

Les Expériences au Sol

détourné en

Détection de Gammas du GeV au TeV

Thémis



- pour les étudier, il faut les voir!
- **Fil rouge**: courbes de sensibilité
- Exemple simple - le spatial,
EGRET et GLAST
 - > généralités sur les flux et les fonds,
 - > rappel sur la diffusion multiple,
cascades électromagnétiques
- Exemple plus tordu - le sol
Technique de Tcherenkov Atmosphérique
- (Détection de rayons cosmique)

David A. Smith

(CEN de Bordeaux-Gradignan, IN2P3/CNRS)

4 mars 2004

Préambule 1 - profession de foi

CREDO: Tout que l'on connait sur l'Univers, on le connaît par le biais d'un seul « messenger des étoiles » (siderius nuncius), les photons (rayonnement électromagnétique). Pour apprendre qu'on est aveugle à 90% de la masse de l'Univers! Un bout de l'iceberg...

L'espoir derrière l'étude des « phénomènes cosmiques de haute énergie » et de pouvoir lever le voile sur l'Univers caché en le regardant autrement.

« Autrement » qui veut dire: neutrinos, antiparticules, particules hors « modèle standard », rayons cosmiques d'ultra-haute énergie, ondes gravitationnelles....

Préambule 2 - excuses

(Certains parmi nous, dont moi, tentent d') aborder une révolution au moyen d'une approche classique : l'étude de sites spécifiques d'émission. Seules les particules neutres conservent une information directionnelle (sauf à UHE).

Le domaine le plus mûr reste les photons. Excusez-moi donc d'insister sur les gammas malgré ma profession qu'une astronomie non-photonique est pleine d'avenir. Notamment, AUGER (UHE) n'aura pas le temps qu'il mérite dans mon exposé.

Les gammas sont les photons issus de processus *relativistes*, donc PCHE, c'est donc quand même regarder « autrement »!

D'ailleurs, je n'arriverai au détecteurs au sol qu'à la 2eme moitié de l'exposé parce que les bases sont plus simples à établir pour un petit cube en orbite.

Une chandelle standard:

M 1 = SuperNova 1054 = nébuleuse du Crabe

Par sa brillance et constance à toutes les longueurs d'onde, le Crabe est un objet exceptionnel.

Exemple: 3rd EGRET catalog (ApJ Supp 123 79 1999)

$F(>100 \text{ MeV}) = 226 \times 10^{-8} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$

$d\Phi/dE = kE^{-p} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}/\text{MeV}$, $p = 2.19 \pm 0.02$

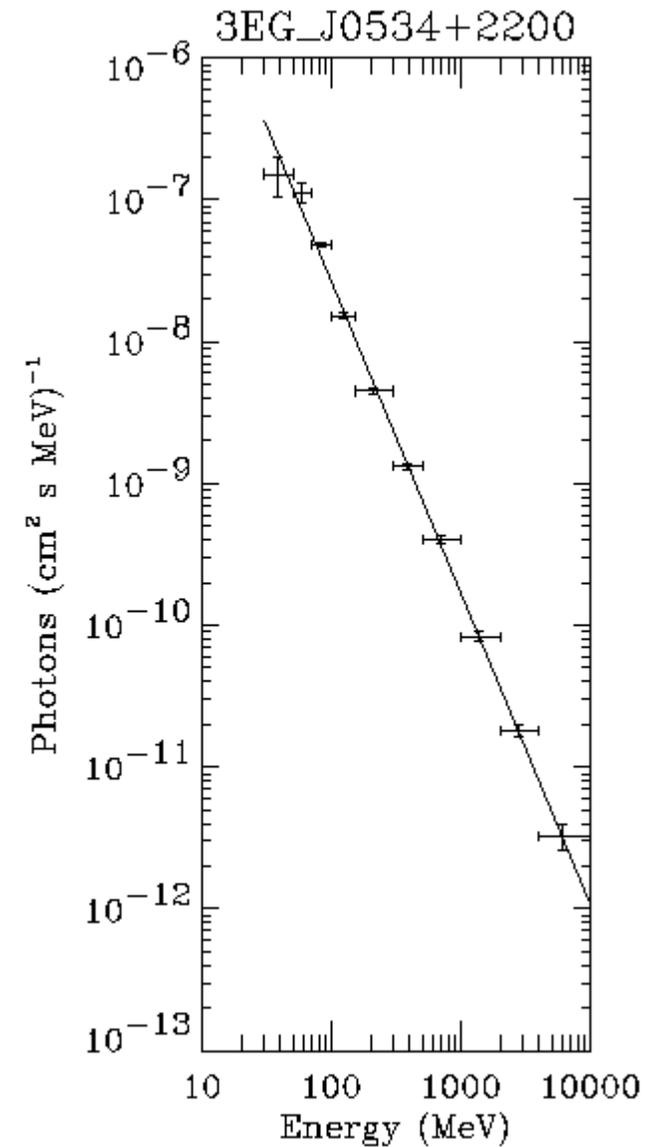
N = FAT,

A = deux feuilles A4 = 1500 cm^2 , T = 10 jours

N = 3000 photons



Lancement du CGRO, Avril 1991. Fin, Juin 2000



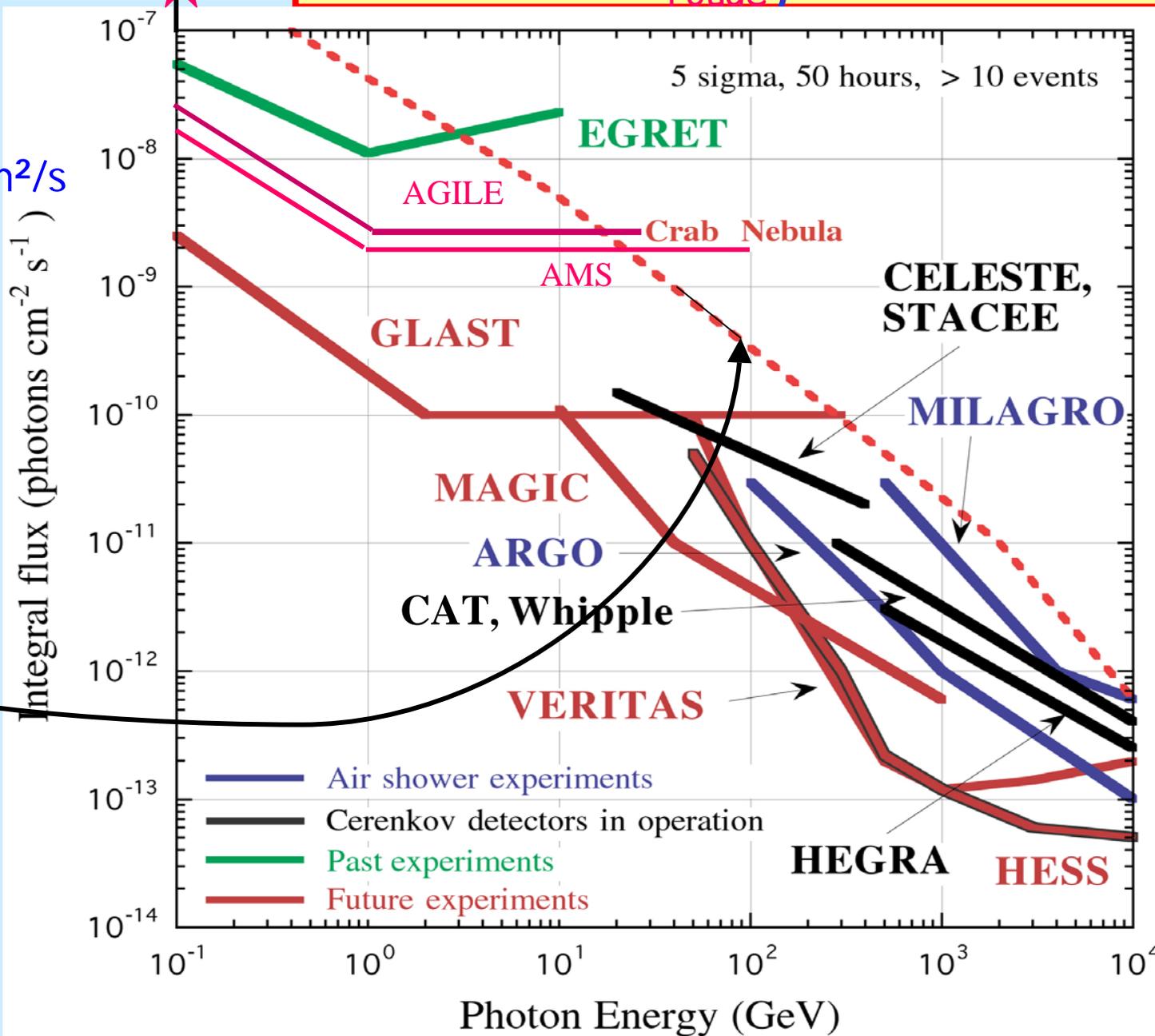
Courbes de Sensibilité (le fil rouge)

On vient de dire
 $F(>100 \text{ MeV})$
 $= 226 \times 10^{-8} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$

On a dit aussi
 $d\Phi/dE = \kappa E^{-2.2}$

ce qui fait

$$F(>E) = \kappa E^{-1.2}$$



EGRET a vu 271 sources de gamma avec $>5\sigma$ en ~ 3 ans.
Pourquoi pas plus? Qu'est-ce qui limite sa sensibilité?

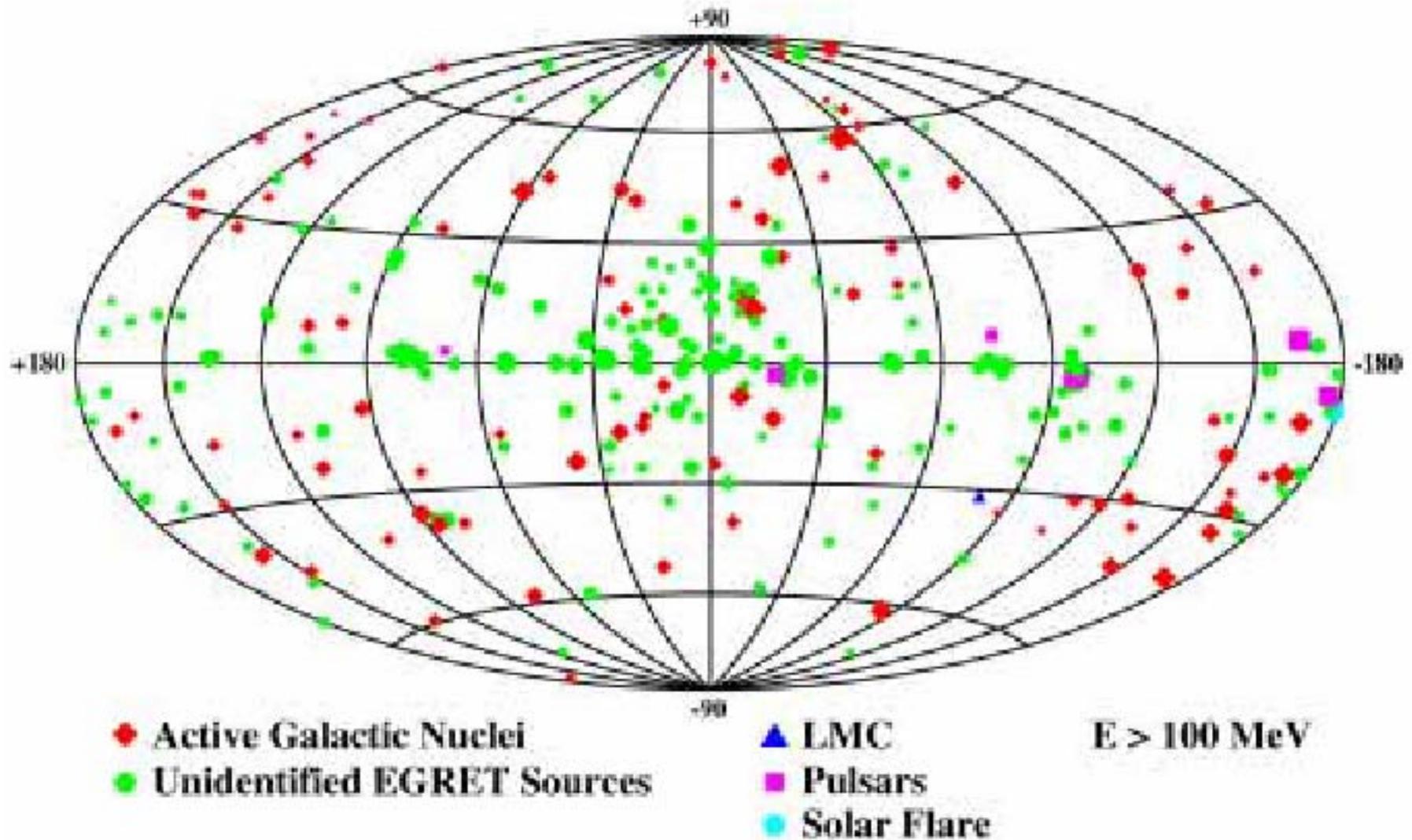


Figure 4-1 Third EGRET Catalog of high-energy gamma-ray sources (Hartman et al. 1999). The source locations are shown in Galactic coordinates.

Ce qui limite la sensibilité d'EGRET... What is EGRET anyway?

Pour *bien* vous embrouiller, disons qu'EGRET, c'est l'ancien GLAST.



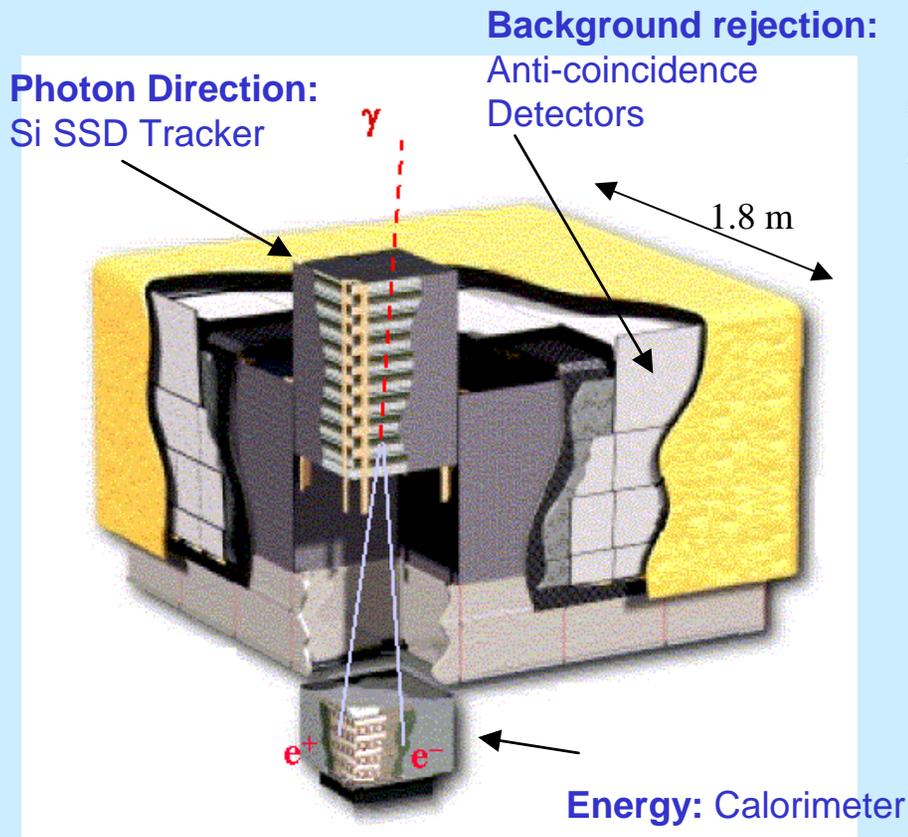
The Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST)

Lancement 2007

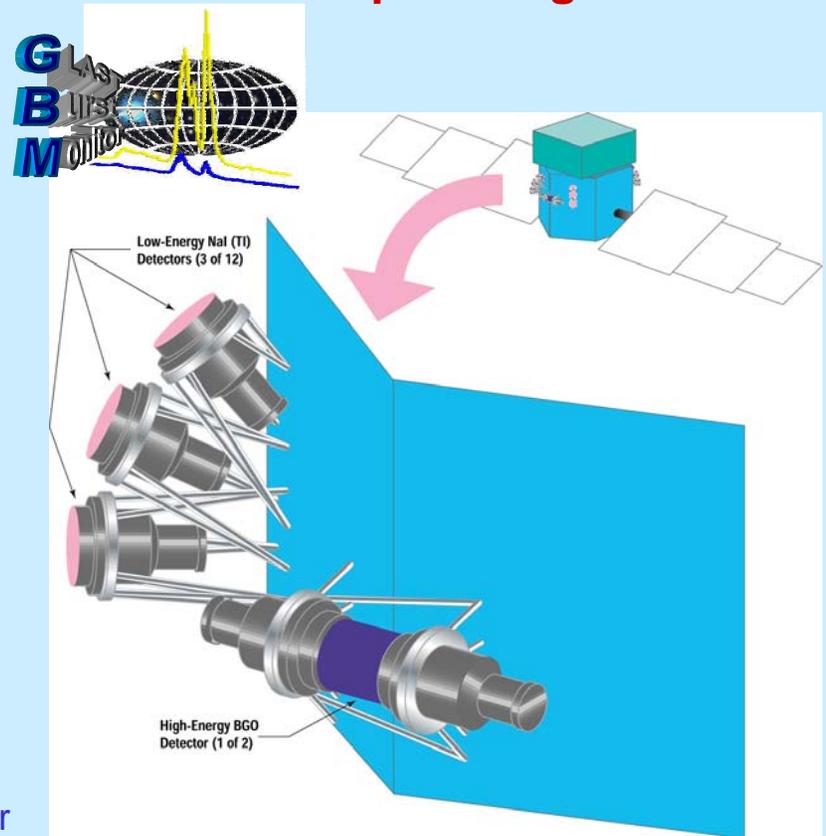
USA
France
Italie
Japon
Suede

Les instruments de GLAST

Large Area Telescope (LAT)
20 MeV-300 GeV
PI: Peter Michelson
Stanford University



GLAST Burst Monitor (GBM)
10 keV-25 MeV
PI: Charles Meegan
Marshall Space Flight Center



EGRET et GLAST:

Direction:

conversion du γ en paire électron-positon.

