Cours Astroparticules de M2 version 2010 -- Université de Bordeaux I

Phénomènes Cosmiques de Haute Energie. David Smith et Thierry Reposeur

ftp://www.cenbg.in2p3.fr/astropart/Teaching/Cours2010

5 janvier 2010 (Smith):

Introduction à la physique des « Astroparticules » aux hautes énergies

1. « **Astroparticules** » -- deux définitions complémentaires
   a. Physique des particules avec les messagers du ciel
   b. L'astrophysique, à la manière de la physique faite sur les accélérateurs
2. **Data Particle Booklet** – un compagnon précieux
3. **Les rayons cosmiques** – ¼ de l'énergie libre Galactique
   a. Dans l'espace – des ions de toutes les énergies
   b. Coupure Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK)
   c. Cascades atmosphériques, particules élémentaires.
   d. Au sol : principalement des muons avec E > ~1 GeV
4. **Les messagers des étoiles**
   a. Astronomie des rayons X et des gamma du MeV et du GeV (satellites)
   b. Astronomie des rayons gamma du TeV (Tcherenkov atmosphérique, et dans l'eau)
   c. Neutrinos (Tcherenkov dans l'eau et dans la glace)
   d. Antimatière
   e. Ondes Gravitationnelles
   f. Matière Noire?

1. « **Astroparticules** »

Regarder autrement, pour voir des choses nouvelles.

La quasi-totalité de nos infos sur l'Univers nous proviennent de photons rayonnés par des plasmas chauds.

Nous savons que nous sommes aveugles à >90% de la materiel qui existe.

Cherchons à voir avec " $E=mc^2$ ".

Modèle Standard des particules élémentaires (I)

Avec 6 quarks et 6 leptons on explique *toutes* les observations sur accélérateur.

Quarks:	up	charm	top	+2/3 e
	down	strange	bottom	-1/3 e

Wolfgang Pauli a introduit le *neutrino*, Enrico Fermi explique la désintégration beta.

Le *neutrino* est un 'lepton'.

Leptons:	e	μ	τ	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	(masse ~ 0)

Le soleil et les étoiles ne sont que l'exemple le plus banal de générateurs *intenses* de neutrinos.

Les neutrinos n'interagissent que *très* faiblement:

ils sondent les intérieurs de milieux denses, mais sont difficiles à capter.

Modèle Standard des particules élémentaires (II)

Einstein nous a appris que $E=mc^2$ (“ relativité restreinte *“).

La conséquence est que, avec suffisamment de ‘E’ on crée de la ‘m’ (et vice versa).

Exemple:

les rayons cosmiques (protons et noyaux en vadrouille dans l’espace) tapent dans l’atmosphère, pour engendrer des particules π (up et down), qui désintègrent en e, μ, ν, γ. Les μ, ν arrivent au sol mais nous traversent sans dommage.

(Ainsi, l’atmosphère nous protège.)

Phénomènes répandus dans les astres et dans le cosmos.

Découvertes à l'ère héroïque, avant que les accélérateurs prennent le dessus.

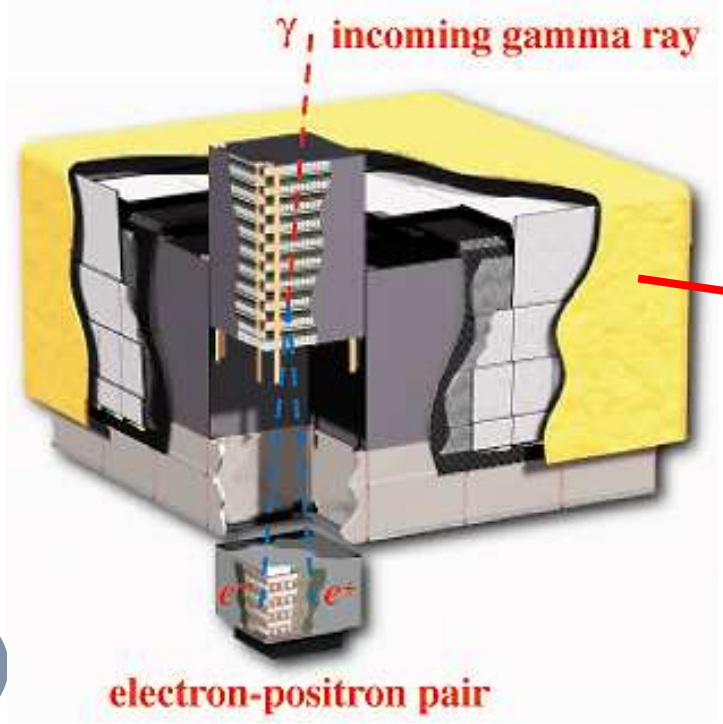
1932 positon.1934 muon. 1947 pion…

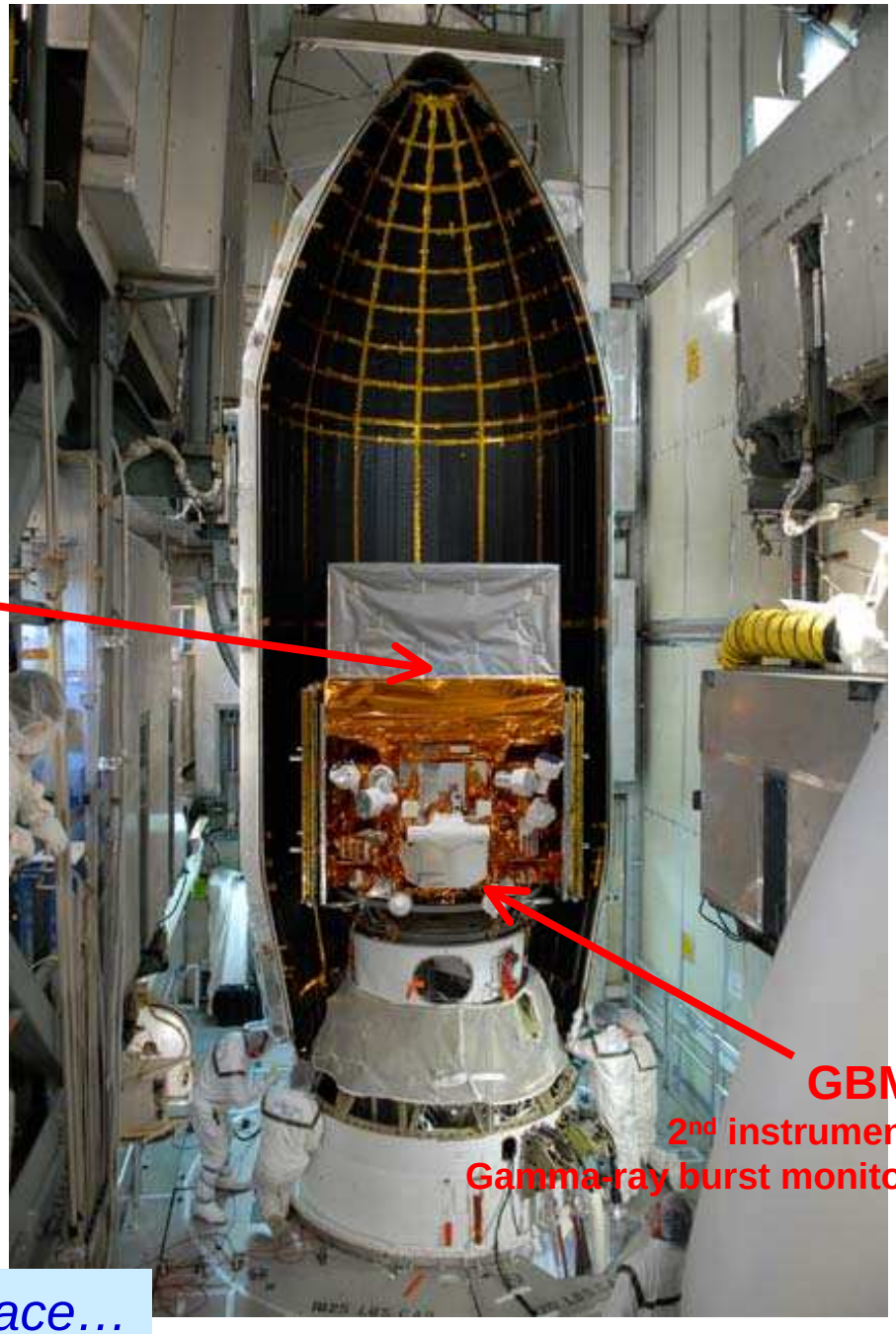
Une nouvelle génération d’appareils pour chercher des signatures nouvelles.

Exemple: Une classe de théories visant à améliorer le modèle standard s’appelle ‘supersymétrique’ et prédit des hordes de nouvelles particules, *presque* indétectables, dont le *neutralino*. Il se désintégrerait en antimatière, en neutrinos, en gammas monoénérgetiques.

(*La ‘relativité générale’ apparaîtra quand nous parlerons des antennes d’onde gravitationnelles.).

Fermi
Large Area Telescope
30 MeV à 300 GeV

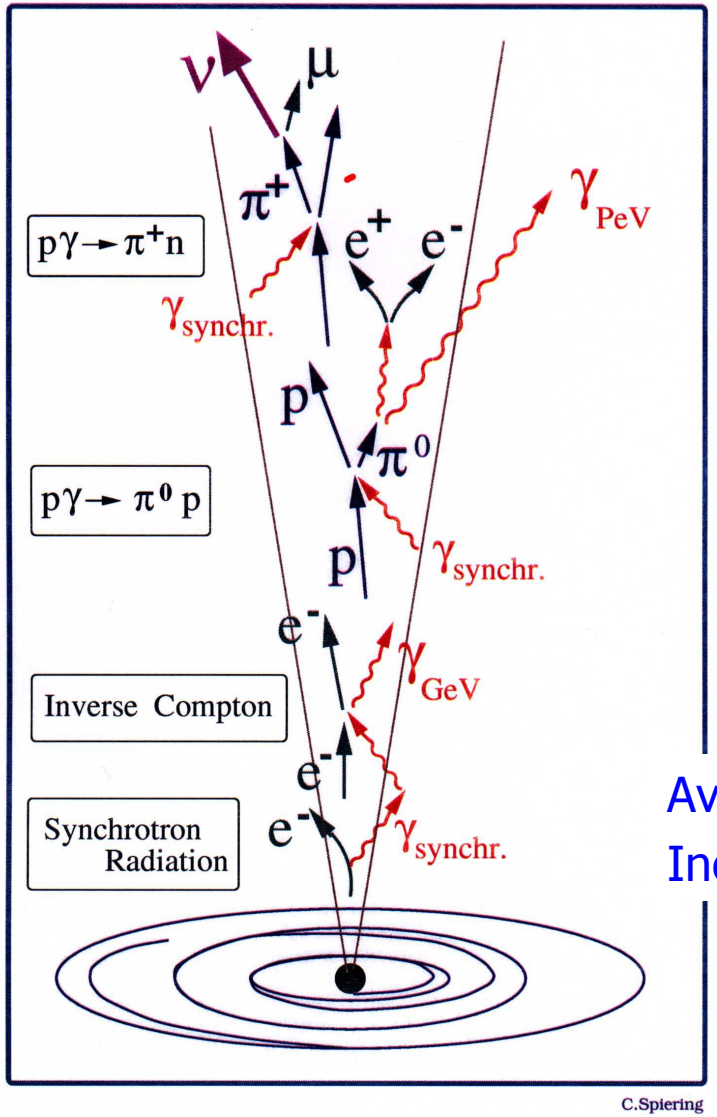




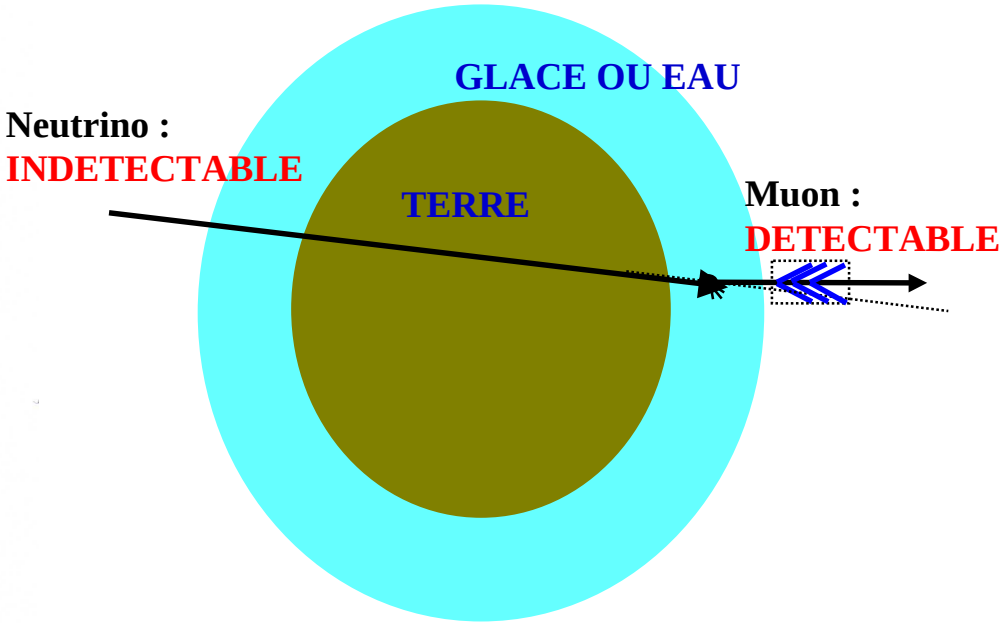
Un détecteur de particules, dans l'espace…

High-Energy Neutrino Astrophysics

Particle Generation in AGN Jets



AGN: noyau actif de galaxie.



Avantage des neutrinos: pas absorbés dans la source.

Inconvénient: dans le détecteur non plus.

2. Particle Data Book

pause publicitaire pour le

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 practiques sur une étendue étonnante de sujets.

