

**Quatres années de données
avec l'observatoire Auger:**

**qu'avons nous appris sur les
rayons cosmiques ?**

Premières conclusions et perspectives pour l'avenir du domaine

Anne Lemière
Collaboration Auger
Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

II ème Ecole de Physique des Astroparticules
OHP, St Michel l'Observatoire — 7-12 septembre 2009

Cours en 2 parties et en 3 sceans

PARTIE I : Introduction aux UHECRs et aux techniques de détection

Cours I

PARTIE II : AUGER: résultats expérimentaux et implications

Cours II --- Spectre et Composition

Cours III --- Anisotropie des directions d'arrivée

Partie I

Introduction aux rayons cosmiques d'ultra haute énergie et aux techniques de détection

A) Introduction aux UHECRs

- 1) Bref rappel historique
- 2) Production & accélération
- 3) Transport

B) Techniques de détection

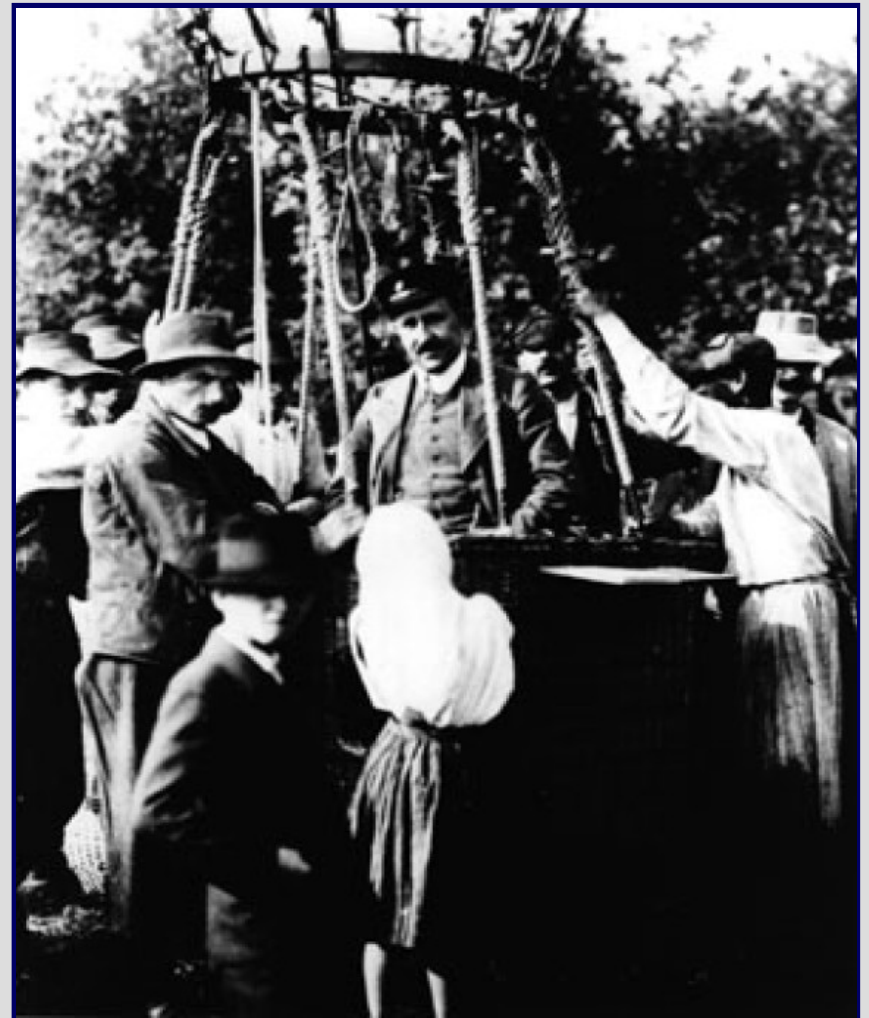
- 1) Phénoménologie des gerbes
- 2) Fluorescence
- 3) émission Cerenkov
- 4) AUGER: un détecteur hybride

Découverte des rayons cosmiques

1912 et 1913 : Hess et Kolhörster mesurent lors de vols en ballon le taux d'ionisation de l'atmosphère en fonction de l'altitude -> 10000 m

Le taux d'ionisation moyen augmente avec l'altitude

→ La source d'ionisation doit être au delà de l'atmosphère terrestre!



Altitude variation of ionisation detected by Hess and Kohlhoster and Pfozter

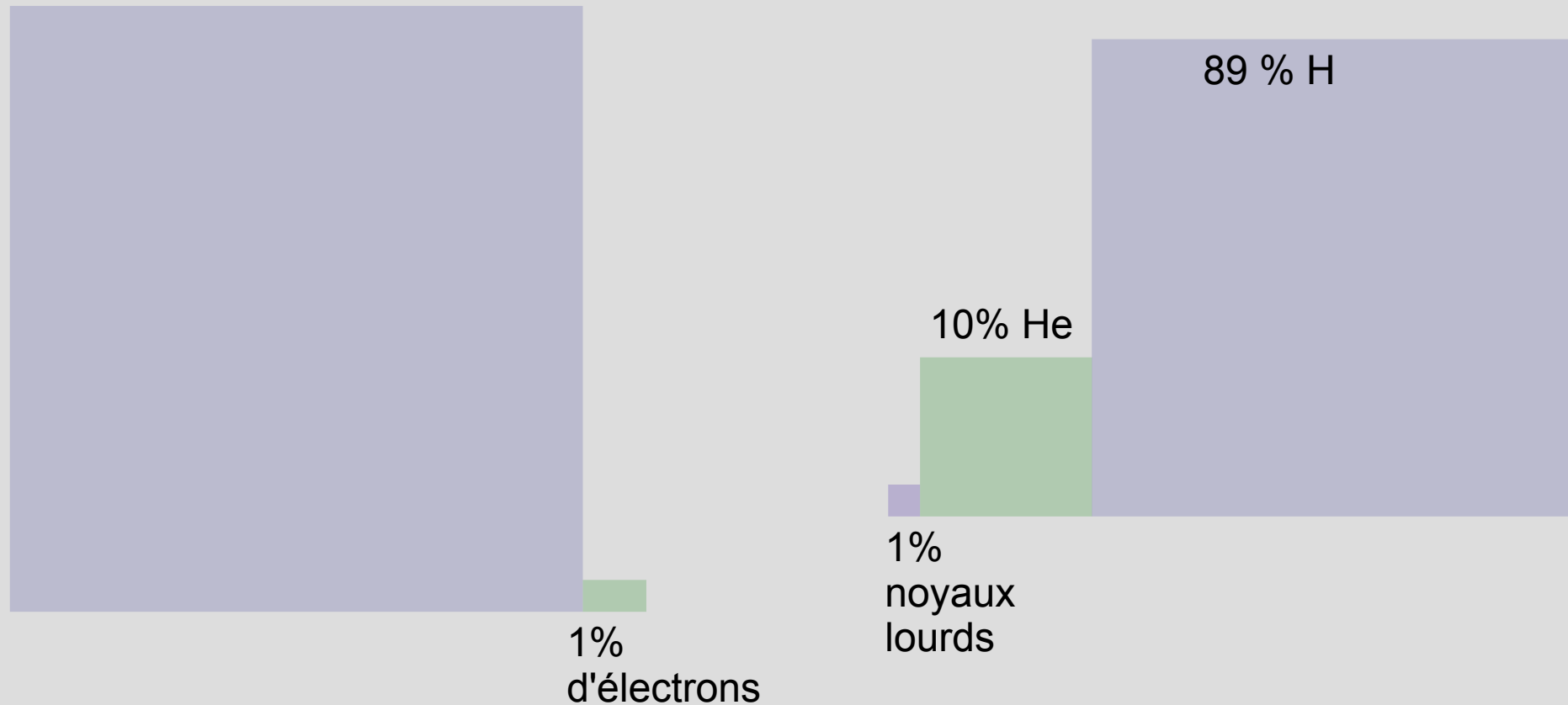
Le rayonnement comique

Mesuré depuis un siècle mais encore beaucoup de questions ouvertes

- Source du rayonnement dans la galaxie
 - Accélération
 - Processus d'injection
 - Propagation dans la galaxie
- Transition galactique-extragalactique
- Source(s) extragalactique d'UHECRs
- Coupure GZK

Composition des rayons cosmiques

99% de noyaux → chargés

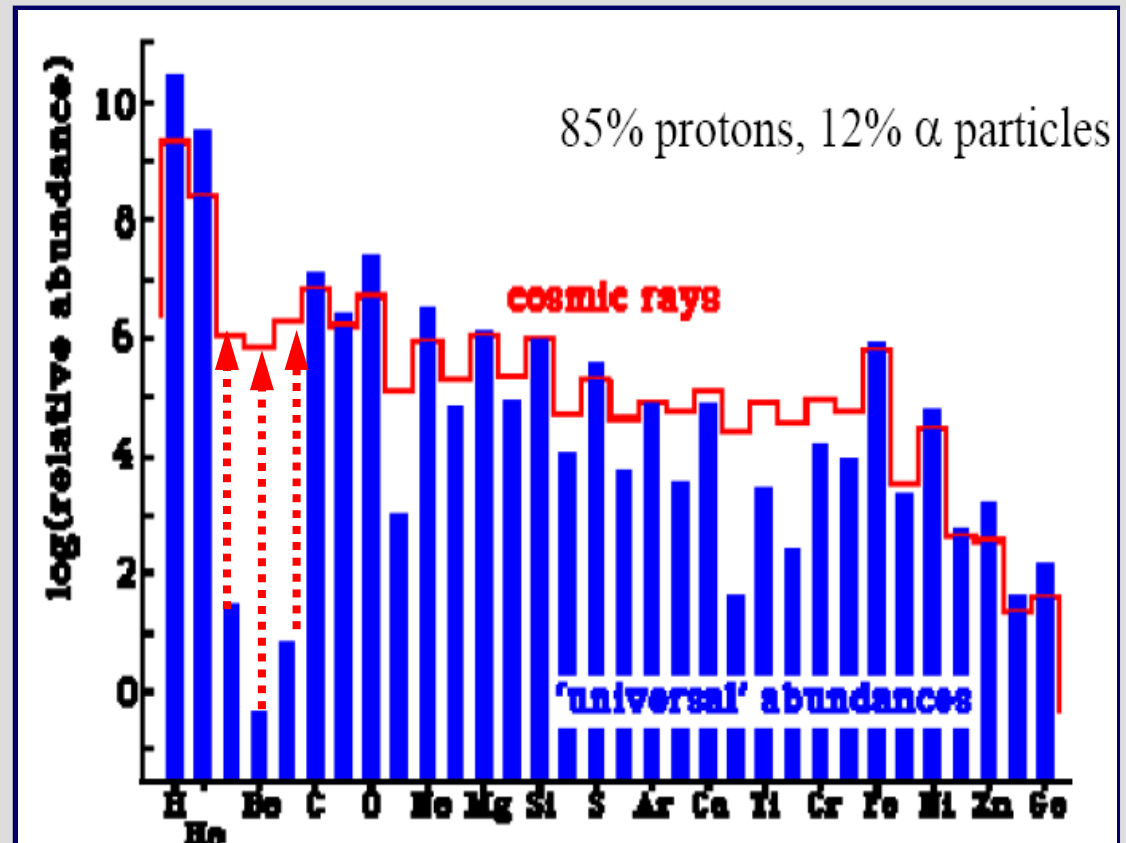


Abondances des espèces

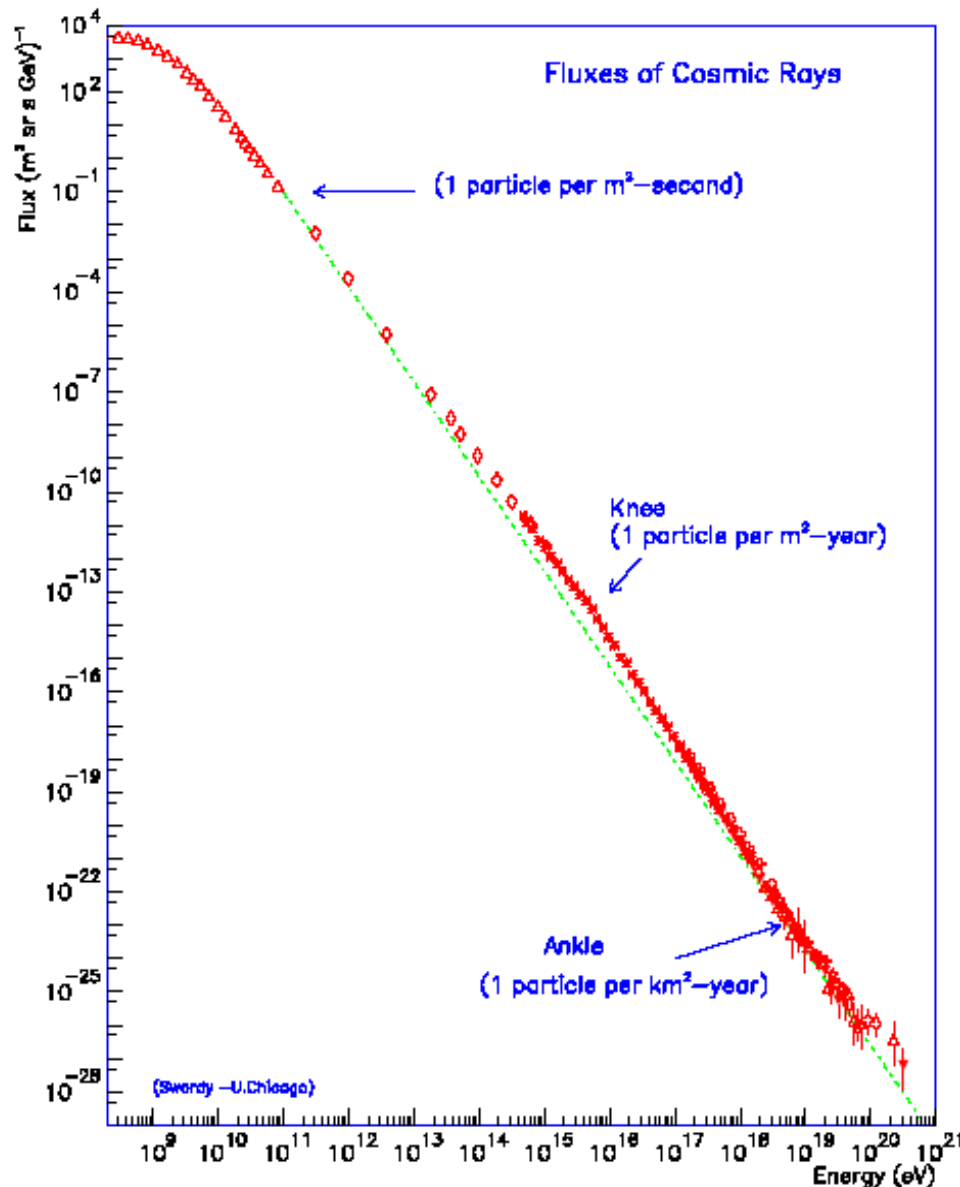
Li, Be, B ainsi que ,
Sc, Ti, V, Cr, Mn sont bcp plus
abondants dans les RC

Eléments absents de la
nucléosynthèse stellaire..