Définition de longueurs de radiation χ :

$$N_e = N_o e^{-\chi}$$

(probabilité d'interaction du photon gamma)

L'ionisation des $e^- e^+$ laisse
deux traces facilement détectable.

(EGRET: chambre à étincelles. GLAST: silicium.)

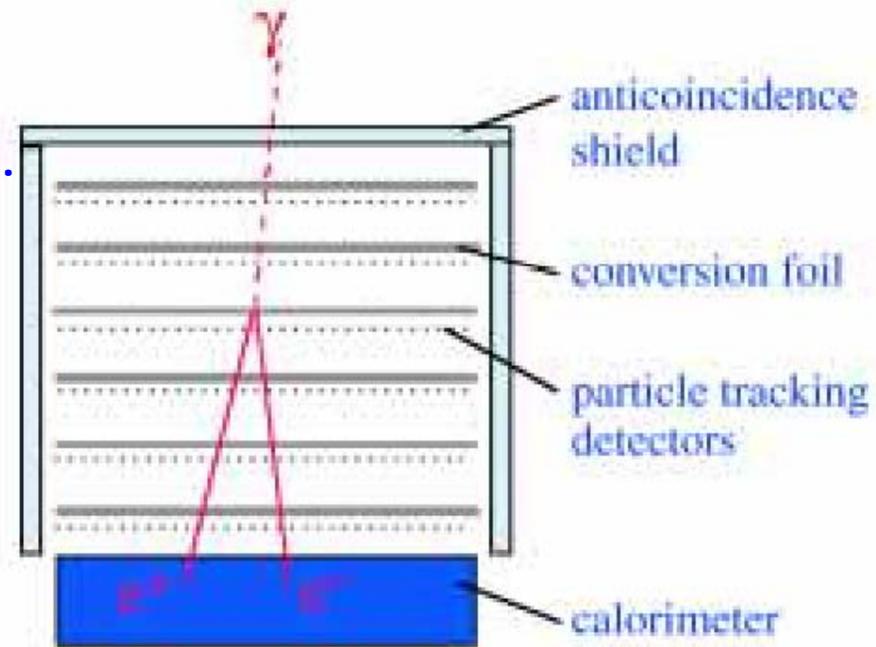


Figure 11-1 Principle of a pair conversion telescope.

Energie: Les $e^- e^+$ rayonnent des gamma (« brehmstrahlung »), les gammas créent de nouvelles paires $e^- e^+$, mais avec de moins en moins d'énergie (« cascade électromagnétique »). Pour certains cristaux, plastiques, huiles,..., l'ionisation crée de la lumière bleue, dite de *scintillation*. Pour une bonne mesure,

le calorimètre aura le plus de longueurs de radiation χ_o

possible. EGRET et GLAST: environ $1.5 \chi_o$ (tracker) + 8.5

χ_o (calorimètre) = $10 \chi_o$.

LAT (Large Area Telescope)

20 MeV-300 GeV

Budget: \$ 160 M

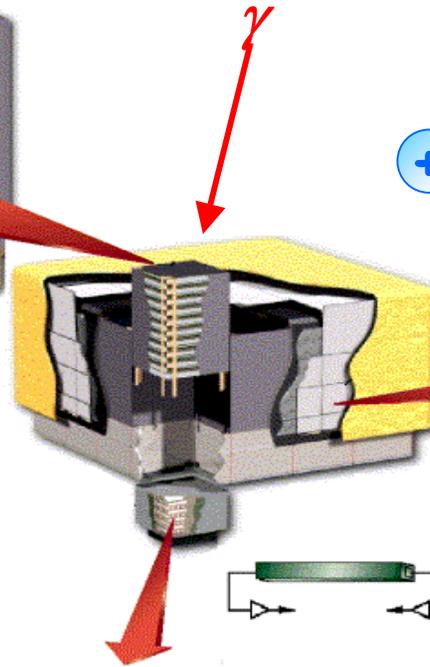
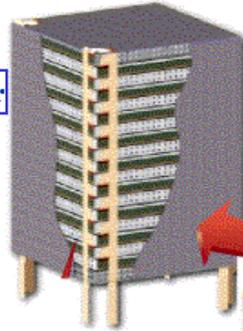
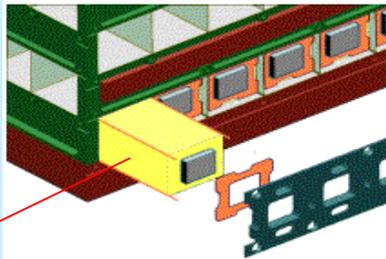
fine pitch: 228 μm
 12 x 0.03 X_0 front-end
 4 x 0.18 X_0 back-end
 2 blank planes
 884736 ch. of electronics

Si- W Tracker



CsI Calorimeter

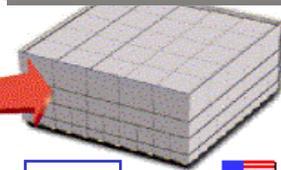
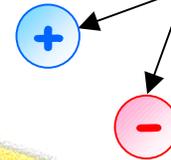
8.6 X_0 8 x 12 bars
 2.0 x 2.8 x 35.1 cm



Pair conversion telescope

16 towers

- Veto
- Tracker
- Calorimeter

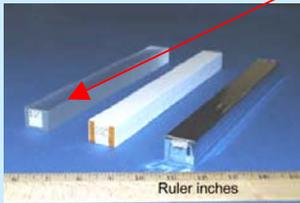


ACD

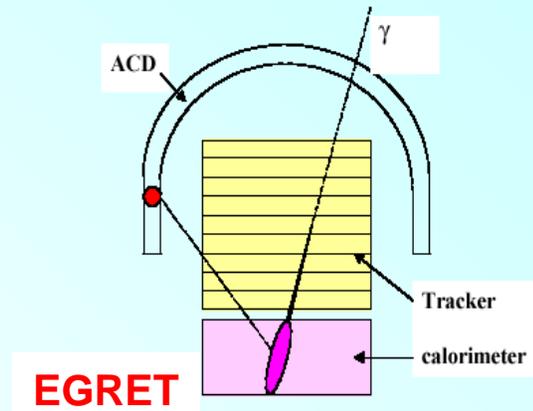
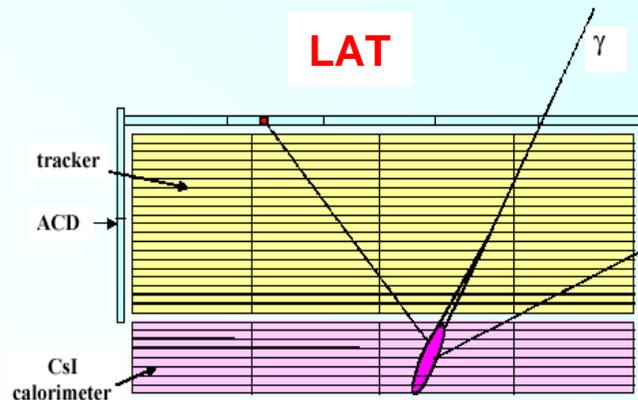


89 scintillator tiles
 0.9997 efficiency

Plastic scintillator to reject charged cosmic rays



Plus compact
 ==> champ de vue
 4.8 fois plus grand



Bon. Maintenant on sait ce que c'est. Alors? La limite à sa sensibilité?

EGRET a vu 271 sources de gamma avec $>5\sigma$ en ~ 3 ans.

(on avait dit $N = \text{FAT}$)

$T = 10$ jours c'est déjà beaucoup. Alors A ?

Surface Egret = deux feuilles de papier A4 = 1500 cm^2 . Faire plus grande?

GLAST $\rightarrow A = 10,000 \text{ cm}^2$.

Pour avoir $10,000$ de surface effective il y a en réalité 16400 cm^2 . (mamma mia)

Calorimètre CsI (cesium iodide) $8.5 \chi_o = 8.5 \times 1.99 \text{ cm} = 17 \text{ cm}$

$\rho = 4.51 \text{ gm/cm}^3$

$16400 \text{ cm}^2 \times 17 \text{ cm} \times 4.51 \text{ gm/cm}^3 = \mathbf{1260 \text{ kg}}$

sans compter les χ_o de tungstène de conversion du tracker et la structure mécanique.

Poids total EGRET 1810 kg , GLAST 3000 kg (un gros satellite).

La surface A est limité par le poids - compromis entre comptage (A) et la qualité de la mesure de l'énergie.

La limite à sa sensibilité?

On avait dit $N = FAT$

Quel est le flux minimum pour ne voir que 10 photons sur 10 jours?

$$F = N/AT = 1/AT = 1/(1500 \text{ cm}^2)/(8,640,000 \text{ s}) = 7.7 \times 10^{-9} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$$

$$7.7 \times 10^{-9} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$$

J'ai un peu triché.

Dans ce plot « 50 heures », pour les détecteurs au sol.

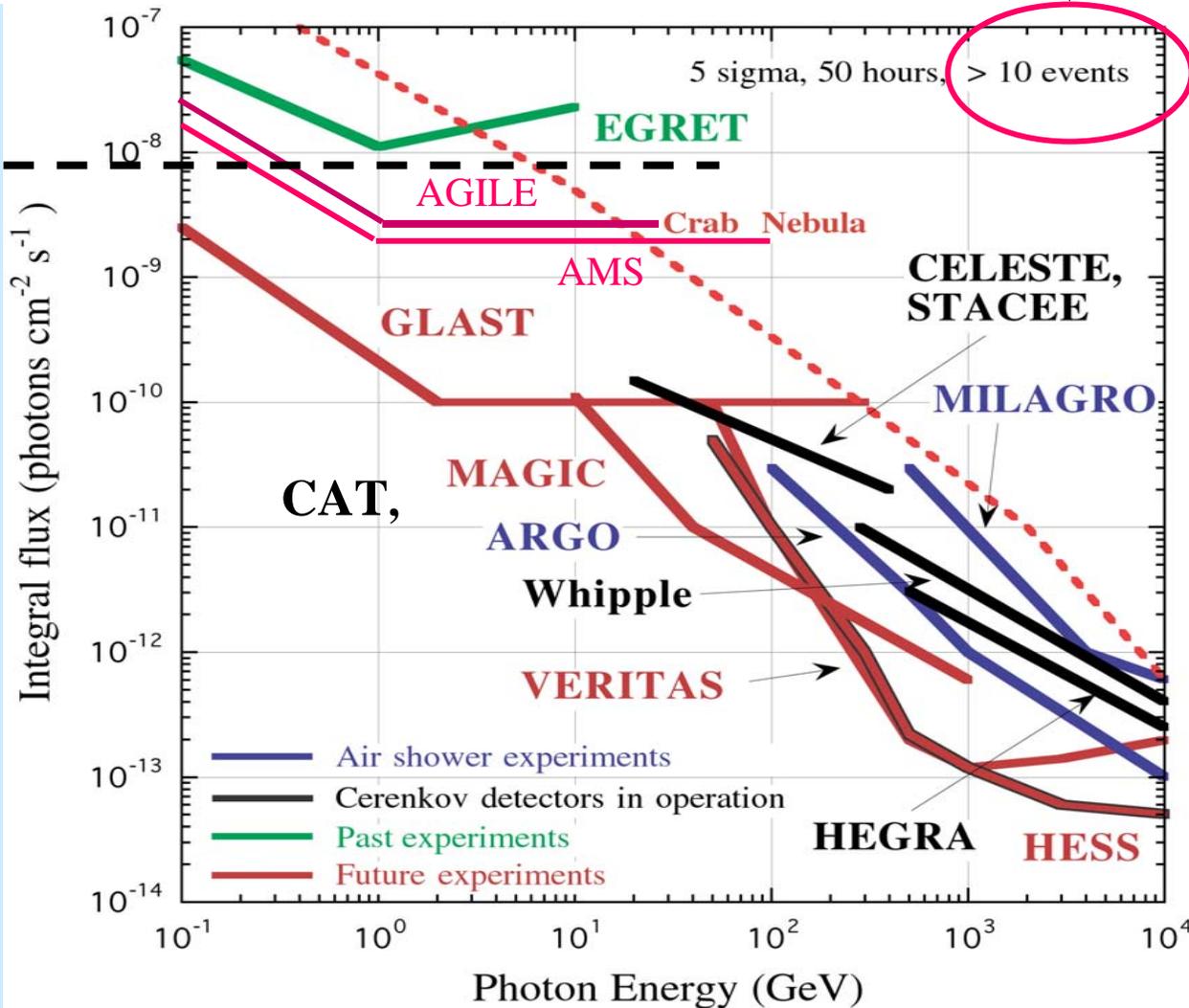
Pour satellite « 1 year all sky survey ».

Champ de vue EGRET

$$= 0.5 \text{ sr, soit ciel}/8\pi,$$

soit $365 / 8\pi = 15$ jours pour un bout du ciel.

**CE RAISONNEMENT
SUPPOSE AUCUN BRUIT.**



(Les rayons cosmiques chargés déclenchent un dispositif de veto.)

Les données sont dominées par un fond de gamma diffus.
Des noyaux ionisés (rayons cosmiques) tapent dans la poussière galactique, e.g. $pN \rightarrow \pi^0 X \rightarrow \gamma\gamma$. Soustraire ce fond pour voir les sources

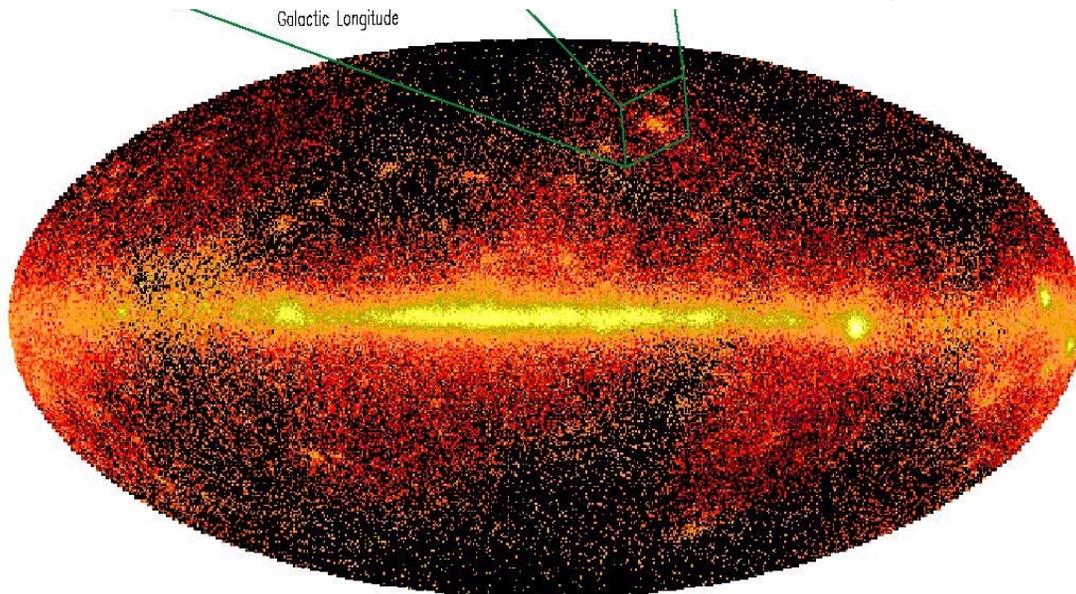
Sur 10 jours, sur qqs degrés, loin de la voie lactée, bruit $B \sim 100$ photons diffus.

Significance minimum pour déclarer avoir vu une source: 5σ .

Avec $5\sigma = S/\sqrt{B} = S/10$ on a $S=50$ photons est le minimum détectable.

$$F = N/AT = 1/AT = 50/(1500 \text{ cm}^2)/(864,000 \text{ s}) = 4 \times 10^{-8} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$$

ce qui tombe gentiment sur la courbe de sensibilité.



EGRET One-Year All-Sky Survey ($E > 100 \text{ MeV}$)

Pourquoi avoir pris qqs degrés dans l'exemple précédent?

Une particule chargée qui traverse de la matière l'ionise (on l'a déjà dit).

Imaginer la charge qui frôle le nuage d'électrons autour des atomes, ce qui

- i) excite l'atome
- ii) fait perdre de l'énergie à la particule
- iii) fait dévier la trajectoire de la particule
- iv) crée éventuellement de la lumière de scintillation

« dE/dx energy loss »
« multiple scattering »

26.3. Multiple scattering through small angles

A charged particle traversing a medium is deflected by many small angles. Most of this deflection is due to Coulomb scattering from nuclei. This is called multiple Coulomb scattering. (However, for hadronic interactions also contribute to multiple scattering.) The Coulomb scattering is well represented by the theory of Molière [32]. It is roughly Gaussian for small deflection angles, but at larger angles (greater than a few θ_0 , defined as the rms deflection angle), it is more like Rutherford scattering, having larger tails than does a Gaussian distribution.

If we define

$$\theta_0 = \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{\text{space}}^{\text{rms}} \quad (26.9)$$

then it is sufficient for many applications to use a Gaussian approximation for the central 98% of the projected angular distribution, with a width given by [33,34]

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} \left[1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right] \quad (26.10)$$

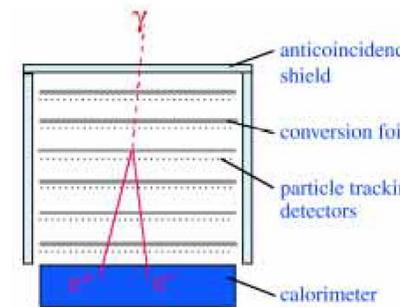
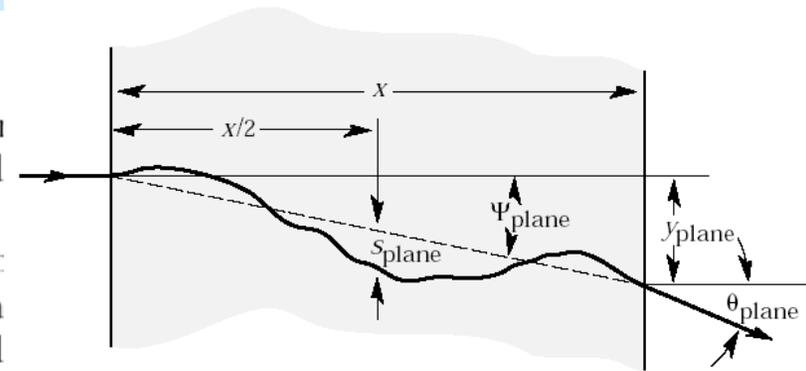


Figure 11-1 Principle of a pair conversion telescope

Tracker: $x/X_0 \sim 0.1 \Rightarrow 13.6 \text{ MeV}/100 \text{ MeV} \sqrt{0.1} = 2.5 \text{ degrés}$ glast

$dF/dE = k/E^p$ alors la plupart de photons près du seuil.

