
Propagation et directions d'arrivée des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

E. Armengaud (APC & IAP)

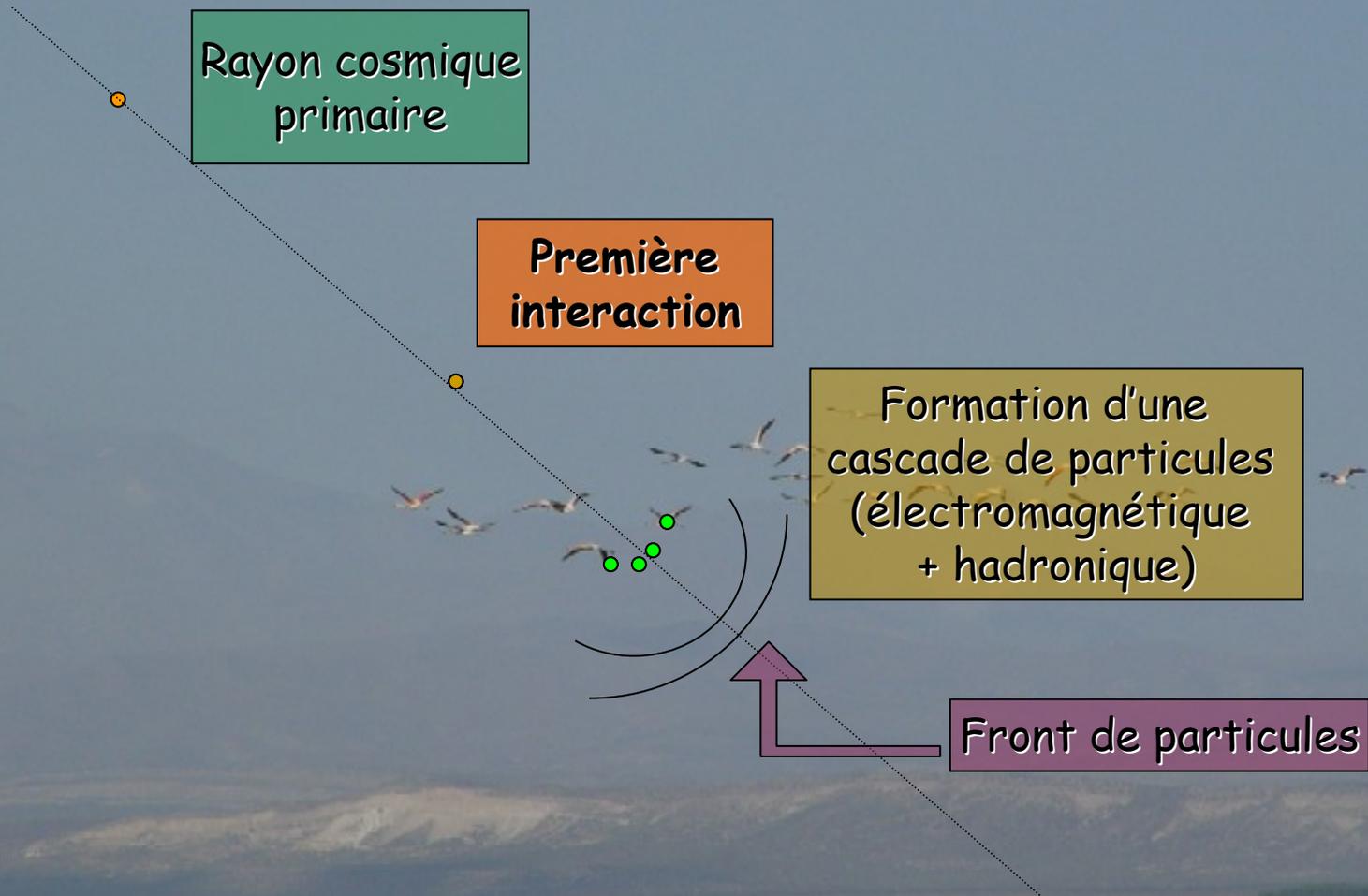
Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

Sujets discutés

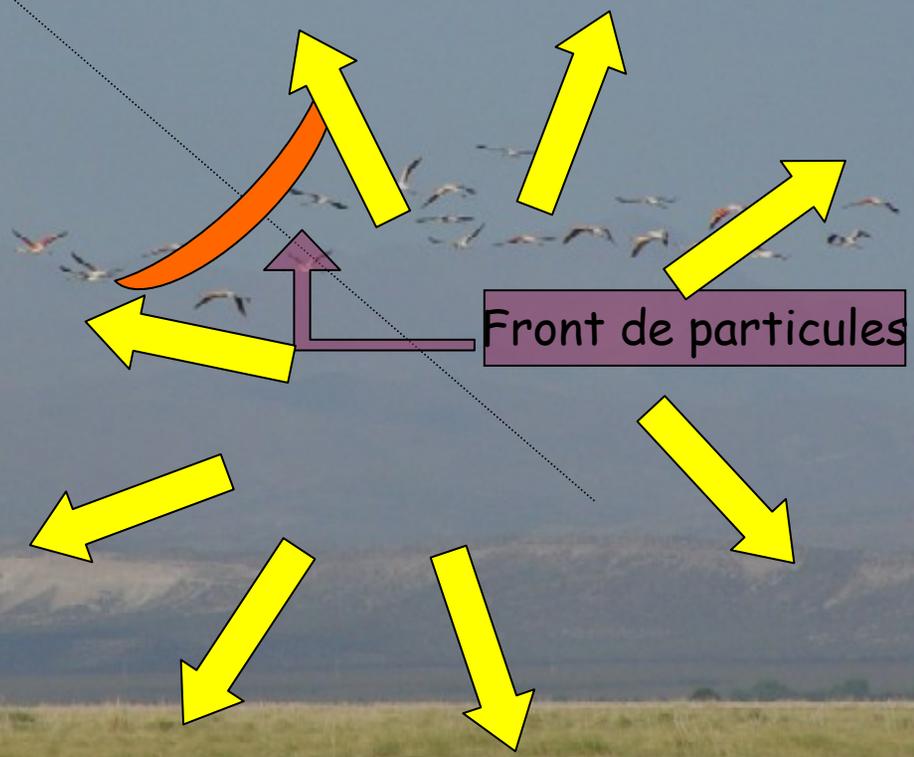
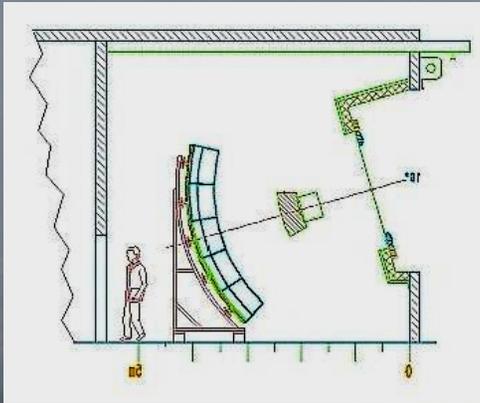
- **Les UHECRs**
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

Détection des UHECRs

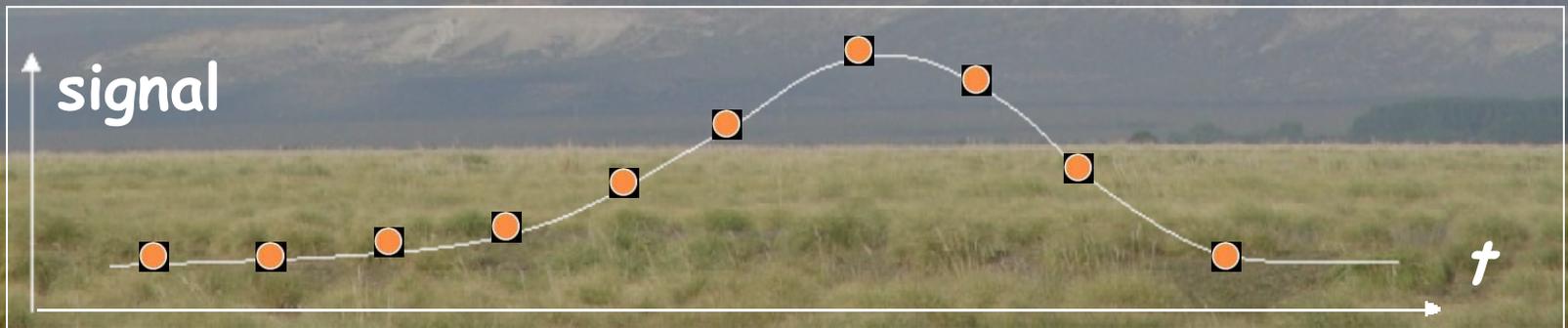
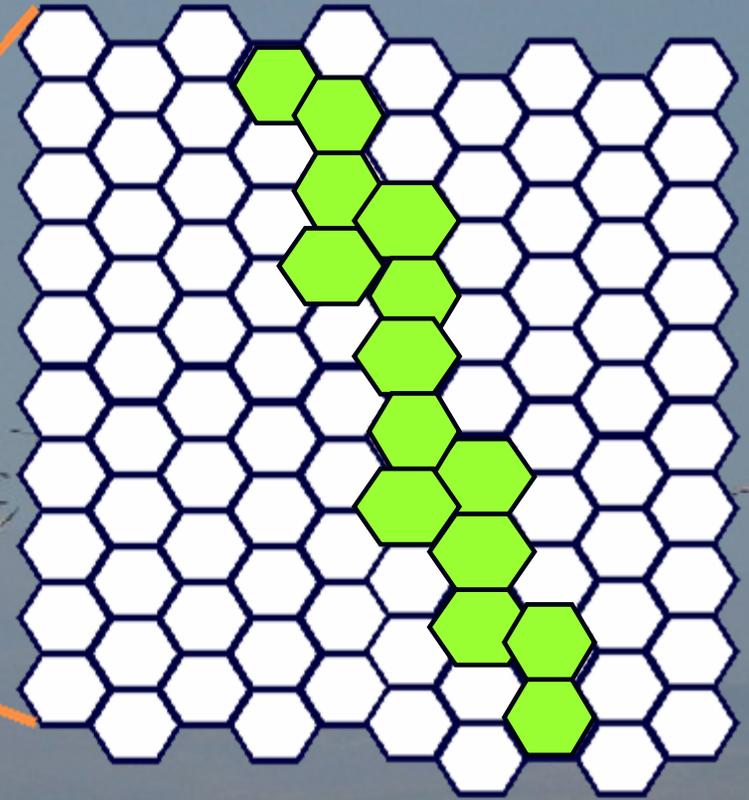
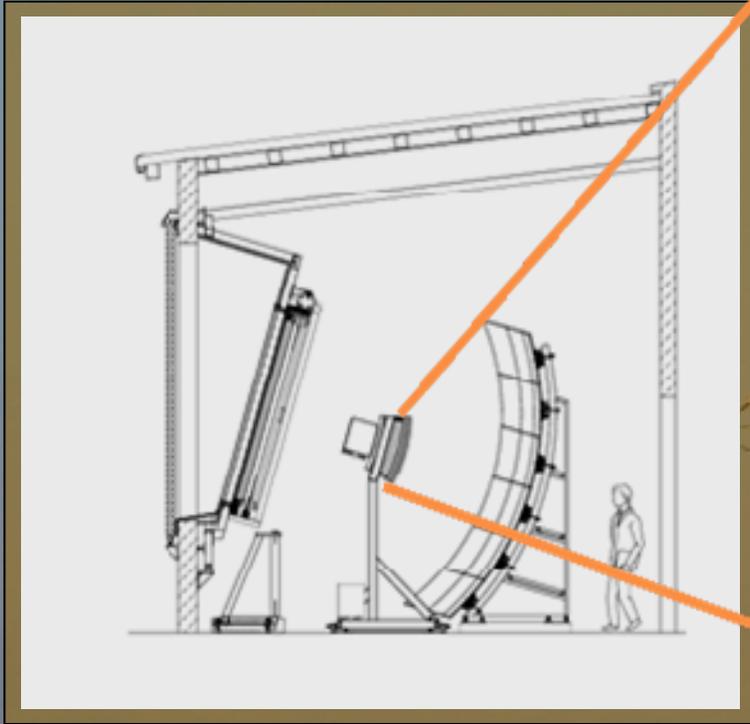


Détection par fluorescence (“HiRes-like”)

Détecteur de fluorescence

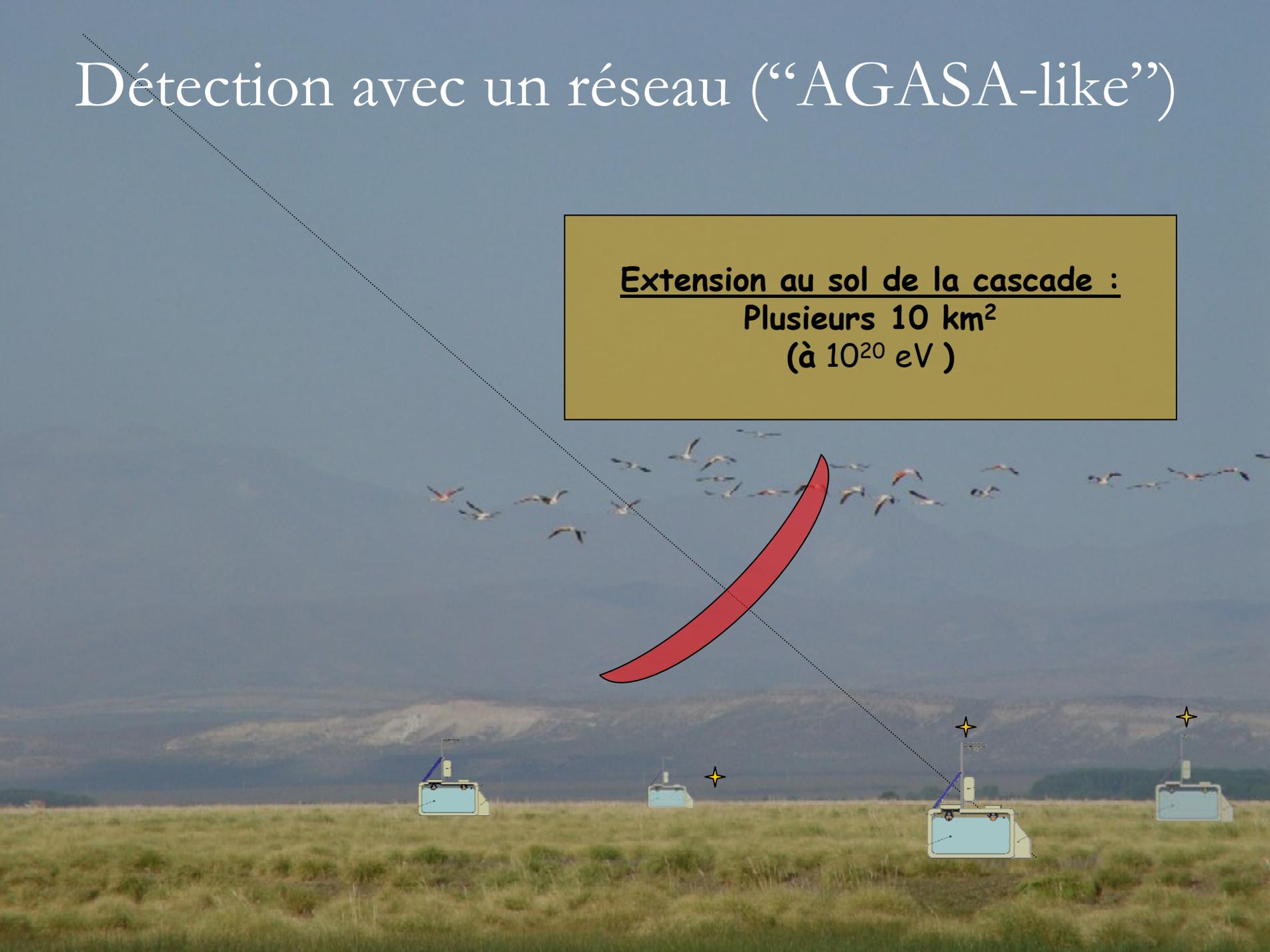


Fluorescence



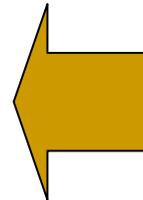
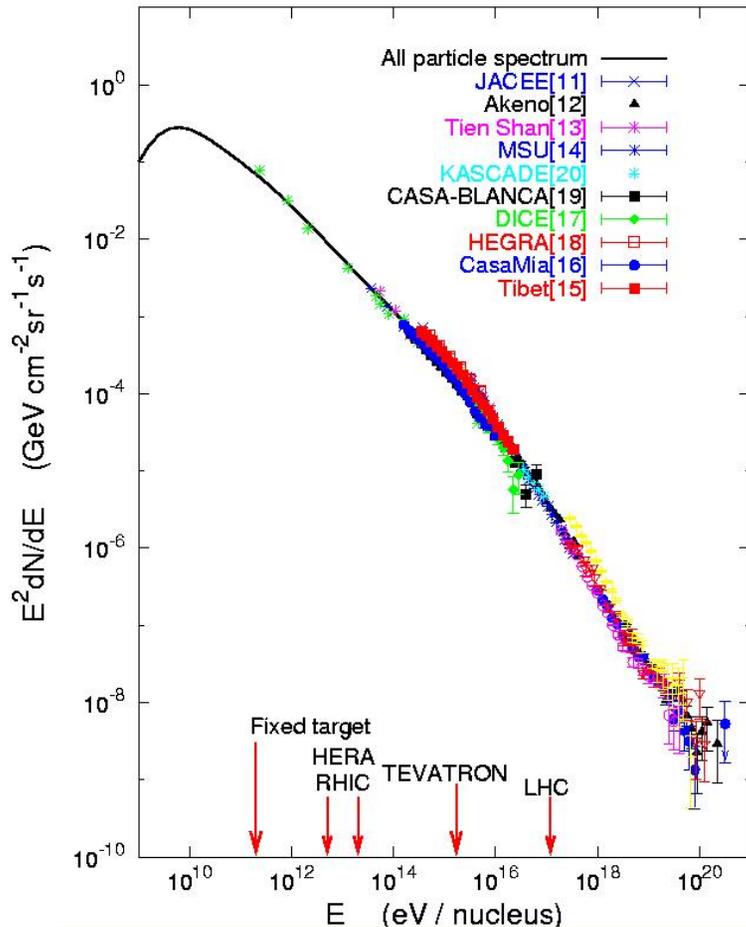
Détection avec un réseau (“AGASA-like”)