Produits de spallation de
noyaux abondants tels que
C, O ainsi que Fe



Un spectre d'une extraordinaire régularité

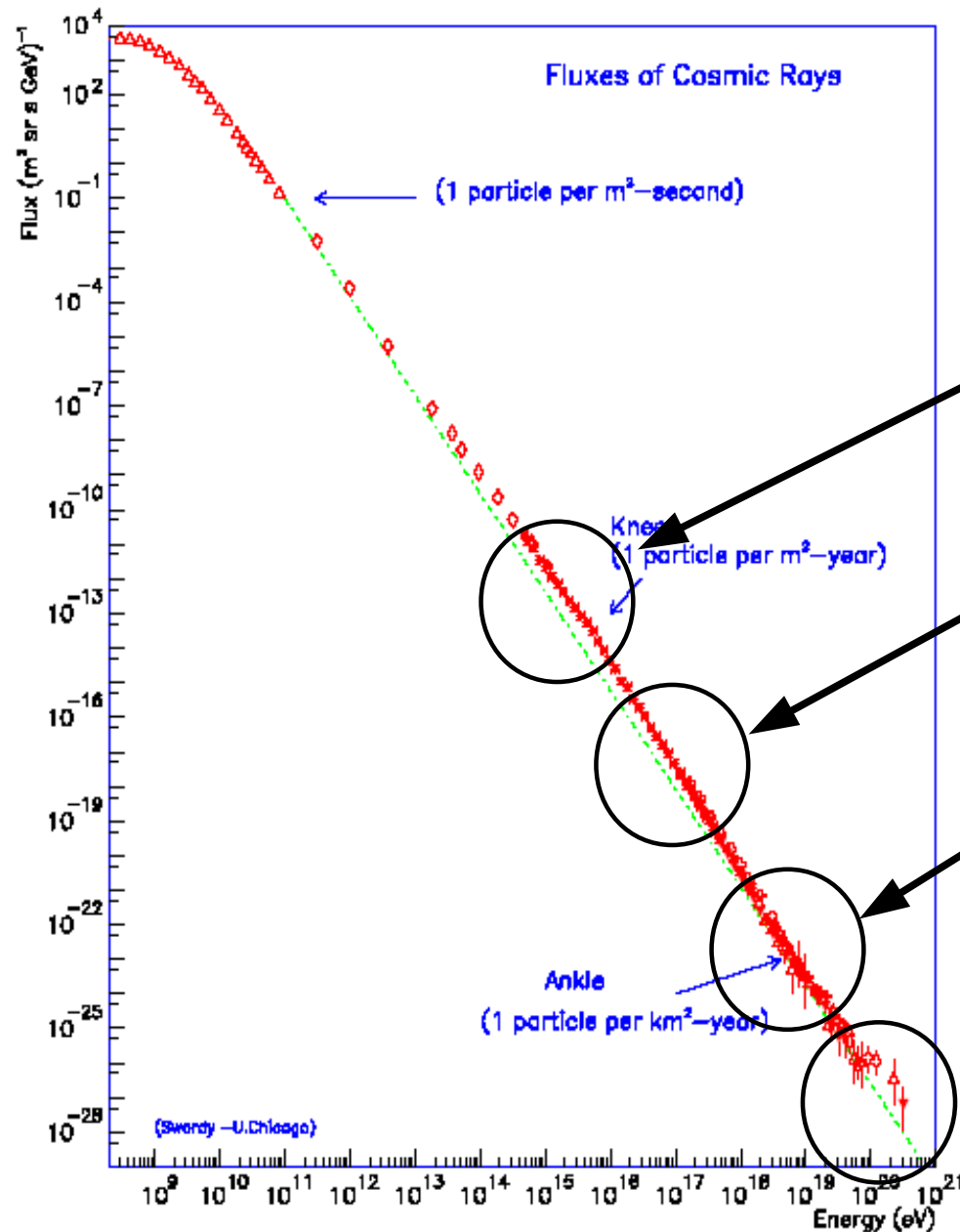


12 ordres de grandeur en énergie

32 ordres de grandeur en flux

UHECRs : $E > 1 \text{ EeV}$ (10^{18} eV)

Un spectre pas si parfait



Genou $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ eV}$

2ème genou $\sim 3 \cdot 10^{17}$

Cheville $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

GZK $> \sim 8 \cdot 10^{19} \text{ eV}$

Spectre en énergie

- Spectre différentiel
- Flux
- Forme du spectre : lois de puissance
 - indices
 - coupures spectrales
- pas d'information temporelle
- spectre total sur le ciel

Composition

- Observables de gerbes atmosphériques :
 - Au spectre de masses
 - Etude statistique
 - Au type de particule
 - photon
 - neutrinos
- Lié aux modèles d'interaction hadroniques

Spectre angulaire

- Directions d'arrivée des événements individuels
- Anisotropie petite échelle
 - recherche de sources haute énergie
- Anisotropie grande échelle
 - variation de la densité des Rcs:

Sources

- Objet(s) astrophysique(s)
- Injection
- Composition à l'injection
- Processus d'accélération
- Environnement des sources
 - Spectre à la source
 - Composition à la source
- Nombre de sources
- Distribution des sources

- Input physique des particules
- Sections efficaces d'interactions
- EM, rayonnement des particules
- Physique des gerbes

Propagation

- Champs B
- Galactique/ExtraGalactique
 - Cohérent / Turbulent
- Champs de photons
- CIB: fond diffus infrarouge
- CRB : fond diffus radio
- CMB
- Distribution de matière dans l'ISM

Sources

Objet(s) astrophysique(s)

Injection

Composition à l'injection

Processus d'accélération

Environnement des sources

→ Spectre à la source

→ Composition à la source

Nombre de sources

Distribution des sources

Propagation

Champs B

Galactique/ExtraGalactique

Cohérent / Turbulent

Champs de photons

CIB: fond diffus infrarouge

CRB : fond diffus radio

CMB

Distribution de matière dans
l'ISM

Input physique
des particules

Sections efficaces
d'interactions

EM, rayonnement
des particules

Physique des
gerbes

Accélération

Mécanisme standard : DSAM (Diffuse Shock Acceleration Mechanism)

→ choc magnétisé en mouvement

Particule ultra-relativiste diffuse dans un milieu magnétisé traversé par un choc

Choc fort non relativiste : Fermi 1er Ordre
Loi de puissance ~ 2

Choc ultra-relativiste : Grand facteur de lorentz
Loi de puissance $\sim 2.6 - 2.7$
Jets d'AGN, GRB

Les Sources Astrophysiques

Diagramme de Hillas :

Accélération limitée par l'échappement
(condition pour confiner des particules de charge Z et d'énergie E)

borne supérieure sur E_{\max} :

$$r_L = E / (Z \cdot B) < L$$

rayon de Larmor

taille du site accélérateur

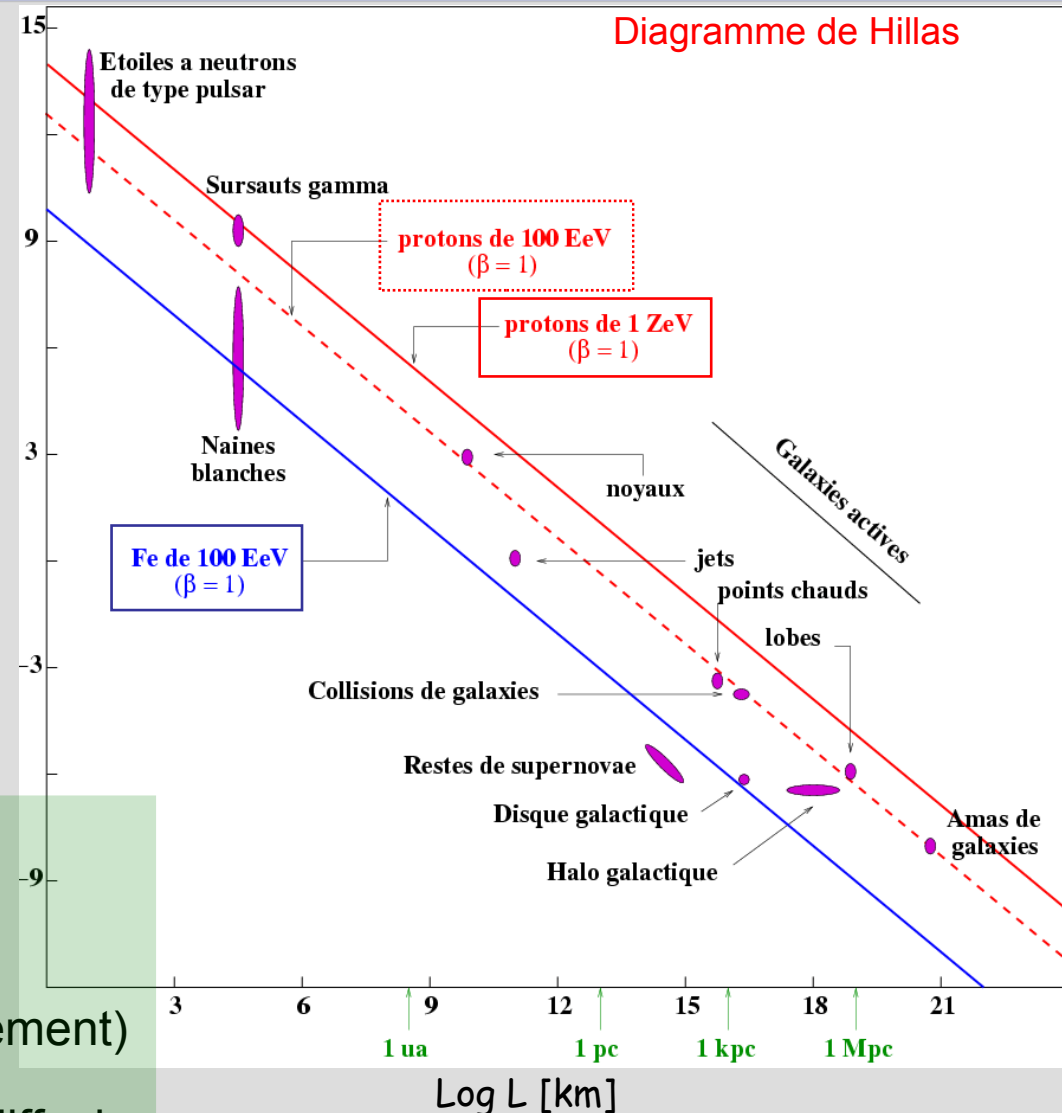
Log B [G]

A aussi prendre en compte :

t_{acc} : mécanisme d'accélération

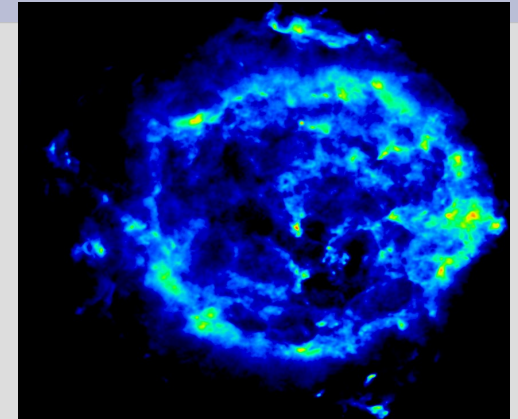
t_{loss} : pertes d'énergie (dépend de l'environnement)

t_{esc} : dépend du champ B, géométrie, coef diffusion

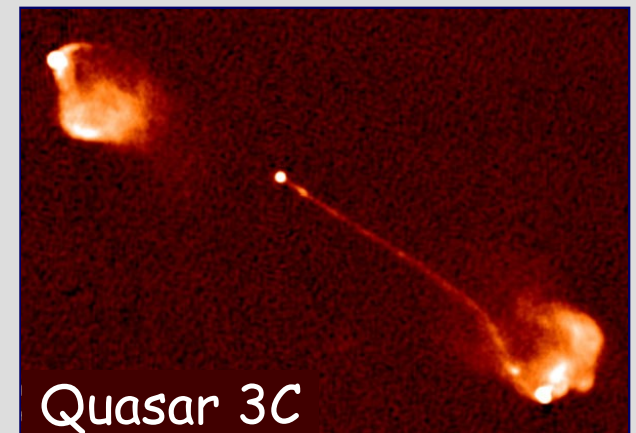


Sources Potentielles

- Accélération “de Fermi”
 - Chocs astrophysiques (magnétisés)
 - Difficile d’atteindre 10^{20} eV...
- Sources extragalactiques privilégiées pour les UHECRs:
 - AGN : jets, lobes
 - radio galaxies : lobes
 - GRB
- Sources “exotiques” → défavorisé par Auger
- **Densité des sources**
 - Paramètre mesurable (autocorrélation)
 - Exemples:
 - AGNs avec $L_x > 10^{43}$ erg/s:
 $n \sim (1-5) 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$
 - GRBs : distribution quasi-continue



