L'observatoire Pierre Auger et les rayons cosmiques ultra-énergétiques

Lumière nouvelle sur un univers méconnu…

Etienne Parizot, APC – Univ. Paris 7

Bienvenue en terre cosmique !
Observatoire Pierre Auger
Pampa amarilla, Province de Mendoza, Argentine, Terre, Voie Lactée

La décennie révolutionnaire…

- Découverte de nouveaux rayonnements à la fin du XIXe…
  - La lumière « non lumineuse »
  - Les rayons cathodiques
  - Les rayons X
  - Les rayonnements radioactifs
  - Les rayons cosmiques

Lumière ou matière ?

- Rayons cathodiques : électrons (1897)
- Rayons X (Röntgen, 1895) : nature incertaine jusqu'à von Laue (1912)
- Radioactivité de l'uranium (Becquerel, 1896)
- 1898-1900, P. et M. Curie, E. Rutherford, P. Villard... comprennent qu'il y a plusieurs types de radioactivité (α, β, γ)

L'électroscope

- Électroscope chargé ⇒ les « bras » se repoussent
- Soumis à un rayonnement énergétique, l'air se trouve partiellement ionisé et les charges sont évacuées
- L'électroscope se décharge d'autant plus vite que le rayonnement est intense

Décharge spontanée !

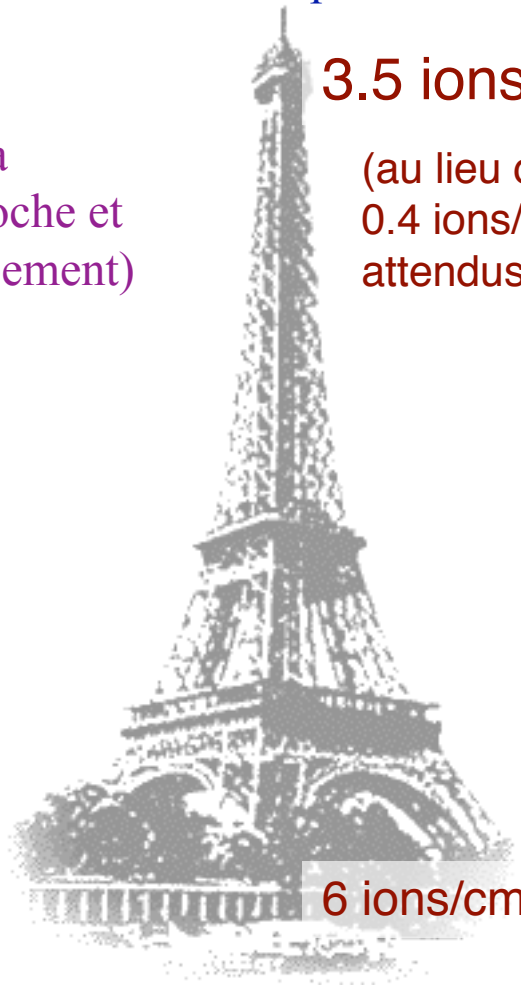
- 1901: Wilson remarque que la décharge est identique à la surface de la Terre et dans un tunnel profond

- Rutherford montre que la radioactivité naturelle (roche et contamination de l'équipement) en est responsable.

3.5 ions/cm^3

(au lieu des 0.4 ions/cm^3 attendus)

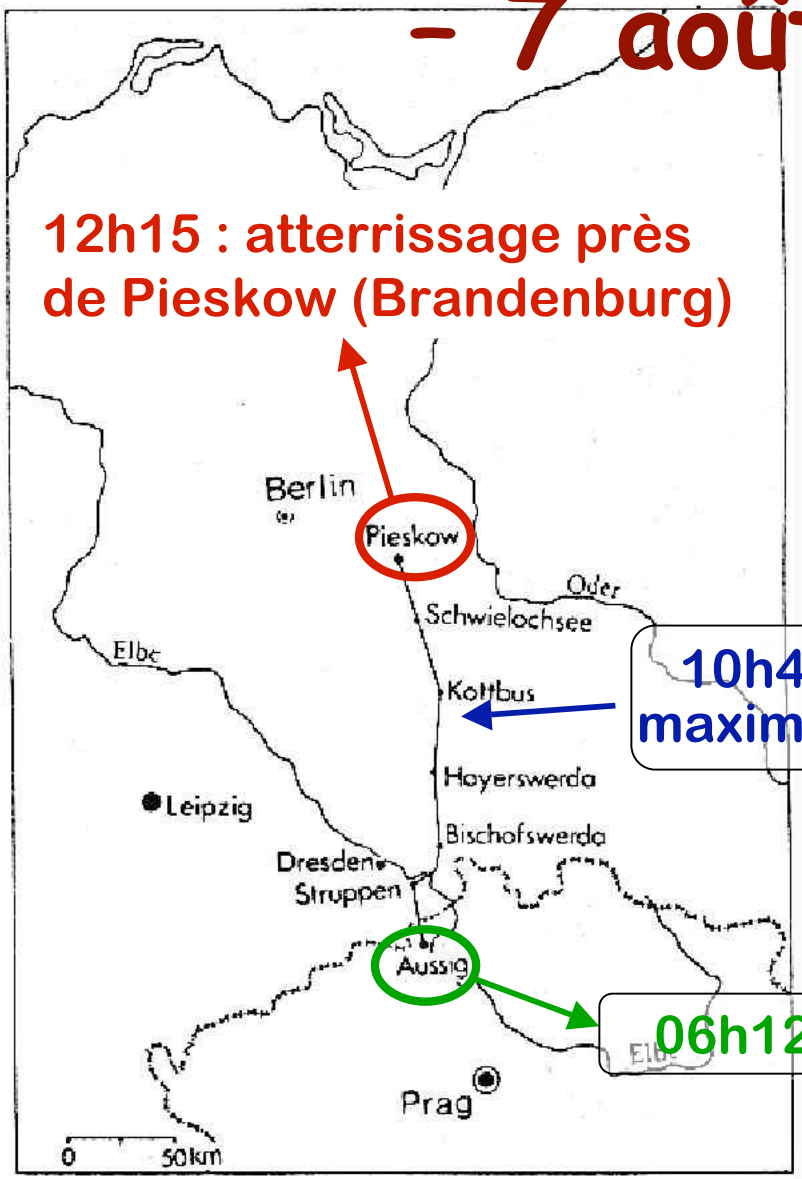
- 1910: Théodore Wulf (physicien amateur jésuite qui construit les meilleurs électromètres) travaille au sommet de la tour Eiffel



6 ions/cm^3

Victor Hess à l'assaut du ciel...

- 7 août 1912 -

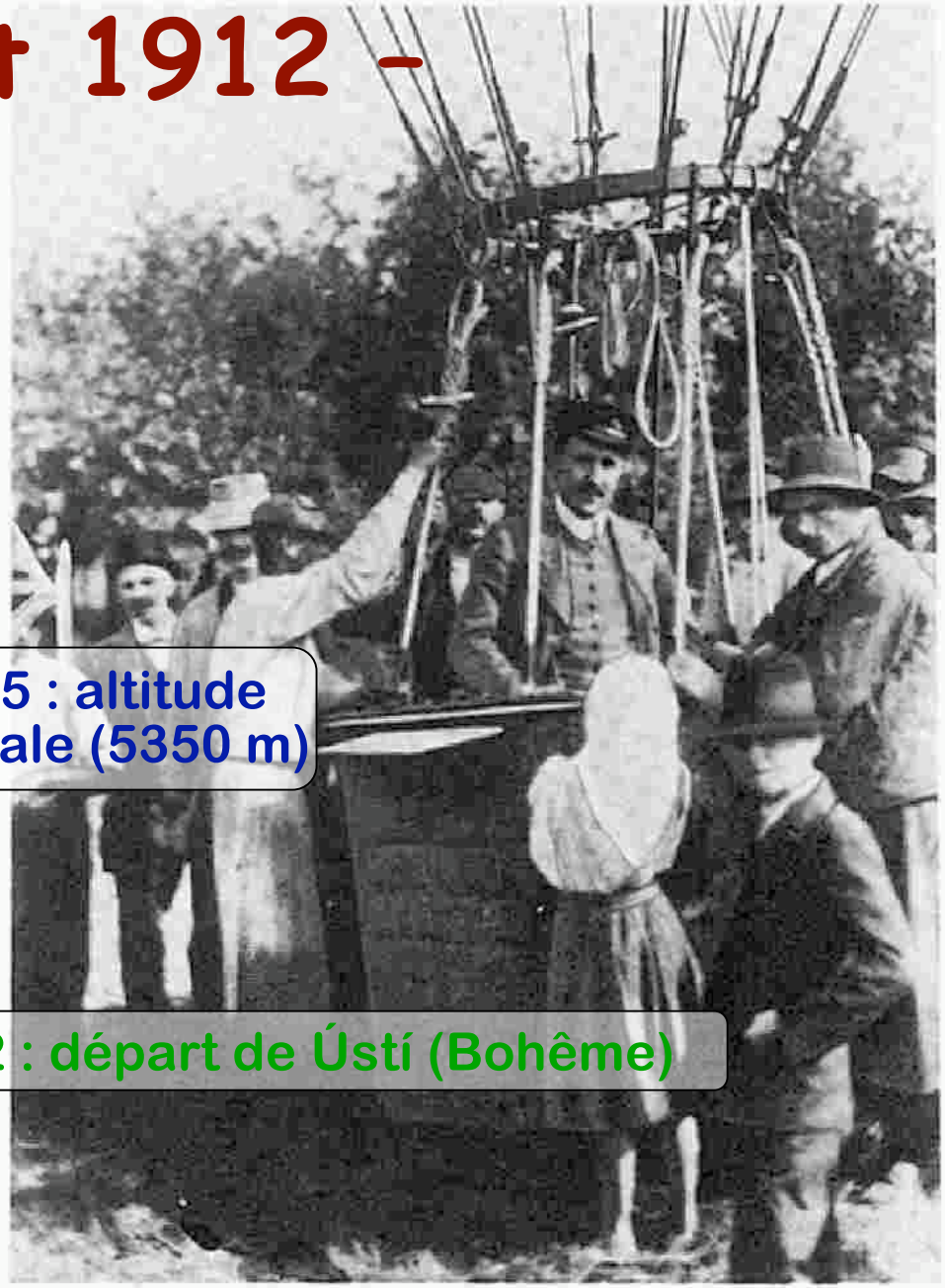


12h15 : atterrissage près de Pieskow (Brandenburg)

10h45 : altitude maximale (5350 m)

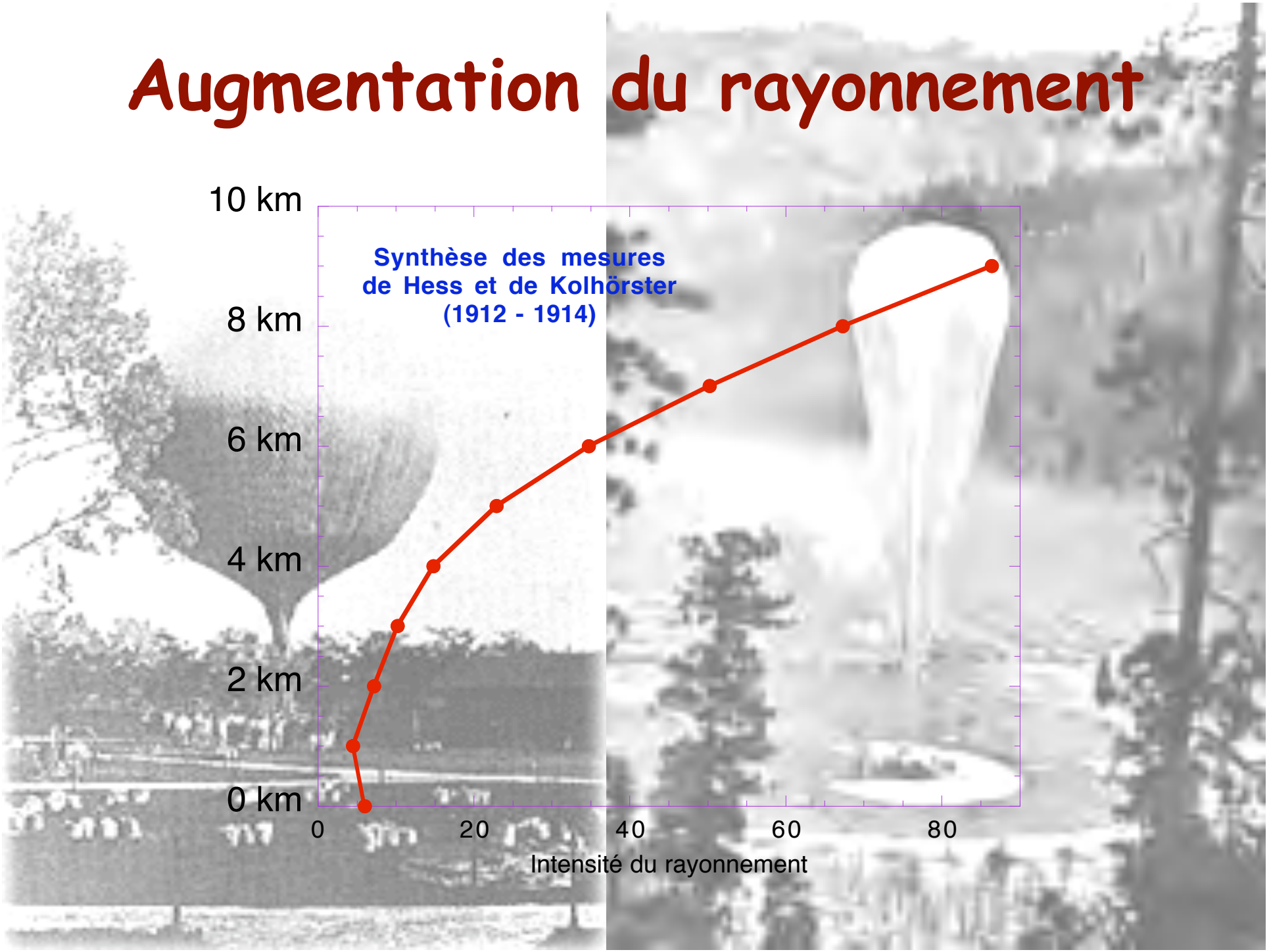
06h12 : départ de Ústí (Bohême)

Route des Entdeckungsfluges der kosmischen Stral



Hess bei Ballonlandung (1912).

Augmentation du rayonnement



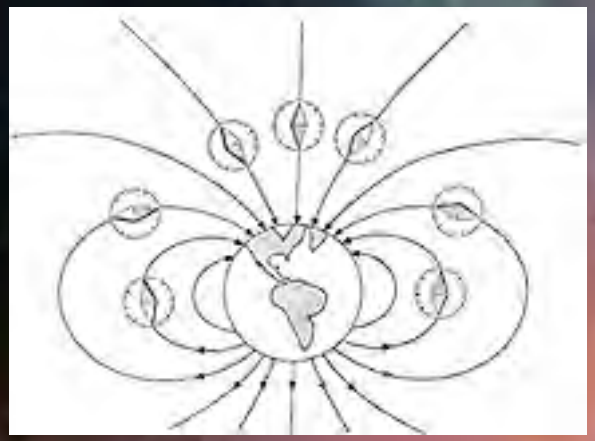
Le Ciel descend sur Terre !

- Mais d'où ? Le cosmos est vaste !
- Et quoi ? Le radium C (^{214}Bi) est 5 fois moins pénétrant !
- Lumière ? Matière ? Comment savoir ?
- Situation très difficile : on ne connaît pas les particules, et on n'a pas d'outils pour les observer ! Les détecteurs sont encore à créer…
- Autre problème : on n'a affaire qu'à des particules secondaires ! Les primaires interagissent le plus souvent dans l'atmosphère…

17 ans de réflexion !

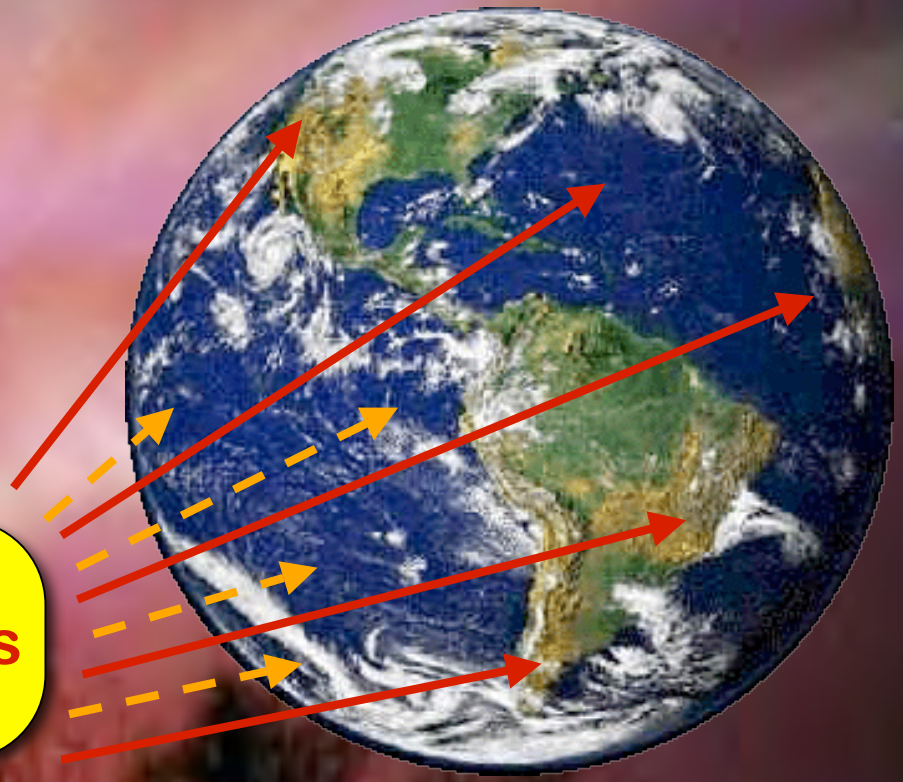
- De 1912 à 1928, la confusion règne.
- Robert Millikan pense que les rayons de Hess sont des rayons gamma de très haute énergie (→ 1925 : « rayons cosmiques »).
- En 1929 : Bothe et Kohlörster travaillent avec les détecteurs de Geiger et montrent que les rayons de Hess sont chargés !
- D. Skobeltzyn, qui travaille avec des chambres à bulles, trouve également des trajectoires courbées par le champ magnétique

Effet du champ magnétique terrestre



Effet de latitude
(déjà observé
par Clay en 1928)

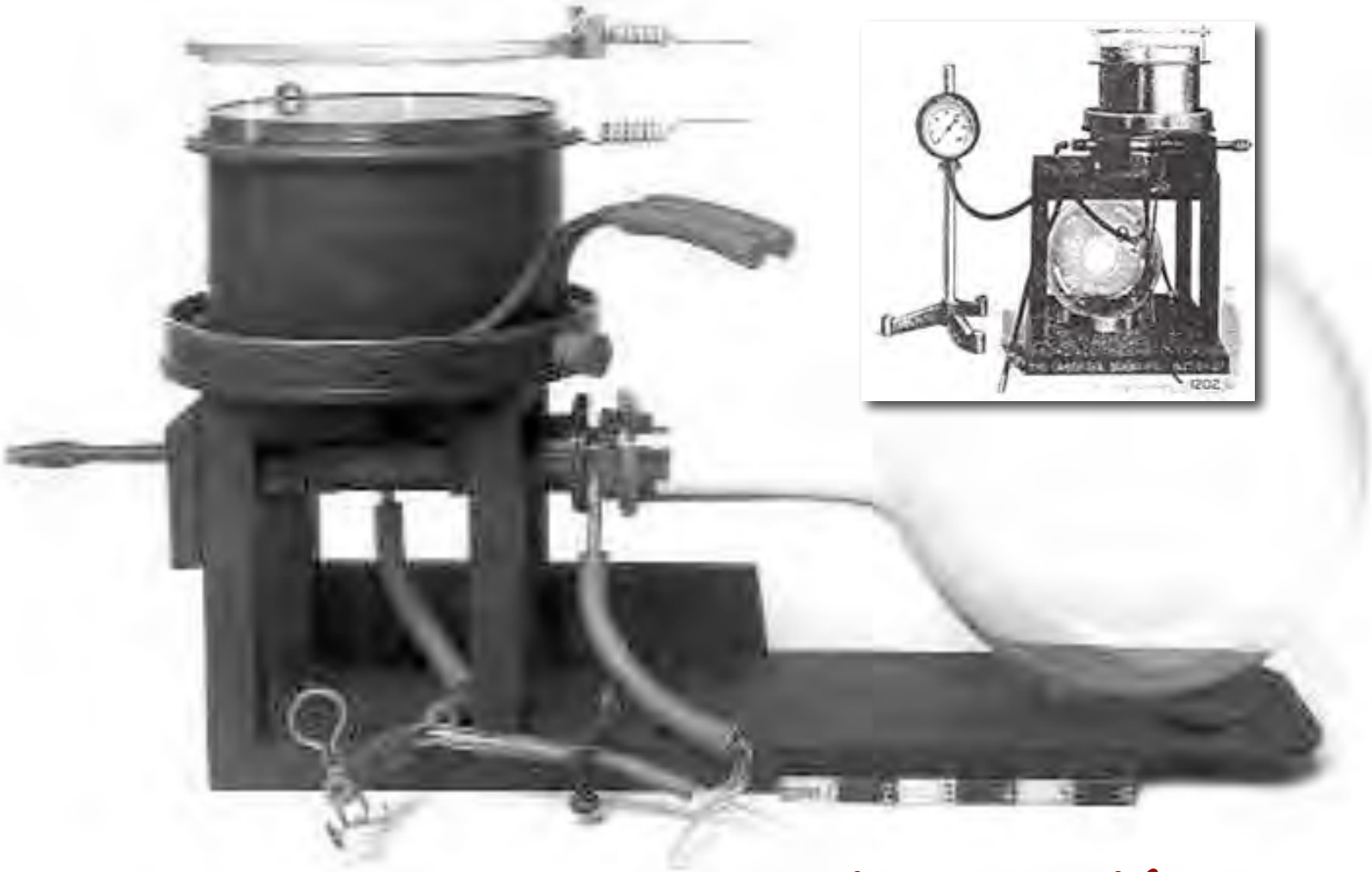
En 1930, Compton lance
une série d'expéditions



60 chercheurs
aux quatre coins
du monde !

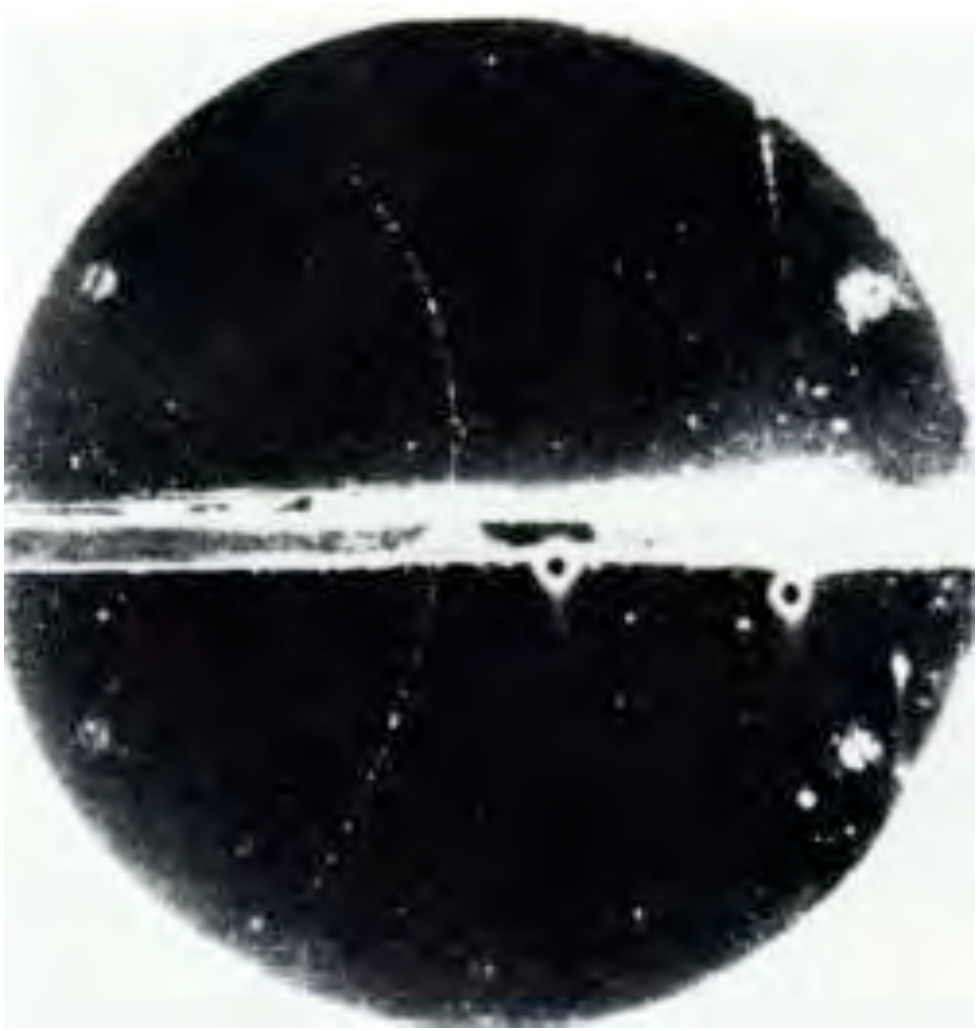
RC = particules chargées !!!

Naissance de la physique des particules…



…et de ses détecteurs

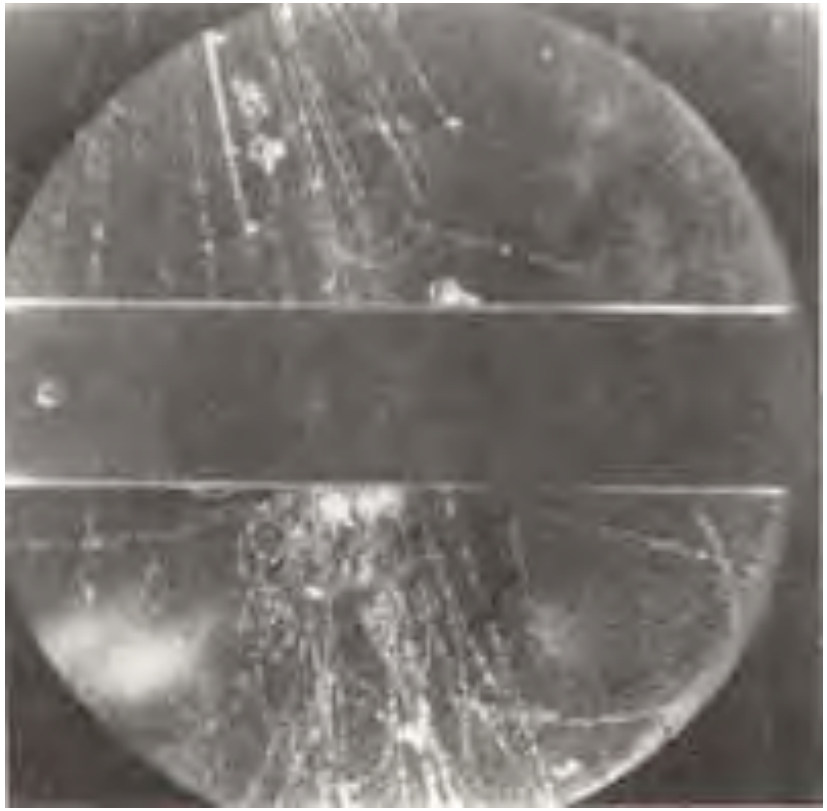
Découverte du positon



- 1930: P. Dirac prédit l'anti-électron (positon)
- **1932**: C. Anderson le découvre par hasard dans une trace de rayon cosmique
- 1932: Blackett et Occhialini inventent la chambre à bulles à déclenchement intelligent !

Paires particule/antiparticule…

(Blackett démontre la réversibilité de la transformation lumière/matière…)

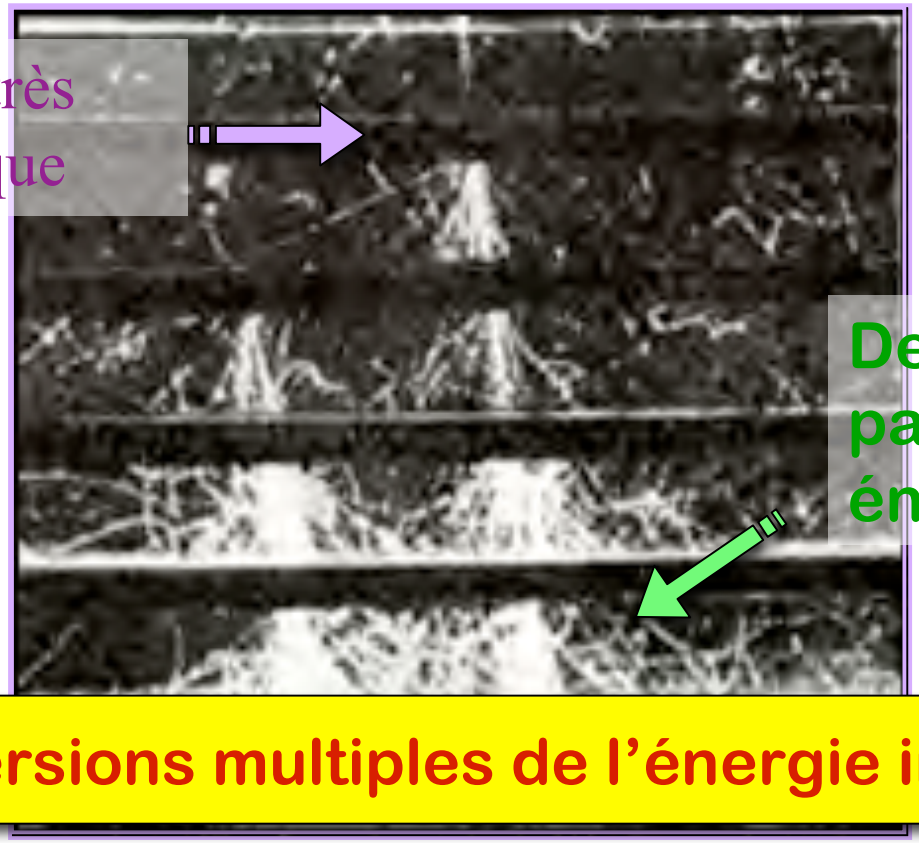


… et « pluies » de particules

Cascades, averses et gerbes

- Entre 1933 et 1937, la théorie des cascades de réactions et des « gerbes de particules » se développe (Carlson, Oppenheimer, Bhabha, Heitler...)

Cascades, averses et gerbes



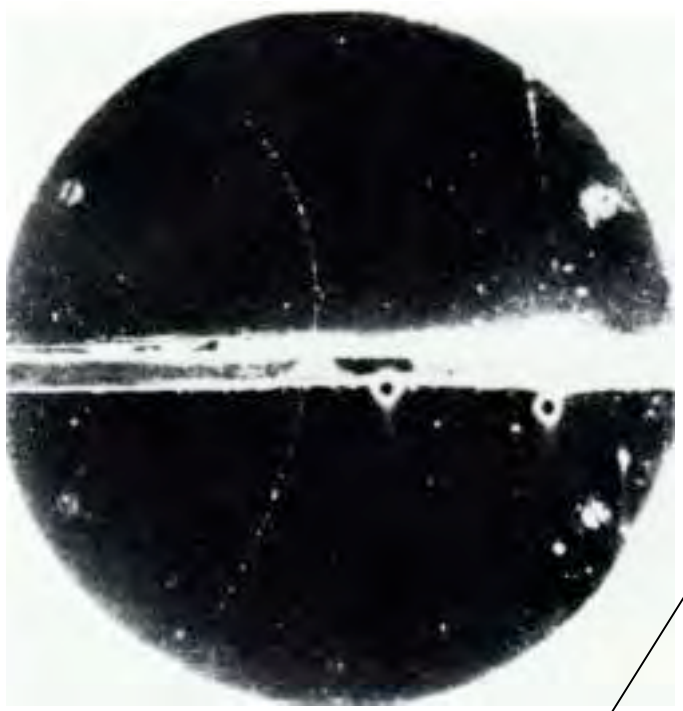
conversions multiples de l'énergie initiale

- Entre 1933 et 1937, la théorie des cascades de réactions et des « gerbes de particules » se développe (Carlson, Oppenheimer, Bhabha, Heitler...)

1936 : découverte du muon

(Neddermeyer et Anderson)

- Le rayon de courbure des trajectoires dépend de la charge et de la masse des particules



- Courbure plus grande que le proton, mais moins grande que l'électron : le **mésotron**
- Mais ce n'est pas la particule de masse intermédiaire prédite par Yukawa l'année précédente…
- En fait, particule en tout point semblable à l'électron, mais 200 fois plus massive

Finalement découverte en 1947 !

Honneur aux rayons cosmiques !

- La liste des particules découvertes est longue

1932	Positon ⇒ antimatière !
1936	Muon ⇒ la nature n'est pas si économe !
1947	Pions : π^0, π^+, π^-
1949	Kaons (K)
1949	Lambda (Λ)
1952	Xi (Ξ)
1953	Sigma (Σ)

Particules « étranges »

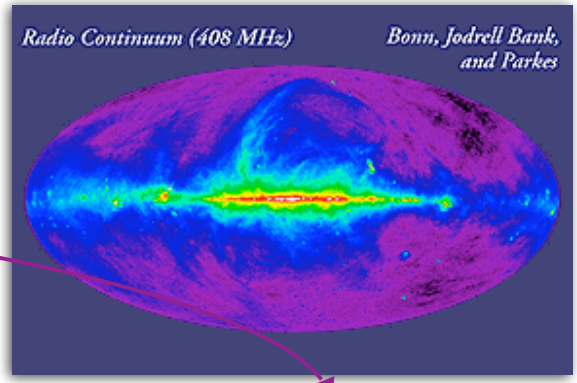
(Durée de vie beaucoup trop longue)

- Tout cela, grâce aux rayons cosmiques…
- … dont on ignore toujours la nature et l'origine !!!

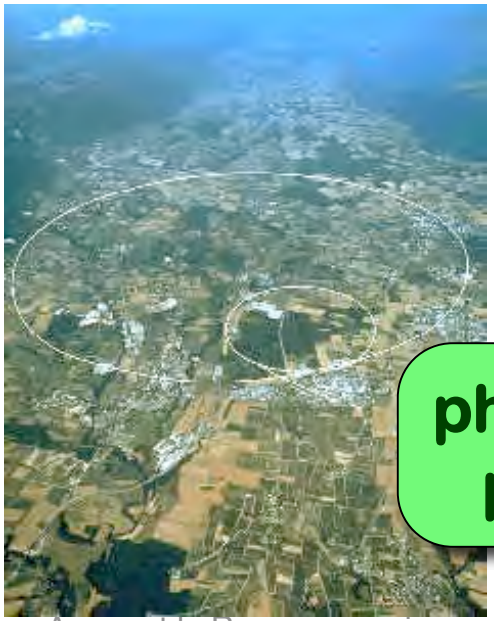
La croisée des chemins...

Étude du rayonnement cosmique

1953



astrophysique



physique des particules

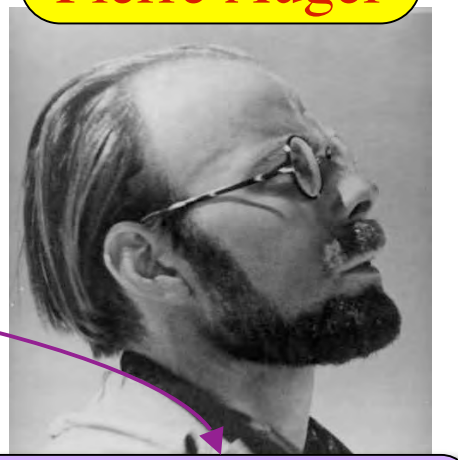
La croisée des chemins…

« Celui qui croyait au ciel, celui qui n'y croyait pas »

Étude du rayonnement cosmique

1953

Pierre Auger



astrophysique

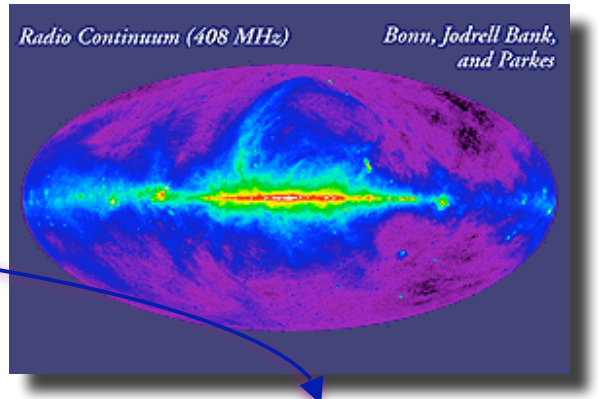
Louis Leprince Ringuet

physique des particules

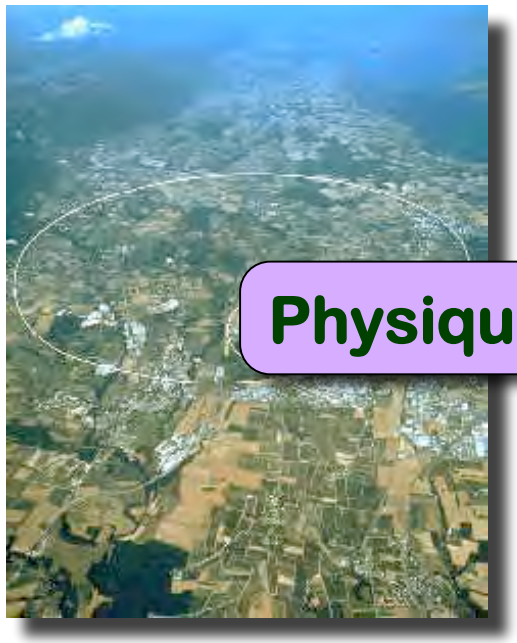
Du schisme…

Étude des rayons cosmiques

1953



astrophysique

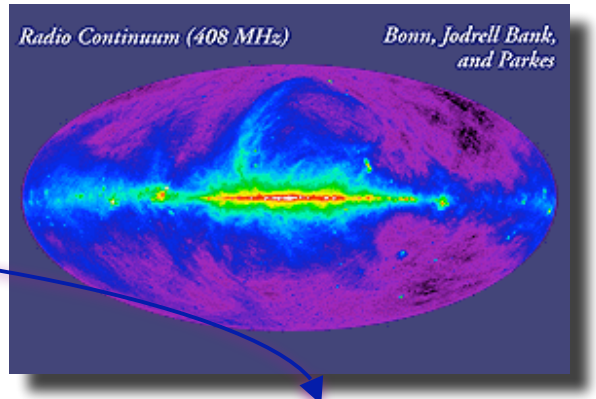


Physique des particules

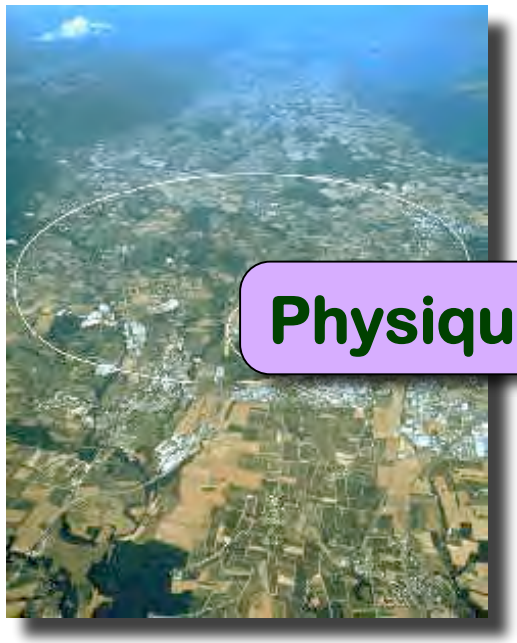
Du schisme… à l'œcuménisme !

