

---

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

---

E. Armengaud (APC & IAP)

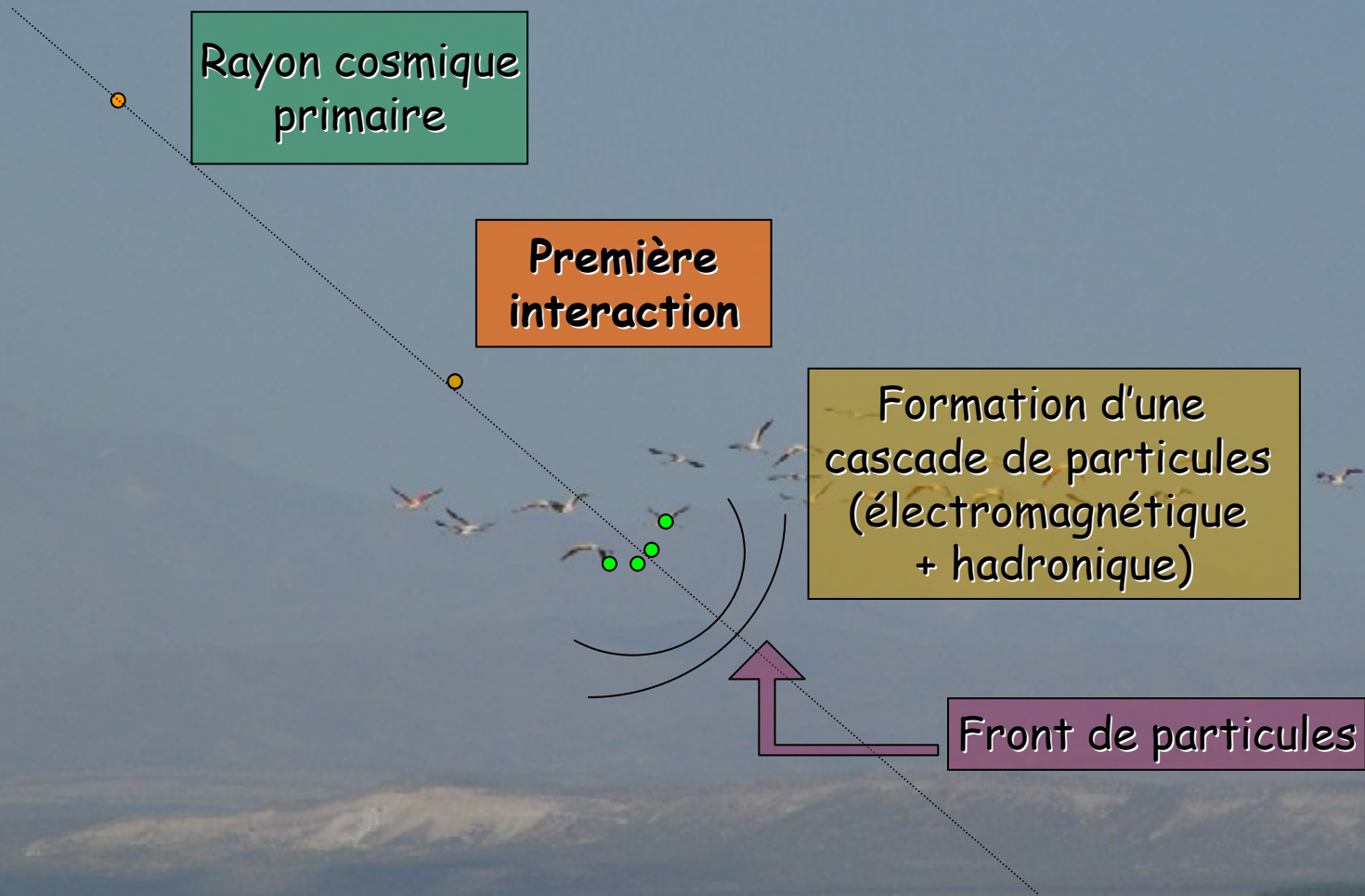
# Sujets discutés

- 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

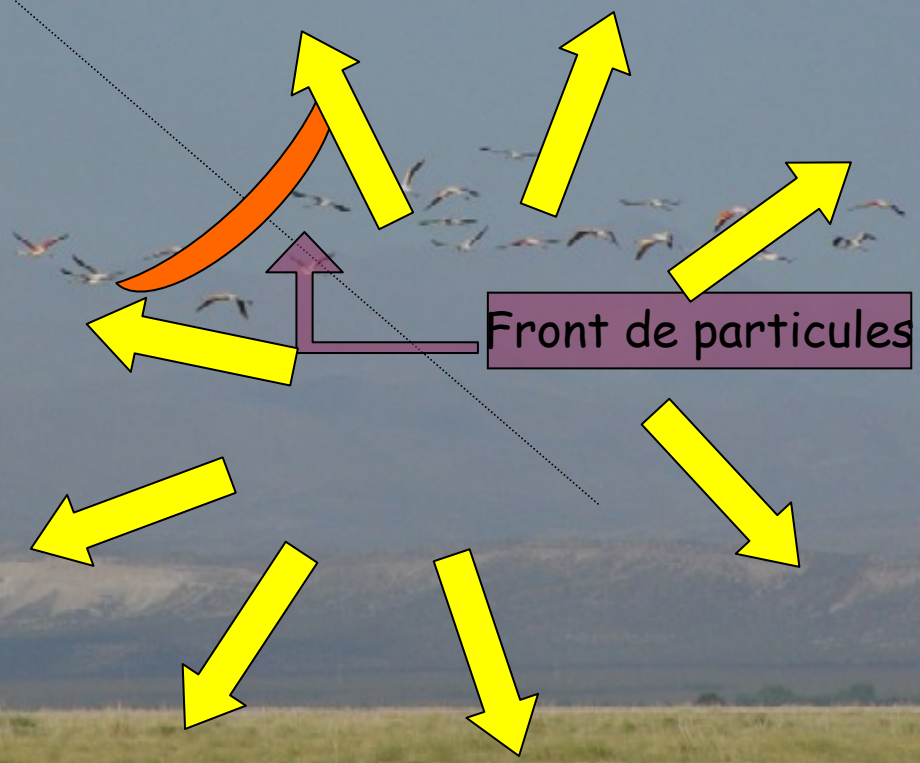
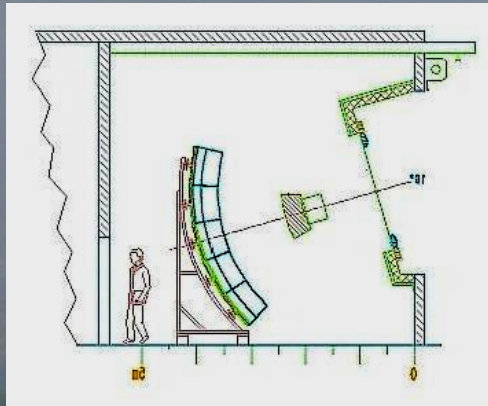
- **Les UHECRs**
- L'observatoire Pierre Auger
- Résultats observationnels récents
  - Premiers résultats d'Auger
  - Analyse des anisotropies à “basse” énergie
- Influence des champs magnétiques sur la propagation des UHECRs
  - Champs galactiques
  - Champs extragalactiques
- Contreparties photon/neutrino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