Extension au sol de la cascade :
Plusieurs 10 km^2
(à 10^{20} eV)



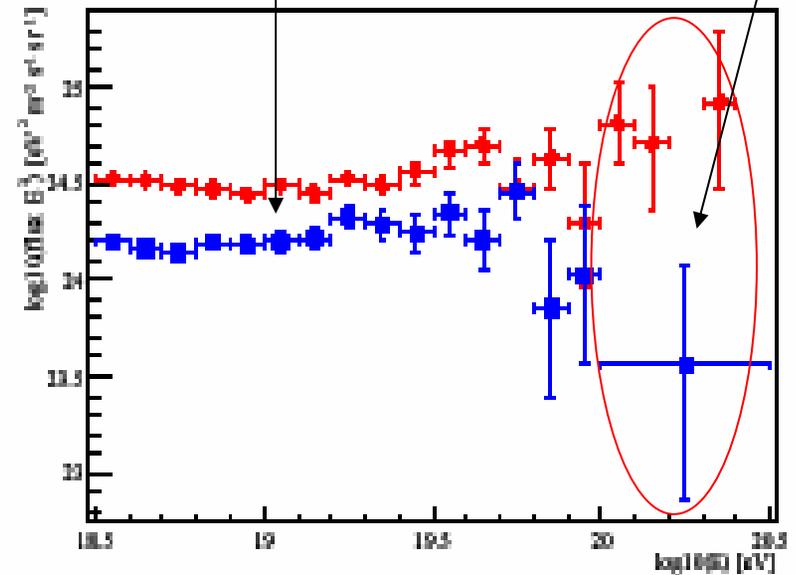
Le spectre des rayons cosmiques

- **AGASA** (Japon) : réseau de détecteurs au sol
- **HiRes** (US) : télescopes de fluorescence



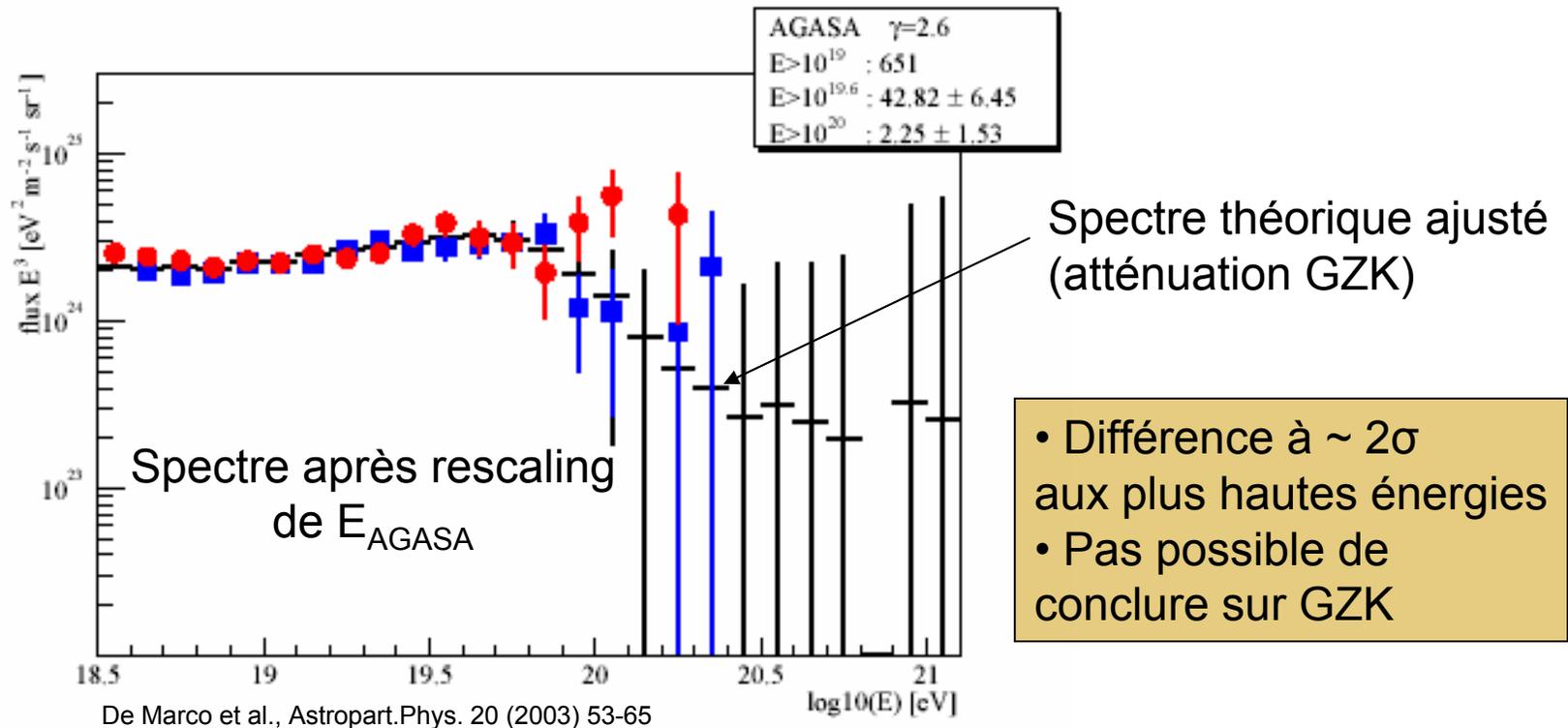
Décalage systématique

Faible statistique

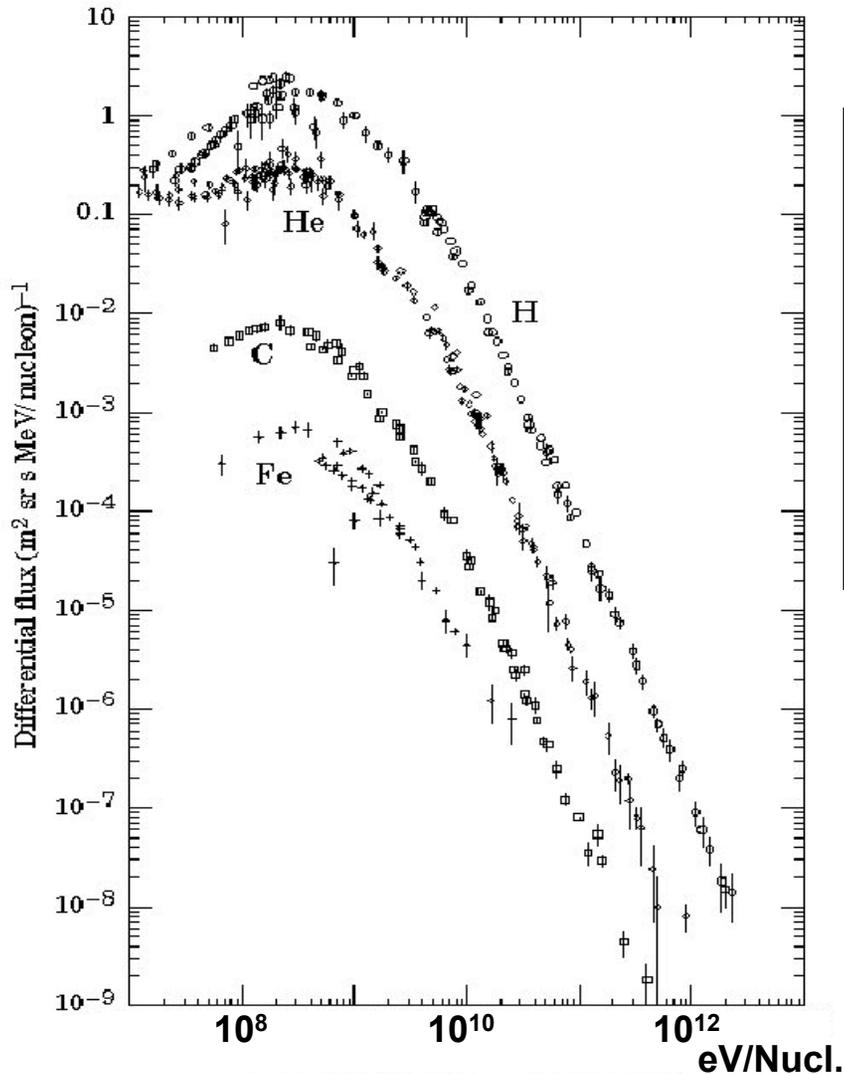


Après “correction” des systématiques

- Principal désaccord = échelle d'énergie ($\sim 30\%$)
- Systématiques attendues $\sim 20 - 25\%$ pour les 2 expériences



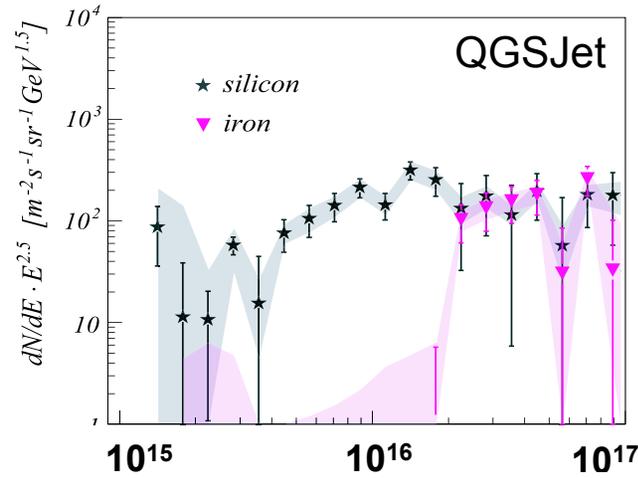
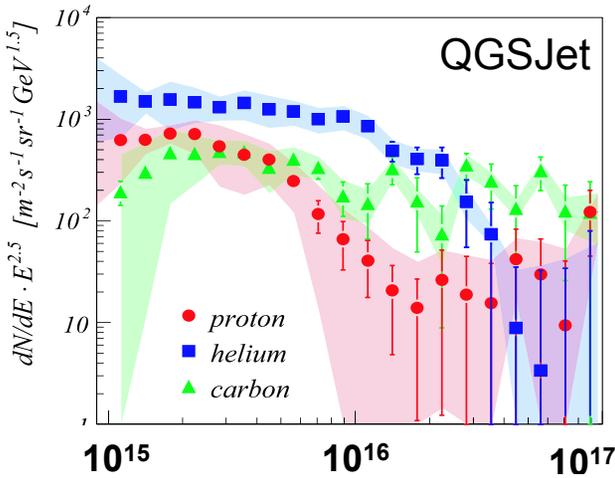
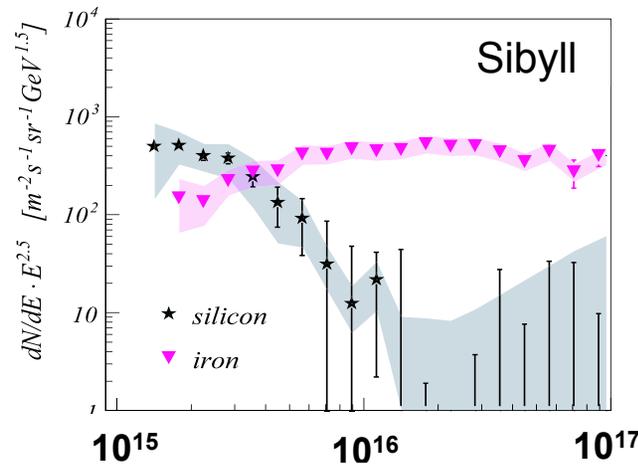
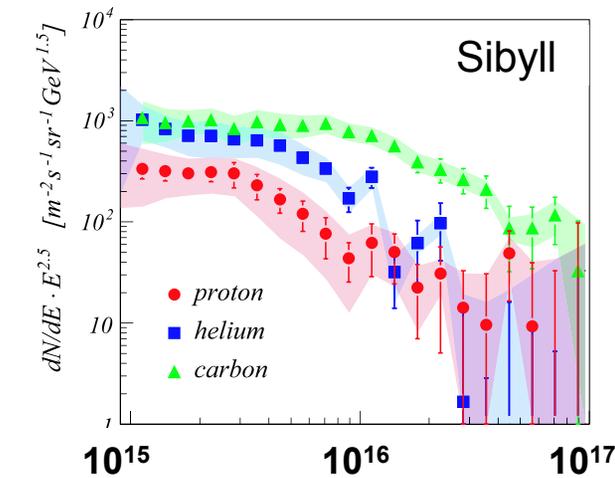
Nature des UHECRs



$E < 10^{13}$ eV :
Détection directe du rayon cosmique
(satellites et ballons atmosphériques)

⇒ Mesure directe de la charge du
cosmique par dépôt d'énergie

Nature des UHECRs



$E > 10^{15}$ eV (genou) :
 détecteurs au sol

→ Utilisation de la fraction N_e/N_μ pour discriminer les noyaux

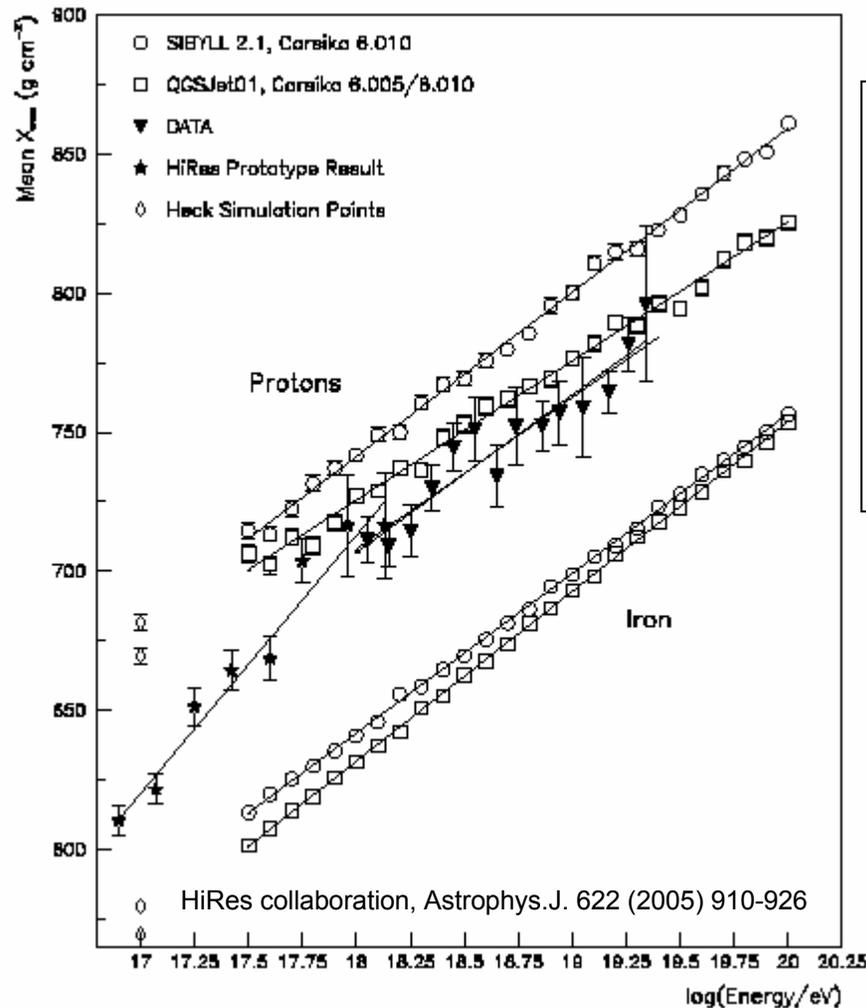
→ Incertitude forte (modèles hadroniques)

Transition noyaux légers vers noyaux lourds (?)