Categories:

- Constants, Units, Atomic and Nuclear Properties **<- dE/dx minimum en CsI**
- Standard Model and Related Topics **<- TOUT sur les quarks en qqs pages**
- Particle Properties
- Hypothetical Particles
- Astrophysics and Cosmology **<- « Cosmologie big bang pour les nulles »**
- Experimental Methods and Colliders
- Mathematical Tools
- Kinematics, Cross-Section Formulae, and Plots **<- rélativité restreinte en 3 petites formules**
- Authors, Introductory Text, History plots

=PDB

To order a copy of the *Review* or the *Particle Physics Booklet* from all other areas, write to

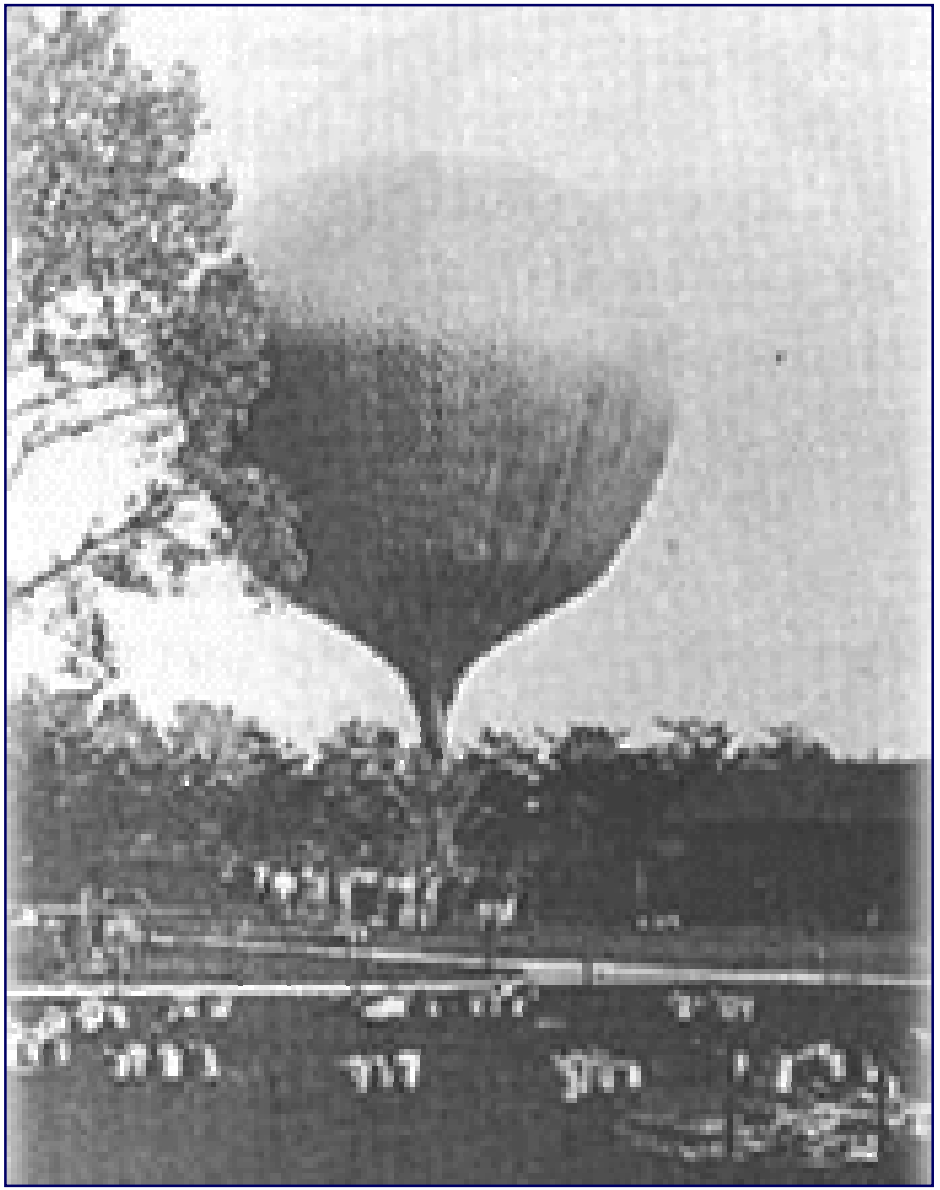
CERN Scientific Information Service
CH-1211 Geneva 23
Switzerland

or via the WWW from CERN
(http://weblib.cern.ch/publreq.php)

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

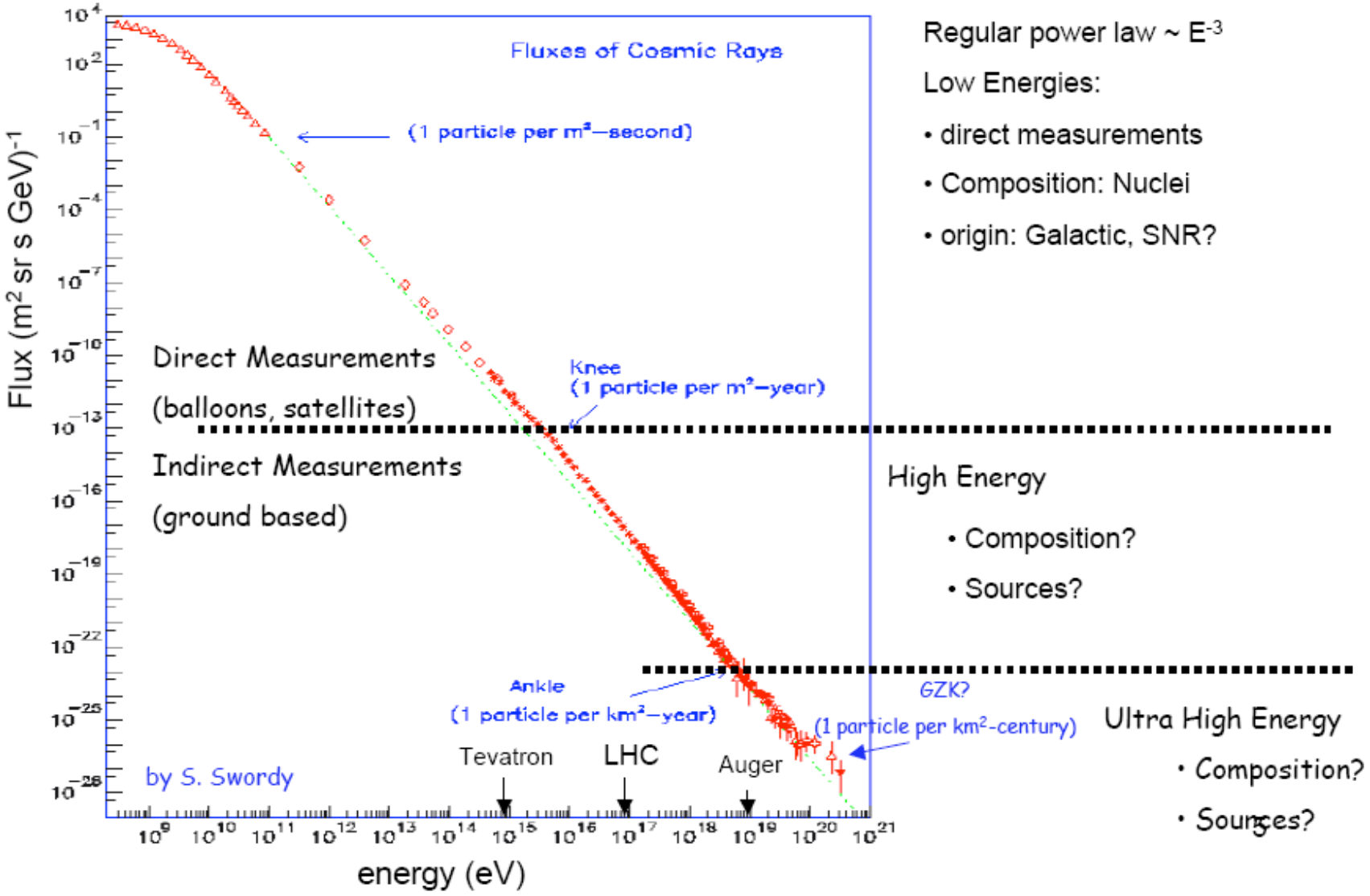
3. Les rayons cosmiques

1911 à 1912: Victor Hess démontre que le rayonnement ambient est d'origine cosmique.



Cosmic Rays

The "All Particle Spectrum"



Regular power law ~ E^{-3}

Low Energies:

- direct measurements
- Composition: Nuclei
- origin: Galactic, SNR?

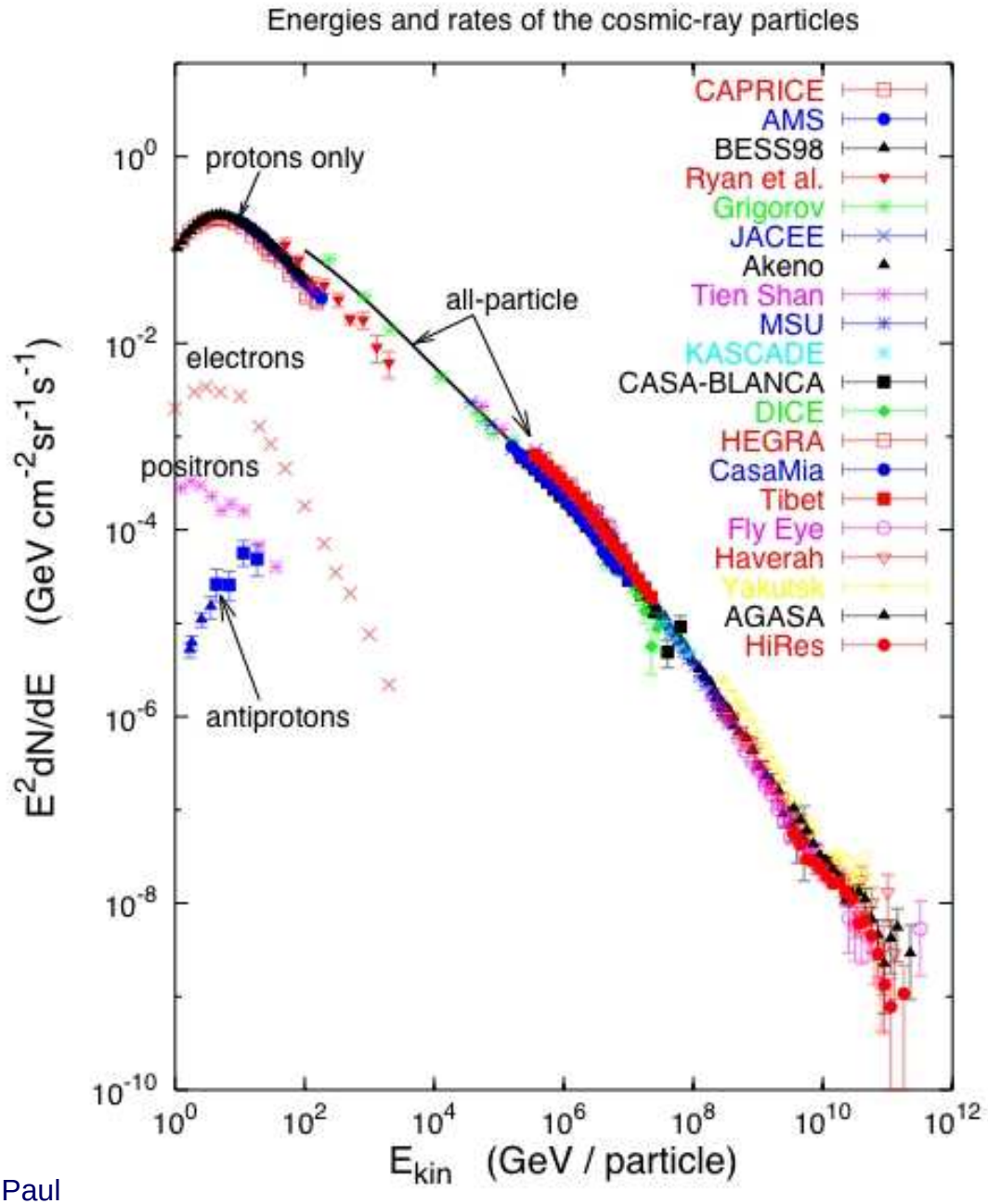
High Energy

- Composition?
- Sources?

Ultra High Energy

- Composition?
- Sources?

Spectre des rayons cosmiques



- 12 ordres de grandeur en énergie
- 32 ordres en flux

$\Rightarrow$ techniques très diverses

- Flux très faible à haute énergie

$\Rightarrow$ besoin de surfaces de détection gigantesques (>1000 km^2)

Nota bene: "rayons cosmiques" veut dire, les particules chargées (jargon…). Nous verrons les photons gamma (et neutrinos) par la suite.

D'où viennent les rayons cosmiques?

- **Dans le vide profond de l'espace, quatre quarts:**
  - **¼ de l'énergie par cm^3 est le fond µ-onde à 3° K.**
  - **¼ dans le champ magnétique de la Galaxie**
  - **¼ dans la lumière des étoiles**
  - **¼ dans les rayons cosmiques**
- **Cela mérite d'être compris…**

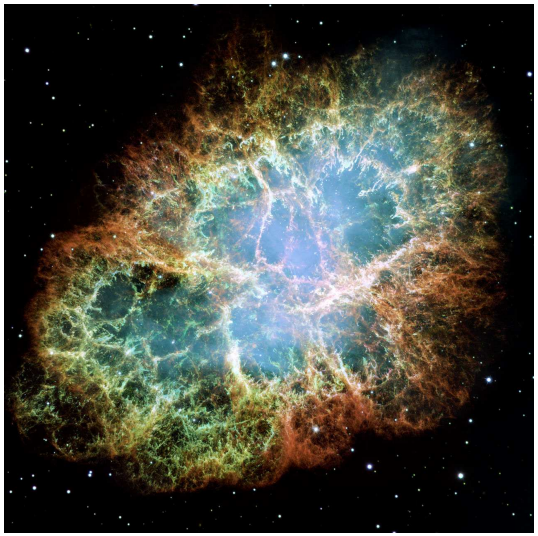
- **En début du spectre: le vent solaire**

- **En dessous du "genou": accélération par chocs dans les vestiges de supernova?**
  - **Rôle des nébuleuses à vent de pulsar?**
  - **Des pulsars?**
  - **Chocs des vents d'étoiles massives (chaudes) qui heurtent des nuages, ou d'autres vents?**

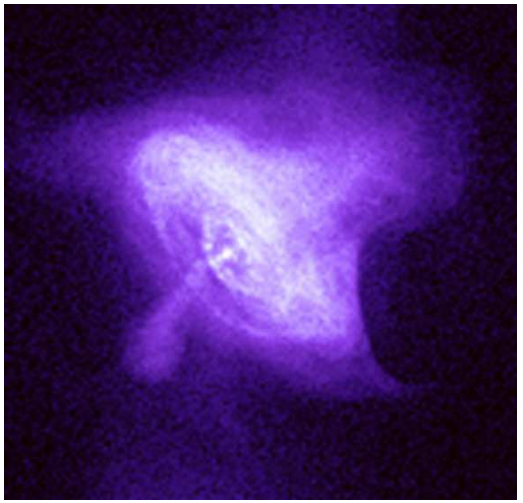
- **Au delà du genou: extragalactique?**
  - **Noyaux actifs de galaxie?**
  - **Sursaut gamma?**
  - **Autre?**

Nébuleuse *(et pulsar)* ***du Crabe***

- **Supernova en l'an 1054, vu par les astronomes asiatiques.**
- **Nébuleuse alimentée par le vent du pulsar.**
- **Source lumineuse à toute longueur d'onde, très étudiée par une diversité de communautés .**



Optical image of the Crab Nebula (Hubble)



X-ray image of the Crab Nebula (Chandra)

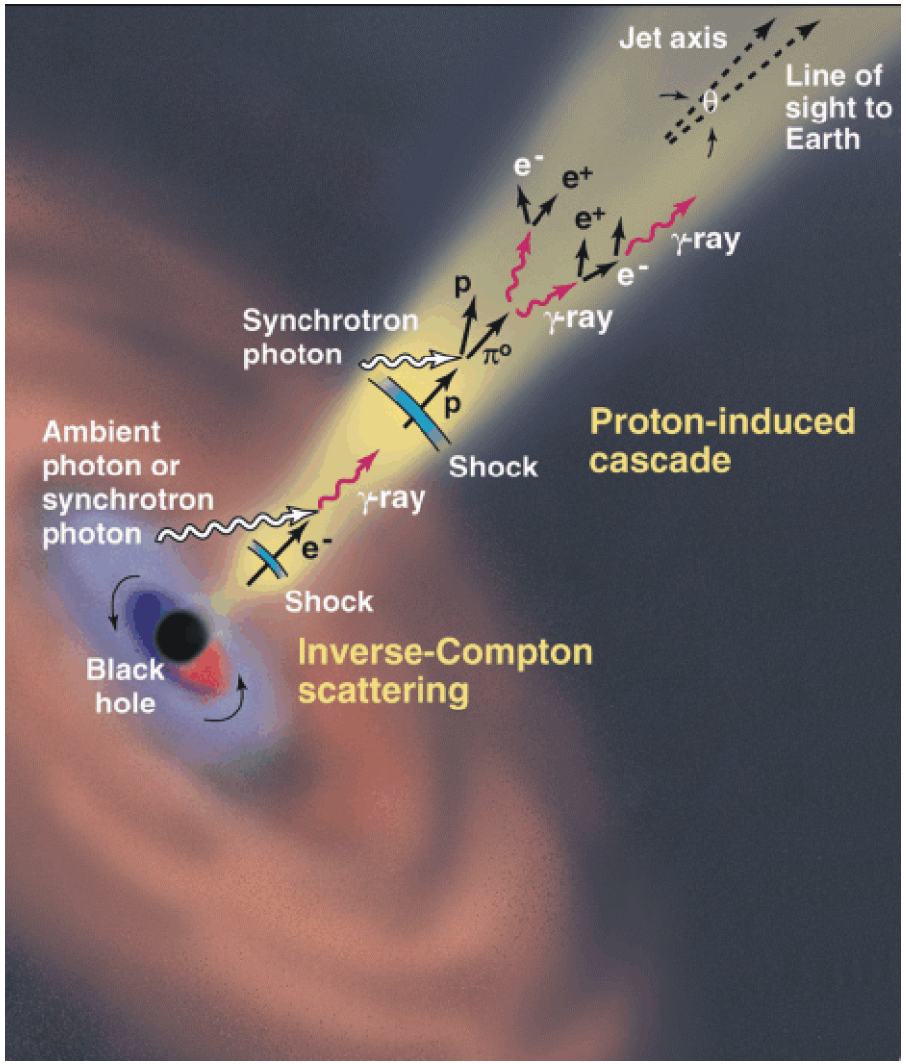
Noyaux actifs de galaxies (AGN)

(ce n'est plus que des Blazars – une variété croissante de galaxies en gamma)

- Un trou noir super-massif au cœur de toutes les galaxies?
- Pour 5% d'entre elles, ce noyau est "actif" – émissions épisodiques plus intenses que celles des ~10^9 étoiles.