# Détection des UHECRs



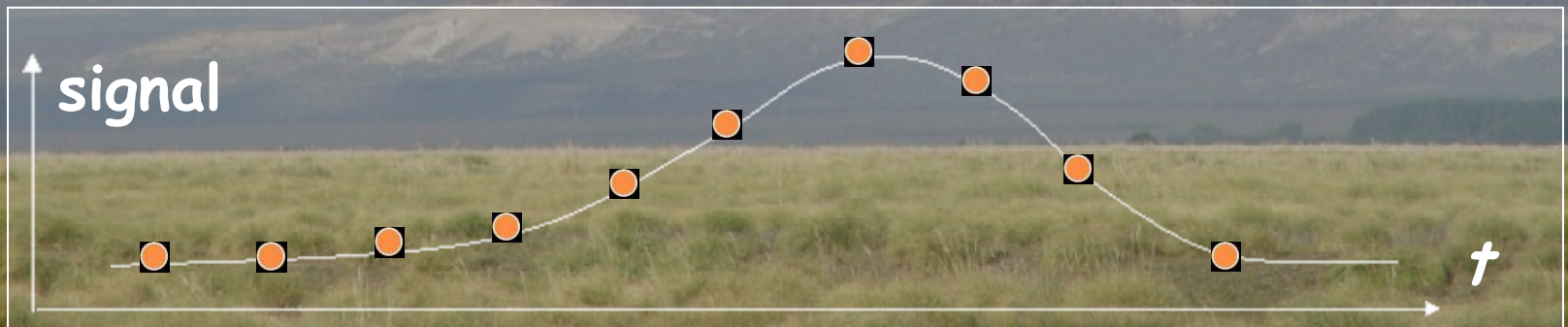
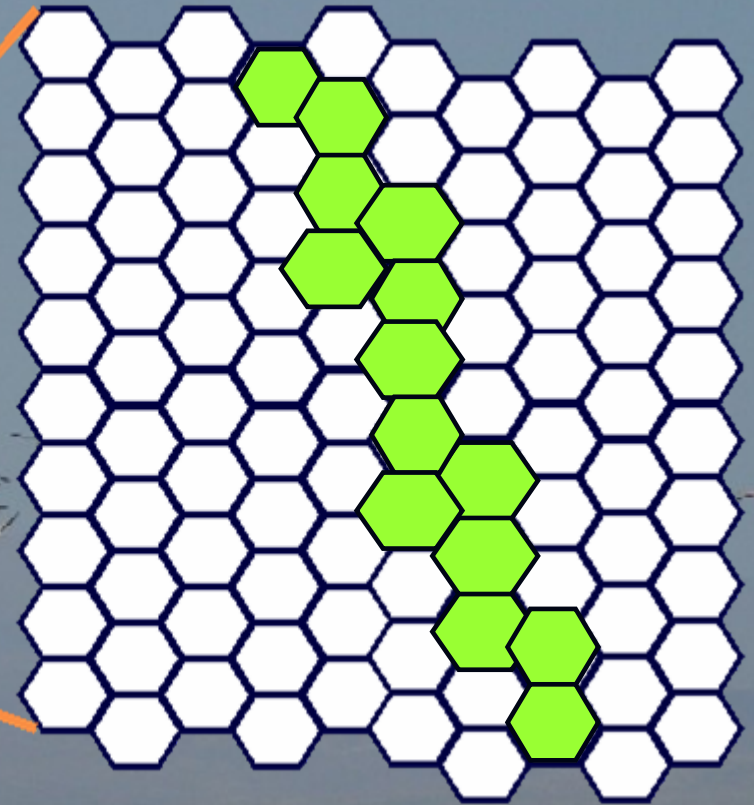
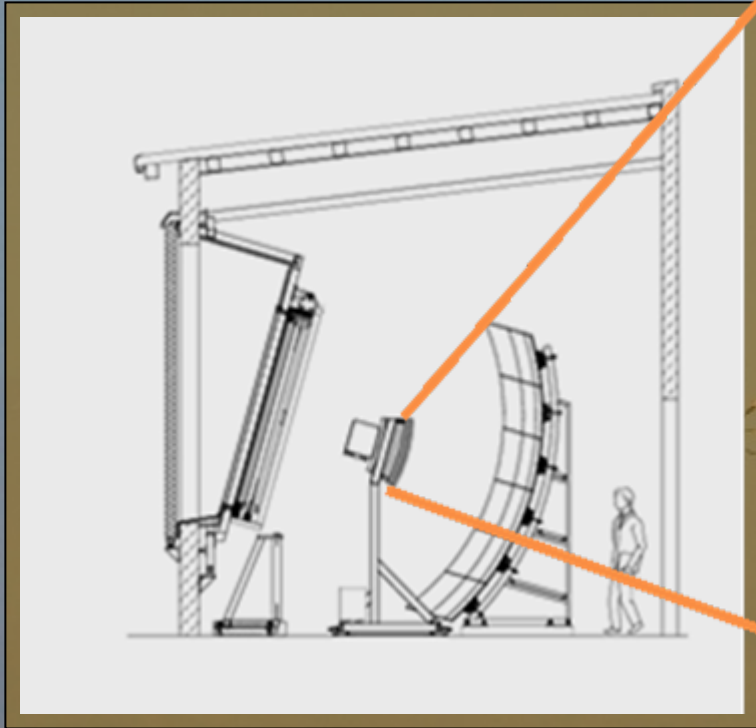
# Détection par fluorescence (“HiRes-like”)