1. Changement de sources
2. Changement du régime de diffusion

Kascade collaboration, Astropart.Phys. 24 (2005) 1-25

Nature des UHECRs



$E > 10^{17}$ eV (~ second genou puis cheville) :
Etude du maximum de développement de la gerbe (X_{max}) par les détecteurs de fluorescence

→ Incertitudes liées aux modèles d'interaction ET à l'acceptance des détecteurs

Transition lourd / léger :

- avant ou après 10^{18} eV ?
- associée à l'apparition d'une composante extragalactique

Origine des UHECRs

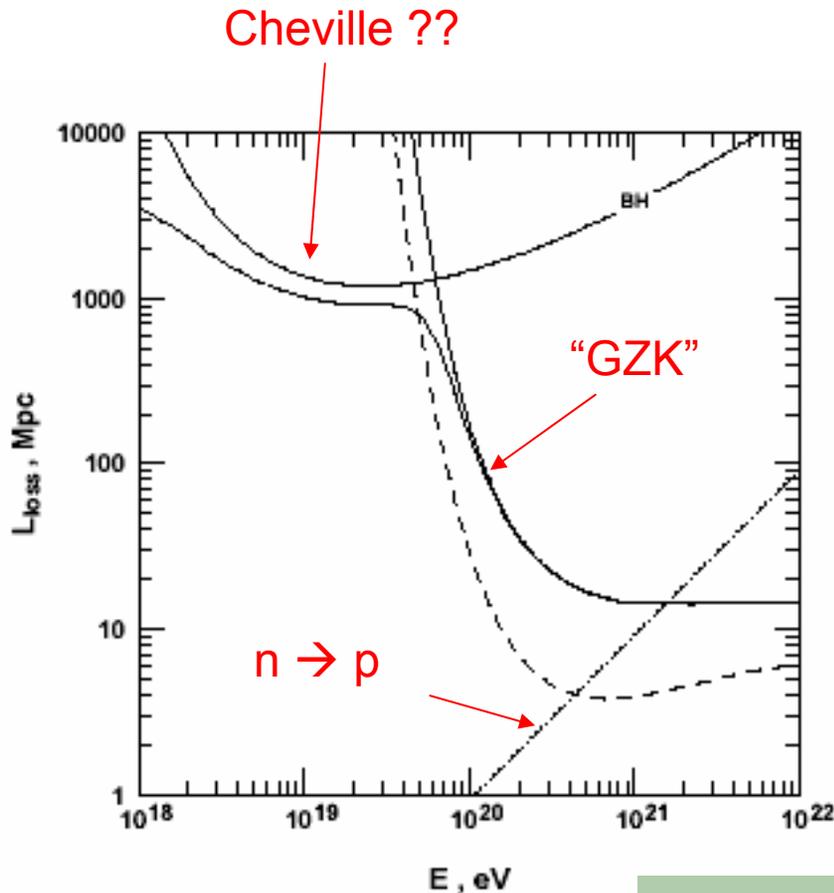
Très probable à basse E

- **Accélération astrophysique**
 - Accélération stochastique dans des chocs magnétisés
 - $E_{\max} \sim L, B; Z$
 - Candidats très nombreux, dont: AGNs (lobes radio), ICM, GRBs, pulsars
 - Spectre : loi de puissance d'indice $\alpha \sim 2 - 2.7$ (chocs relativistes,...)
 - α, E_{\max} et n_{sources} mal connus
 - Observation de sources aux hautes énergies

Possible seulement à haute E

- **“Top – down”**
 - Désintégration de particules supermassives
 - SHDM
 - Défauts topologiques
 - Production copieuse de photons et neutrinos
 - Contraintes dues au fond diffus au GeV
 - Production locale
 - Contourne GZK
 - Structure à grande échelle (halo galactique) aux hautes énergies

Propagation des protons

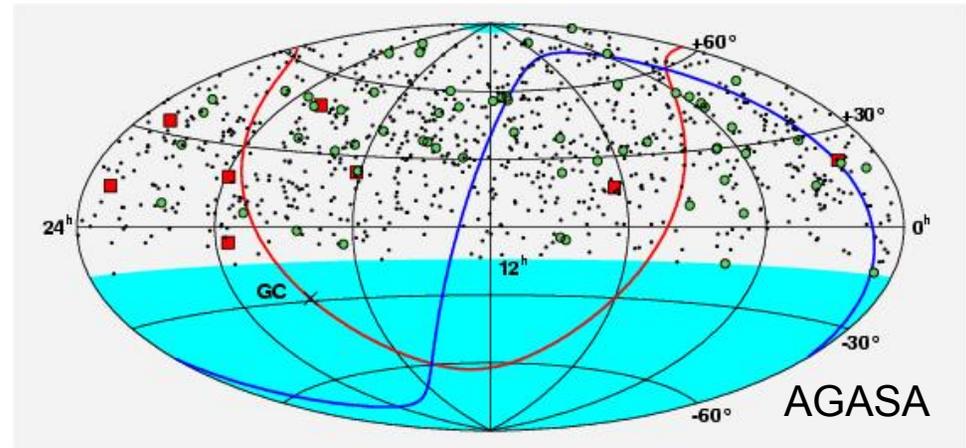
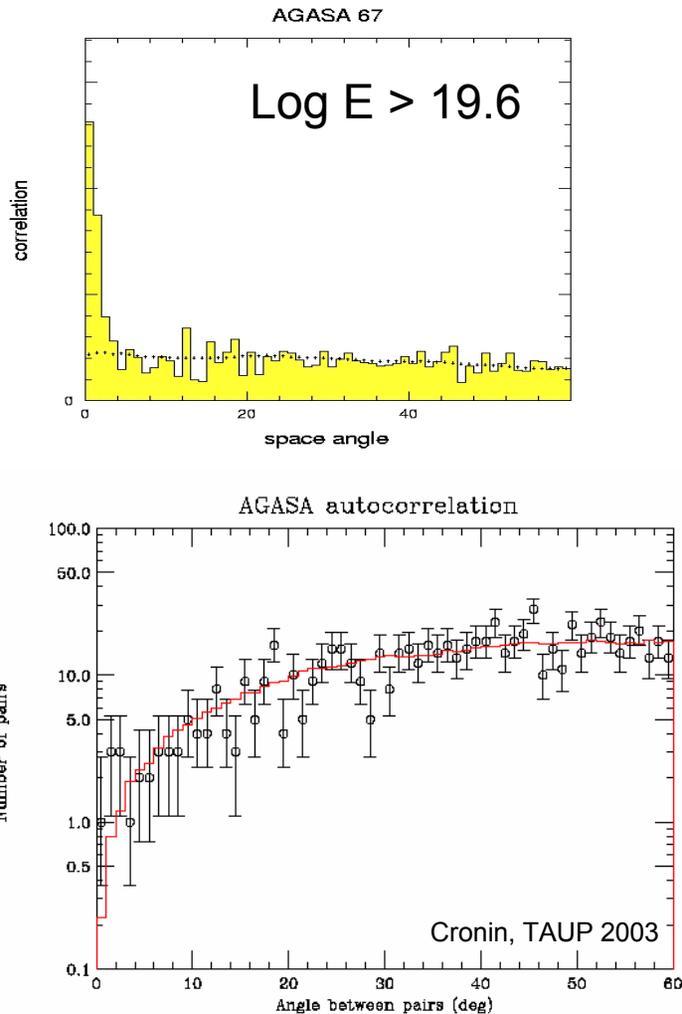


- Fonds impliqués : CMB, fond infrarouge
- Photons et neutrinos secondaires
→ flux "assurés"
- Cas des noyaux : photodissociation \sim GZK (fond IR plus crucial)
- Effet des champs B : déflexions, temps de propagation rallongé

Contournement? LIV (modification phénoménologiques des relations de dispersion)
→ Contraintes sur modèles ?

Des sources?

- $E > 10^{19.6}$: clustering (AGASA)
- Fluctuation statistique?



- Aux plus hautes énergies :**
- Réduction de l'horizon (GZK)
 - Réduction des déflexions

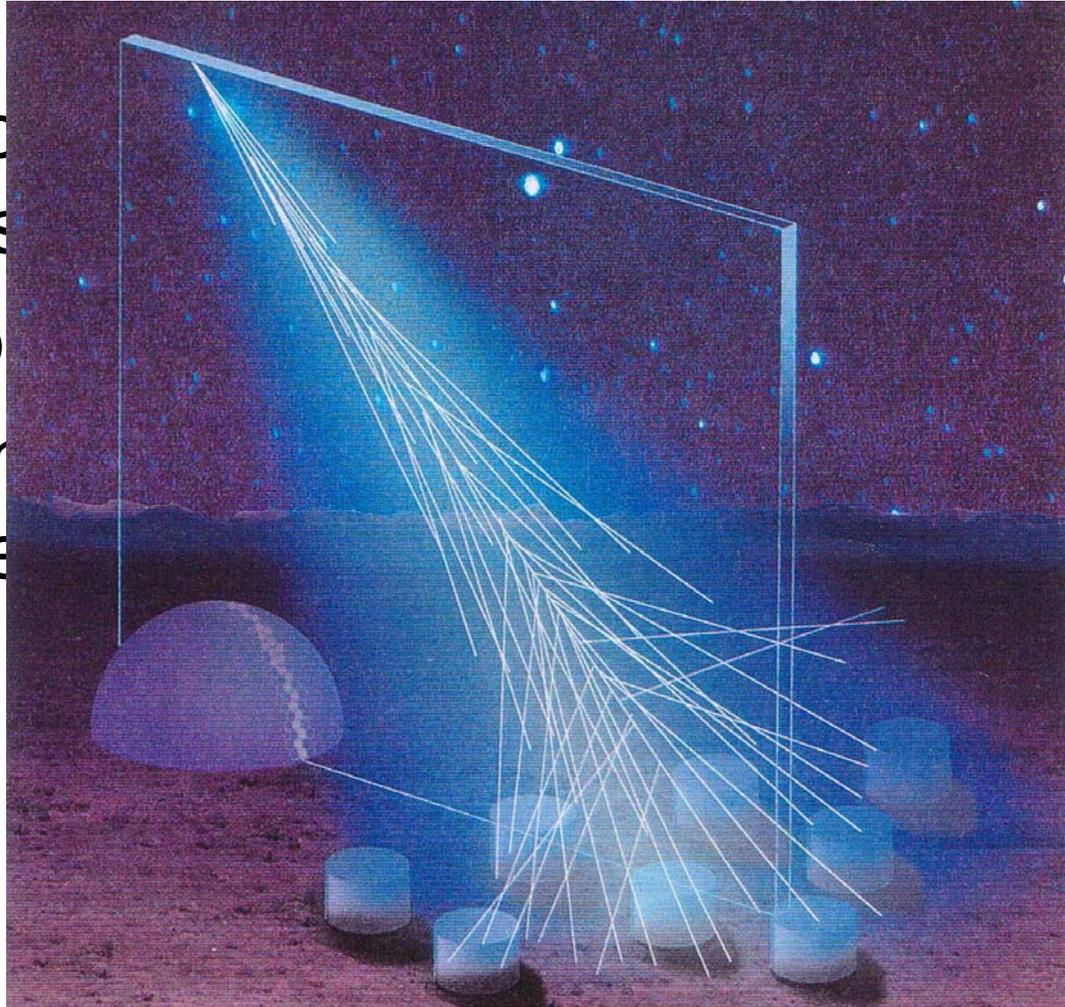
➔ **Sources attendues**

Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

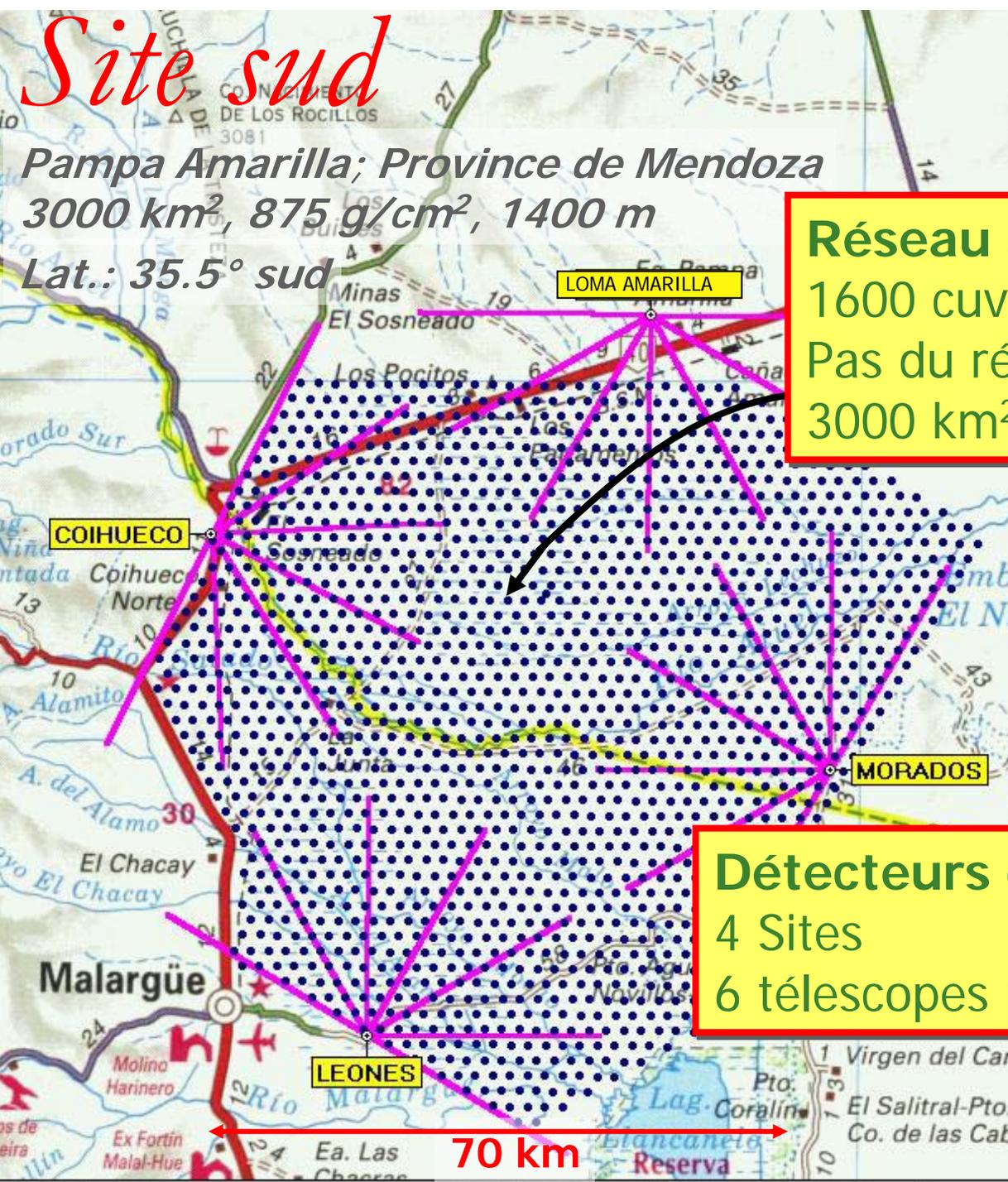
L'Observatoire Pierre Auger

- But principal : détecter les UHECRs
- Flux faible
- Compréhension de la propagation des UHECRs à meilleure énergie :



Site sud

Pampa Amarilla; Province de Mendoza
3000 km², 875 g/cm², 1400 m
Lat.: 35.5° sud

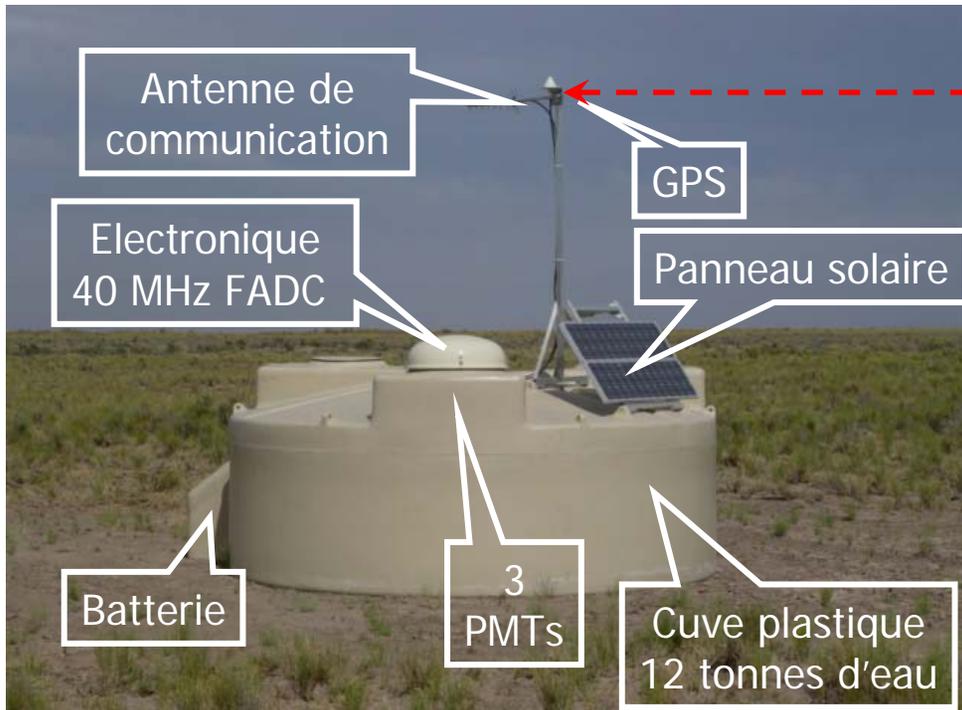


Réseau au sol (SD):
1600 cuves d'eau
Pas du réseau : 1.5 km
3000 km²

Détecteurs de Fluorescence (FD):
4 Sites
6 télescopes par site (180° x 30°)



Réseau de surface

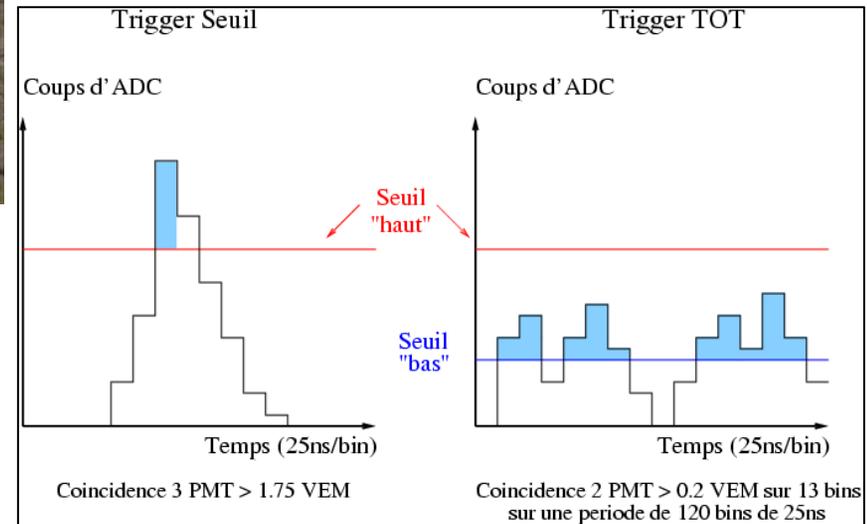


Ondes hertziennes



Acquisition centrale
Sélection spatio-temporelle

Trigger interne



Auto-calibration de la cuve:

