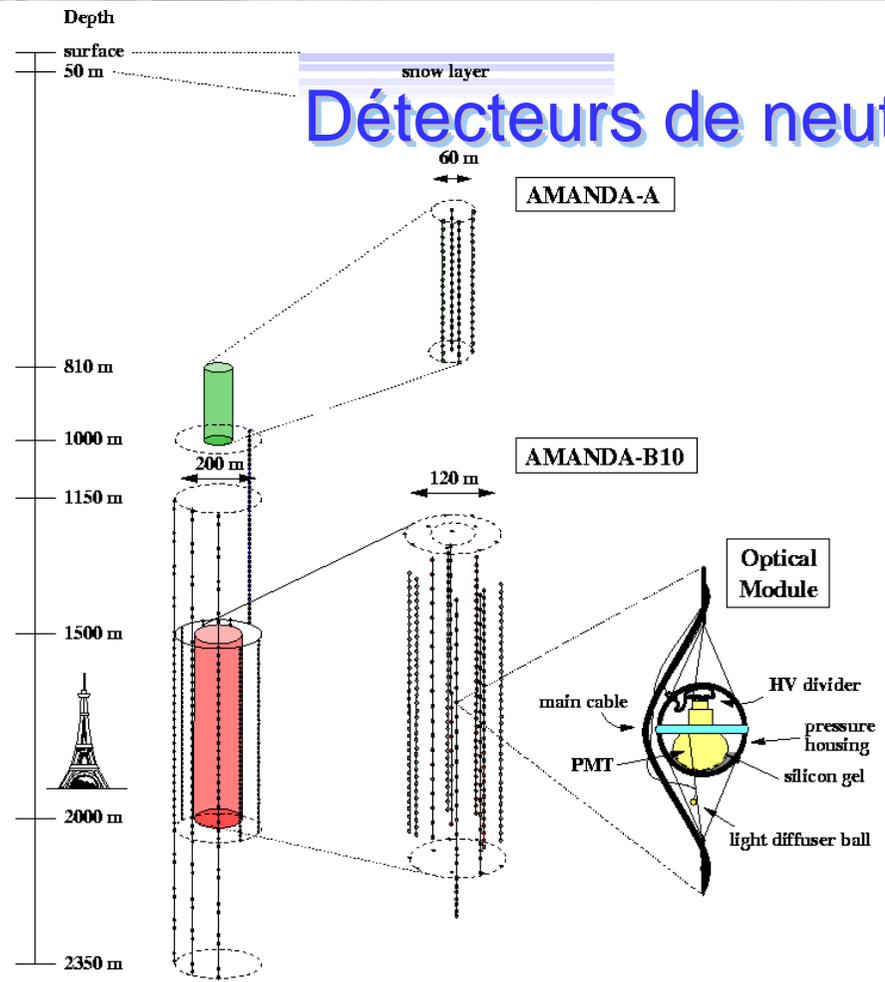
... par le signal de photons produit par l'annihilation de deux particules de matière noire au centre galactique ...

... par le signal de neutrinos conséquent à l'annihilation de deux particules de matière noire au centre du Soleil...





Détecteurs de neutrinos de très haute énergie (>TeV)



AMANDA as of 2000
Eiffel Tower as comparison (true scaling)