Étude des rayons cosmiques

1953



astrophysique



Physique des particules

> 2000

astroparticules

Les RCs sont (aussi) intéressants par eux-mêmes !

- Quels sont les primaires ?
- D'où viennent-ils ?
- Comment obtiennent-ils leur énergie ?
- Que nous révèlent-ils sur l'univers ?
- Peut-on les utiliser pour faire de l'astrophysique ?
- Peuvent-ils représenter des "messagers" intéressants en provenance de sources lointaines ?

Les rayons cosmiques

- Rôle central dans l'écologie Galactique!
  - Une des composantes principales de la Galaxie !
  - Les RC contrôlent l'**ionisation** du milieu interstellaire

+ chauffage + champ magnétique turbulent + astro-chimie !

  - Les RC régulent la formation d'étoiles

+ nucleosynthèse (Li, Be, B)

- Impact sur l'évolution des espèces et le climat de la Terre

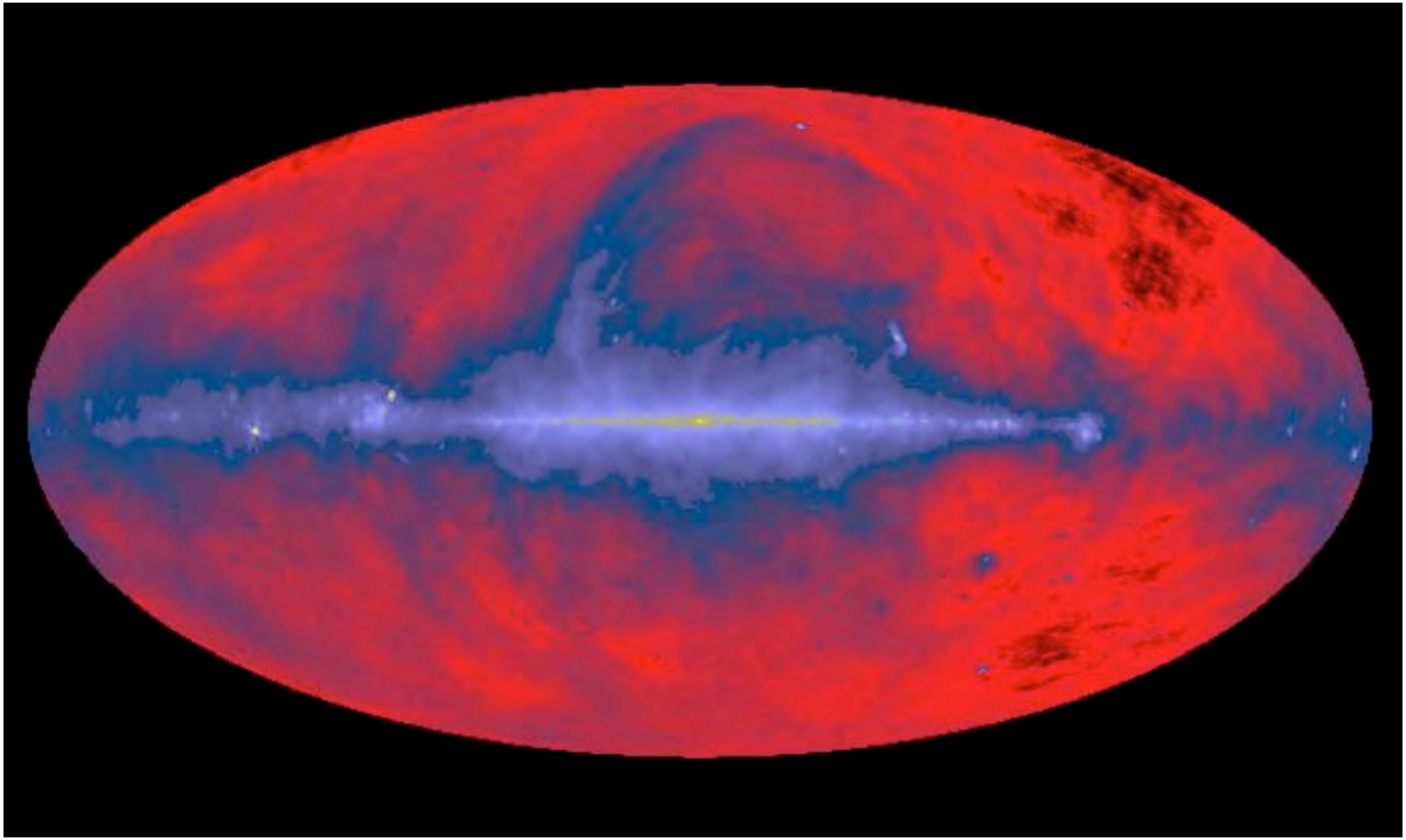
+ Herschel et le prix du blé en Angleterre !

+ qualité sonore des Stradivarius ?

- Phénomène universel majeur, toujours mal connu…

La Galaxie en radio, à 480 MHz

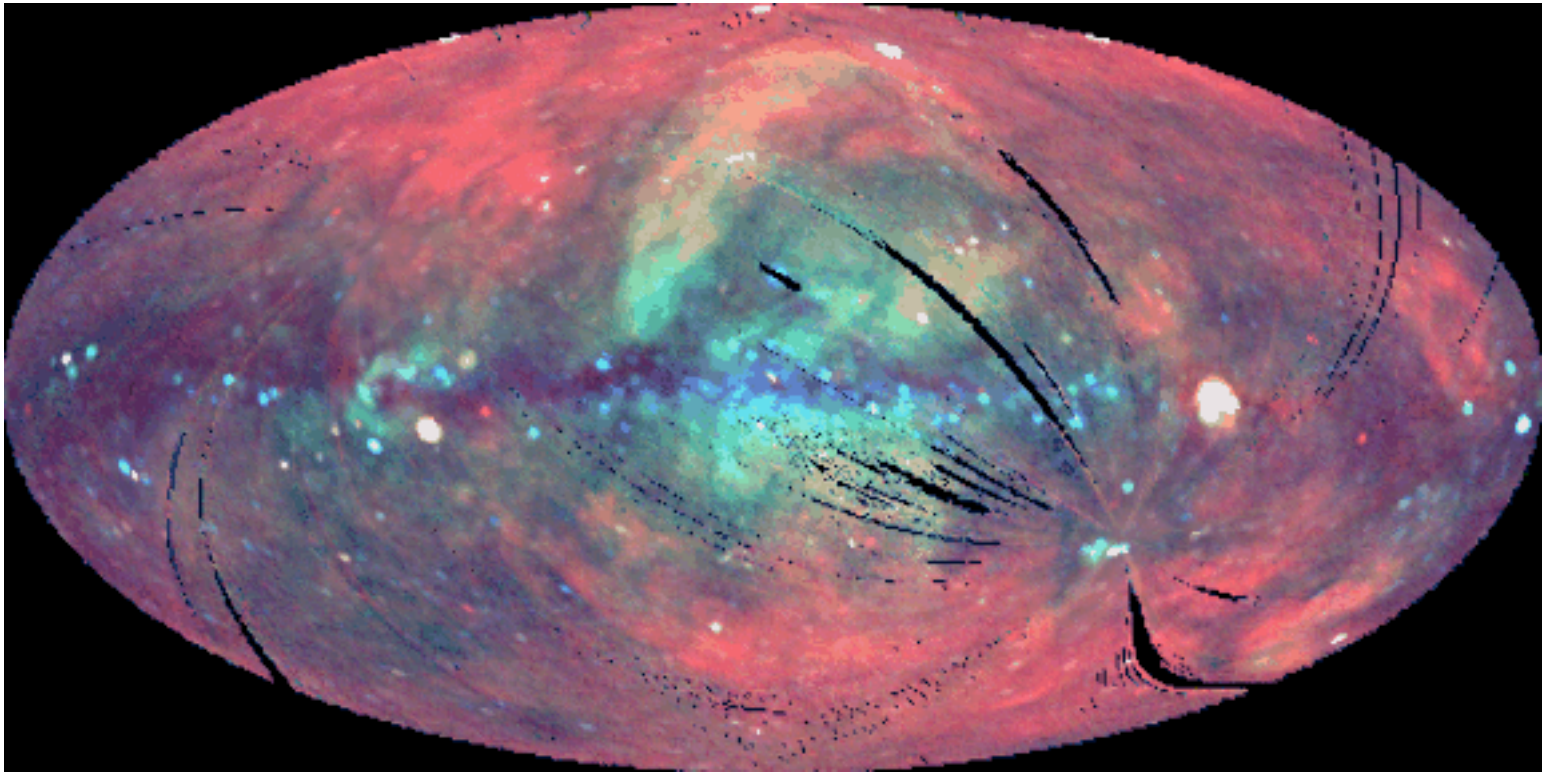
Rayonnement synchrotron des électrons énergétiques dans le champ magnétique…



SNRs, bulles, superbulles, radio galaxies, LMC…

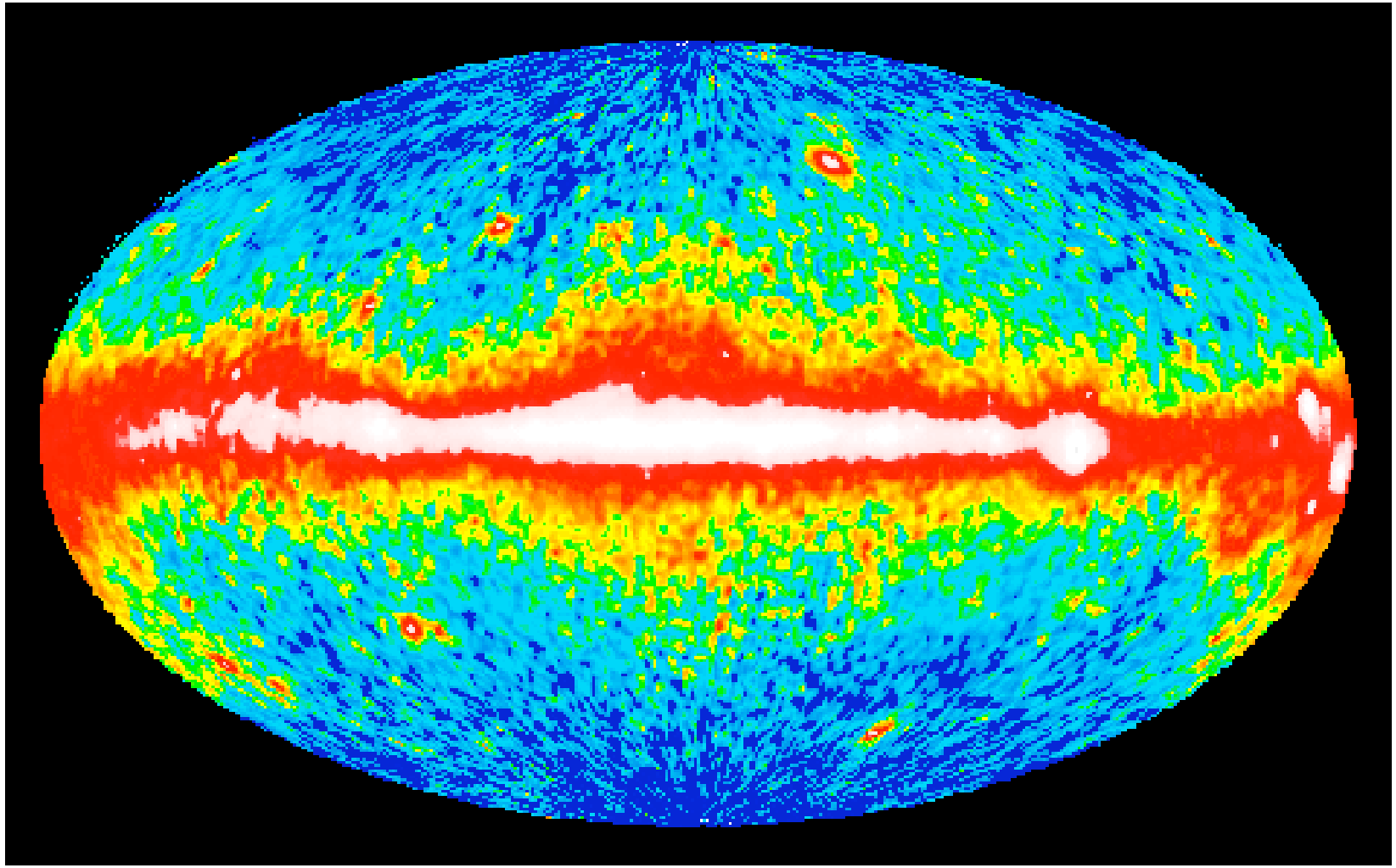
La Galaxie en rayons X

ROSAT (0.1–2.0 keV)

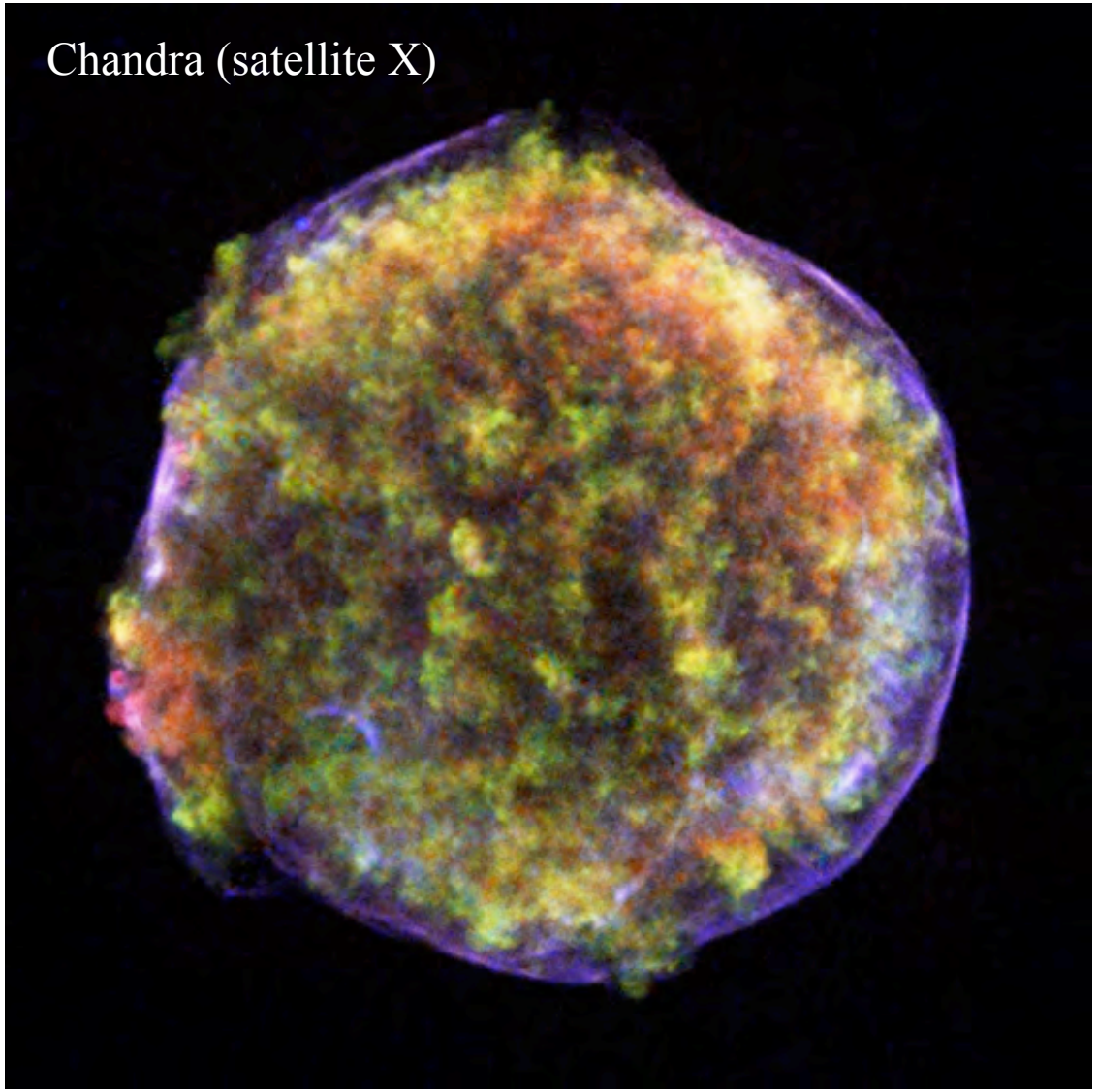


La Galaxie en rayons gamma

EGRET (> 100 MeV)



Reste de supernova : Tycho (1572)

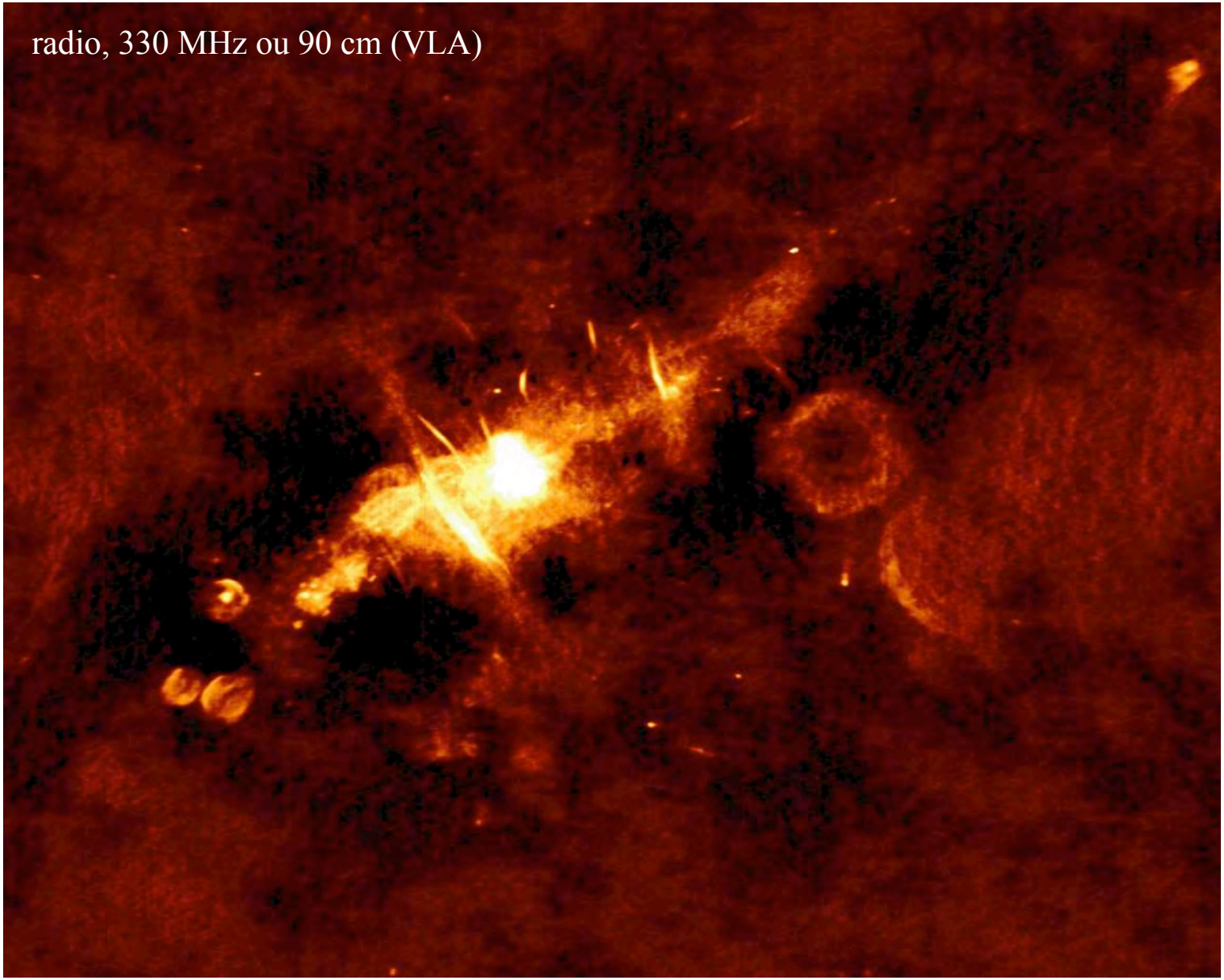


Rouge 0.95-1.26 keV, Vert 1.63-2.26 keV, Bleu 4.1-6.1 keV

La nébuleuse du Crabe

Image composite

Région du centre Galactique (4° × 4°)



Le ciel en rayons cosmiques…

à 1 GeV

Le ciel en rayons cosmiques…

à 10 GeV

Le ciel en rayons cosmiques…

à 1 TeV

Le ciel en rayons cosmiques…

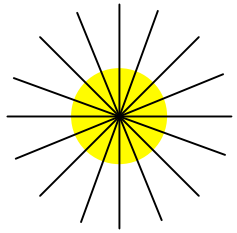
à 10^{15} eV

Le ciel en rayons cosmiques…

à 10^{18} eV (= 1 EeV)

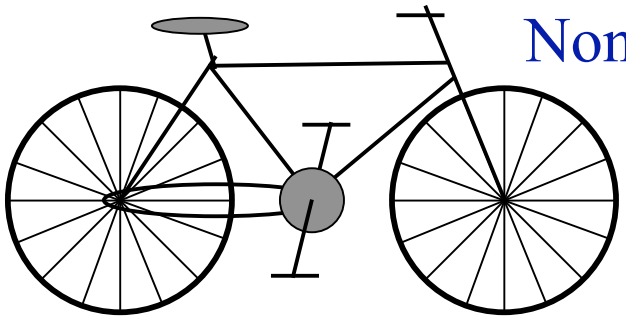
(exa-électron-volt)

« Rayons cosmiques »



Oui !

Ils viennent du cosmos (présents dans toute la Galaxie et au-delà…)



Non !

Un rayon, ça part d'un point et ça va tout droit !

photons (lumière) = « rayons » mais rayons cosmiques ≠ « rayons »

Grande nouveauté : qch vient du cosmos, mais ce n'est pas de la lumière !

Nouvelle astronomie ! ≠ astronomie photonique étendue

(radio, infrarouge, UV, X, gamma, TeV…)

« nouvelle astronomie »

Oui !

Récolte de matière extraterrestre,
et même extragalactique !

Non !

Pas de pointage, hélas !

Particule chargée + champ magnétique = déflexion !

« isotropisation »

Brouillage complet
du ciel et mélange
de toutes les sources

→ Comment voir les sources ?

→ Comment comprendre le phénomène des rayons cosmiques ?

(très important !)

© Pierre-Paul Feyte

Photo très haute définition du ciel vu en rayons cosmiques !

Comment sortir du brouillard magnétique? Transformer les RC en vrais « rayons »…

- Étudier les particules énergétiques en observant le rayonnement induit

  ⇘ photons ⇒ pointage du lieu d'interaction

- Interactions diverses

  ⇒ production de photons — cf. HESS, INTEGRAL, Fermi…

  ⇒ production de neutrinos — cf. ANTARES, Auger, IceCube…

- NB: c'est pourquoi les RC sont si importants en astrophysique !

  Toutes les sources de haute énergie nous sont connues principalement par l'effet des particules énergétiques qu'elles accélèrent !

- Autre raison: les RC interviennent dans la plupart des processus galactiques importants

- Pb: rayonnements induits détectables seulement à basse énergie

  (à haute énergie, les particules énergétiques sont trop peu nombreuses)

Comment sortir du brouillard magnétique? Transformer les RC en vrais « rayons »…

- À très haute énergie, les déflexions des particules par les champs magnétiques sont moindre

$$r_g = (1\,\mathrm{kpc}) \times \frac{E_{\mathrm{EeV}}}{Z B_{\mu\mathrm{G}}}$$

- Champs magnétiques galactiques typiques : qq microGauss

- Proton ayant une énergie E = 1 EeV (10^{18} eV) : $r_g \sim$ kpc

  ⇒ perte de confinement dans la Galaxie

  ⇒ origine extragalactique !

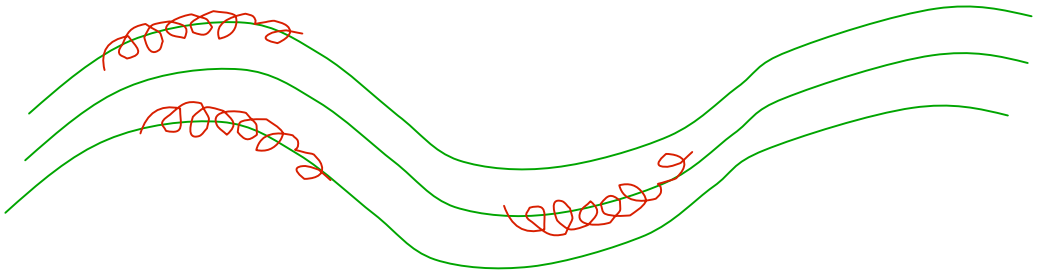
- Proton ayant une énergie E = 100 EeV, dans 1 nG : $r_g \sim$ 100 Mpc

  ⇒ trajectoire ~ rectiligne

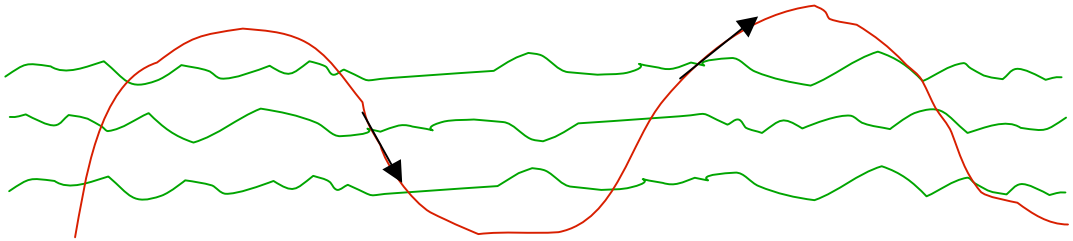
Interaction avec les inhomogénéités magnétiques

- Lignes de champ perturbées : jusqu'à quelle échelle ?

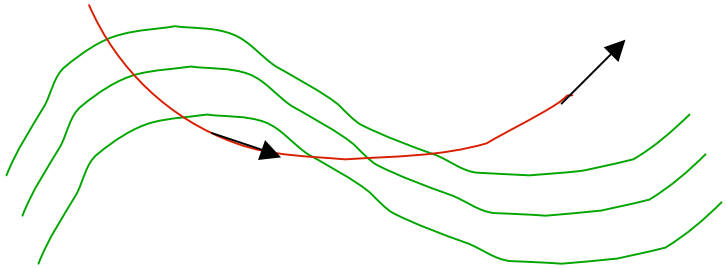
$\underline{r_g << \lambda}$



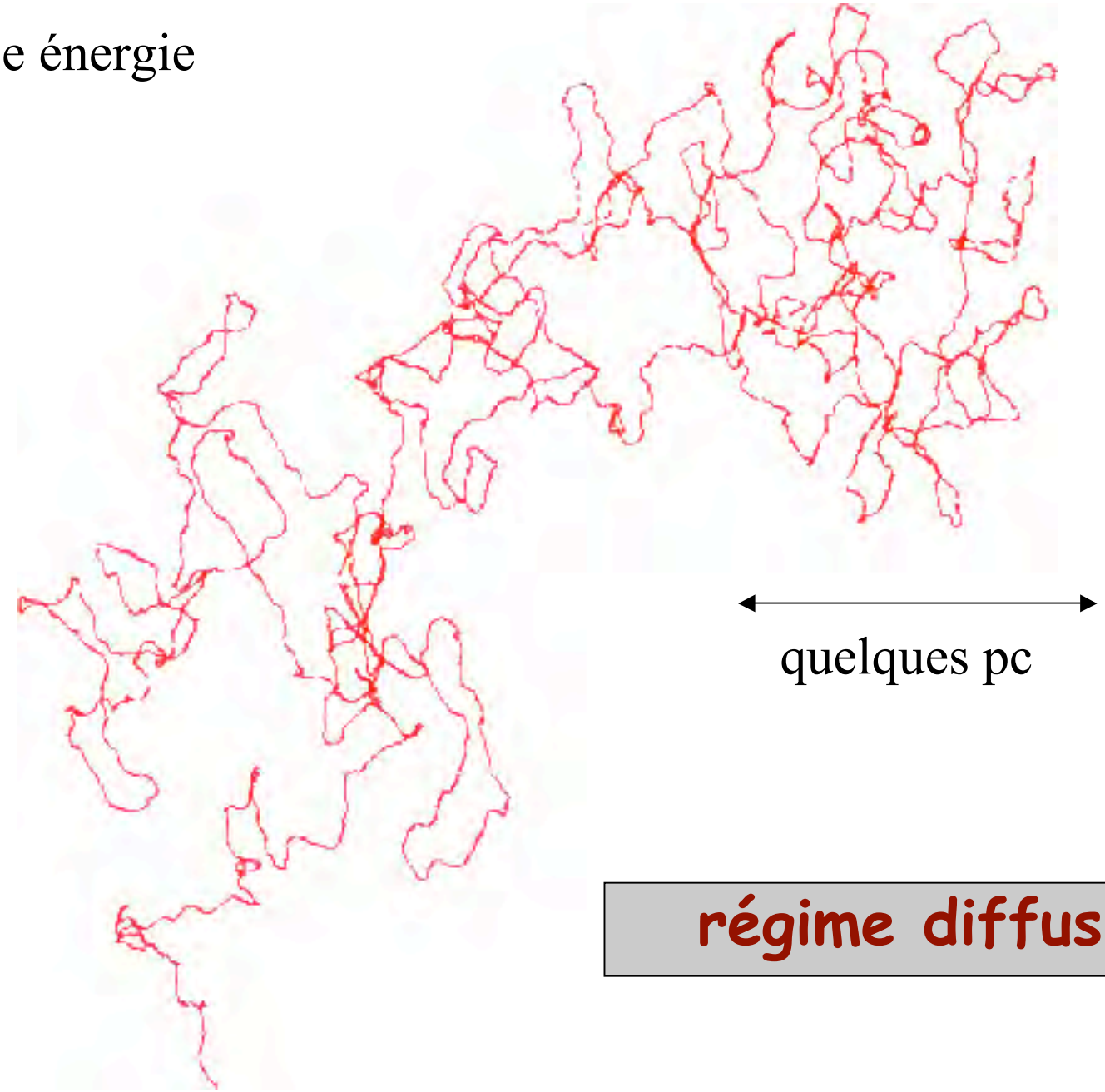
$\underline{r_g >> \lambda}$



$\underline{r_g \sim \lambda}$

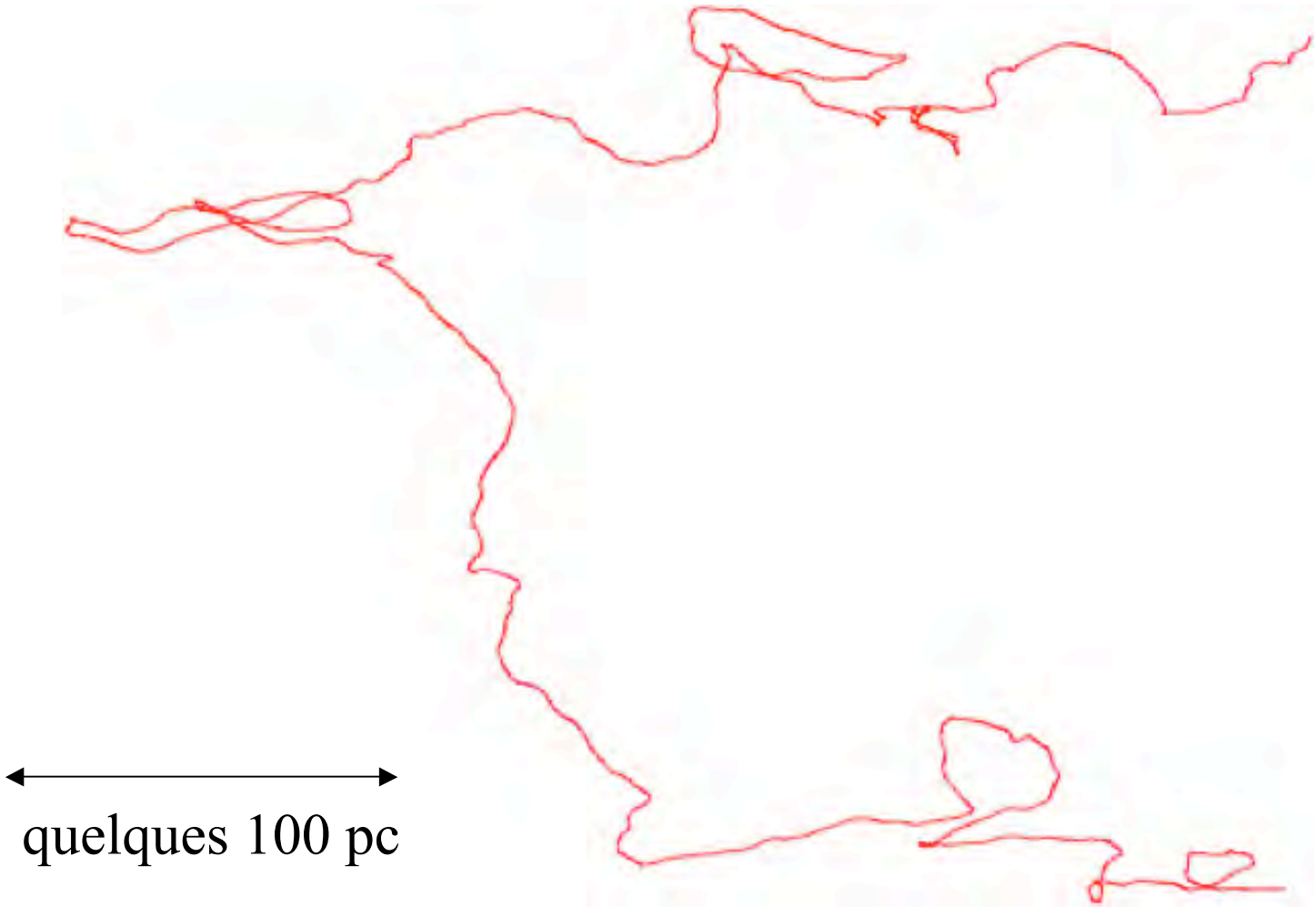


Basse énergie

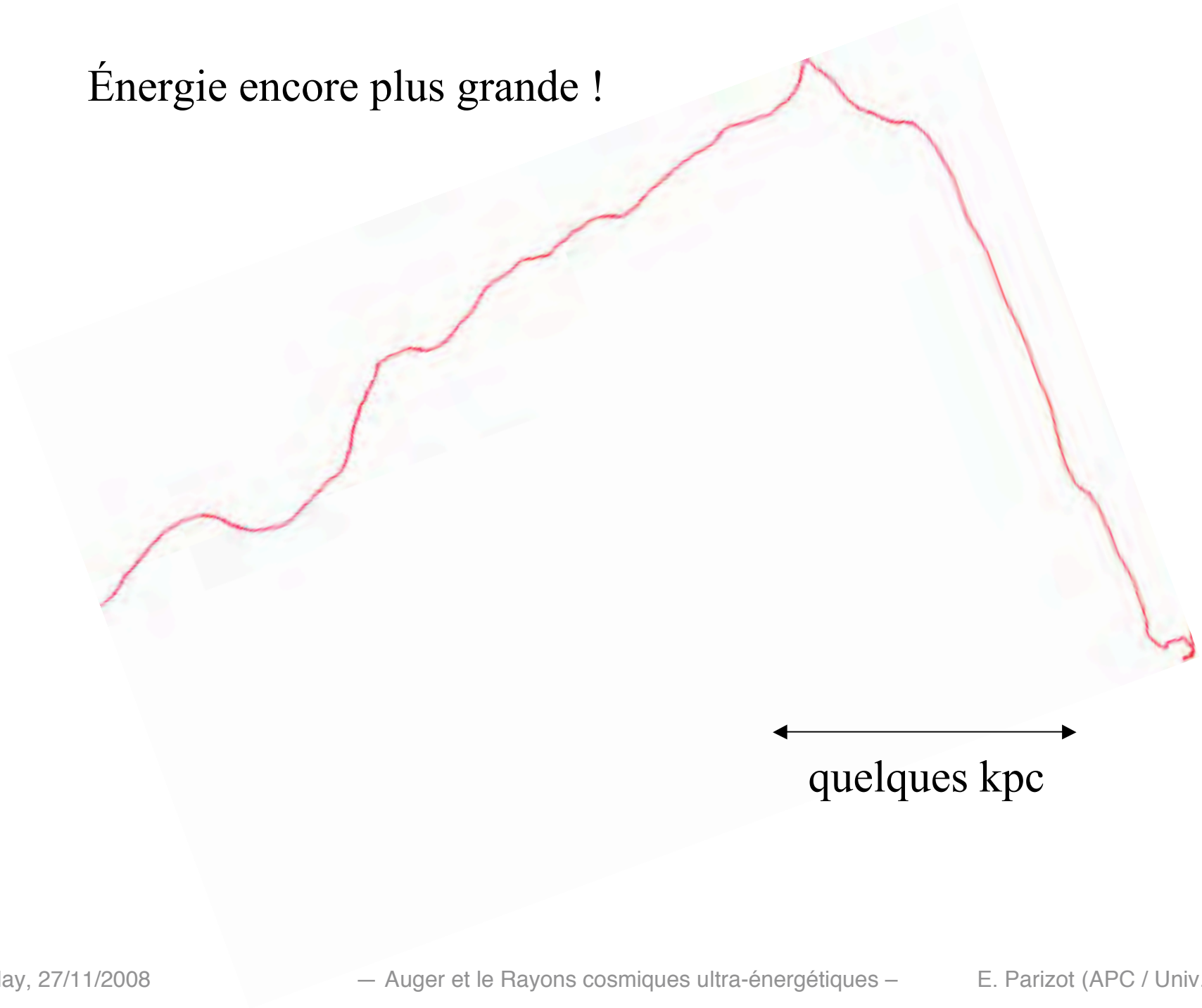


régime diffusif

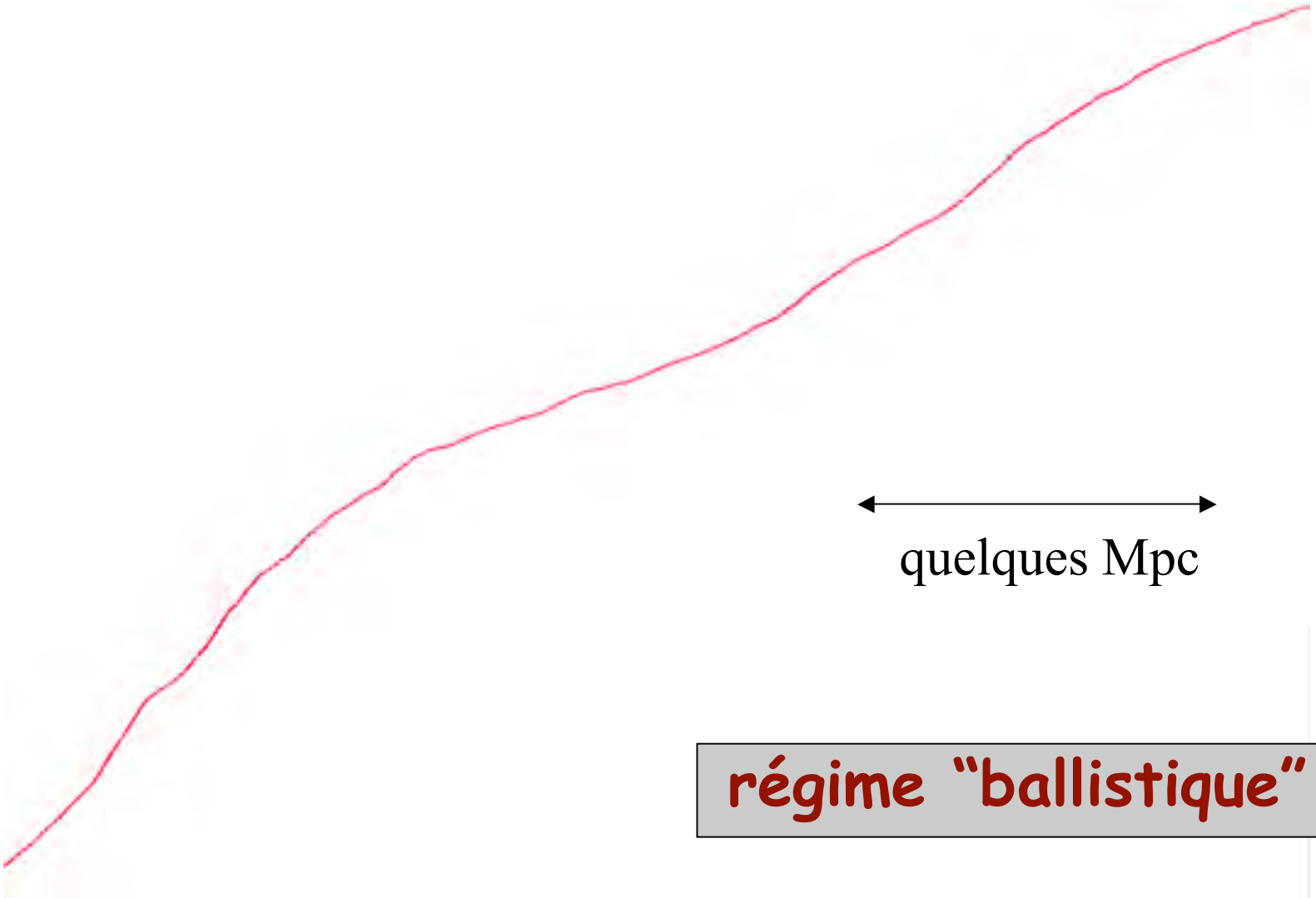
Énergie supérieure



Énergie encore plus grande !