Détecteur de fluorescence



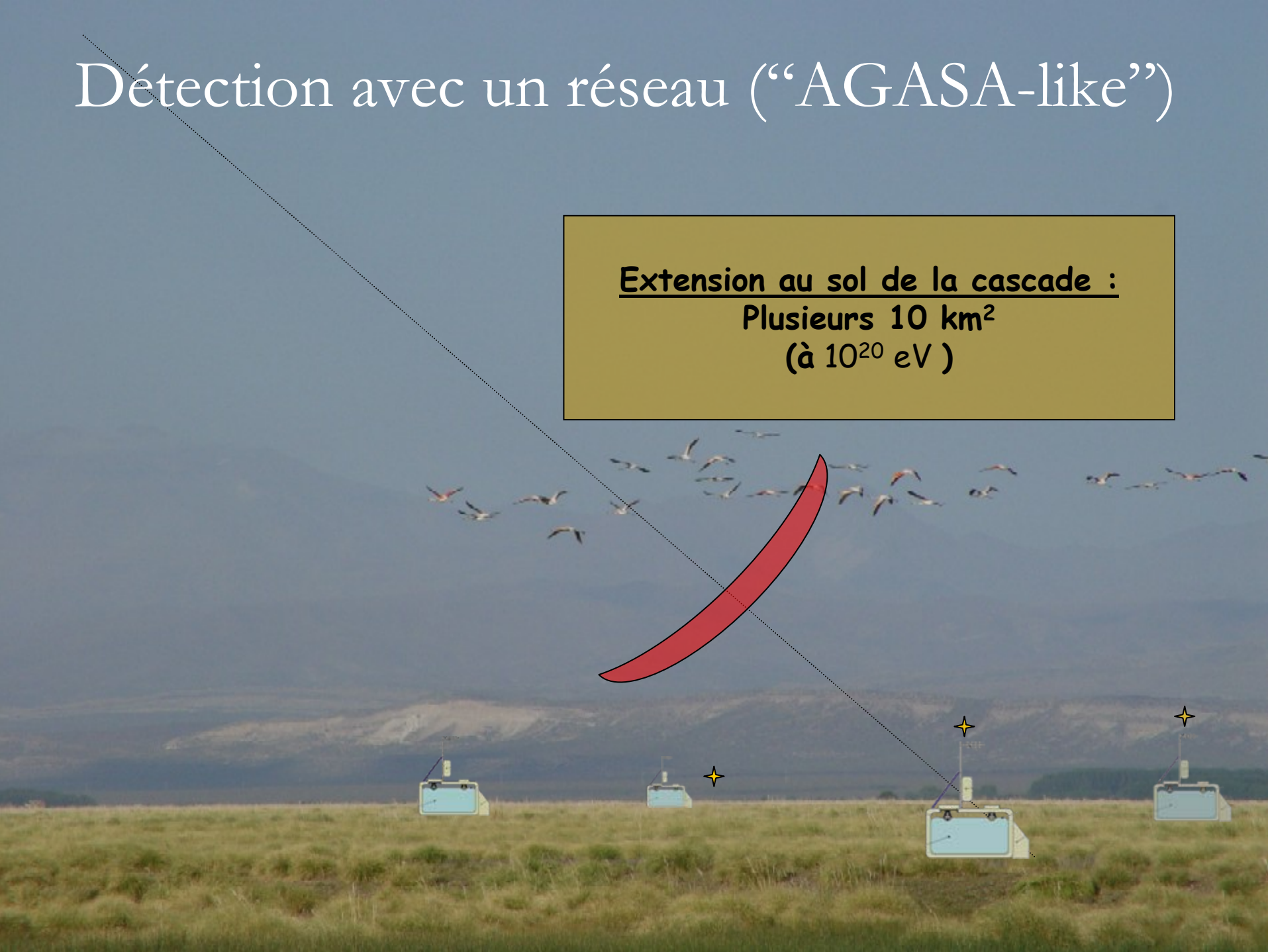


# Fluorescence



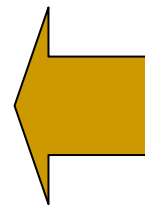
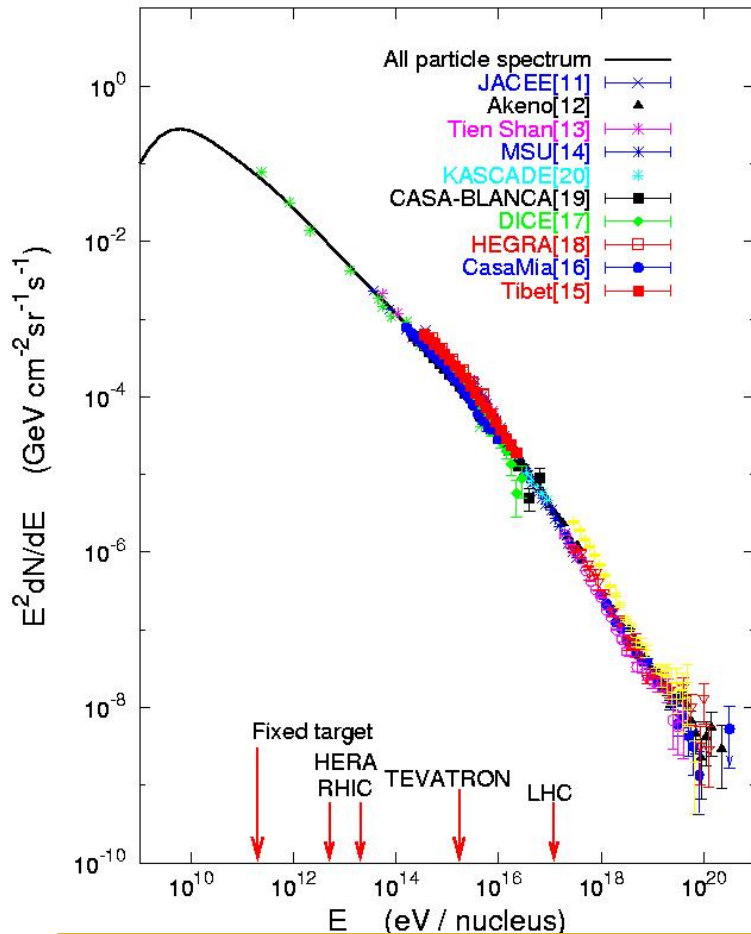
# Détection avec un réseau (“AGASA-like”)