Cassiopeia A;
VLA Radio Image



Quasar 3C

175
Noyaux actifs de galaxie

Transport

- * Interaction avec les gamma (CMB, IR, optiques)

- Nucleons, coupure GZK
- Photons

- * interaction des nucleons avec les noyaux : spallation

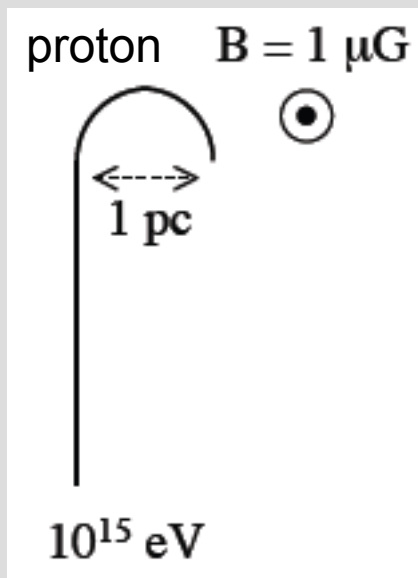
- * les champs magnetiques :

- developpement de cascades, rayonnement synchrotron des paires e^+e^-
- Deflection et retard des hadrons
- Galactiques : coherents / turbulents (diffusifs)
- Extragalactiques : coherents (faibles) / turbulents (diffusifs)

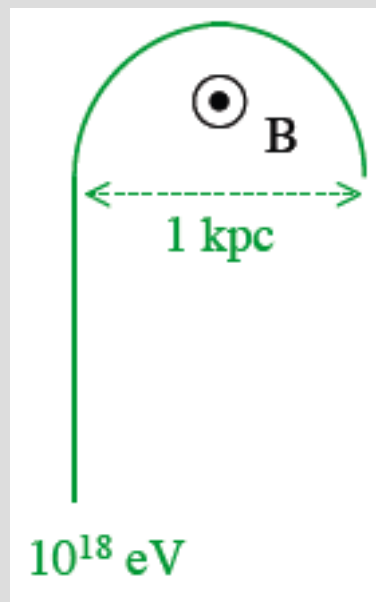
Propagation dans les champs magnétiques

Dans la galaxie ($B \sim 1 \mu\text{G}$)
 rayon de giration des particules
 Rayon de Larmor :

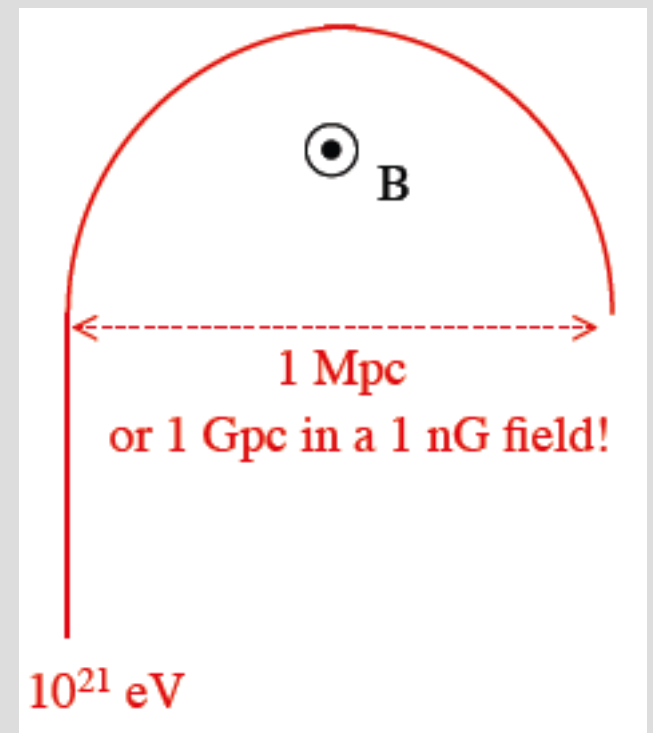
$$R_{\text{kpc}} = \frac{E_{\text{EeV}}}{Z \cdot B_{\text{G}}}$$



SNR



Disque +halo Galactique



>> galaxie

Champs magnétique Galactique

Mesures nombreuses : $B \sim 2-10$ G

Composante régulière

- Correlée avec Les bras spiraux (voie lactee: difficile, position interne du syst solaire)
- Associé au halo galactique (émission radio observées)

+
Amplitudes
Comparables

Composante turbulente

- Dépend des propriétés locales de la Galaxie (vents stellaires / explosion de SN)

Effet sur la distribution angulaire des UHECRs d'origine extragalactique

Composante turbulente :

Déflexions faibles
→ Négligeable

Composante régulière :

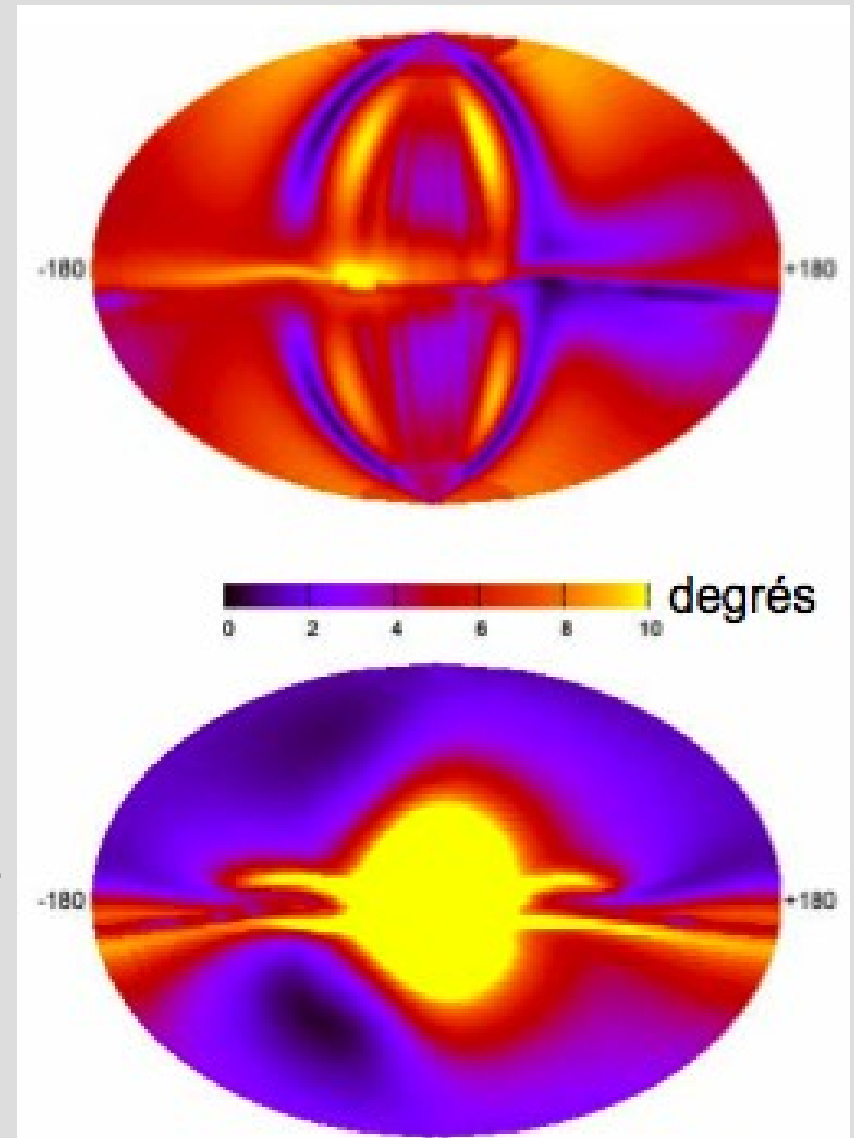
Déflexions importantes → plusieurs degrés

→ non négligeable

Dépend du modèle adopté :

Déviation à des échelles de 10° à $E = 10^{19}$ eV.

Cartes de déflexion pour deux
modèles du champ B Galactique
($E = 4 \cdot 10^{19}$ eV)



Champ magnétique Extra-Galactique

- Difficiles à mesurer
- 2 types de mesures :

- Champs observés dans les amas de Galaxies
~0.1 – qq G
Mesure : emission synchrotron, rotation faraday

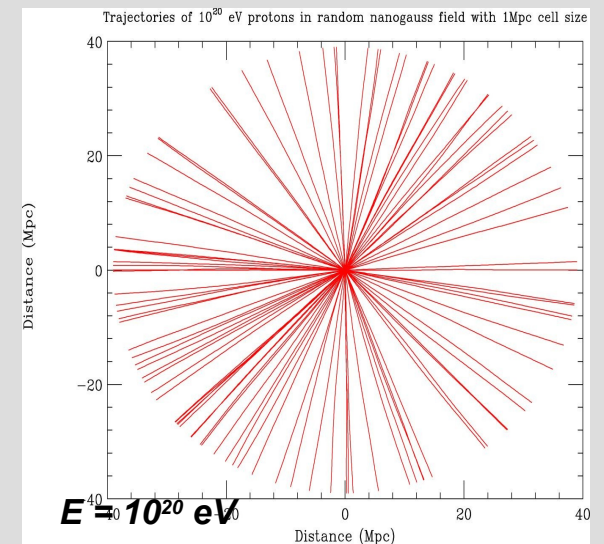
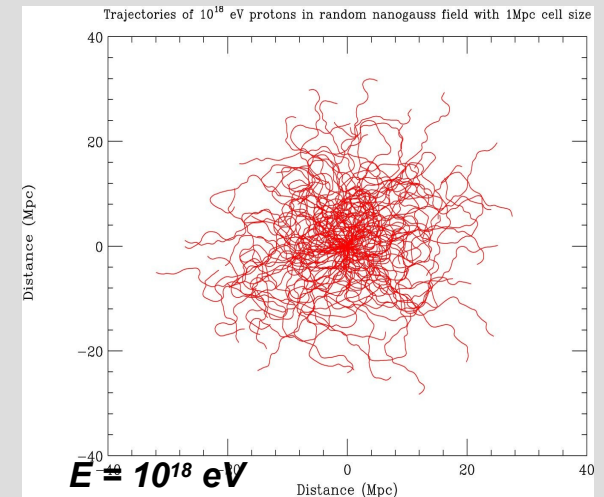
- Limites supérieures sur les champs à très grande
Échelle : échelles cosmologiques
< 1 nG

Effet du champ B sur les RC

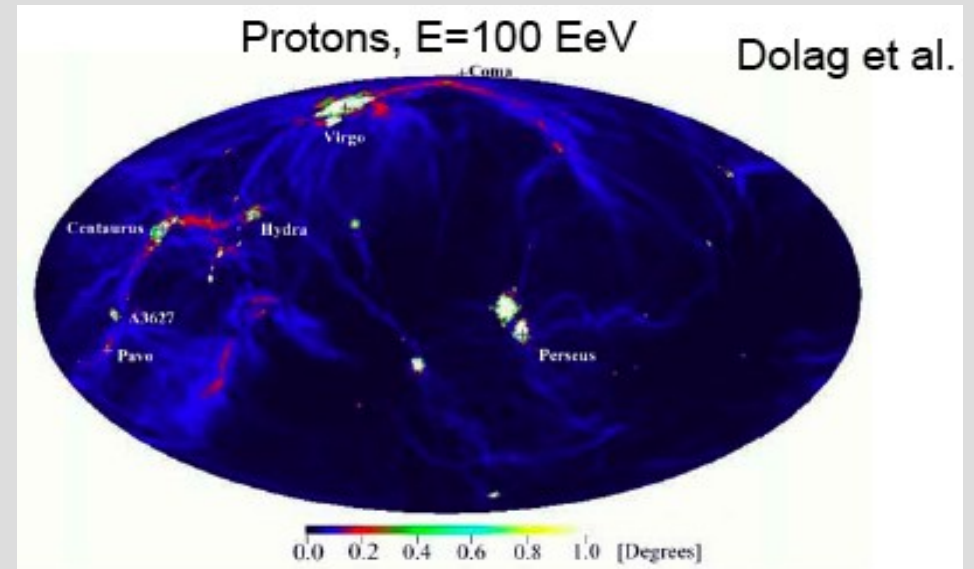
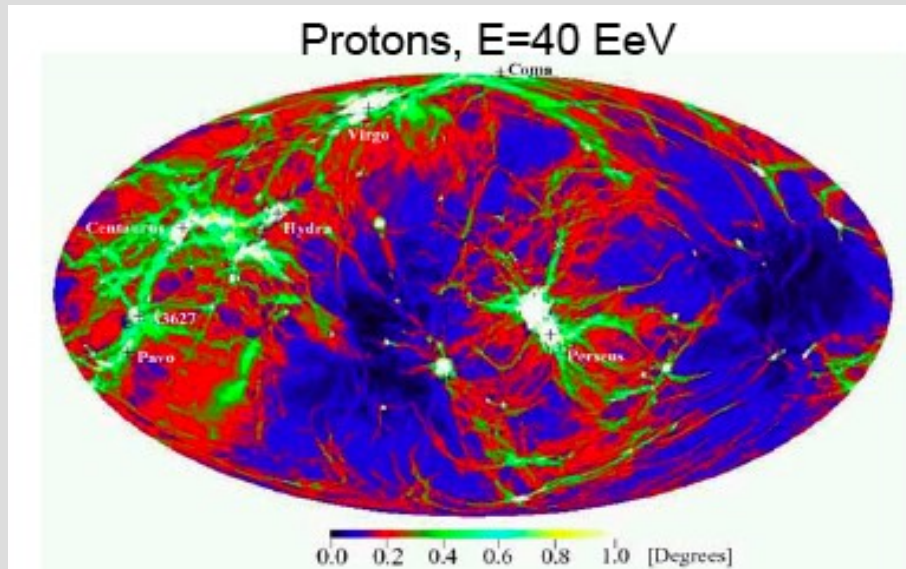
Champs avec propriétés homogènes dans l'espace :