Énergie vraiment très grande… ;-)

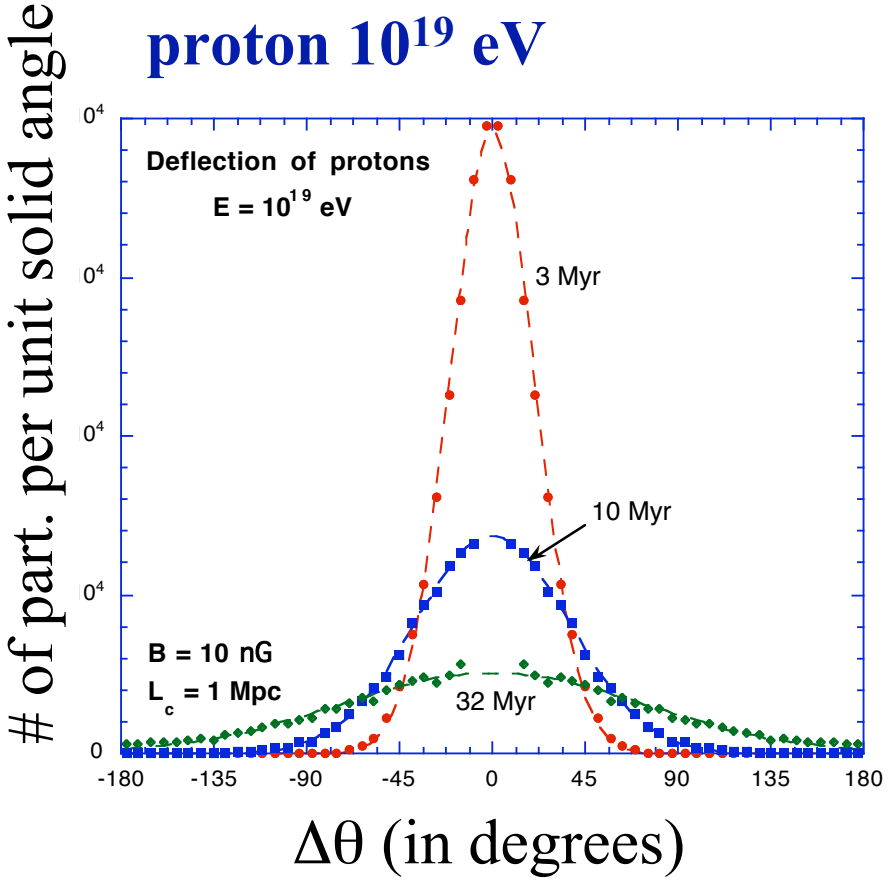


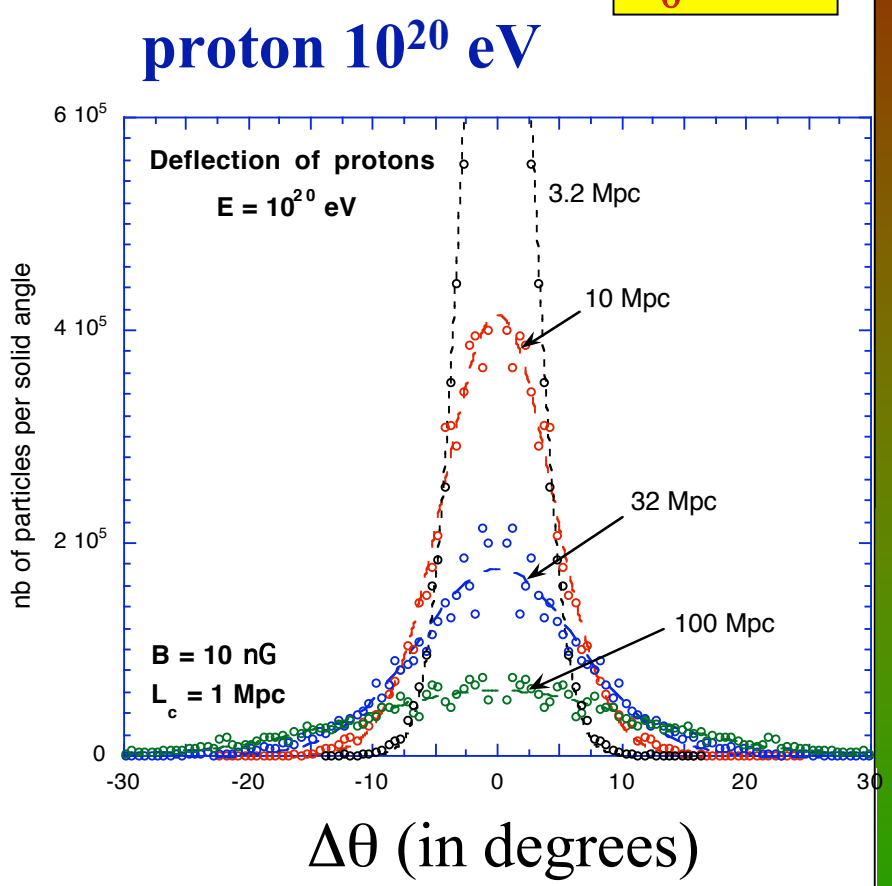
régime "ballistique"

Régime de diffusion angulaire

(Champ purement turbulent)

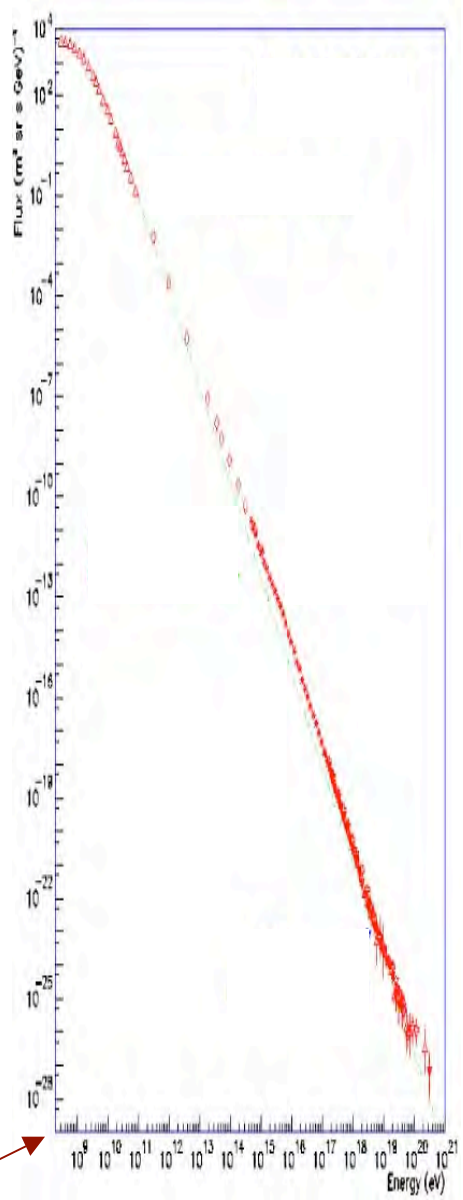
$\sigma_\theta \propto D^{1/2}$





→ extension angulaire des sources + délai de propagation!

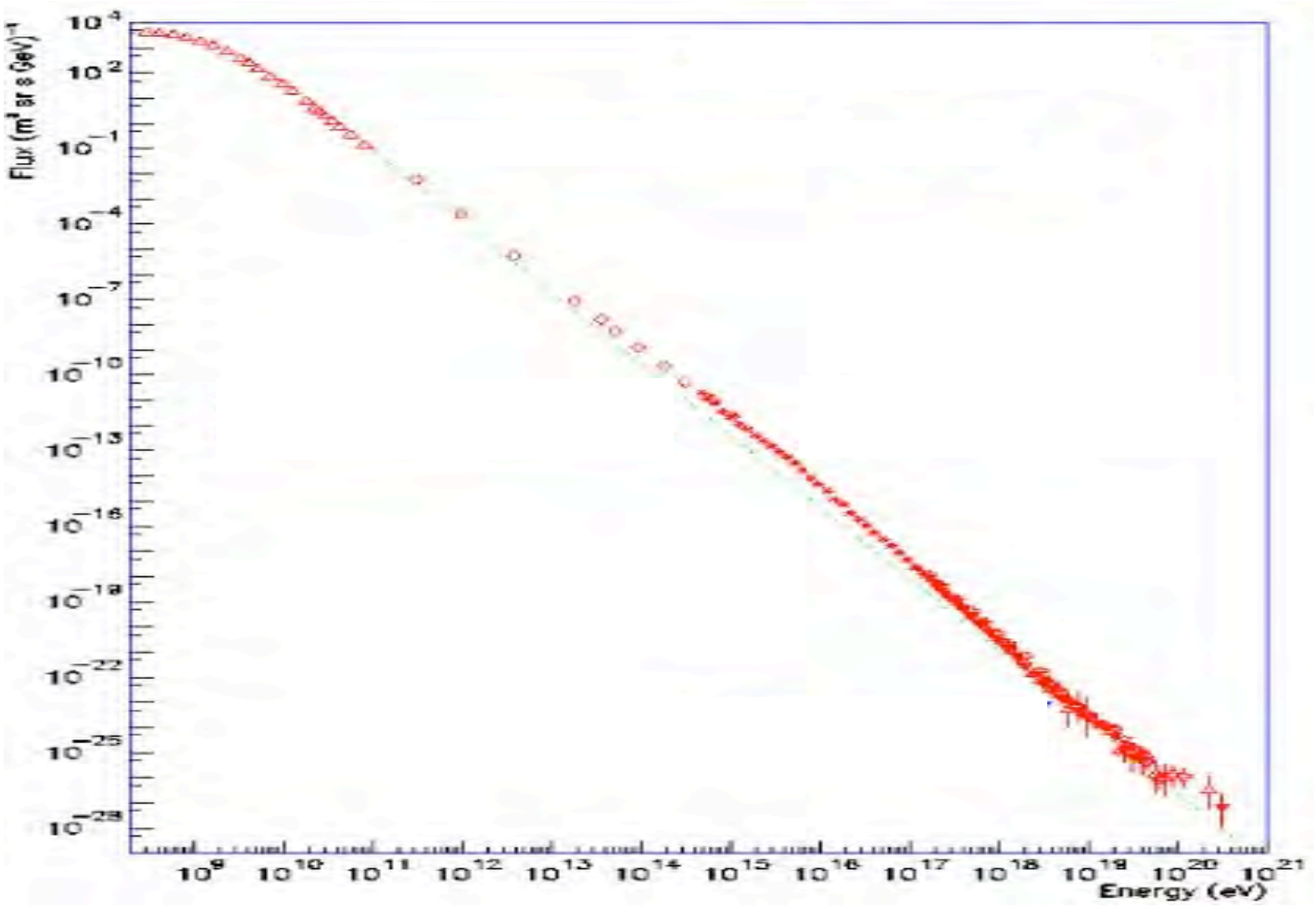
Le spectre d'énergie des rayons cosmiques



10^{21} eV

100 MeV

Le spectre d'énergie des rayons cosmiques



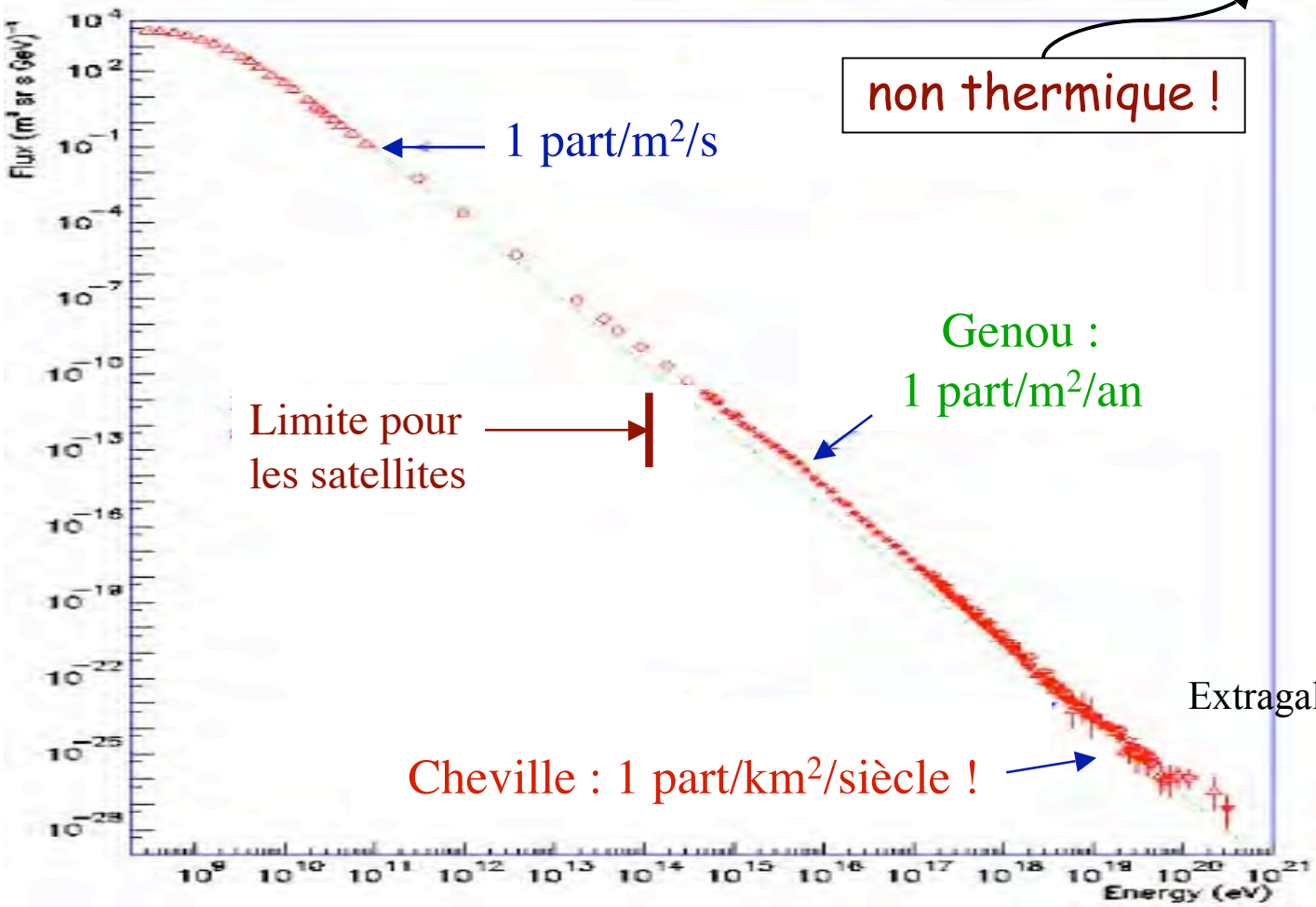
Le spectre d'énergie des rayons cosmiques

106 octaves // de 1 cheveu à 10 milliards d'années lumière !

Hors équilibre !

non thermique !

32 ordres de grandeur !



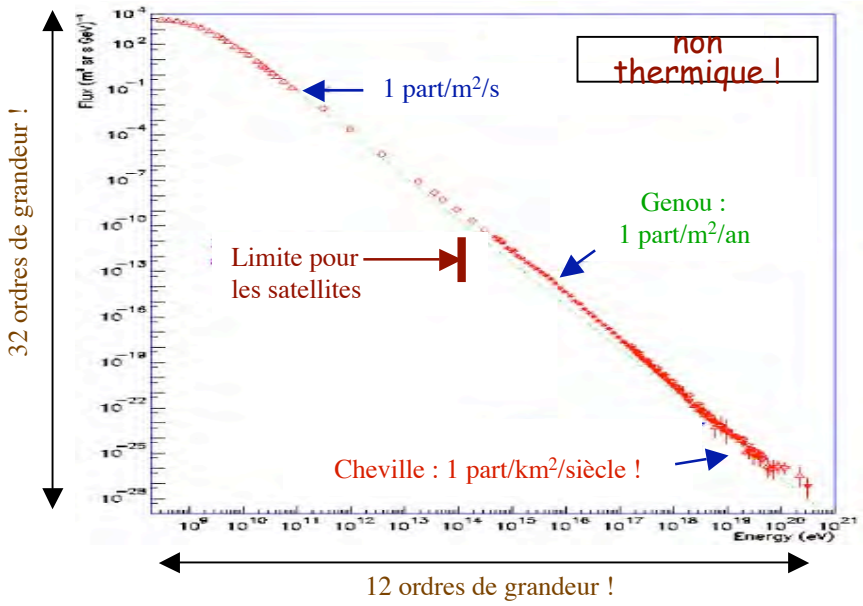
12 ordres de grandeur !

40 octaves // de 1 cheveu à 100 000 km !

Limite à haute énergie ?

Où s'arrête le spectre ?

Pourra-t-on faire de l'astronomie proton ?



Énergies extraordinaires, permettant de tester la physique à des énergies inaccessibles sur Terre !

Espoir d'une « astronomie rayons cosmiques »

- À partir de quelle énergie les rayons cosmiques cesseront-ils d'avoir une distribution angulaire isotrope ?

- Trois conditions nécessaires

  ⇒ déflexions pas trop grandes
  → champs B pas trop élevés
  → énergies très élevées

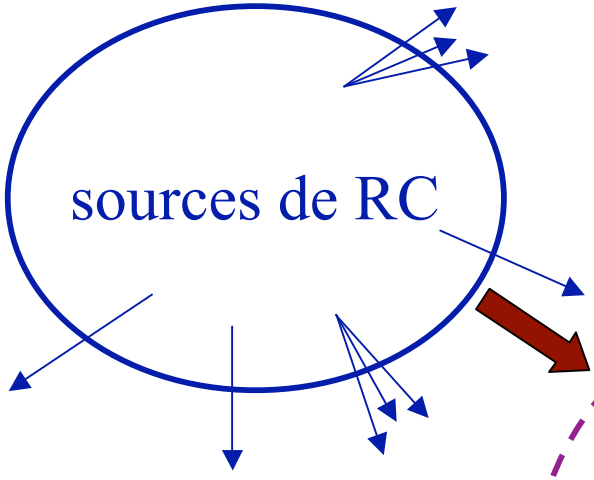
  ⇒ sources distribuées anisotropiquement
  → nombre de sources pas trop élevé
  → sources proches dominent (univers anisotrope)
  → énergies très élevées (effet GZK, réduction de l'horizon)

  ⇒ statistique suffisante
  → la taille du détecteur, adaptée au flux de RCUE, doit rester réaliste…

- Problème : les rayons cosmiques ultra-énergétiques sont aussi ultra-rares

  ⇒ 1 par km^2 par siècle !

Propagation des rayons cosmiques



distribution source
spectre source
composition source

modèle de propagation

input astrophysique
- champs B
- coef. diffusion
- fonds de rayonnement
- distribution de matière

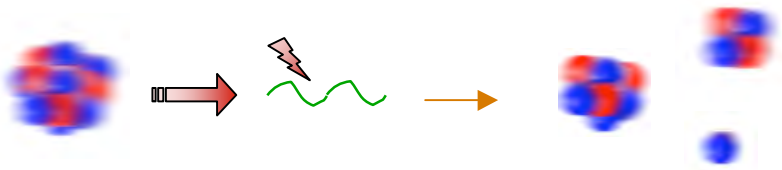
input physique
- sections efficaces
- physique générale
- (interactions EM…)

spectre propagé
composition propagée
distribution angulaire

Terre

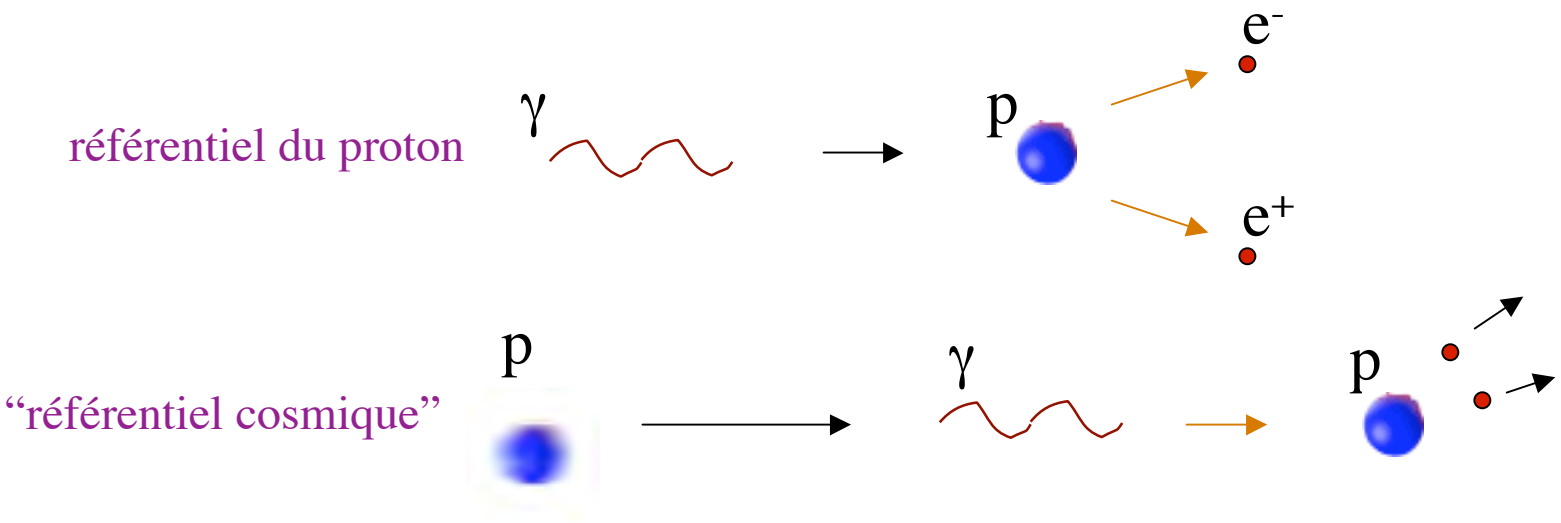
Propagation des RC à haute énergie

- RC au-delà de ~10^{19} eV ont de grandes rigidités → s'échappent facilement des galaxies
- Interagissent principalement avec le milieu extragalactique: dominé par le rayonnement !
- Protons : photo-production de paires et de pions (sur les photons du CMB)
- Noyaux plus lourds : photo-dissociation (sur les photons du CMB et les fonds IR-Visible-UV)



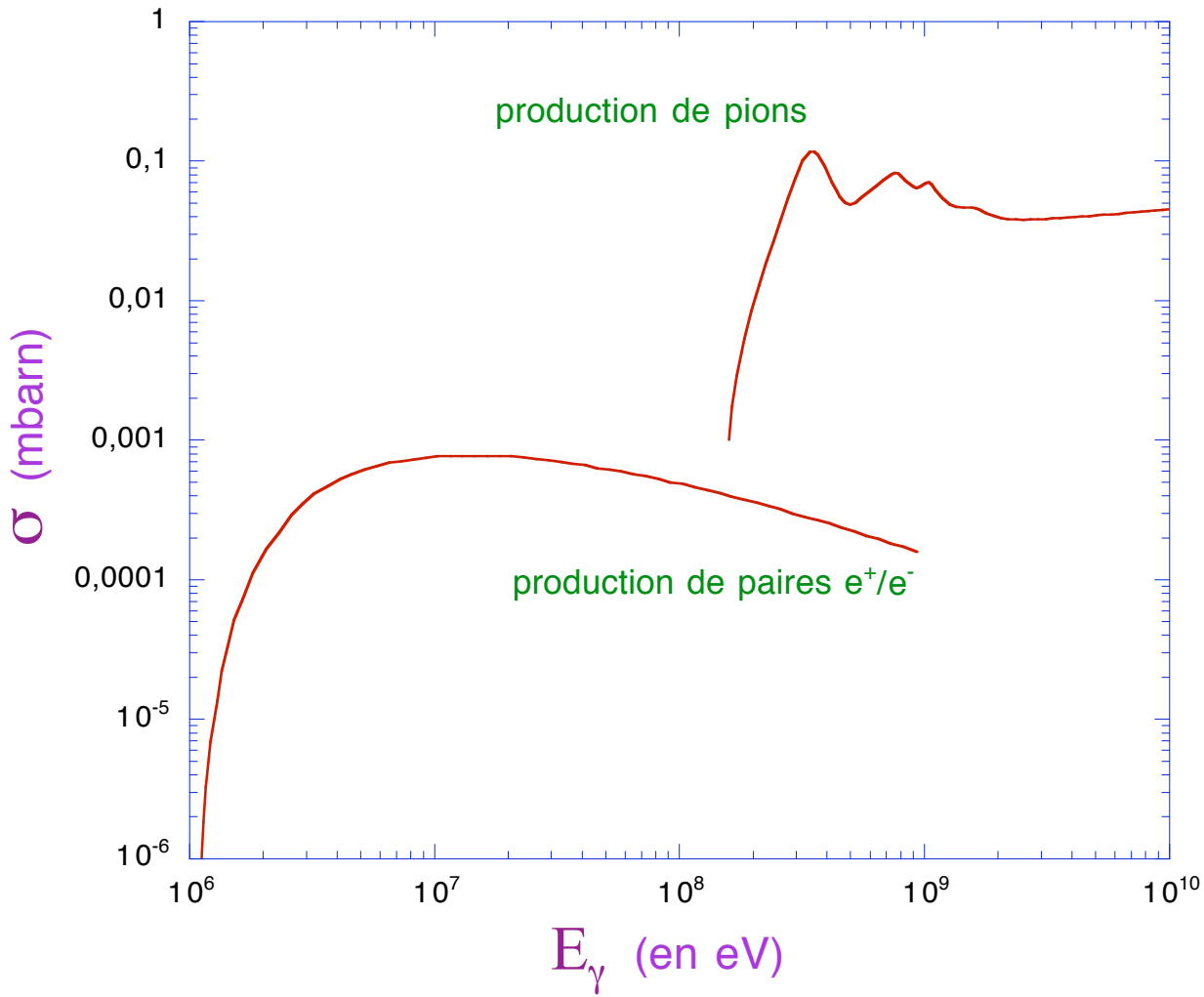
L'effet GZK

- Greisen (1966) + Zatsepin & Kuz'min (1966)
- Pertes d'énergie par production de paires e^+/e^- et de pions !

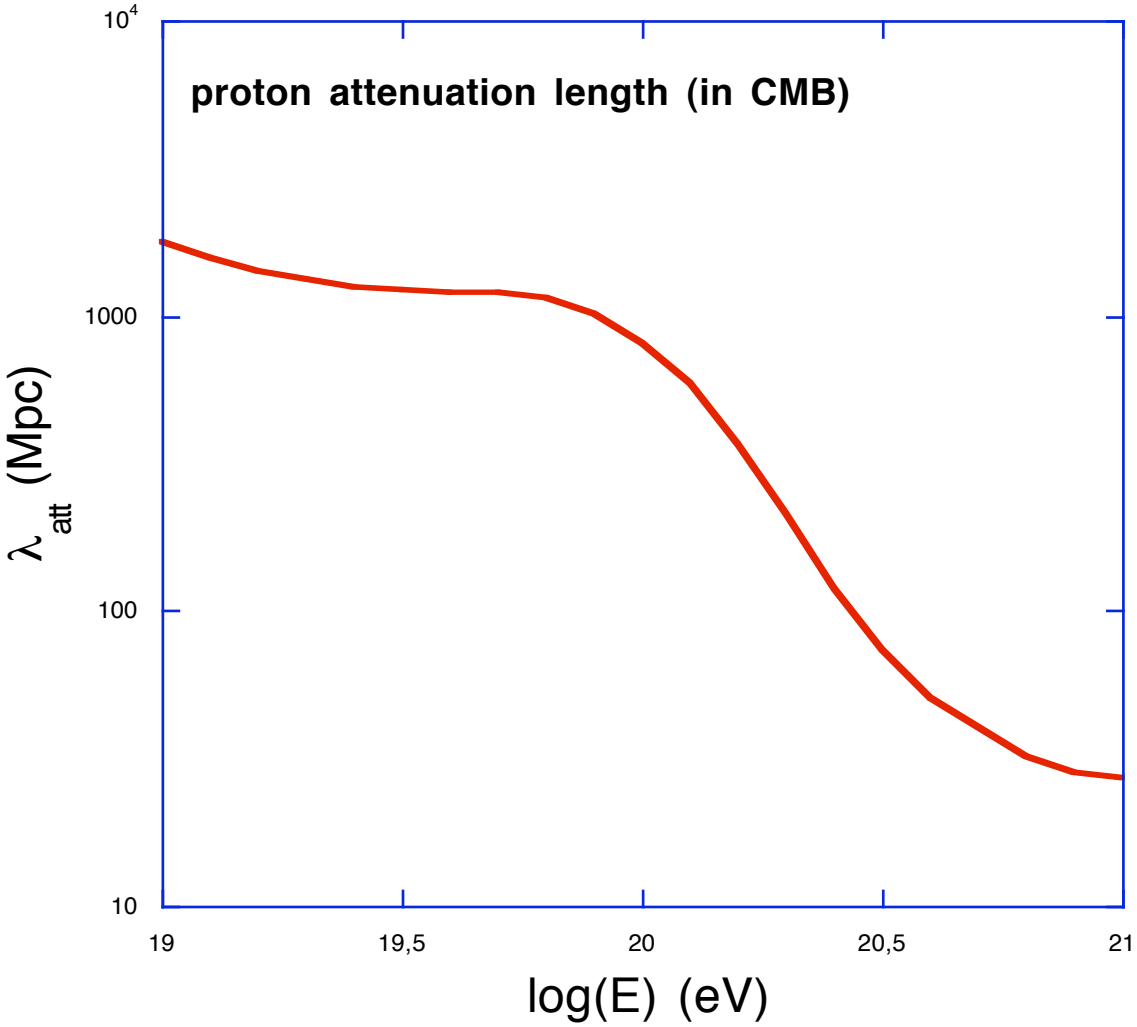


- Seuil : $E_\gamma \approx 2\ m_e c^2$ dans le référentiel du proton $\boxed{E_\gamma > 1\ \text{MeV}}$
- Seuil : $E_\gamma \approx m_\pi c^2$ dans le référentiel du proton $\boxed{E_\gamma > 160\ \text{MeV}}$

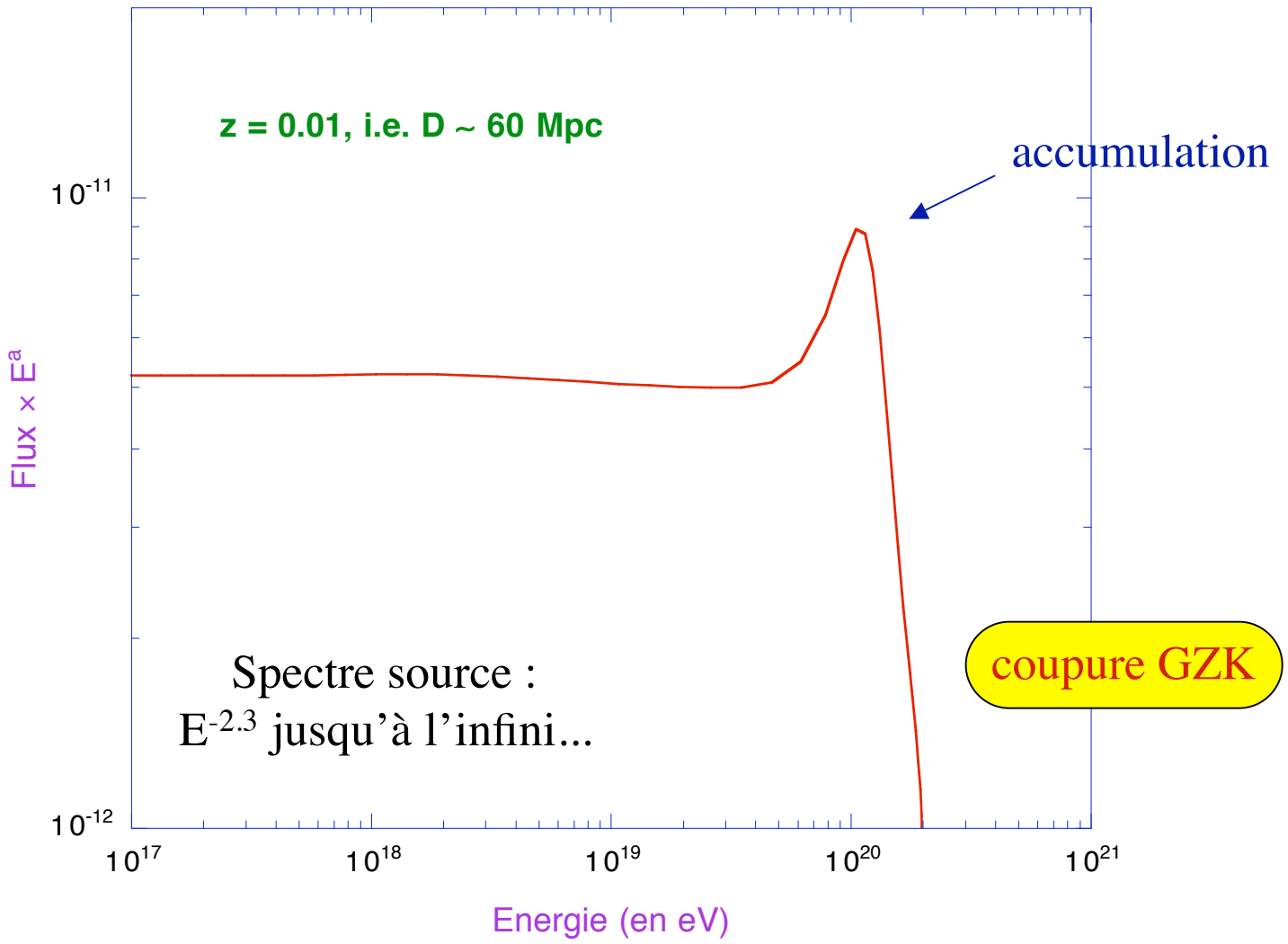
[section efficace] x [inélasticité]