Optimiser x/X_0 vs. bras de levier...

PARTICLE PROPERTIES DATA BOOK <http://pdg.lbl.gov/>

K. Hagiwara et al., Phys. Rev. D 66, 010001 pdg = Particle Data Group

Des synthèses précis, courts, et pratiques sur une étendue étonnante de sujets.

Categories:

- Constants, Units, Atomic and Nuclear Properties
- Standard Model and Related Topics
- Particle Properties
- Hypothetical Particles
- Astrophysics and Cosmology
- Experimental Methods and Colliders
- Mathematical Tools
- Kinematics, Cross-Section Formulae, and Plots
- Authors, Introductory Text, History plots

<- dE/dx minimum en Csl

<- TOUT sur les quarks en qqs pages

<- « Cosmologie big bang pour les nulls »

<- relativité restreinte en 3 petites formules

=PDB

To order a copy of the *Review* or the *Particle Physics Booklet* from

all other areas, write to

CERN Scientific Information Service
CH-1211 Geneva 23
Switzerland

or via the WWW from CERN

(<http://weplib.cern.ch/publreq.php>)

C'est *GRATUIT* si les stocks ne sont pas en rupture ==>>
ayez *TOUJOURS* votre copie en poche!!

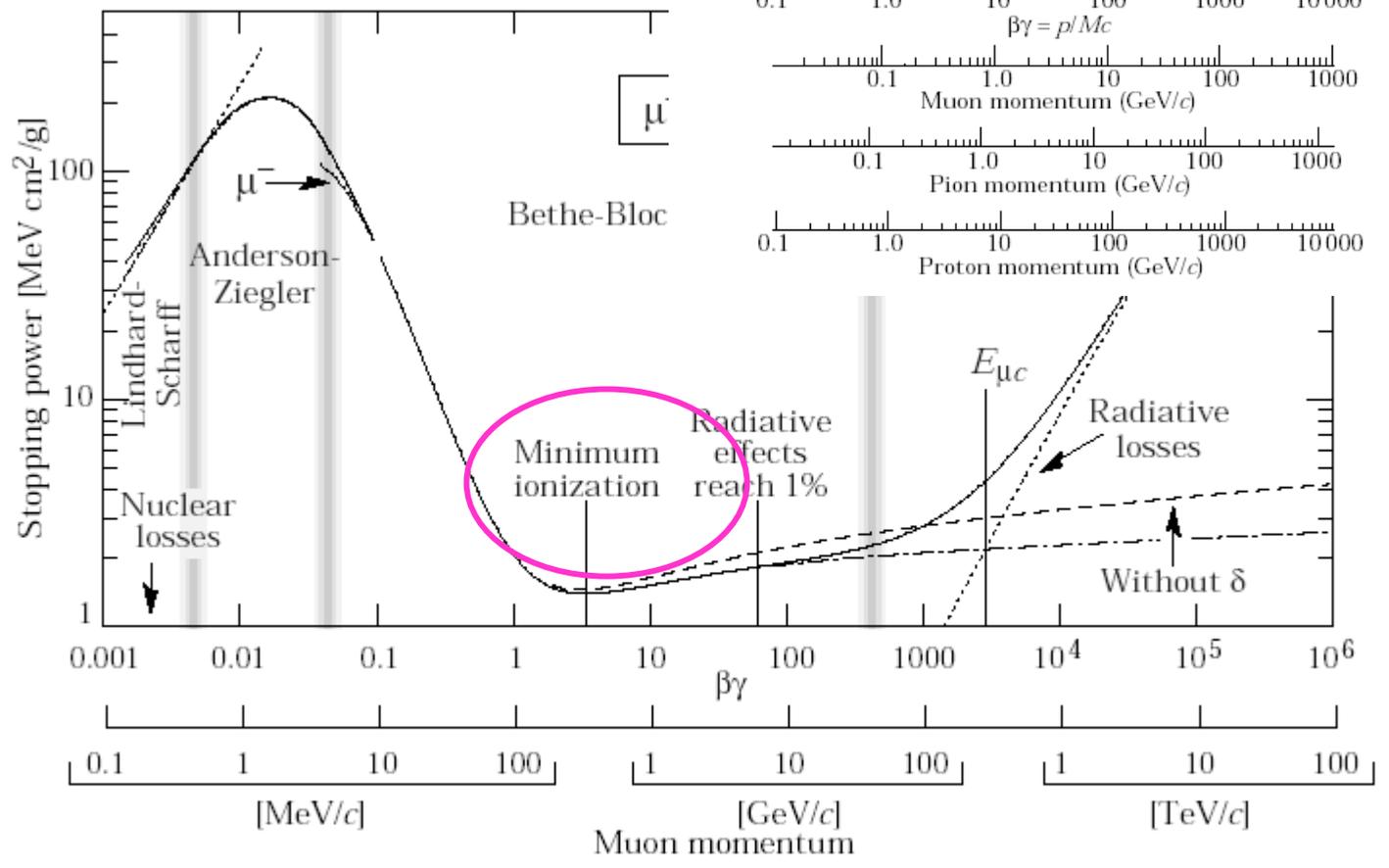
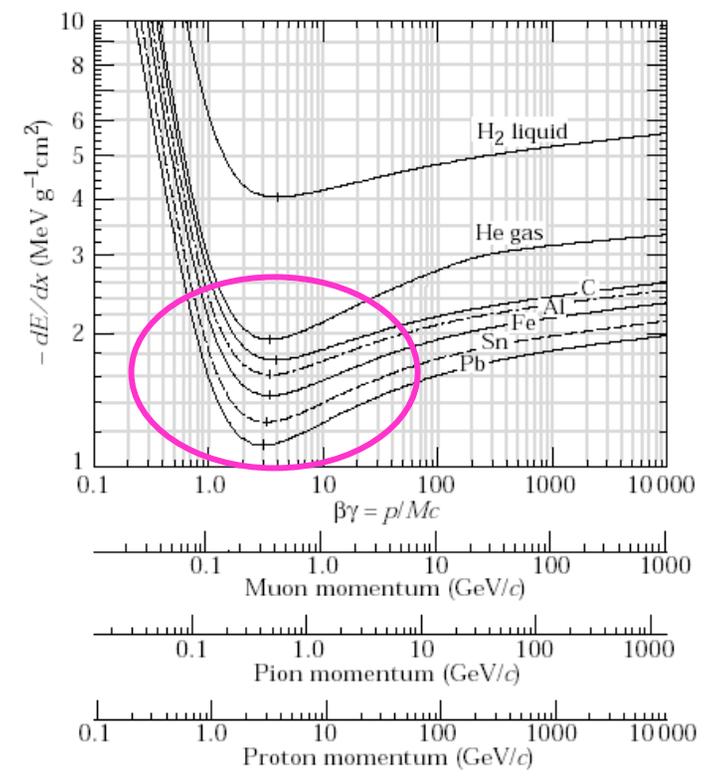
26. Passage of particles through matter

26.2. Electronic energy loss by heavy particles [1-5]

Moderately relativistic charged particles other than electrons lose primarily by ionization and atomic excitation. The mean rate of energy loss is given by the Bethe-Bloch equation,

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

Here T_{\max} is the maximum kinetic energy which can be imparted to a single collision, and the other variables are defined in Table 26.1. With A in g/mol and Z in g/mol



6. ATOMIC AND NUCLEAR PROPERTIES OF MATERIALS

Table 6.1. Revised May 2002 by D.E. Groom (LBNL). Gases are evaluated at 20°C and 1 atm (in parentheses) or at STP [square brackets]. Densities and refractive indices without parentheses or brackets are for solids or liquids, or are for cryogenic liquids at the indicated boiling point (BP) at 1 atm. Refractive indices are evaluated at the sodium D line. Data for compounds and mixtures are from Refs. 1 and 2. Further materials and properties are given in Ref. 3 and at <http://pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties>.

| Material | Z | A | $\langle Z/A \rangle$ | Nuclear ^a collision length λ_c {g/cm ² } | Nuclear ^a interaction length λ_I {g/cm ² } | $dE/dx _{min}^b$ { $\frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$ } | Radiation length ^c X_0 {g/cm ² } {cm} | Density {g/cm ³ } {g/ℓ} for gas | Liquid boiling point at 1 atm(K) | Refractive index n { $(n-1) \times 10^6$ for gas} |
|-----------------------|---|----------|-----------------------|---|---|--|---|---|---|--|
| H ₂ gas | 1 | 1.00794 | 0.99212 | 43.3 | 50.8 | (4.103) | 61.28 ^d (731000) | (0.0838)[0.0899] | | [139.2] |
| H ₂ liquid | 1 | 1.00794 | 0.99212 | 43.3 | 50.8 | 4.034 | 61.28 ^d | 0.0708 | 20.39 | 1.112 |
| D ₂ | 1 | 2.0140 | 0.49652 | 45.7 | 54.7 | (2.052) | 122.4 | 0.169[0.179] | 23.65 | 1.128 [138] |
| He | 2 | 4.002602 | 0.49968 | 49.9 | 65.1 | (1.937) | 94.32 | 0.1249[0.1786] | 4.224 | 1.024 [34.9] |

AUGER



| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----|----------|---------|-------|-------|---------|-------|---------|-----------------|----------|-------------|
| W | 74 | 183.84 | 0.40250 | 110.3 | 185 | 1.145 | 6.76 | 0.35 | 19.3 | | — |
| Pt | 78 | 195.08 | 0.39984 | 113.3 | 189.7 | 1.129 | 6.54 | 0.305 | 21.45 | | — |
| Pb | 82 | 207.2 | 0.39575 | 116.2 | 194 | 1.123 | 6.37 | 0.56 | 11.35 | | — |
| U | 92 | 238.0289 | 0.38651 | 117.0 | 199 | 1.082 | 6.00 | ≈0.32 | ≈18.95 | | — |
| Air, (20°C, 1 atm.), [STP] | | | 0.49919 | 62.0 | 90.0 | (1.815) | 36.66 | [30420] | (1.205)[1.2931] | 78.8 | (273) [293] |
| H ₂ O | | | 0.55509 | 60.1 | 83.6 | 1.991 | 36.08 | 36.1 | 1.00 | 373.15 | 1.33 |
| CO ₂ gas | | | 0.49989 | 62.4 | 89.7 | (1.819) | 36.2 | [18310] | [1.977] | | [410] |
| CO ₂ solid (dry ice) | | | 0.49989 | 62.4 | 89.7 | 1.787 | 36.2 | 23.2 | 1.563 | sublimes | — |

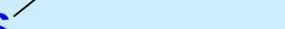
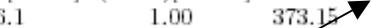
GLAST

EGRET

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|--|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|--|-------|
| Bismuth germanate (BGO) ^e | | | 0.42065 | 98.2 | 157 | 1.251 | 7.97 | 1.12 | 7.1 | | 2.15 |
| Cesium iodide (CsI) | | | 0.41569 | 102 | 167 | 1.243 | 8.39 | 1.85 | 4.53 | | 1.80 |
| Lithium fluoride (LiF) | | | 0.46262 | 62.2 | 88.2 | 1.614 | 39.25 | 14.91 | 2.632 | | 1.392 |
| Sodium fluoride (NaF) | | | 0.47632 | 66.9 | 98.3 | 1.69 | 29.87 | 11.68 | 2.558 | | 1.336 |
| Sodium iodide (NaI) | | | 0.42697 | 94.6 | 151 | 1.305 | 9.49 | 2.59 | 3.67 | | 1.775 |

HESS

ANTARES



Résumé: GLAST 25 fois plus sensible qu'EGRET

| | EGRET | GLAST | |
|--|---|---|----------------------------|
| Detector technology | Spark chambers+ NaI calorimeter | Si-strips+ CsI calorimeter | |
| Energy range | 20 MeV-30 GeV | 20 MeV-300 GeV | |
| Energy resolution | 10% | 10% | |
| Effective area | 1500 cm ² | 10000 cm ² | x 6.7 |
| Deadtime per photon | 100 ms | 20μs | (Sursauts gamma) |
| Field of view | 0.5 sr | 2.4 sr | x 4.8 |
| Angular resolution (PSF) | 5.8° at 100 MeV | 3° at 100 MeV 0.2° > 10 GeV | (5.8/3) ² = 3.7 |
| Source location determination | 5'-30' | 30''-5' | (PSF/√N) |
| Sensitivity (>100 MeV) | 10 ⁻⁷ cm ⁻² s ⁻¹ | 4 10 ⁻⁹ cm ⁻² s ⁻¹ | x 25 |
| Power | 160 W | 650W | |
| Orbit | 350 km/ 28.5° | 550 km/ 28.5° | |
| Mass | 1810 kg | 3000 kg | |
| Lifetime | 1991-2000 | 2006-2011(16) | |

Fond $6.7/3.7 = 1.8$ plus grand, donc sensibilité $6.7 \times 4.8 / \sqrt{1.8} = 24$

Et avec 25x on gagne quoi?

Des 271 sources EGRET, environ 70 sont des « blazars »

dont 3/4 FSRQ = Flat Spectrum Radio Quasars, 1/4 objets type BL Lacertae.

Modèle - le jet de l'AGN est « in your face ».



25x plus faible veut dire 5x plus loin. ($1/R^2$)

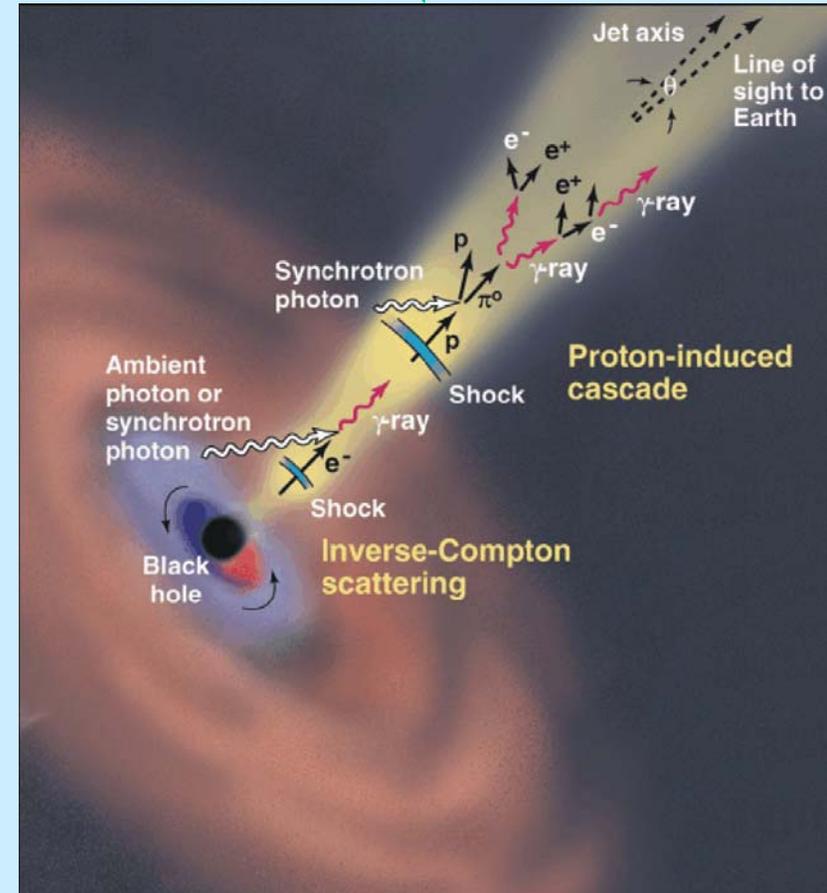
5x plus loin, 125x plus de l'Univers. (R^3)

125 x 70 = 8750 blazars !!!!!