→ Les Rc diffusent dans un régime de diffusion « normal » jusqu'à une certaine énergie E_i

→ Au delà de E_i → propagation balistique



Champ magnétique Extra-Galactique



Carte des déflexions de protons émis par des sources extragalactiques ($d < 107$ Mpc) dans les champs extragalactiques

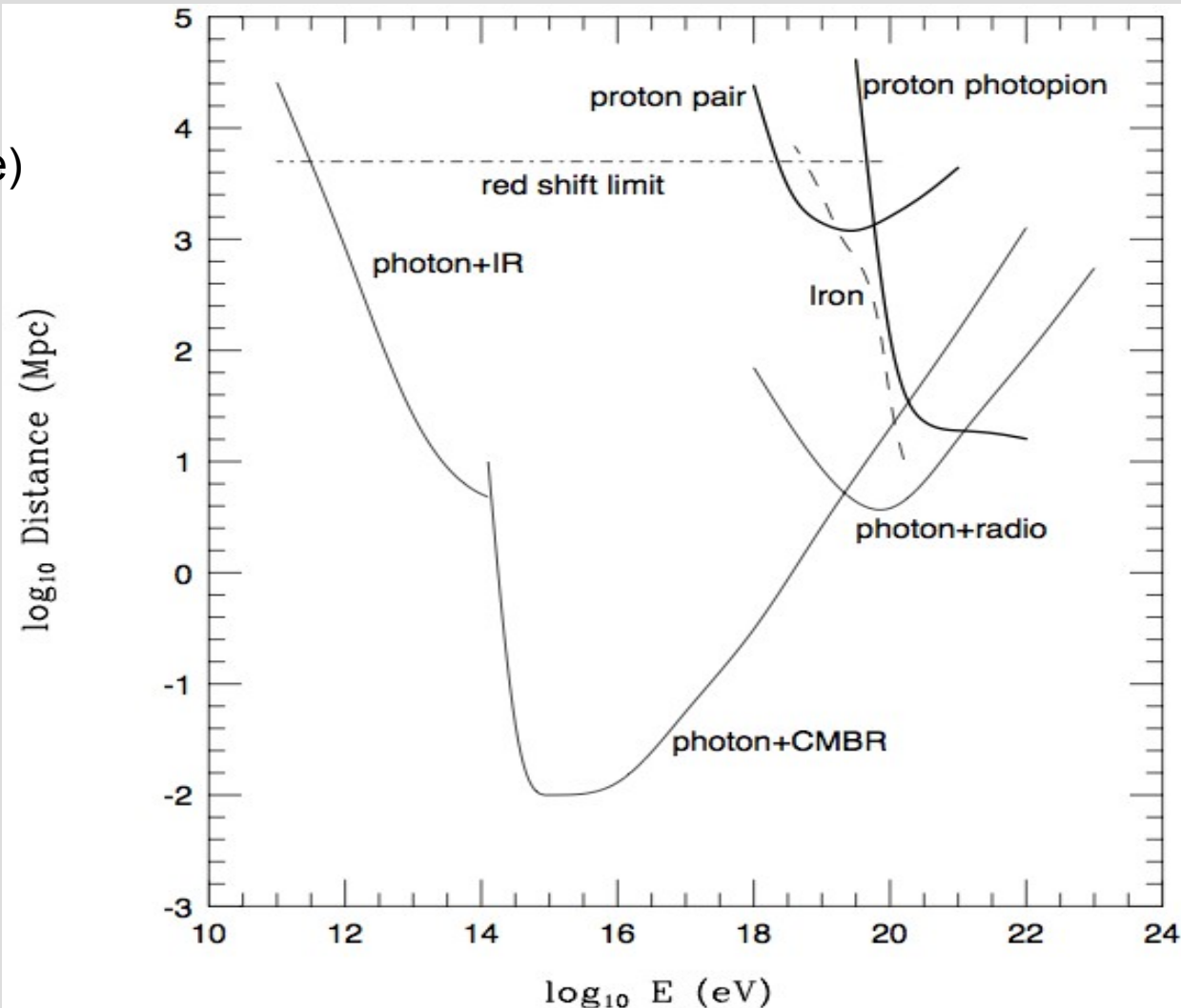
Atténuation des RC durant leur propagation dans les champs de photons

Protons et neutrons interagissent:

- le CMB
- de manière sous dominante avec le CIB (fond diffus infrarouge)

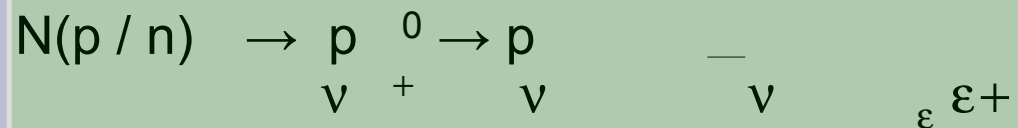
Longueurs d'atténuation des photons, protons et noyaux de fer dans différents fonds de radiation.

La limite red shift correspond à une longueur d'interaction égale à la taille de l'univers.



Origine de la suppression GZK

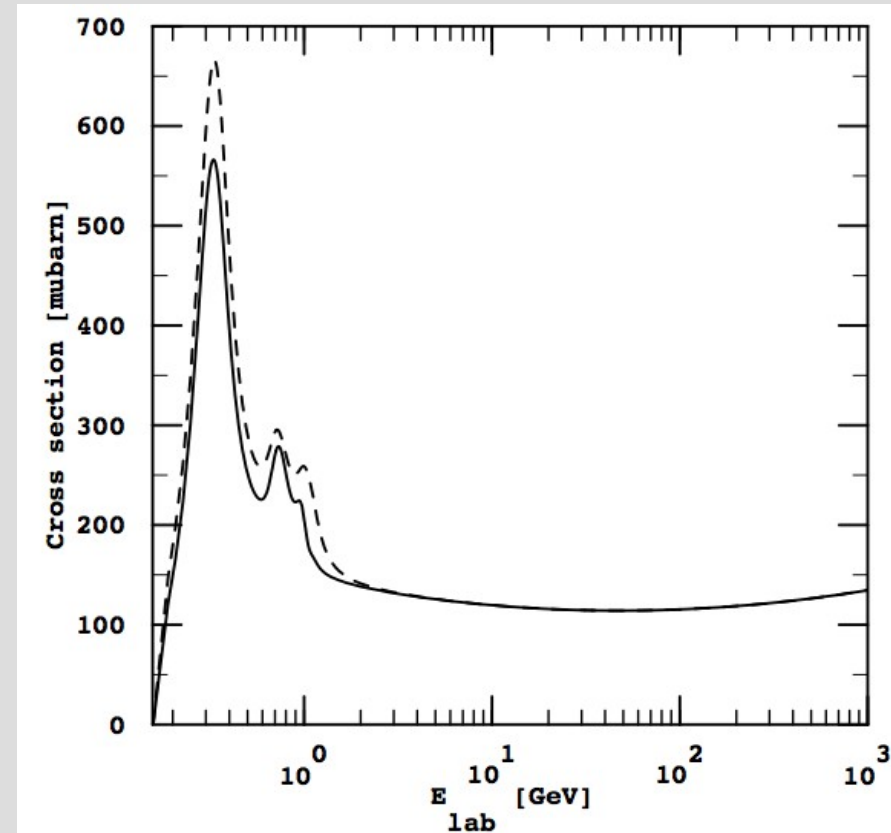
Photoproduction de pions:



Seuil sur le CMB \rightarrow 40 EeV

Seuil sur les photons du CIB : plus basse energie
Joue un rôle non négligeable à 20-30 EeV

\rightarrow Réduit l'horizon des particules de plusieurs centaines de Mpc à 30 EeV, à une vingtaine de Mpc à $2 \cdot 10^{20}$ eV.



Section efficace totale de photoproduction de pion sur nucléon

(trait plein : protons / pointillés : neutrons)

Résonances du Δ sont clairement visibles

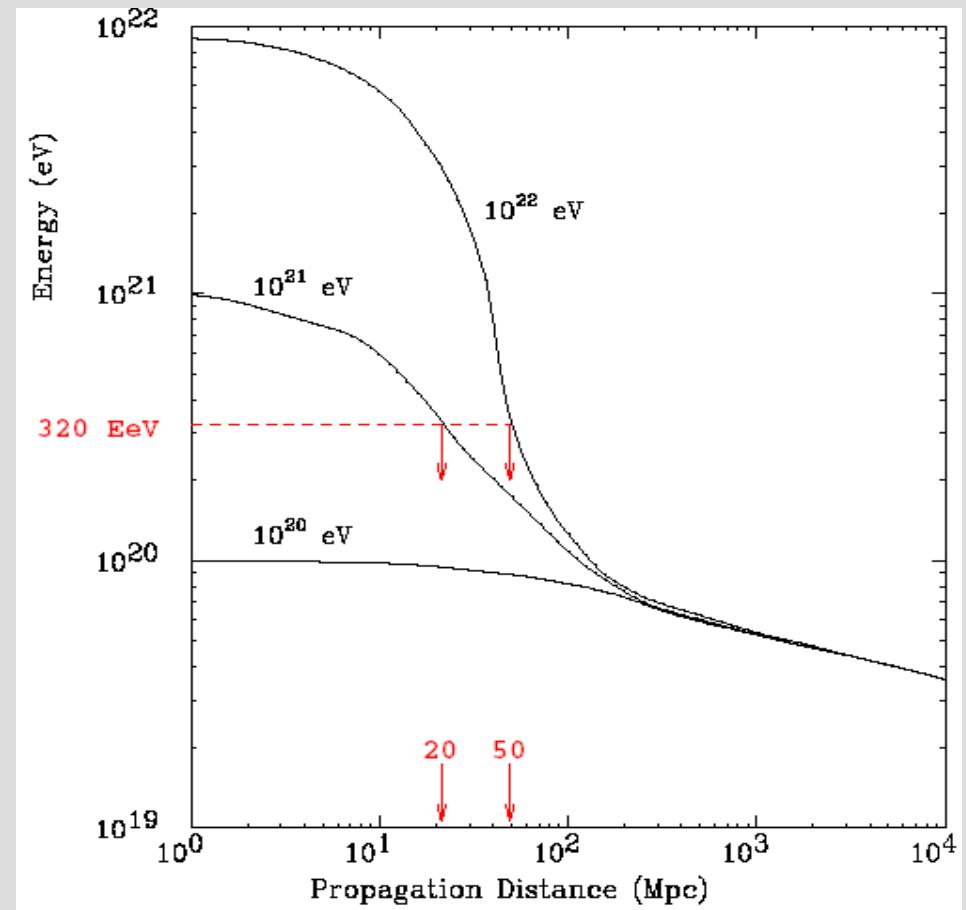
La coupure GZK

Greisen, Zatsepin et Kuzmin comprennent que plus l'énergie des RC est élevée, plus ils viennent d'une source proche

Les protons dont l'énergie est plus grande que 5×10^{19} eV sont absorbés par le CMB

$E = 10^{20}$ eV $d < 100$ Mpc

$E = 10^{21}$ eV $d < 15$ Mpc

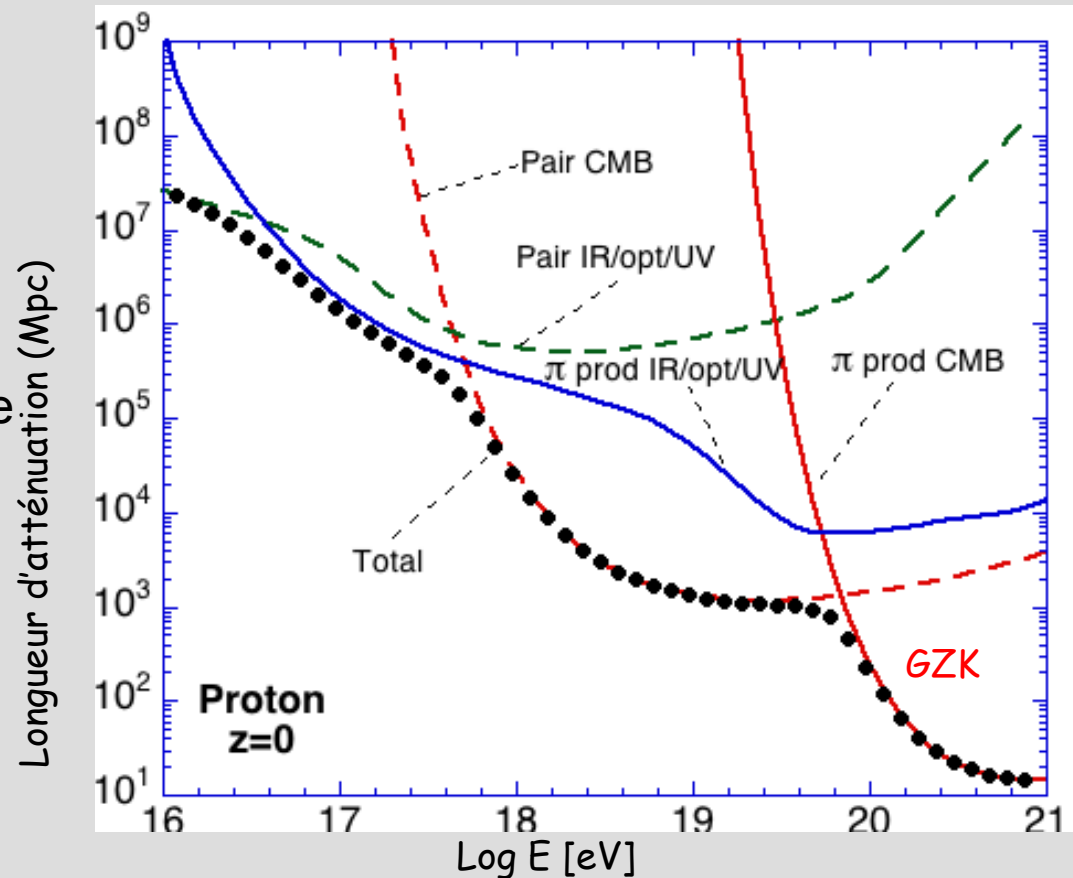


Energie d'un proton en fonction de sa distance au point de production, pour différentes énergies initiales