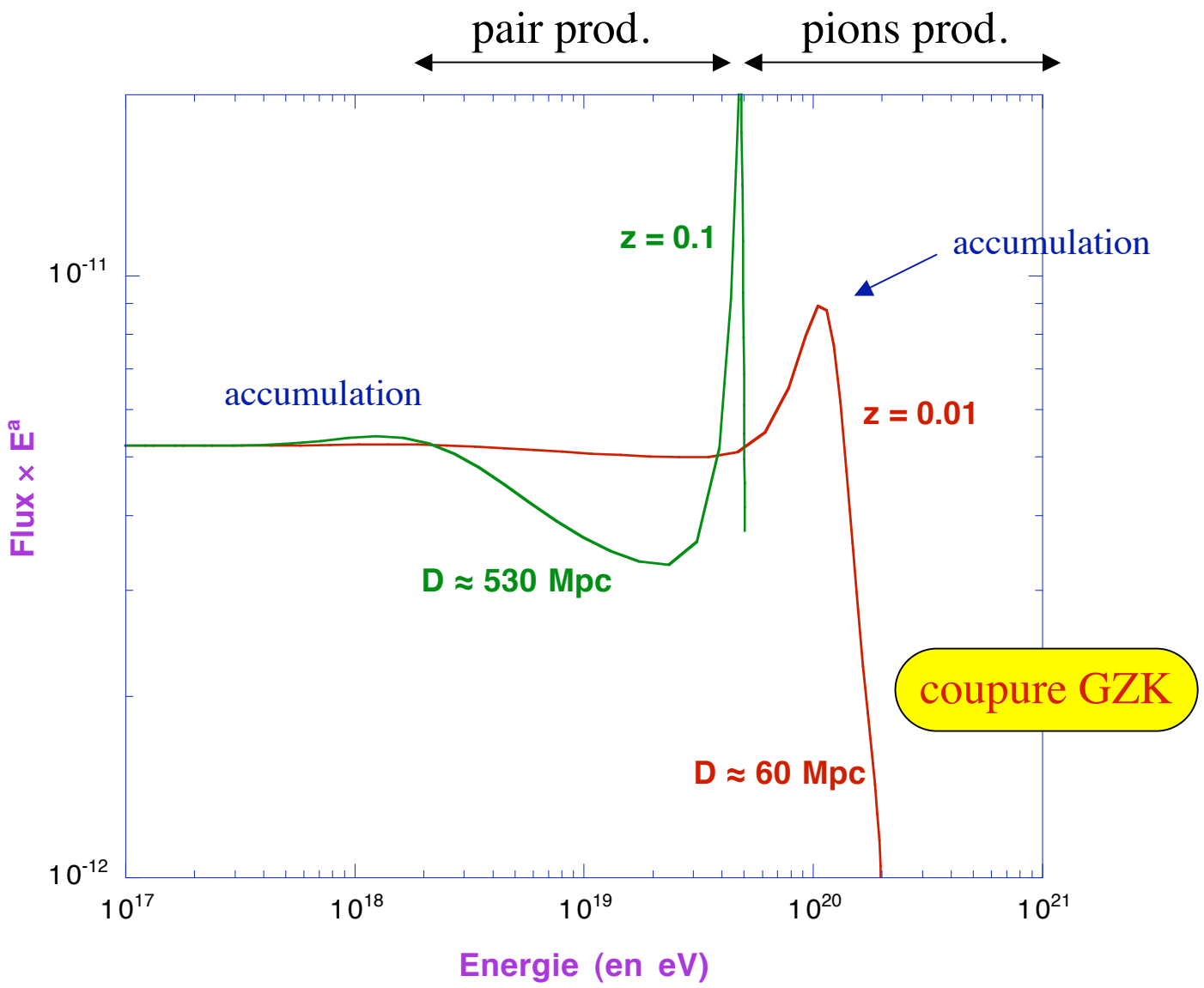


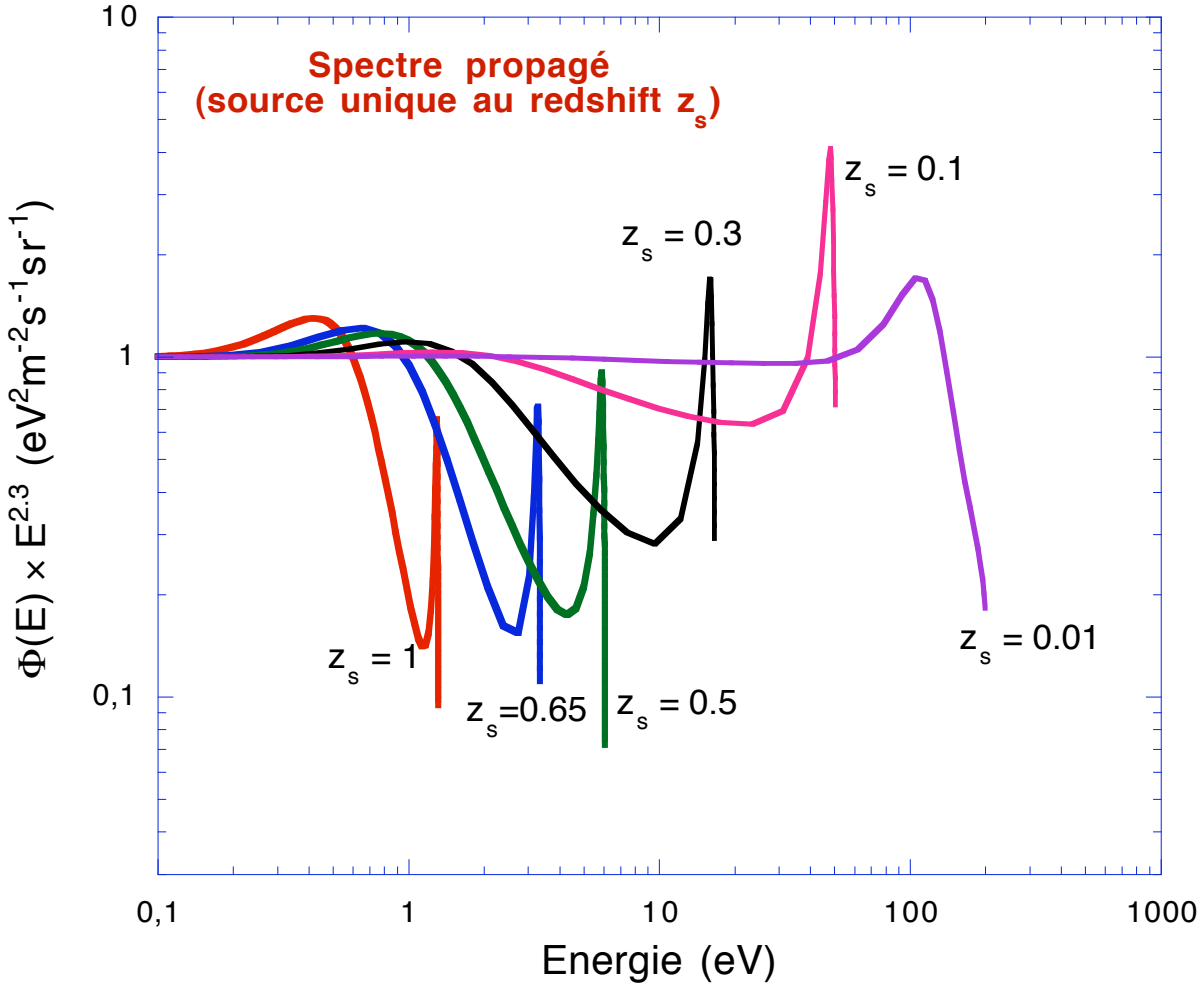
Longueur d'atténuation – horizon



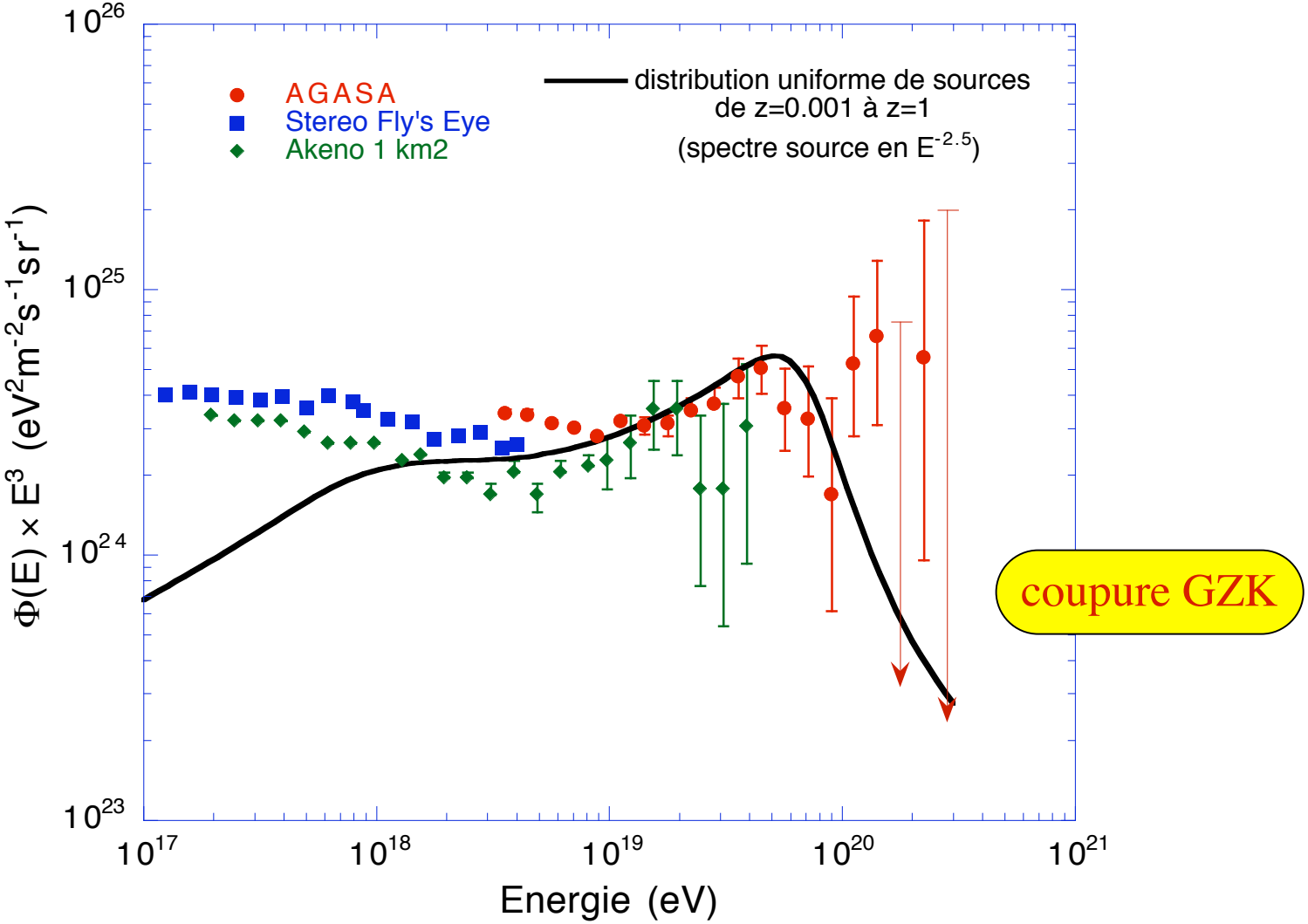
Spectre "propagé"



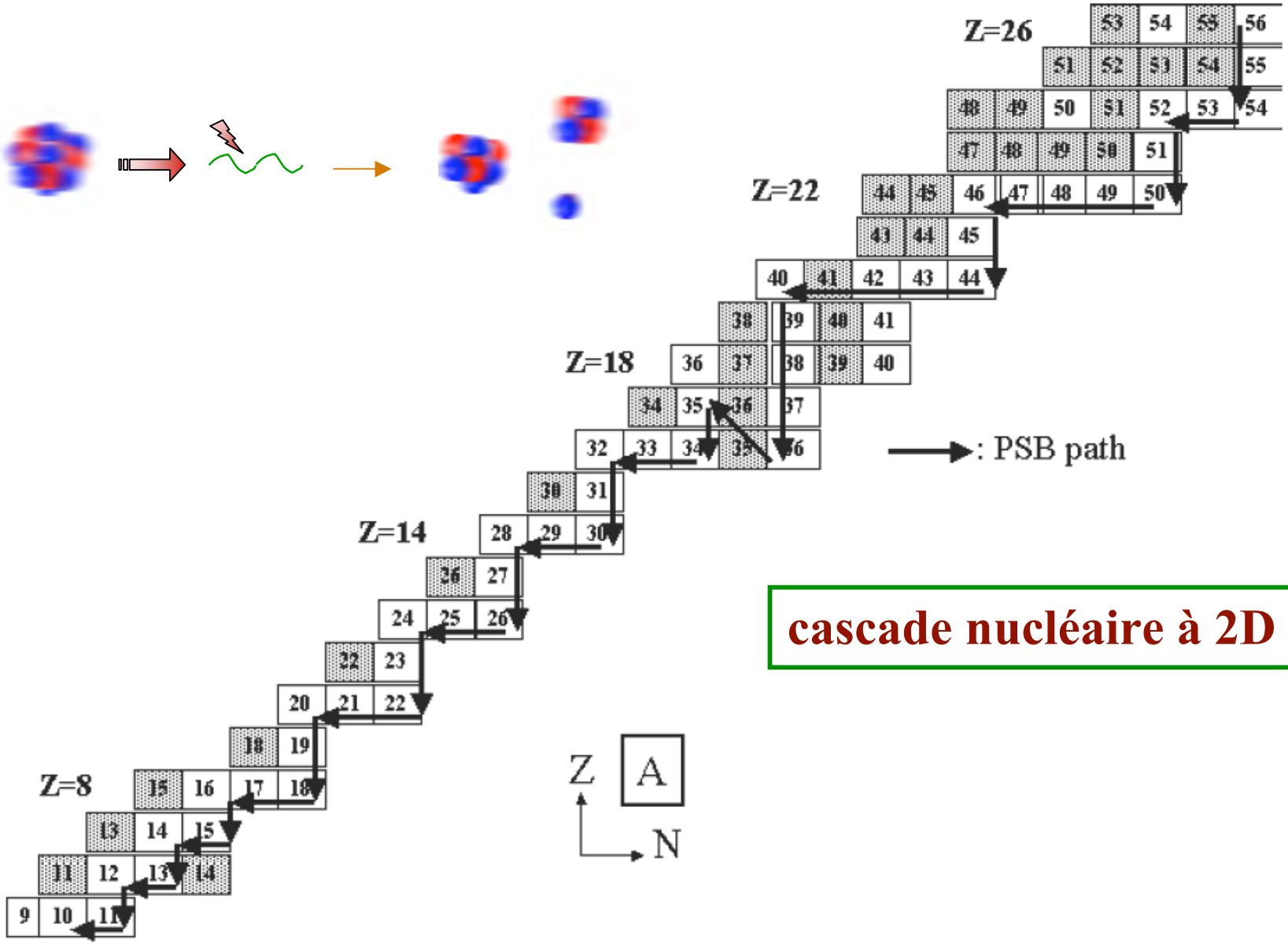

pair prod.
pions prod.
z = 0.1
accumulation
accumulation
z = 0.01
D ≈ 530 Mpc
coupure GZK
D ≈ 60 Mpc
10-11
10-12
Flux × Ea
10^17
10^18
10^19
10^20
10^21
Energie (en eV)


Spectre propagé
(source unique au redshift z_s)
z_s = 0.1
z_s = 0.3
z_s = 1
z_s=0.65
z_s = 0.5
z_s = 0.01
10
1
0,1
0,1
1
10
100
1000
$\Phi(E) \times E^{2.3}$ ($eV^2 m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$)
Energie (eV)

Distribution uniforme de sources

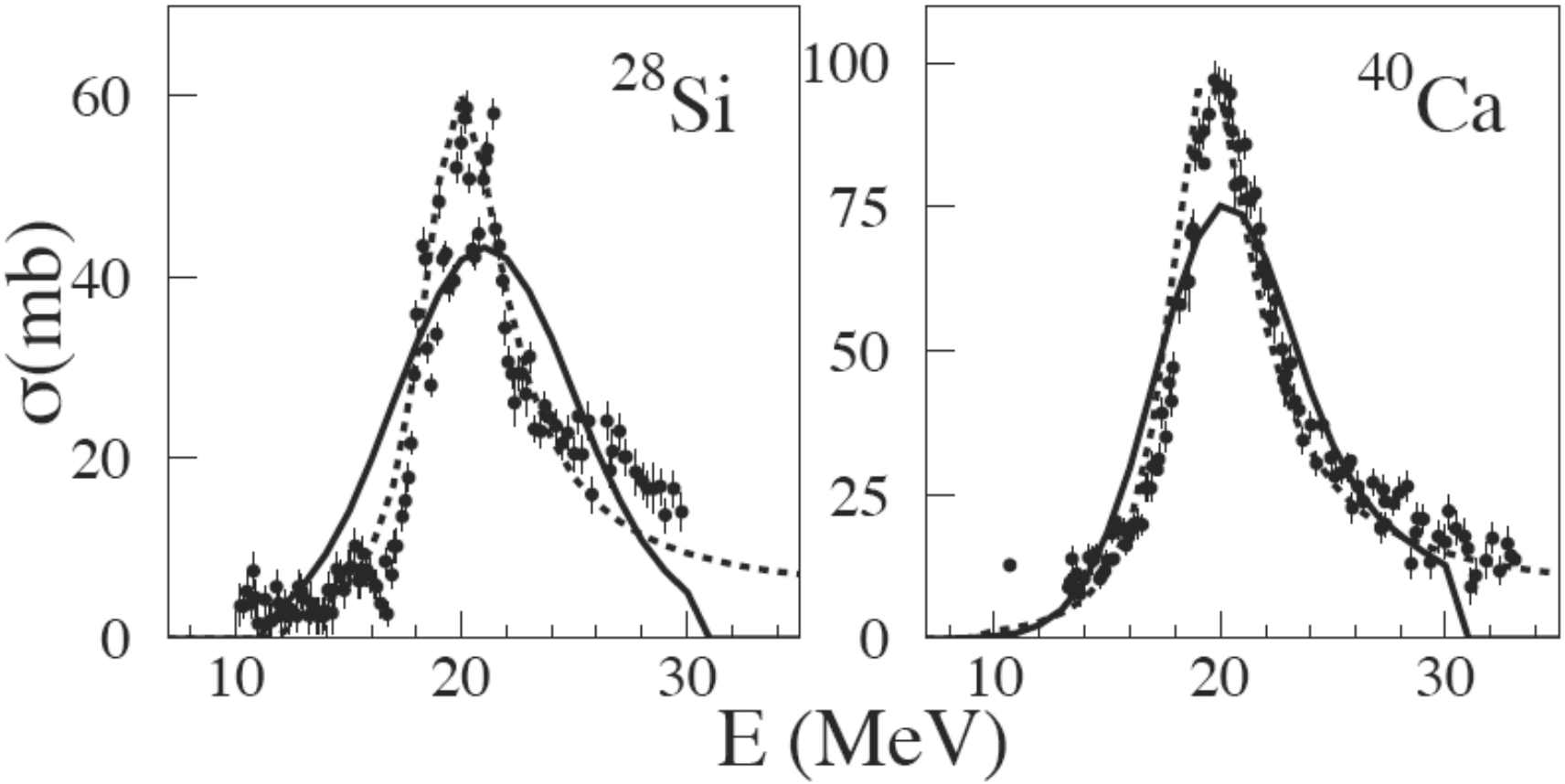


Propagation de noyaux UHE



cascade nucléaire à 2D

Nouvelles sections efficaces

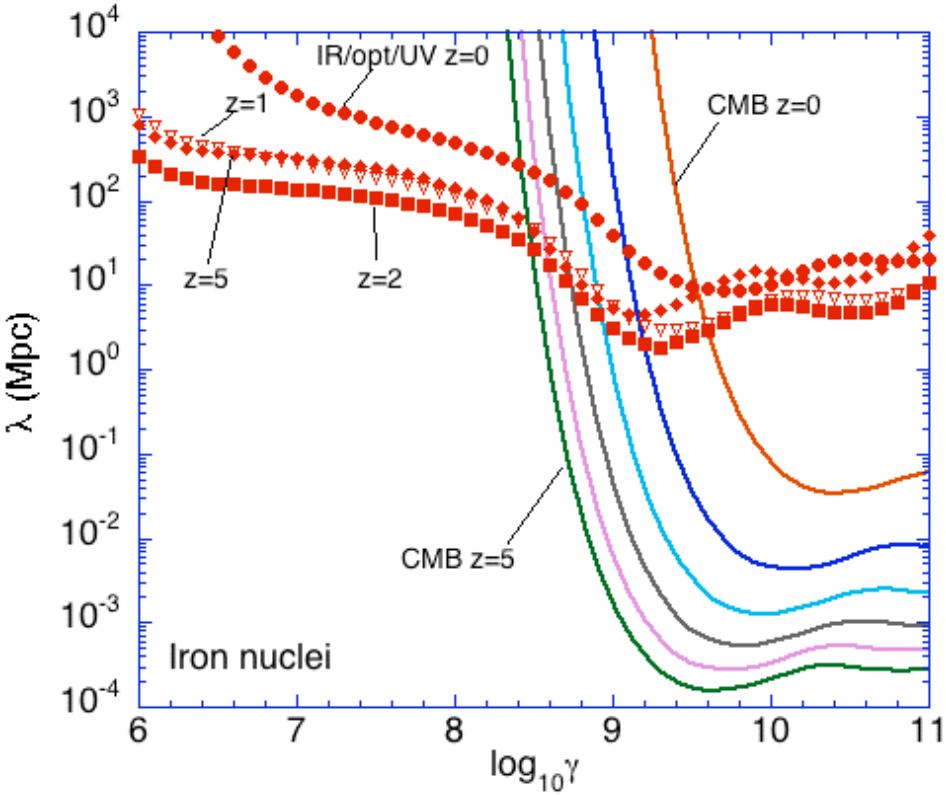


Puget, Stecker, Bredekamp (1976)

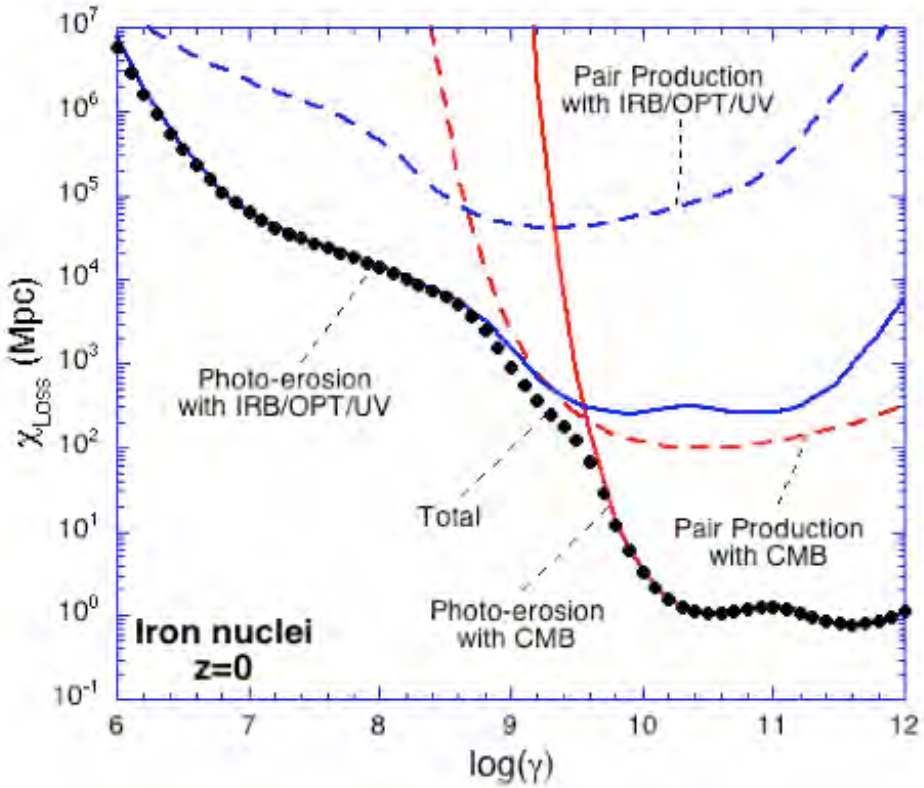
Khan et al. (2004)

Interaction du Fe et longueur de perte

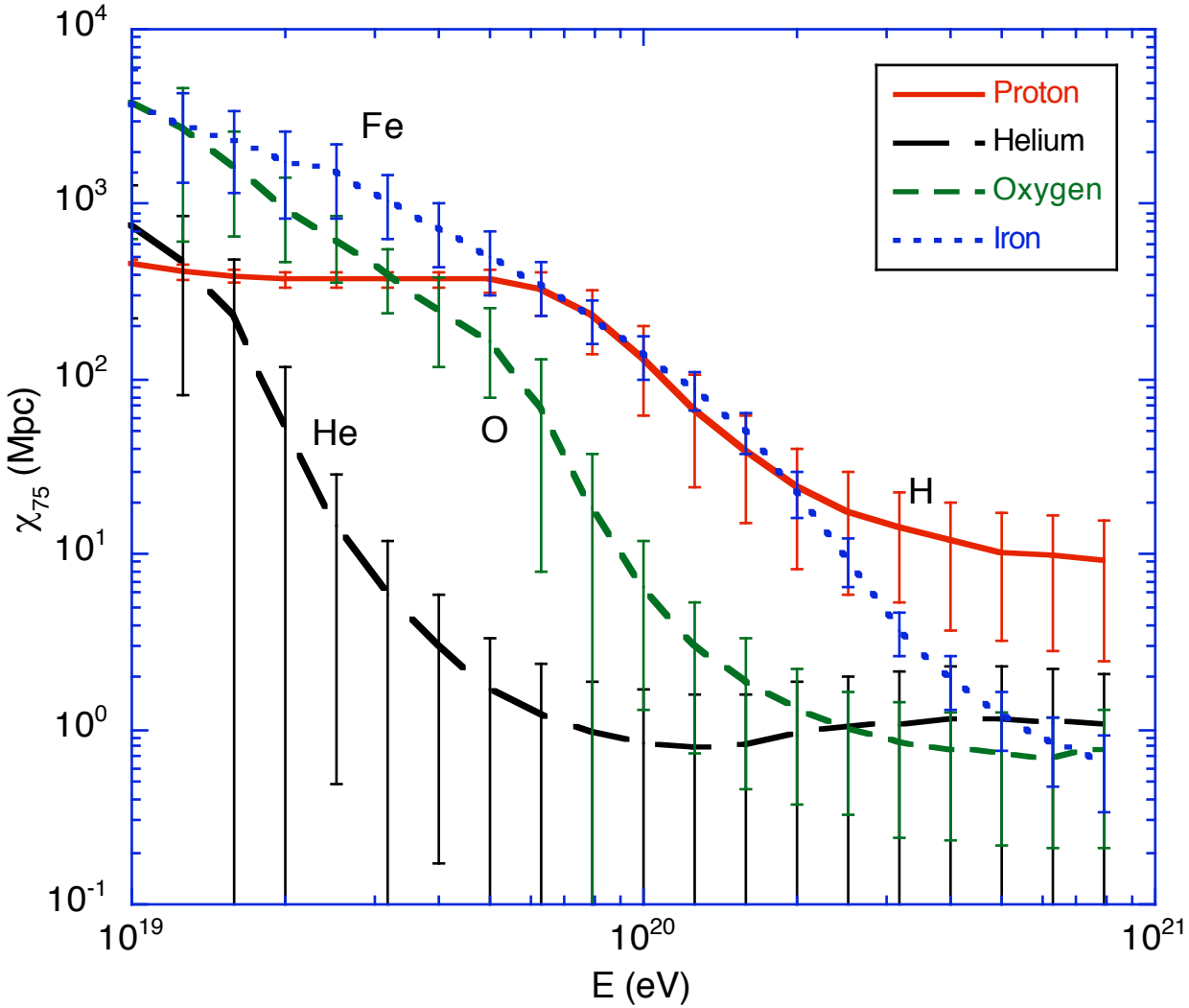
Libre parcours moyen du Fe
(pour différents redshifts)



Longueur de perte du Fe
(par différents processus)



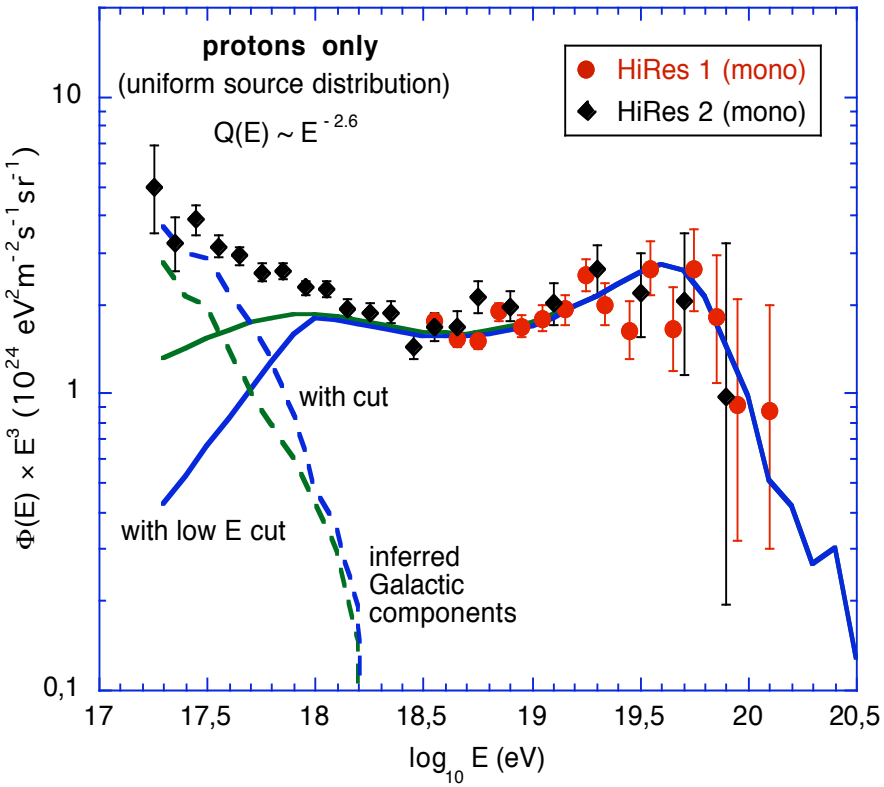
Longueurs de pertes d'énergie



La structure de l'horizon GZK est essentiellement la même pour H et Fe

Y a-t-il des noyaux parmi les EGCRs?

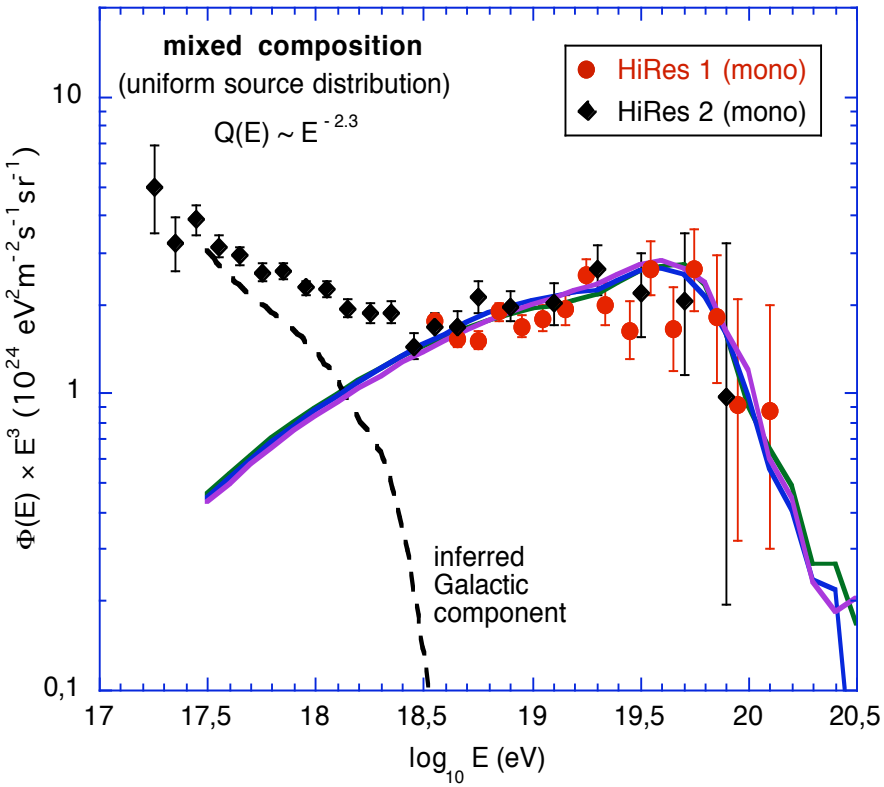
protons seuls (cf. Berezinsky et al.)



Spectre source en $E^{-2.6}$

cheville = "pair production dip"

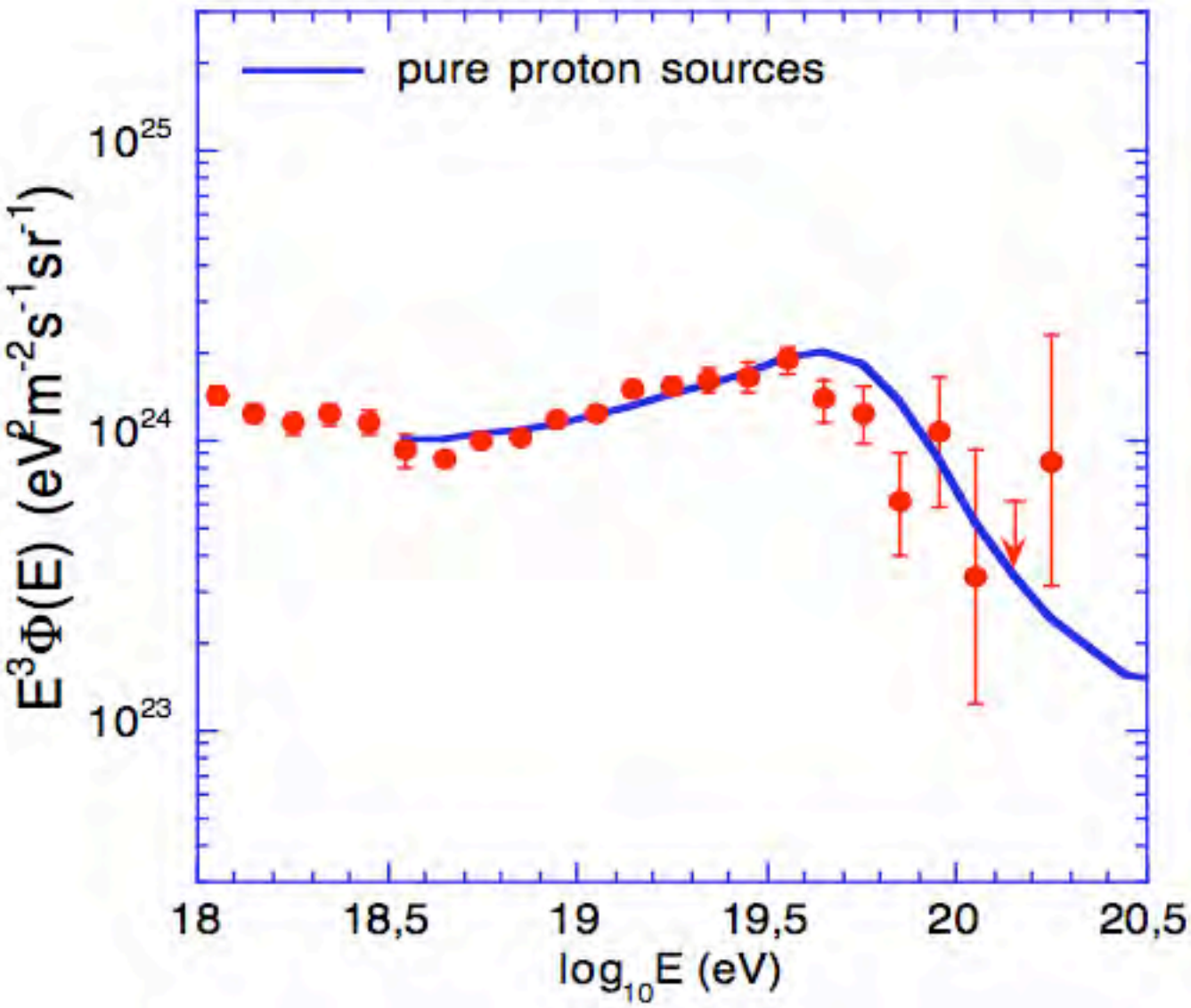
composition mixte (Allard et al.)



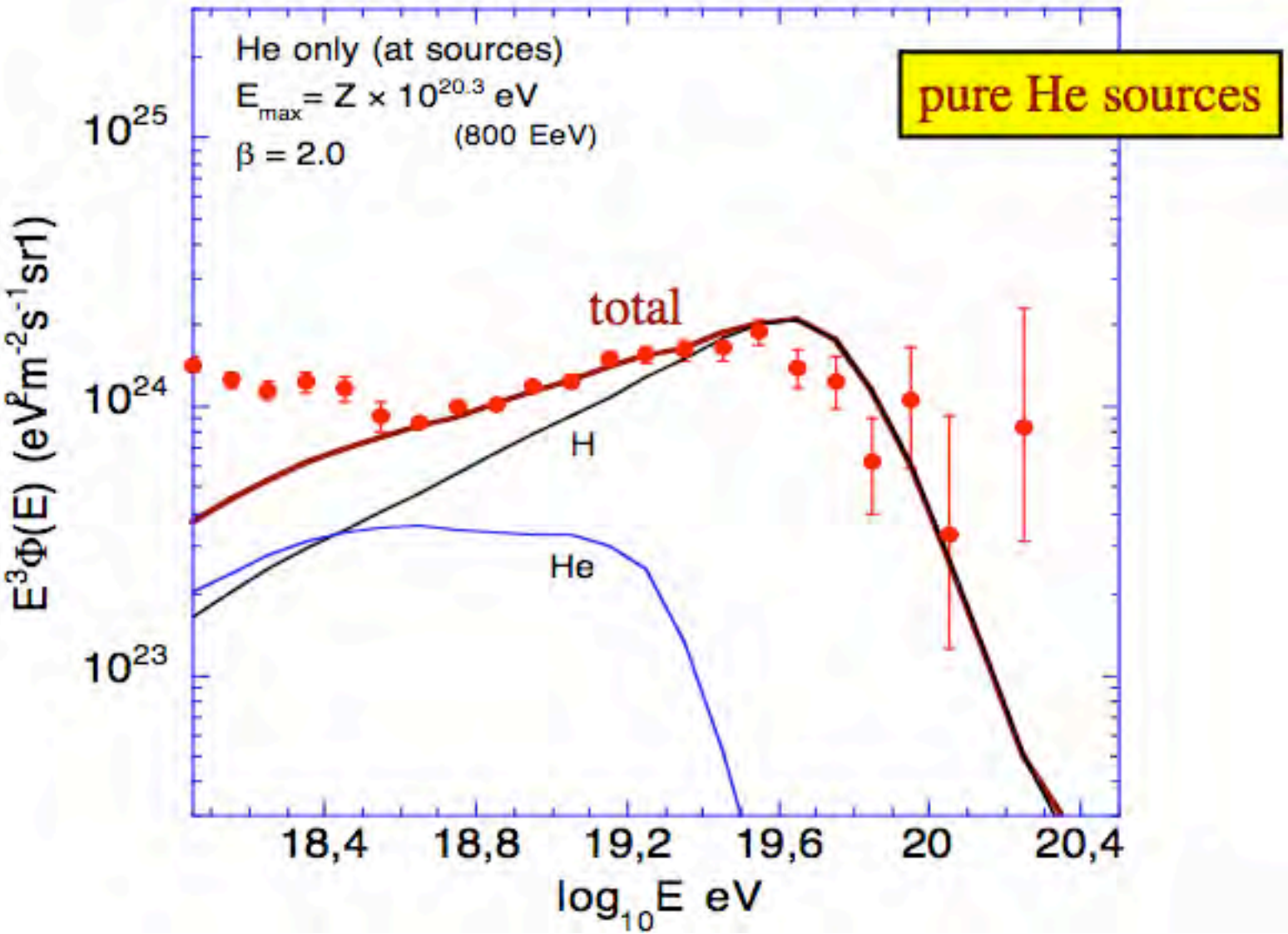
Spectre source en $E^{-2.3}$

cheville = transition gal./extragal.