1 VEM = Signal moyen déposé par un muon traversant la cuve verticalement en son centre

Chaîne d'installation



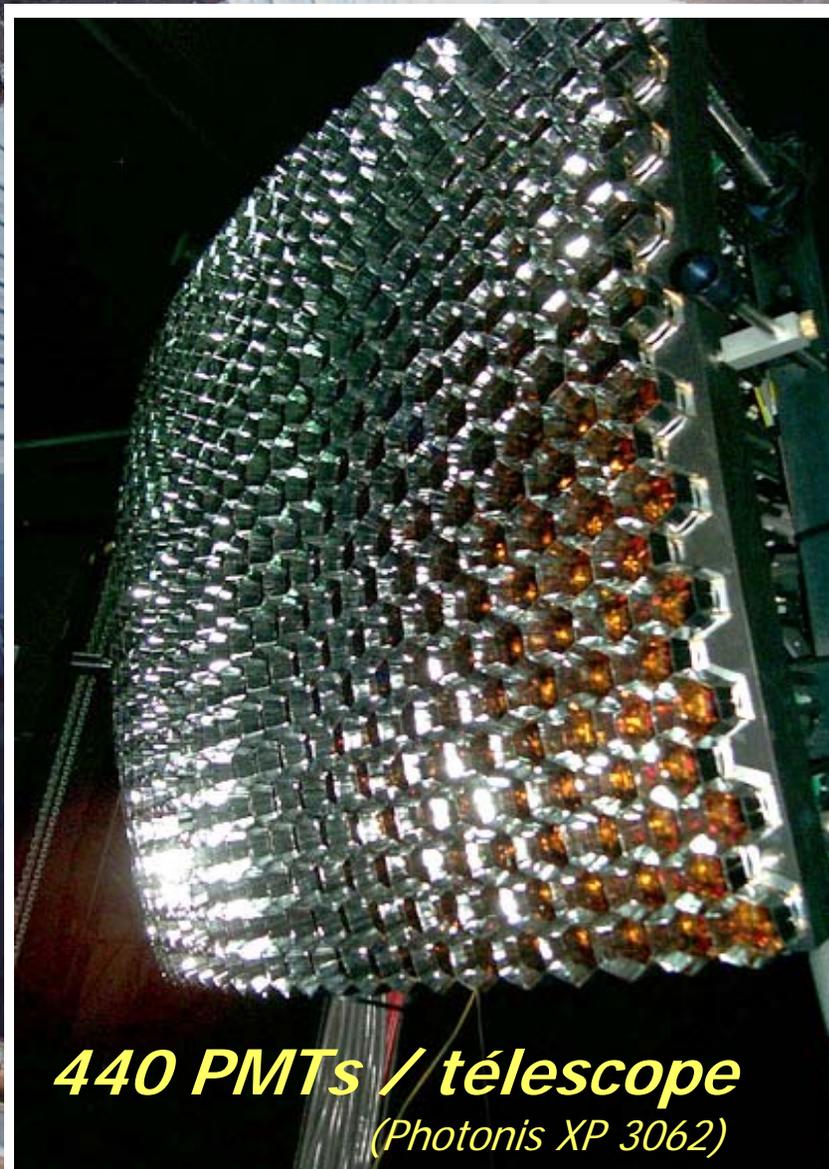
installation de l'électronique



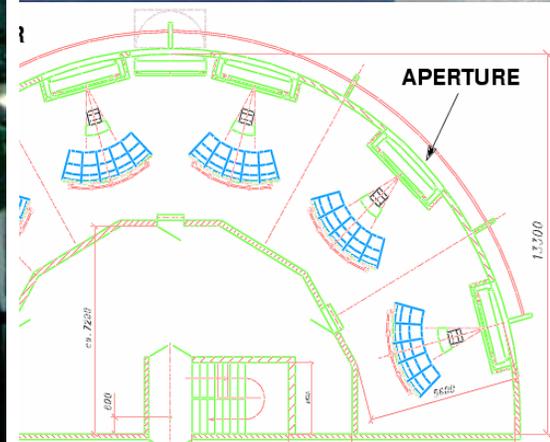
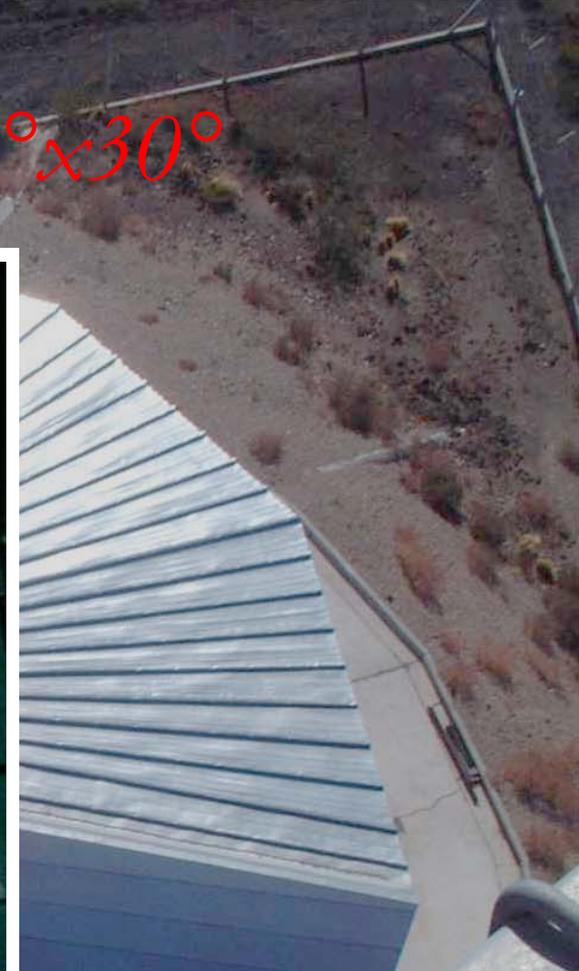
P

Dép

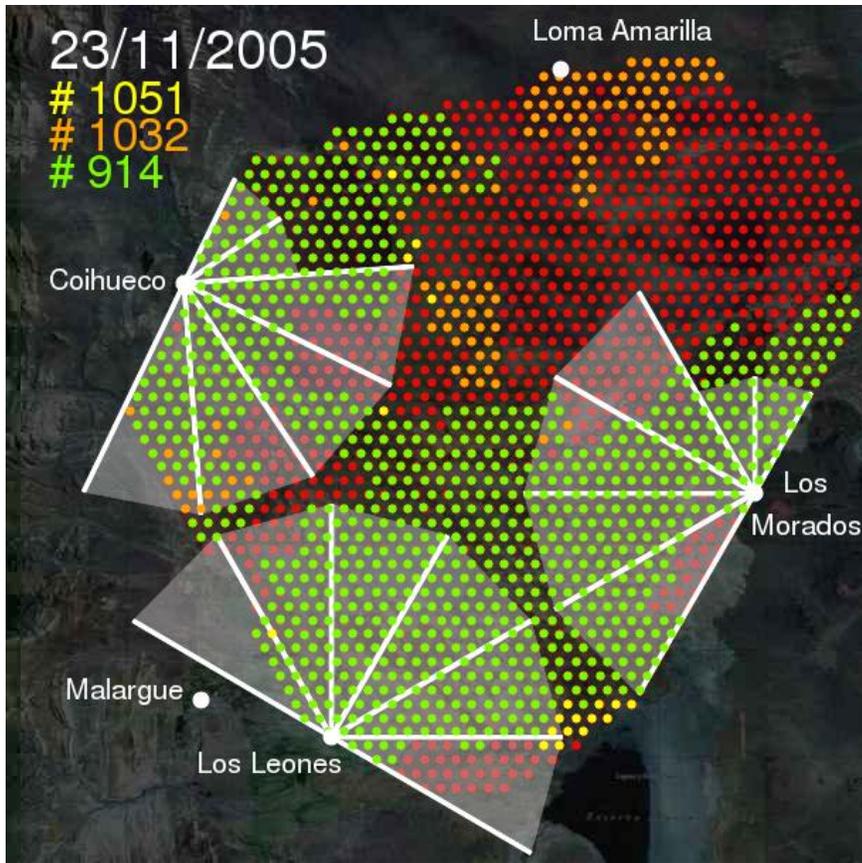
Six télescopes regardant chacun $30^\circ \times 30^\circ$



440 PMTs / télescope
(Photonis XP 3062)

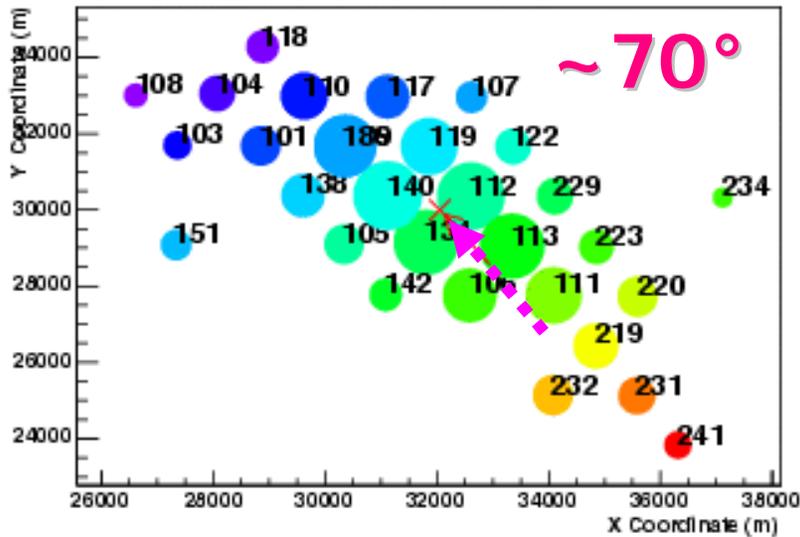


Déploiement du réseau

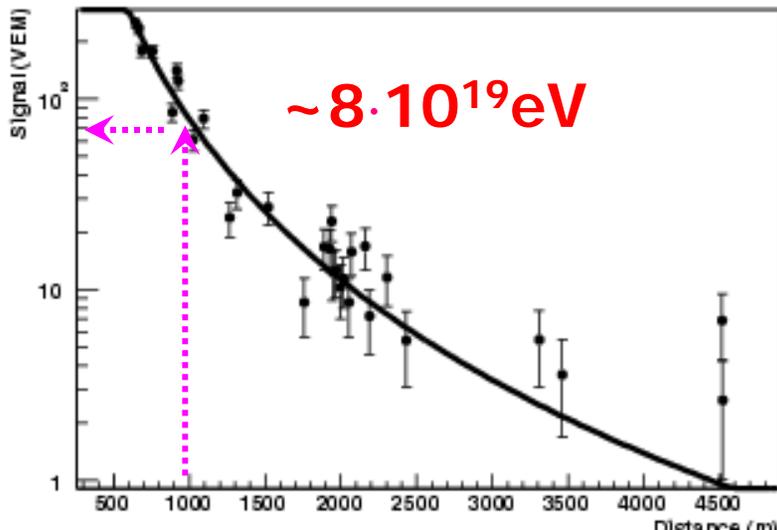


Un événement stéréo hybride

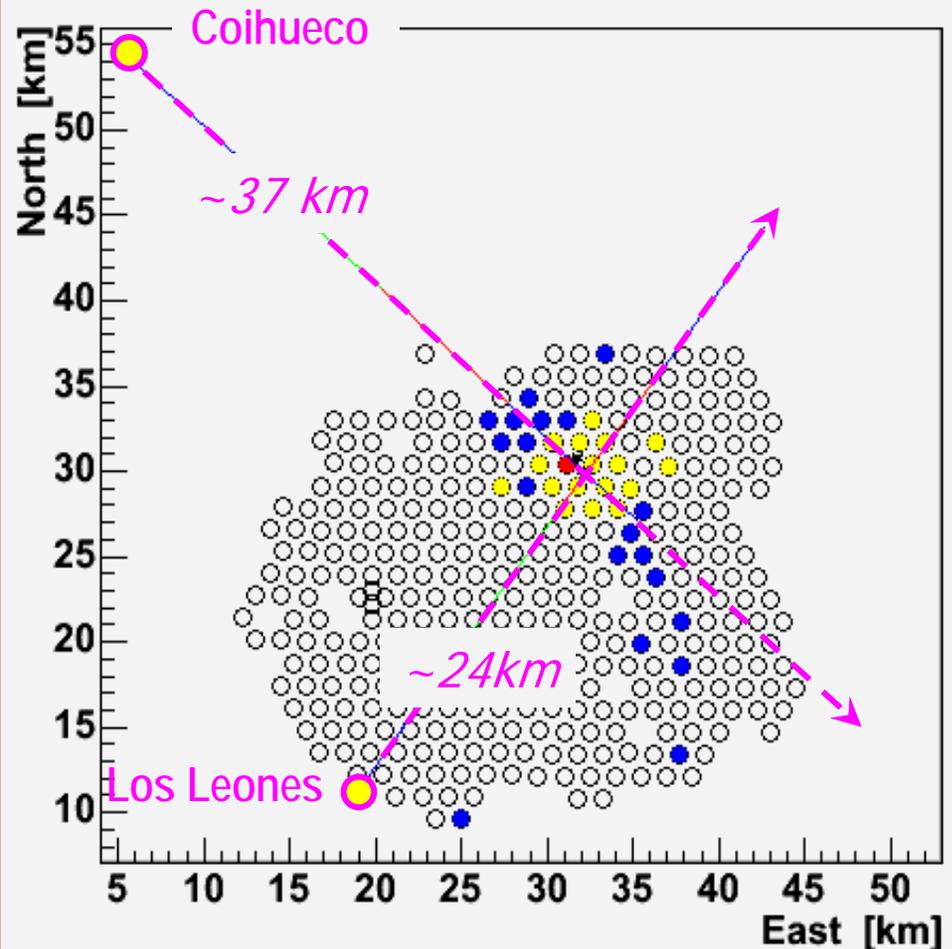
Hit Locations (Red: First, Violet: Last)



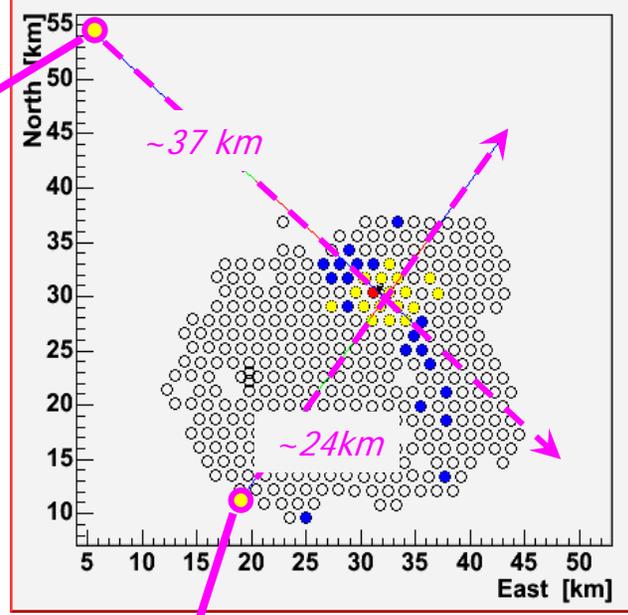
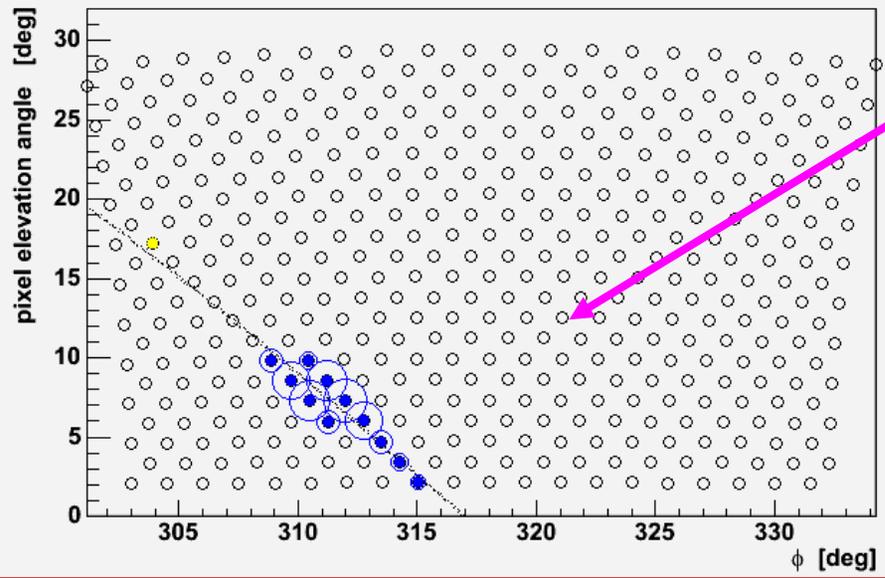
LDF