Interaction des nucleons avec le fond de photon

Production de paire : $P \rightarrow p e^+ e^-$

- photon typique du CMB : $E_{th} = 5 \cdot 10^{17} \text{ eV}$
- seul le CMB est dominant pour cette interaction.
- processus dominant les pertes d'énergie pour les protons aux énergies sub-GZK.
- distance de perte minimal: pour $E = 2 \cdot 10^{19} \text{ eV} < 1 \text{ Gpc}$
- Longueur d'interaction de 6 Mpc (densité CMB = $400/\text{cm}^3$)



Les noyaux

- production de paire
- photoproduction de pions

Perte d'E due a la prod de paire :
 Z^2/A fois plus grande que celle
d'un proton (E/A)

Photodesintegration:

dominante aux énergies trans-GZK

Absorption d'un photon

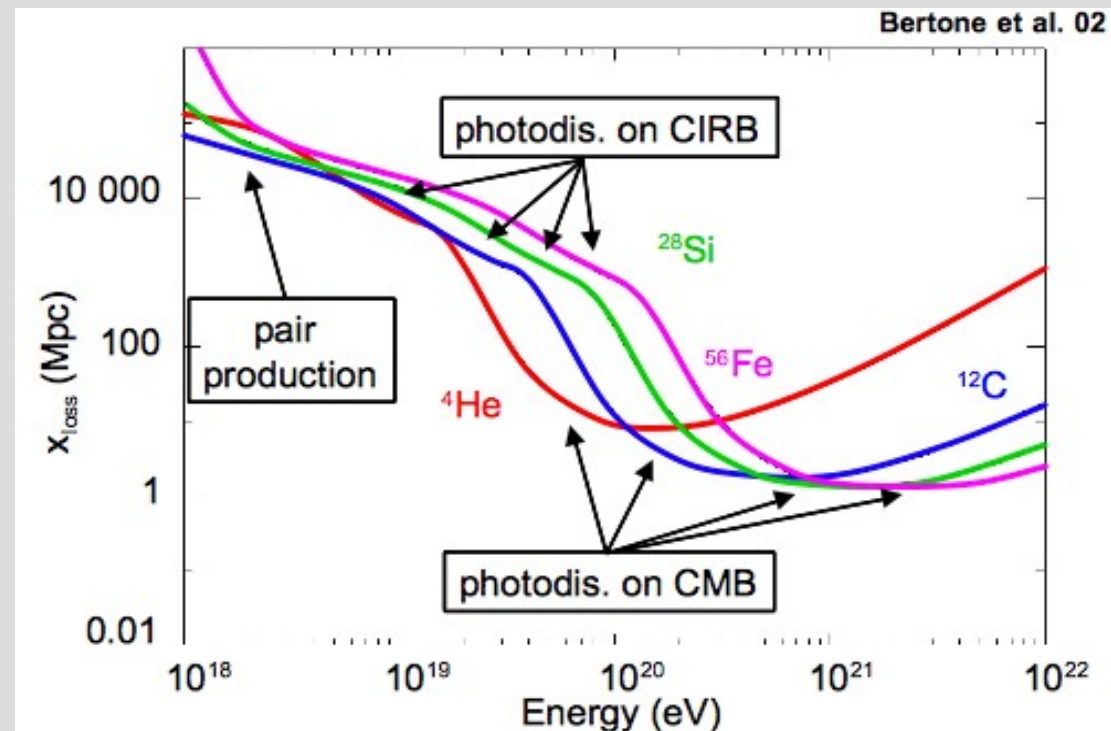
→ état instable

→ expulsion rapide d'un ou plusieurs
nucléons

(un nucleon est arrache au noyau et
son facteur de lorentz est conserve)

Basse Energie :

- CMB + CIB (devient importante)
- Source d'incertitude assez forte pour
les noyaux =>



effet GZK pour les noyaux aussi

Les photons

- Production de paires :
(PP : collision photon-photon)

$$\varepsilon + \varepsilon \rightarrow e^+ + e^-$$

Section efficace max a $E = 1$ PeV sur le CMB

- Coupure dans le spectre des source VHE situées a distance cosmologiques
- Photon a 10^{20} eV : résonance pour un fond au MHz (fond radio extragalactique)

- Diffusion compton inverse :
(ICS : diffusion d'un electron sur un photon)

- Rayonnement synchrotron :

- incertitudes liées à la connaissance des champs extragalactiques
- joue un rôle crucial de perte d'énergie aux grandes distance

OBSERVABLES

Spectre en énergie

- Spectre différentiel
- Flux
- Forme du spectre :
 - lois de puissance
 - indices
 - coupures spectrales

→ pas d'information temporelle
→ spectre total sur le ciel

Composition

- Observables de gerbes atmosphériques liés :
- Au spectre de masses
Etude statistique
- Au type de particule
 - photon
 - neutrinos

→ Lié aux modèles d'interaction hadroniques

Spectre angulaire

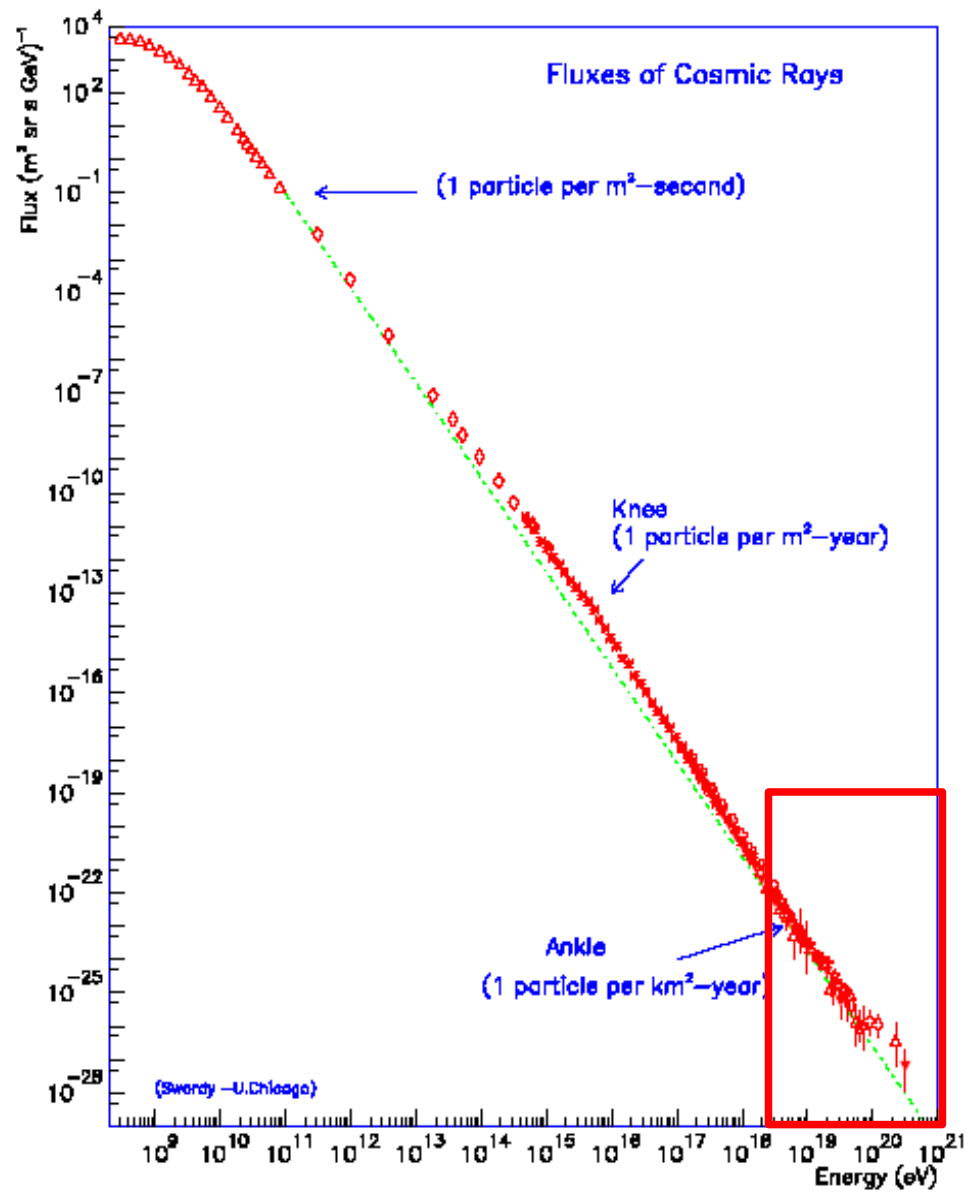
- Directions d'arrivée des événements individuels

Anisotropie petite échelle
→ recherche de sources haute énergie

- Anisotropie grande échelle
variation de la densité des Rcs:

basse/haute énergie

LES UHECRS



UHECRs : $E > 1 \text{ EeV}$ (10^{18} eV)

Observatoire AUGER

Découverte des gerbes atmosphériques

- 1938 : Pierre Auger observe que deux détecteurs situés à plusieurs mètres de distance détectent de particules en coincidence

→ Les particules mesurées par les deux détecteurs de particules proviennent de la particule initiale



Les gerbes atmosphériques

- La grande gerbe de particules secondaires engendrée par l'interaction du primaire dans l'atmosphère peut être détectée sur une zone étendue
 - grande surface efficace de détection
 - faire face aux très faibles flux aux énergies ≥ 1000 TeV

- L'atmosphère est utilisée comme un calorimètre inhomogène

- À partir des observables, on cherche à reconstruire :
 - la direction incidente
 - l'énergie primaire E_0

Et remonter à la nature de la particule primaire :

- * distinction γ -hadron
- * distinction noyau léger - noyau lourd

Phénoménologie des gerbes

Le primaire entre dans l'atmosphère et interagit avec des noyaux

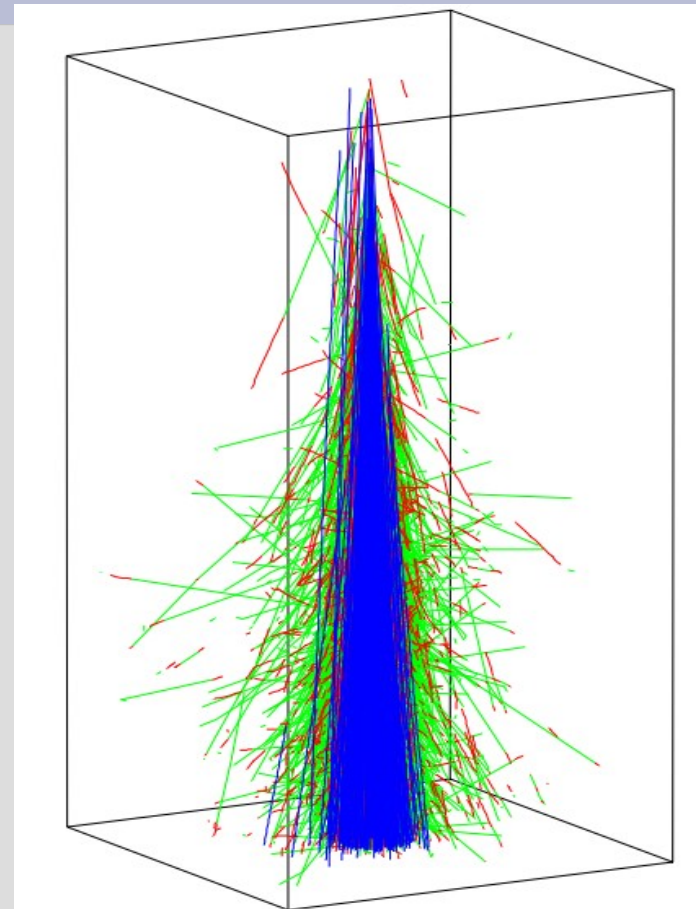
Les particules secondaires:

→ gerbe de particule qui se développe jusqu'à une profondeur maximale

@ 10^{20} eV $\sim 10^{11}$ particules

Trois composantes :

- Cascade hadronique primaire près de l'axe (100 m)
- cascade électro-magnétique (qq kms)
- Cascade de pions (qq kms)



Simulation d'une gerbe de proton de 10^{19} eV à partir du programme MOCCA.
Un échantillon des traces au delà de 300m du cœur est présenté. Le cadre fait $6 \times 6 \times 12 \text{ km}^3$. Code des couleurs : vert Gamma, rouge électrons et positrons, bleu muons.