La matière est accrèté par un disque…
… des jets ultra-relativistes se forment.

- Diversité des AGN due en partie à l'orientation, et/ou au taux d'accrétion.



Composition des rayons cosmiques.

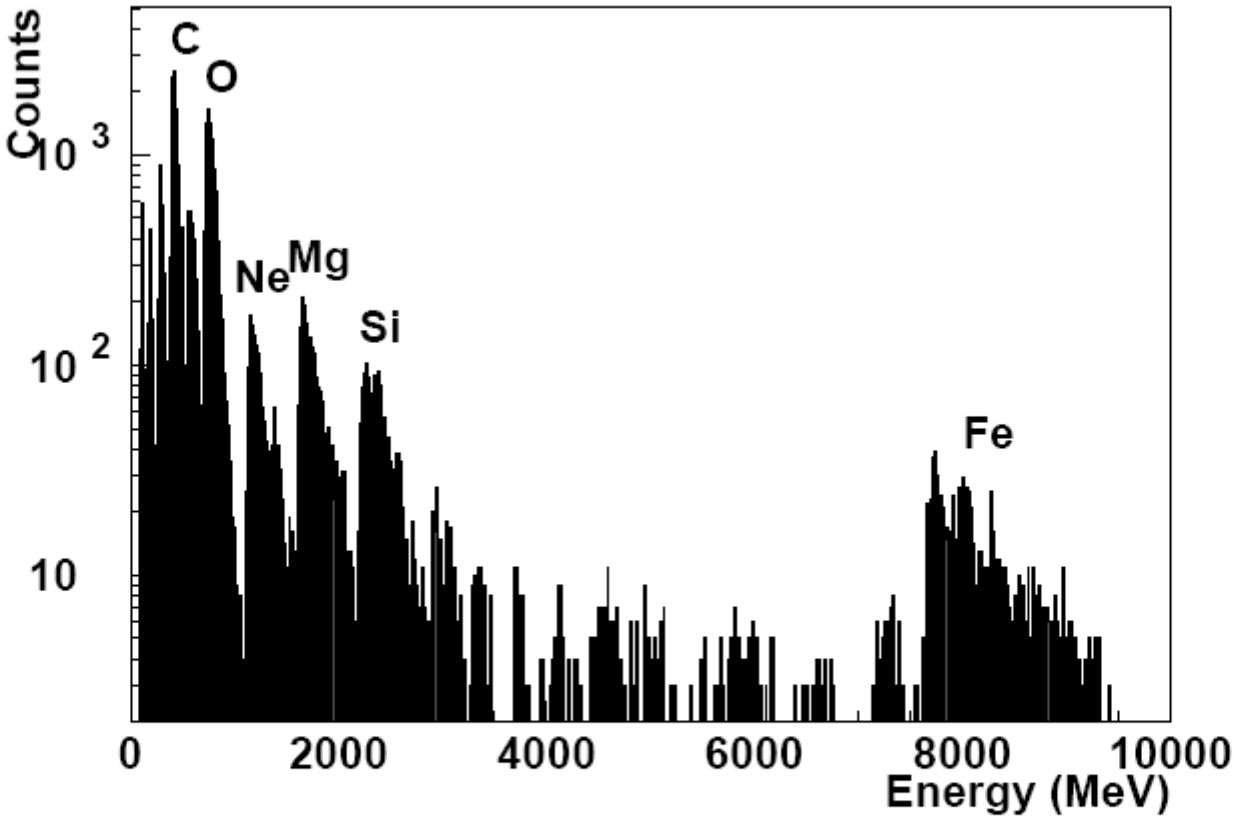


Fig. 2. Expected distribution of ionization energy deposited by the cosmic-ray ions in one CsI crystal. The main peaks are labeled according to the elements they correspond to.

Etallonnage des cristaux du calorimètre du Fermi LAT…

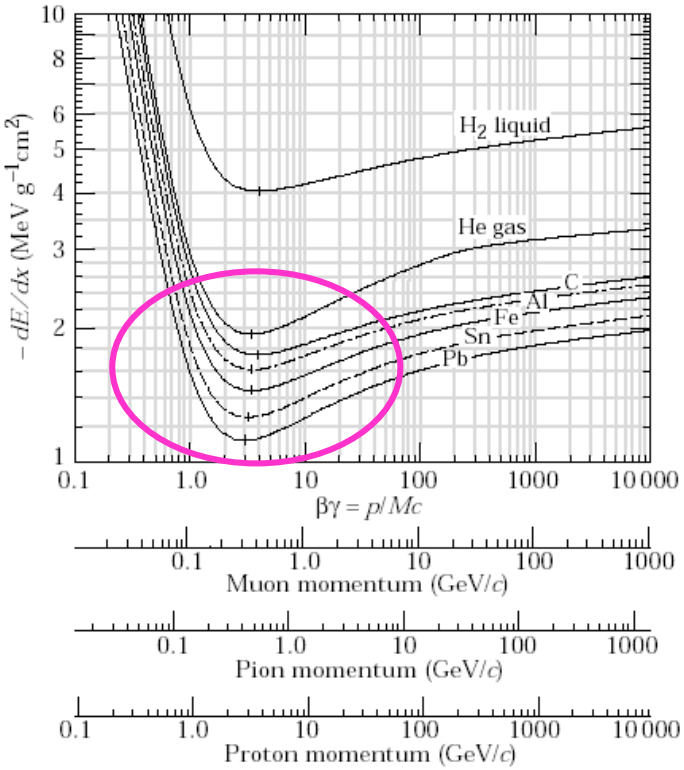
Cours 3 avec T. Reposeur.

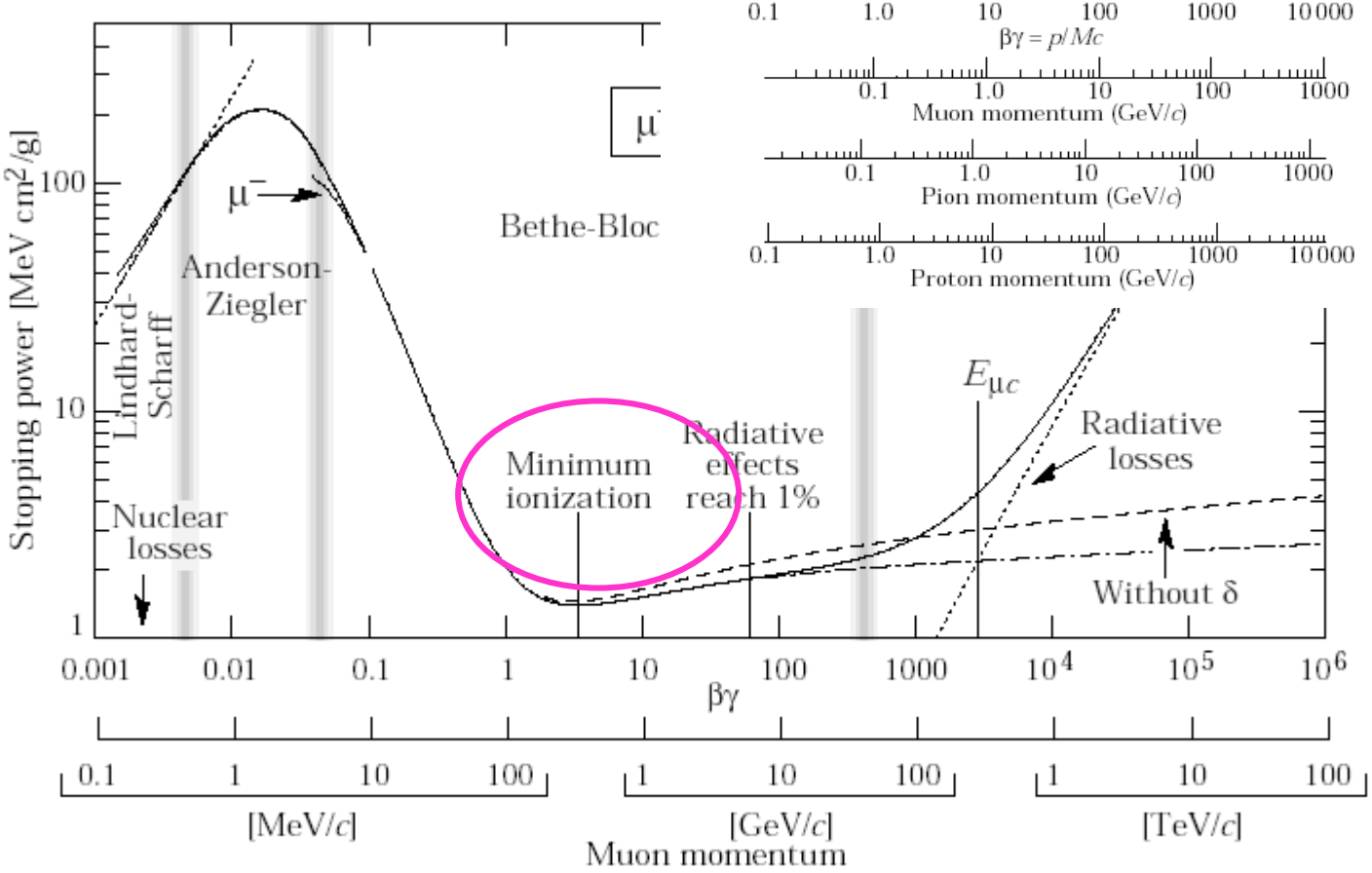
26.2. Electronic energy loss by heavy particles [1–5]

Moderately relativistic charged particles other than electrons lose primarily by ionization and atomic excitation. The mean rate of energ power) 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. Wit Table 26.1 and A in g m





Sur Terre, deux types d'accélérateurs de particules:

1. "léptonic": Électron-positon (SLAC@Stanford, LEP@CERN)
2. "hadronic": Proton-antiproton (Fermilab, LHC@CERN)

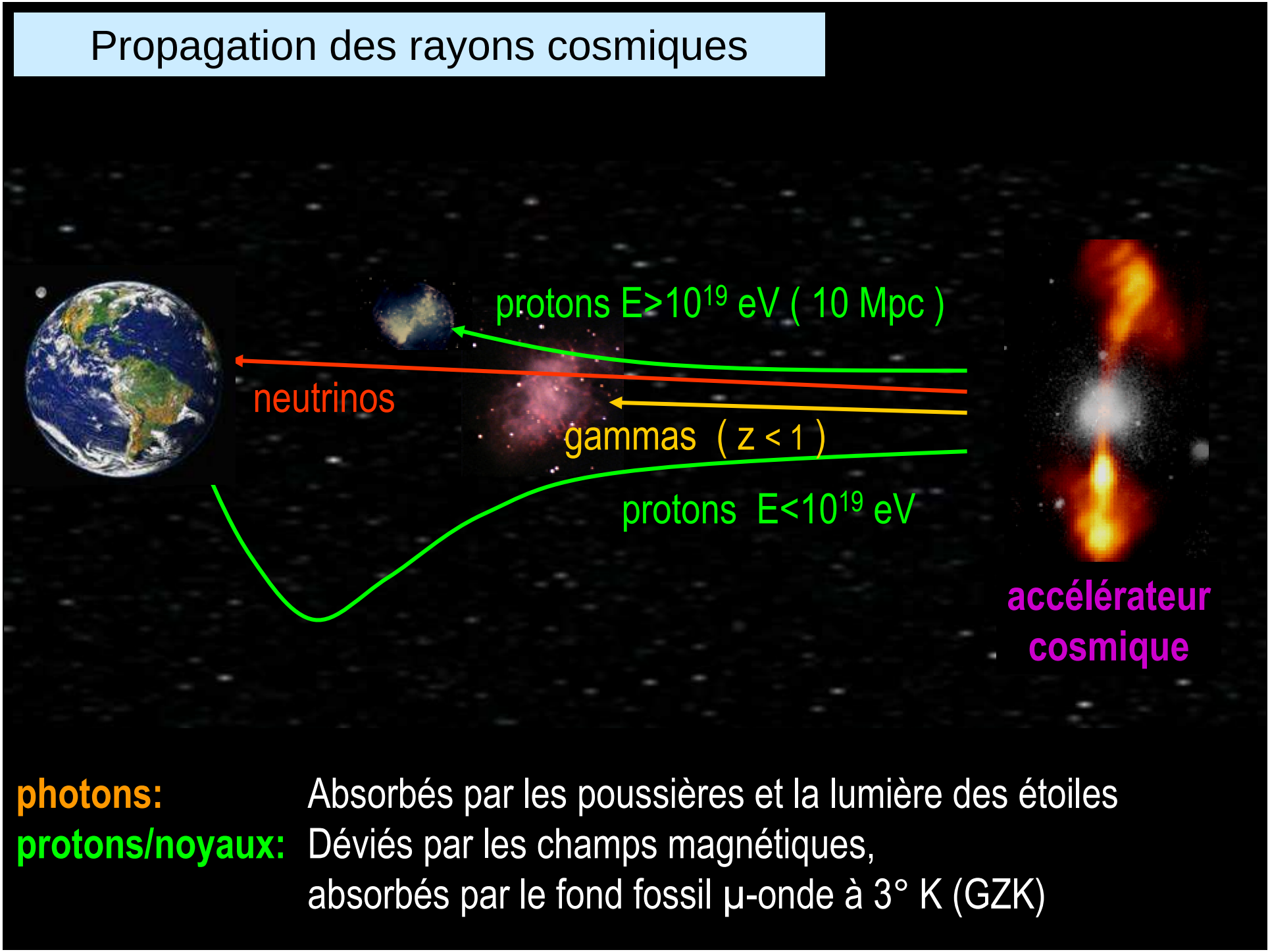
Dans le cosmos, on cherche les accélerateurs d'ions.

(un proton est un ion d'hydrogène…)

Constat: quasiment tout accélérateur cosmique étudié jusqu'à présent s'explique le plus simplement avec des modèles léptonics…

"Problème d'actualité" depuis un certain temps déjà.