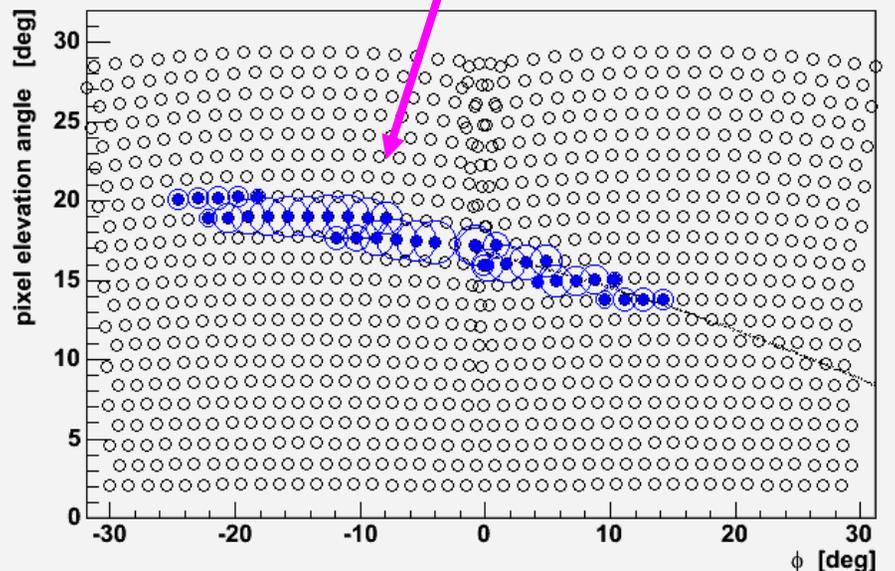
Stations-SDP Event Id: 850019



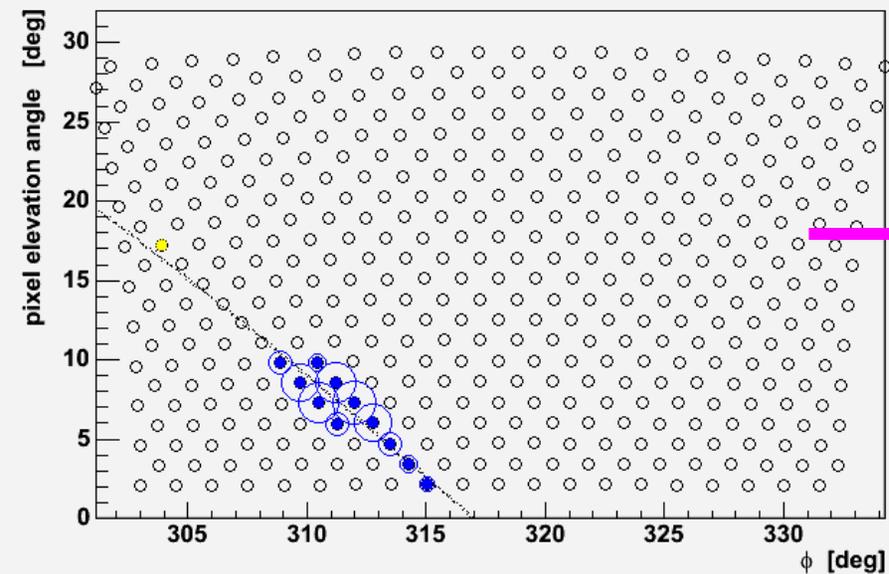
SDP Run 469 Event 197 Eye Id: 4



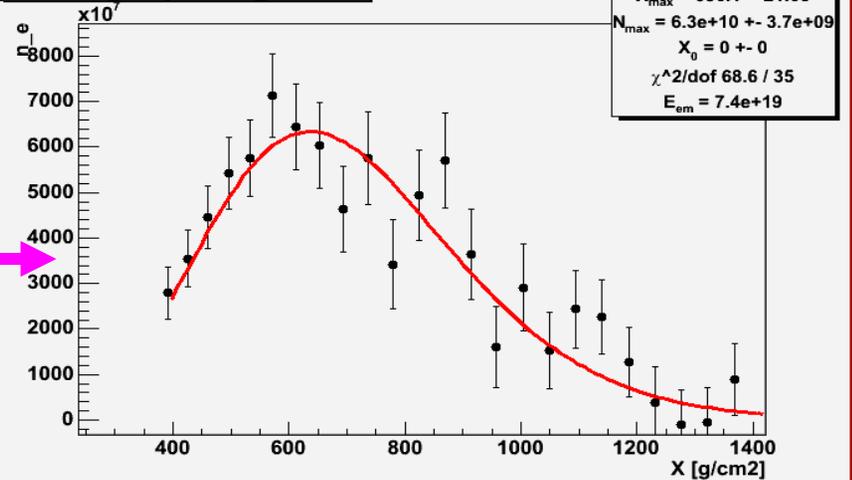
SDP Run 1 Event 687 Eye Id: 1



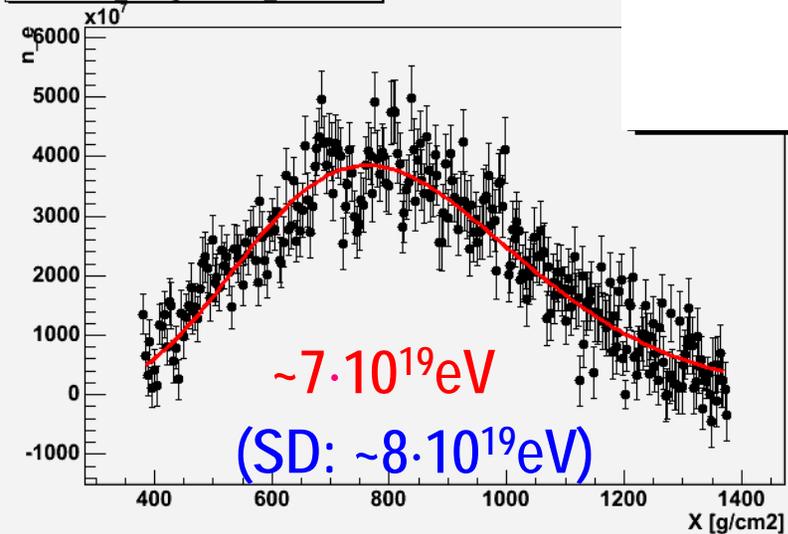
SDP Run 469 Event 197 Eye Id: 4



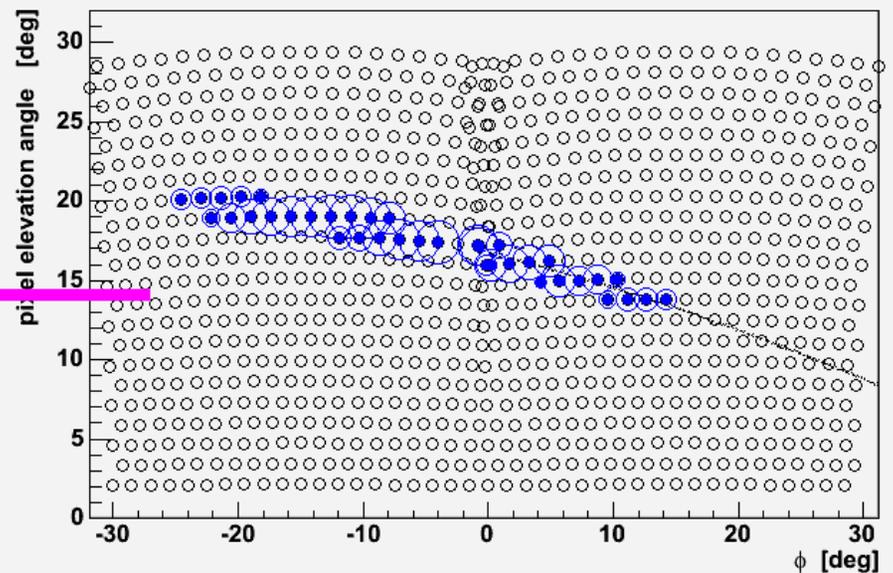
850019 Longitudinal Profile



850019 Longitudinal Profile



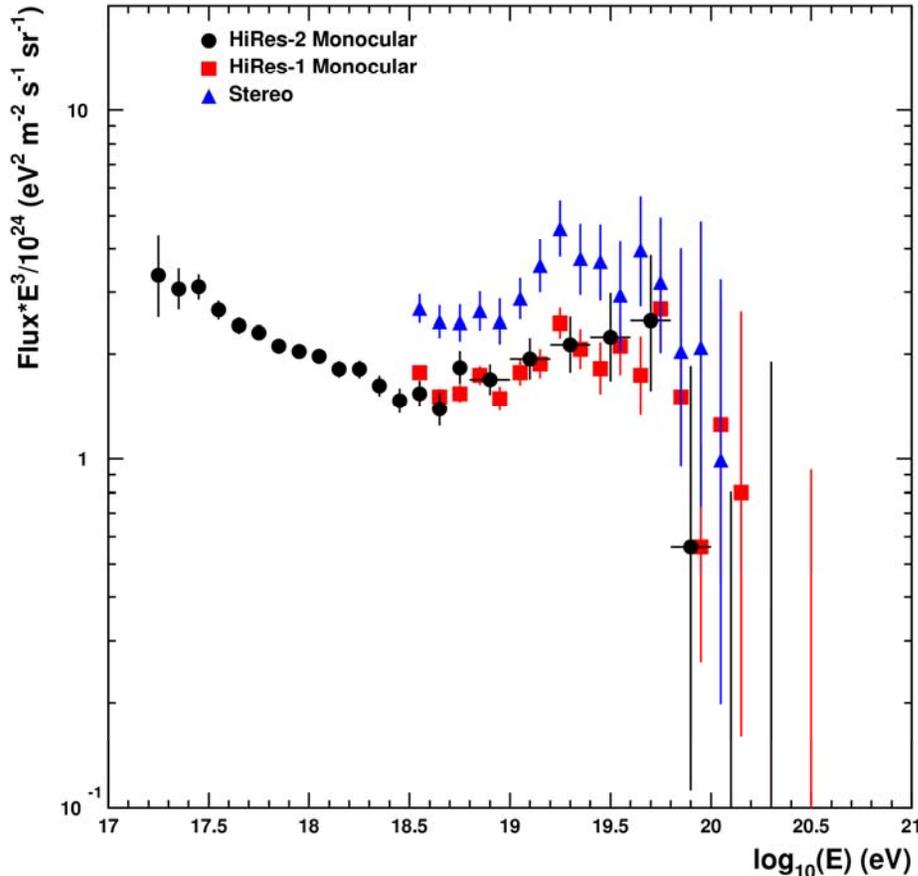
SDP Run 1 Event 687 Eye Id: 1



Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- **Résultats observationnels récents**
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

Le spectre : HiRes



HiRes confirme la coupure GZK

- HiRes1 (mono) $\sim 5000 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$
- HiRes (Stereo) $\sim 2500 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$
- Auger-ICRC $1750 \text{ km}^2 \text{ sr yr} \sim \text{AGASA}$

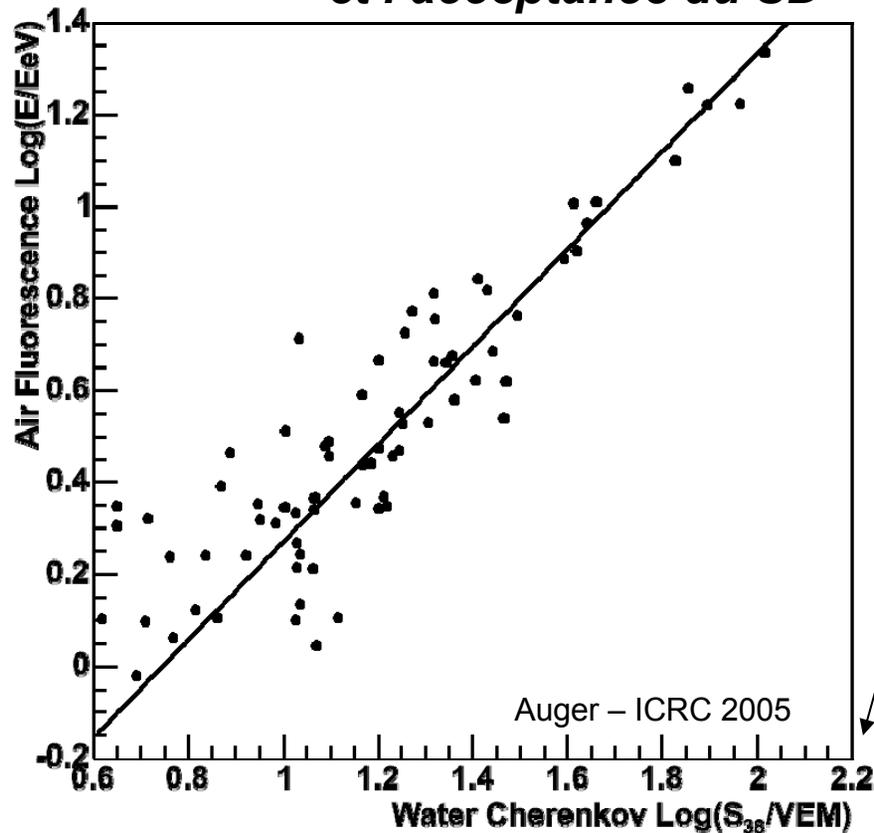
Analyse très délicate:

- Estimation de l'acceptance difficile
- Biais systématique entre les données mono et stéréo
 - Besoin d'un contrôle parfait de l'atmosphère

Le spectre : Auger

Données hybrides : combine les avantages du FD et du SD
On utilise l'échelle d'énergie du FD (moins MC-dépendante)
et l'acceptance du SD

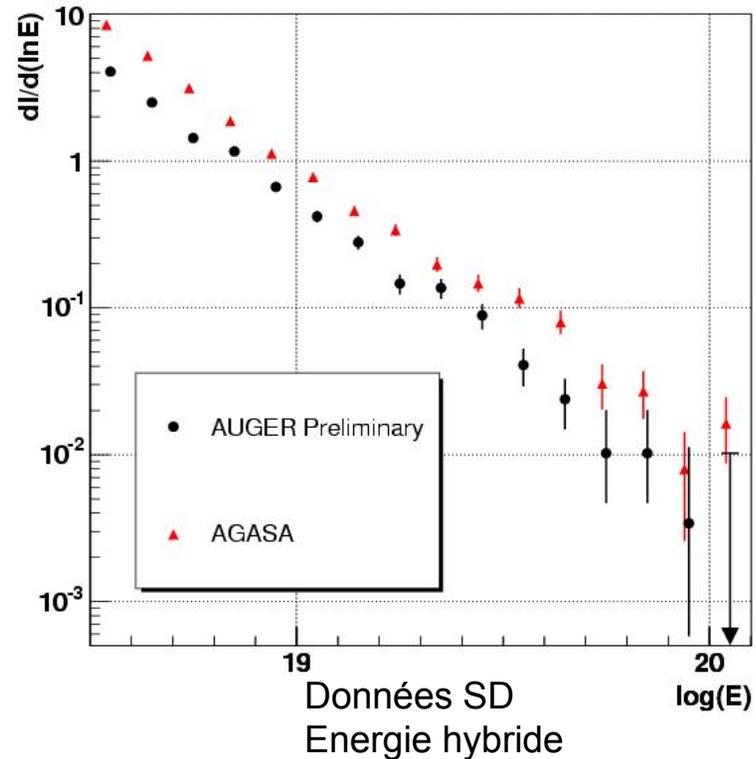
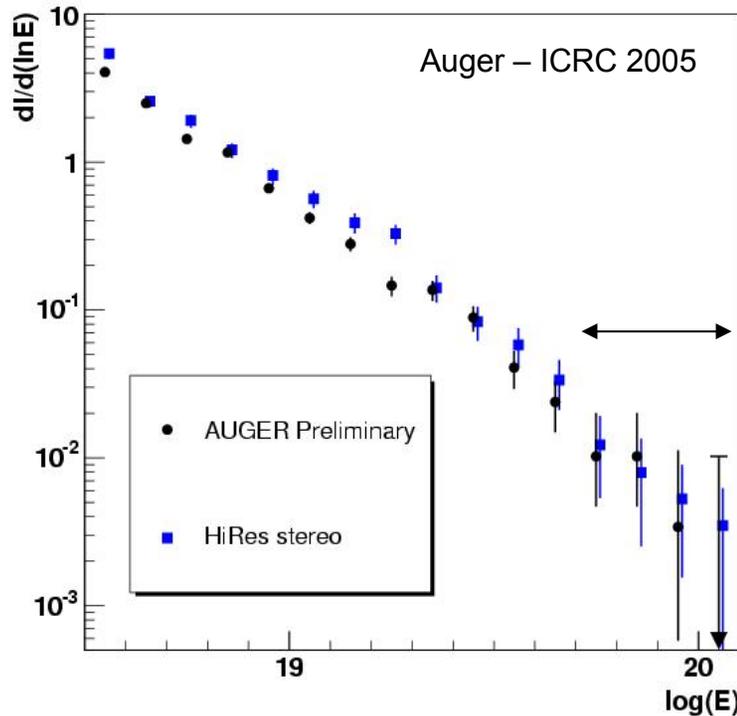
Énergie FD
(mesure
calorimétrique)



“Signal”
des cuves

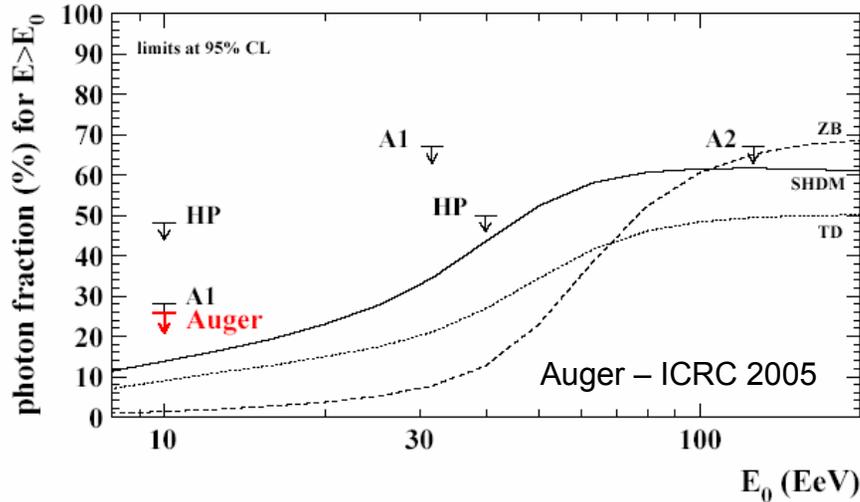
Signal interpolé à 1000 m du
coeur de la gerbe, tel qu’il
serait pour une gerbe incidente
à 38 deg. Zénith
(méthode “S1000+CIC”)

Premier spectre Auger

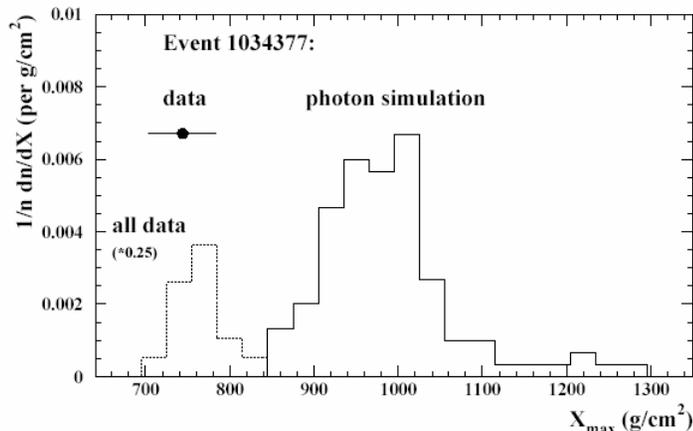


- Echelle d'énergie du FD...
- Systématiques larges, vont vite diminuer
- Lot de données restreint (trigger de niveau 5)

Proportion de photons dans les UHECRs (Auger-FD)



- Comparaison du X_{\max} des événements avec celui attendu pour des photons
 → Valeur limite supérieure sur la fraction de photons à 10 EeV



- Contraintes fortes potentielles sur les modèles “top down”

Structures à petite échelle à $E > 10 \text{ EeV}$

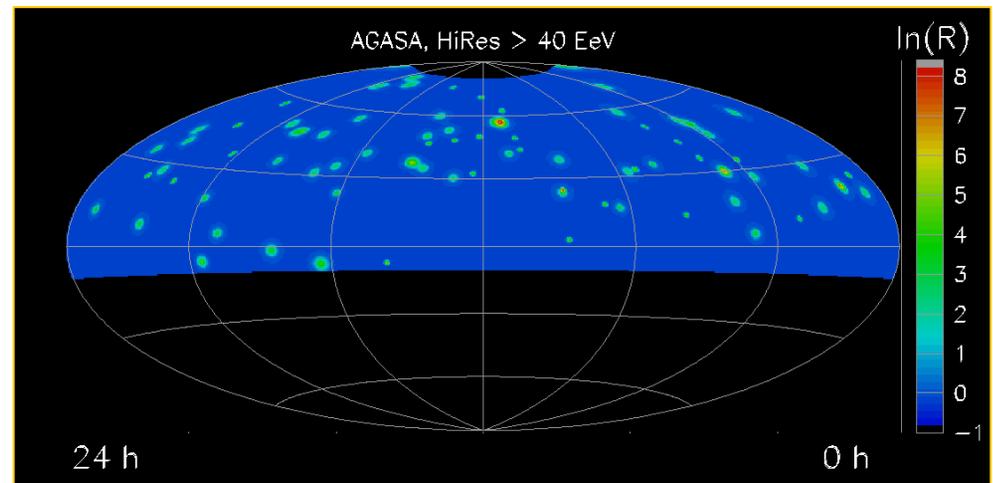
- HiRes : pas d'autocorrélation nette (mais manque de statistique encore)
- **Un amas de 5 événements** (triplet AGASA @ $E > 40 \text{ EeV}$ + 1 HiRes @ $E \sim 38 \text{ EeV}$ + 1 HiRes @ $10 < E < 30 \text{ EeV}$)
 - Analyse HiRes : $P(\text{amas}) \sim 28\%$
- **Corrélations avec les BI Lacs :**
 - Événements AGASA, $E > 40 \text{ EeV}$
 - Événements HiRes, $E > 10 \text{ EeV}$ ($P \sim 0.5 \%$)

→ Peut-être des particules neutres; doit être vérifié avec un lot de données indépendantes
- **Auger** : on attend plus de statistique...