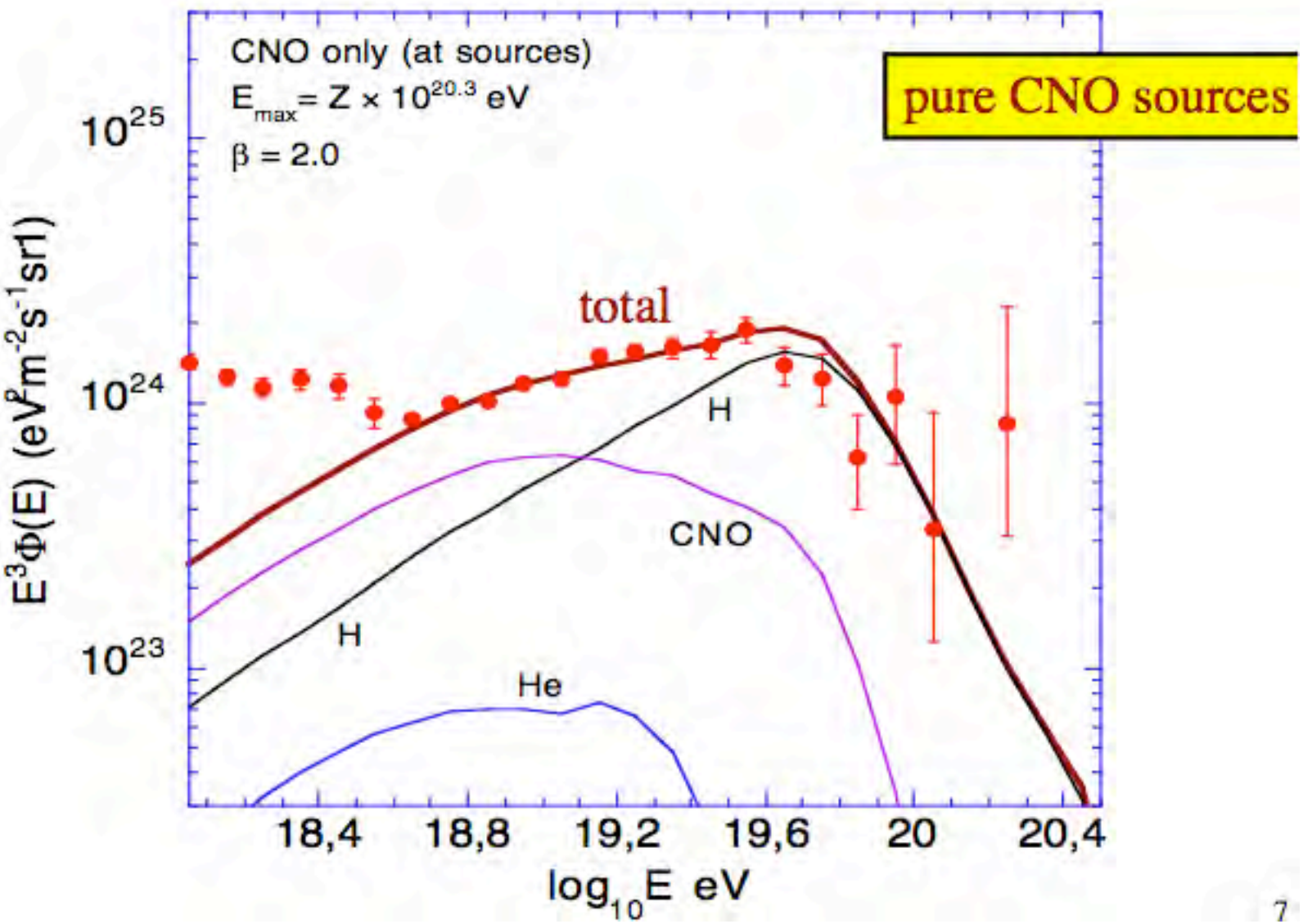
Incertitude sur la composition…



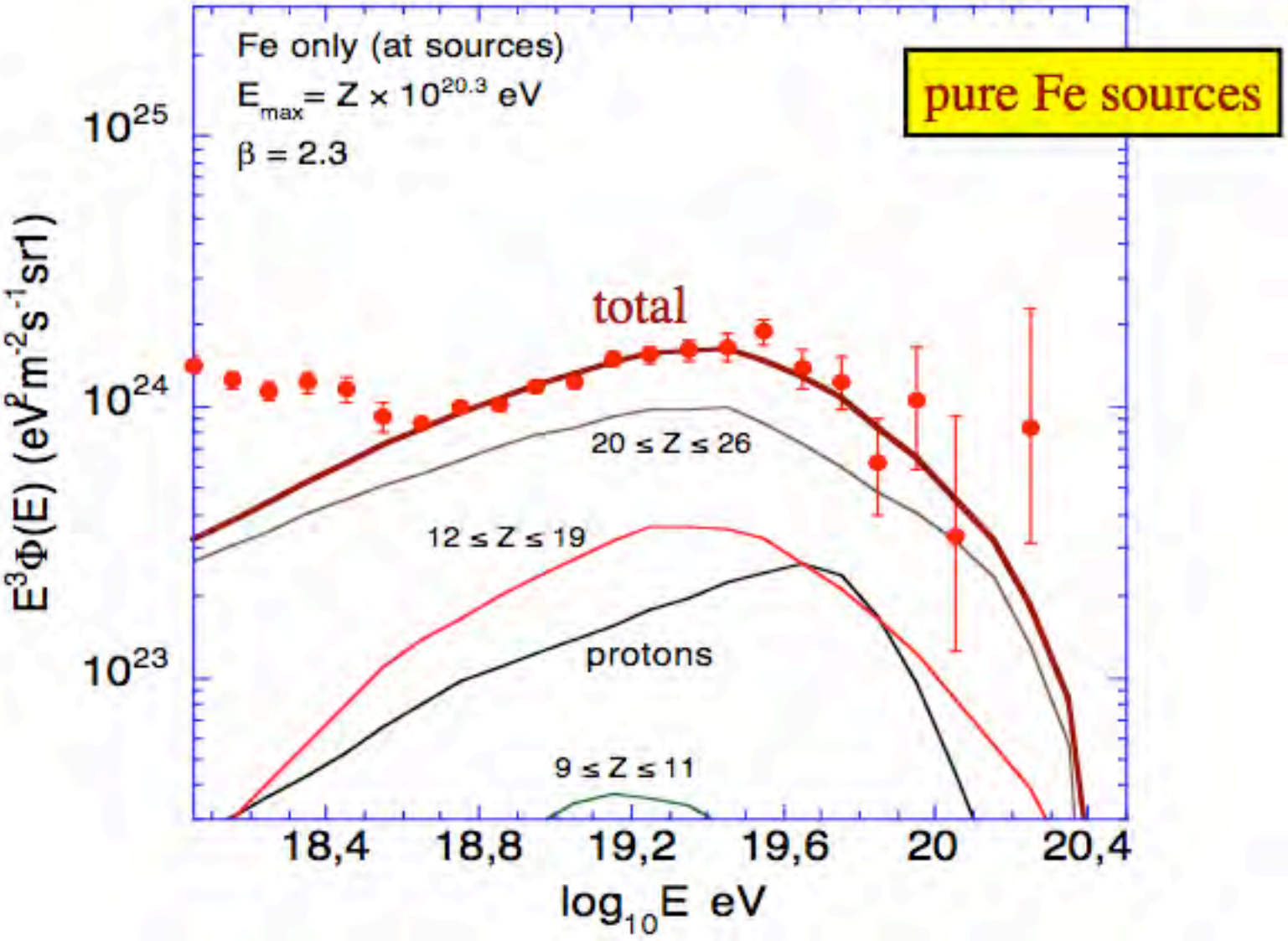
Incertitude sur la composition…



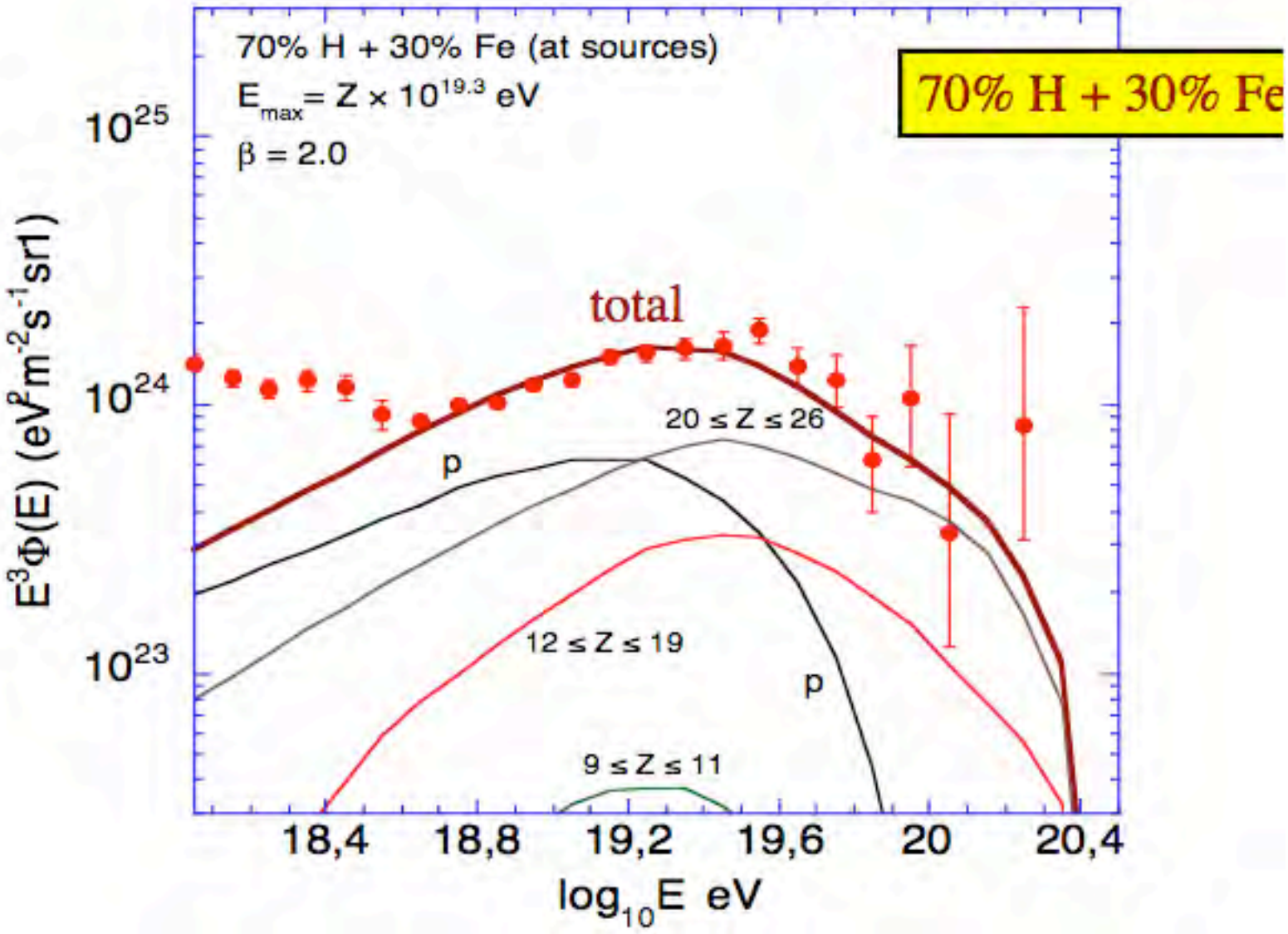
Incertitude sur la composition…



Incertitude sur la composition…



Incertitude sur la composition…

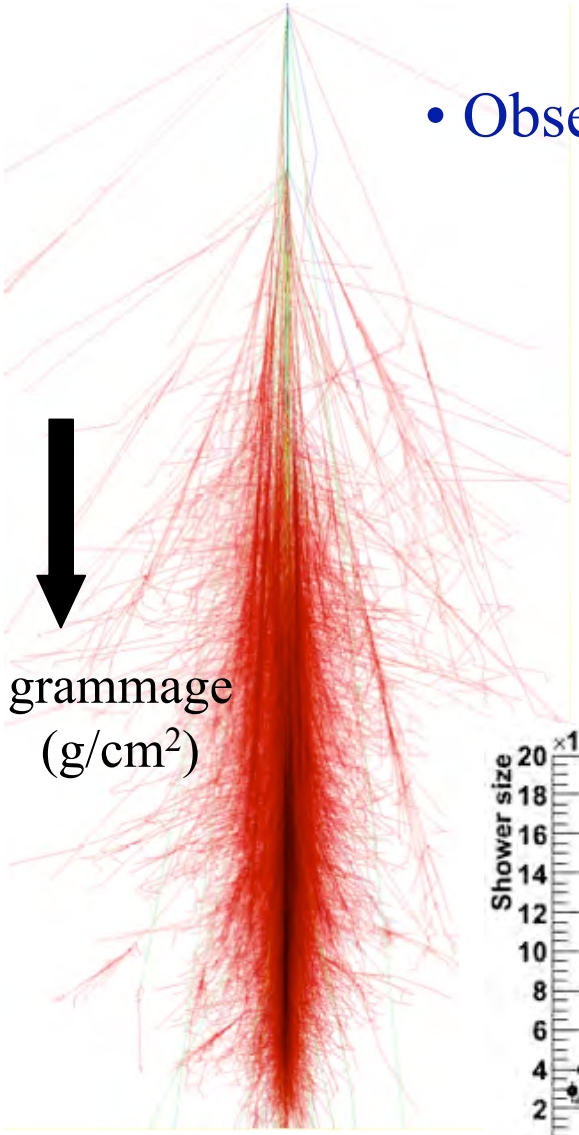


L'Observatoire Pierre Auger

Un observatoire couvrant 3 000 km² !

17 pays, 70 instituts, 400 chercheurs et ingénieurs

Détection des RC à haute énergie



grammage (g/cm^2)

- Observation des "gerbes atmosphériques géantes"

photons de fluorescence dans l'atmosphere

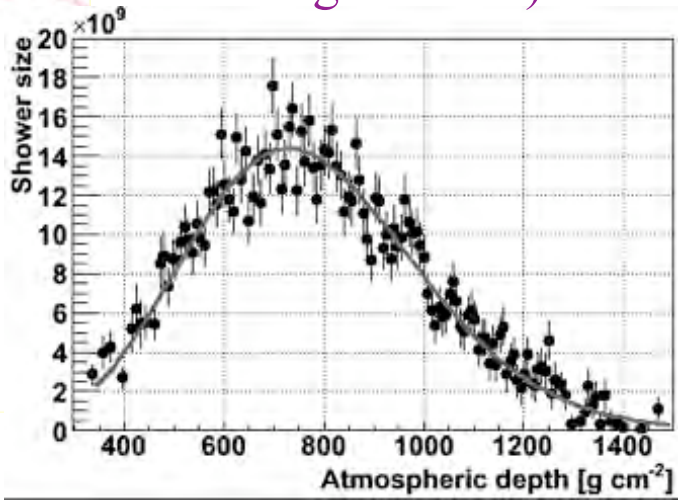
→ développement longitudinal

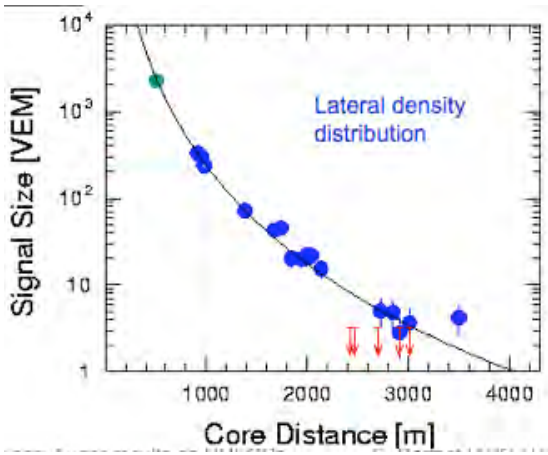
(sensible à la sous-gerbe EM)

Densité de particules de la gerbe, mesurée au sol

→ distribution latérale

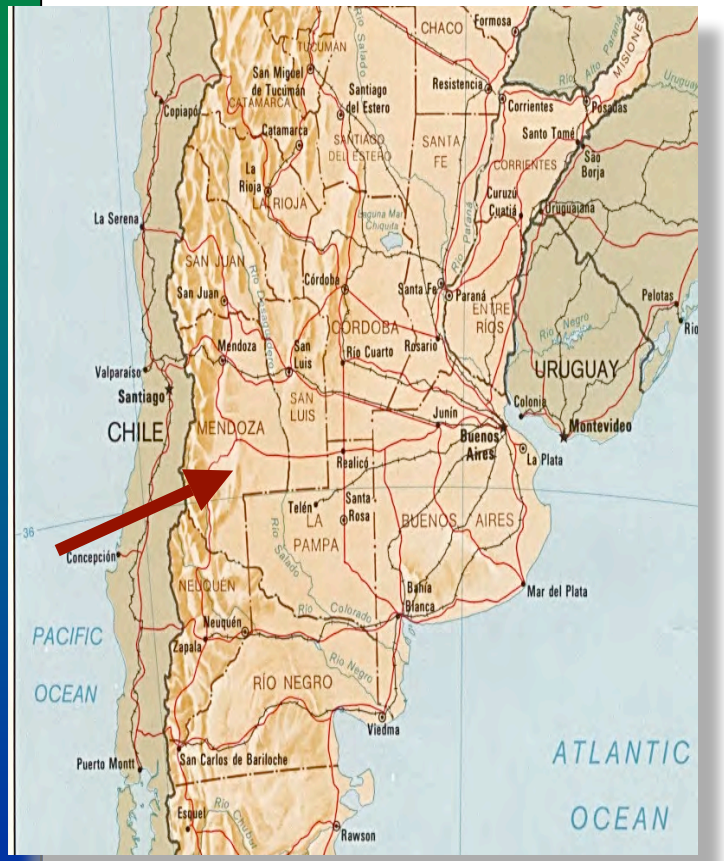
(sensible aux sous-gerbes EM et hadronique)

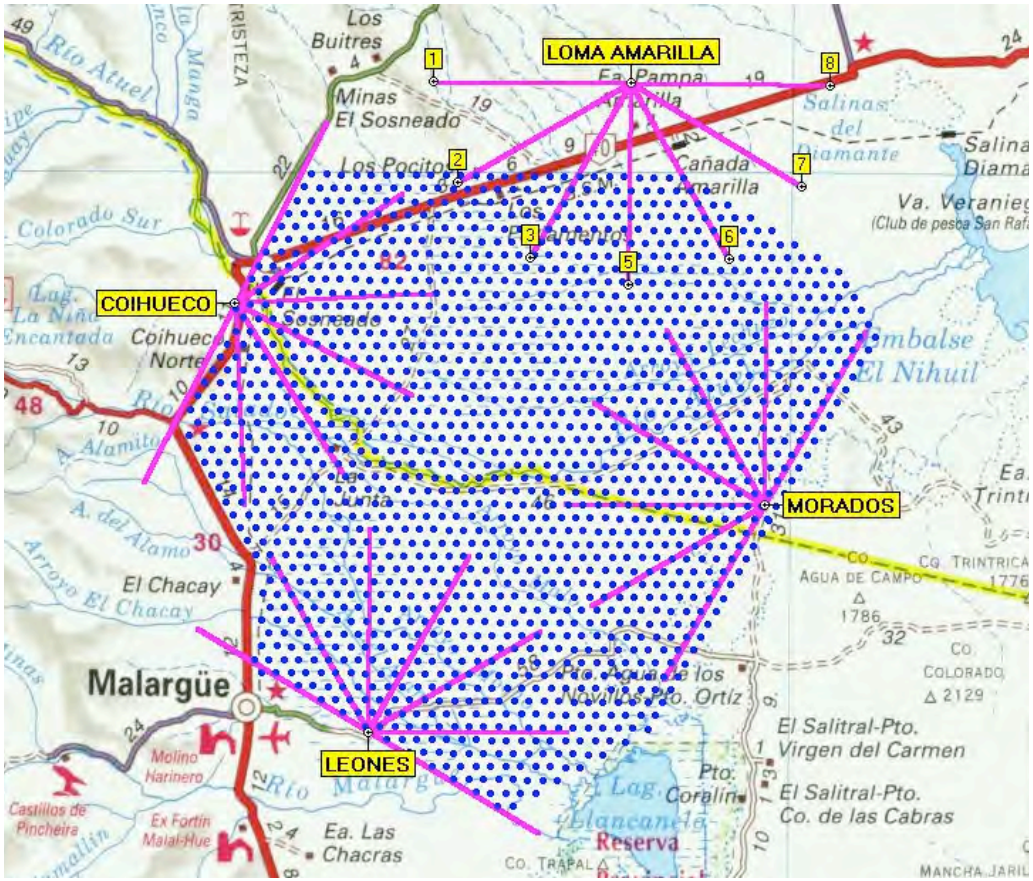




Plan de l'Observatoire

Argentine





Réseau de surface

1600 stations

1.5 km entre voisines

3000 km²

Détecteurs de fluorescence

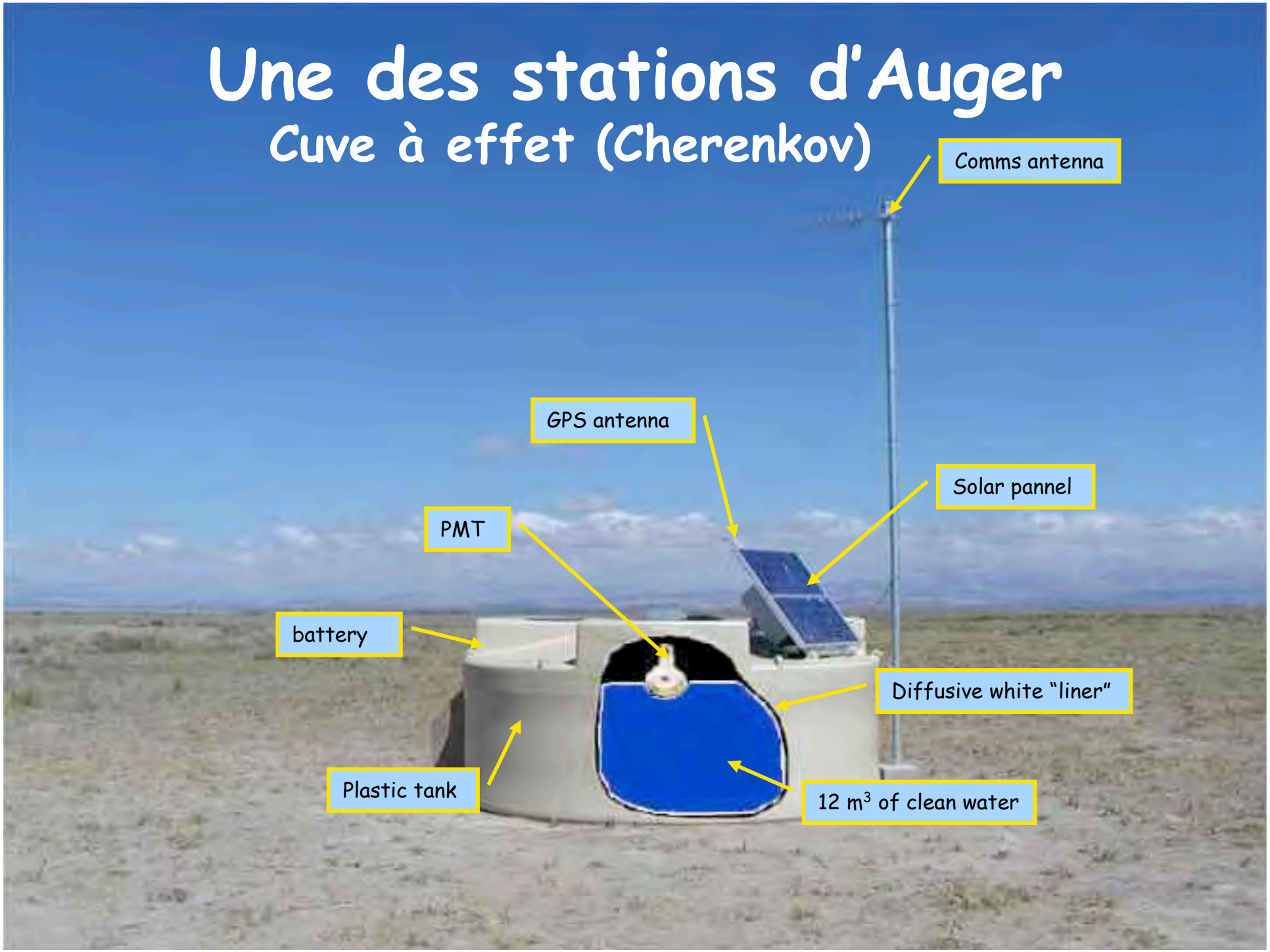
4 bâtiments

6 télescopes par bâtiment

24 télescopes au total

Une des stations d'Auger

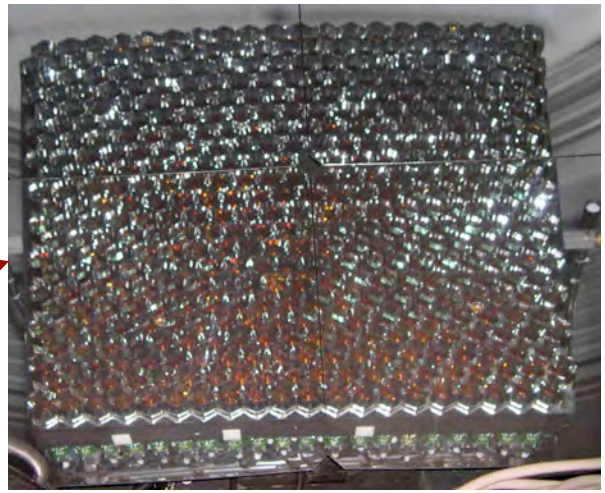
Cuve à effet (Cherenkov)



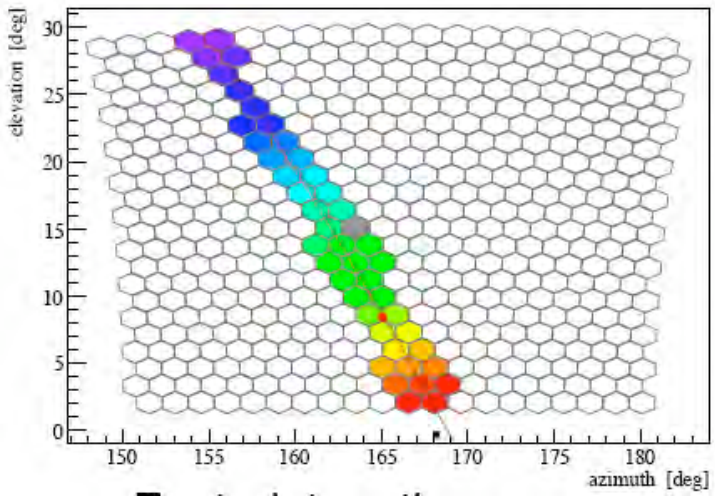
Réseau hexagonal (d=1.5 km, S=3000 km^2)

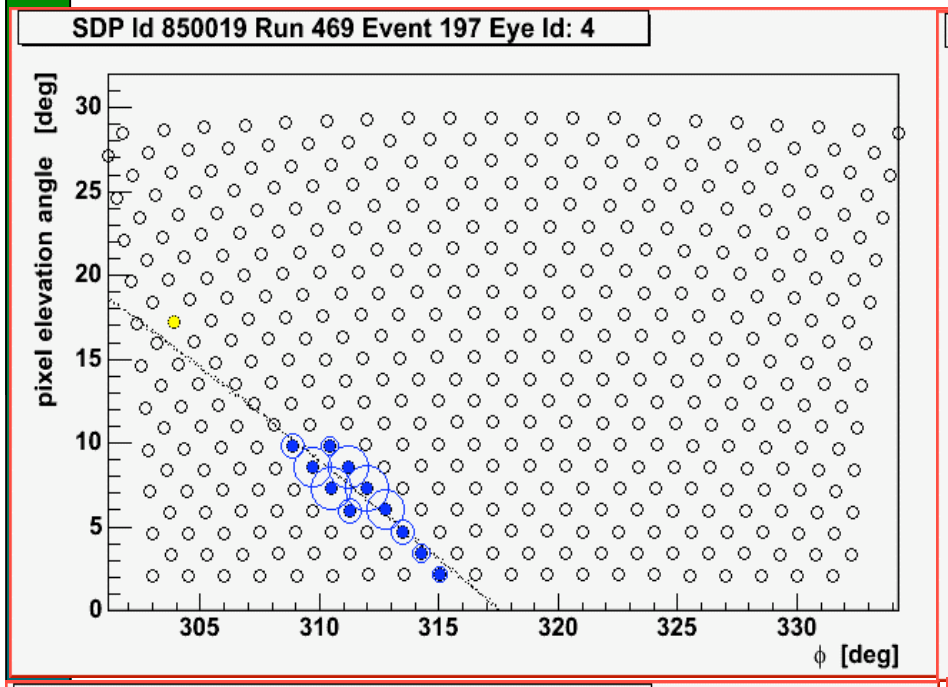
4 fois 6 télescopes couvrant le site

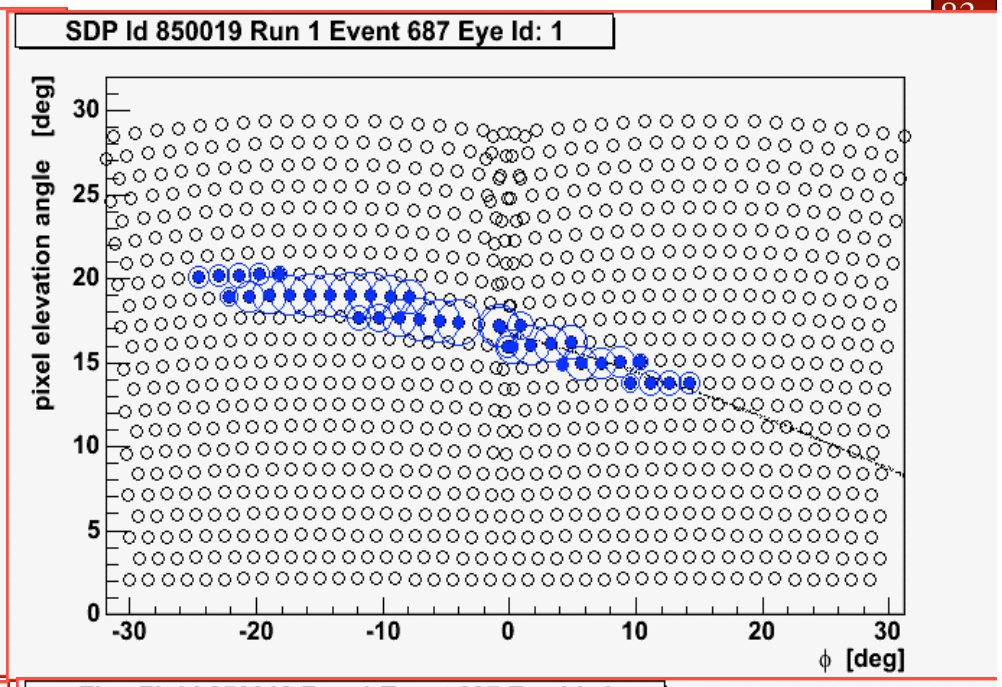
Un des « yeux à fluorescence »

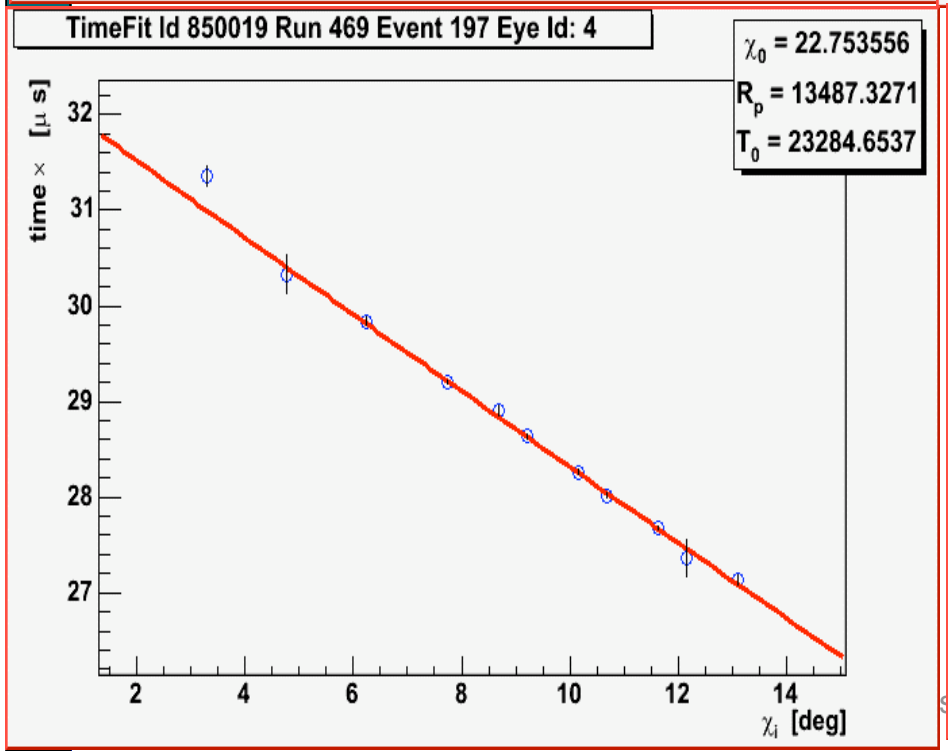


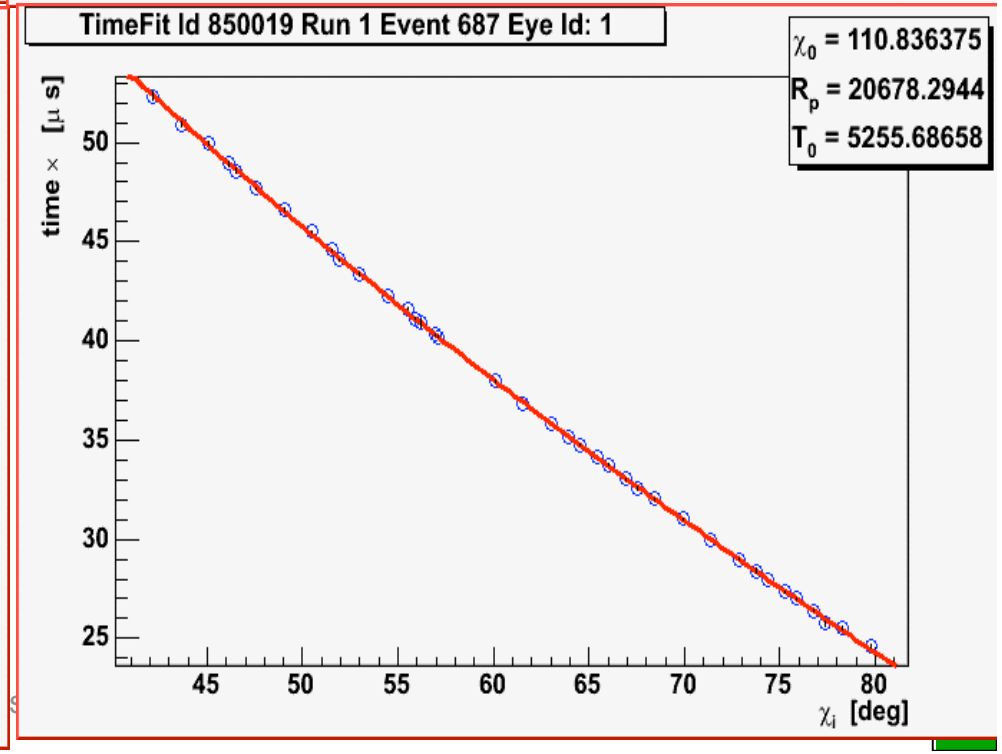
caméra à 440 PMT 1.5° par pixel



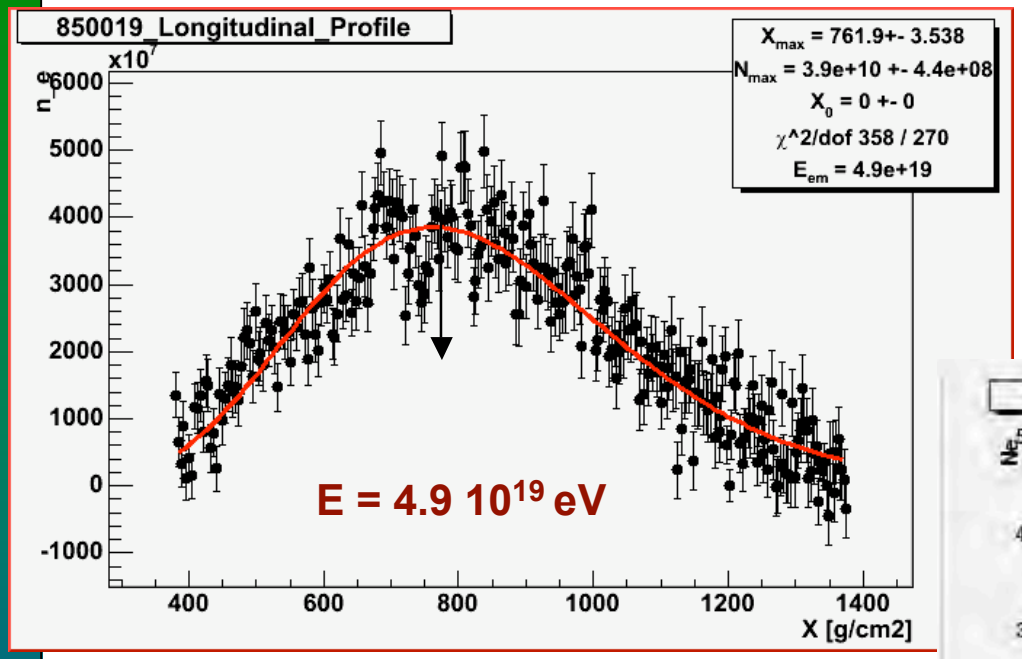

SDP Id 850019 Run 469 Event 197 Eye Id: 4
pixel elevation angle [deg]
ϕ [deg]


SDP Id 850019 Run 1 Event 687 Eye Id: 1
pixel elevation angle [deg]
ϕ [deg]

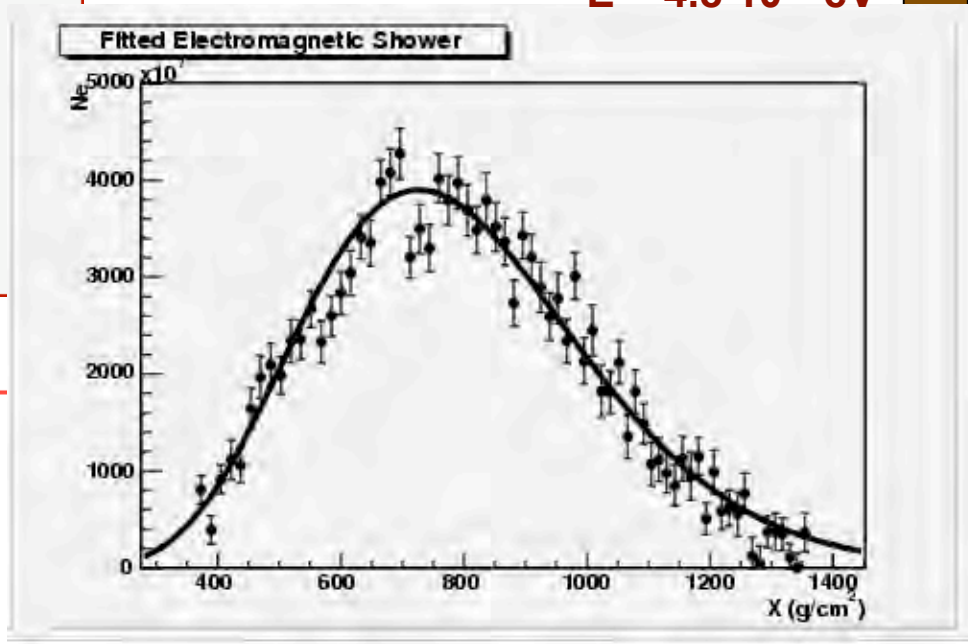

TimeFit Id 850019 Run 469 Event 197 Eye Id: 4
χ0 = 22.753556
Rp = 13487.3271
T0 = 23284.6537
time × [μ s]
χi [deg]