Propagation des rayons cosmiques

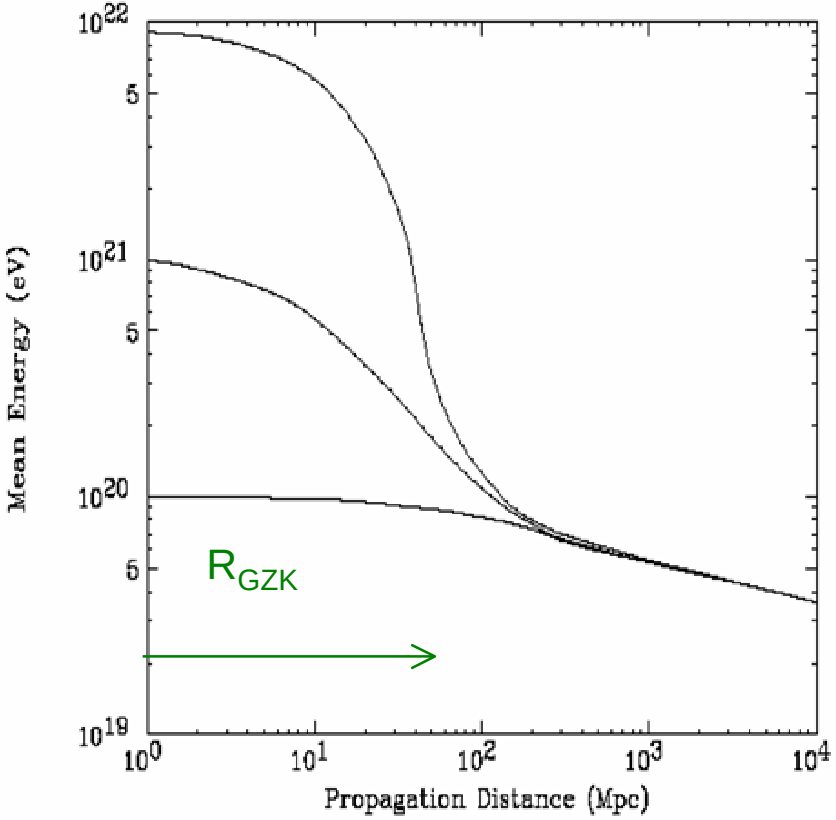


photons: Absorbés par les poussières et la lumière des étoiles

protons/noyaux: Déviés par les champs magnétiques,
absorbés par le fond fossil μ-onde à 3° K (GZK)

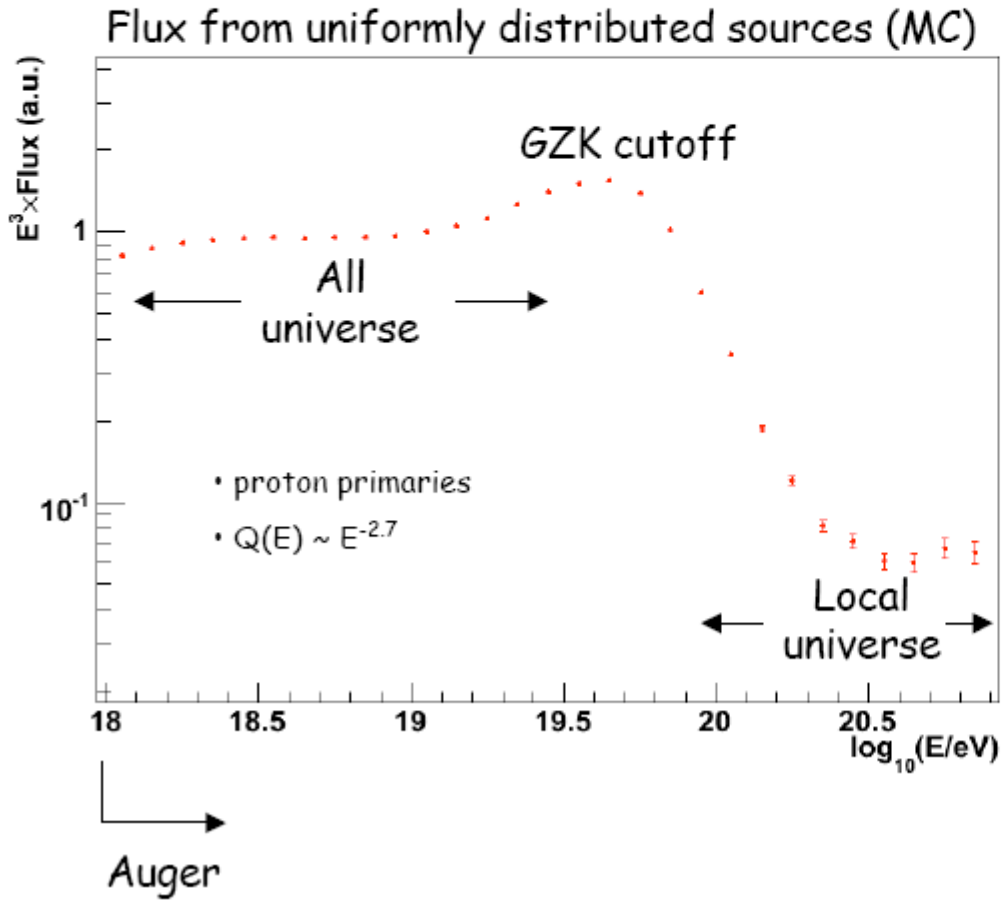
Coupure "GZK"

- 1965: découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson (CMB = Cosmic Microwave Background)
  T = 6 10^{-4} eV (2.7° Kelvin) ,
  N = 400 cm^{-3}
- Interaction des noyaux avec ces photons qui baignent l'univers prédit par Greisen, Zatsepin et Kuzmin.



$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta^{+} \begin{cases} \rightarrow p\ \pi^{0} \rightarrow p\ \gamma\gamma \\ \rightarrow n\pi^{+} \rightarrow n\nu_{\mu}\mu^{+} \rightarrow n\nu_{\mu}\bar{\nu}_{\mu}\nu_{e}e^{+} \end{cases}$$

Interaction with the CMB background

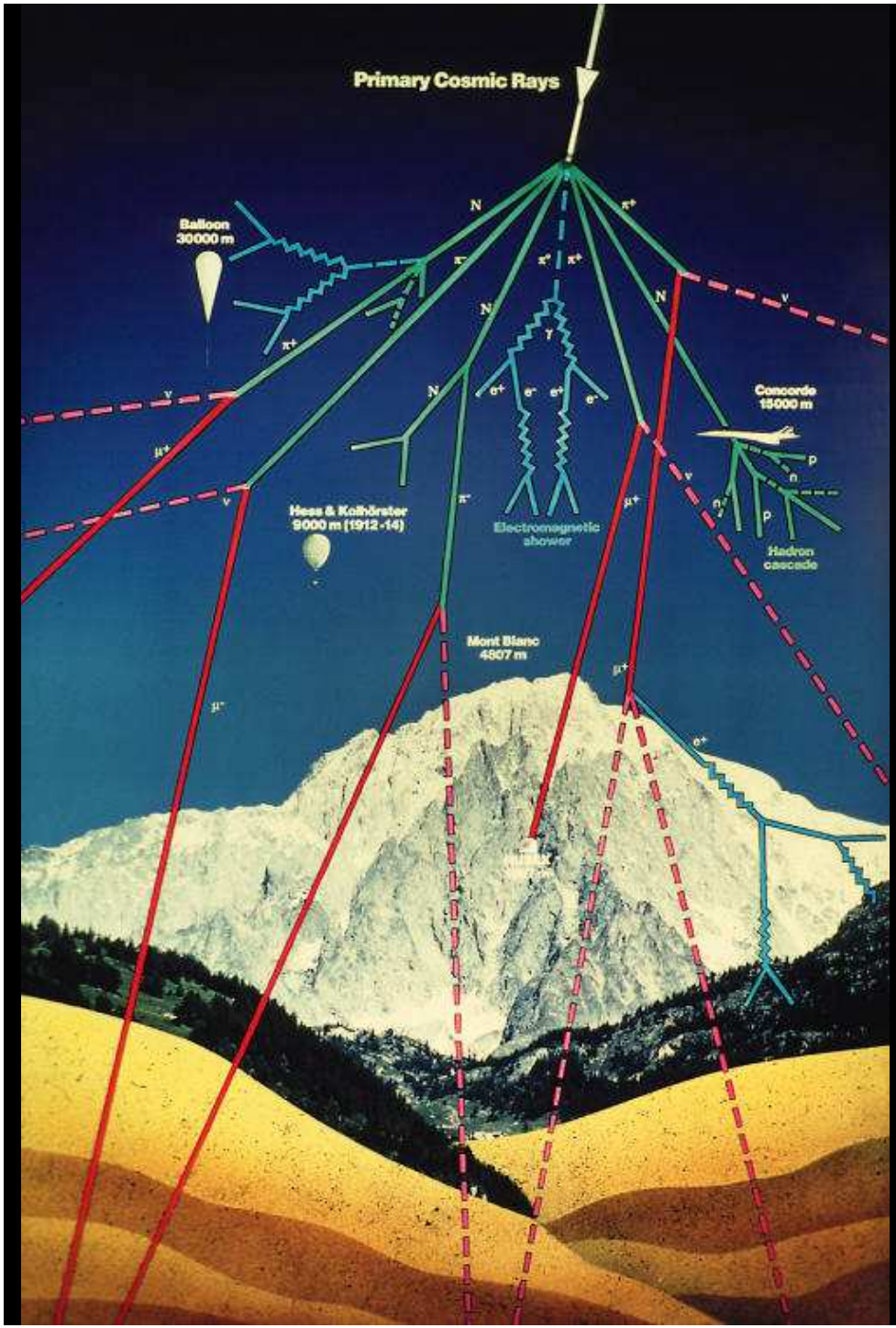


$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow p + \pi^0$$

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow n + \pi^+$$

$E_{th} \sim 5 \times 10^{19}$ eV

GZK cutoff is NOT a sharp cutoff!!



Une particule cosmique cogne dans un molecule d'azote ou d'oxygène.

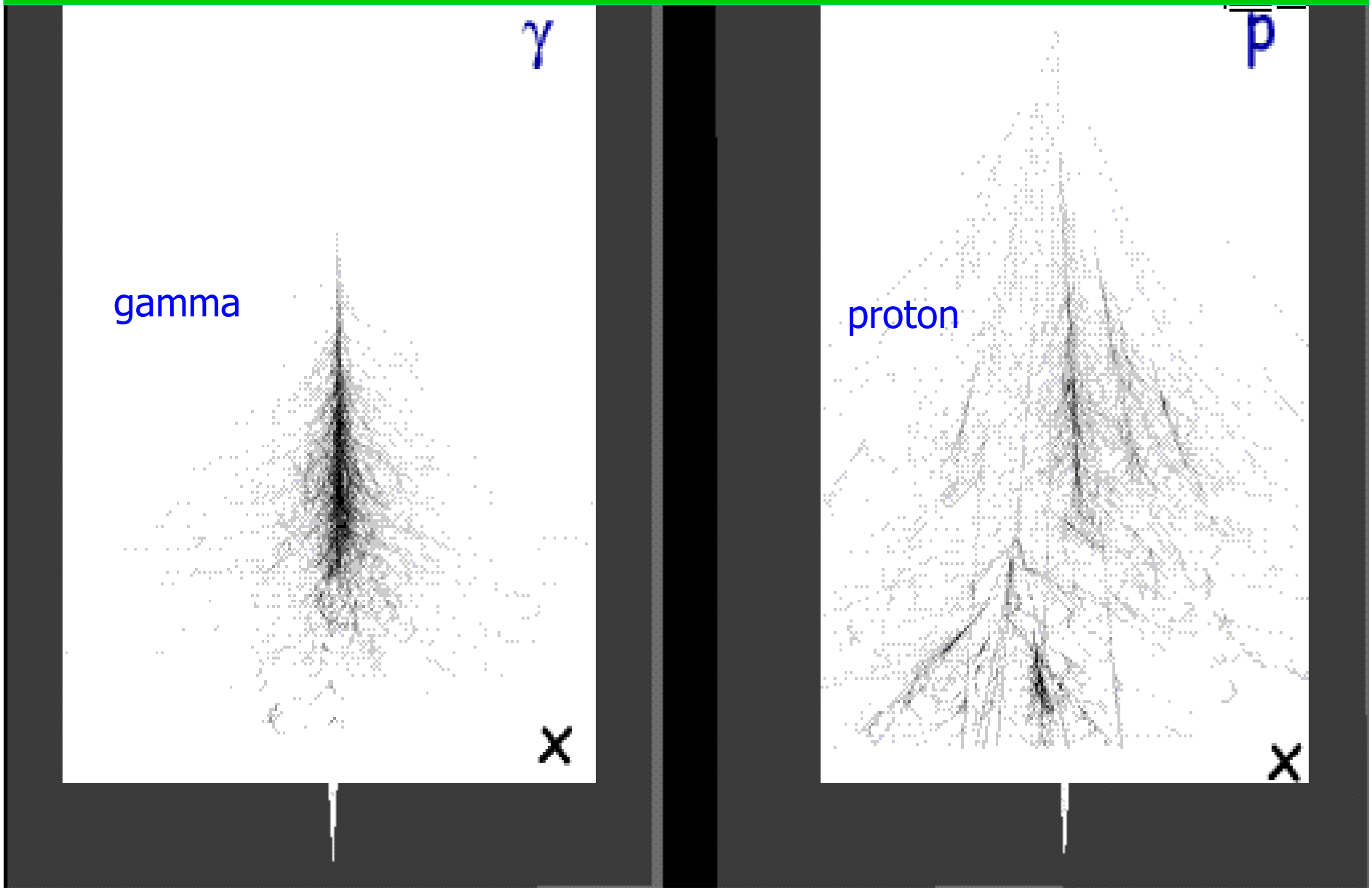
(à haute énergie, voit plutot les quarks des nucleons…)

Electron ou photon (rares!): engendre une cascade électromagnétique.

Proton, ou ion lourd: engendre une gerbe hadronique.

pN -> π^o π^+ π^- K Λ et cetera π^o -> $\gamma\gamma$ π^+ -> $\mu\nu$ μ -> **e**ν

Les gerbes « hadroniques » sont plus complexes, variés, étendues que les cascades électromagnetiques.



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 ther variables

$$t = x/X_0$$
$$y = E/E_c\ ,$$

so that distance is measured in units of radiation energy.

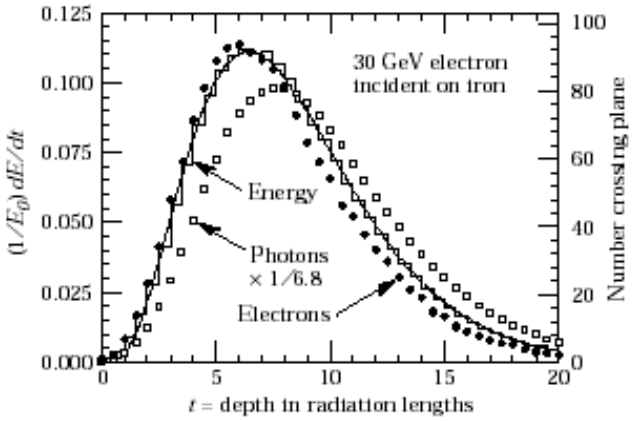


Figure 26.17: An EGS4 simulation of a 30 GeV electron-induced cascade in iron. The histogram shows fractional energy deposition per radiation length, and the curve is a gamma-function fit to the distribution. Circles indicate the number of electrons with total energy greater than 1.5 MeV crossing planes 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).

Cascade: le nombre d'électrons *double* avec chaque χ_o parcouru. A chaque stade l'énergie moyenne des électrons est moitié. Quand cette énergie est réduite à une valeur critique Ec ~ 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 χ_o

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

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

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

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

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

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

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. Futher 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}	$dE/dx\|_{\rm min}$ [b] {MeV/g/cm^2}	Radiation length [c] X_0 {g/cm^2}	X_0 {cm}	Density {g/cm^3} ({g/ℓ} for gas)	Liquid boiling point at 1 atm(K)	Refractive index n ($(n-1)\times10^6$ 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]	866	0.0708	20.39	1.112
D_2	1	2.0140	0.49652	45.7	54.7	(2.052)	122.4	724	0.169[0.179]	23.65	1.128 [138]
He	2	4.002602	0.49968	49.9	65.1	(1.937)	94.32	756	0.1249[0.1786]	4.224	1.024 [34.9]
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_2O			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	—
Bismuth germanate (BGO) [r]			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

AUGER

Fermi

EGRET

HESS

ANTARES

"L'atmosphère nous protège"

1 atmosphère ~ 1000 gm/cm² / 37 gm/cm² = 27 χ_o.

Soit 27 x 0.56 = 15 cm de plomb

1 atmosphère ~ 1000 gm/cm² / 90 gm/cm² = 11 Λ_o.