[Fig 4.1]

Phénoménologie des gerbes

Développement schématique d'une gerbe atmosphérique

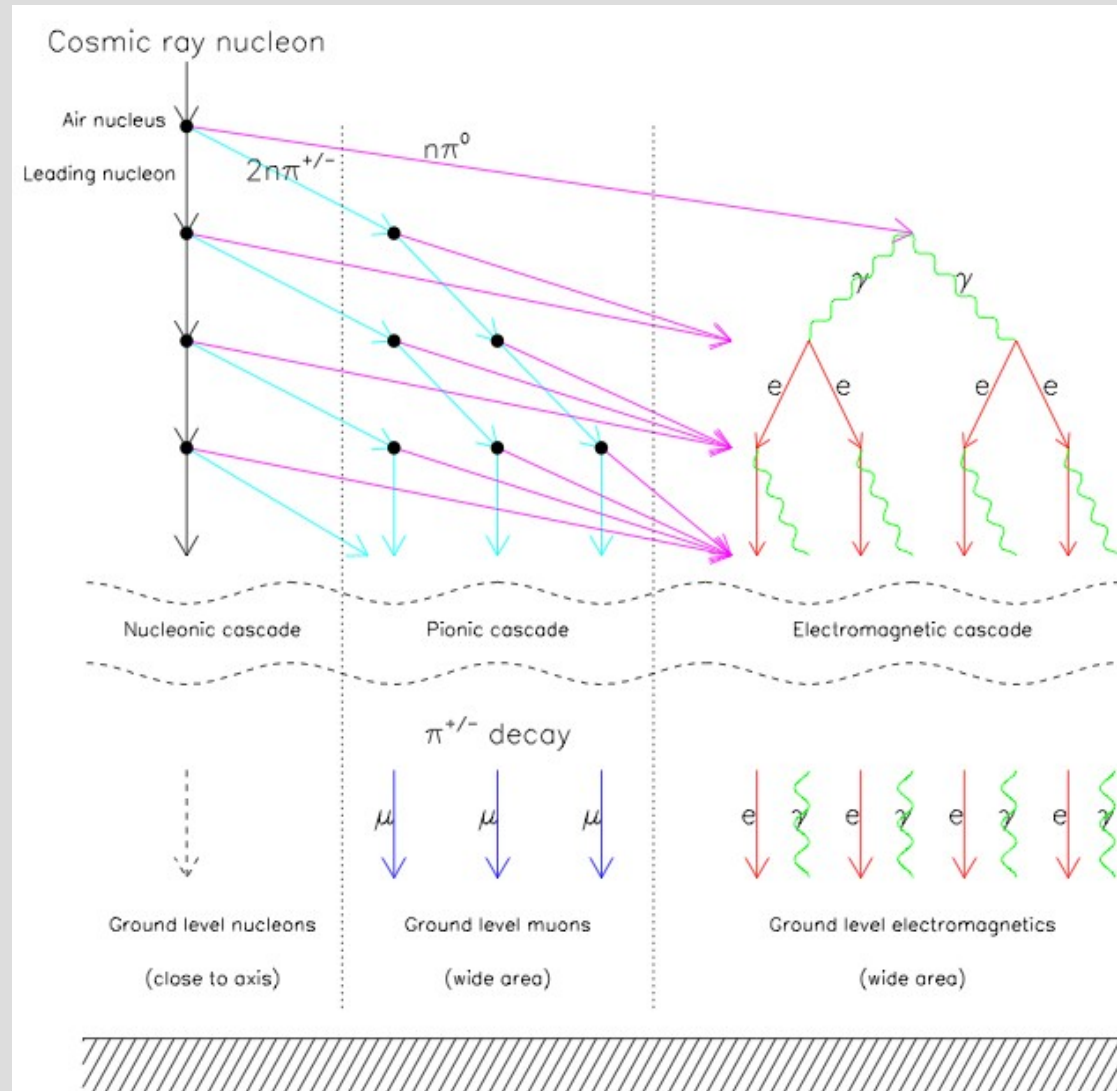
Composante hadronique :

fragments nucléaires, nucléons, mésons π , K, etc.

Composante électromagnétique

engendrée par $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ et autres désintégrations radiatives

Composante muonique engendrée par les désintégrations des π^\pm et des K^\pm



Les observables au sol

Les particules secondaires de la gerbe arrivant au sol

Selon l'énergie primaire et l'altitude :

- **Hadrons résiduels** (fragments nucléaires) : peu nombreux car la composante hadronique est la plus rapidement absorbée.
- **e^\pm** : les plus nombreux à l'altitude du développement maximal de la gerbe.
- **μ^\pm** : atteignent presque toujours le sol (composante pénétrante) et peuvent pénétrer profondément sous le sol ou sous la mer.
- **γ secondaires** : peuvent être détectés au sol après conversion en paires e^+e^- dans l'eau (effet Tcherenkov dans l'eau).

Les photons (visibles, UV) émis le long des trajectoires des particules chargées de la gerbe (effet Tcherenkov, fluorescence de l'azote) au cours de son développement → information calorimétrique tri-dimensionnelle.

L'émission radio de ces mêmes particules.

Emissions de fluorescence des gerbes

Les particules chargées de la gerbe émettent de la lumière :
Lumière de fluorescence de l'azote émise de façon isotrope
(λ entre 310 et 400 nm) (4 photons par électron par m au sol)

Peut être détectée très loin (plusieurs dizaines de km) de l'impact au sol → très grande acceptance bien adaptée aux énergies extrêmes: $E \geq 10^{18} \text{eV}$.

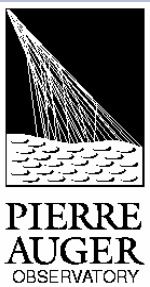
Cette lumière détectée au sol nous renseigne sur le développement de la gerbe en 3D très utile pour la mesure d'énergie.

Observations stéréoscopiques permettent de remonter à la distribution du nombre de photons émis le long de l'axe → profil longitudinal de la gerbe.

On mesure directement l'énergie déposée dans l'atmosphère par les particules chargées de la gerbe

Ne peuvent fonctionner que la nuit, par beau temps et en l'absence de lune ($\approx 10\%$ du temps).

L'observatoire Auger, un détecteur hybride



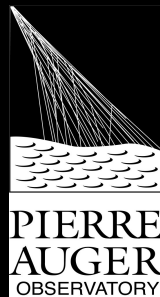
Dans la pampa en Argentine, province de Mendoza



~400 scientists from
~70 Institutions and 17 countries



Argentina
Australia
Bolivia*
Brasil
Czech Republic
France
Germany
Italy
Poland
Mexico
Slovenia
Spain
United Kingdom
USA
Vietnam*



L'observatoire Auger, un détecteur hybride

Déploiement des curves terminé

AIM: 1600 tanks, 3,000km²



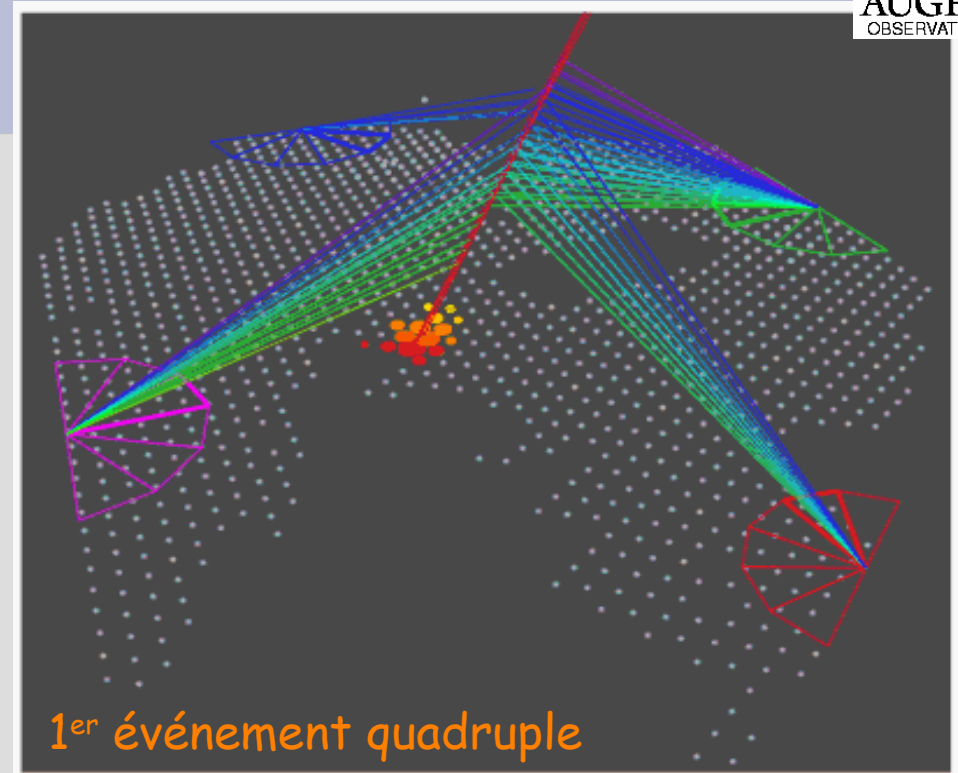
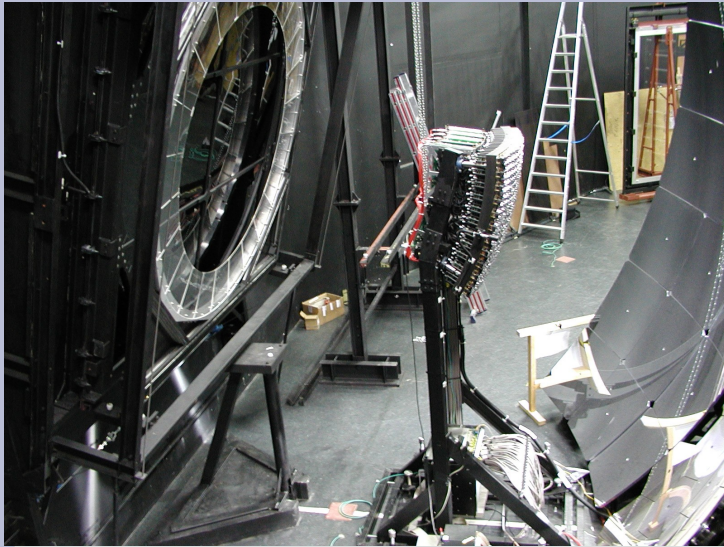
Title:map2009.eps

Creator:GIMP PostScript file plugin V 1,

CreationDate:Thu Jul 2 16:07:56 2009

LanguageLevel:2

Observatoire Auger



FD

4*6 télescopes de 440 PMTs

champ de vue : $30^\circ \times 30^\circ$

Stéréoscopie



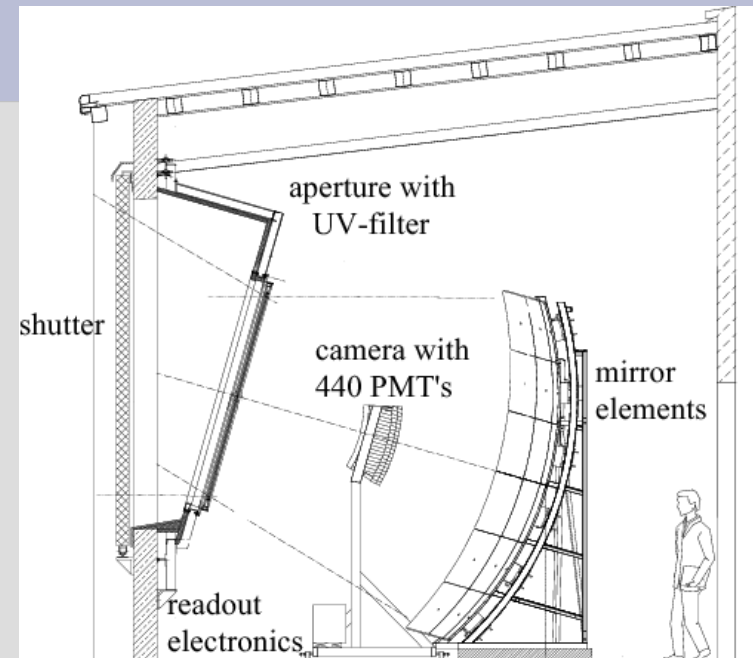
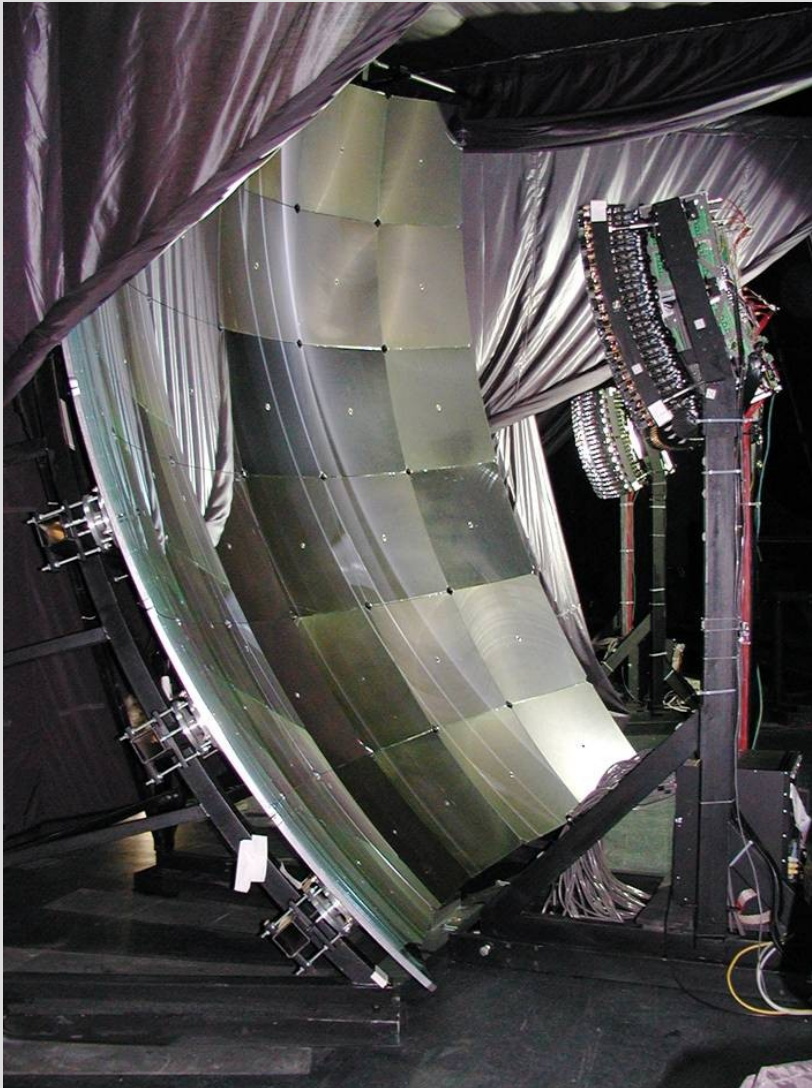
SD