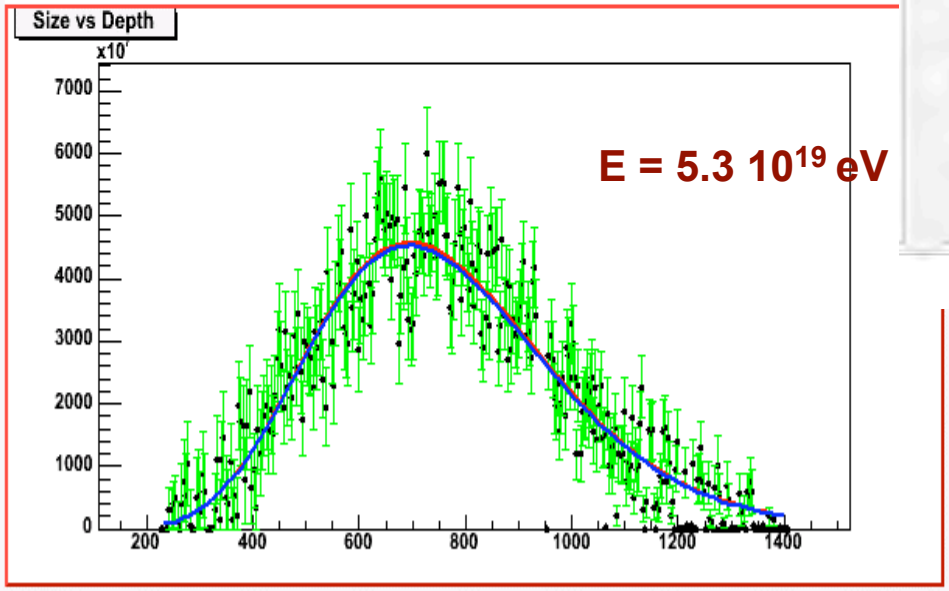

TimeFit Id 850019 Run 1 Event 687 Eye Id: 1
χ0 = 110.836375
Rp = 20678.2944
T0 = 5255.68658
time × [μ s]
χi [deg]

Analyse indépendante d'événements stéréos



E = 4.8 10^{19} eV

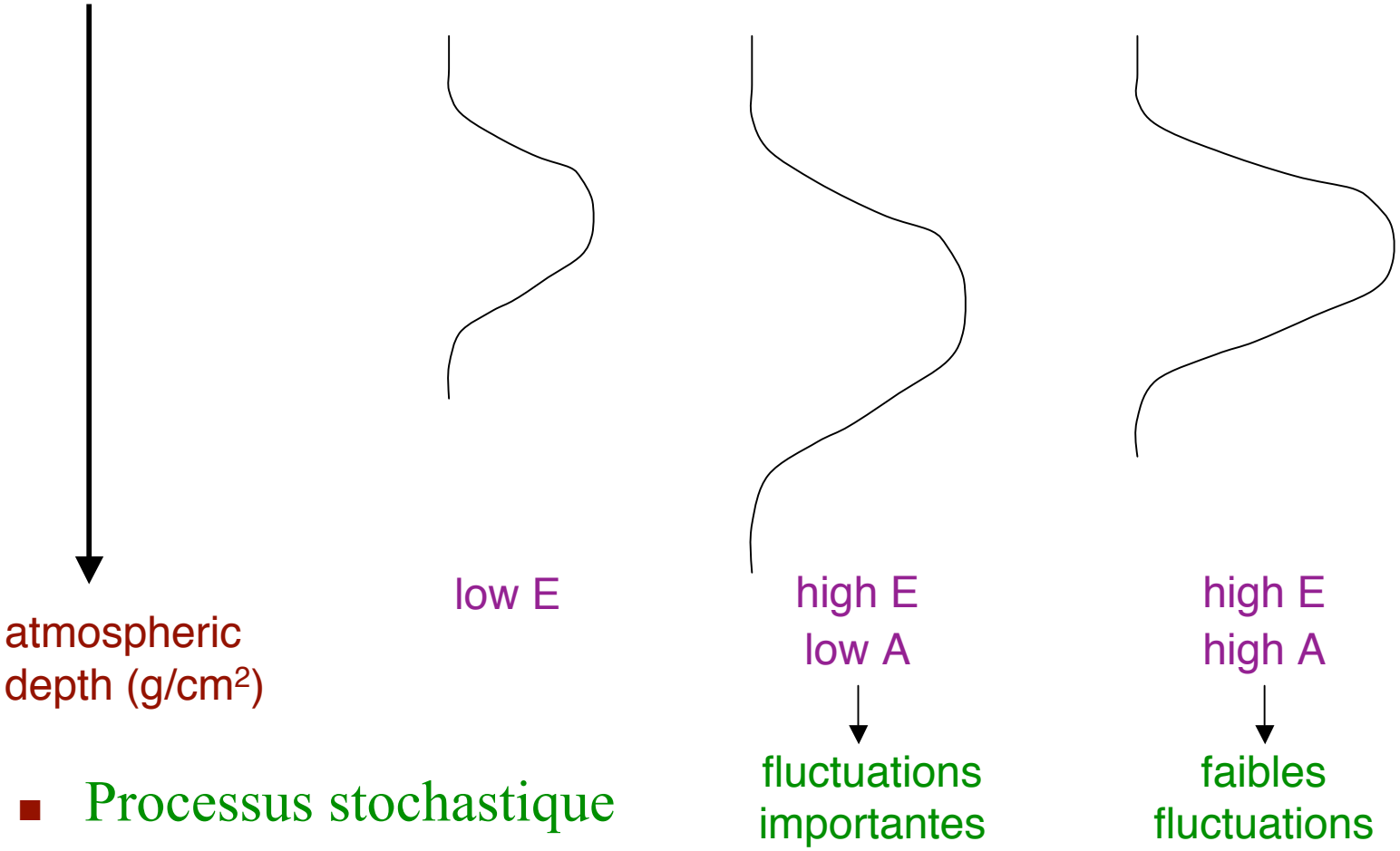




E_{em} estimée en fittant un profil GH, et en intégrant…

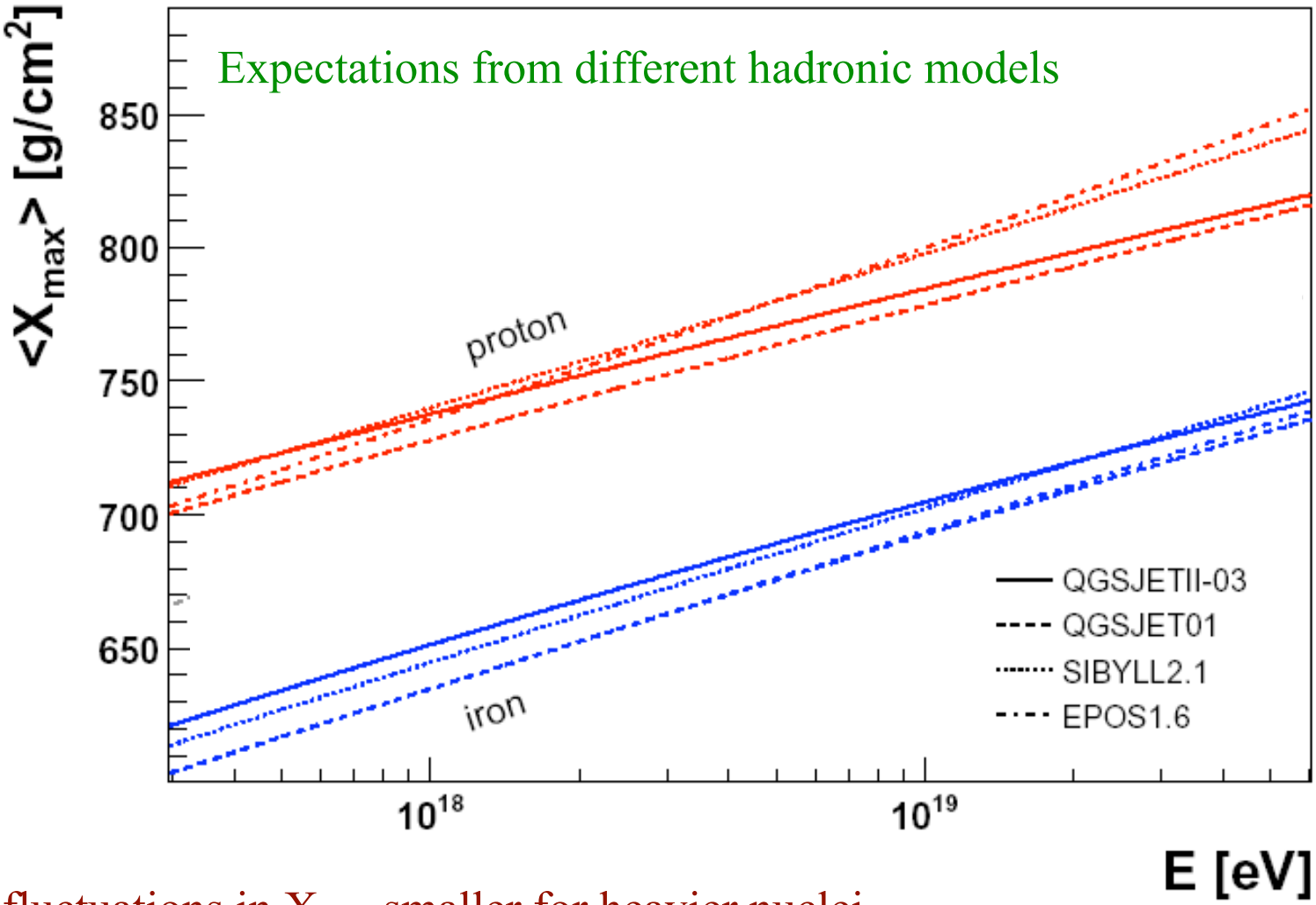
Observable sensible à la composition

- Profondeur du maximum de développement : X_{max}



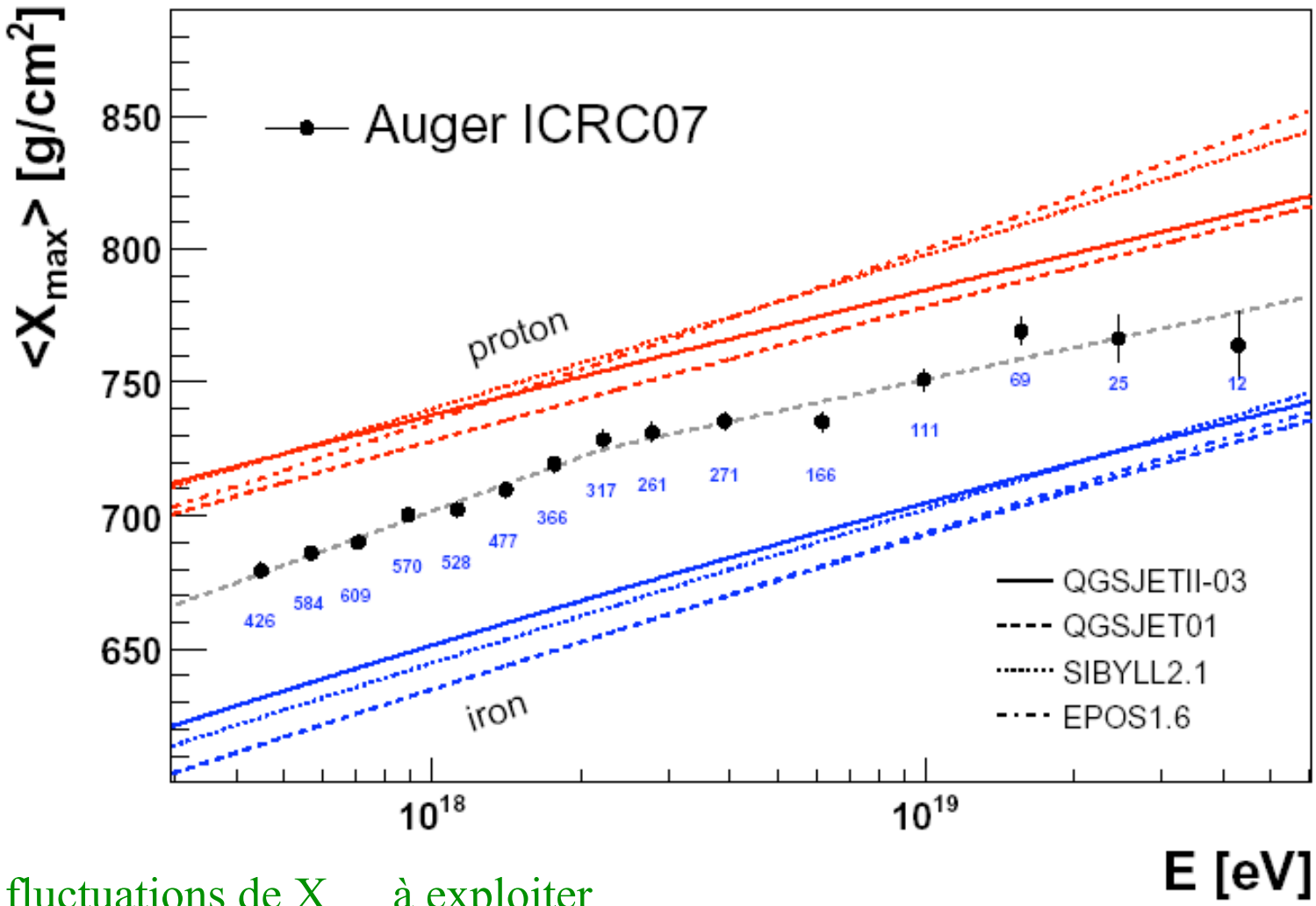
- Processus stochastique

Atmospheric depth of shower maximum



+ fluctuations in X_{max} smaller for heavier nuclei

Maximum des gerbes
mesuré sur 2 décades en énergie



+ fluctuations de X_{max} à exploiter

Implications possibles

1 Les noyaux lourds dominent à très haute énergie

Sources très enrichies en Fe ?

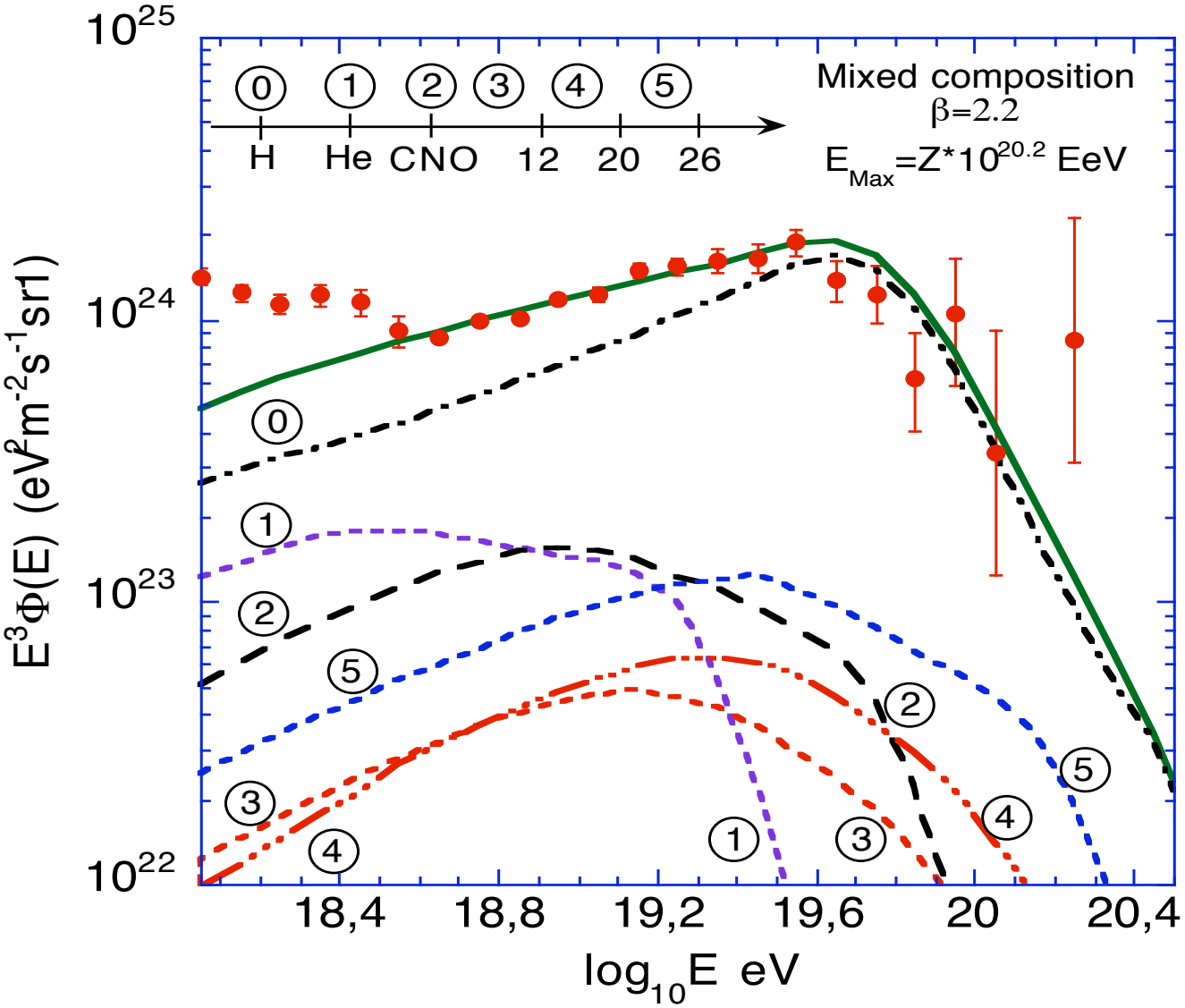
Sources modérément enrichies, mais énergie maximale des protons limitée ?

Est-ce compatible avec les anisotropies observées ?

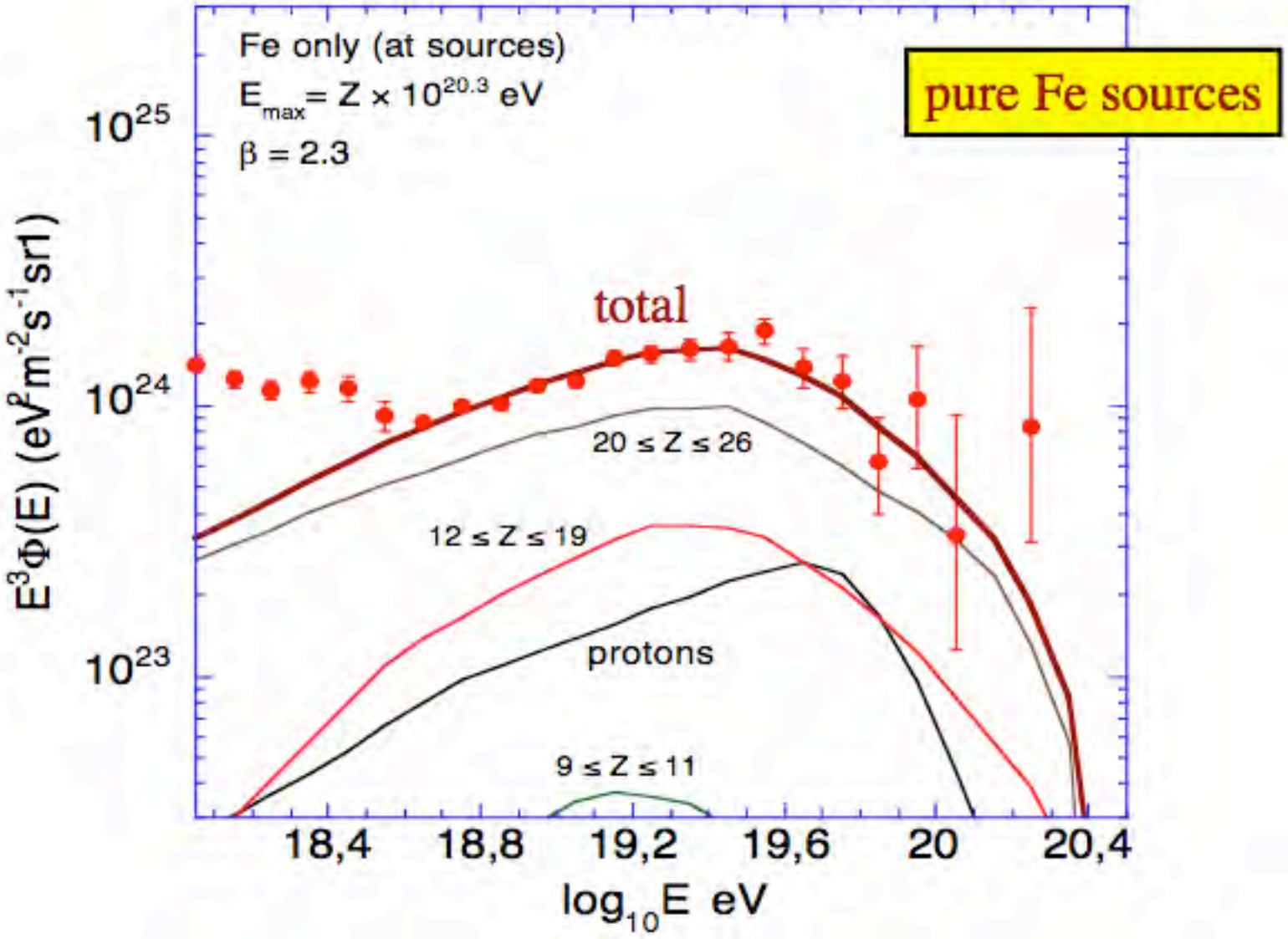
2 Les gerbes ressemblent à des gerbes initiées par des noyaux lourds, mais les protons dominent…

→ Physique à très haute énergie !

Composition mixte, mais protons dominent



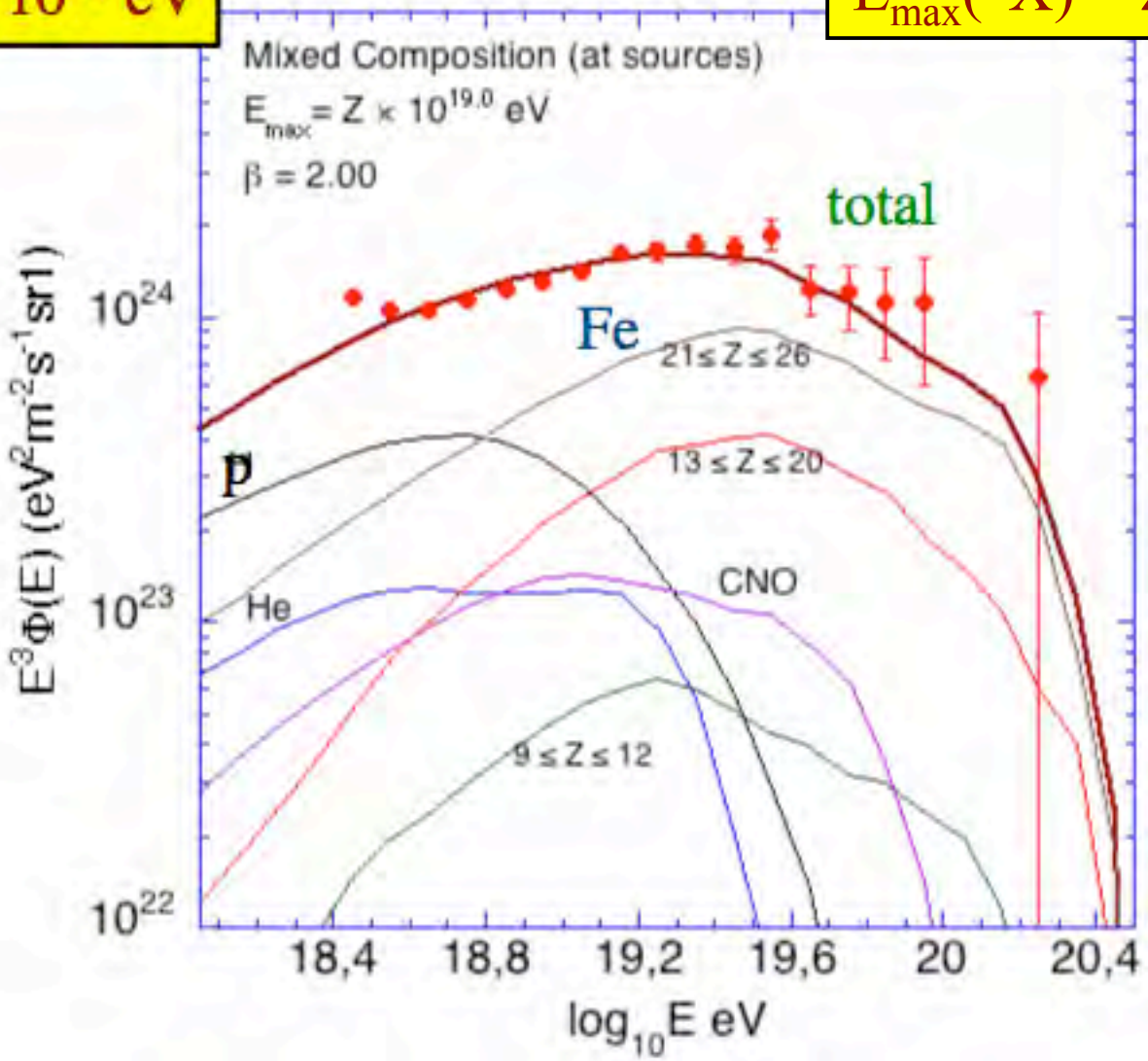
Sources très enrichies en Fe ?



Sources à rigidité maximale limitée

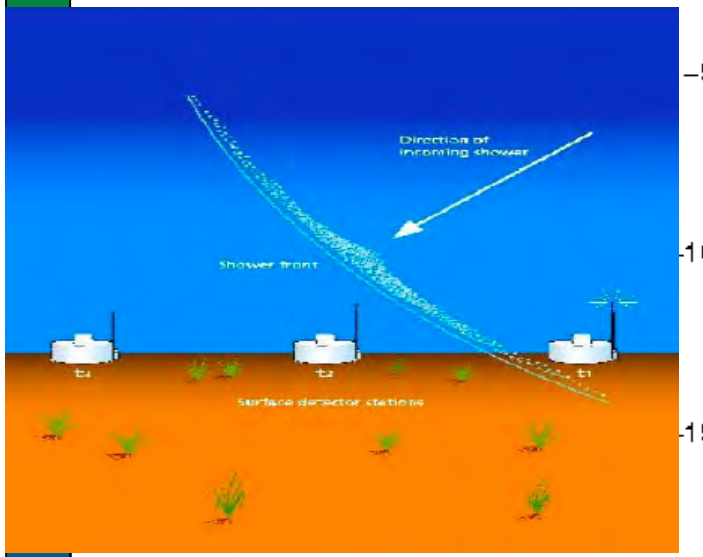
$E_{max}(p) = 10^{19}$ eV

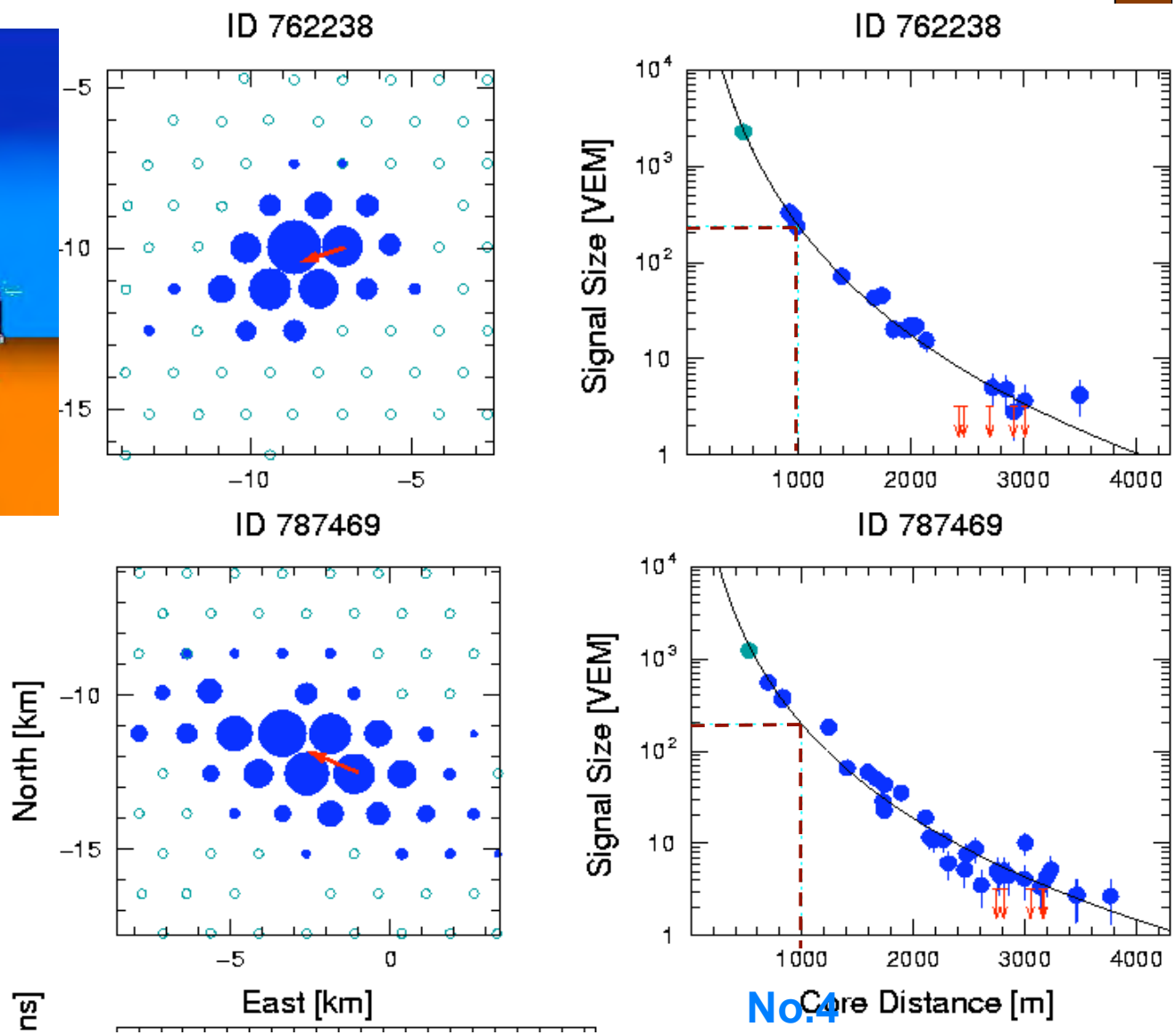
$E_{max}(^{Z}X) = Z \times E_{max}(p)$



Reconstruction avec les détecteur de surface

- Estimateur d'énergie: signal interpolé à 1000 mètres et à 38° d'angle zénithal



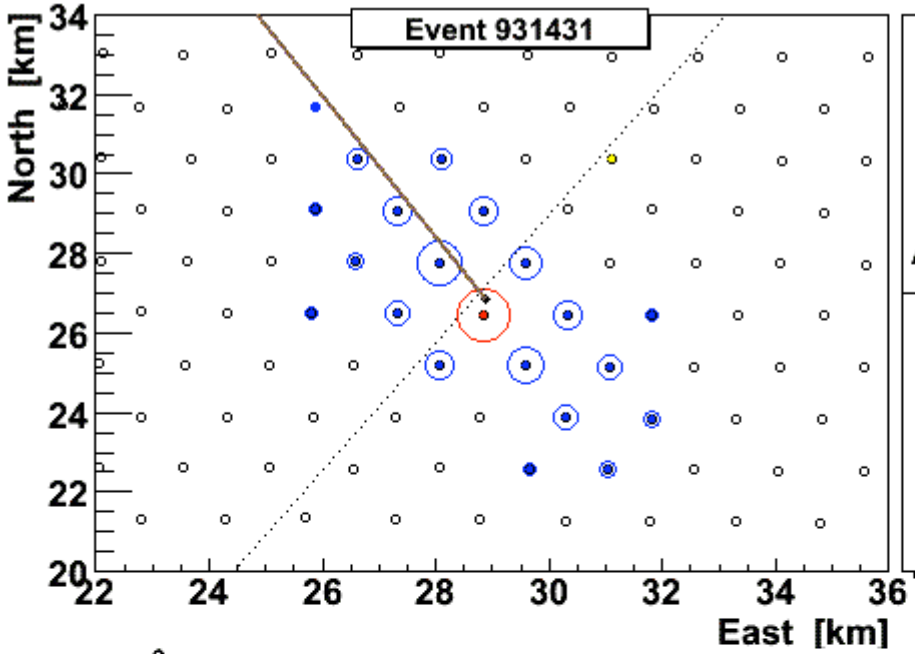


information temporelle
→ triangulation

↓

reconstruction
géométrique
(direction d'arrivée)

Exemple d'événement hybride



Core location

Easting 468693 ± 59

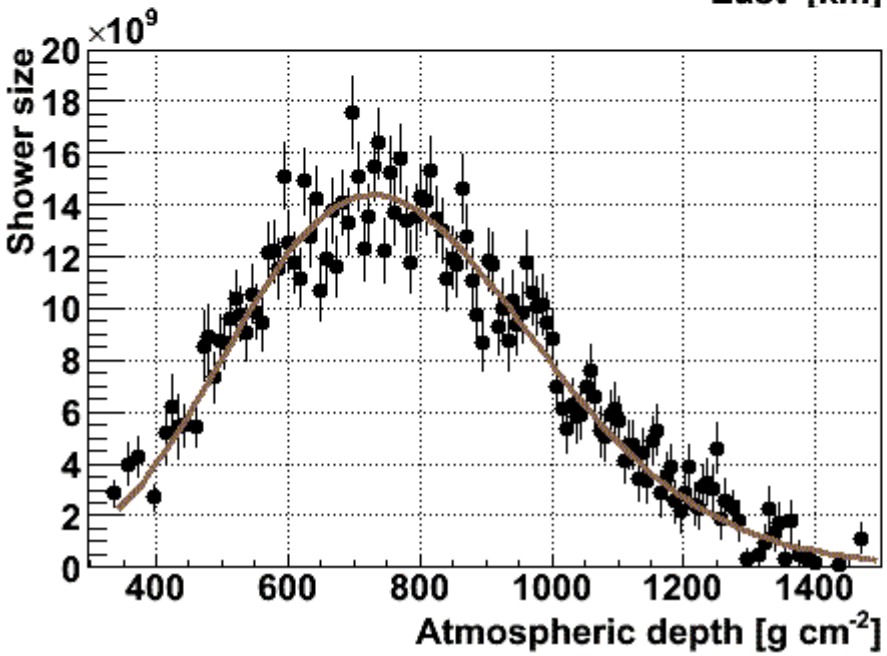
Northing 6087022 ± 80

Altitude = 1390 m a.s.l.