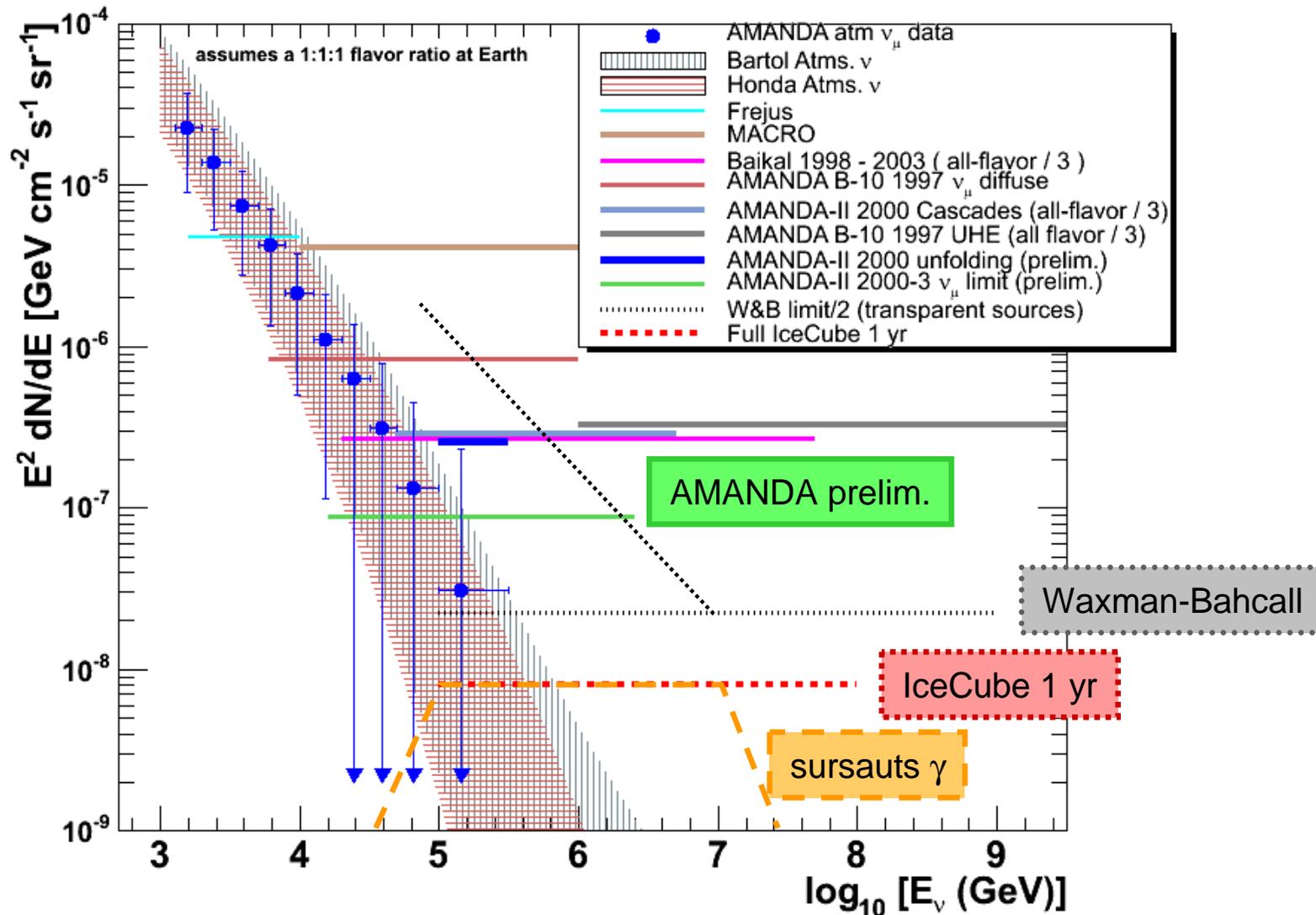
zoomed in on AMANDA-A (top)
AMANDA-B10 (bottom)

zoomed in on one optical module (OM)

télescopes neutrinos en développement/opération : AMANDA, ANTARES, NESTOR

signal : lumière Cerenkov d'un muon produit par interaction $\nu - N$ près du détecteur

Limites actuelles sur la détection de neutrinos UHE



- o Aucun neutrino extra-terrestre officiel mais :
coïncidence (3.7σ) entre un signal de neutrinos et des photons TeV d'un blazar ...
- o Fond diffus attendu pour génération km^2 : ~ 20 neutrinos de 10^5 GeV par an (GRB)
 ~ 1 ou plus ? par an (AGN)

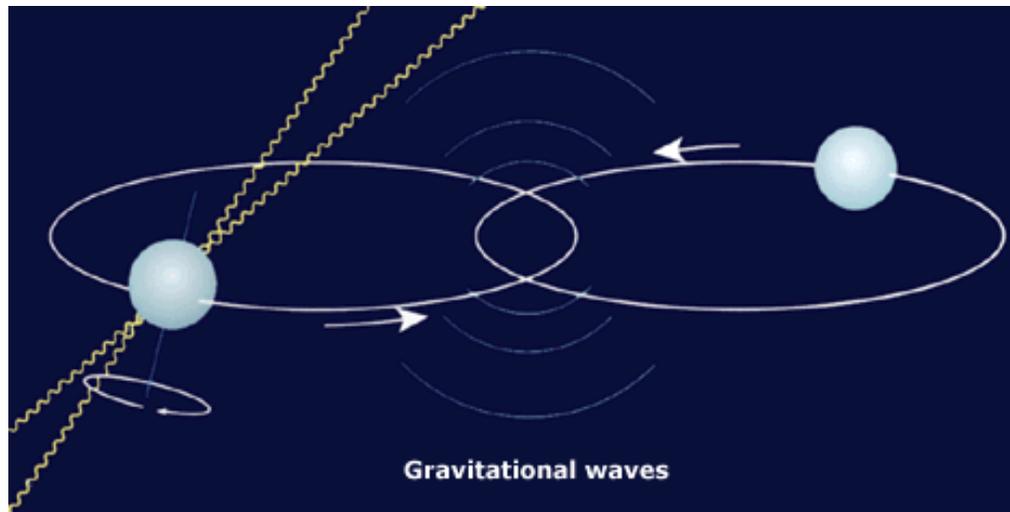
► Onde gravitationnelle : fluctuation de la métrique