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



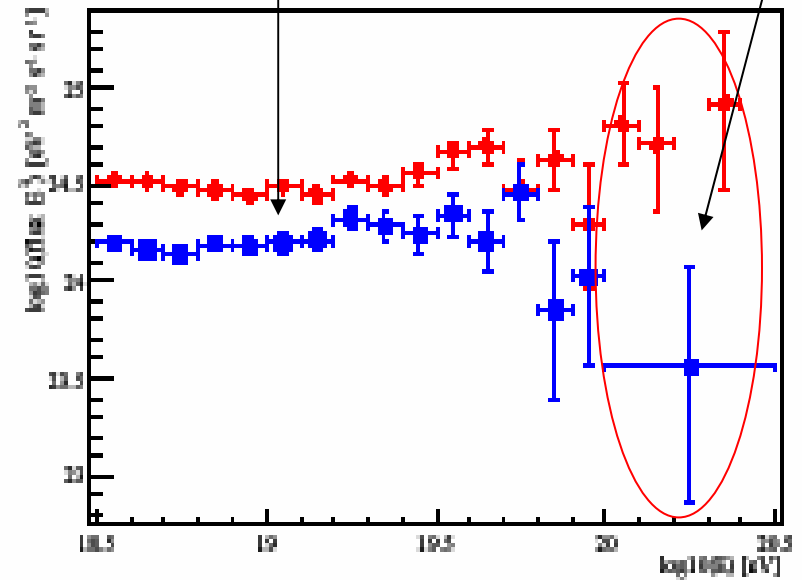
# Le spectre des rayons cosmiques

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



Décalage systématique

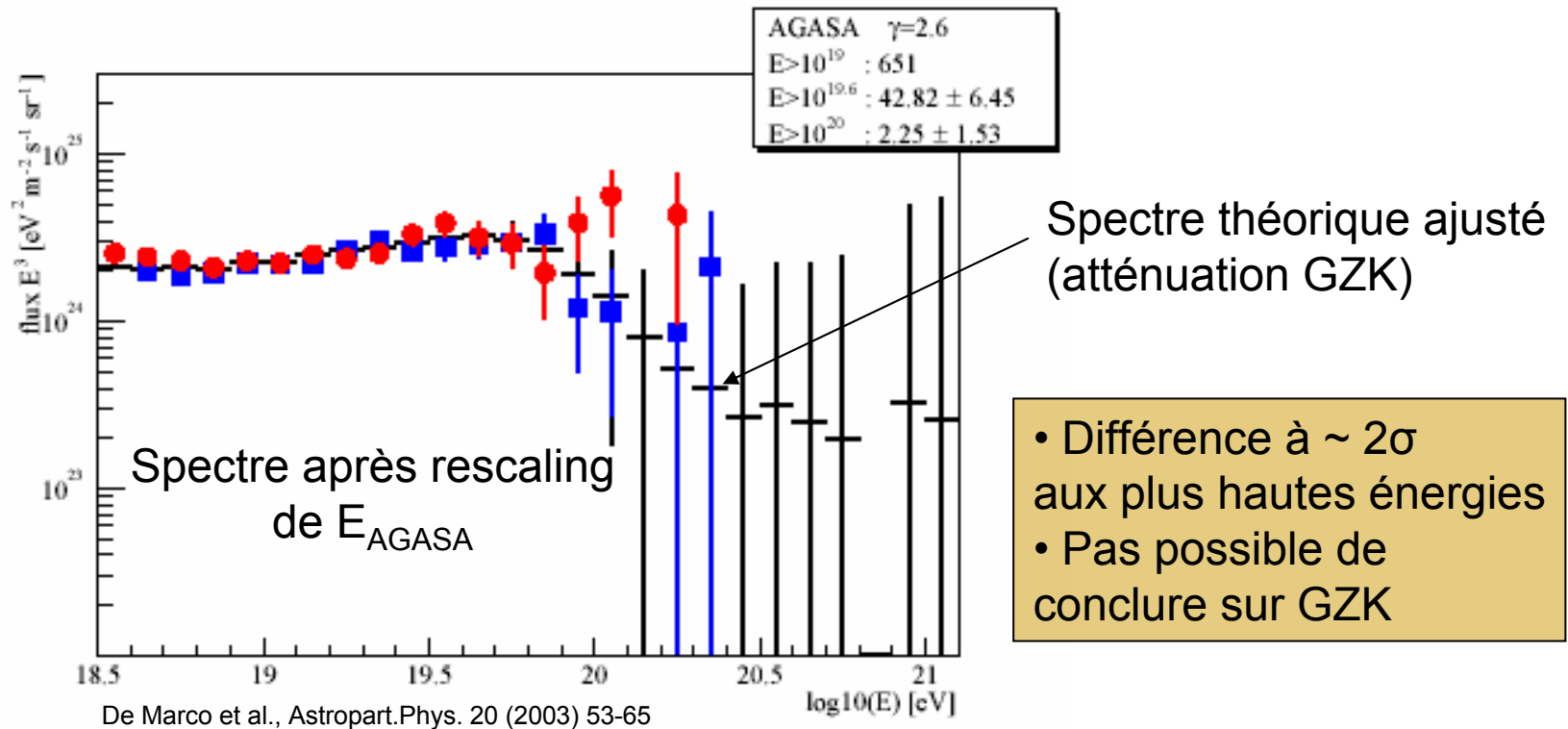
Faible statistique



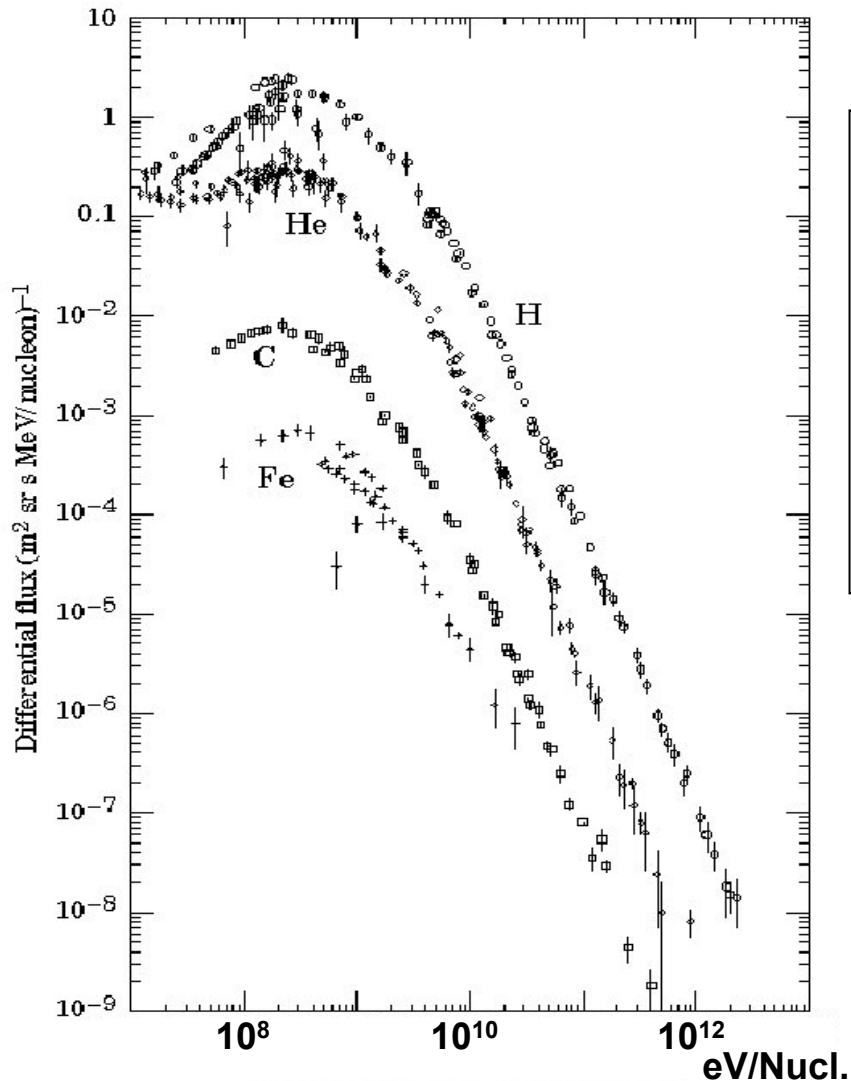


# Après “correction” des systématiques

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