HiRes, *Astrophys.J.* 623 (2005) 164-170

Carte de MLR :

$$\mathcal{R}(n_s, \vec{x}_s) = \frac{\mathcal{L}(n_s, \vec{x}_s)}{\mathcal{L}(0, \vec{x}_s)}$$
$$= \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{n_s}{N} \left(\frac{Q_i(\vec{x}_i, \vec{x}_s)}{R_i(\vec{x}_i)} - 1 \right) + 1 \right\}$$

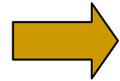


Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - **Analyse des anisotropies à “basse” énergie**
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

Données Auger à “basse énergie”

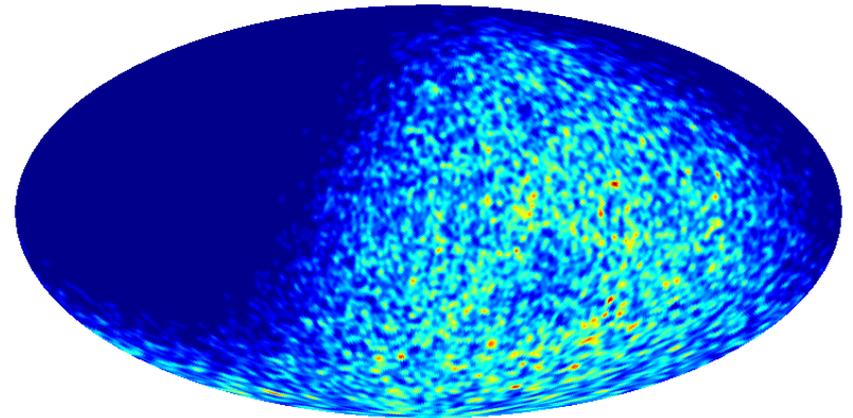
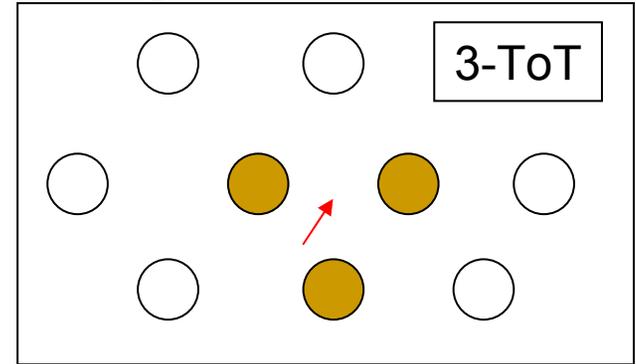
- Un trigger efficace : le “Compact 3-ToT” → événements reconstruits avec 3 cuves en configuration compacte
- Résolution angulaire $\sim 2^\circ$ @ EeV



Excellente statistique aux énergies \sim EeV
(pas le premier but d’Auger)
L’acceptance sature à ~ 3 EeV

+ Données hybrides :

- Reconstruction FD améliorée significativement avec les signaux d’une seule cuve
- Meilleure résolution angulaire $\sim 1^\circ$ @ EeV
- Bas seuil en énergie (< 1 EeV)

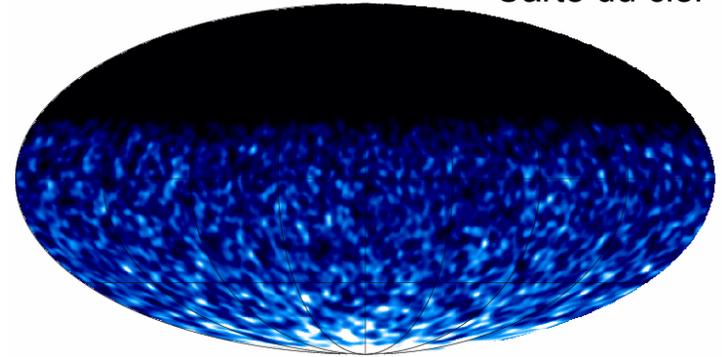


Carte des 3ToT en coord. gal.
(année 2004)

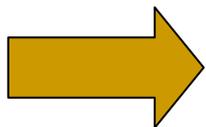
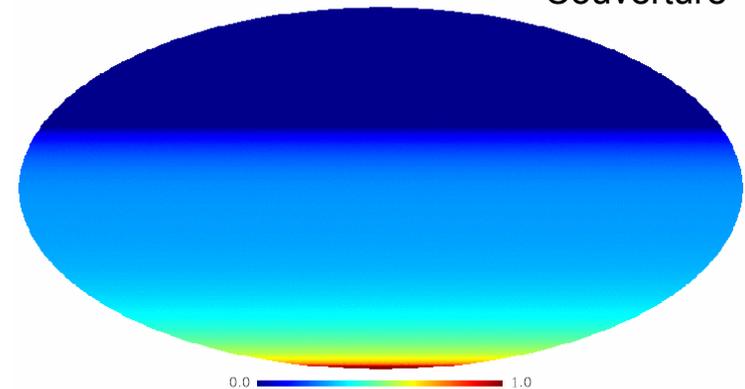
Difficulté : couverture du ciel

- Nécessité de connaître le nombre d'événements attendus dans chaque direction
 - Des systématiques nombreuses à basse énergie:
 - Instabilités du détecteur
 - Effets atmosphériques
- Modulation à grande échelle du nombre d'événements sur le ciel
- 2 stratégies complémentaires:
 1. Modélisation complète de l'*acceptance* du détecteur
 2. Permutations astucieuses des événements (*scrambling*)

Carte du ciel

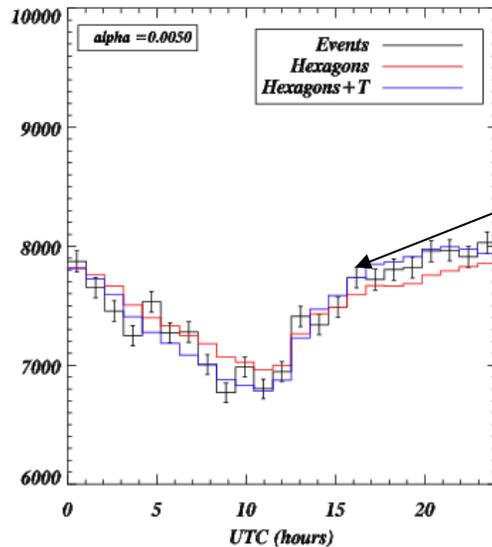


Couverture



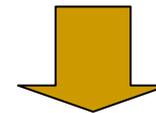
Analyse cruciale pour les anisotropies à grande échelle

Variations du taux d'événements

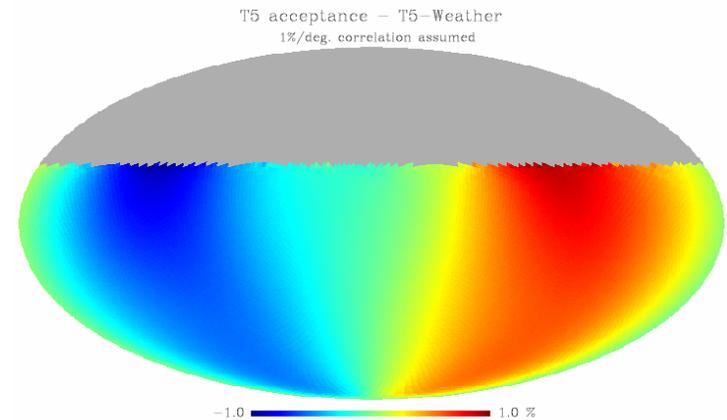
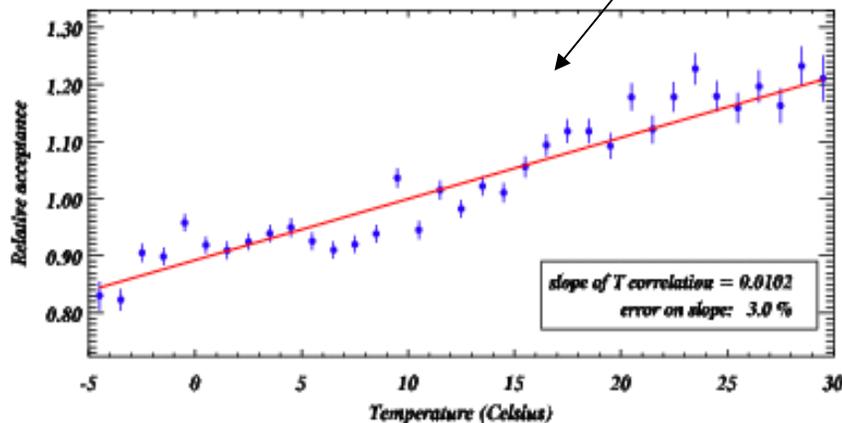


Modulation journalière
(maintenance/déploiement du réseau)

Effets de température
→ Modulation journalière et annuelle

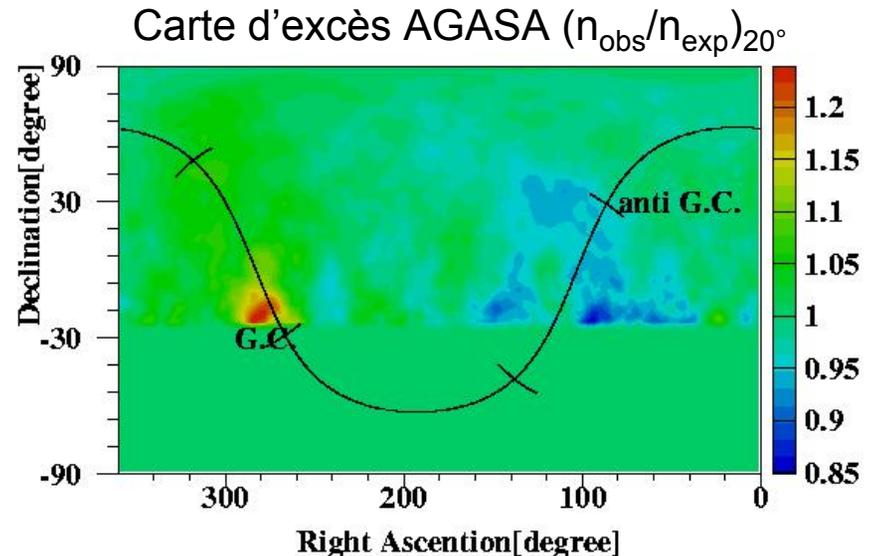


Conséquence sur la couverture du ciel :



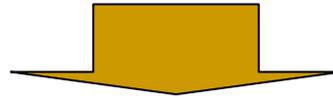
Excès vers le centre galactique (GC)

- AGASA 1998 :
 - Excès annoncé *a posteriori* dans la bande d'énergie [$10^{17.9}$ – $10^{18.3}$] eV
 - GC hors de vue, mais proche : 308 obs / 242 attendus (4σ)
 - Couverture supposée R.A.-invariante
- 2001 : Réanalyse de SUGAR (hémisphère Sud, années 60) :
 - Source ~ ponctuelle à 7 deg. du GC



Une connection TeV – EeV ?

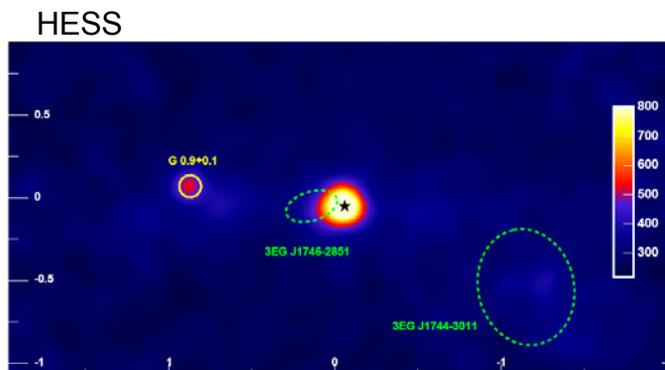
- Accélération de protons dans un (des) objet(s) du GC à l'EeV



- 1) Diffusion hadronique $pp \rightarrow pp + \pi^0 \rightarrow$ Flux gamma avec $\alpha \sim 2.2$ si $\alpha_{\text{proton}} \sim 2.2$
- 2) $pp \rightarrow np + \pi^+$

$p\gamma_{\text{IR}} \rightarrow n$ via photoproduction de pions / photodésintégration de noyaux

\rightarrow Flux de neutrons

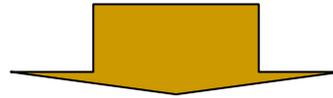


Source 3 EG J1746-2851 ?
Source HESS au TeV~ SGR A* ?

Crocker et al., ApJ,622:892-909 (2005)
Grasso, Maccione, astro-ph/0504323

Une connection TeV – EeV ?

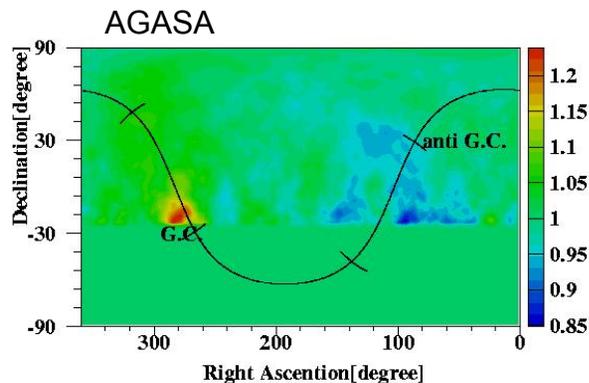
- Accélération de protons dans un (des) objet(s) du GC à l'EeV



- 1) Diffusion hadronique $pp \rightarrow pp + \pi^0 \rightarrow$ Flux gamma avec $\alpha \sim 2.2$ si $\alpha_{\text{proton}} \sim 2.2$
- 2) $pp \rightarrow np + \pi^+$

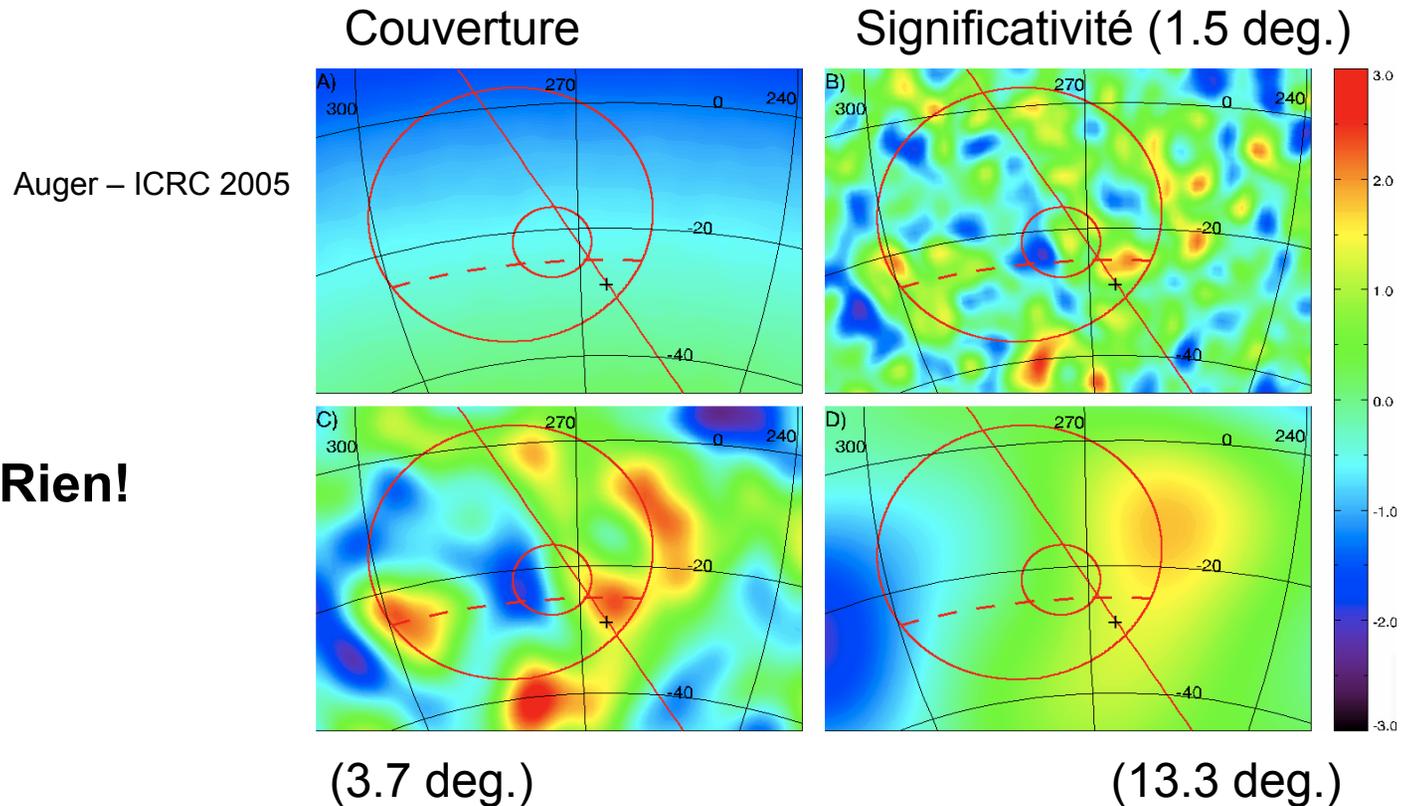
$p\gamma_{\text{IR}} \rightarrow n$ via photoproduction de pions / photodésintégration de noyaux