◦ équation d'onde : $(\partial_t^2 + \nabla^2) h^{\mu\nu}(t, \mathbf{x}) = -\kappa T^{\mu\nu}$

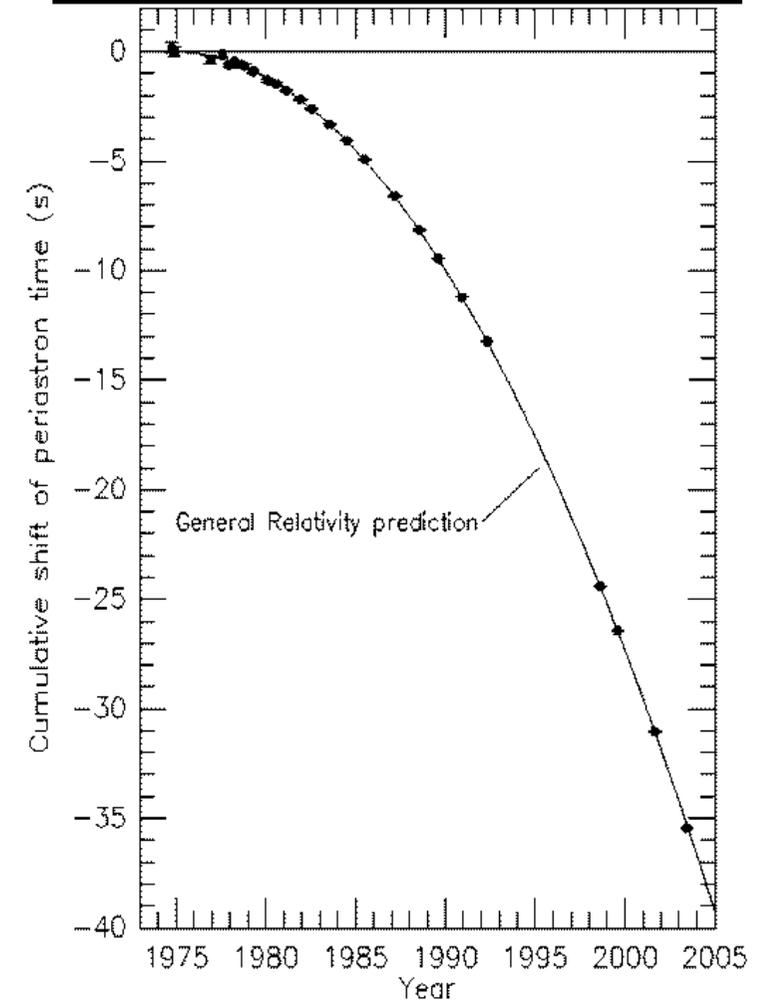
⇒ amplitude à distance r : $h \sim \frac{1}{r} \frac{2G}{c^4} \frac{d^2Q}{dt^2}$

effet : contraction/dilatation des longueurs lors du passage de l'onde

► Premier objet d'étude: pour les détecteurs terrestres (VIRGO, LIGO, ...), coalescence d'objets compacts (NS-NS, NS-BH, BH-BH, ...)