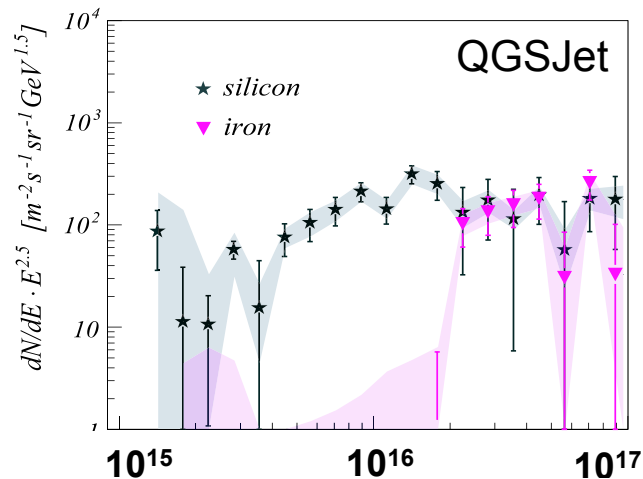
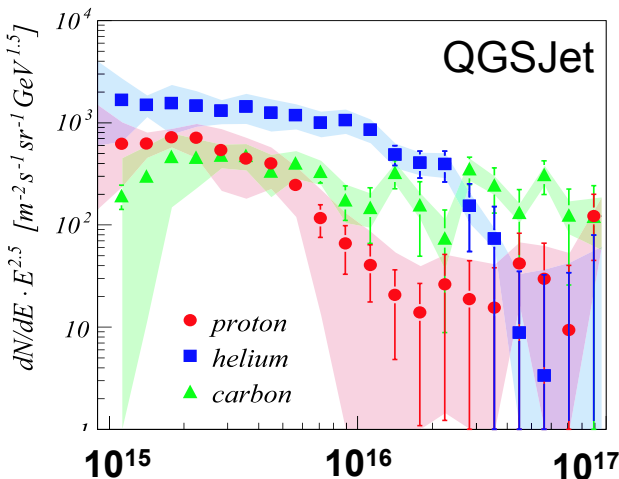
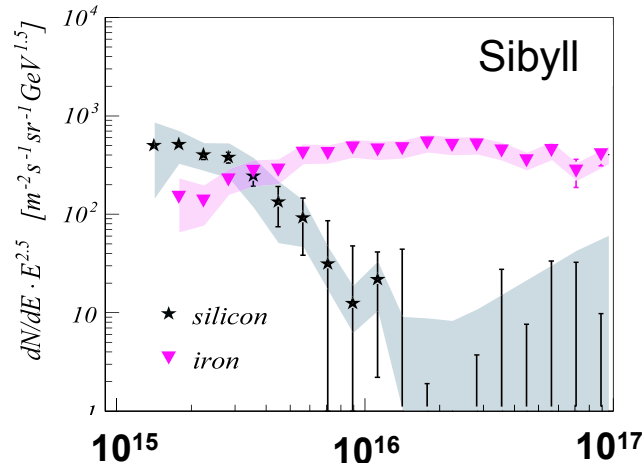
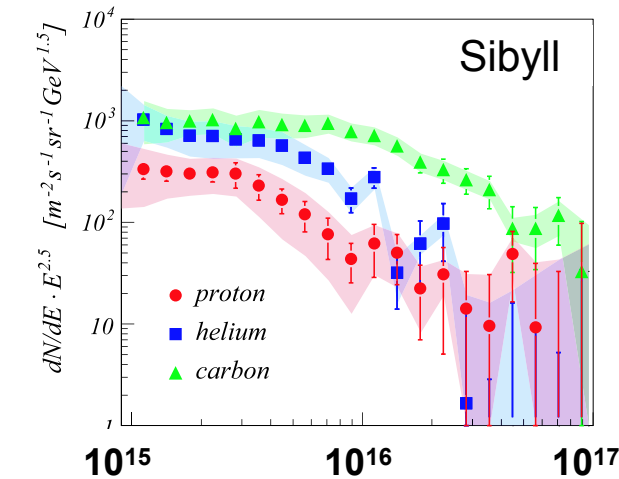
# Nature des UHECRs



$E < 10^{13}$  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  $N_e/N_\mu$  pour discriminer les noyaux

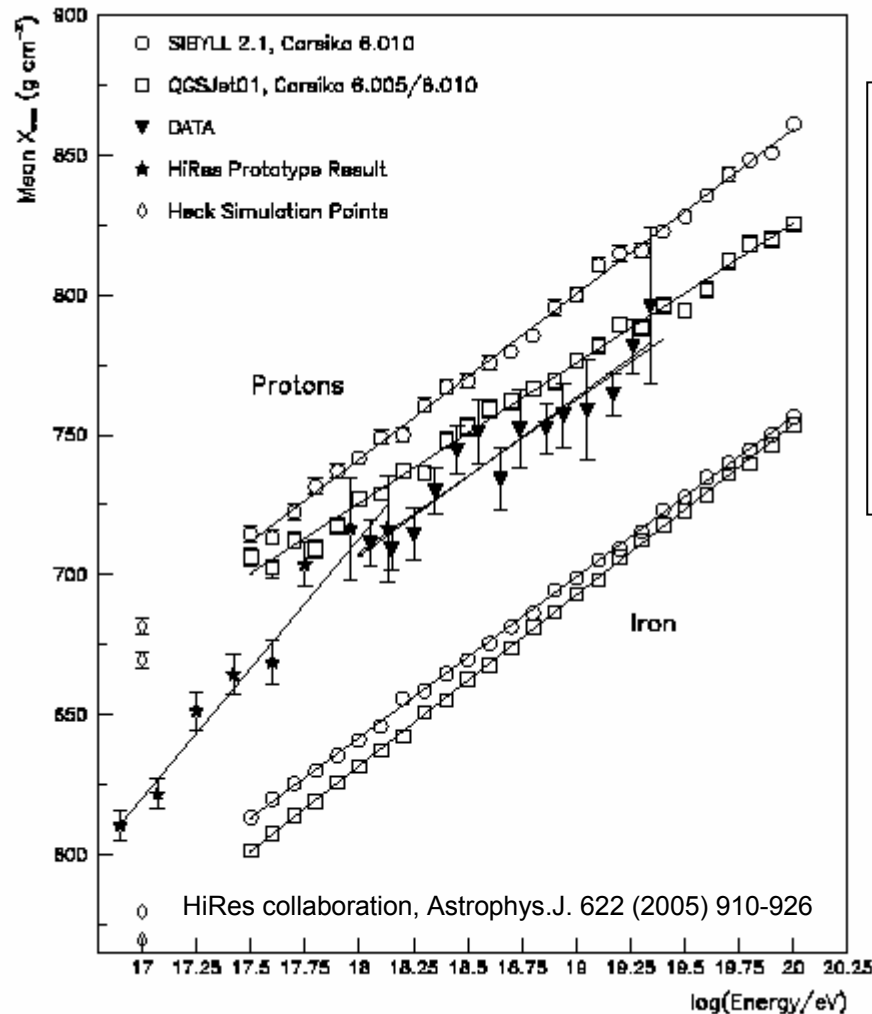
→ Incertitude forte (modèles hadroniques)