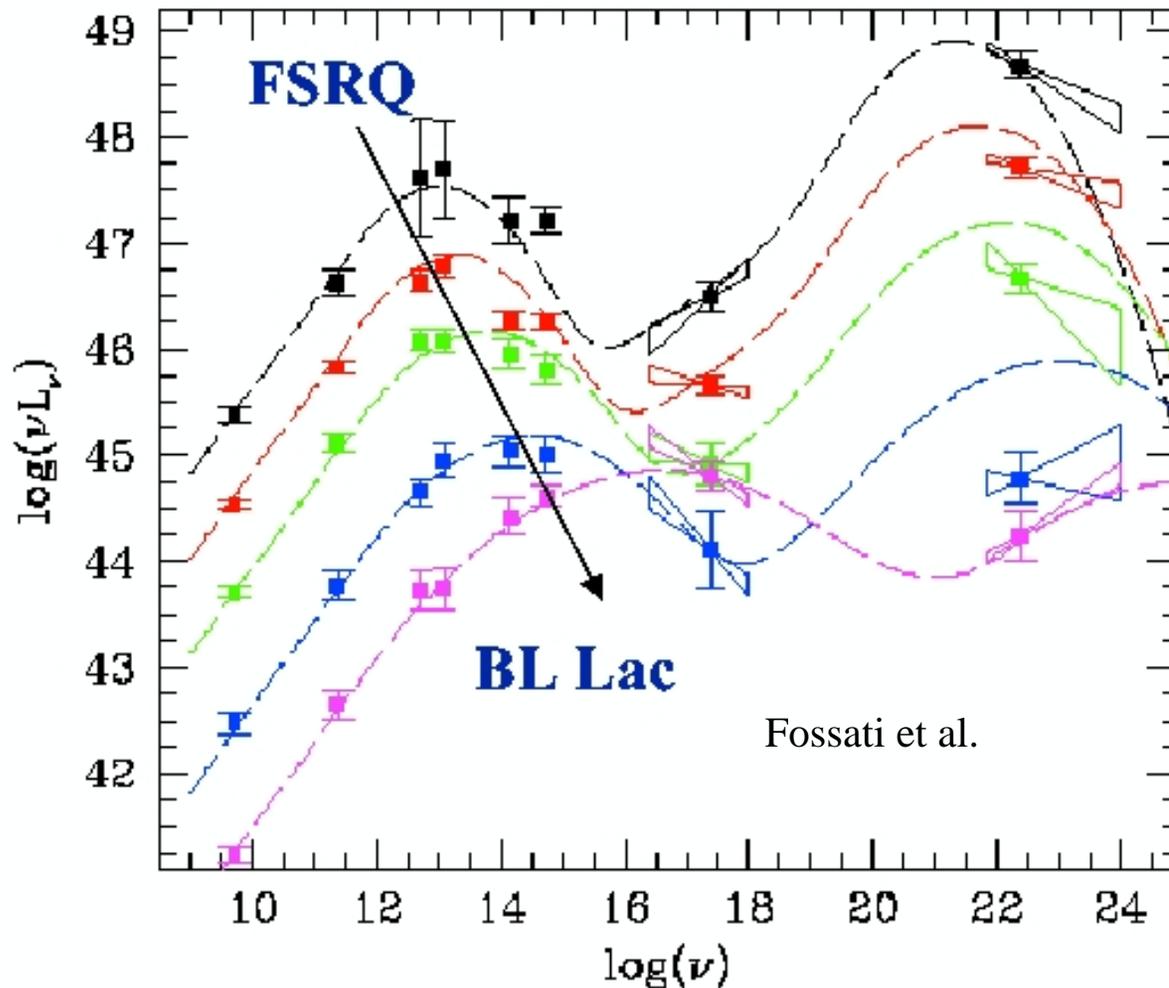
Evolution

Plus loin, l'Univers est plus jeune.

Un BL Lac serait un vieux FSRQ.



Séquence des AGNs



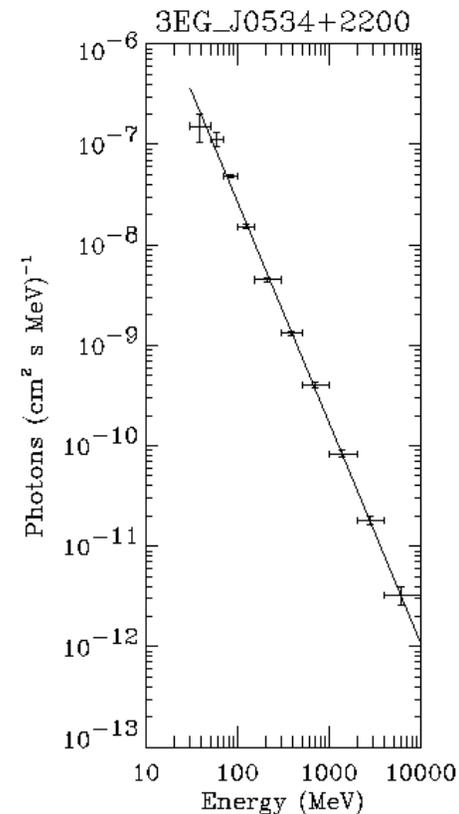
Achtung: à gauche, νL_ν .

En bas (et avant) on a dN/dE .

Sachez que

$$E^2 \frac{dN}{dE} = \nu L_\nu$$

alors $1/E^2$ apparaît comme une ligne horizontale.



FSRQ → LBL → HBL?

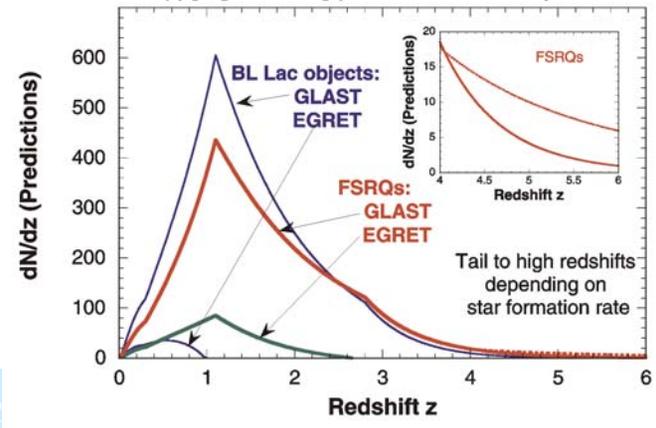
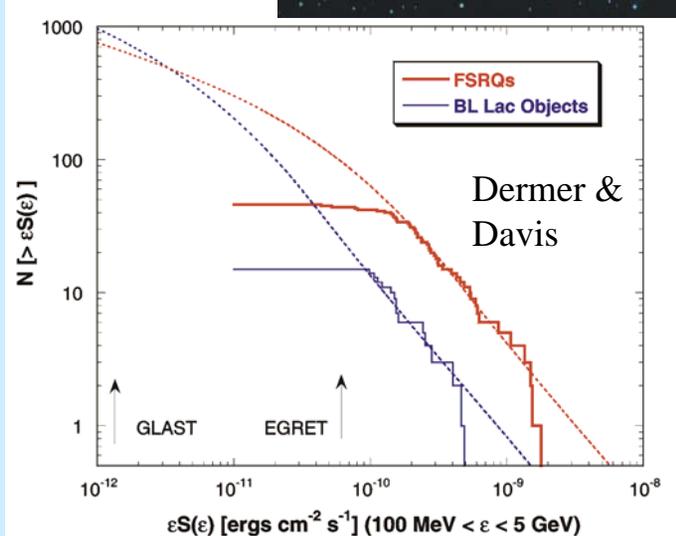
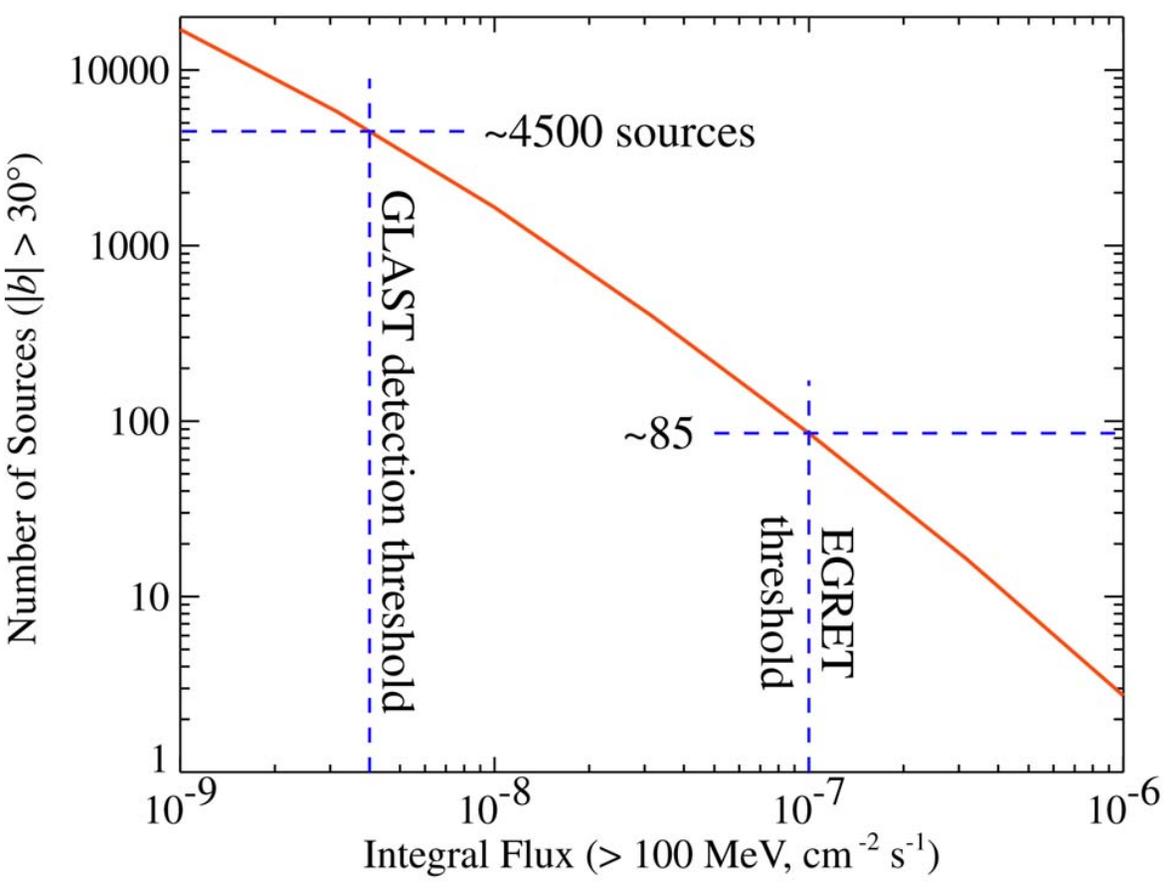
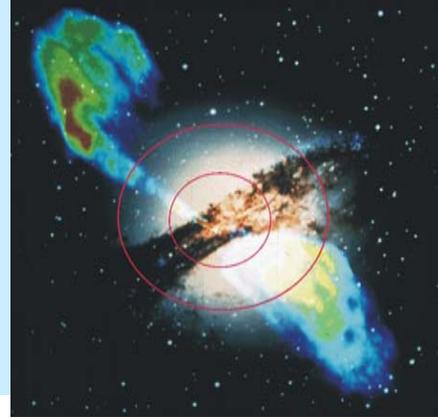
Tarissement de la matière accrétée?

Pour expliquer l' **Evolution**

Evolution:

nombre d'AGN détectables pas linéaire en (sensibilité)^{3/2}

Ainsi, compter le nombre d'AGN visibles fourni une information.



5 blazars avec $F > 10^{-6} \text{ ph/cm}^2 \text{ s}$
dans le champ de vue en permanence

Avant de finir avec les détecteurs orbitaux:

AGILE sera lancé par l'Italie en 2005.

Calorimètre mince, petit tracker silicium.

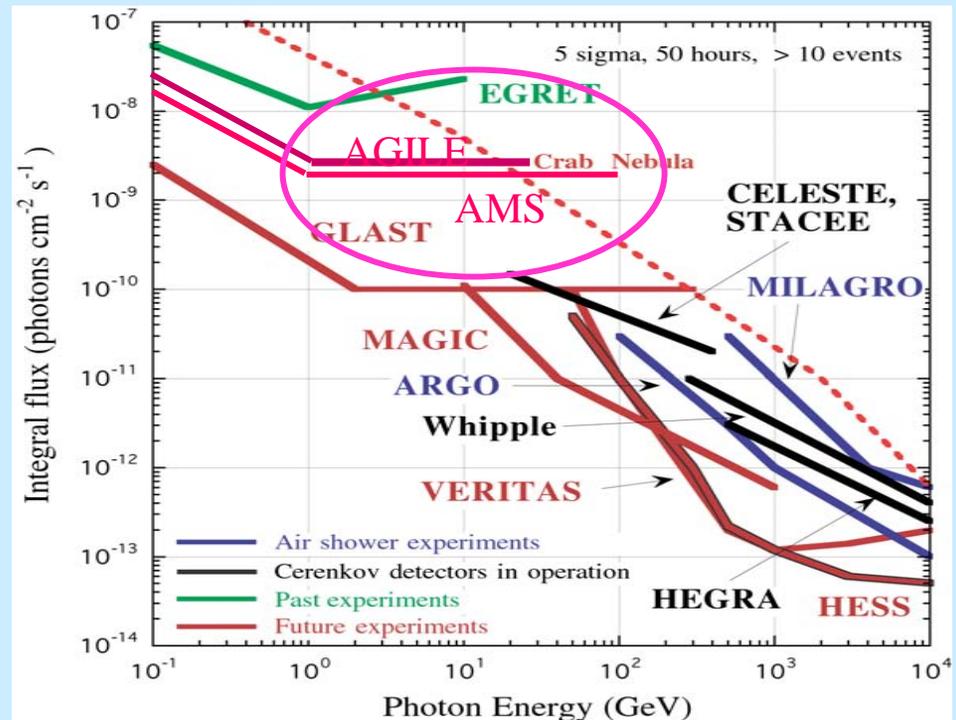
Performance meilleure qu'EGRET.

AMS sera lancé par la navette, placé sur ISS en 2007.

Conçu par la recherche de l'antimatière

mais bonne sensibilité aux gammas.

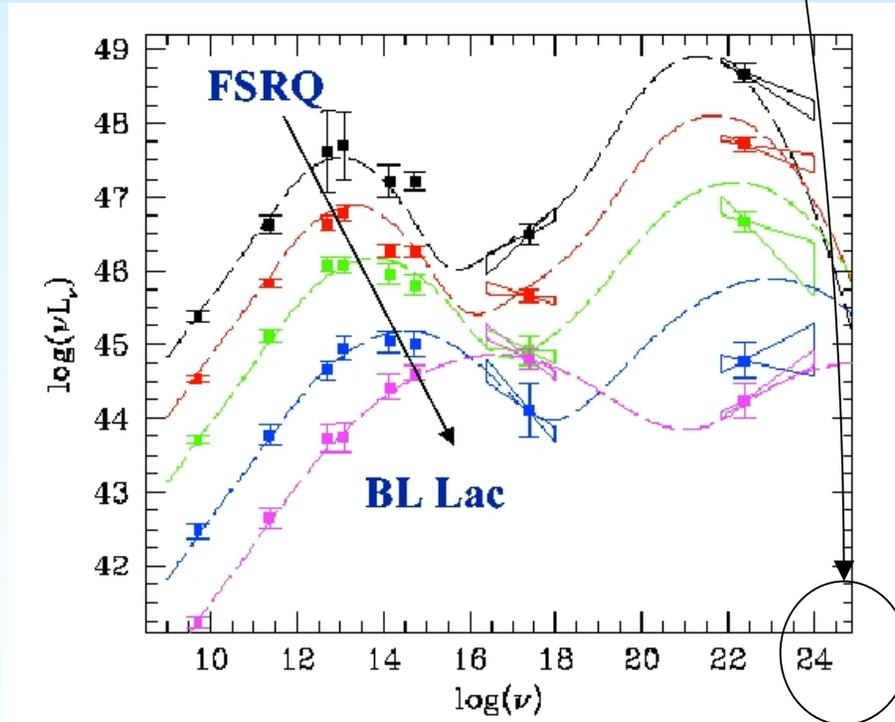
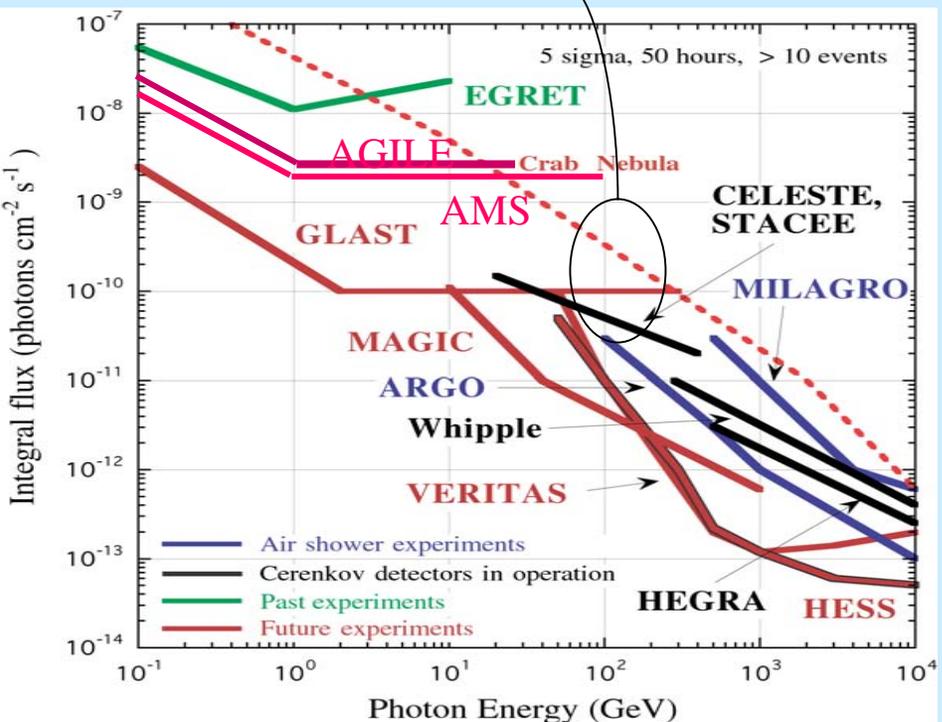
Voir exposé par Catherine LELUC



Détection au Sol

- On voudrait continuer les mesures au delà de 10^{25} Hz = 42 GeV.
- On voudrait voir des variations de signaux en moins de 10 jours.
(on en a vu en moins d'une demie-heure au sol)
- La surface de Glast est simplement trop petite.
(à 100 GeV, sensibilité ~ Crab/2 sur longue durée ==> ~ 5 sources accessibles)