3 000 km²

1 600 cuves Čerenkov

maille triangulaire de 1.5
km de côté

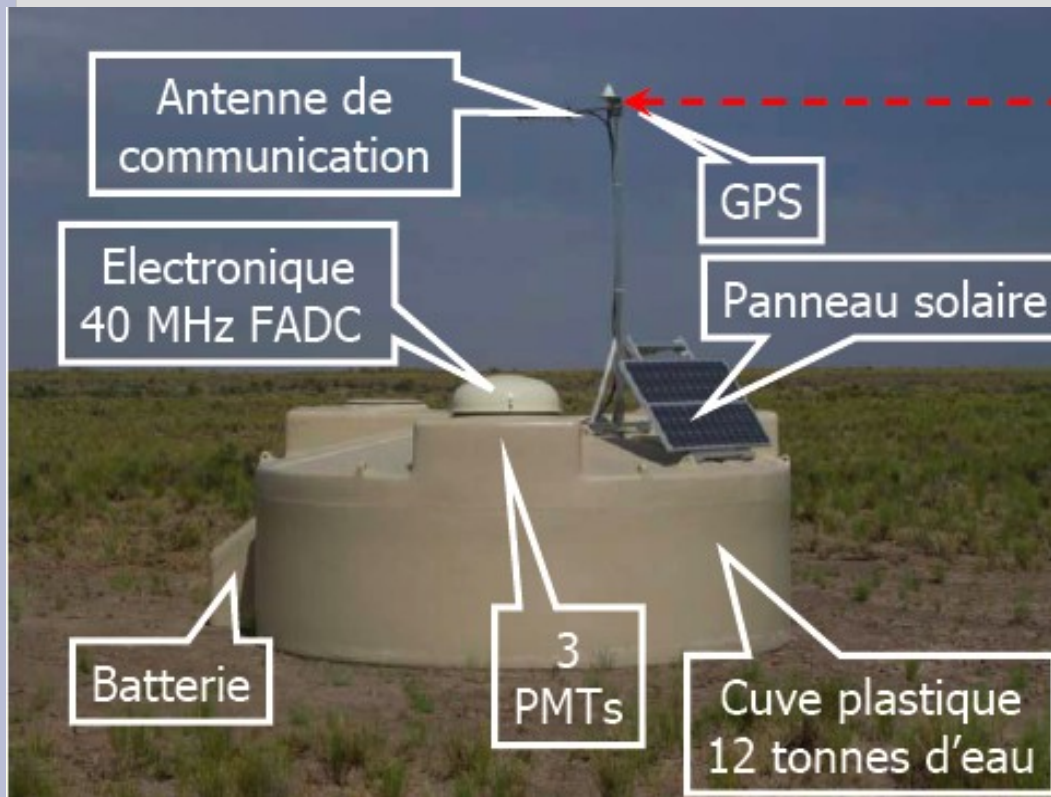
4 télescopes à fluorescence



6 télescopes d'orientations différentes,
couvrant chacun une portion de ciel

L'intensité reçue sur chaque pixel
permet de remonter au
profil longitudinal de la gerbe si
la direction est bien reconstruite.

Le détecteur de surface



Identification des muons au sol :

Détecteur Tcherenkov à eau (cuve) que les muons traversent

Les muons au sol sont beaucoup moins nombreux que les électrons donc beaucoup plus dispersés

→ après le stade de développement maximal, le nombre de muons ne diminue que lentement.

Distribution latérale

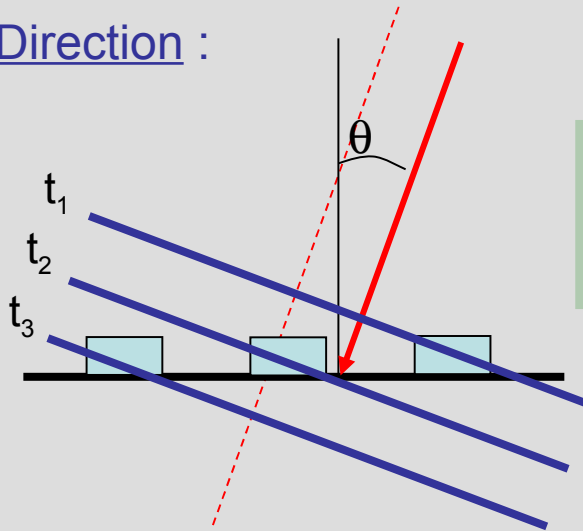
→ densité moyenne de μ à la distance r de l'axe de la gerbe

Reconstruction SD

Distribution des particules au sol :

→ Profil latéral de la gerbe

Direction :



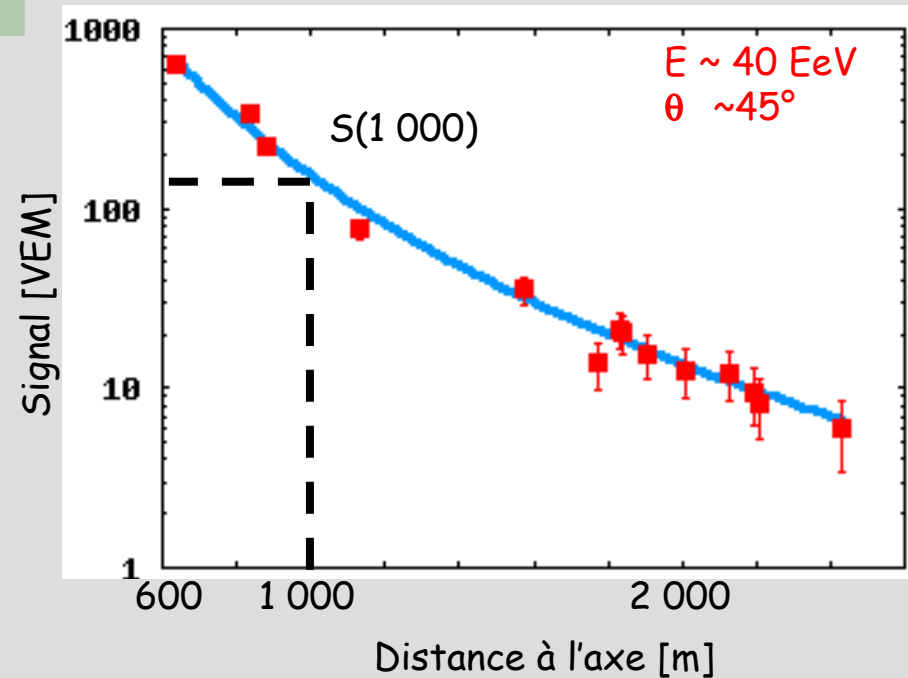
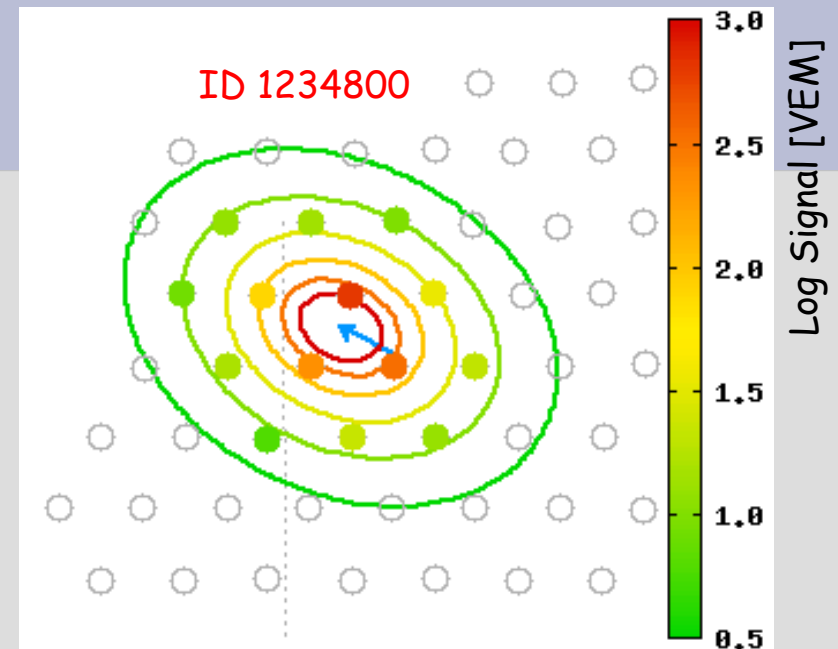
Résolution angulaire :

$\sim 1^\circ$ à 10 EeV

Estimation de l'énergie :

S(1 000)

- soit simulations + hypothèse sur la nature
- soit calibration via les événements hybrides



Reconstruction hybride

Sensible aux photons de fluorescence :

Profil longitudinal de la gerbe
détermination calorimétrique de E

Résolution angulaire $\sim 0.5^\circ$

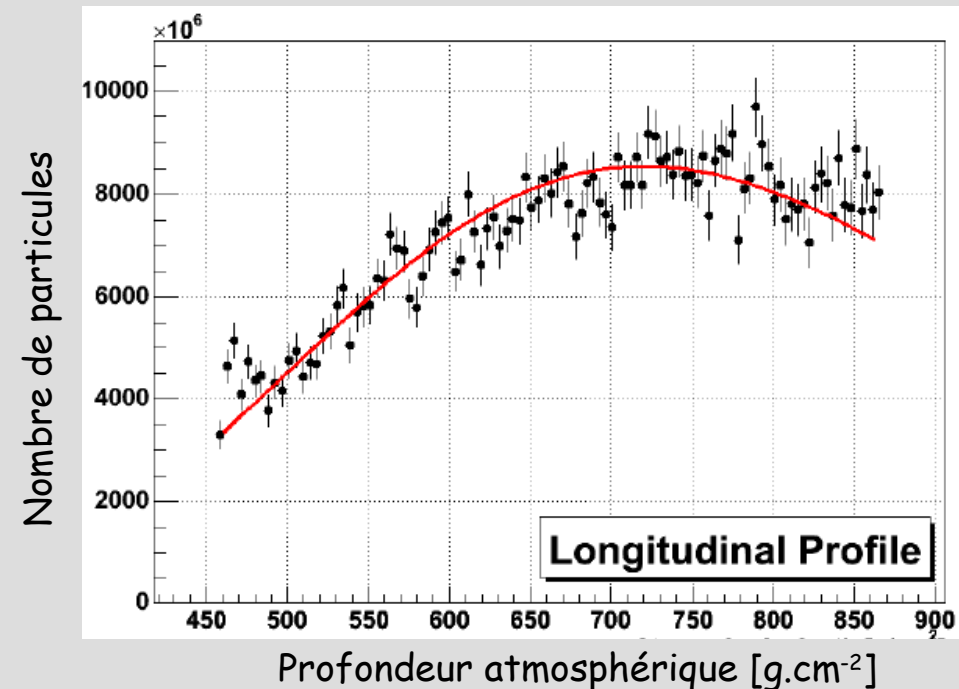
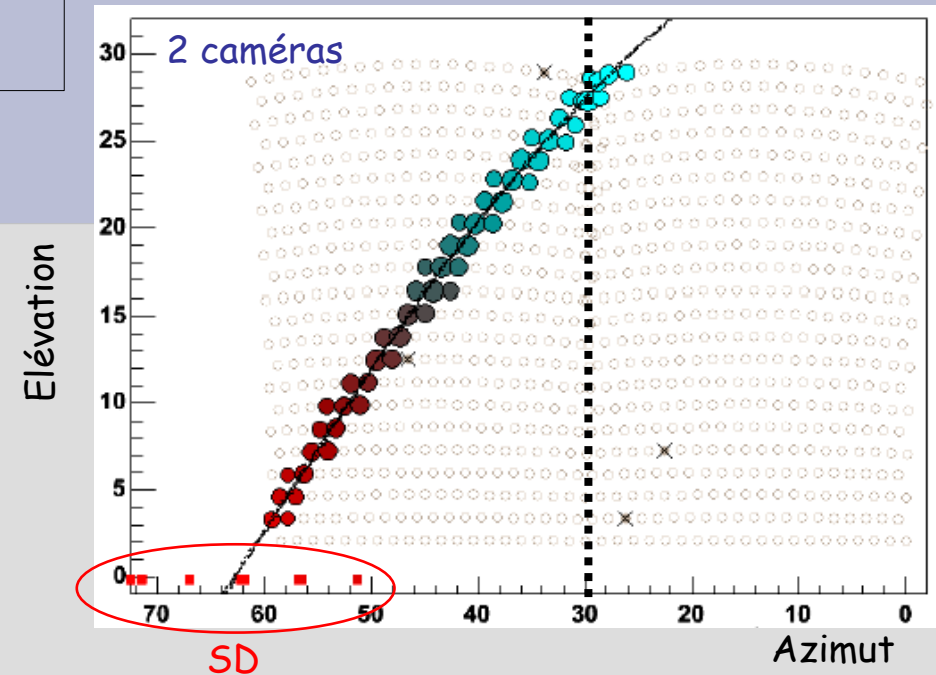
Systématiques importantes sur l'estimation de l'énergie (25%)

rendement de fluorescence (15%)

atténuation atmosphérique (aérosols $\sim 10\%$)

surveillance de l'atmosphère

Cycle utile de détection $\sim 10\%$



Conclusion

Physique des rayons cosmiques :

- complexe car impliquant de nombreux paramètres physiques
- Mais c'est ce qui fait sa richesse !
- Difficulté pour les UHECRs : faible statistique

Détecteur Auger :

- Détecteur hybride : combine fluorescence et détection au sol
- Déploiement terminé en 2008
- analyse combinée

Motivation

La physique des RCUHEs (10^{18} - 10^{20} eV) ?