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

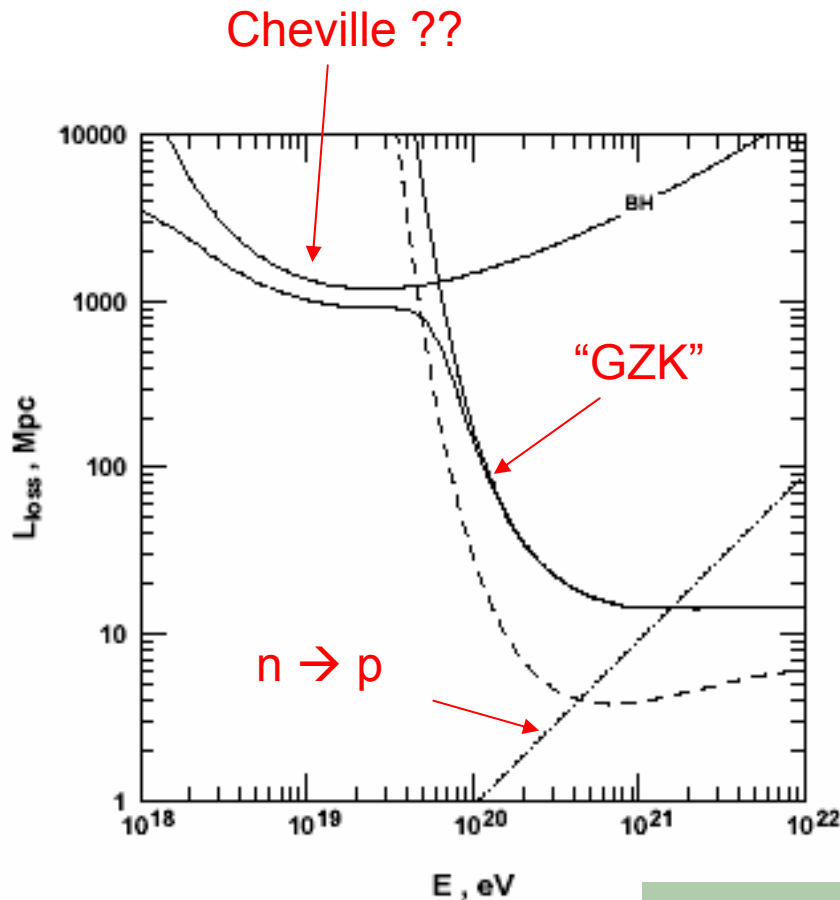
- **Accélération astrophysique**
  - Accélération stochastique dans des chocs magnétisés
  - $E_{\max} \sim L, B; Z$
  - Candidats très nombreux, dont: AGNs (lobes radio), ICM, GRBs, pulsars
  - Spectre : loi de puissance d'indice  $\alpha \sim 2 - 2.7$  (chocs relativistes,...)
  - $\alpha, E_{\max}$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

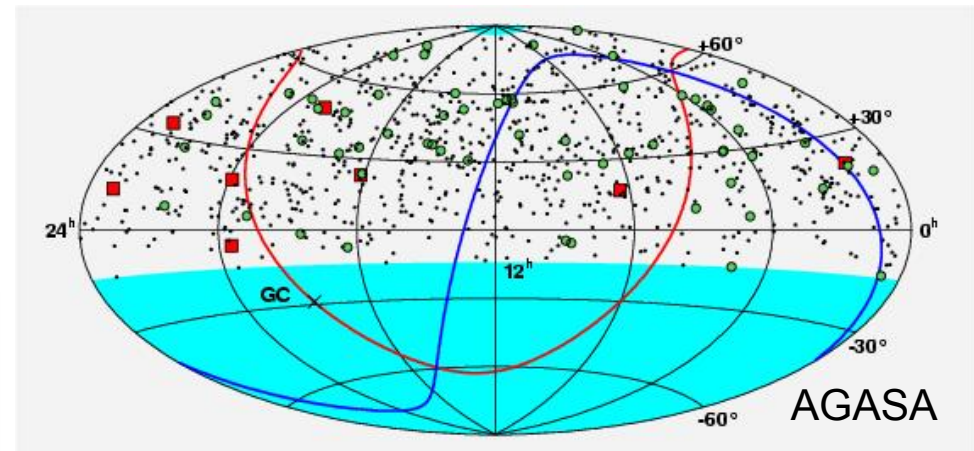
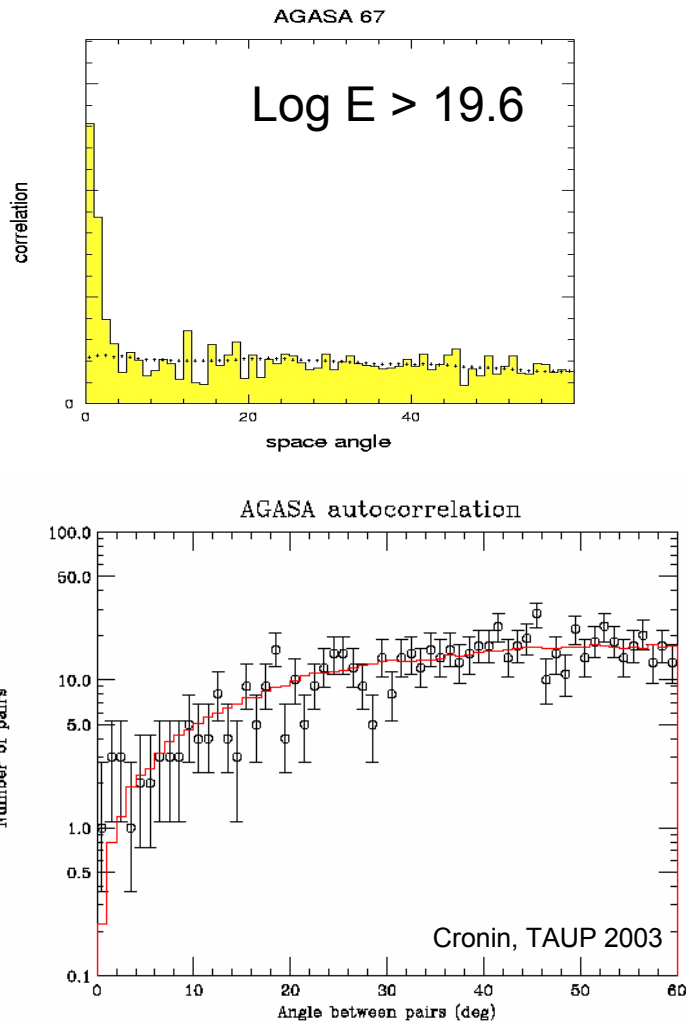
- Cas des noyaux : photodissociation ~ GZK (fond IR plus crucial)