Shower Axis

$\theta = (62.3 \pm 0.2)^{\circ}$

$\phi = (119.7 \pm 0.1)^{\circ}$



Energy Estimate:

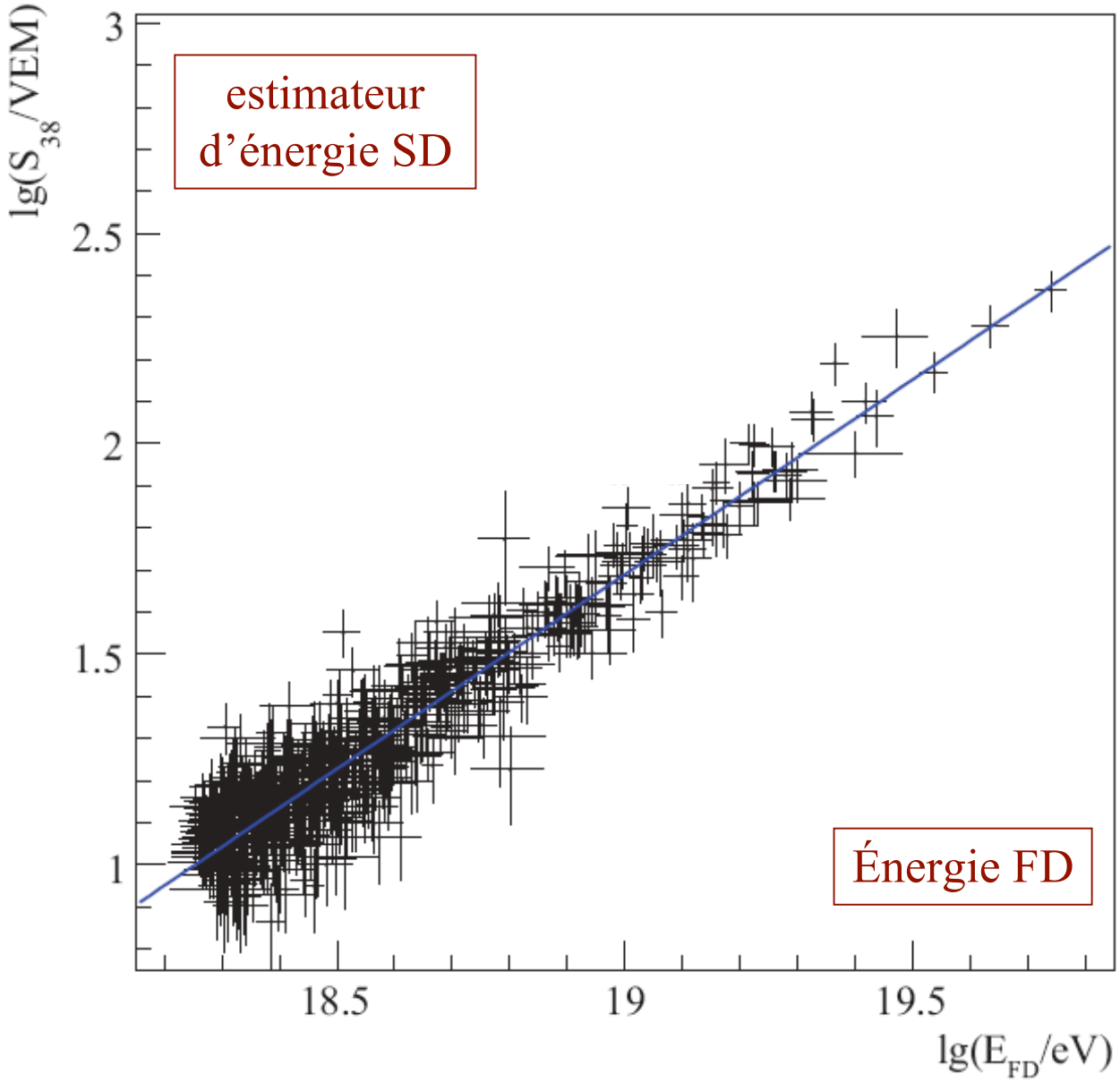
$X_{max} = (728 \pm 20)$ g cm^{-2}

χ^2/dof = 258 / 134

$E_{em} = (21 \pm 5)$ EeV

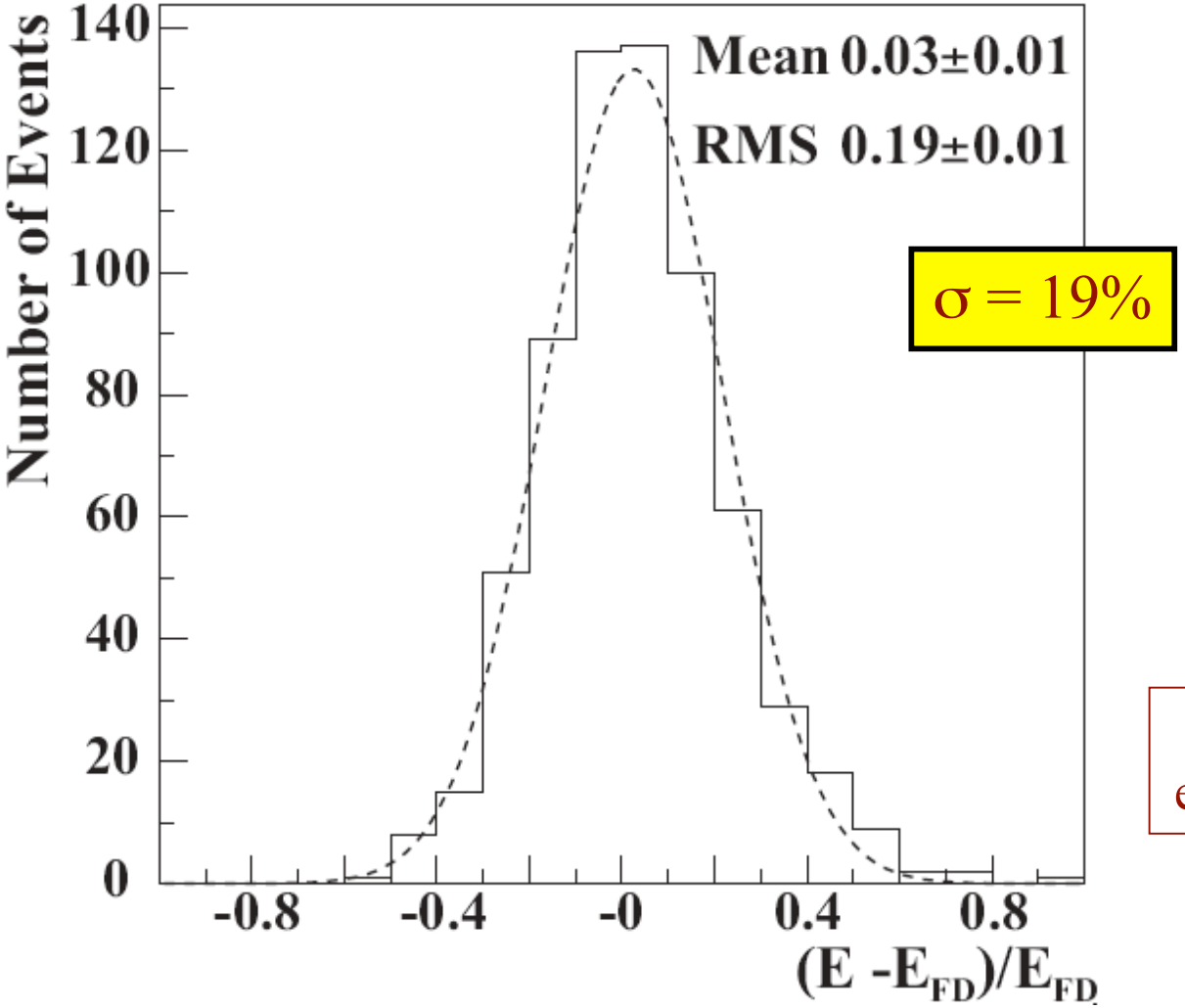
$E_{tot} = (23 \pm 6)$ EeV

Inter-calibration des détecteurs



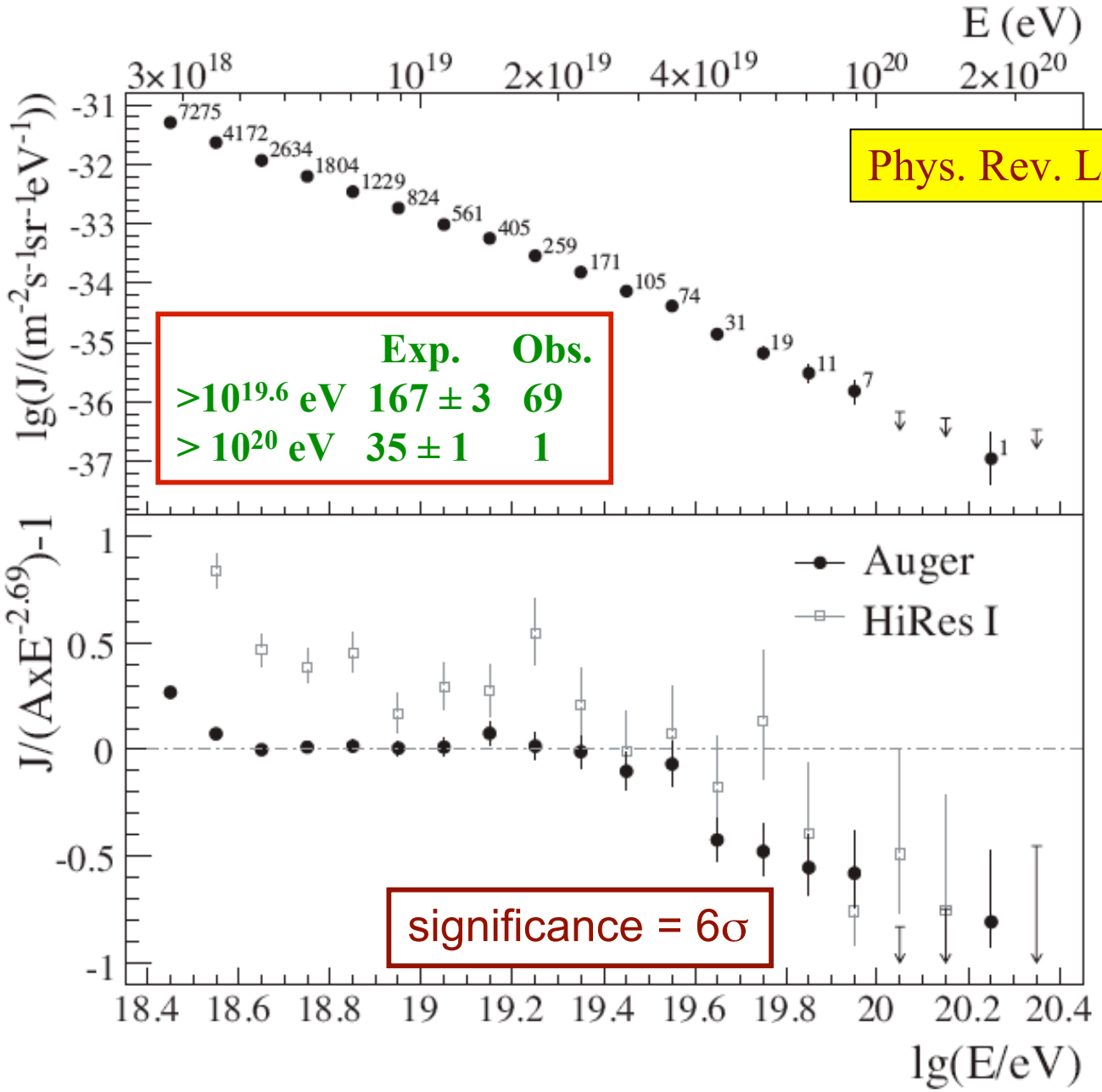
Inter-calibration des détecteurs

Dispersion fractionelle des estimations d'énergie FD/SD



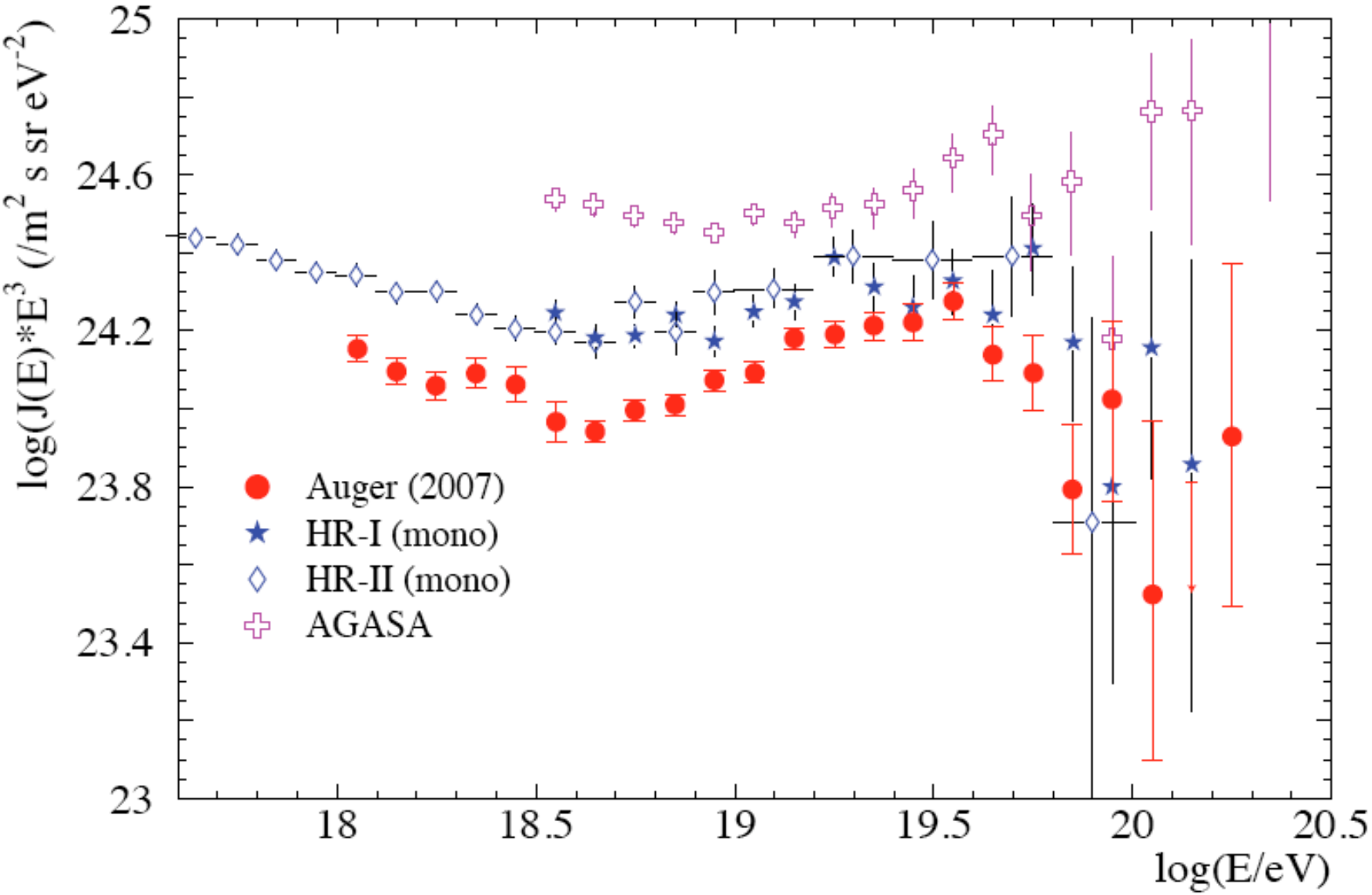
Très bon estimateur !

Spectrum d'énergie (SD, gerbes ayant θ ≤ 60°)

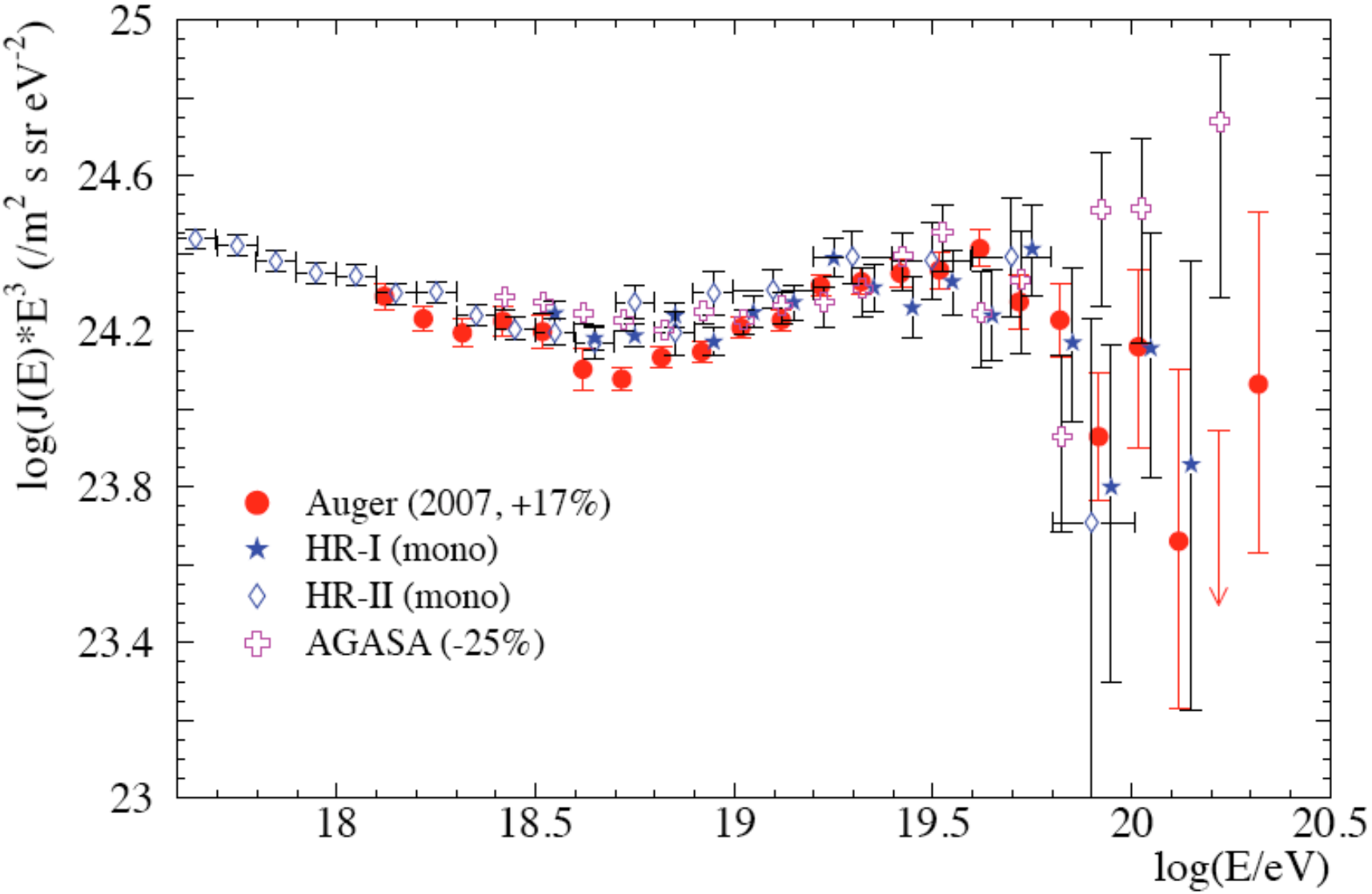


Phys. Rev. Lett. 2008

Spectrum d'énergie



Spectrum d'énergie



Résultats d'anisotropie

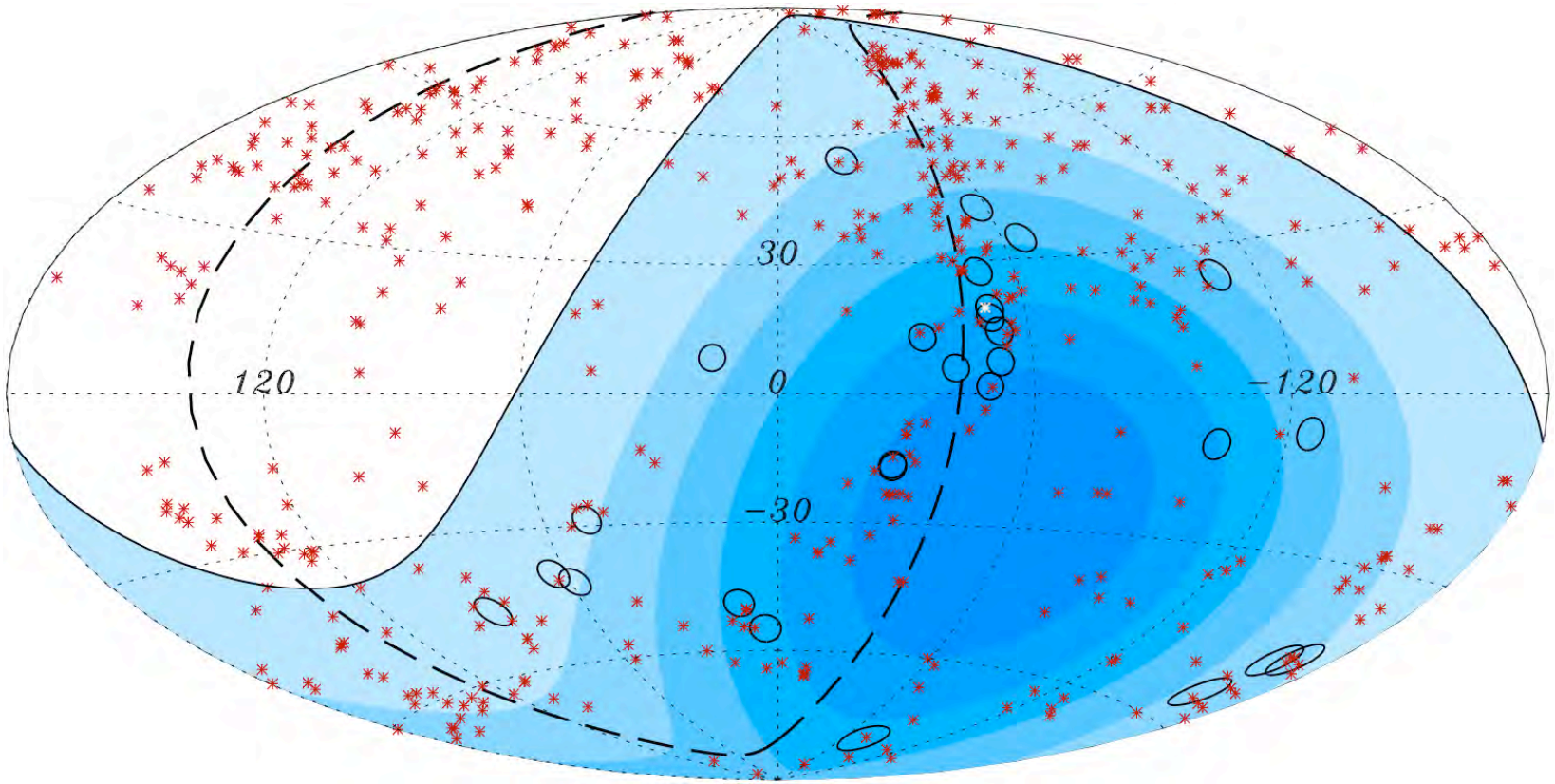
- resolution angulaire de ~1°: suffisant!
- Pas de signal à grande échelle angulaire (dipole), à aucune énergie supérieure à 1 EeV
  e.g. $\alpha < 0.7\%$ for $1\ \text{EeV} \leq E \leq 3\ \text{EeV}$
- Pas d'excès significatif au centre Galactique
- Pas de signal associé aux BL-Lacs (cf. HiRes)

⟹ aucune suggestion antérieure n'est confirmée…

Principal résultat d'anisotropie d'Auger

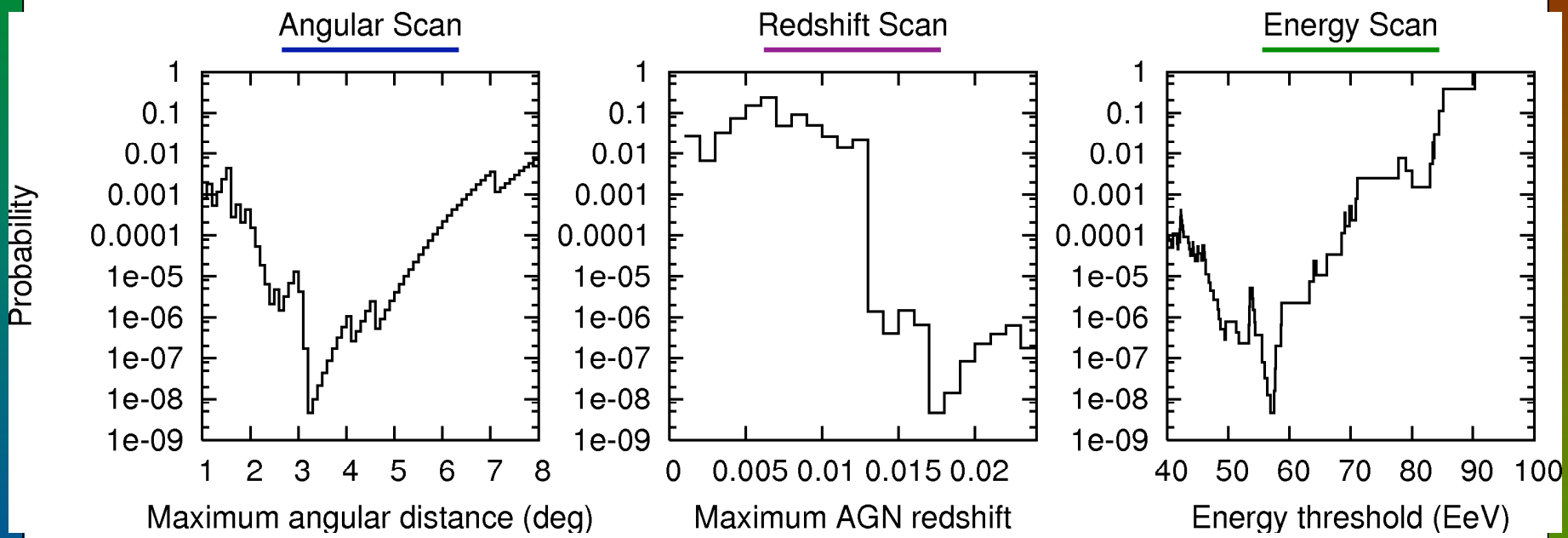
- Les rayons cosmiques de très haute énergie ont une distribution anisotrope !
- Première preuve que l'astronomie rayons cosmiques est possible!
- Correlation avec la distribution de matière locale (limite en distance)
- Début d'une ère nouvelle :
  - Étude de l'acceleration des particules dans les sources de l'astrophysique des hautes énergies
  - Étude "multi-messenger" des sources
  - Physique à très haute énergie !

Principal résultat d'anisotropie d'Auger



Principal résultat d'anisotropie d'Auger

3 paramètres libres dans la définition de la corrélation



$\Delta\theta \leq 3.1°$

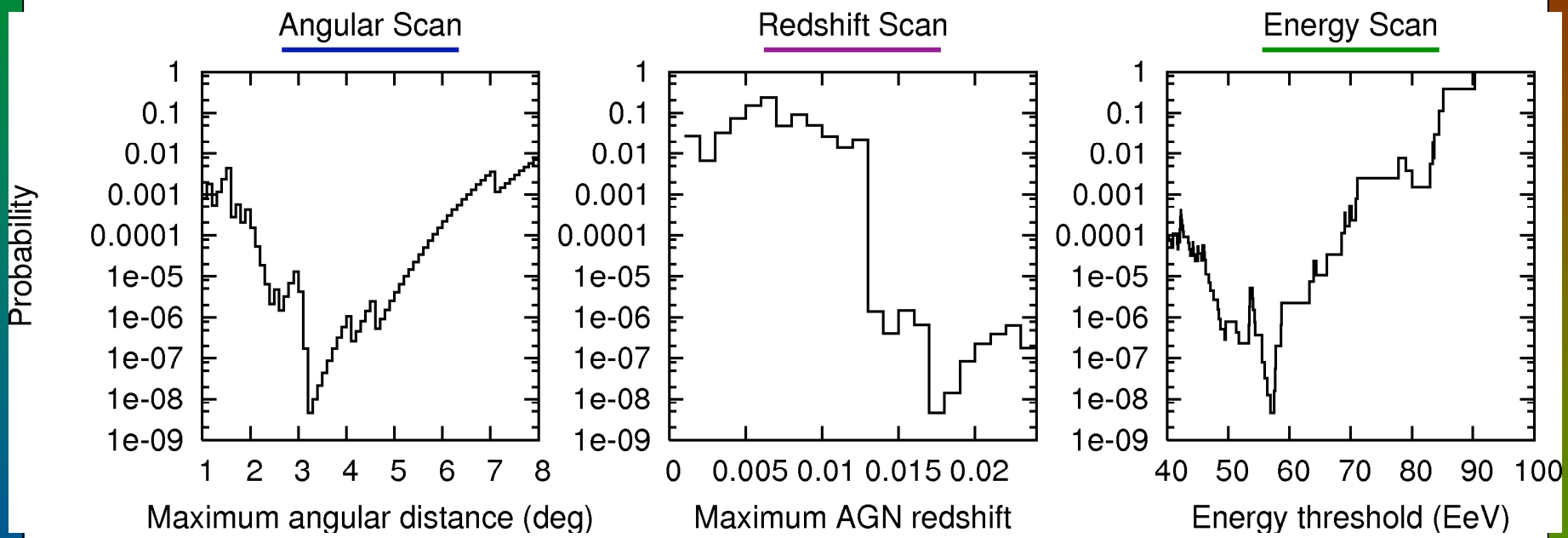
$z \leq 0.018$

$(D \leq 75$ Mpc$)$

$E \geq 56$ EeV

Principal résultat d'anisotropie d'Auger

3 paramètres libres dans la définition de la corrélation



$\Delta\theta \leq 3.1°$

$z \leq 0.018$

$(D \leq 75$ Mpc$)$

$E \geq 56$ EeV

$\neq$ déflexion des RC

$\neq$ horizon vrai

$\neq$ E_{min} (anisotropie)

Significance du résultat d'anisotropie

pas une résultat sur les AGN !

- Véron-Cetty / Véron, 12th Edition, 2006

  "This catalogue should not be used for any statistical analysis as it is not complete in any sense, except that it is, we hope, a complete survey of the literature."

Significance du résultat d'anisotropie

pas une résultat sur les AGN !

- **1st step**: search between HECR arrival directions and various source catalogues (hard to estimate how many, how intensively, etc.)

(data from 2004/01/01 to 2006/05/26)

- A very large "raw significance" was found with the 12th VCV catalogue of AGNs
  - Even after taking into account generous penalty factors for a posteriori searches and scanning of parameter space

→ Did not seem to be fluctuation

→ Auger collaboration set up a prescription for future data

- Most significant *a posteriori* "correlation signal":

12 out of 15 events above "56 EeV" are closer than 3.1° from an AGN in 12th VCV with $z \leq 0.018$ ($D \leq 75$ Mpc)

3.2 expected from isotropic distribution

Significance du résultat d'anisotropie

pas une résultat sur les AGN !

- **2nd step**: predefine a region in the sky where there seems to be an excess of CR flux, and see if the next highest energy cosmic rays come from this region

21% chance from isotropic distribution

→
  - Independent data set
  - prescribed parameters
  - unambiguous significance (Confidence Level)

- **Result**: 99% CL that the excess we had seen in the original data set was not a random fluctuation from an otherwise isotropic cosmic ray distribution

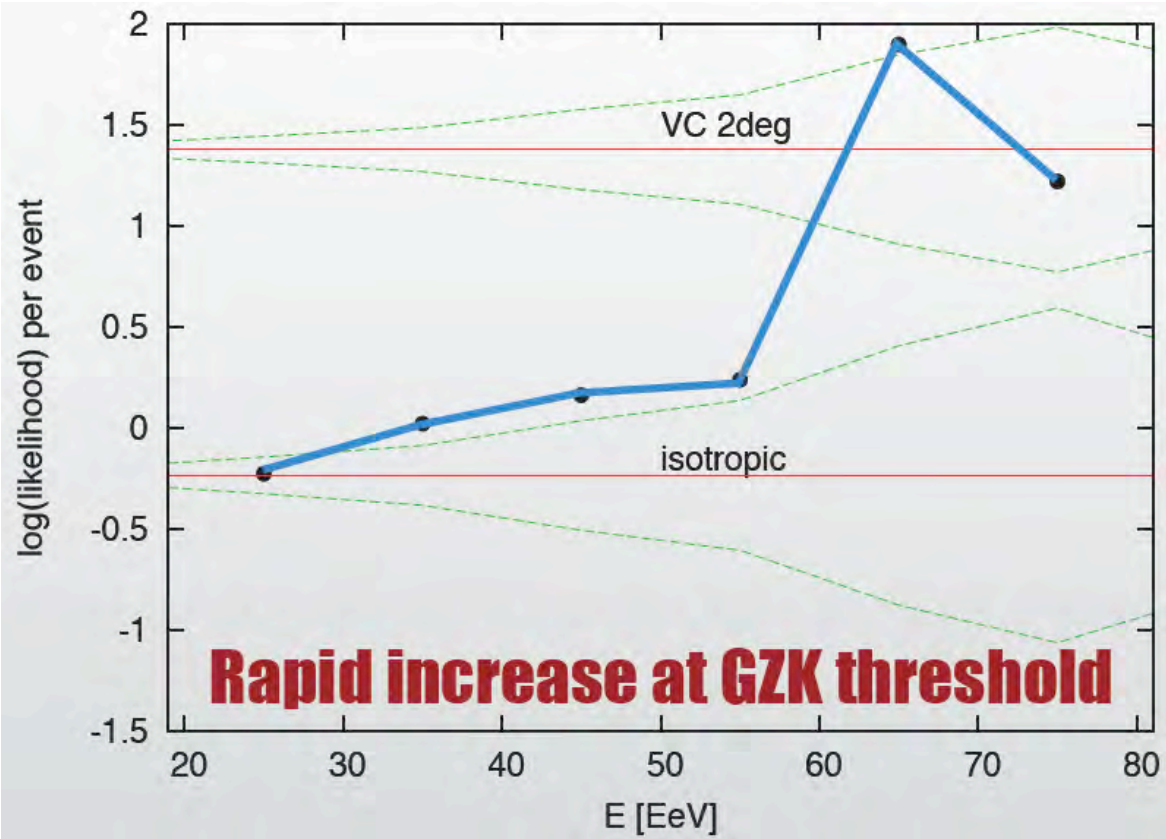
8 "correlating events" out of 13 (2.7 expected)

→ "CR distribution is not isotropic at the highest energies!"

corroborated by other analyses, independent of any source catalogue

Significance du résultat d'anisotropie

pas une résultat sur les AGN !



The energy above which the correlation is most significant corresponds to an energy where the CR flux drops… (supporting the GZK interpretation)

Implications astrophysiques ?

- Pas encore clair ! (très faible statistique et trop d'incertitudes pour vérifier les prédictions de tel ou tel modèle, qu'il soit naïf ou sophistiqué)
- Les RCUEs peuvent-ils venir des AGNs ? → OUI

  Mais on le savait déjà !
- Les RCUEs doivent-ils venir des AGNs? → NON !
- NB: aucune déclaration de la part d'Auger!

Résumé des résultats d'Auger

composition

des noyaux,
pas de photons
ni de neutrinos

accord avec les attentes astrophysiques

implications pour la **transition** gal./extragal. ?

Unité de la science des RC + sources à basse E?

Rend l'étude des RCHE encore **plus riche** !

spectre E

cheville +
coupure GZK

Excellente nouvelle !
prédction 40 ans !

⇒ sources proches
⇒ « astronomie RC »!
+ sources isolées !

+ physique à haute énergie
étude des gerbes (muons, modèles hadroniques…)

cf. genou + **LHC** !

directions

ciel anisotrope

Un des résultats les plus importants depuis 100 ans !

⇒ une forme de "astronomie RC" est possible (vient de débuter !)

⇒ intégrer les RC au *corpus* de l'astrophysique !

Rayons cosmiques, année zéro !

- **Question** (vieille d'un demi siècle): peut-on faire de l'astronomie avec les rayons cosmiques ?
- **Réponse** (vieille d'un an): **oui !**

- Ouverture historique de l'astronomie non-photonique !
  - À portée d'expérience : identification et étude des sources individuelles
  - Nécessité d'augmenter la puissance de collection des RCUE

⟹ Au sol ? (Auger Nord à Lamar, Colorado)

⟹ Détection depuis l'espace (JEM-EUSO, S-EUSO…)

Les sources sont là : allons les chercher !

- Nombreuses questions
  - sources, origine des RC, mécanismes d'accélération, physique des sources de haute énergie dans l'univers, lien avec les RC de basse énergie et l'écologie galactique
  - Étude de la physique à haute énergie (résultats du LHC très attendus !)

Auger Sud ne suffira pas !

- Étudier les sources individuellement !
- 1 particule/km^2/siècle sur l'ensemble du ciel

S'il y a ~10 sources principales, on a ~ 1 particule/km^2/millénaire !

⟹ détecteur ~10 fois plus grand

Auger Nord

⇓

voie naturelle

Auger sud en plus grand
4 400 cuves, 21 000 km^2

dernière étape au sol

JEM-EUSO

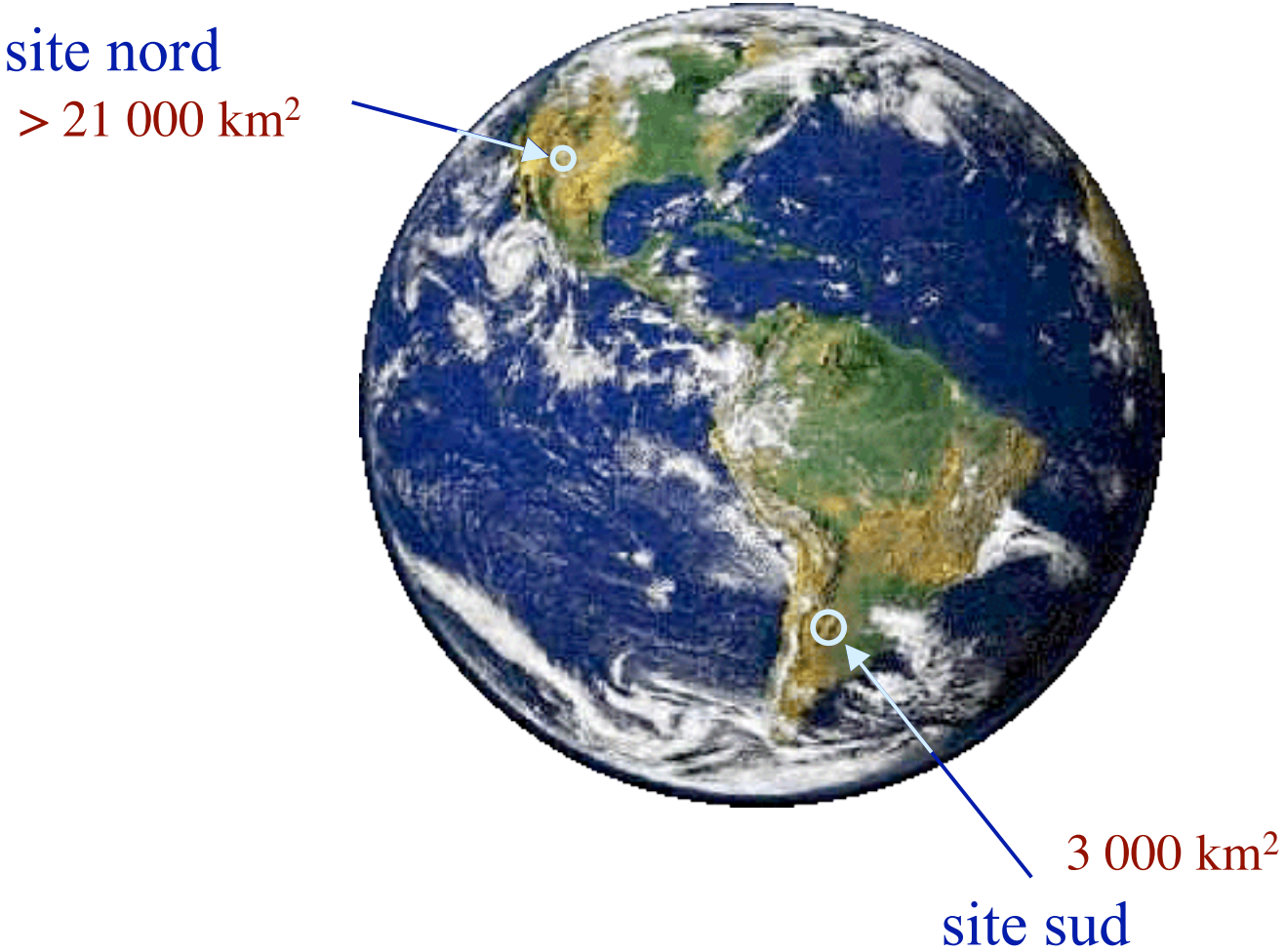
⇓

voie exploratoire

Observatoire des gerbes depuis l'espace
190 000 km^2 (mais slmt 20% du temps)

première étape dans l'espace

L'Observatoire Pierre Auger



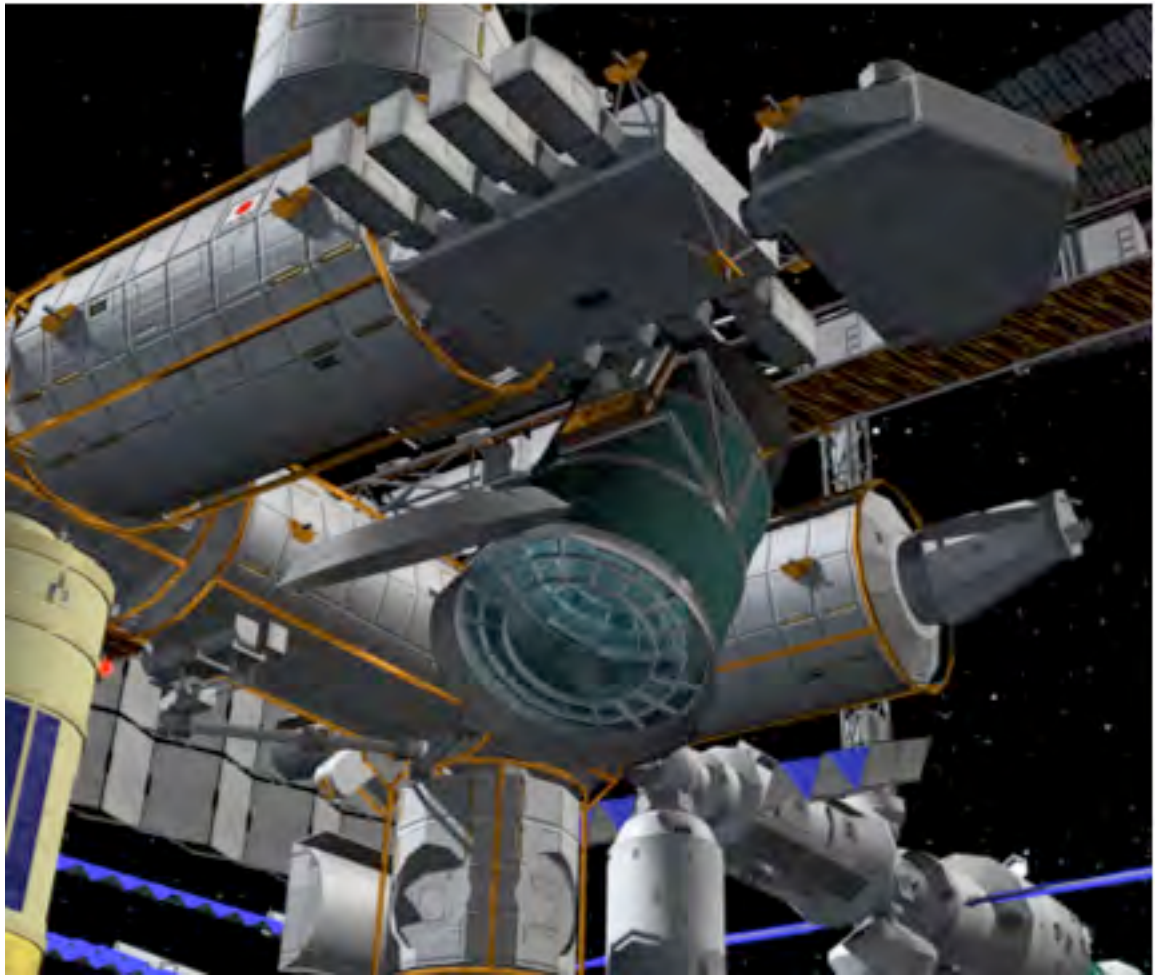
Auger Nord

Bientôt 4400 cuves sur 20 700 km^2…

JEM-EUSO
(Extreme Universe Space Observatory)