- Nature (protons, noyaux (lourd/léger), gammas, neutrinos ou particules exotiques)
- Sources (galactique/extragalactique, distance, distribution spatiale et leur nature, identification avec des sources astrophysiques connues, des GRB, des reliques primordiales),
- Physiques des interactions (physique hadronique au dessus de l'énergie des accélérateurs $E_{\text{LHC}}=10^{17}$ eV)

Que peut t'on en dire aujourd'hui?

Qu'allons nous apprendre dans les prochaines années ?

L'avenir de la physique des RCUHEs

Interaction avec les gamma (CMB, IR, optiques)

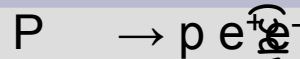
- Nucléons \rightarrow coupure GZK
- Photons

Interactions subies pas les UHECRs au cours de leur propagation :

ie. : les processus de pertes d'énergie due essentiellement aux champs de photons denses qui baignent l'univers à grande échelle.

1) Interaction des nucléons : Protons et neutrons avec le CMB et de manière sous dominante avec le (infrarouge)

a) production de paire :



Pour un photon typique du CMB : $E_{th} = 5 \cdot 10^4$ eV

En pratique, sur le CMB est dominant pour cette

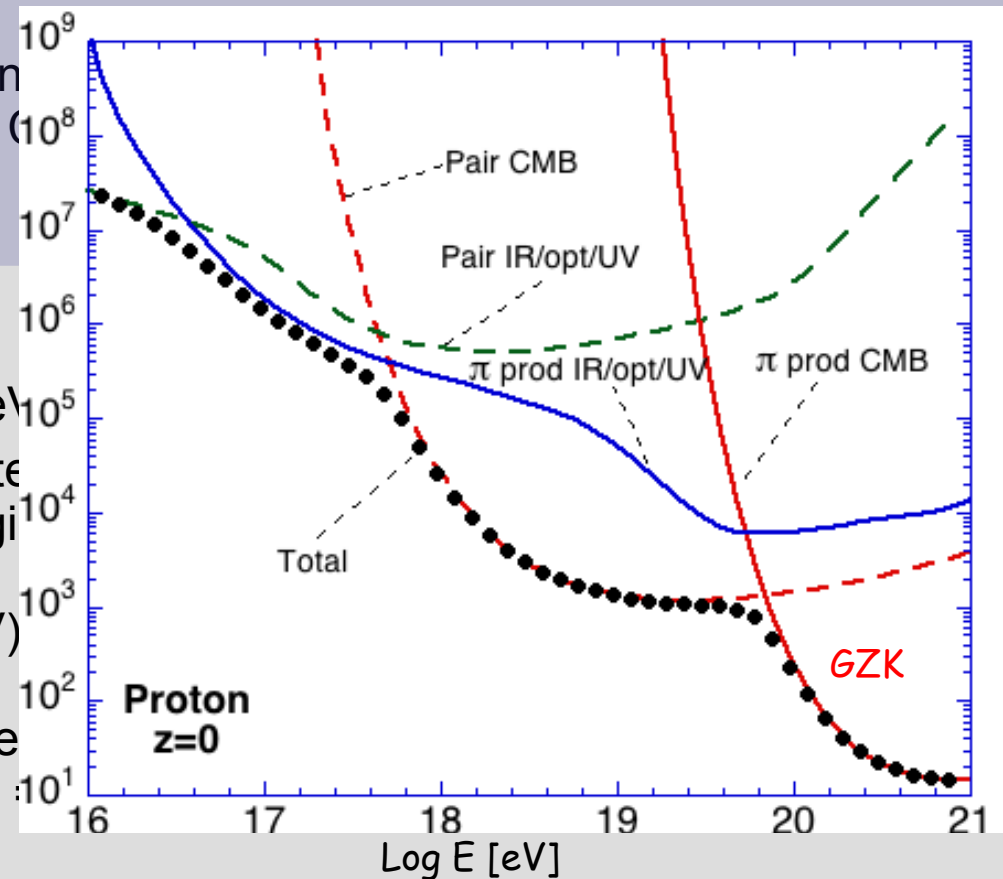
C'est le processus dominant des pertes d'énergie aux énergies sub-GZK.

La distance de perte minimal (pour $2 \cdot 10^{19}$ eV)

Donc seuil plus bas que 2 mais section efficace

Longueur d'interaction de 6 Mpc (densité CMB)

Longueur d'interaction (Mpc)



On ne considère pas ici les interactions à la source, bien que la distinction peut être tenue à l'échelle des amas de galaxies que l'on peut considérer comme source ou milieu de propagation.

Désintégration des neutrons

Particules neutres:

Non accélérés aux sources

Mais créés par interaction pp au voisinage des sources

Se désintègrent suivant : $n \rightarrow p \bar{e} e^-$

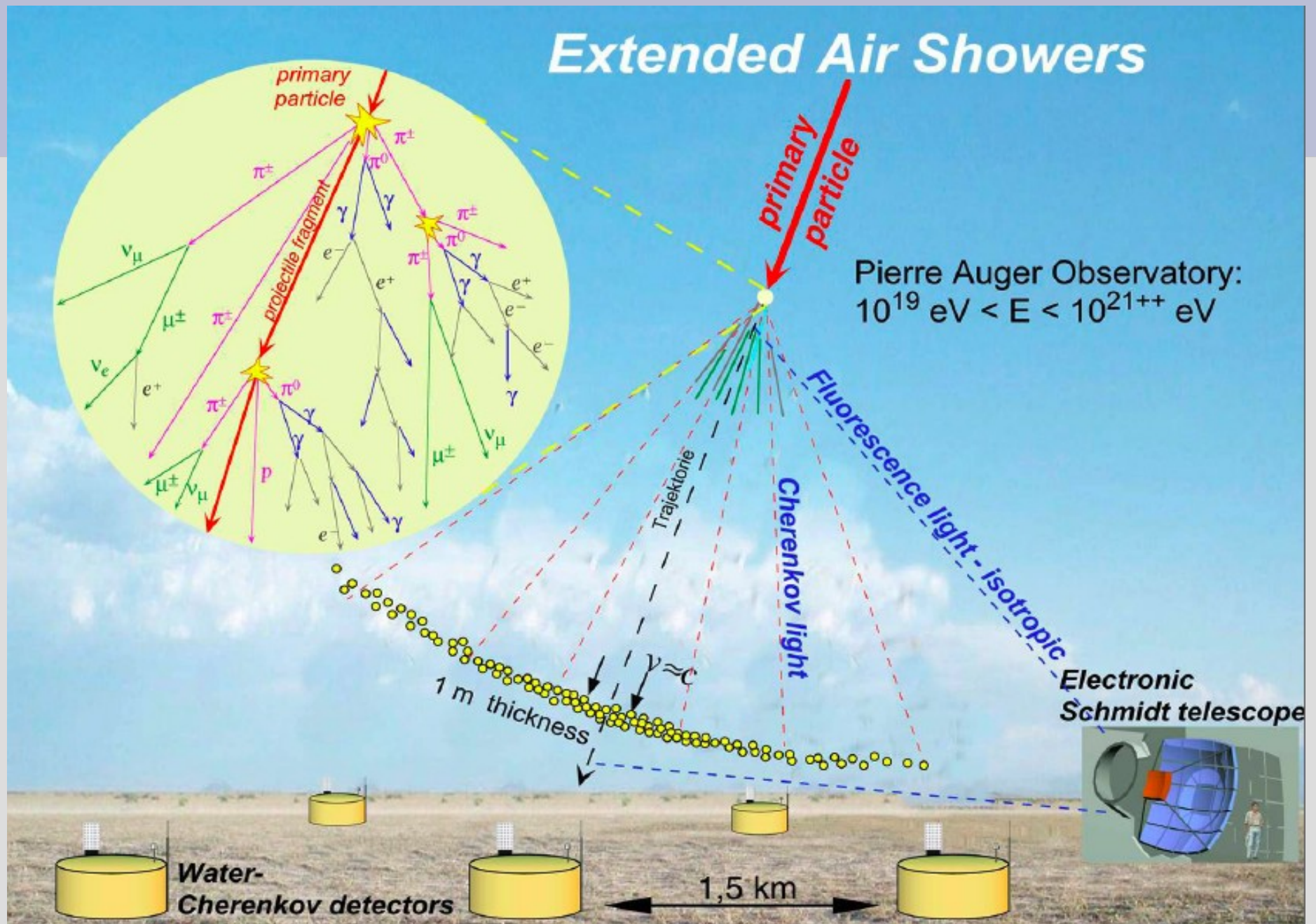
- $E=1\text{EeV}$ $L_{\text{des}} = 9 \text{ kpc}$

→ Centre Galactique

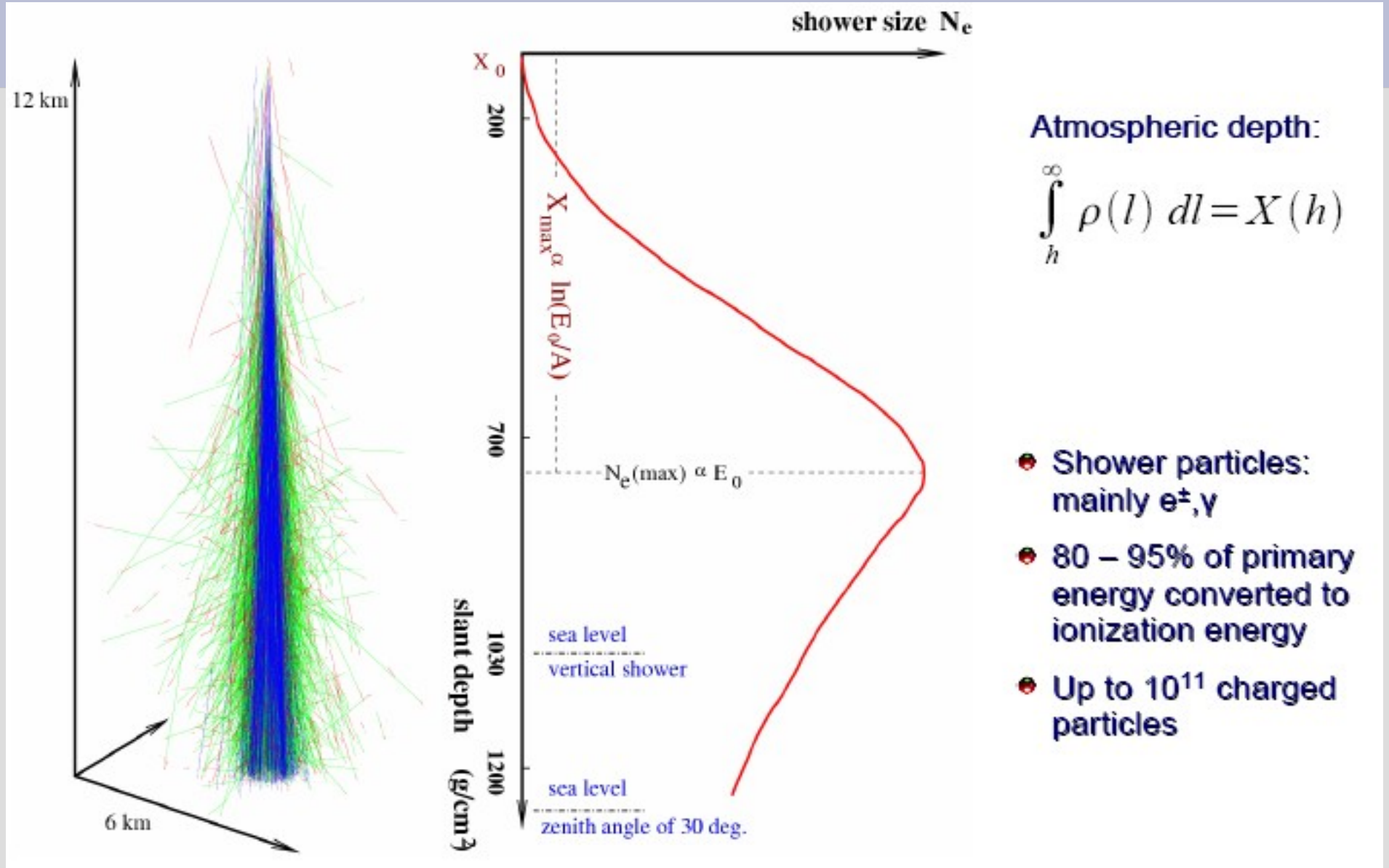
- $E=100 \text{ EeV}$ $L_{\text{des}} = 1 \text{ Mpc}$

→ peu d'espoir de voir une source UHE
grâce à sa composante neutrinos...

Extended Air Showers



Phénoménologie des gerbes



26/05/2007

1413
1360
1280

Coihueco

Loma Amarilla

Los
Morados

Malargue

Los Leones