- 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



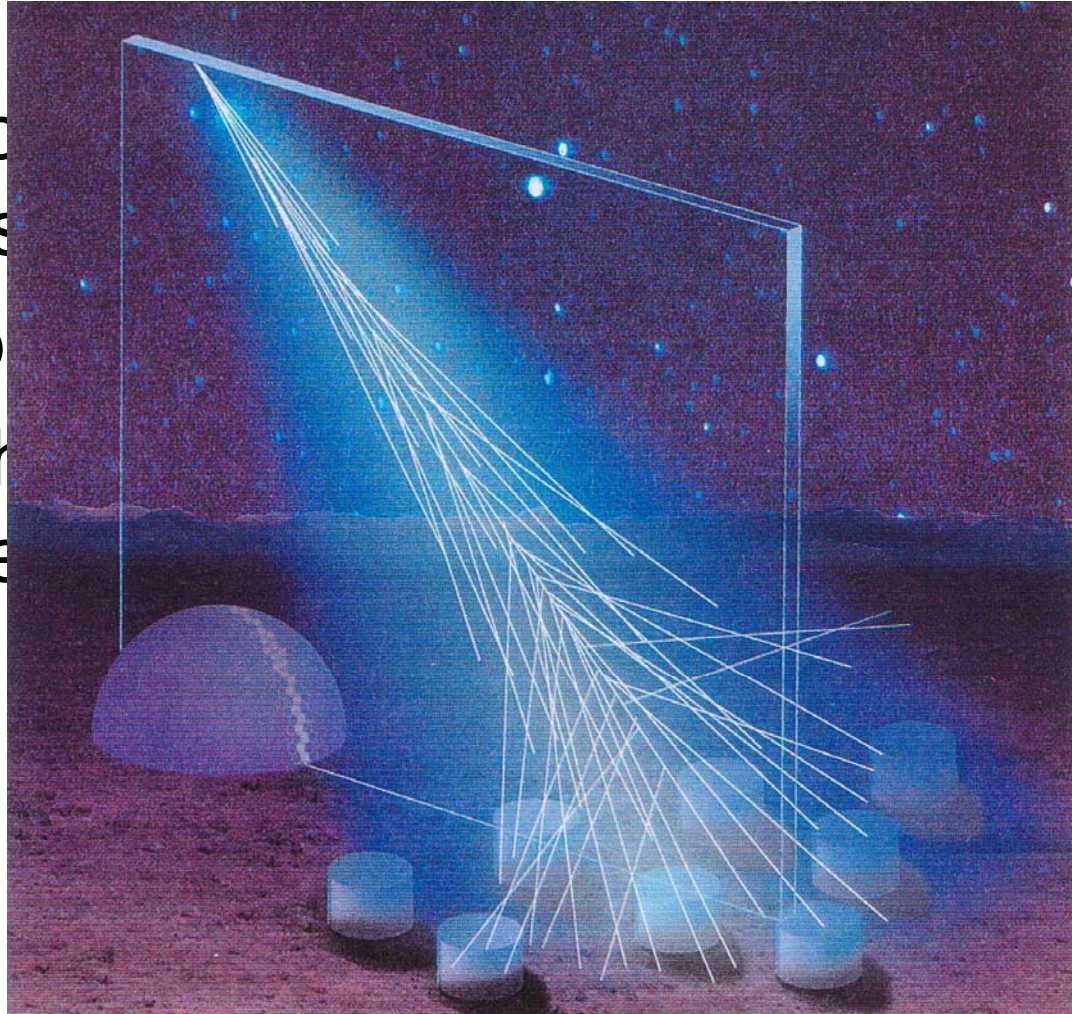
**Sources attendues**

# 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

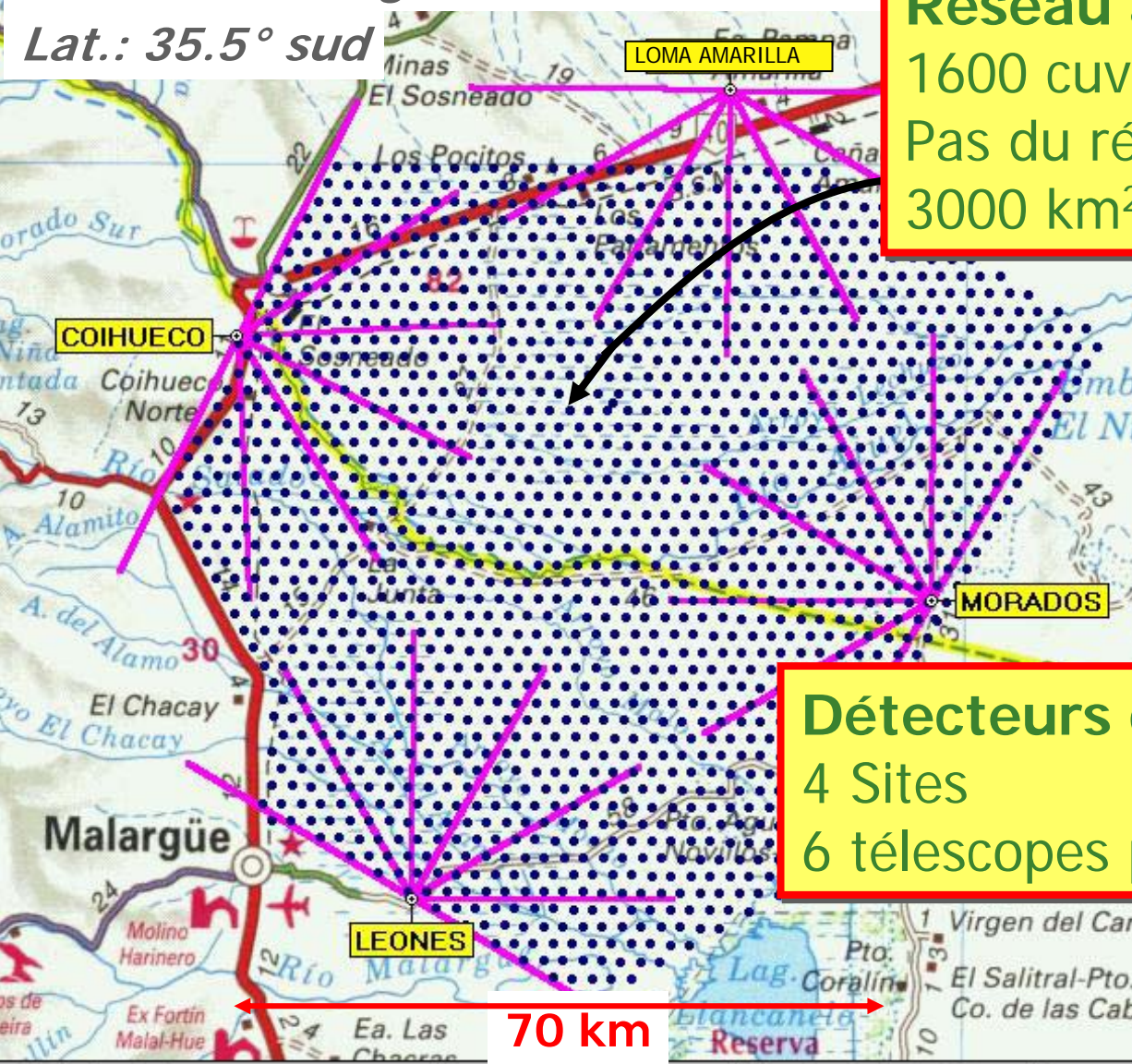
- But principal : étudier les UHECRs
- Flux faible
- Compréhension de la propagation des UHECRs à haute énergie :





# Site sud

Pampa Amarilla; Province de Mendoza  
3000 km<sup>2</sup>, 875 g/cm<sup>2</sup>, 1400 m  
Lat.: 35.5° sud