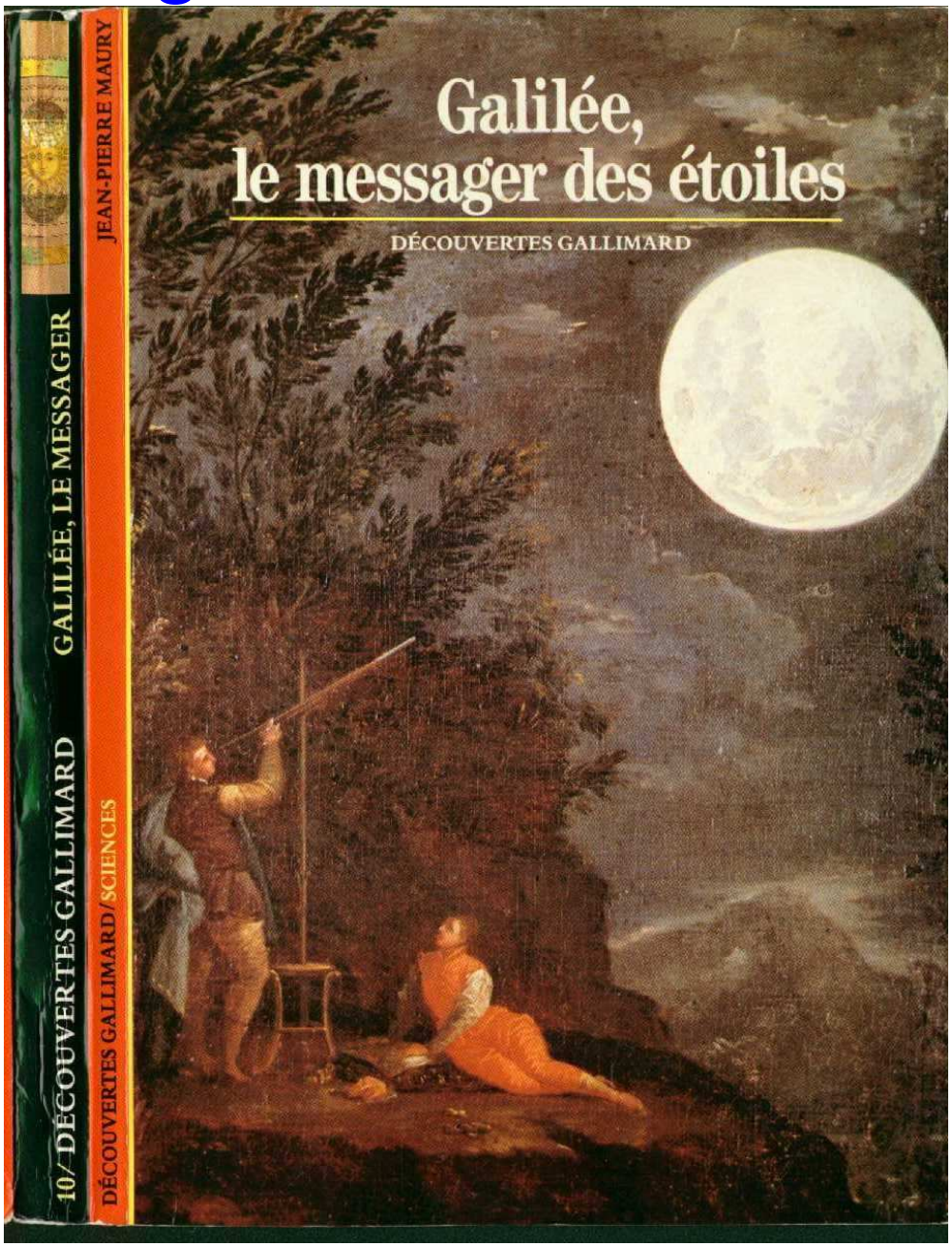
e^{-11} = 0.17 protons sur million ne cascadent pas

Mais pertes par dE/dx….

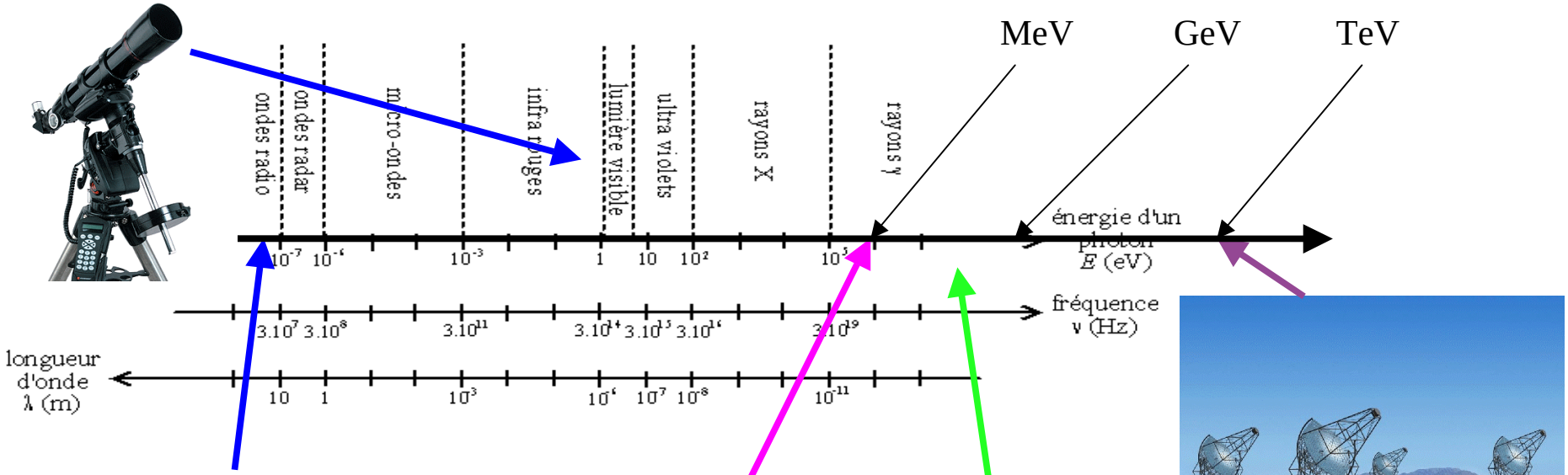
"Most events are muons…"

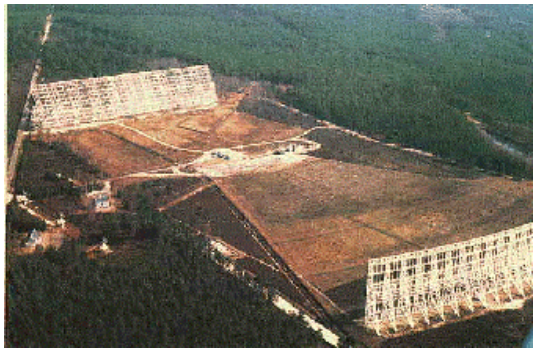
1. Pourquoi des μ ?
2. Pourquoi un spectre en $1/E^2$?
3. Pourquoi l'énergie moyenne est-elle 2 GeV ?

4. Les messagers des étoiles

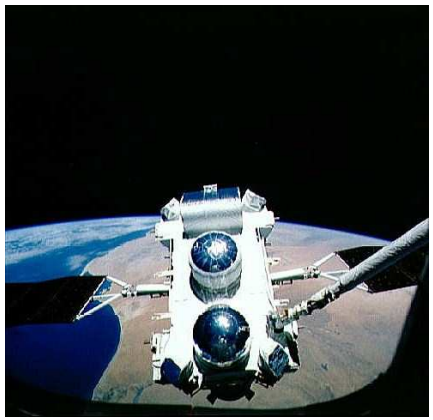


OBSERVATORIES





Radiotélescope de Nançay, France, 3rd largest in world)



Compton GRO with EGRET, April 1991. End, June 2000

Fermi's predecessor

HESS (Namibie)

CELESTE (Thémis)

"Thermique" versus "non-Thermique":

rayonnement collectif, incoherent, d'une population d'électrons (corps noir)

Versus

Diffusions (réactions) individuels entre particules

- Rayons X – frontière entre la physique "classique" et moderne. Divers télescopes spatiaux, dont XMM et *Chandra*.
- Gammas du MeV – Raies nucléaires importantes. Satellite Integral.
- Gammas du GeV – "vraiment" relativiste. Richesse de sources à étudier. Satellites *Compton* et *Fermi*.
- Gammas du TeV – Etudes des accélérateurs cosmiques aux énergies extrêmes. Flux réduits ➔ instruments au sol ➔ Tcherenkov atmosphérique. HESS.

L'analogue électromagnétique du bang supersonique

Si on place une charge quelque part, son champ électrique se propagera dans l'espace avec un 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 Tcherenkov en 1937 (prix Nobel, 1958).

Air au niveau de la mer, n= 1.00273, angle Tcherenkov ~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.

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

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

(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.

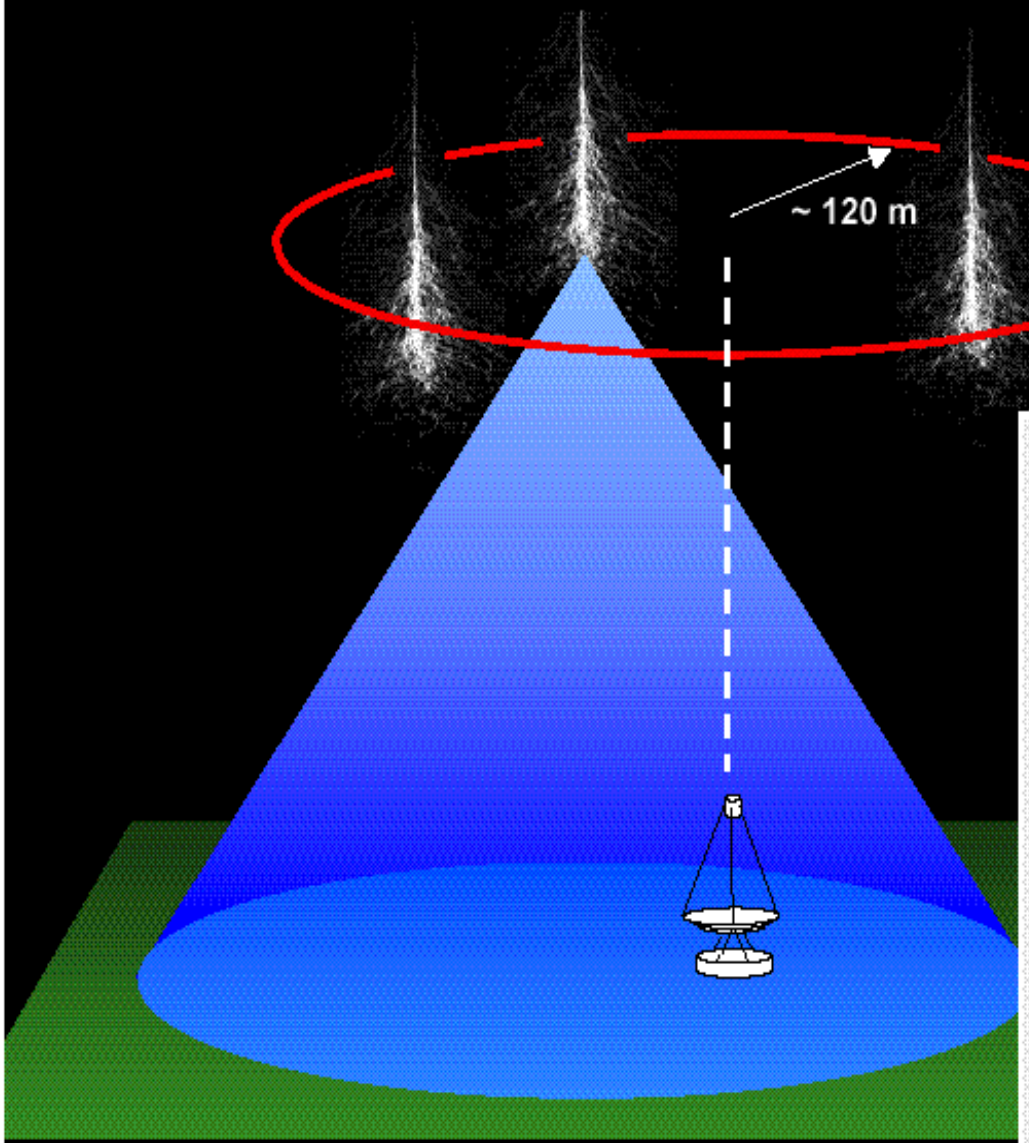
The number of photons produced per unit path length of a particle with charge ze and per unit energy interval of the photons is

$$\frac{d^2N}{dEdx} = \frac{\alpha z^2}{\hbar c}\sin^2\theta_c = \frac{\alpha^2 z^2}{r_e m_e c^2}\left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(E)}\right)$$
$$\approx 370 \sin^2\theta_c(E)\ \text{eV}^{-1}\text{cm}^{-1} \qquad (z=1)\ , \qquad (26.37)$$