SOLUTION: technique de Tcherenkov Atmosphérique



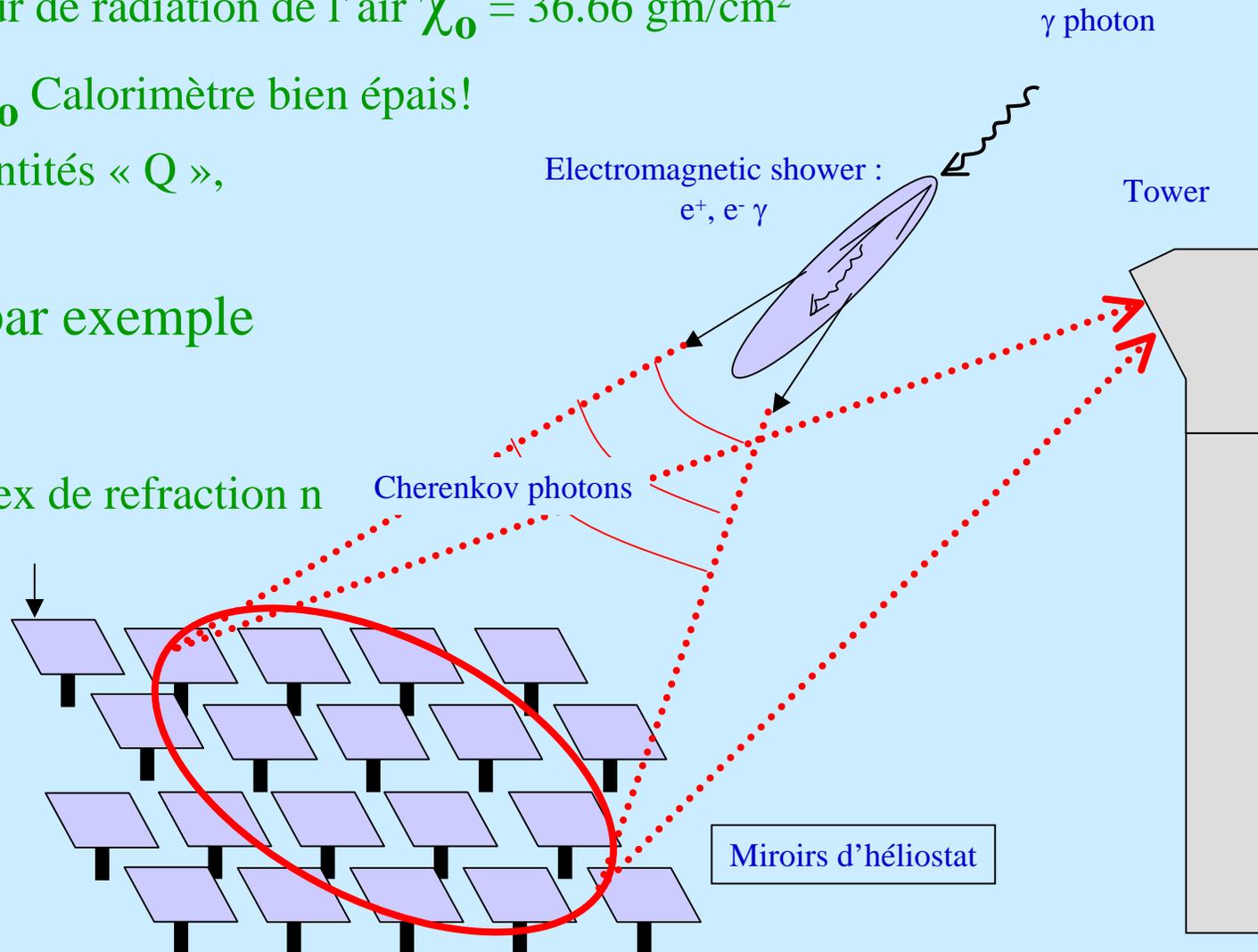
On remplace Plomb ou CsI par l'atmosphère

Au remplace lumière de scintillation par lumière Tcherenkov

- Le poids de l'atmosphère $\sim 1000 \text{ gm/cm}^2$.
- Data book, longueur de radiation de l'air $\chi_0 = 36.66 \text{ gm/cm}^2$
- $1000/36.66 = 27 \chi_0$ Calorimètre bien épais!
- Pour plusieurs quantités « Q »,
$$Q = Q_0 e^{-h/h_0}$$
avec $h_0 \sim 7 \text{ km}$, par exemple

ρ (densité), χ ,

$\delta = n-1$, pour index de refraction n



26.5. Electromagnetic cascades

(from PDB)

When a high-energy electron or photon is incident on a thick absorber, it initiates an electromagnetic cascade as pair production and bremsstrahlung generate more electrons and photons with lower energy. The longitudinal development is governed by the high-energy part of the cascade, and therefore scales as the radiation length in the material. Electron energies eventually fall below the critical energy, and then dissipate their energy by ionization and excitation rather than by the generation of more shower particles. In describing shower behavior, it is there variables

$$t = x/X_0$$

$$y = E/E_c,$$

so that distance is measured in units of radiation energy.

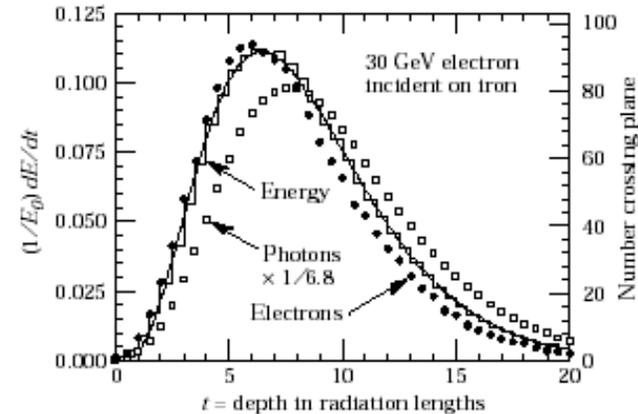


Figure 26.17: An EGS4 simulation of a 30 GeV electron-induced cascade in iron. The histogram shows fractional energy deposition per radiation length, and the curve is a gamma-function fit to the distribution. Circles indicate the number of electrons with total energy greater than 1.5 MeV crossing planes at $X_0/2$ intervals (scale on right) and the squares the number of photons with $E \geq 1.5$ MeV crossing the planes (scaled down to have same area as the electron distribution).

The mean longitudinal profile of the energy deposition in an electromagnetic cascade is reasonably well described by a gamma distribution [52]:

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)} \quad (26.29)$$

The maximum t_{\max} occurs at $(a-1)/b$. We have made fits to shower profiles in elements ranging from carbon to uranium, at energies from 1 GeV to 100 GeV. The energy deposition profiles are well described by Eq. (26.29) with

$$t_{\max} = (a-1)/b = 1.0 \times (\ln y + C_j), \quad j = e, \gamma, \quad (26.30)$$

where $C_e = -0.5$ for electron-induced cascades and $C_\gamma = +0.5$ for photon-induced cascades. To use Eq. (26.29), one finds $(a-1)/b$ from Eq. (26.30) and Eq. (26.28), then

Cascade: le nombre d'électrons *double*

avec chaque χ_0 parcouru. A chaque stade

l'énergie moyenne des électrons est moitié

Quand cette énergie est réduite à une

valeur critique $E_c \sim 80$ MeV dans l'air, la

création d'électrons s'arrête et les électrons

sont absorbés en se propageant.

Nb. maximum d'électrons vers $6 \chi_0$

$$h_{\max} = 7 \ln(27/6) = 11 \text{ km}$$

L'analogie électromagnétique du bang supersonique

Si on place une charge quelque part, son champ électrique se propagera dans l'espace avec une vitesse c/n , n étant l'index de réfraction du milieu.

Si cette particule chargée qui se propage plus vite que son rayonnement,

$$v > c/n$$

les ondes s'empilent. Cette onde de choc électromagnétique est de la lumière visible!

Effet prédit par Tcherekov en 1937 (prix Nobel, 1958).

Air au niveau de la mer, $n= 1.00273$, angle Tcherekov ~ 1.5 degrés.

A 11km, la moitié.

Prévoir des douzaines

de photons par mètre,

400 à 600 nm.

Parcours de tous

les électrons d'une

cascade:

des kilomètres.

CELESTE:

30 GeV vaut

30 photons sur un miroir de 54 m²,

sur quelques nanosecondes.

Cerenkov Radiation. The half-angle θ_c of the Čerenkov cone for a particle with velocity v in a medium with index of refraction n is

$$\begin{aligned}\theta_c &= \arccos(1/n\beta) \\ &\approx \sqrt{2(1 - 1/n\beta)} \quad \text{for small } \theta_c, \text{ e.g. in gases.}\end{aligned} \quad \text{(from PDB)}$$

The threshold velocity β_t is $1/n$, and $\gamma_t = 1/(1 - \beta_t^2)^{1/2}$. Therefore, $\beta_t \gamma_t = 1/(2\delta + \delta^2)^{1/2}$, where $\delta = n - 1$. Values of δ for various commonly used gases are given as a function of pressure and wavelength in Ref. 71. For values at atmospheric pressure, see Table 6.1. Data for other commonly used materials are given in Ref. 72.

The number of photons produced per unit path length of a particle with charge ze and per unit energy interval of the photons is

$$\begin{aligned}\frac{d^2 N}{dE dx} &= \frac{\alpha z^2}{\hbar c} \sin^2 \theta_c = \frac{\alpha^2 z^2}{r_e m_e c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(E)}\right) \\ &\approx 370 \sin^2 \theta_c(E) \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-1} \quad (z = 1),\end{aligned} \quad (26.37)$$

or, equivalently,

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi \alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right). \quad (26.38)$$

Détection: Cherenkov light in water / ice

10000000000 m³
~ 5000 PMTs
Threshold ~ 1 TeV

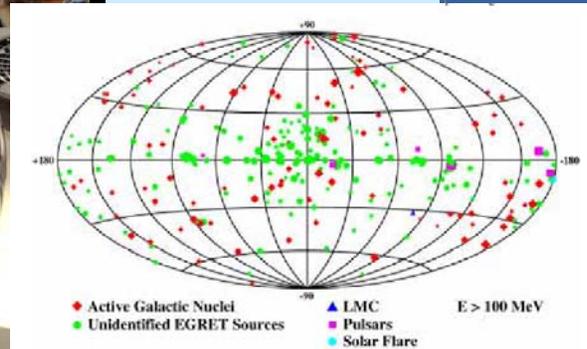
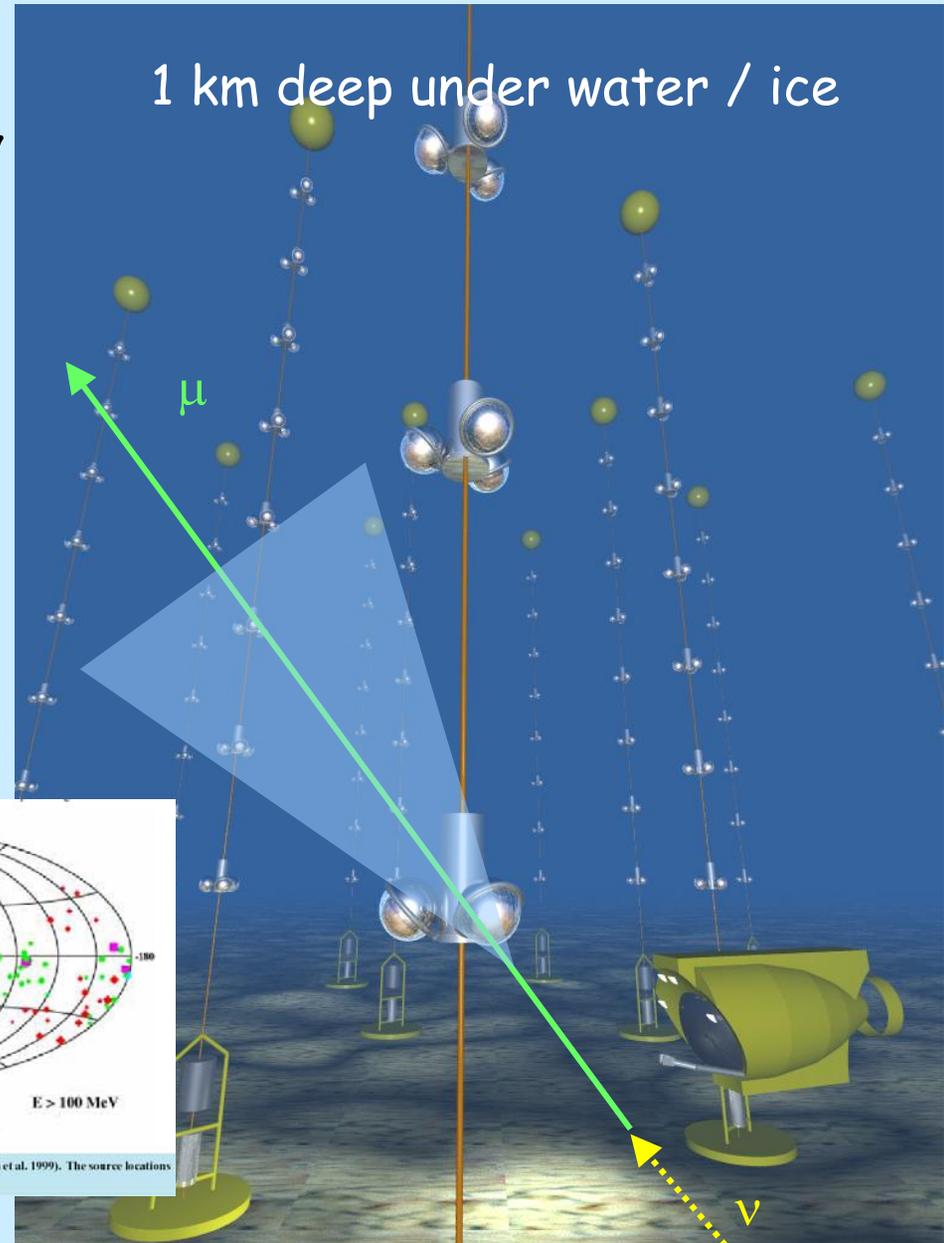
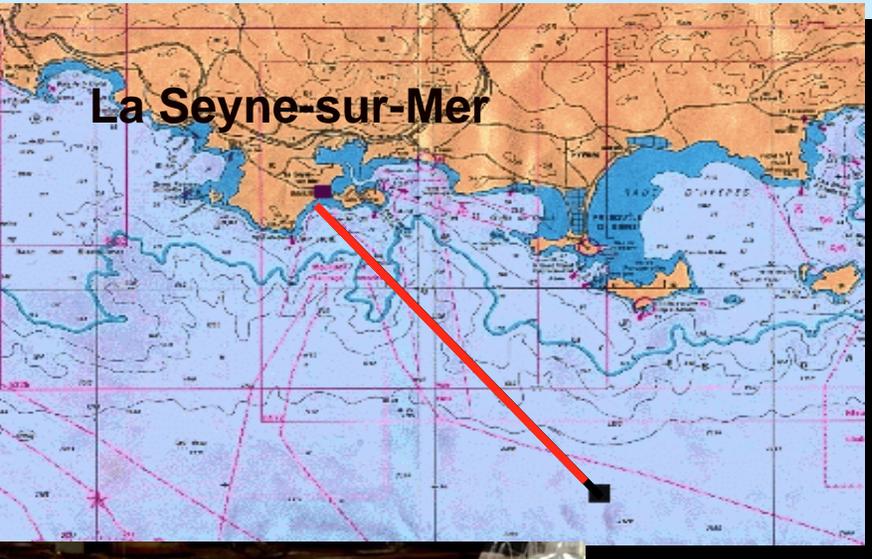
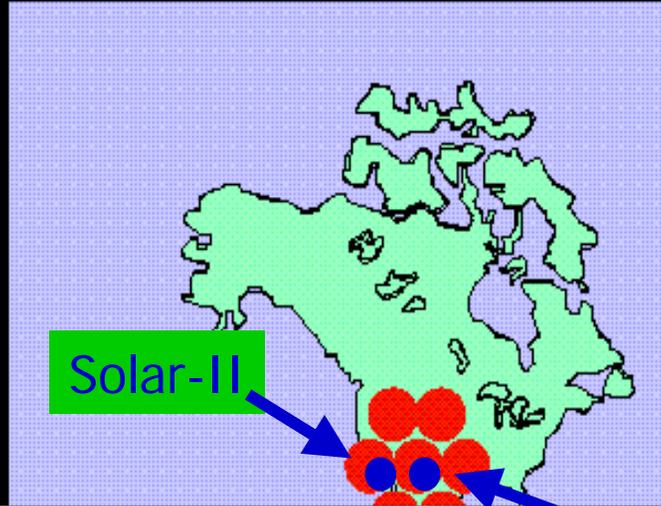


Figure 4-1 Third EGRET Catalog of high-energy gamma-ray sources (Hartman et al. 1999). The source locations are shown in Galactic coordinates.

Large projects in high

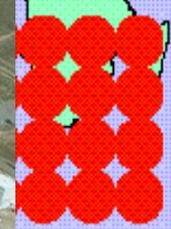
gamma-ray astronomy



Stacee



E.S.S.



Reprenons le fil rouge: quelle est la sensibilité?

On a dit, une source de lumière à 9 km (11 km au dessus de la mer), qui éclaire avec un angle Tcherenkov de moins d'un degré (prenons 10 mrad).

N'oublions pas la diffusion multiple:

supposons gamma primaire de 100 GeV, après $6\chi_0$ $100/2^6 = 1.5$ GeV/électron,

alors $\theta \sim 13.6/1500 \sqrt{6} = 20$ mrad.

Somme en quadrature de 20 et 10 ---> 22 mrad.

Le rayon de la tâche éclairée au sol sera **9 km x 22 mrad = 200 mètres**

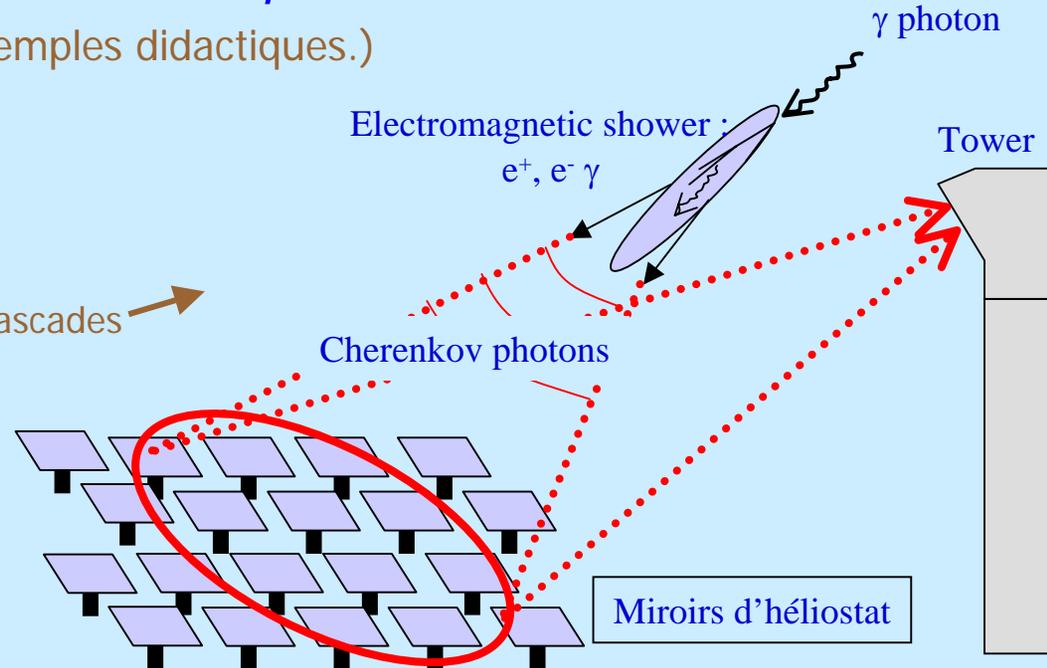
Si le détecteur se trouve qq part sur ces $\pi r^2 = \mathbf{125,000 \text{ m}^2}$ il verra de la lumière!