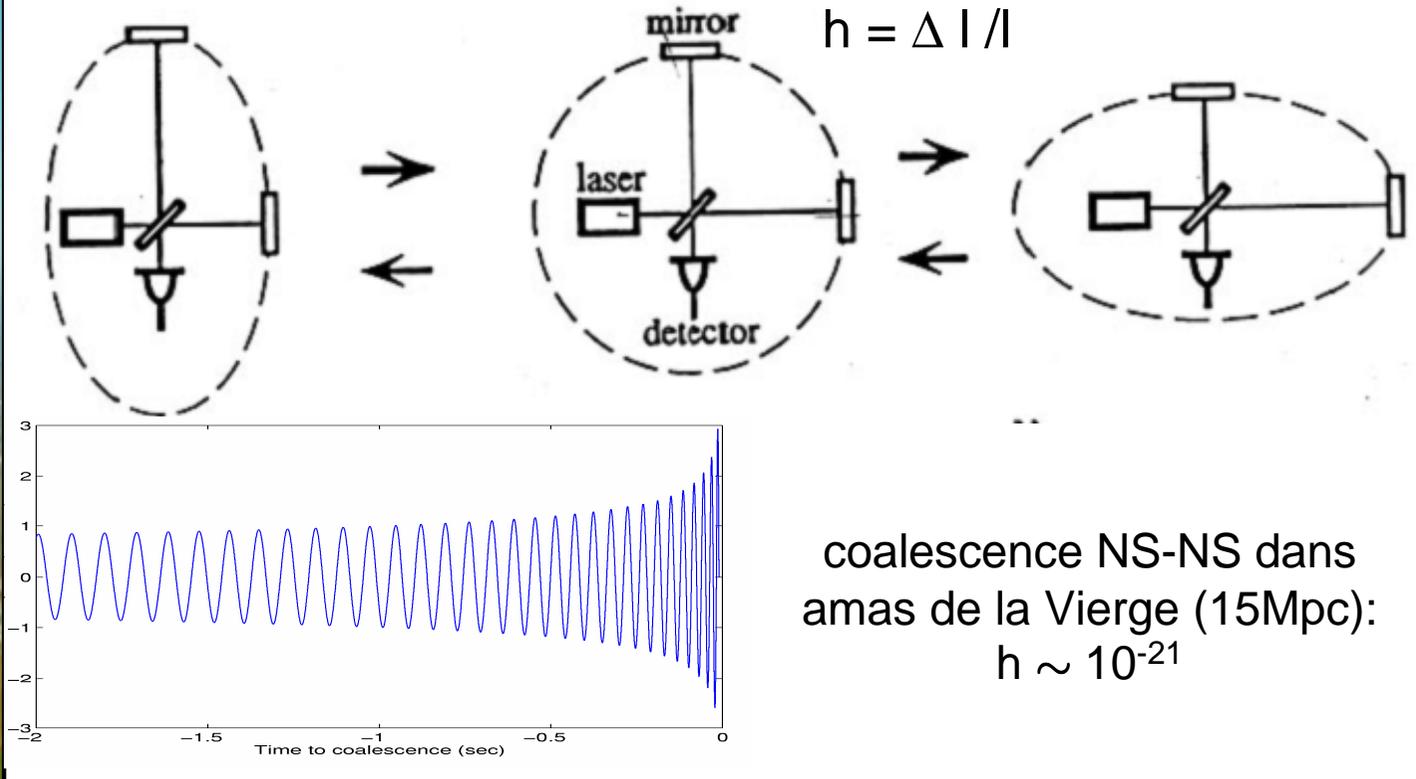


perte d'énergie du système binaire de Hulse & Taylor



Détection d'ondes gravitationnelles ?

Principe de détection :



coalescence NS-NS dans
amas de la Vierge (15Mpc):
 $h \sim 10^{-21}$

nombre d'événements attendus : 1/ jour \rightarrow 1 /an pour détecteurs avancés (NS-NS)
et beaucoup plus pour les systèmes BH-BH... supernovae - collapsars ?

► Résumé :

- l'astroparticule est un domaine jeune qui relie l'infiniment petit à l'infiniment grand (ou l'inverse)
- les observatoires de l'Univers extrême deviennent des expériences de physique des particules
- l'astronomie des particules permet l'étude des phénomènes extrêmes dans l'Univers (objets compacts, trous noirs massifs ou non, jets, ...)
- question essentielle : origine des particules (nucléons/noyaux/photons/neutrinos) de très haute énergie...?

► Une perspective d'avenir :

- d'ici ~ 10 ans, on pourra corrélérer les observations de photons UHE, hadrons UHE, neutrinos UHE, et ondes gravitationnelles \Rightarrow astronomie multi-messagers !

le meilleur est à venir ...

- **l'astronomie des particules existe déjà !**