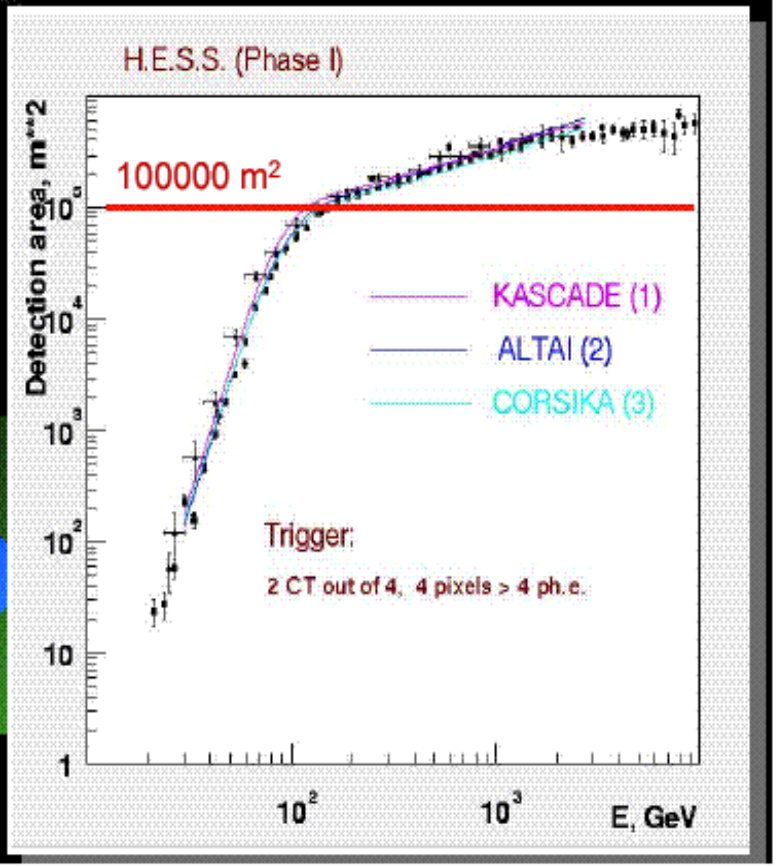
or, equivalently,

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

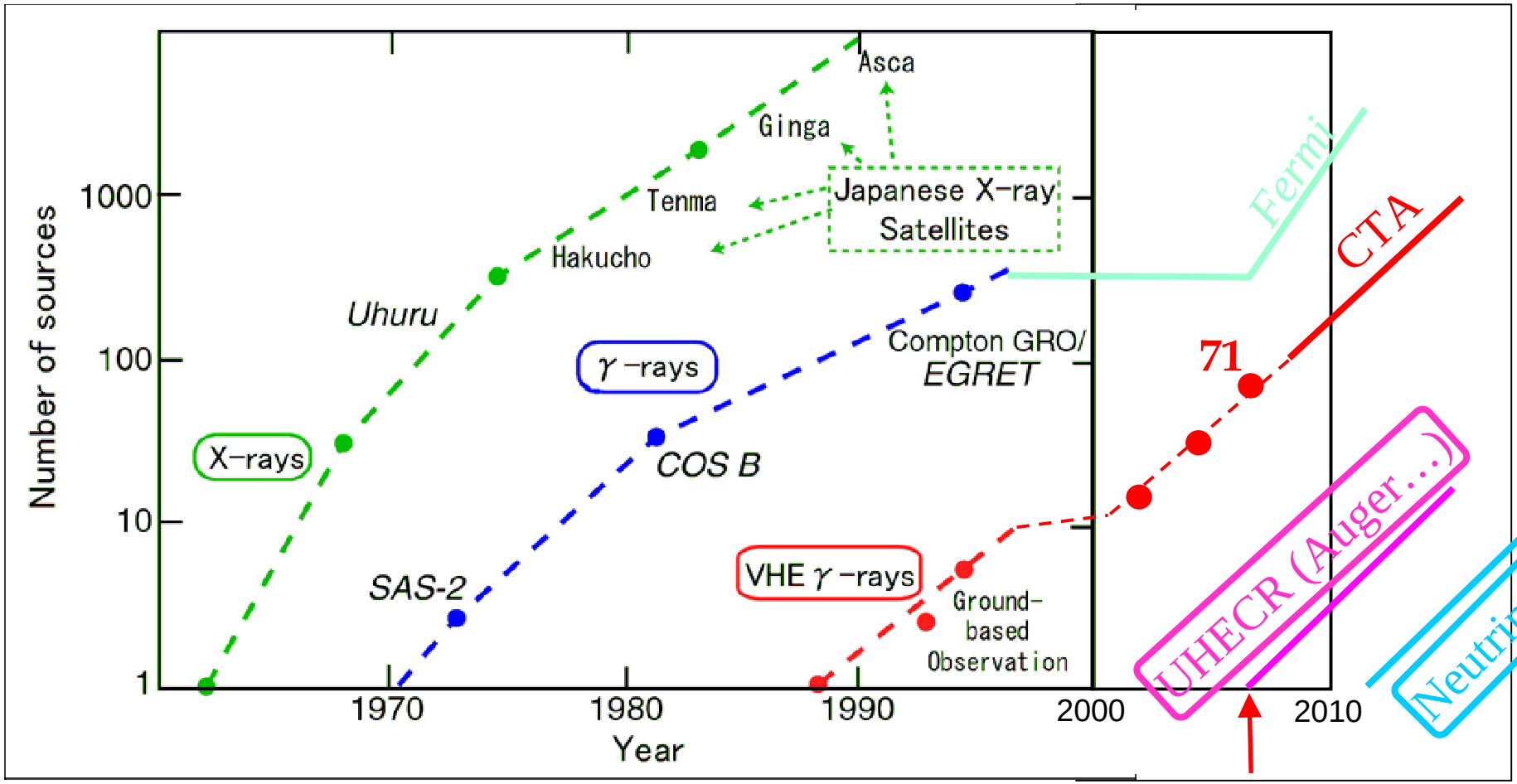
Effective detection area



about 50000 m^2

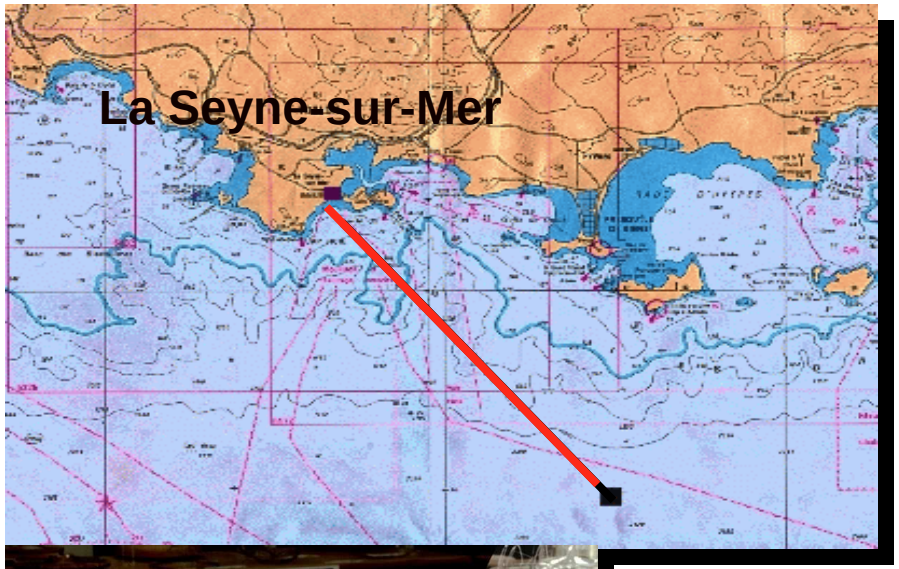


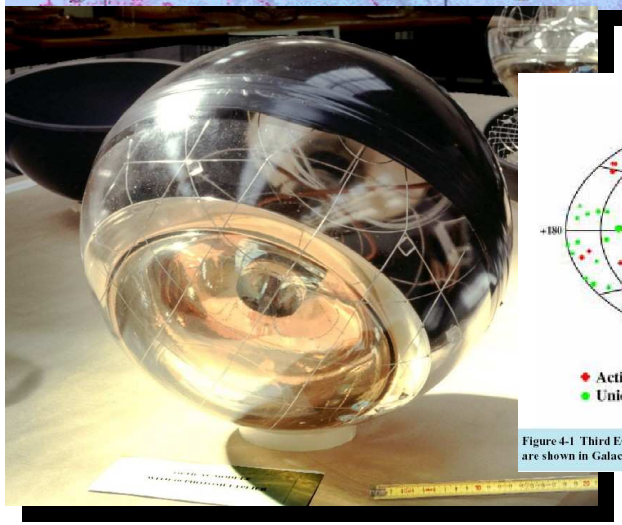
(Slide W. Hoffman)


Number of sources
1000
100
10
1
1970
1980
1990
2000
2010
Year
Asca
Ginga
Tenma
Hakucho
Uhuru
Japanese X-ray Satellites
X-rays
γ-rays
Compton GRO/ EGRET
COS B
SAS-2
VHE γ-rays
Ground-based Observation
Fermi
CTA
71
UHECR (Auger…)
Neutrinos

Détection: Cherenkov light in water / ice

1000000000 m^3
~ 5000 PMTs
Threshold ~ 1 TeV





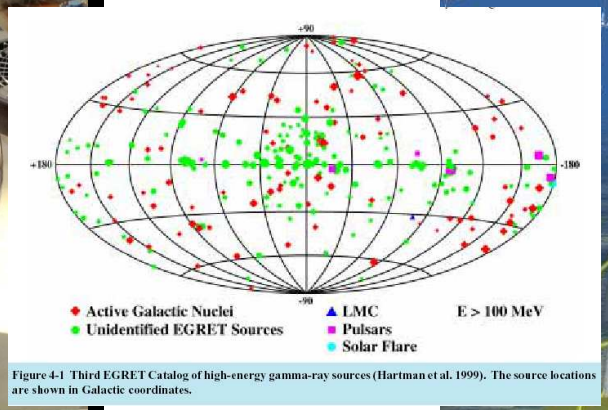
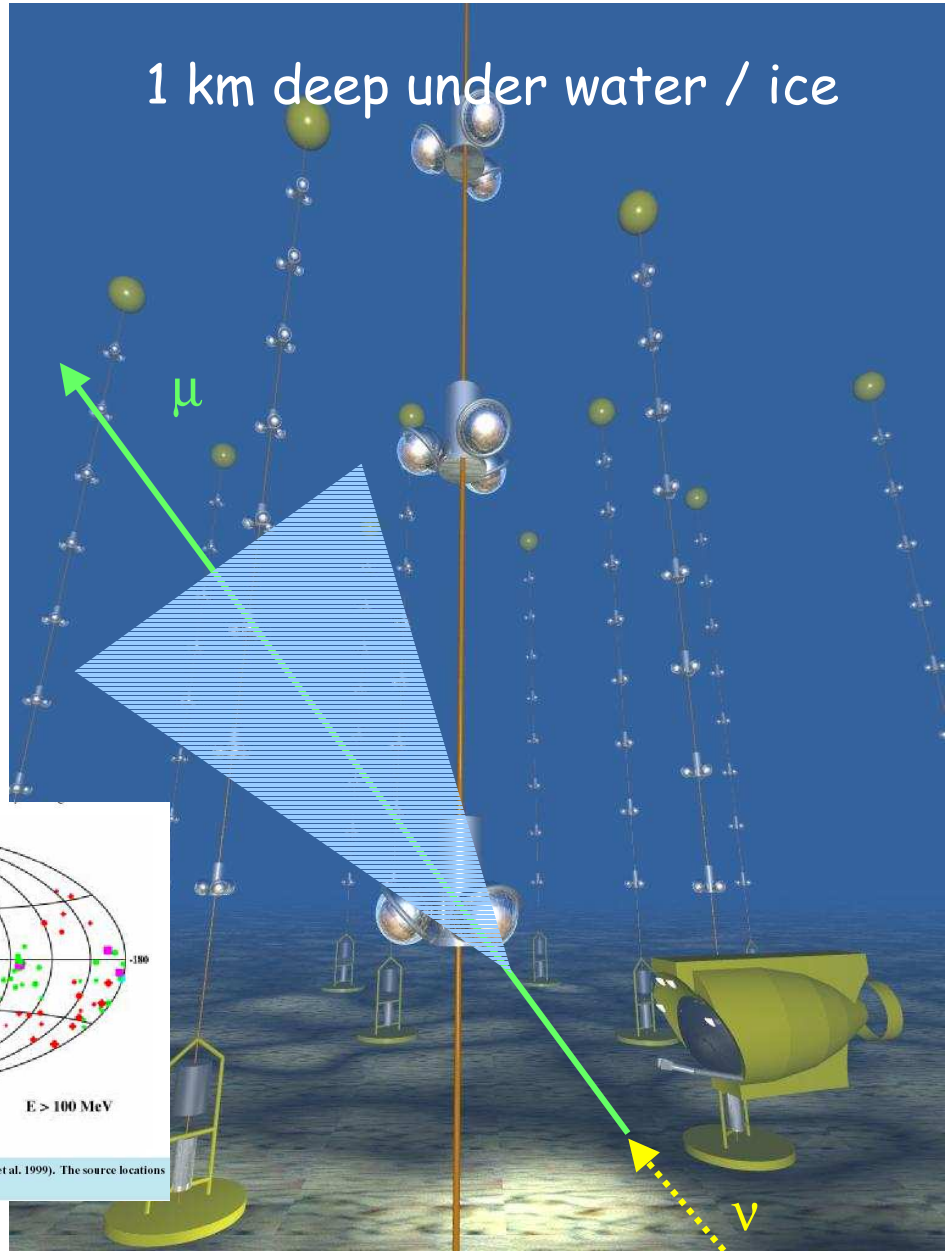
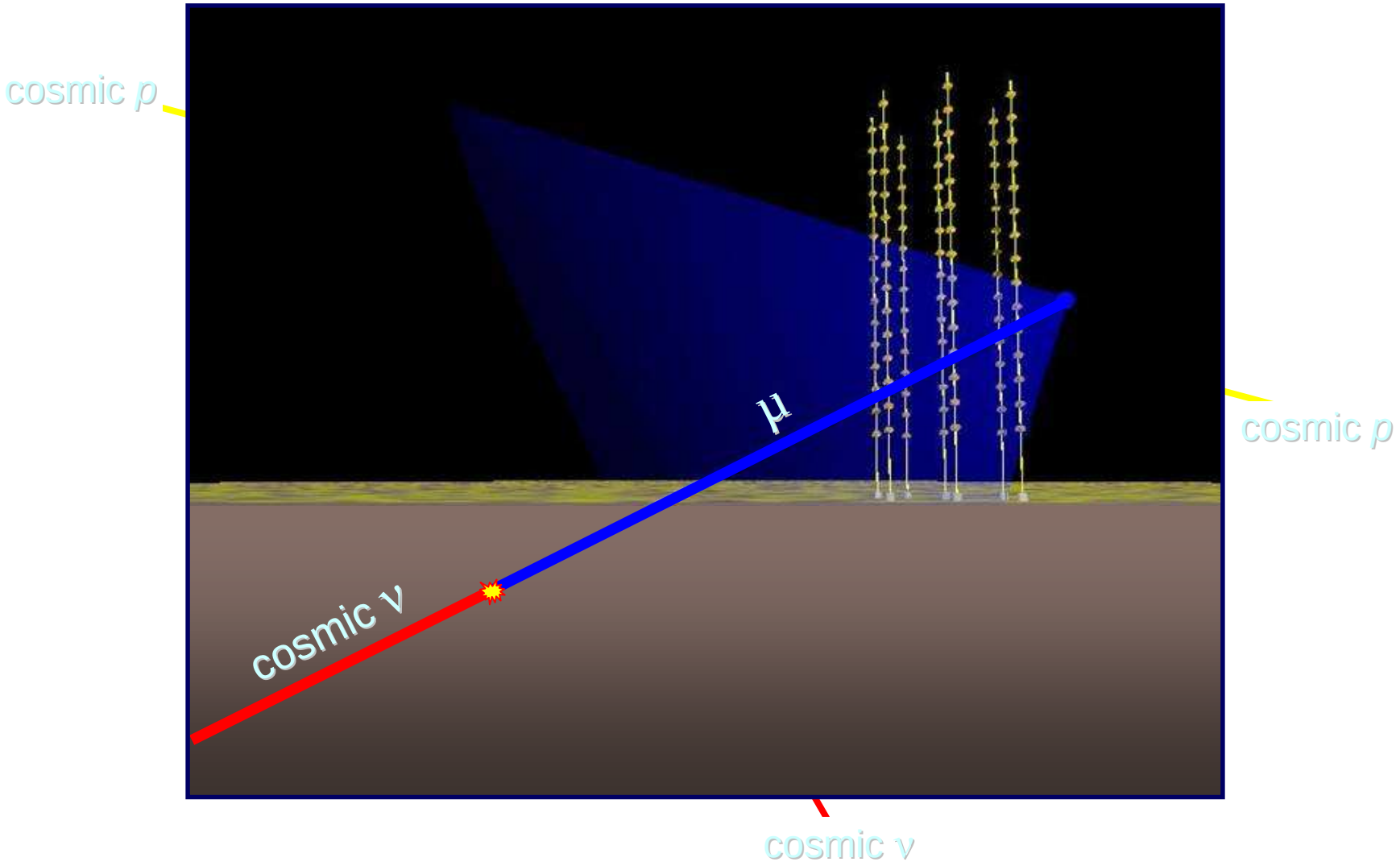


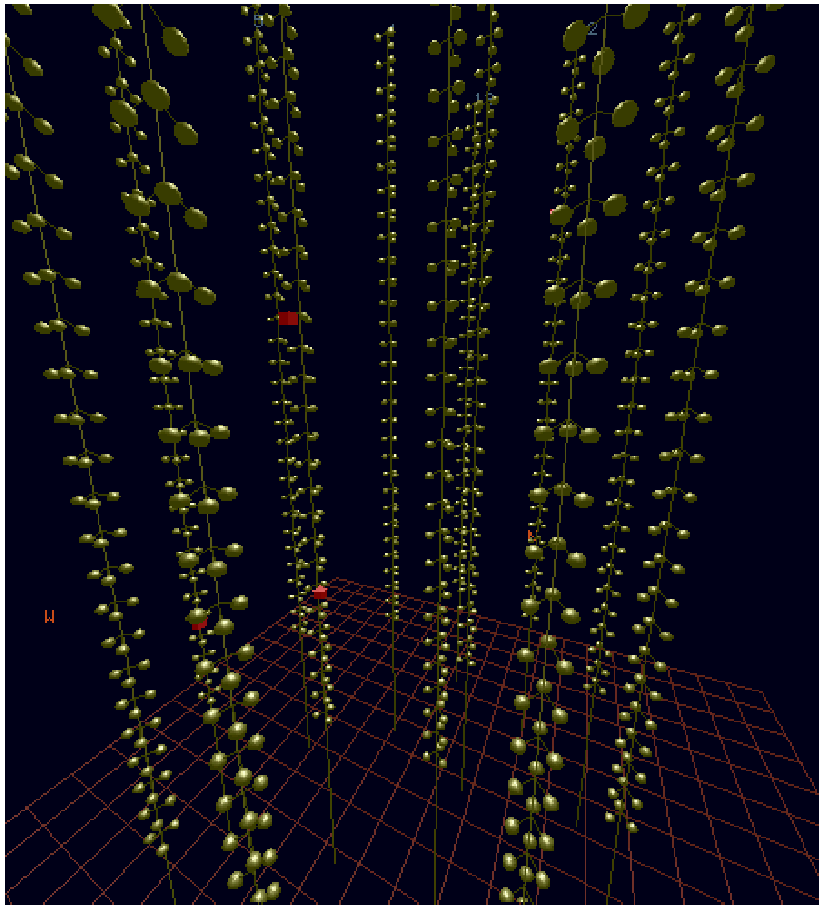
Figure 4-1 Third EGRET Catalog of high-energy gamma-ray sources (Hartman et al. 1999). The source locations are shown in Galactic coordinates.