(valeurs non-contractuelles, ce sont des exemples didactiques.)

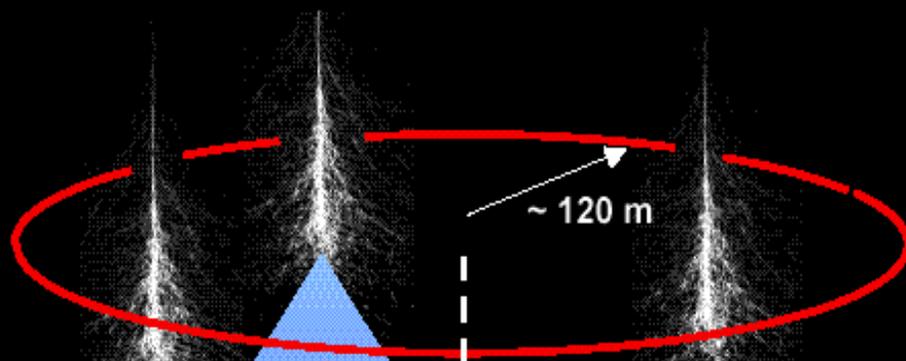
Au sol, on a une surface d'enfer.



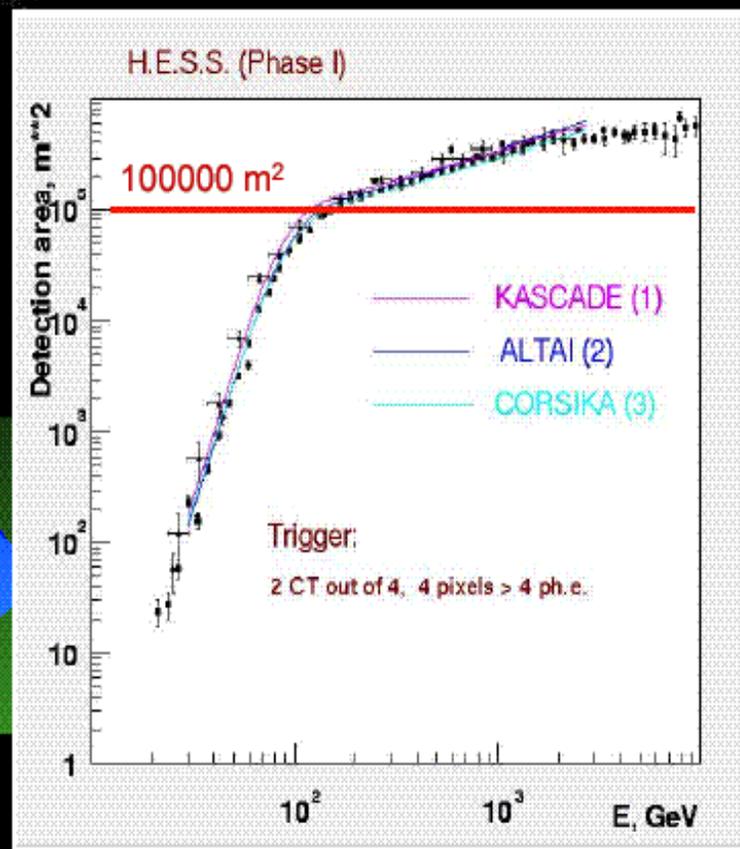
(Remarquez que les cascades se ressemblent...)



Effective detection area



about 50000 m²



(Slide W. Hoffman)

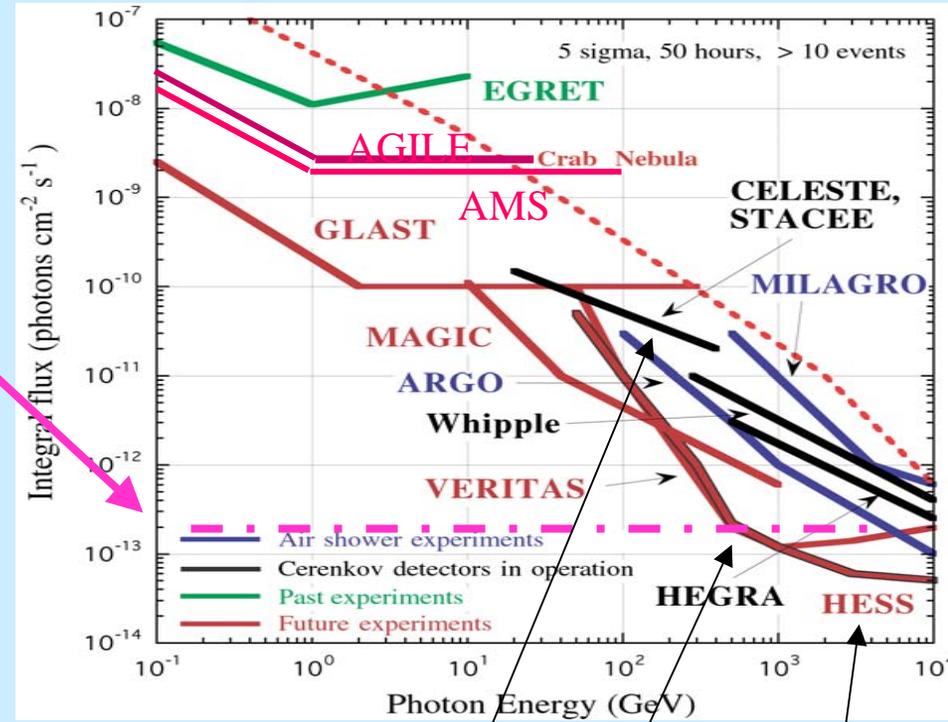
Reprenons la petite formule du transparent 11: $F = N/AT$

Pour $N=10$ photons et $T = 1$ jour au lieu de 10

La valeur $50,000 \text{ m}^2$ est plus fiable

$$F = 10 / 5 \times 10^8 \text{cm}^2 / (86,400 \text{ s})$$
$$= 2.3 \times 10^{-14} \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$$

Ces calculs à la louche (calculs louches?)
ne marchent pas si mal...



d'accord

Trop bon

Pas de tout d'accord

MAIS: Nous n'avons rien dit sur le fond dû au rayons cosmiques chargés, et pourtant il est *grand*.

DEUX variantes de télescope Tcherenkov :

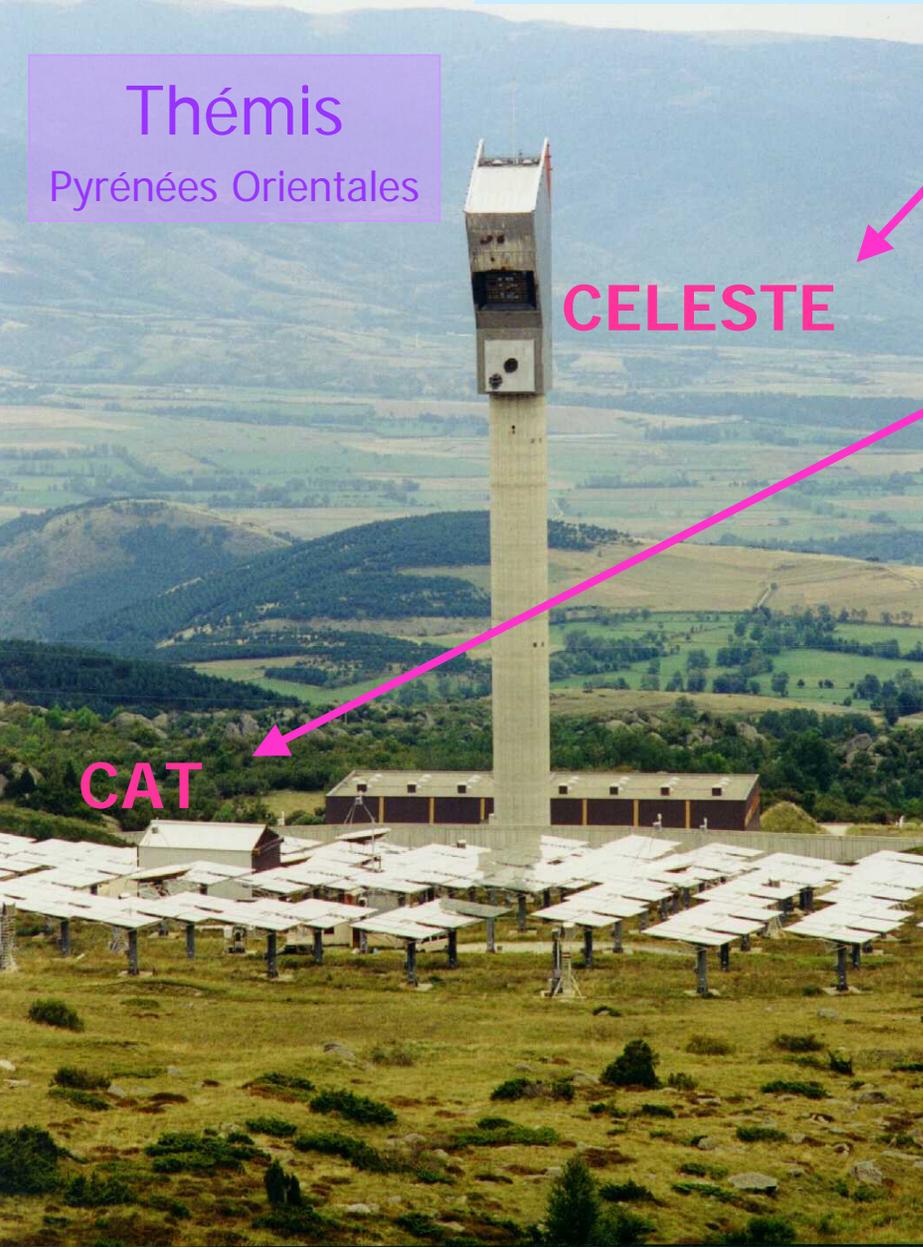
“wavefront samplers” et “imagers”

Thémis

Pyrénées Orientales

CELESTE

CAT



“wavefront samplers”:
conceptuellement les plus simples.
But - descendre en énergie au moyen
de la vaste surface de miroirs aux centrales
solaires. Sensibilité dépassée par HESS et
VERITAS, et Magic et Cangaroo.

Ma propre manip!

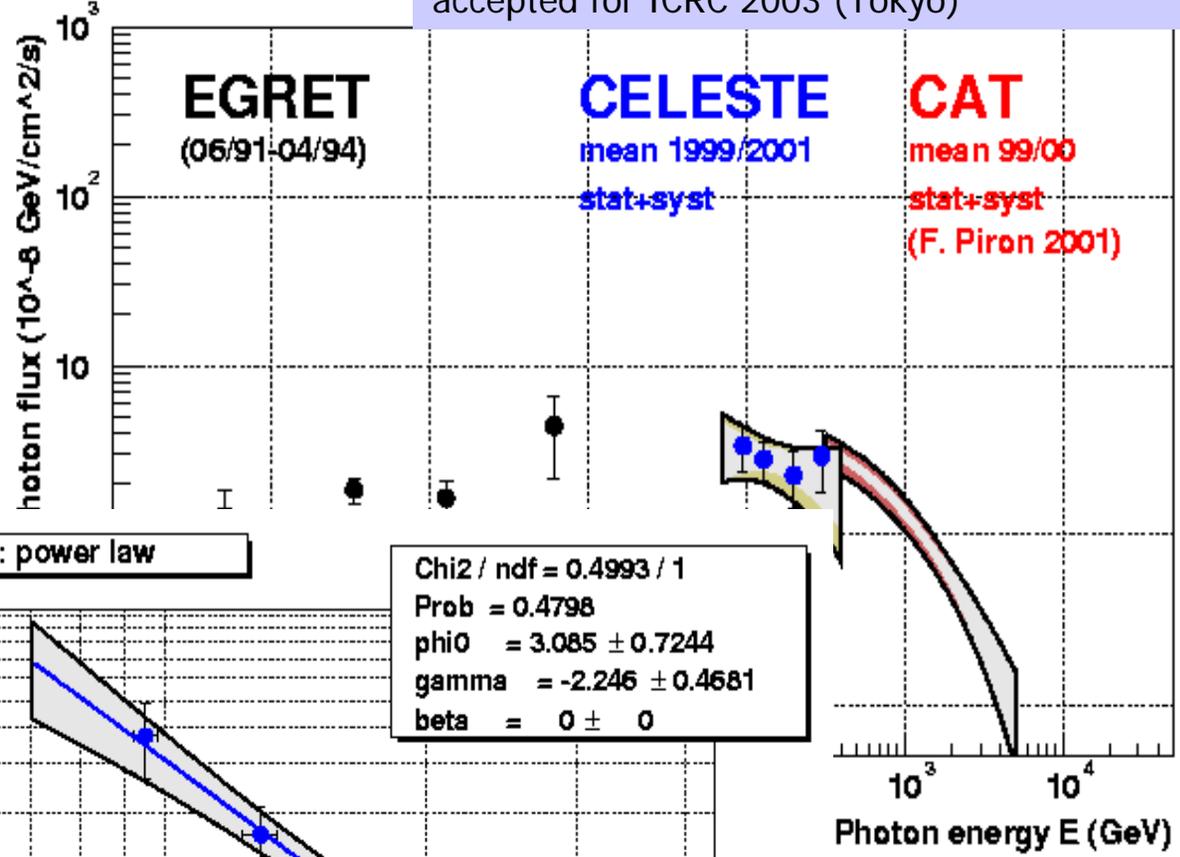
Je n'en parlerai pas pour gagner du temps.

Disons... nous sommes les seuls au monde
à avoir vu le Crabe et Mrk 421 en dessous
de 100 GeV depuis le sol.

“imagers” : on y va!

NuFNu : power law

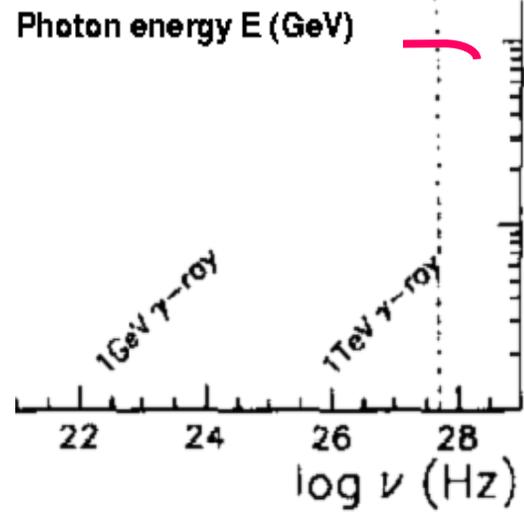
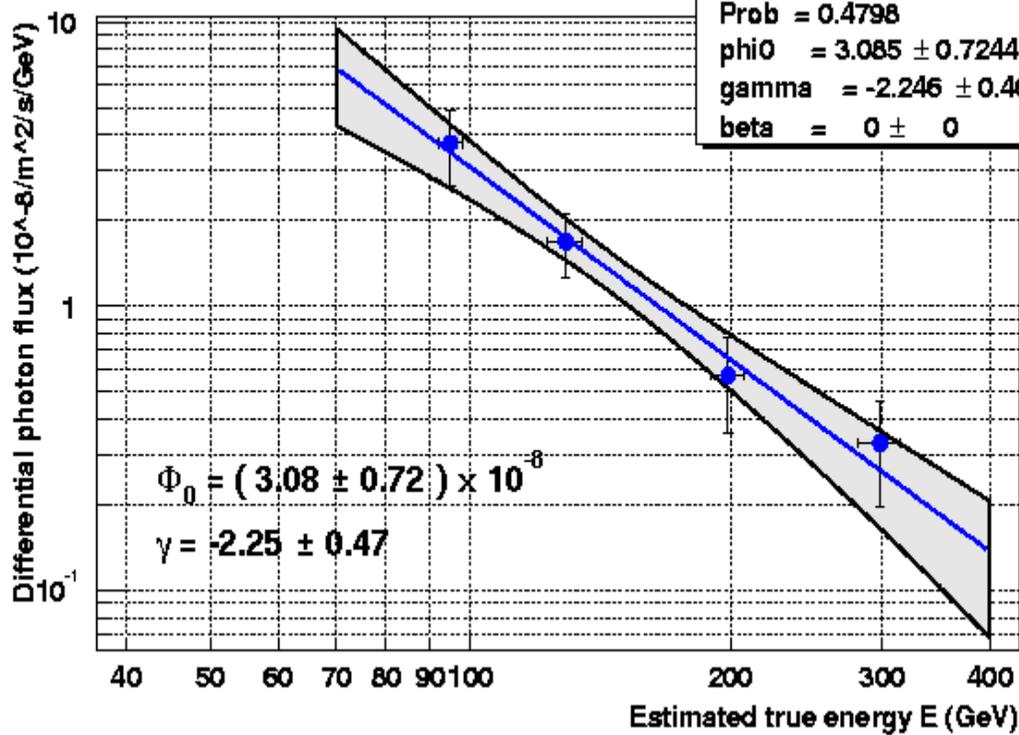
νF_ν ($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)



« Markarian
 Type d'AGL

orienté vers la terre
 vers.