\rightarrow Flux de neutrons



↓
Anisotropie d'UHECRs
($EAS_{\text{neutron}} = EAS_{\text{proton}}$)

Le GC à $\sim 10^{18}$ eV vu par Auger



Limite sur une source
ponctuelle pour $0.8 < E < 3.2$ EeV :

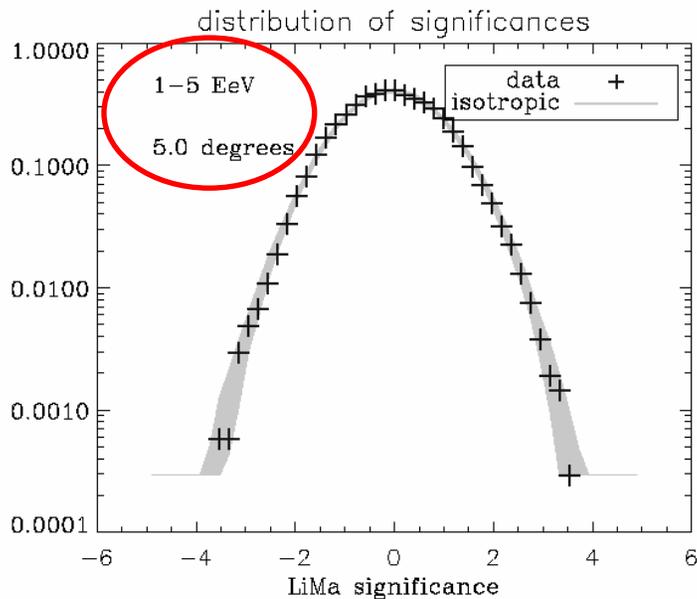
$$\Phi_{GC} < 2.5 \epsilon \xi \times 10^{-15} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ @ 95\%}$$

acceptance

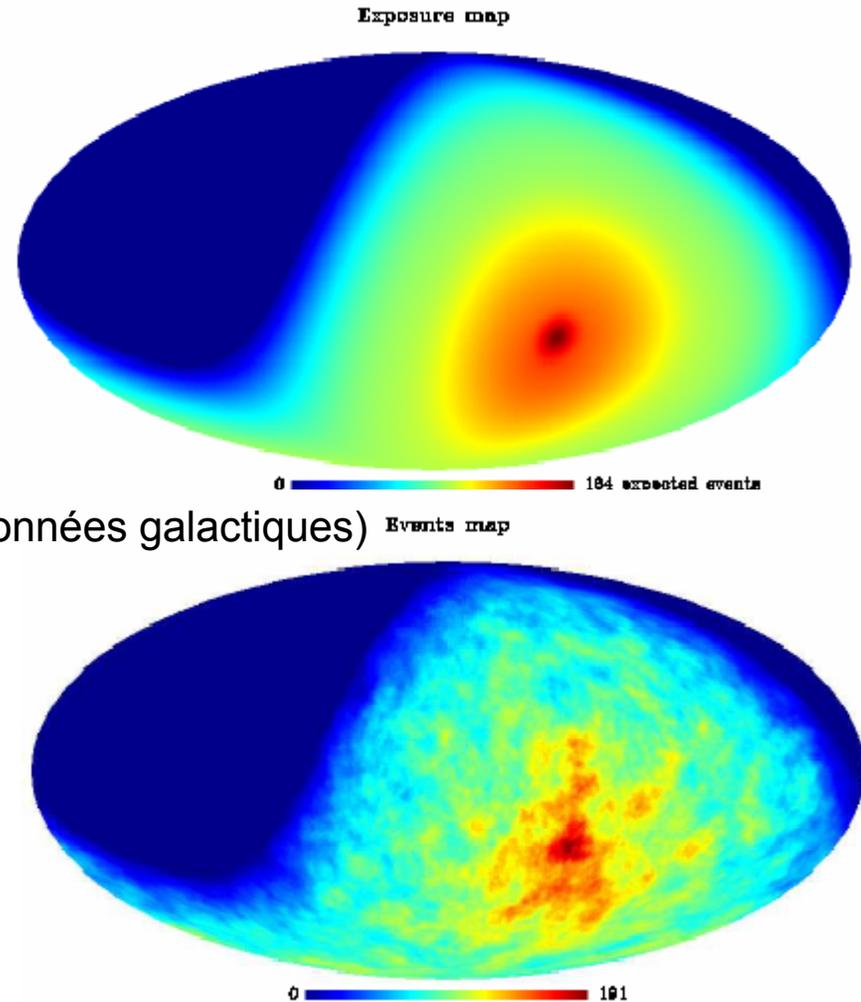
échelle d'énergie

Recherche aveugle de sources avec Auger

Pas d'excès apparents
à petite échelle
dans cette bande d'énergie
($1 < E < 5 \text{ EeV}$)



(Coordonnées galactiques) Events map



Spectre de puissance angulaire des UHECRs

- Jusqu'à présent: études limitées
- Analyse harmonique en ascension droite des événements
 - ➔ Une seule dimension
- Ajustement d'un dipôle sur les données
 - ➔ Ordres supérieurs non pris en compte
- Nous avons adapté les méthodes de la communauté du CMB pour calculer les $C(l)$ d'une carte de rayons cosmiques

Spectre de puissance : définitions

- Développement des fluctuations du nombre d'événements sur la base des harmoniques sphériques:
- Champ stochastique et homogène au niveau de ses propriétés spectrales:
- Estimation du spectre de puissance:
- Le bruit étant poissonien, tout peut se calculer analytiquement!

$$\Delta(\vec{n}) = \sum_{\ell \geq 0} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\vec{n})$$

$$\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'}^* \rangle_r = C_{\ell} \delta_{\ell \ell'} \delta_{m m'}$$

$$\tilde{C}_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} |\tilde{a}_{\ell m}|^2$$

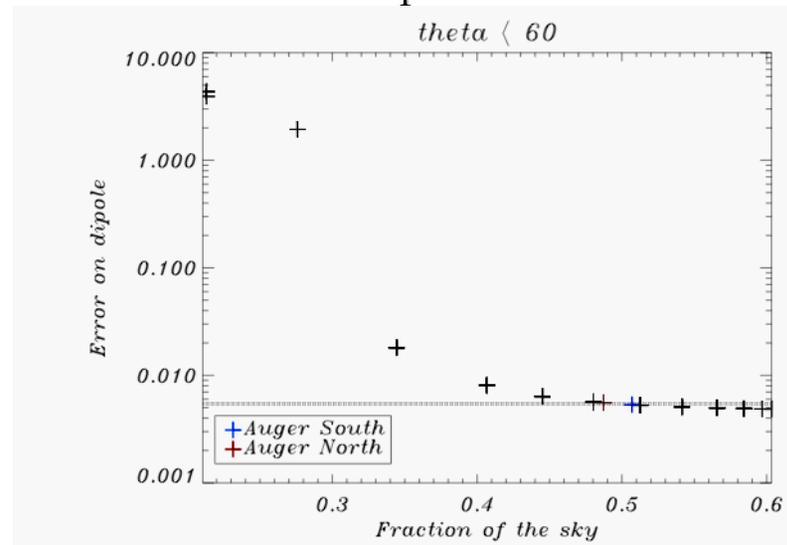
Couverture partielle du ciel

Couverture partielle du ciel : les $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{l})$ que l'on peut calculer à partir des données sont liés aux vrais $\mathbf{C}(\mathbf{l})$ par un noyau de convolution:

$$\langle \tilde{C}_\ell \rangle = \sum_{\ell'=0}^{+\infty} M_{\ell\ell'} C_{\ell'}$$

On peut calculer $M(\ell,\ell')$ à partir de la couverture de l'expérience.

- A bas ℓ , on peut remonter des $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{l})$ aux $\mathbf{C}(\mathbf{l})$ si la couverture du ciel est assez grande;
c'est le cas d'Auger Sud

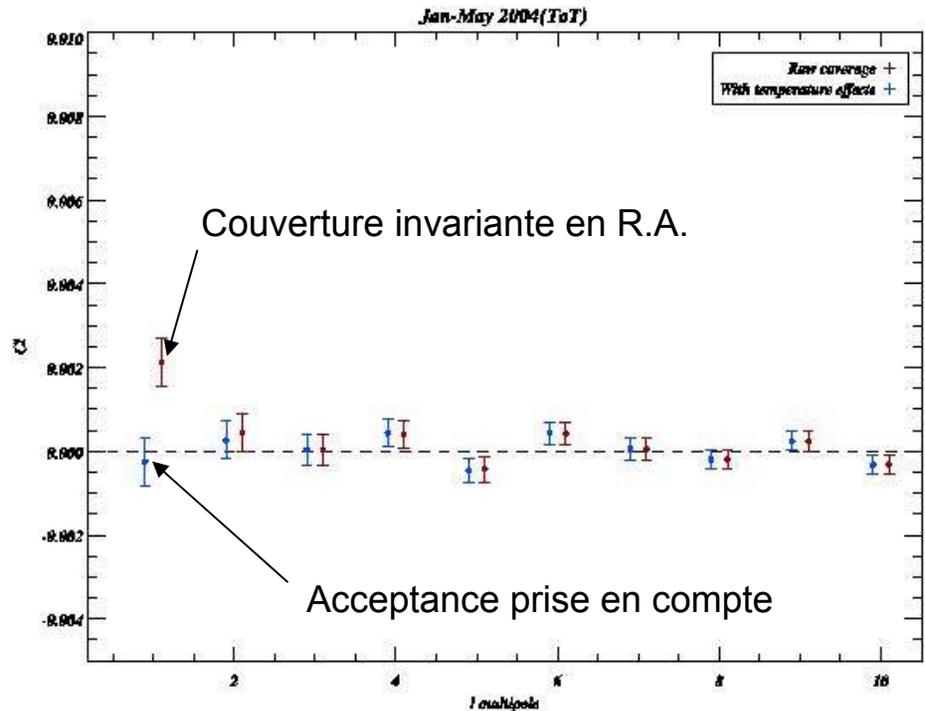


Deligny et al., JCAP, 0410:008, 2004

Exemple de calcul de $C(l)$

Tests fins de l'isotropie du ciel UHECR à grande échelle:

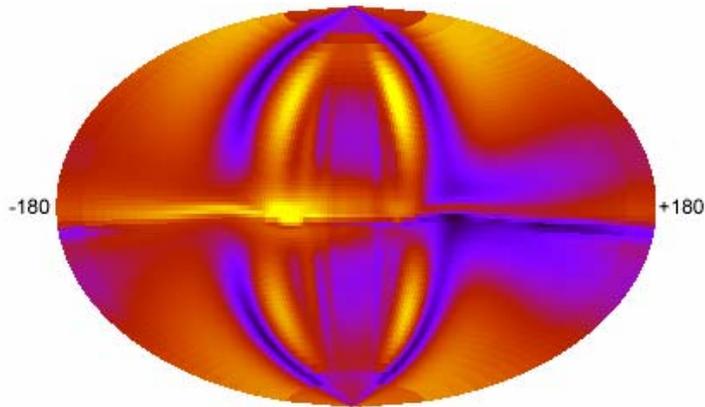
- A \sim EeV, structures galactiques attendues (si la cheville marque bien la transition galactique - extragalactique)
- A haute énergie : halo de matière noire, quelques sources très étendues...



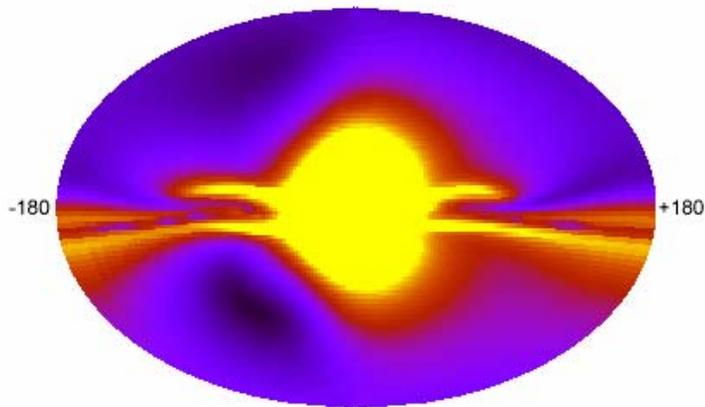
Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

Effet des champs B galactiques sur les anisotropies



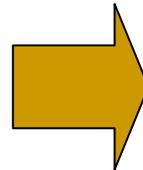
0 2 4 6 8 10 degrés



- Ordre de grandeur du champ connu : composantes régulière + turbulente $\sim \mu\text{G}$
- Topologie globale encore inconnue

Rayon de Larmor :

$$R/\text{kpc} \sim (E/\text{EeV}) / (Z B/\mu\text{G})$$



Effet important sur les directions d'arrivée des UHECRs (dilution des sources)

Cartes de déflexion pour 2 modèles différents de champs B
Rigidité = 4×10^{19} V
(Kachelriess et al., astro-ph/0510444)

Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - **Champs extragalactiques**
- Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs

Modèles de champs B extragalactiques

- Origine:
 - Graine uniforme “cosmologique”
 - Vents galactiques / d’AGN
 - Génération aux chocs : par exemple mécanisme de Biermann (+ amplification dynamo), instabilités
- Evolution cosmologique (simulation de grandes structures) selon MHD
- Dans tous les cas, B renormalisé par $(B_{\text{cluster}})_{z=0} \sim \mu\text{G}$
- Difficile de confronter avec les données actuelles!

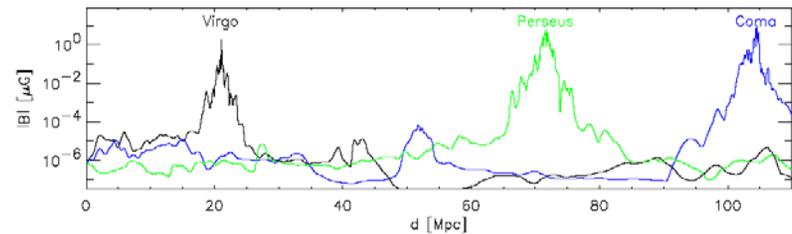
Sigl et al. (PRD 043007) :

- Champ généré au cours de l’évolution / champ initial uniforme
- MHD sur réseau

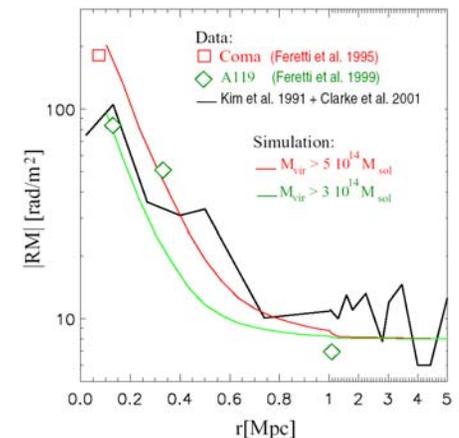
Dolag et al. (JCAP 0501, 009) :

- Graine uniforme $B \sim (1-5) \text{ nG} @ z \sim 20$
- Algorithme = “mariage” de SPH et de MHD
- Simulation cosmologique “contrainte” : champ $\delta\rho$ initial déduit du survey de galaxies IRAS

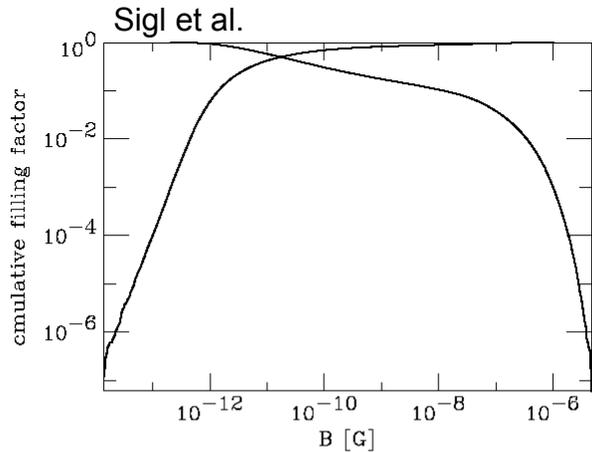
Dolag et al.



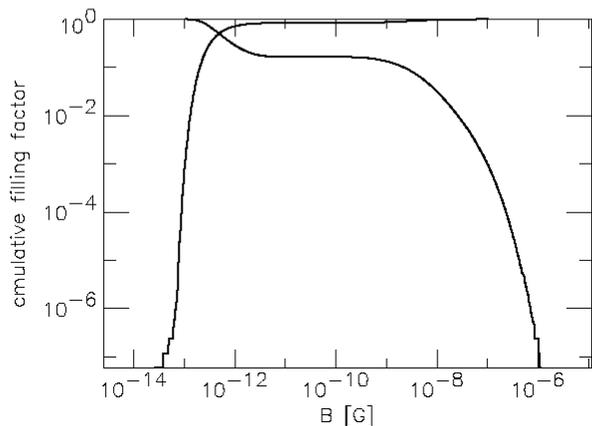
Dolag et al.