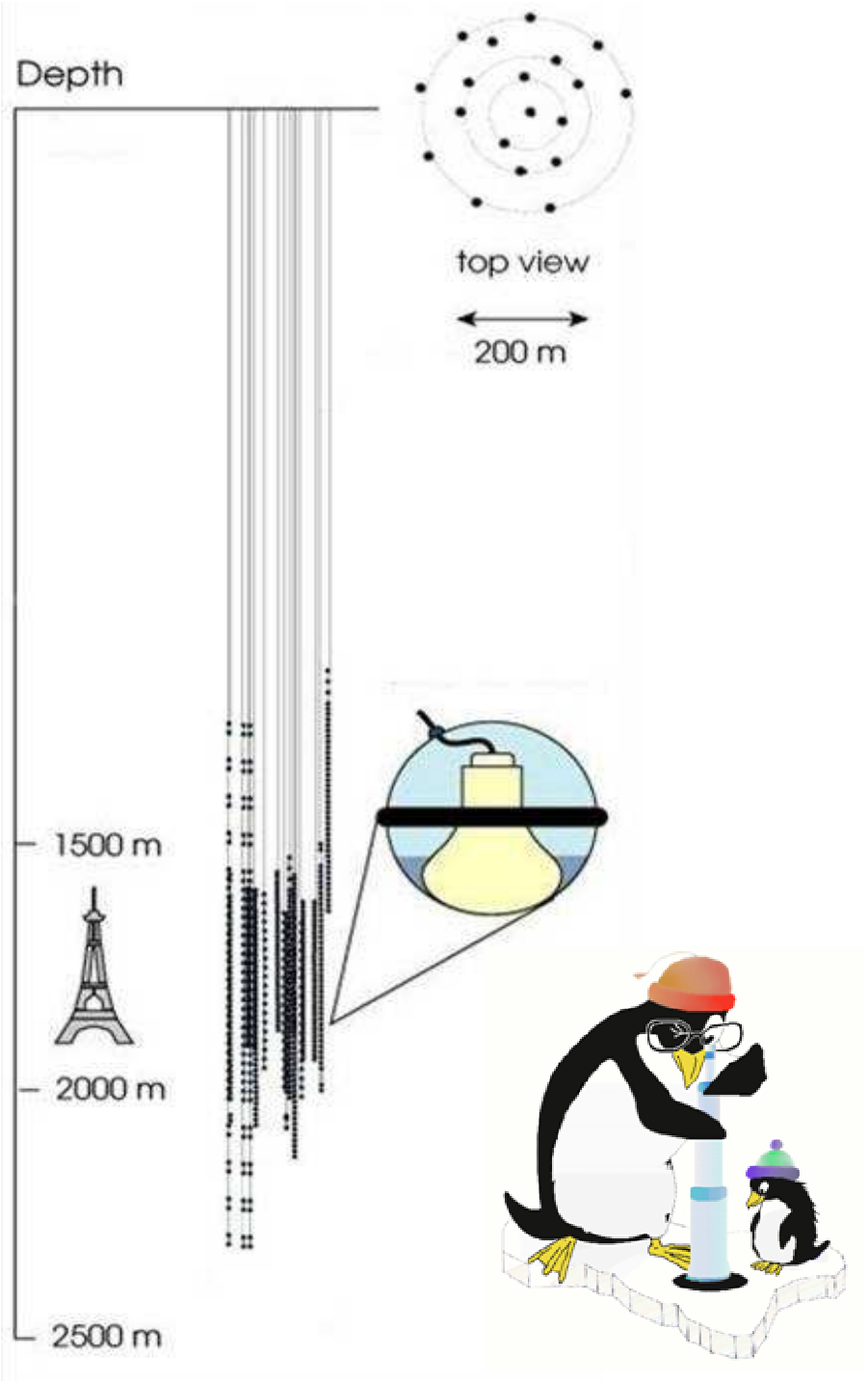
Principe de base d'un télescope neutrino



Simulation Antares



Muon 1 TeV



AMANDA-II

- AMANDA a démarré au pôle sud en 1996
- 19-lignes en 2000
- R&D pour un détecteur km^3 (IceCube)
- Résultats sur les neutrinos atmosphériques
- Pas de source de neutrinos

Pourquoi "qqs degrès" de résolution angulaire?

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

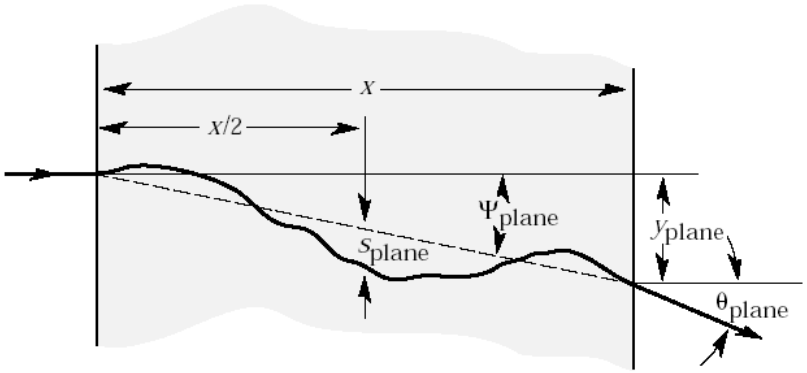
ii) fait perdre de l'énergie à la particule **« dE/dx energy loss »**

iii) fait dévier la trajectoire de la particule **« multiple scattering »**

iv) crée éventuellement de la lumière de scintillation

26.3. Multiple scattering through small angles

A charged particle traversing a medium is deflected by mai
Most of this deflection is due to Coulomb scattering from nucl
is called multiple Coulomb scattering. (However, for hadronic
interactions also contribute to multiple scattering.) The Coulon
is well represented by the theory of Molière [32]. It is rough
deflection angles, but at larger angles (greater than a few θ_0, d
like Rutherford scattering, having larger tails than does a Gaussian distribution.



If we define

$$\theta_0 = \theta^{\text{rms}}_{\text{plane}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\,\theta^{\text{rms}}_{\text{space}} \ . \qquad (26.9)$$

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]

$$\theta_0 = \frac{13.6\ \text{MeV}}{\beta cp}\, z\, \sqrt{x/X_0}\left[1 + 0.038 \ln(x/X_0)\right] \ . \qquad (26.10)$$

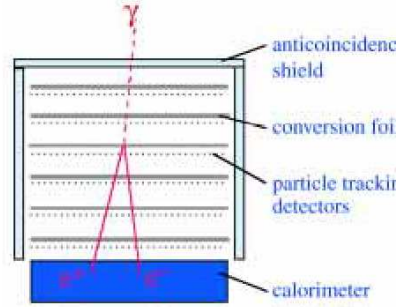


Figure 11-1 Principle of a pair conversion telescope

Tracker: x/Xo ~0.1 => 13.6 MeV/100 MeV √0.1 = 2.5 degrès glast

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

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

Antimatière

- Chose bizarre – les réactions fondamentales ne préfèrent pas matière versus antimatière ; pendant le Big Bang il y en avait kif-kif.
- Alors… pourquoi notre Monde n'a que très très peu d'antimatière?

- Découverte des antiprotons à Berkeley en 1955.

pp ➔ ppp pbar

Pour un proton de ~6 GeV incident sur une cible fixe.

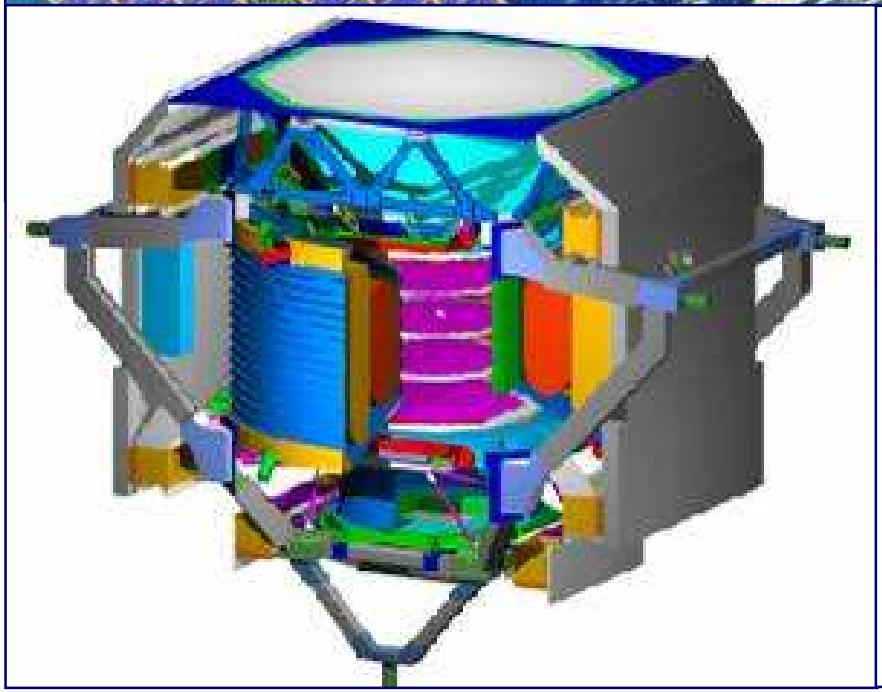
- Cela se passe naturellement dans les gerbes atmosphériques.

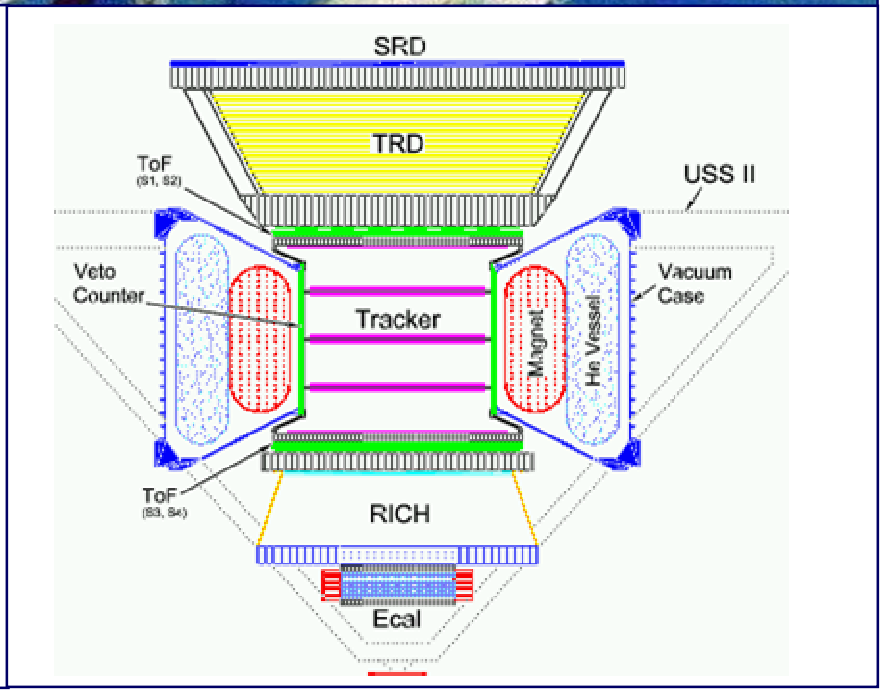
- Sakharov 1967: trois conditions pour un Univers asymmétric –

1. Non-conservation du nombre de baryons
2. Violation de CP
3. Période de déséquilibre énergie-matière pendant le Big Bang

- AMS sera amené sur la station spatiale par la navette avant l'automne – recherche d'anti-**hélium** cosmique.