JEM-EUSO (lancement prévu en 2013)

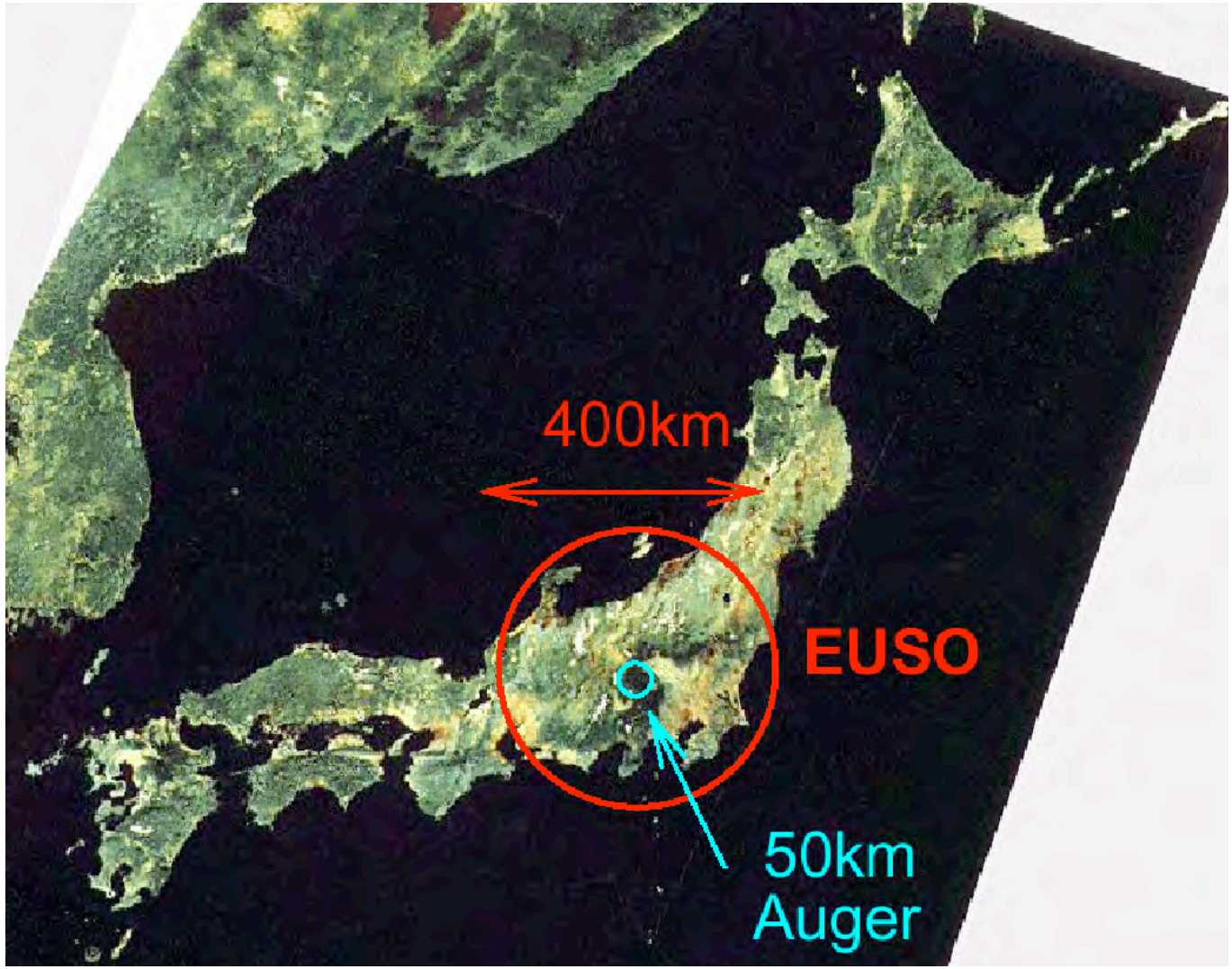
(Japanese Experiment Module)



Sur le module japonais de la station spatiale internationale…

JEM-EUSO

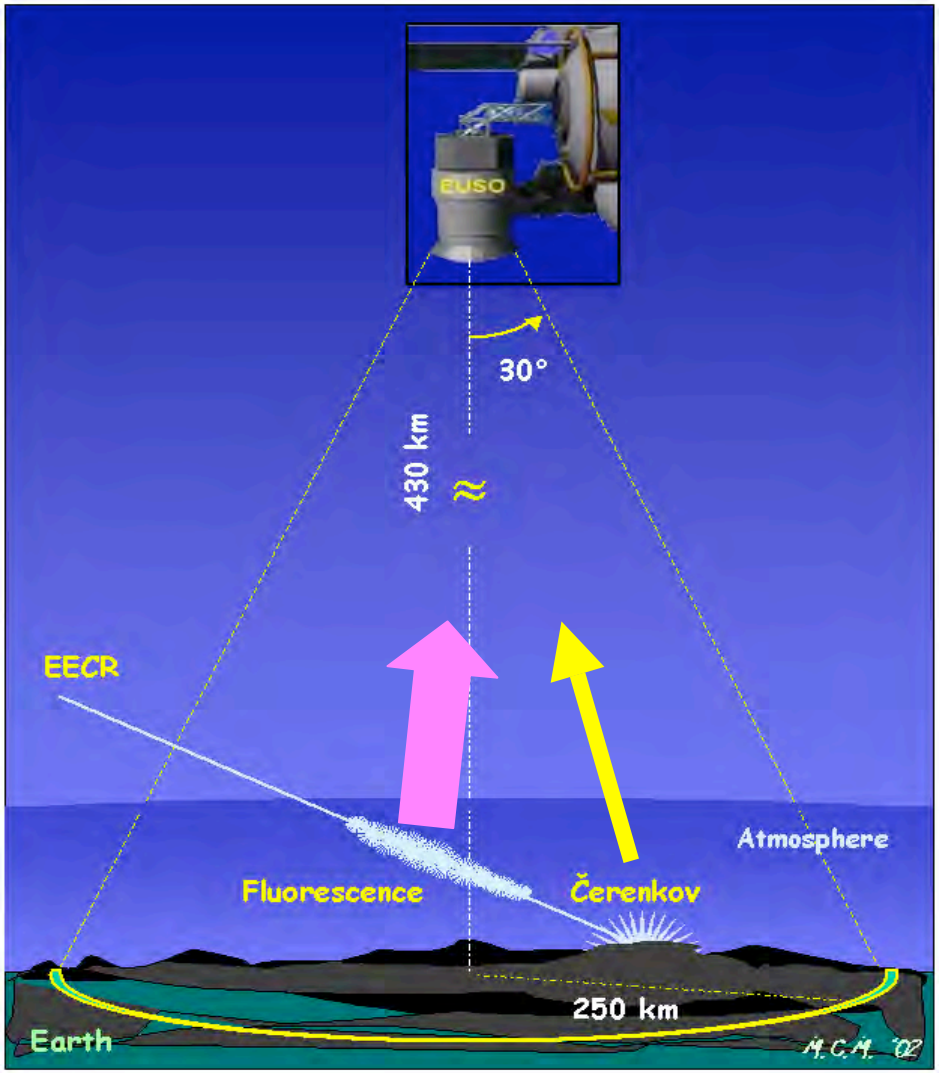
(Extreme Universe Space Observatory)



Détection de la fluorescence des gerbes depuis l'espace

Volume de détection considérable !

190 000 km^2



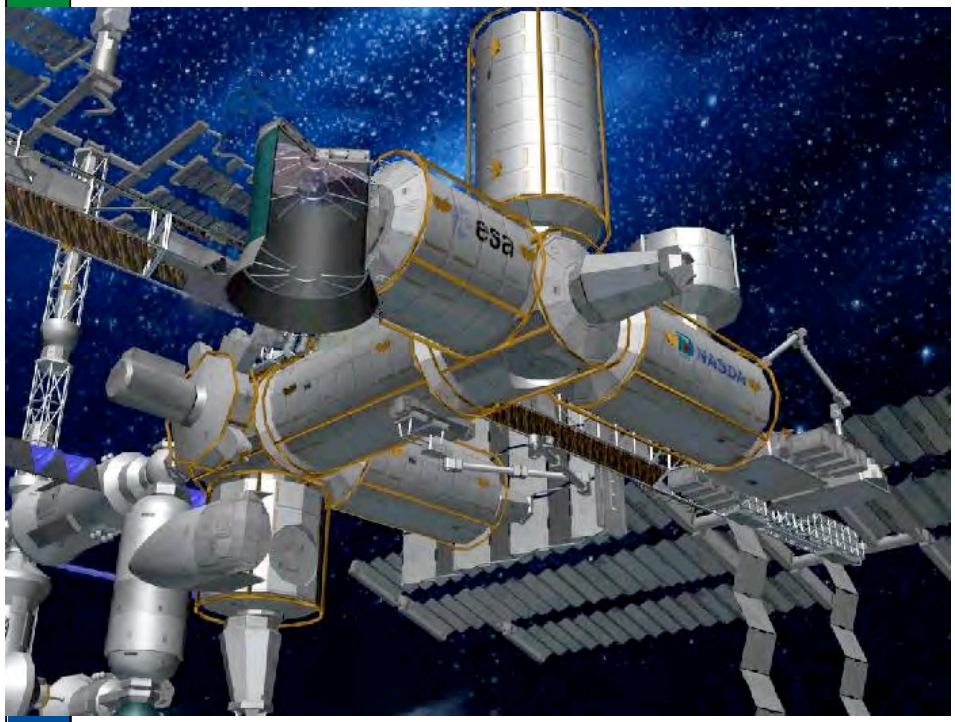
Ne fonctionne que les nuits sans Lune…

20% de cycle utile

NUV Fluorescence 300 - 400 nm (+ Cherenkov)

JEM-EUSO sur l'ISS

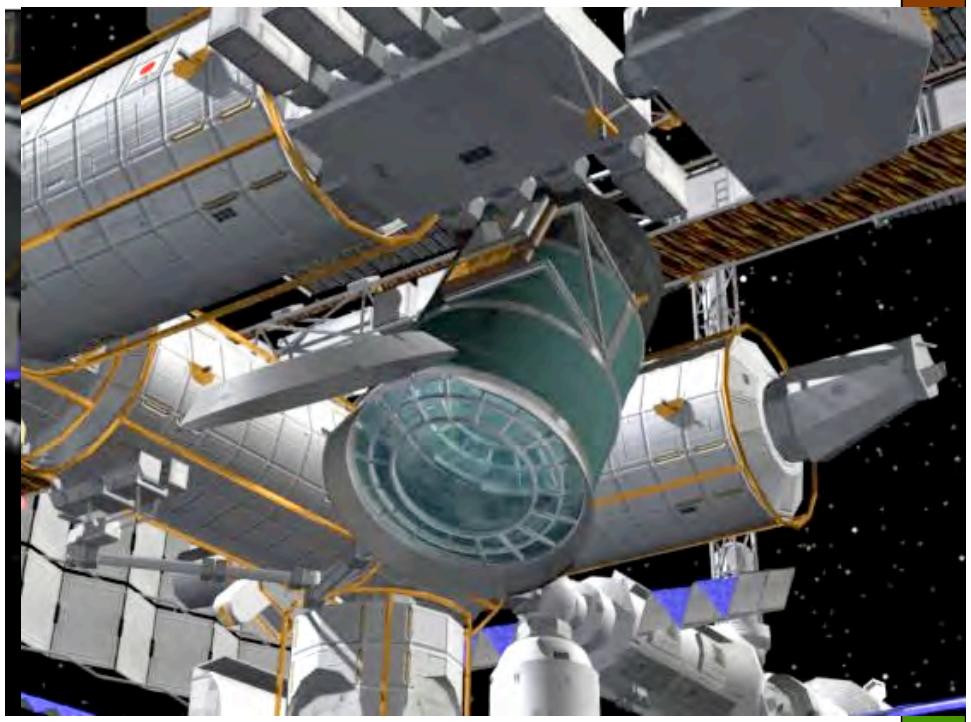
« mode nadir » (2 ans)



Surface de détection nominale

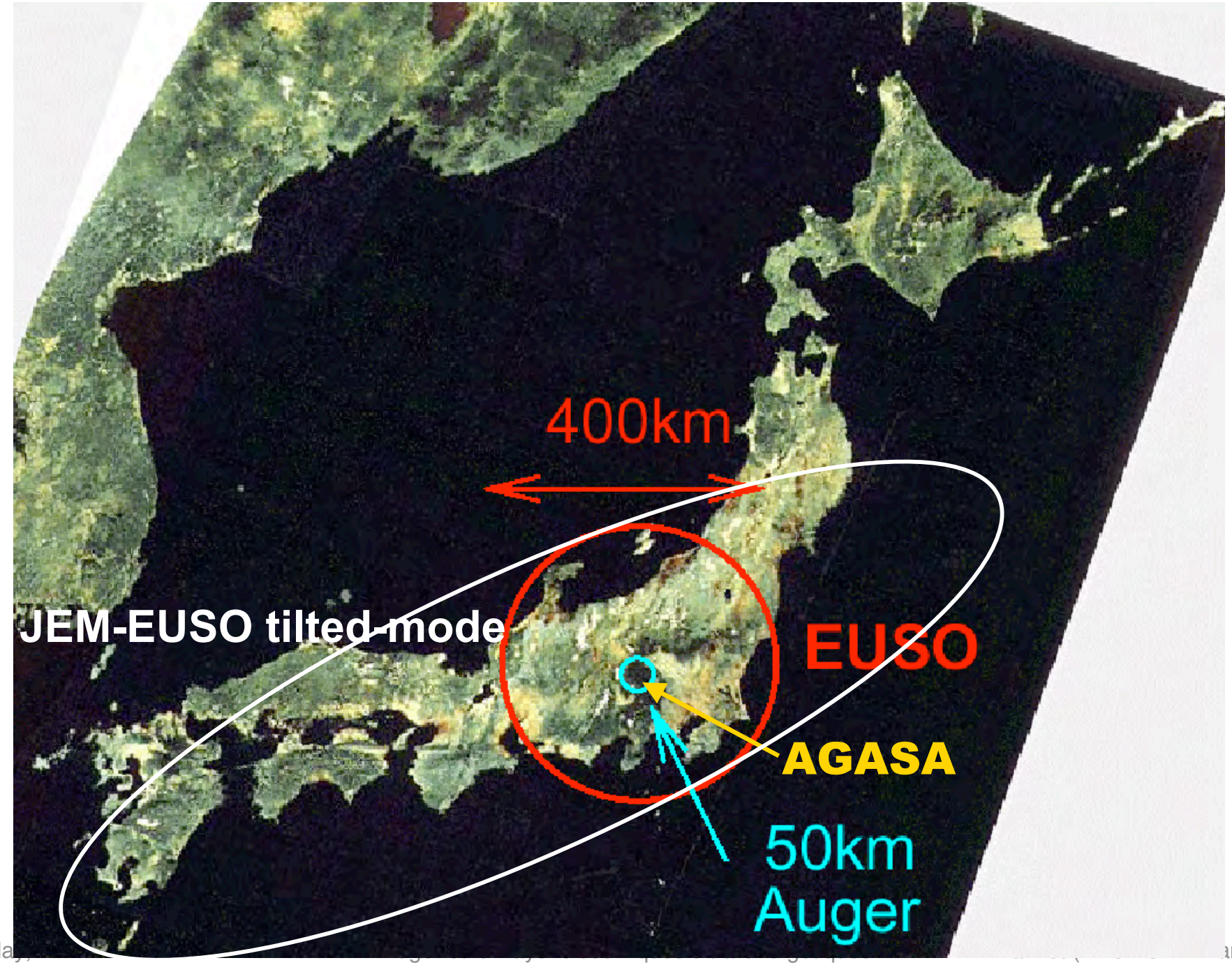
énergie seuil suffisamment basse

« mode tilté » (3 ans)

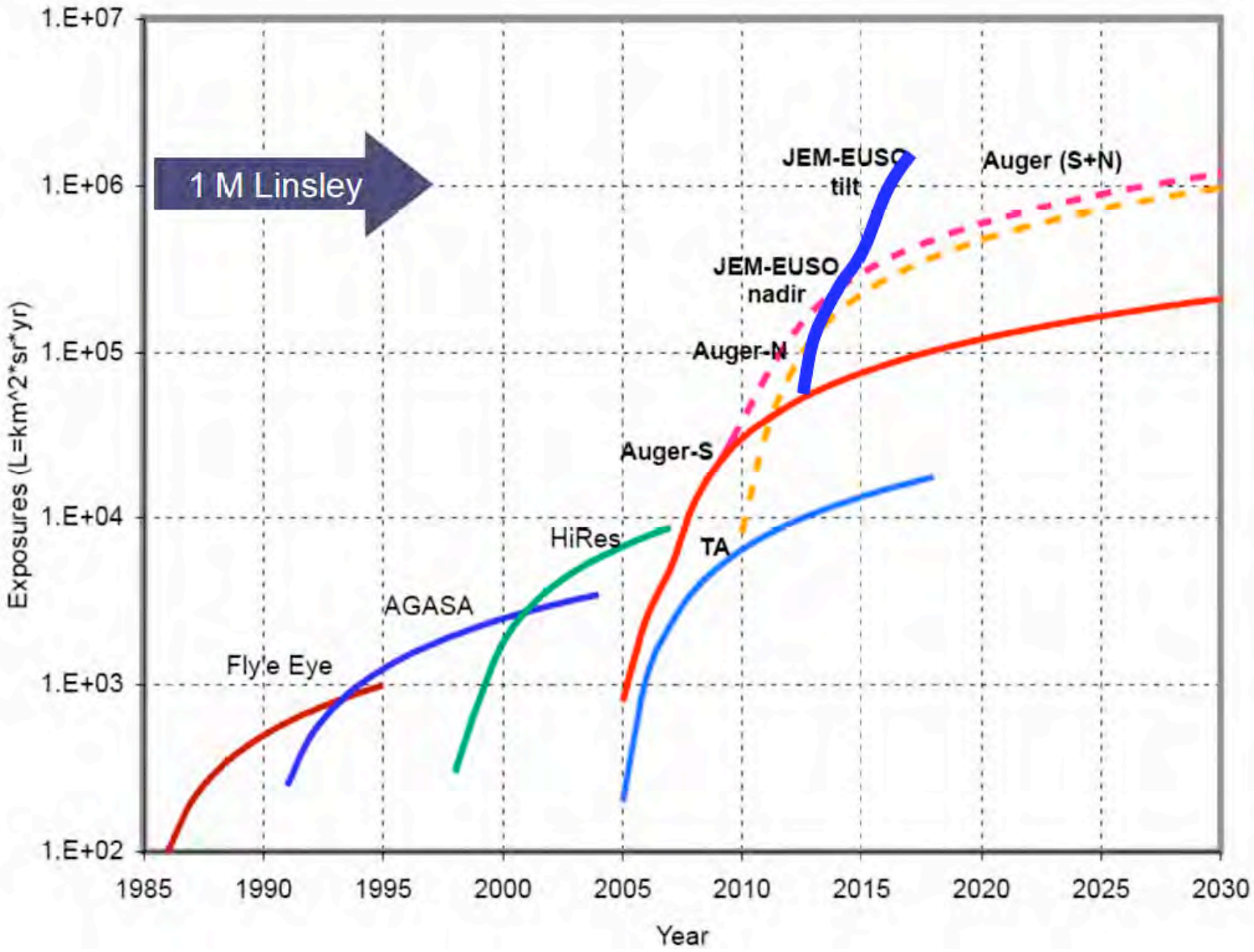


Surface de détection accrue

énergie seuil plus élevée


400km
JEM-EUSO tilted-mode
EUSO
AGASA
50km
Auger

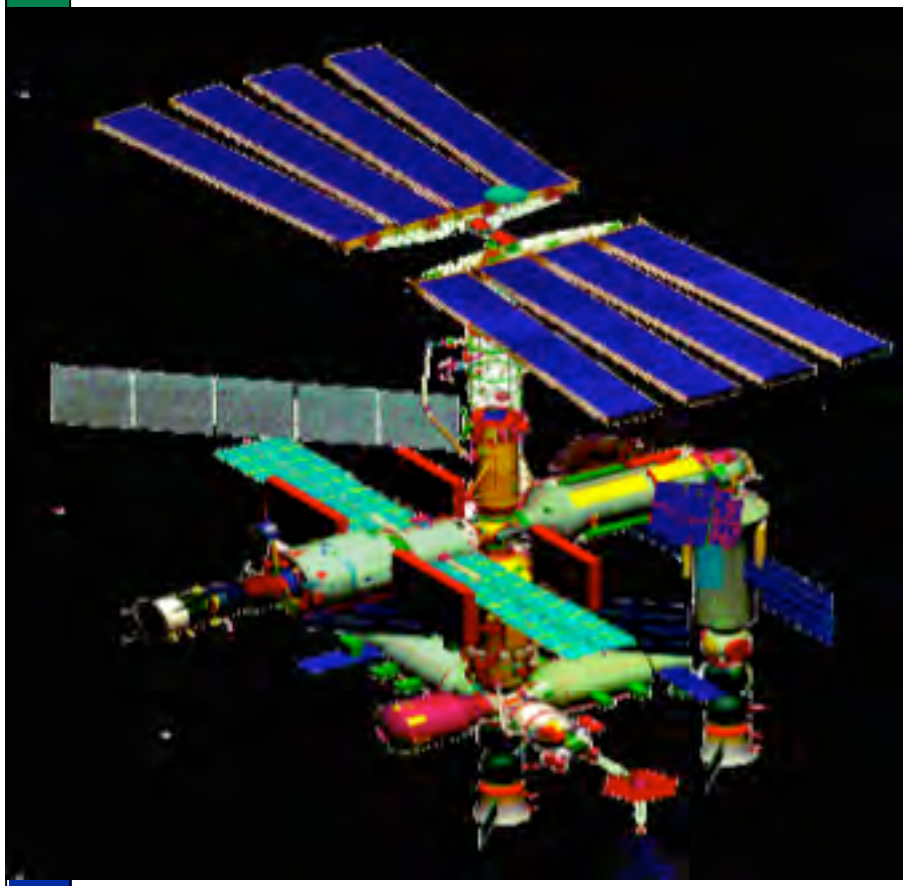
Évolution de l'acceptance des détecteurs

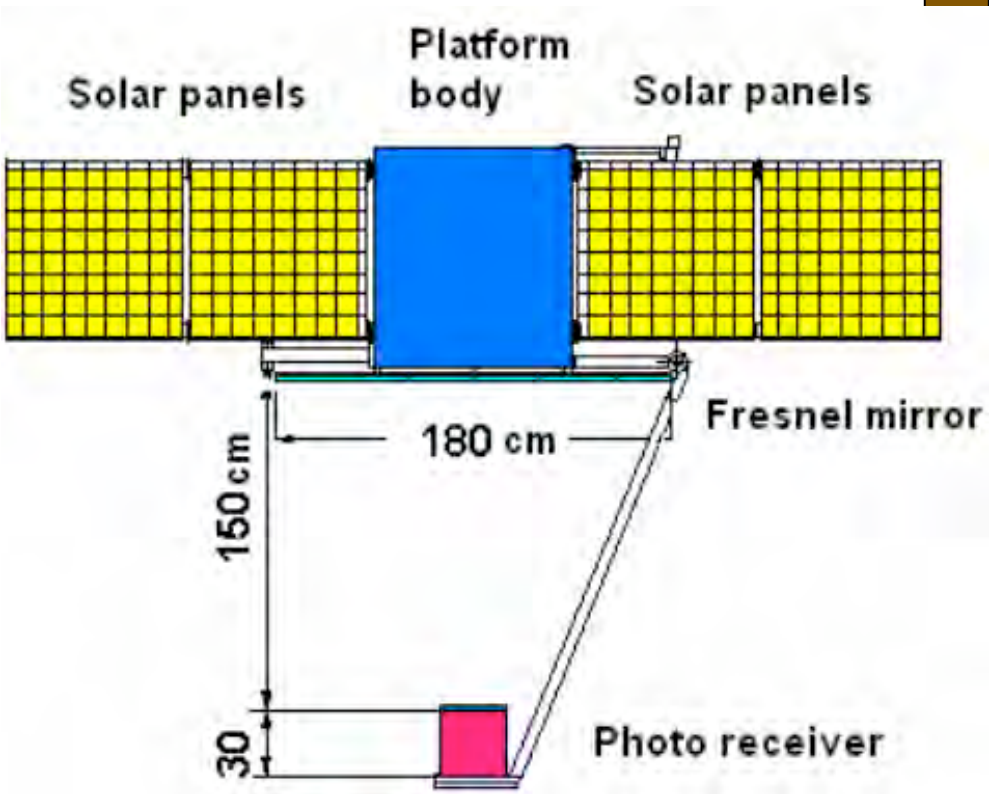


NB: synergie avec TUS et S-EUSO…

- Les russes ont leur programme et participent à JEM-EUSO

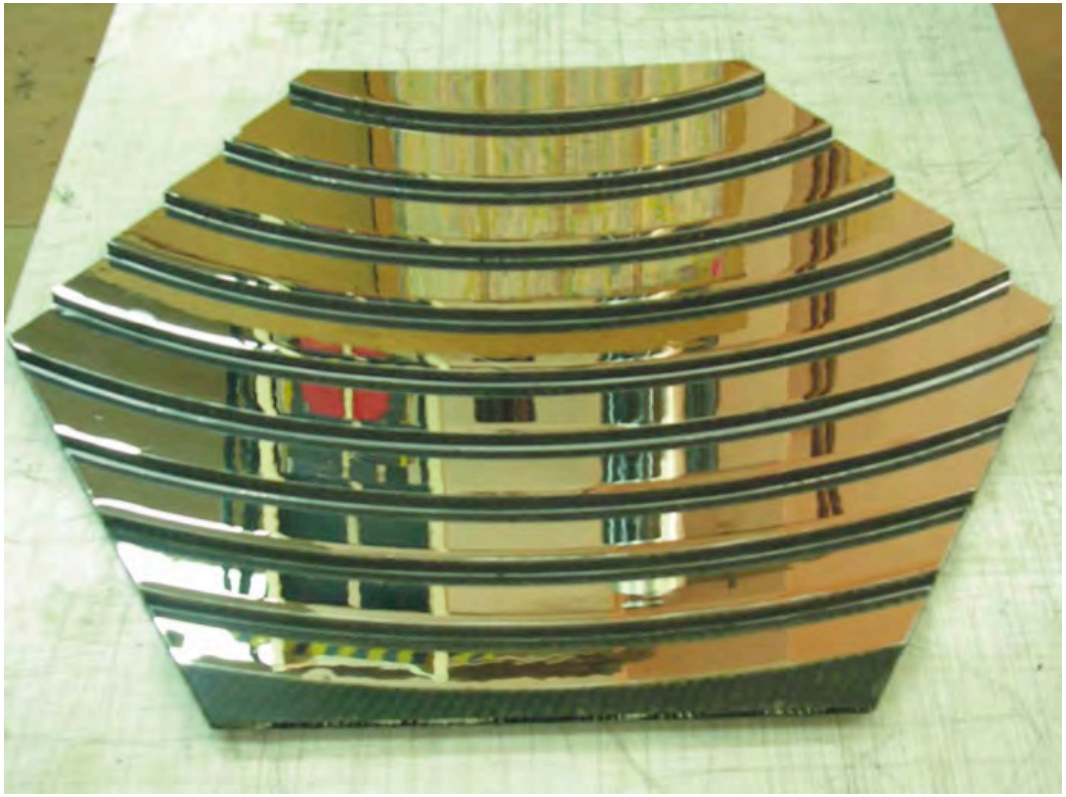
TUS: lancement 2010



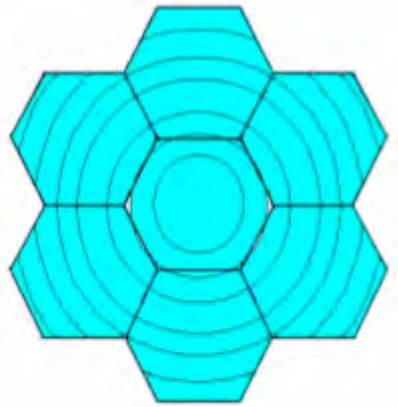


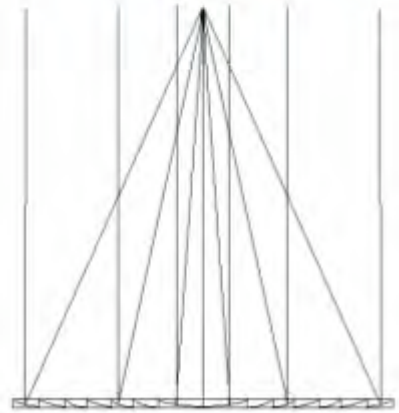
NB: synergie avec TUS et S-EUSO…

- Les russes ont leur programme et participent à JEM-EUSO



Miroir de Fresnel

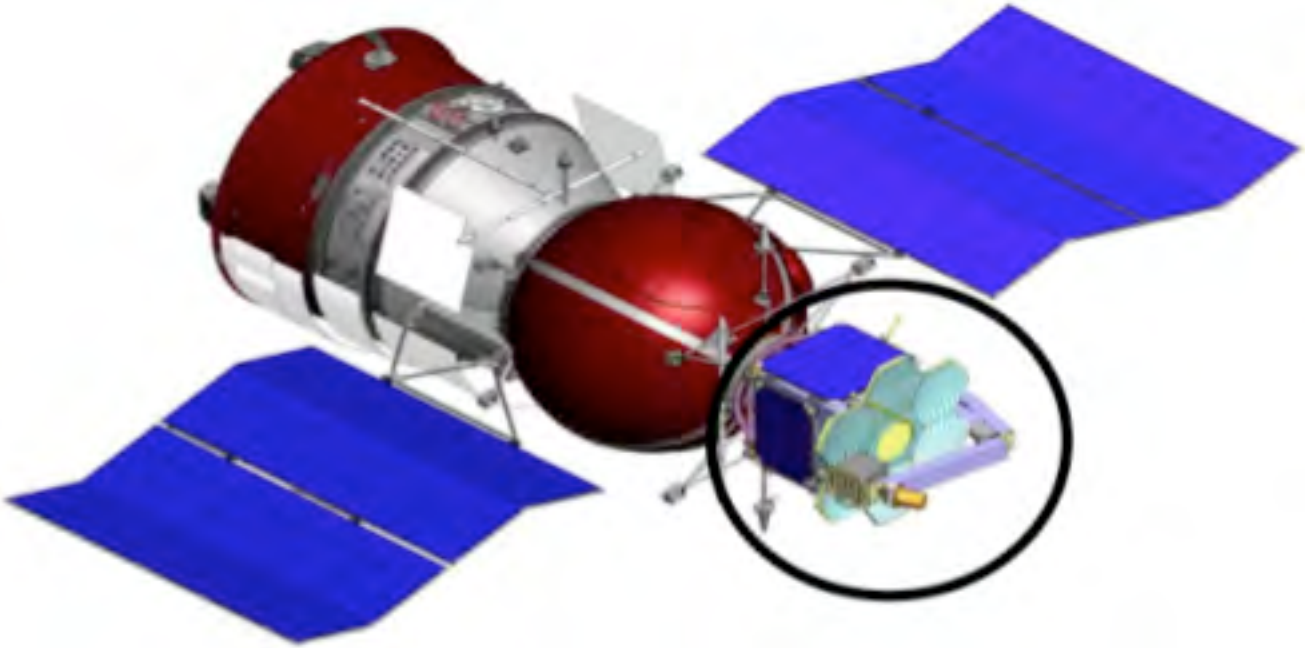




NB: synergie avec TUS et S-EUSO…

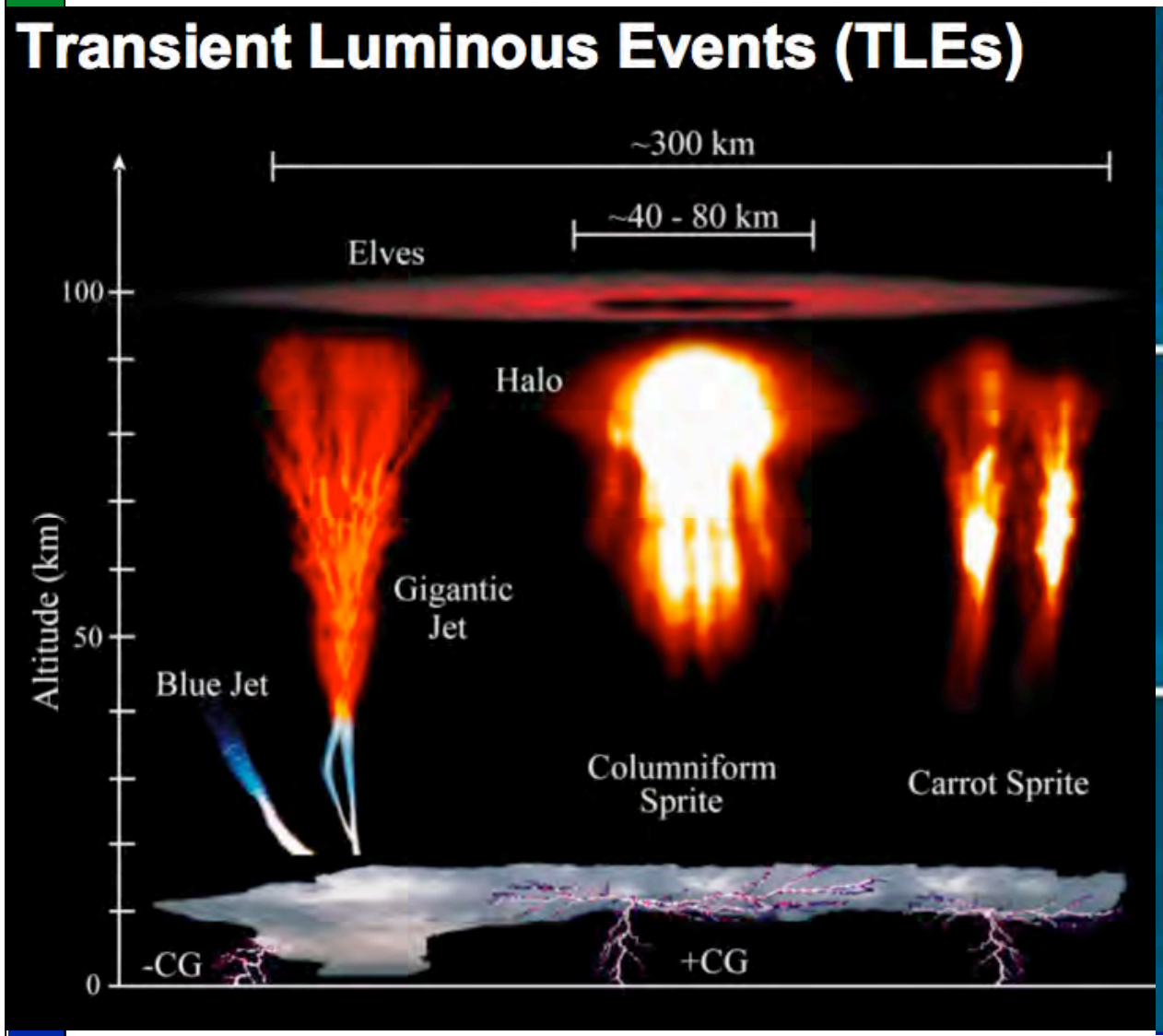
- Les russes ont leur programme et participent à JEM-EUSO

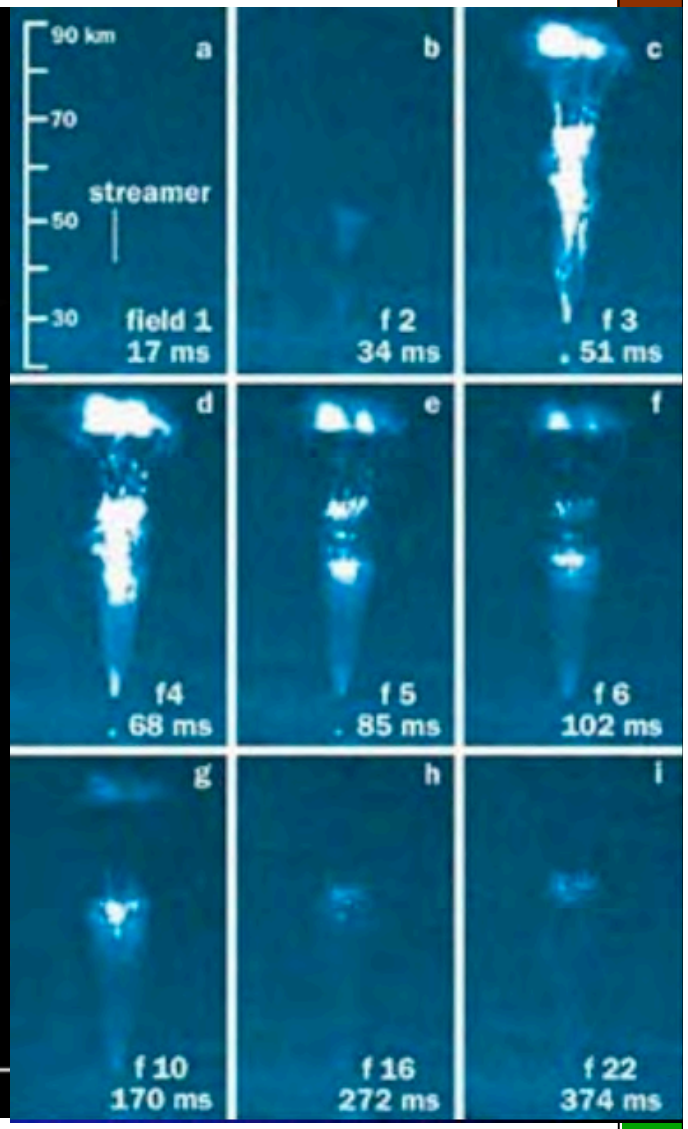
KLYPVE : free-flyer…



cf. S-EUSO (ESA cosmic vision)

Phénomènes ionosphériques





À suivre…