Remplissage de l'espace par les champs B



Champ généré aux chocs des grandes structures
• B étendu (filaments)



Champ magnétique primordial (à grand z)
• B concentré à l'intérieur des amas

La propagation des UHECRs est très sensible
à ce facteur de remplissage

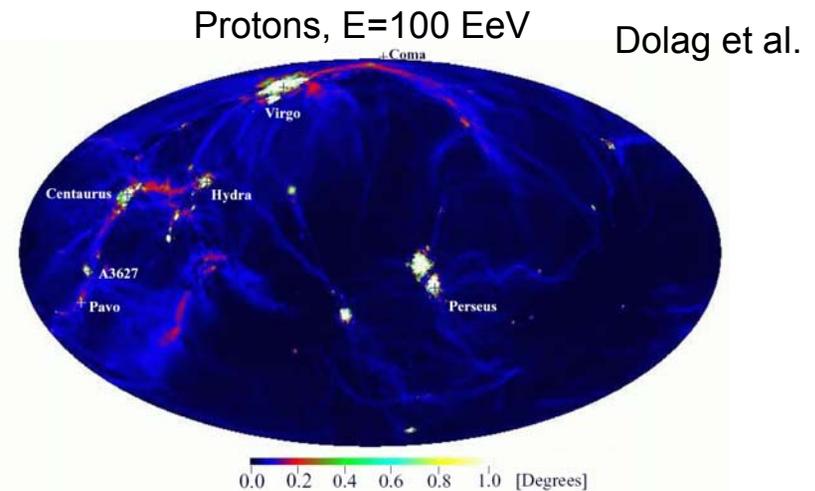
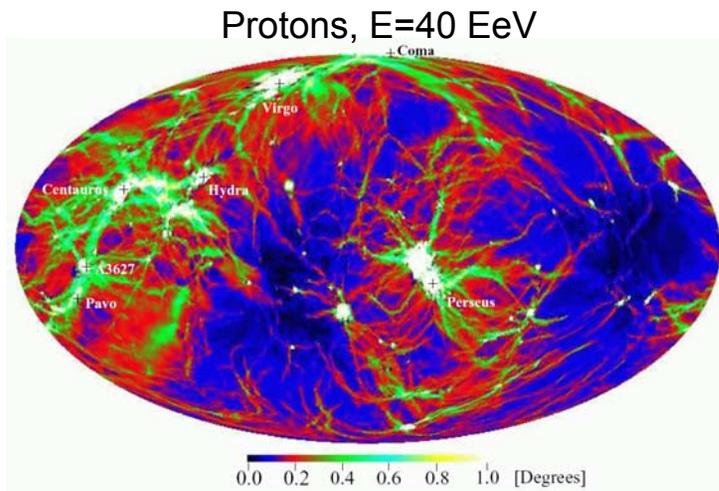


Possibilité de discriminer les modèles ?

Champs B structurés : influence sur les trajectoires des UHECRs

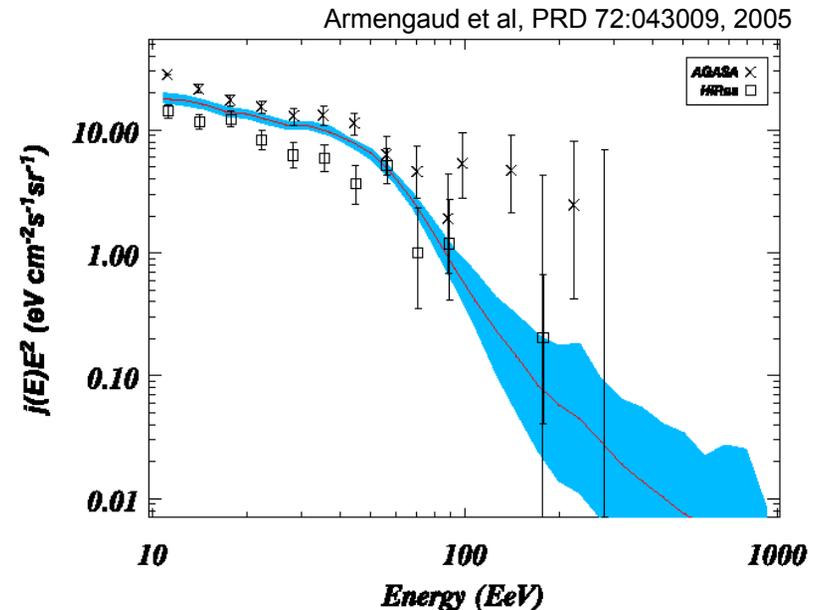
- Scénario “champs faibles”
 - “Cartes de déflexion” = $\int B_{\perp}$ le long d’une droite

Influence négligeable hors du coeur des amas
↓
Astrophysique des UHECR possible sur une grande part du ciel



Modèle de propagation des UHECRs

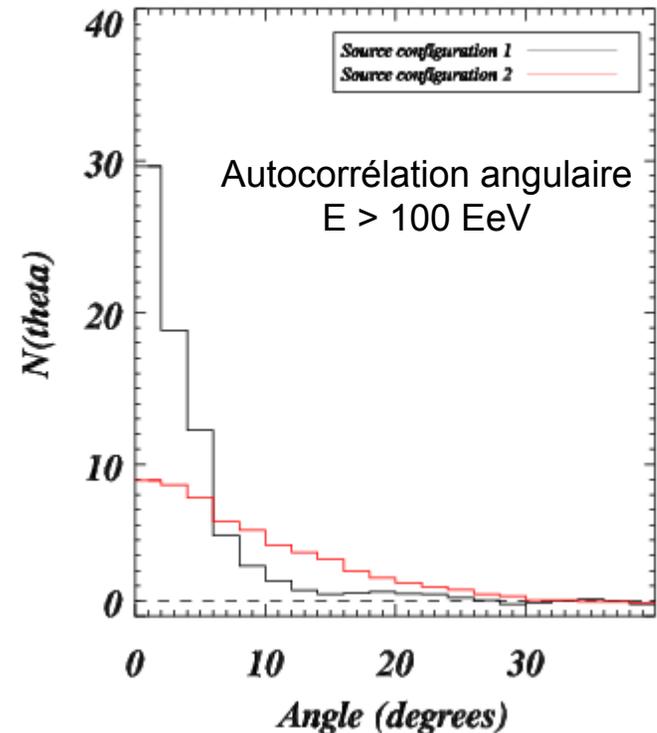
- Grille de champ B (Sigl et al.)
- Sources discrètes, densité $\sim 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$, distribuées selon la densité baryonique
- Injection et propagation de protons/fer
 - Suivi des secondaires
 - Enregistrement “d'événements” par un observateur = sphère de rayon $\sim 1 \text{ Mpc}$
- **Etude des propriétés statistiques du spectre, de la composition, des anisotropies**



- Protons
- Spectre d'injection $E^{-2.4}$
- Variance cosmique : fluctuations des positions des sources

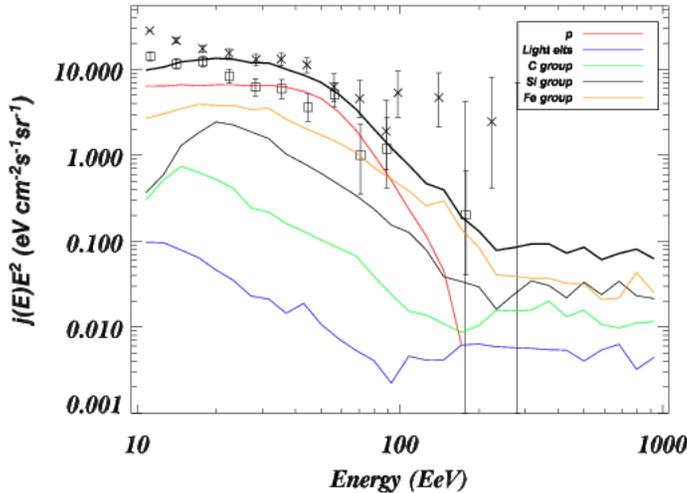
Modèle de propagation des UHECRs

- Grille de champ B (Sigl et al.)
- Sources discrètes, densité $\sim 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$, distribuées selon la densité baryonique
- Injection et propagation de protons/fer
 - Suivi des secondaires
 - Enregistrement “d'événements” par un observateur = sphère de rayon $\sim 1 \text{ Mpc}$
- **Etude des propriétés statistiques du spectre, de la composition, des anisotropies**

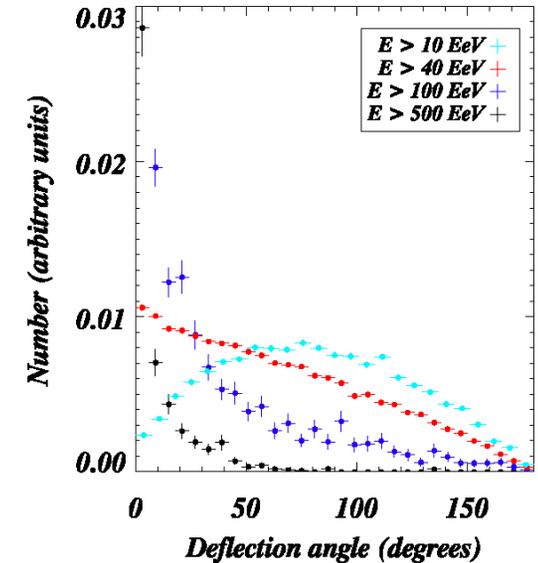


- Même scénario
- Variance cosmique considérable
- “Champs forts” \rightarrow on observe des sources étendues

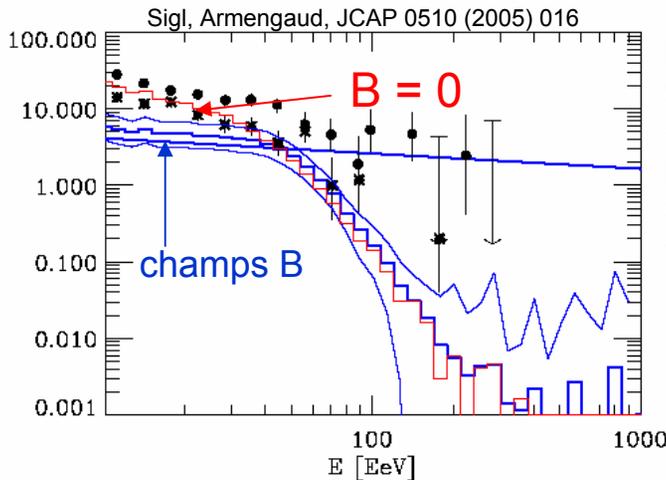
Sources UHECR de noyaux lourds



Sources de fer, $\alpha=2$
Spectres par groupes de masses
• Composante faible masse importante à basse énergie



Déflexions importantes:
• Champs B “étendus”
• Sources de fer
• Sources dans les amas



Injection mixte, $\alpha=2.2$
Spectre total
• La spallation des noyaux est plus complète en présence de champs B
→ spectre plus dur

Photodissociation
Déflexions



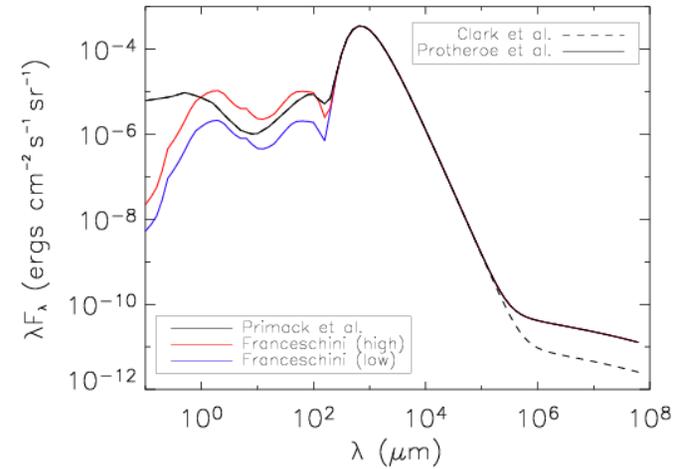
Spectre modifié
(interprétation de la cheville)

Sujets discutés

- Les UHECRs
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
 - Premiers résultats d'Auger
 - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
 - Champs galactiques
 - Champs extragalactiques
- **Contreparties photon/neutrino d'une source proche d'UHECRs**

Secondaires neutres générés par les UHECRs

- Interactions des protons:
 - Production de paire : CEL
 - Production de pions : utilisation du code SOPHIA (Mucke et al. 1999)
- Les secondaires (e^+, e^-, γ, ν) sont générés et suivis après la propagation des protons
- Les e^+, e^-, γ forment des cascades électromagnétiques :
 - ICS
 - Synchrotron
 - Production de paire ...
- Modélisation avec le code de S.Lee (1998) : résolution numérique d'équations de transport



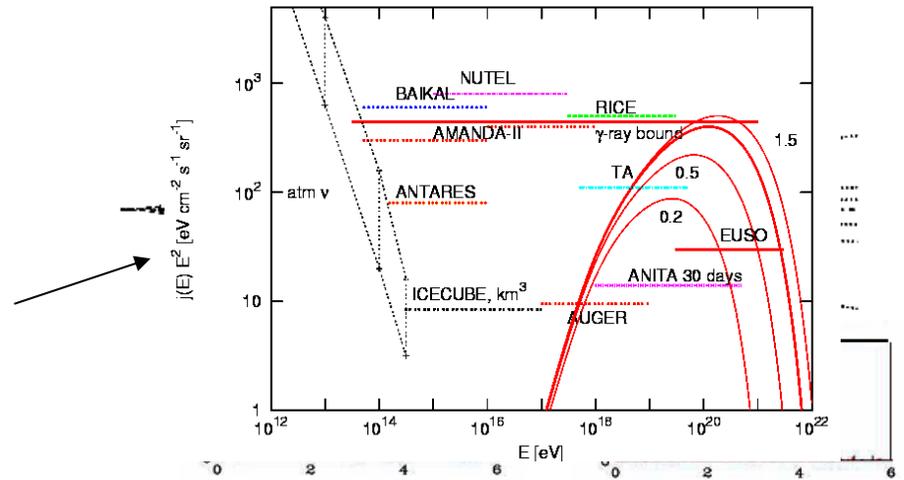
Fonds IR et radio extragalactiques :

- plusieurs modèles possibles
- utilisés à la fois pour les interactions des hadrons et les cascades EM

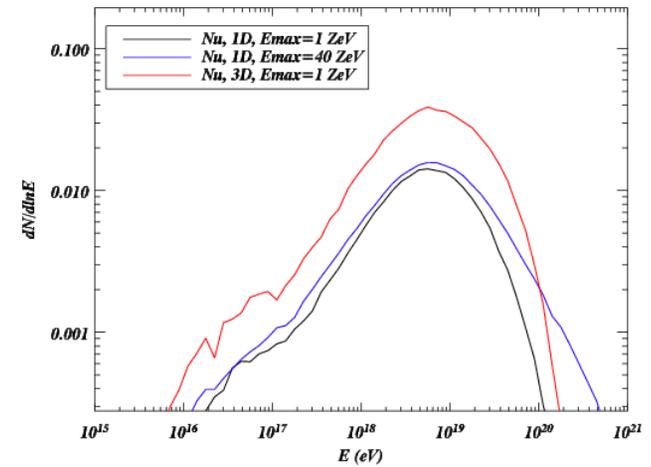
Prise en compte du champ B inhomogène dans l'Univers local

Neutrinos GZK provenant d'une source proche et magnétisée

- L'essentiel des neutrinos générés par production de pions sont émis à grand z et constitue un fond diffus
 - Quelques événements au plus observables par Auger



- Calcul du spectre d'une source proche : la prise en compte des déflexions augmente le flux neutrinos.
 - (reste faible \rightarrow pas détectables à court terme)

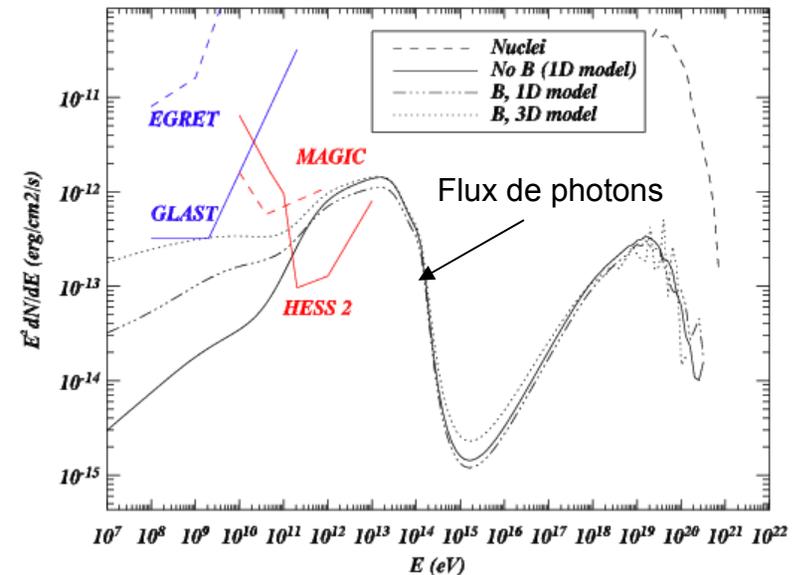


Flux au GeV – TeV d'une source d'UHECRs magnétisée

- Production de paires ET de pions → Gammas
- Rôle important des champs B sur les cascades EM + sur la propagation des protons

Source :

- située à 20 Mpc
- magnétisée
- luminosité ~ correspondant aux "clusters" AGASA



Armengaud et al., astro-ph/0511277



Une éventuelle source UHECR aura probablement une contrepartie observable au TeV [voire au GeV]

Perspectives

- Auger a déjà des données, mais est encore en construction...
- **Anisotropies à $E \sim 10^{18}$ eV** : une perspective prometteuse
 - Systématiques délicates
 - Une statistique déjà énorme
- **Contraintes sur les modèles “top-down”** : le spectre mais aussi la composition des UHECRs
- **Des sources?** Dépendra :
 - De leur densité
 - Des champs magnétiques
 - Composition des UHECRs
- Si on voit des sources :
 - Contraintes sur les champs B
 - Réel espoir d’une contrepartie TeV