AMS - Alpha Magnetic Spectrometer

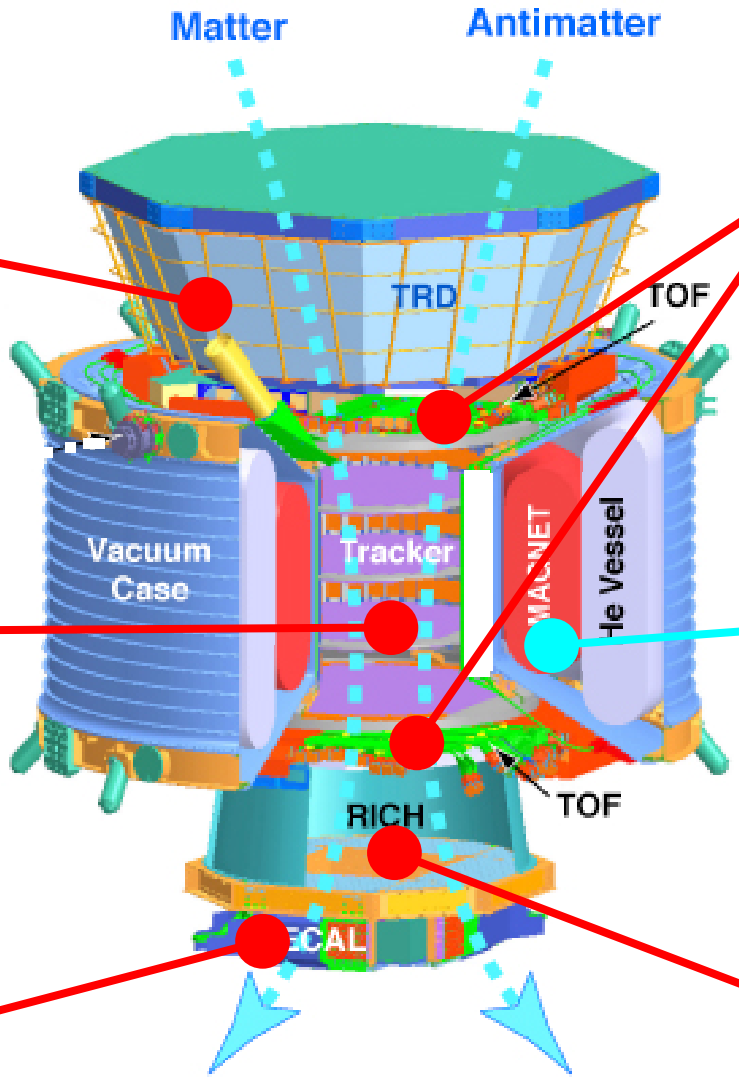




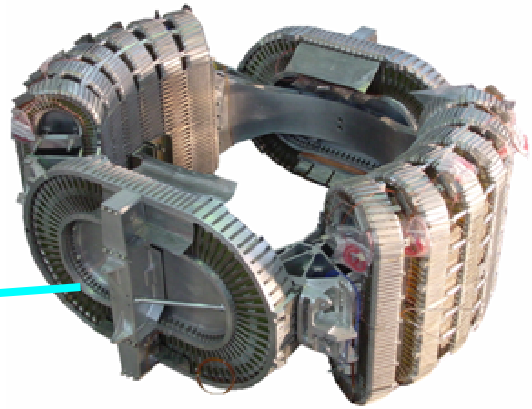
Le détecteur AMS

TRD
séparation e/p

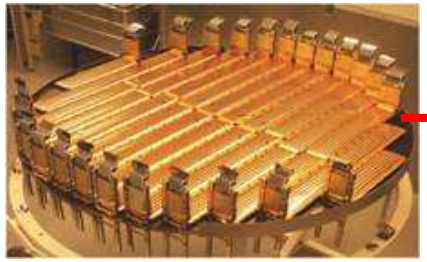
Mesure de temps de vol
β, Z



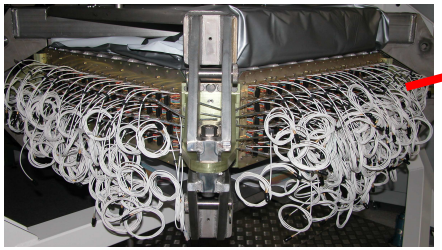
Aimant supra



Trajectrographe
Z,R



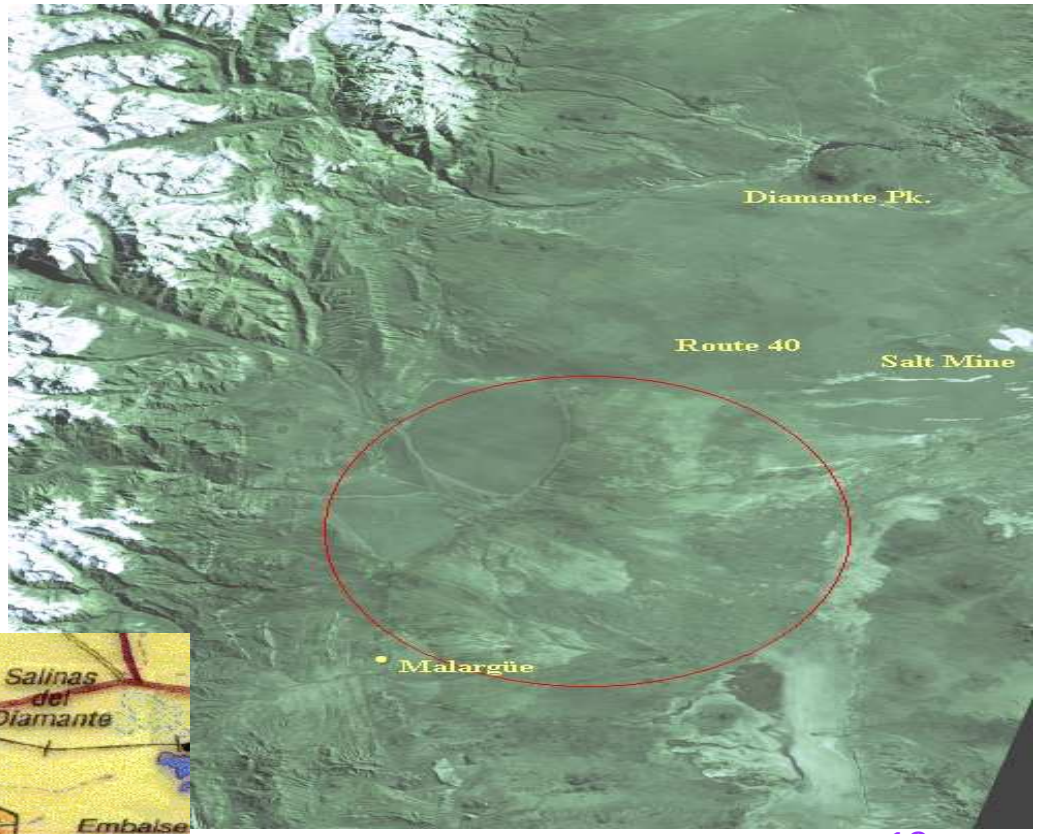
Calorimètre électromagnétique
séparation e/p , E

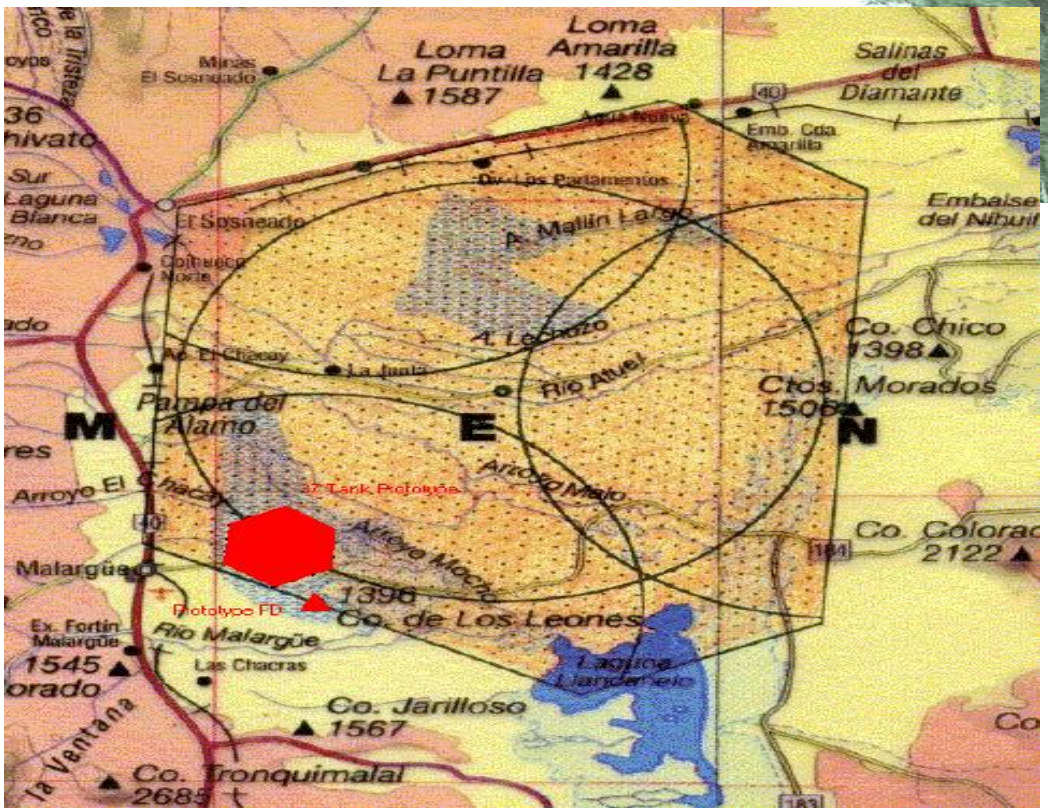


RICH
β, Z

Taille: 3m x 3m x 3m
Poids: 7 tonnes

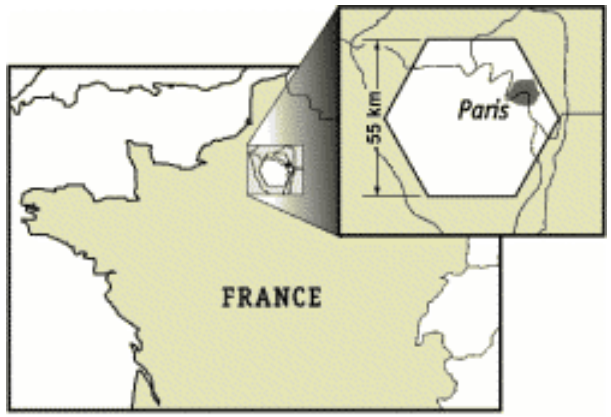
PIERRE AUGER OBSERVATORY





Rayons cosmiques_$>10^{19}$ eV

Site sud: Mendoza, Argentine

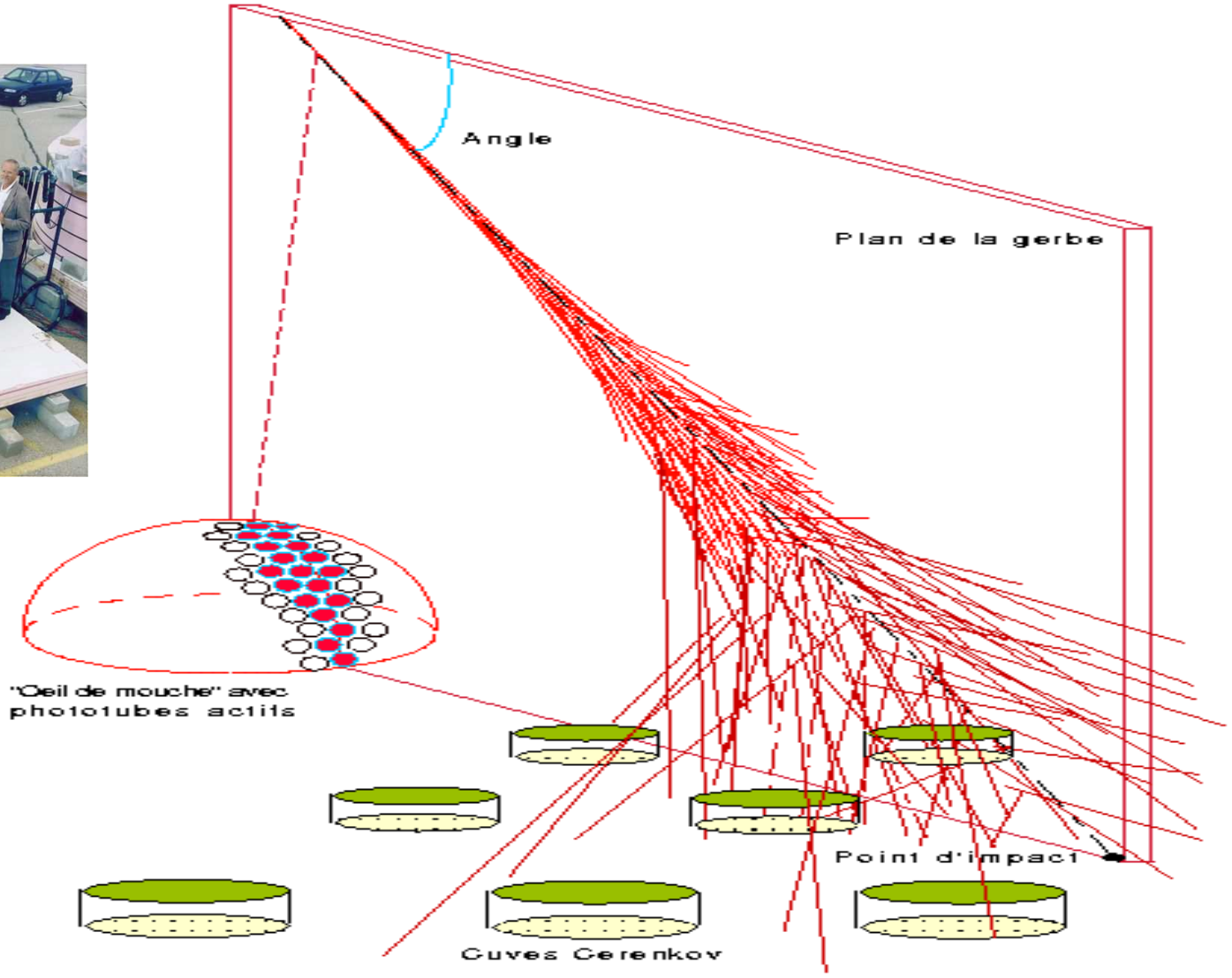


Hybride: Fluorescence (œil de mouche) *plus* détecteurs d'électrons.

Cycle utile: 10% pour l 'œil de mouche,

100% pour le réseau.

Site nord + site sud => le ciel entier.

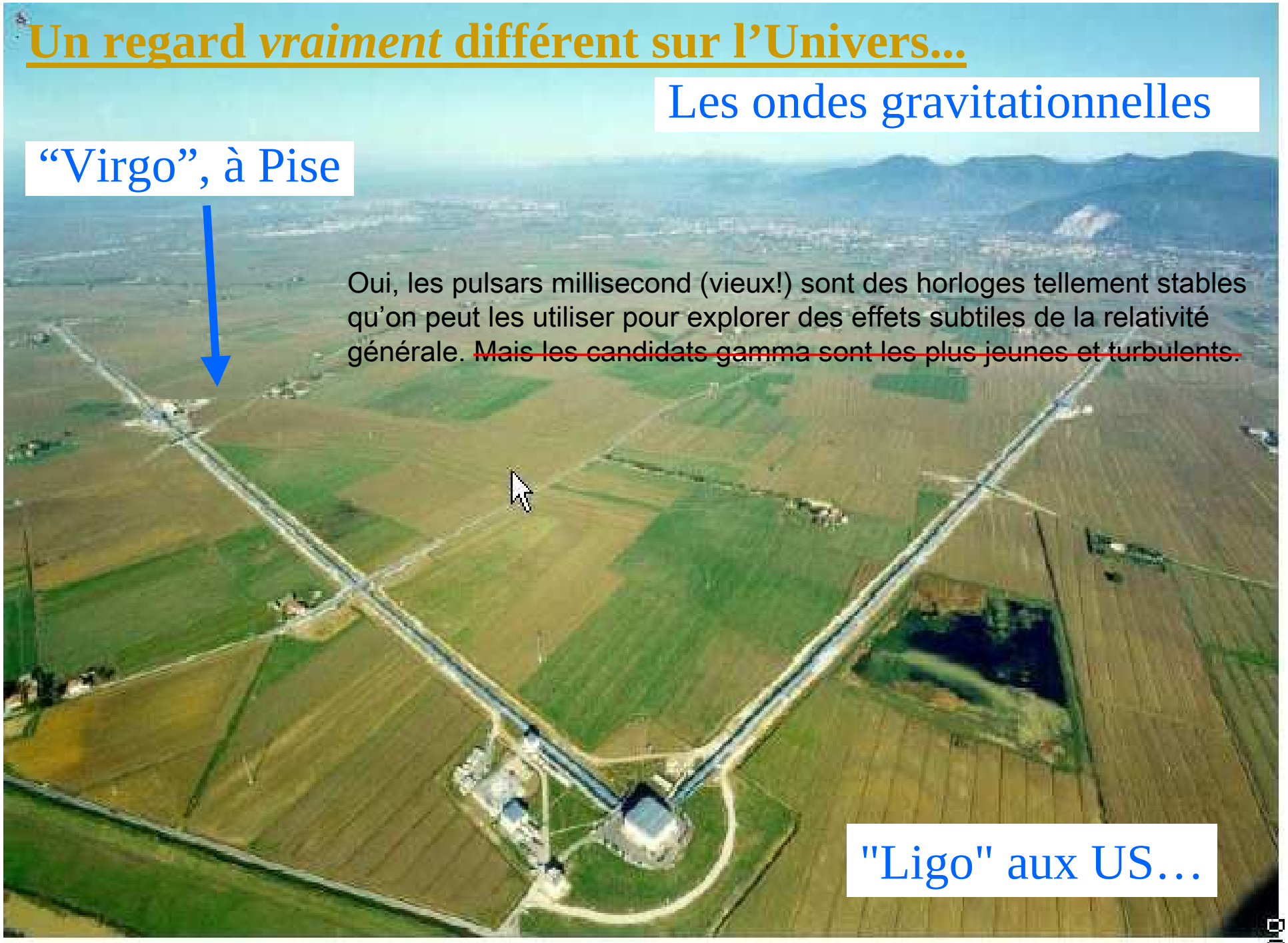


Un regard *vraiment* différent sur l'Univers...

Les ondes gravitationnelles

"Virgo", à Pise

Oui, les pulsars millisecond (vieux!) sont des horloges tellement stables qu'on peut les utiliser pour explorer des effets subtiles de la relativité générale. ~~Mais les candidats gamma sont les plus jeunes et turbulents.~~



"Ligo" aux US…

Matière noire

- La théorie des particules élémentaires proposent des extensions aux Modèle Standard qui pourraient expliquer la masse invisible.
- WIMP = Weakly Interacting Massive Particle.
- LISP = Lightest Supersymmetric Particle.
- Le neutralino, χ, est une LISP.
- Depuis le Big Bang, il s'en serait accumulé aux centres des galaxies, des amas globulaires, et cetera.
- Il n'interagit qu'avec lui-même, rarement.

χ χ ➔ .. ➔ gammas (Fermi?)
➔ anti-protons (AMS?)
➔ Positons (Pamela?)

Tout signal serait à confirmer au LHC (ou à Fermilab…)

Affaire à suivre…