Differential flux : power law



Le télescope Tcherenkov enregistre signal et fond

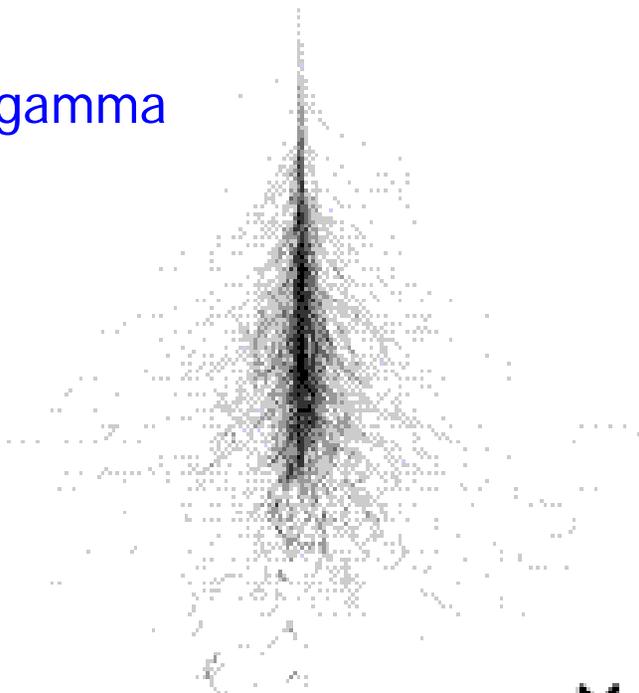
bien que le déclenchement favorise les gerbes gamma-like.

On rejette beaucoup du fond à l'analyse.

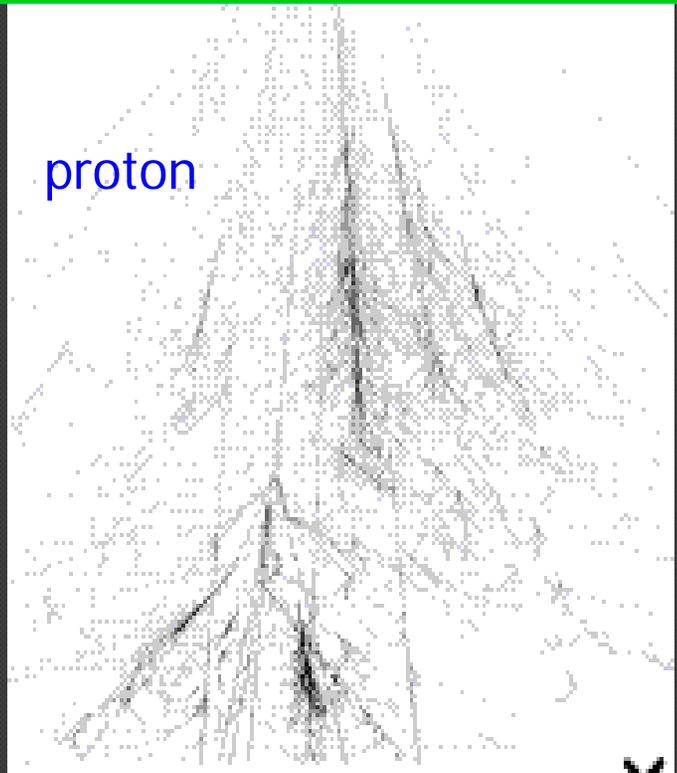
$pN \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^- K \Lambda$ et cetera $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ $\pi^+ \rightarrow \mu\nu$ $\mu \rightarrow e\nu$

Les gerbes « hadroniques » sont plus complexes, variées, étendues que les cascades électromagnétiques.

gamma



proton



HESS depuis Décembre 2003

“imagers” de 12 mètres.

Quatre!! i) surface effective plus grand ii) rejection de muons iii) stéreo

i + ii + iii = excellente rejet du fond.



Le « flash » de lumière Tcherenkov ne dure que quelques nanosecondes.

Pour lutter contre la lumière ambiante, on fait une électronique aussi rapide.

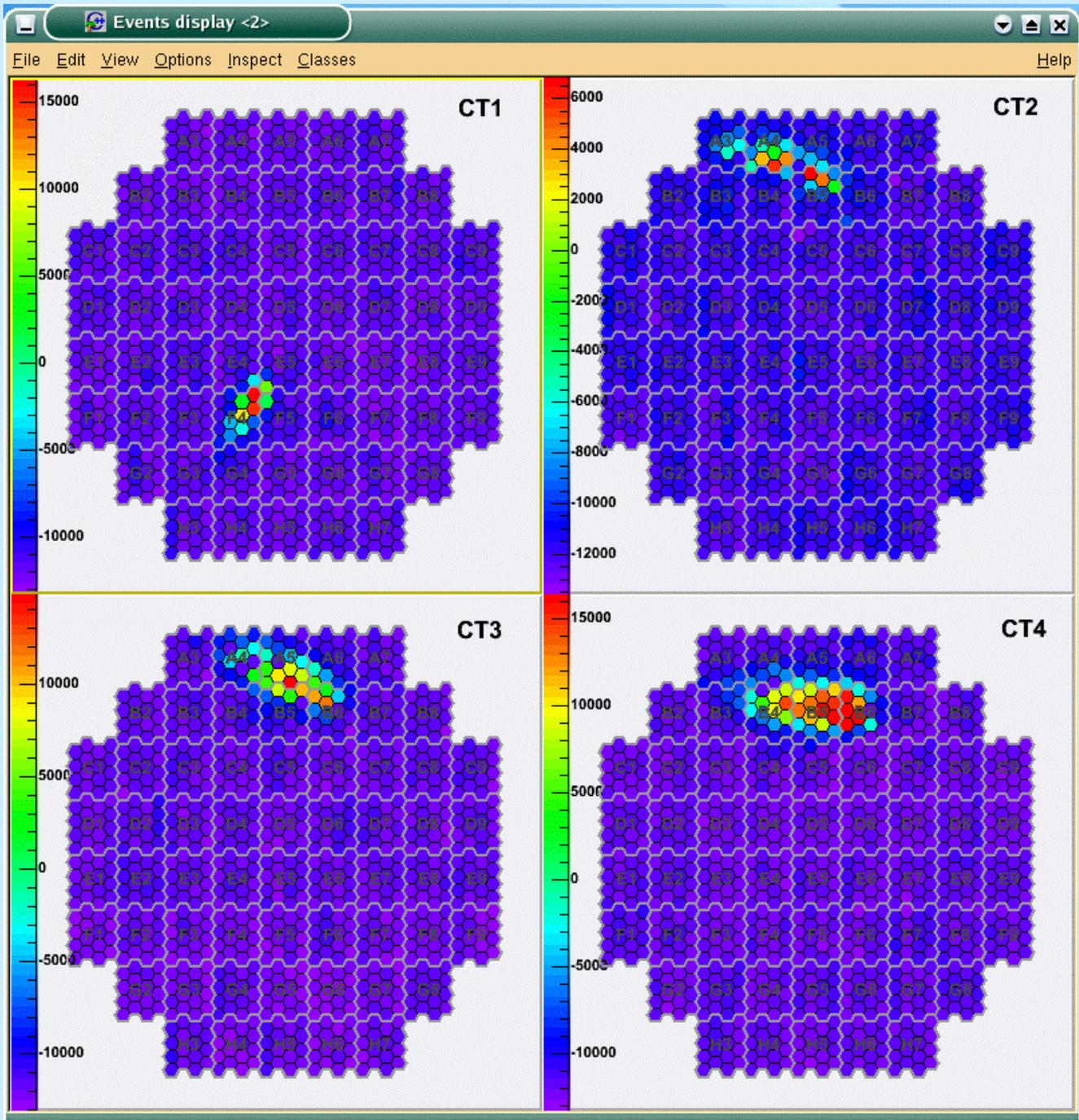
Camera

960 Pixels of 0.16°

5° Field of view (1.4 m)

Readout-integrated in camera body





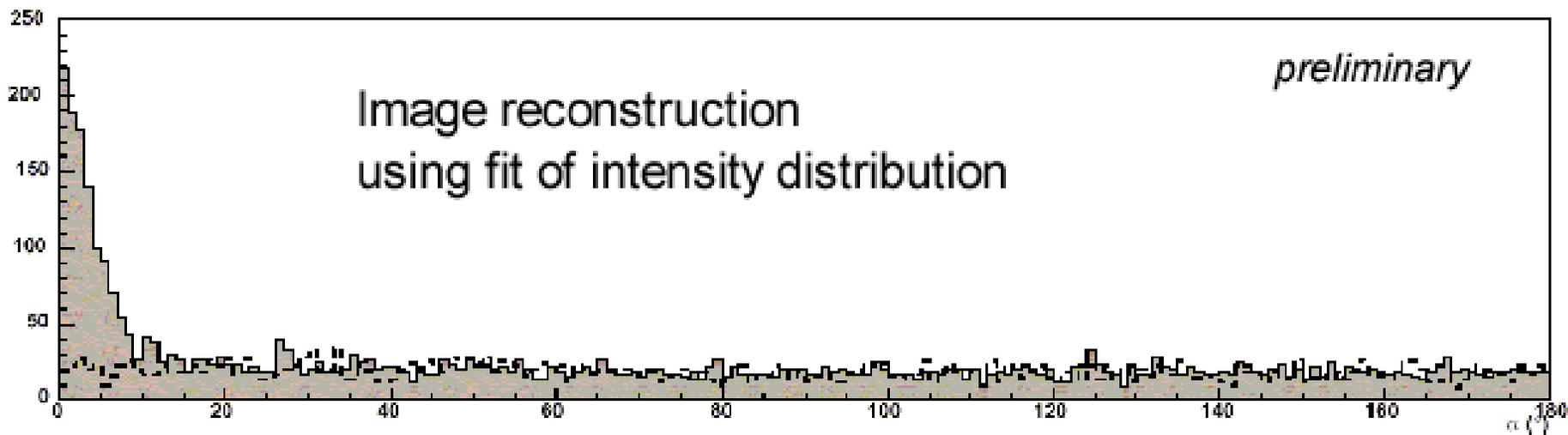
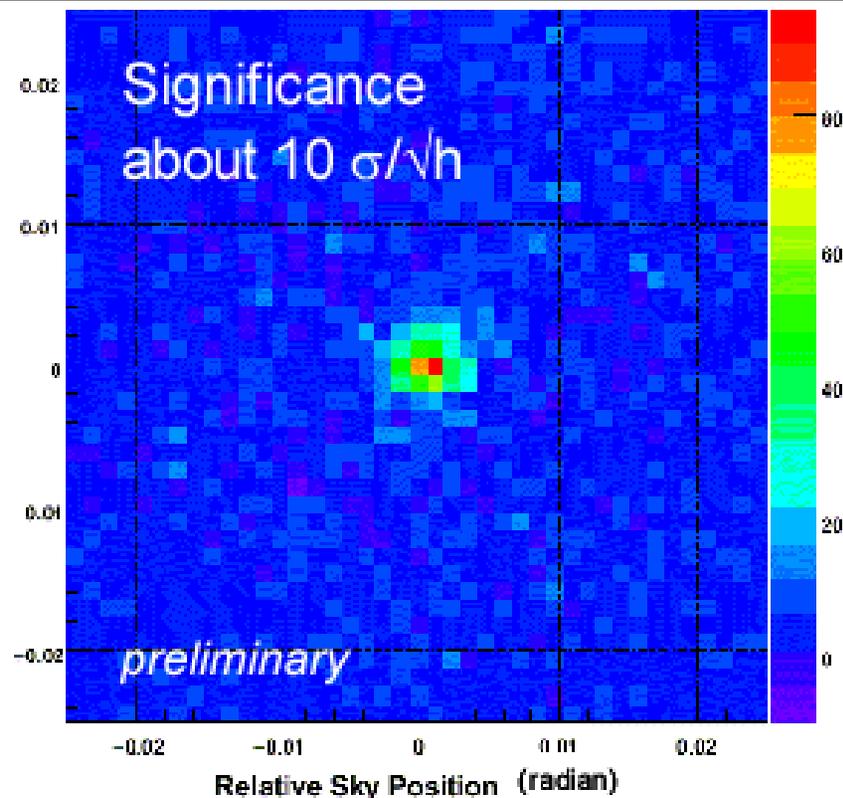
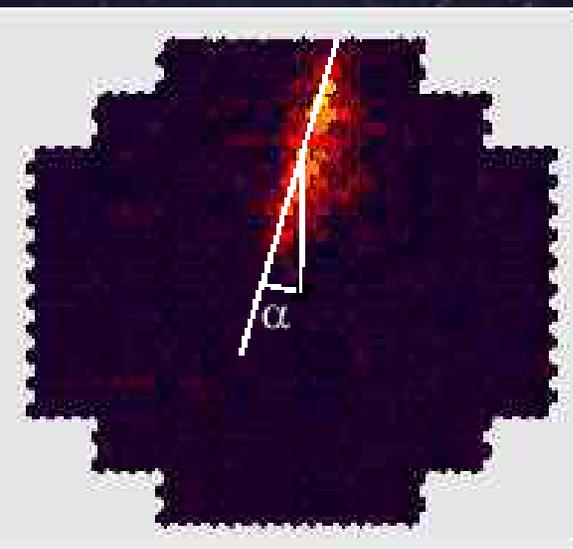
Alpha: perspective angle of parallel lines viewed from an offset position.
Like, looking up at tall trees. Or looking at meteor paths in the sky.



Digitally combined composite of nine 8-minute exposures,
November 18th 1999, 1h29-2h46 TU, Sharm El Sheikh, Egypt,
by Nigel Evans, courtesy of Sky & Telescope, June 2000.
All Leonid meteors radiate from a point just inside the sickle
of Leo, whose bottom star, Regulus, is the brightest star at lower left

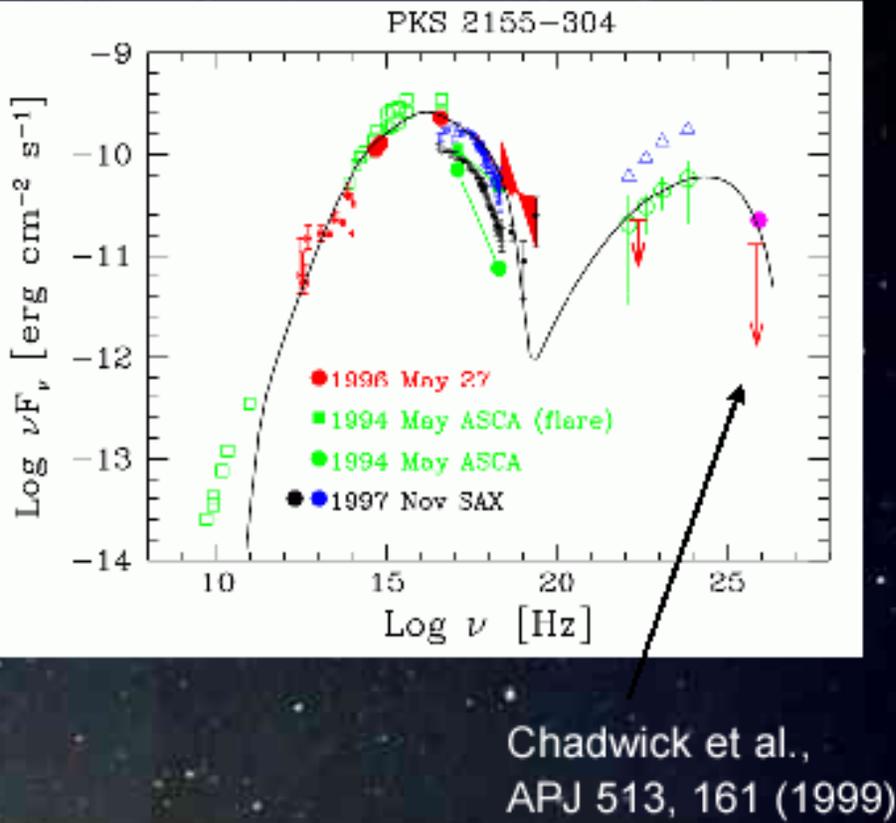
Crab Nebula (CT3)

HESS results, Fall 2003



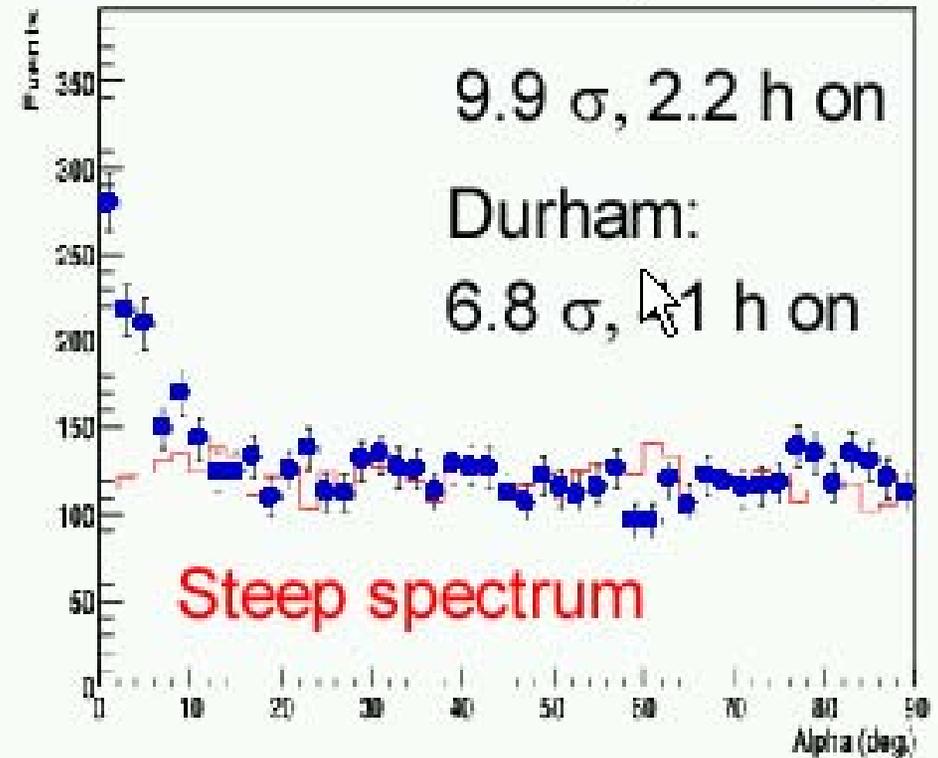
HESS results, Fall 2003

PKS 2155 ($z = 0.116$)



PKS2155 Jul 2002

preliminary



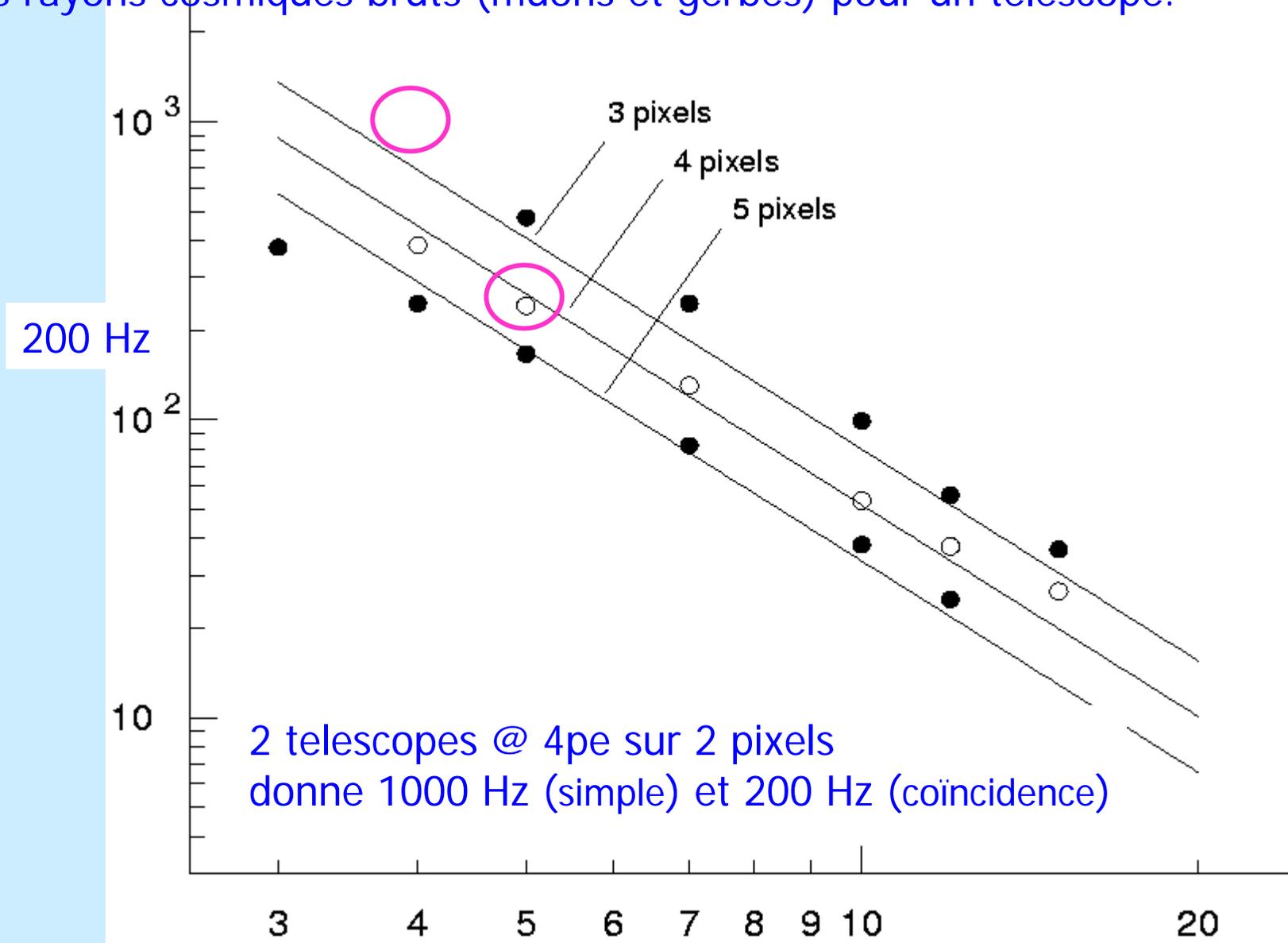
Stéreo: distribution d' α étroite, bon pour le signal/bruit.

Multi-miroirs: le niveau du fond est bas, bon pour le signal/bruit.

Reprenons le fil rouge: sensibilité

HESS taux de déclenchement (Hz) versus seuil (photoélectrons)

Ce sont les rayons cosmiques bruts (muons et gerbes) pour un télescope.



le fil rouge

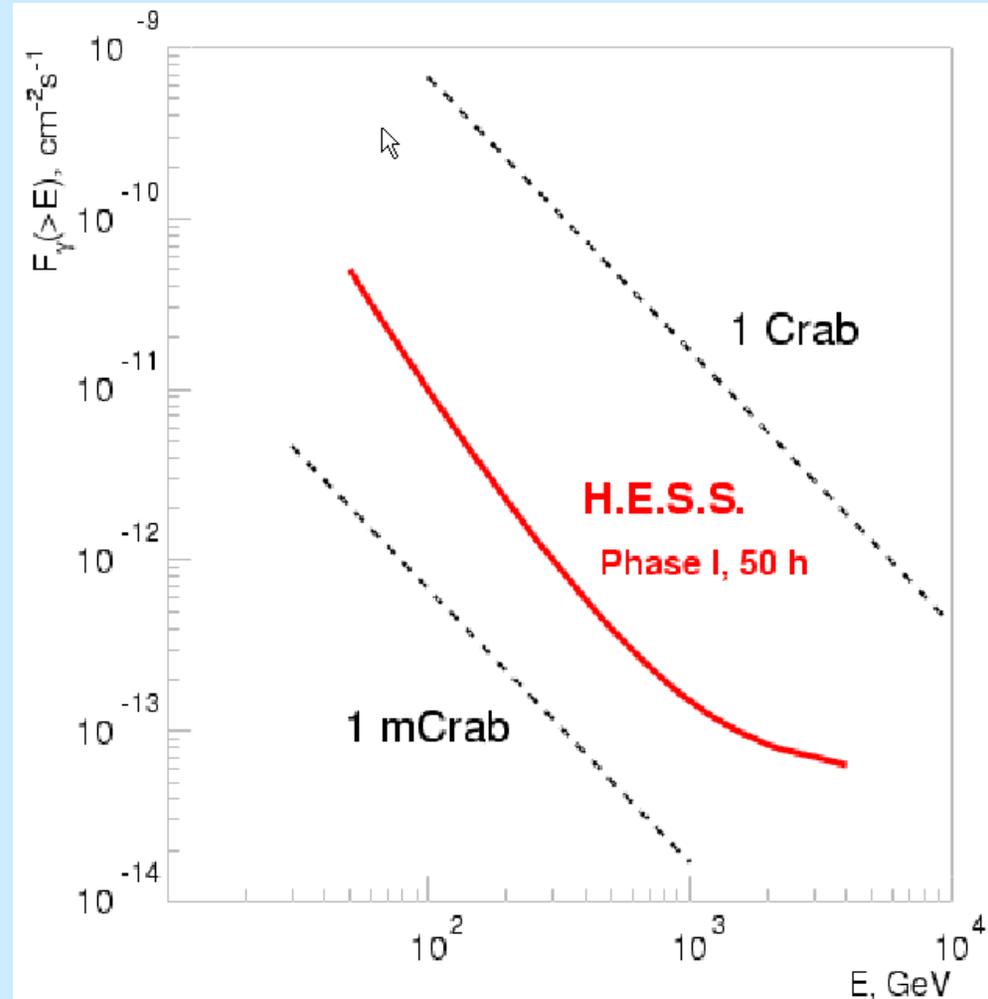
Sensibilité théorique (prédictions Monte Carlo avant la réalisation de l'appareil).
Normalement, même que celle de la brochure Glast.

Vérification expérimentale en cours.

CONCLUSIONS:

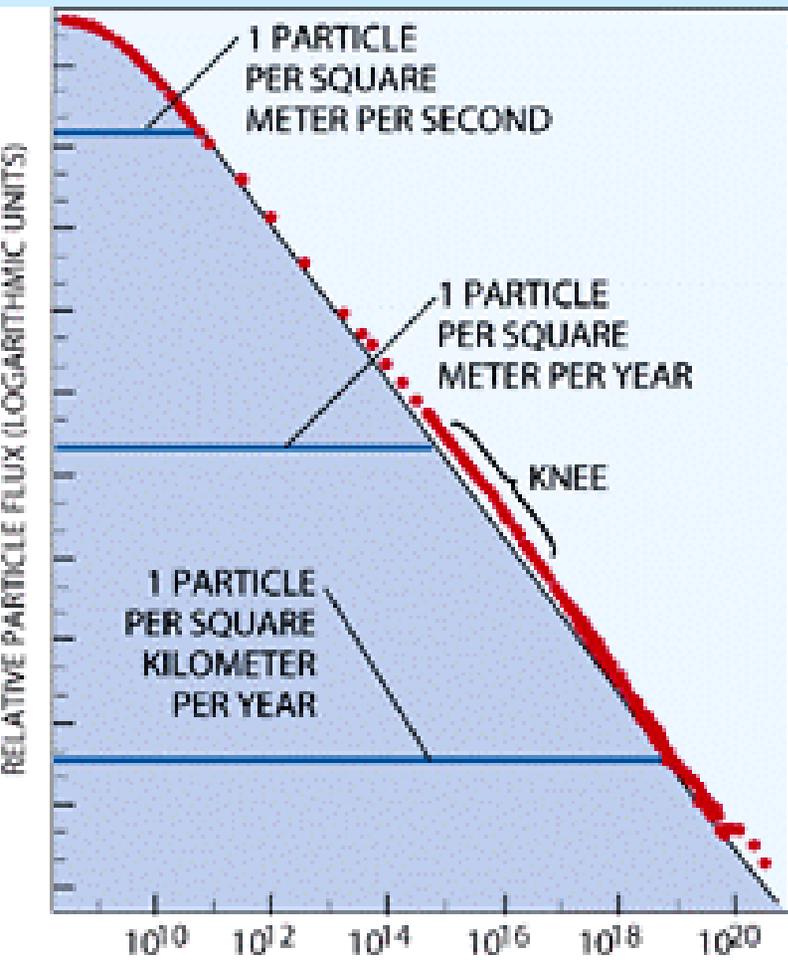
- HESS déjà, VERITAS en 2006, GLAST en 2007, devraient nous apporter un saut quantique en compréhension des P.C.H.E.

- Pour AUGER, j'ai un autre fichier PowerPoint prêt.



Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

Il arrive sur terre des noyaux d'atome ayant l'énergie d'une balle de tennis de Roland-Garros. Aucune explication de leur origine ne tient la route.



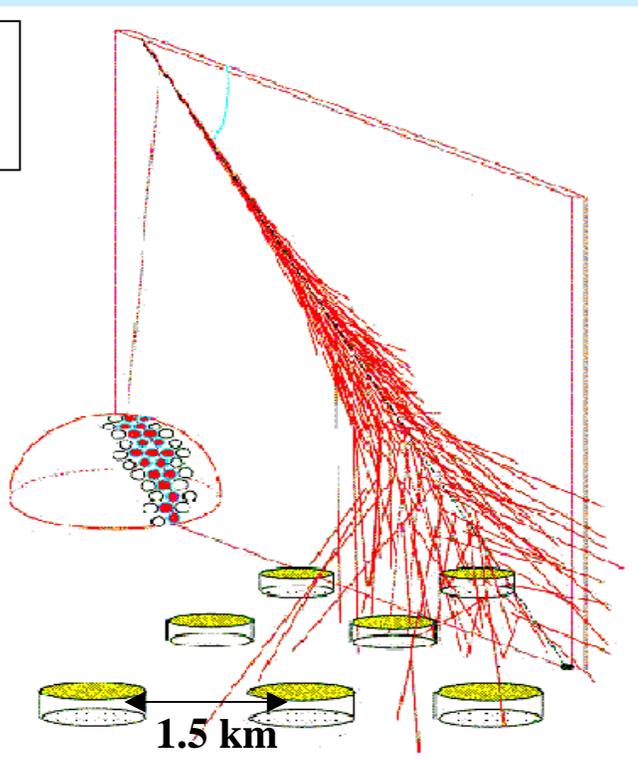
Dans la galaxie, on ne connaît pas d'accélérateur capable d'accélérer autant.

En principe, ça ne peut pas voyager depuis une autre galaxie sans s'écraser sur un photon du fond diffus.

L'Observatoire Pierre Auger :

Fluorescence:

4×6 Télescopes



Particules au sol:

détecteurs Tcherenkov à eau :

1600 tanks, 3000 km²



Observations Hybrides: 10% du temps

Performances Améliorées (simulations):

Nathalie Playez, GDR PCHE

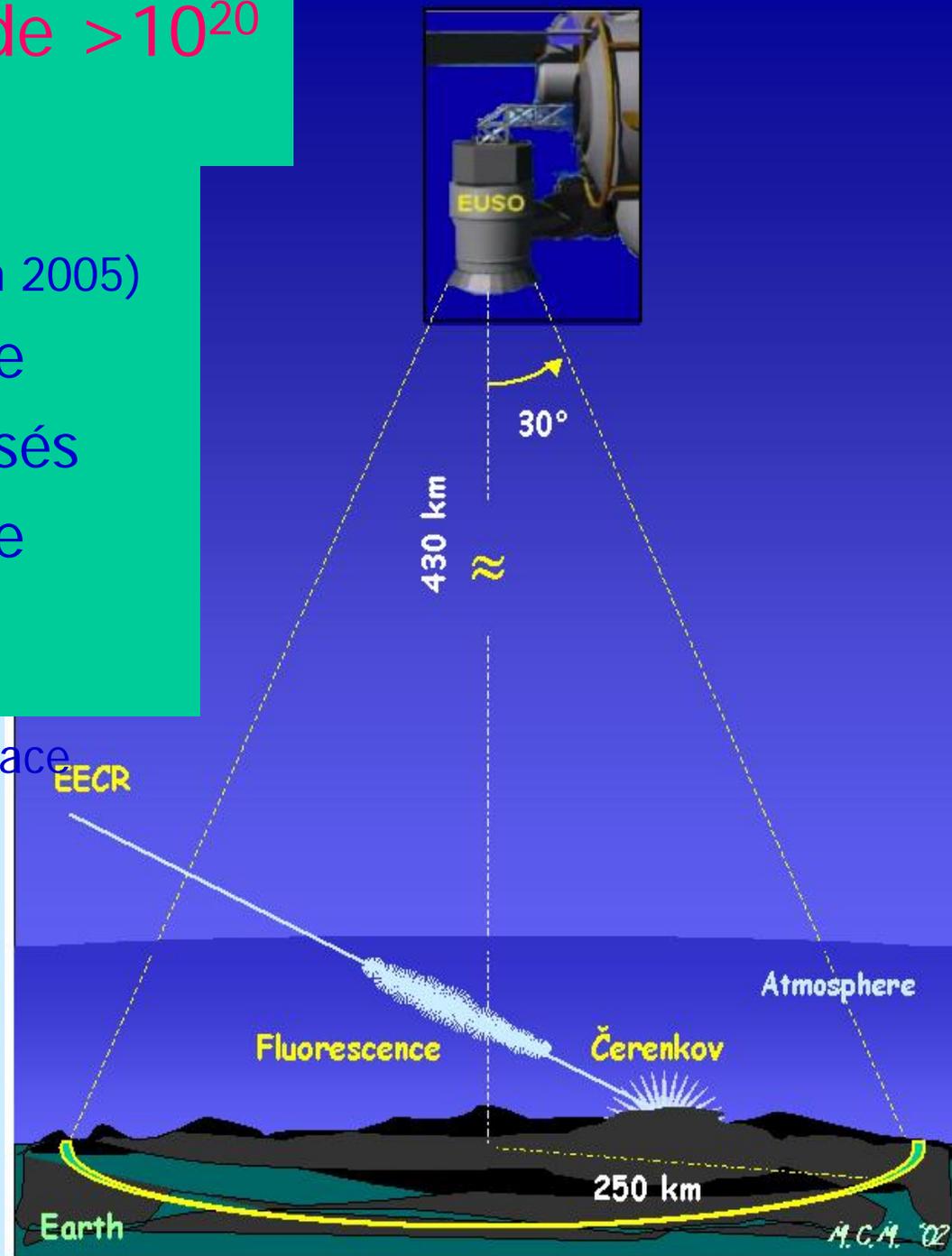
| à 10 ¹⁹ eV : | Fluorescence(FD) | Détecteur de surface(SD) | Mode Hybride |
|-------------------------|------------------|--------------------------|--------------|
| Energie | 28 % | 18 % | 12 % |
| Angle | 2.5 deg | 2 deg | 0.51 deg |
| Point d'impact | 350 m | 80 m | 50 m |

Les rayons cosmiques de $>10^{20}$ eV

- Auger en Argentine
 - (prototype fait ; 3000 km² en 2005)
- Hémisphère nord à l'étude
- EUSO Détecteurs spatialisés pour voir la fluorescence de dessus

<http://www.euso-mission.org/>

To be installed on the Internat'l Space Station.



7.3. Synchrotron radiation (CGS units)

For a particle of charge e , velocity $v = \beta c$, and energy $E = \gamma mc^2$, traveling in a circular orbit of radius R , the classical energy loss per revolution δE is

$$\delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{e^2}{R} \beta^3 \gamma^4 . \quad (7.10)$$

For high-energy electrons or positrons ($\beta \approx 1$), this becomes

$$\delta E \text{ (in MeV)} \approx 0.0885 [E \text{ (in GeV)}]^4 / R \text{ (in m)} . \quad (7.11)$$

For $\gamma \gg 1$, the energy radiated per revolution into the photon energy interval $d(\hbar\omega)$ is

$$dI = \frac{8\pi}{9} \alpha \gamma F(\omega/\omega_c) d(\hbar\omega) , \quad (7.12)$$

Remarque: like antares