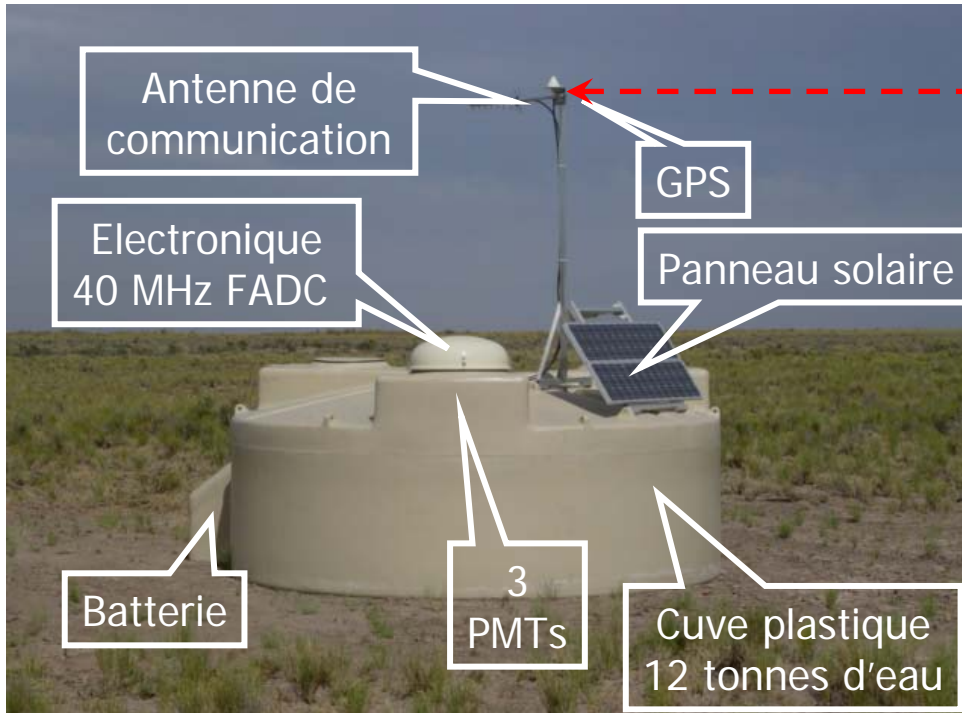
**Réseau au sol (SD):**  
1600 cuves d'eau  
Pas du réseau : 1.5 km  
3000 km<sup>2</sup>

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





# Réseau de surface

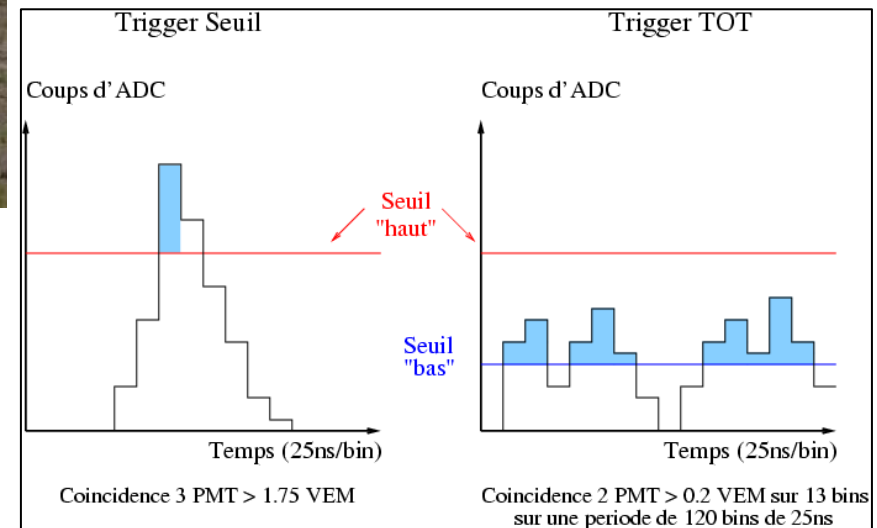


Ondes hertziennes



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



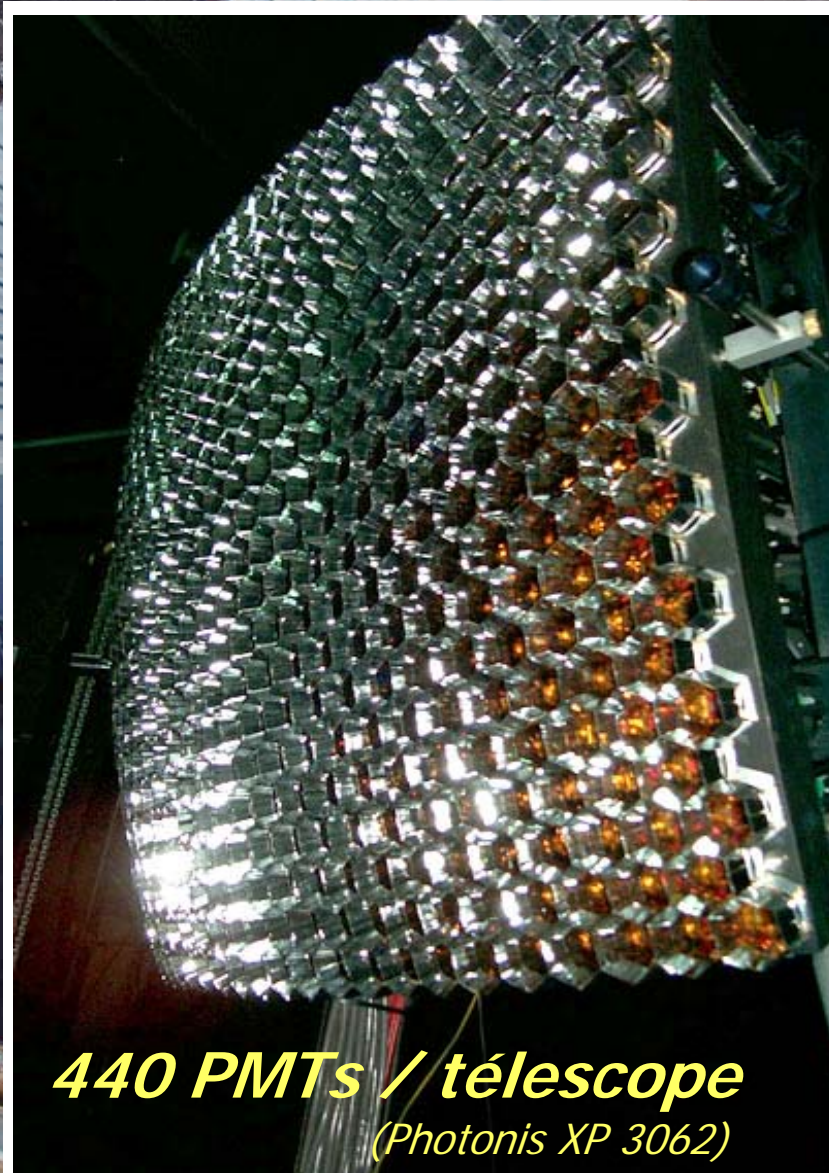
installation de l'électronique

P

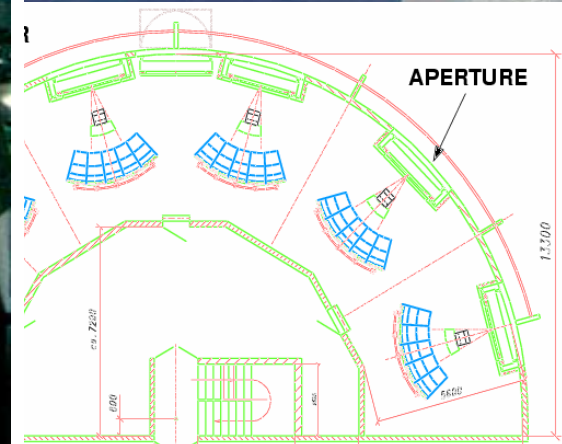
Dép



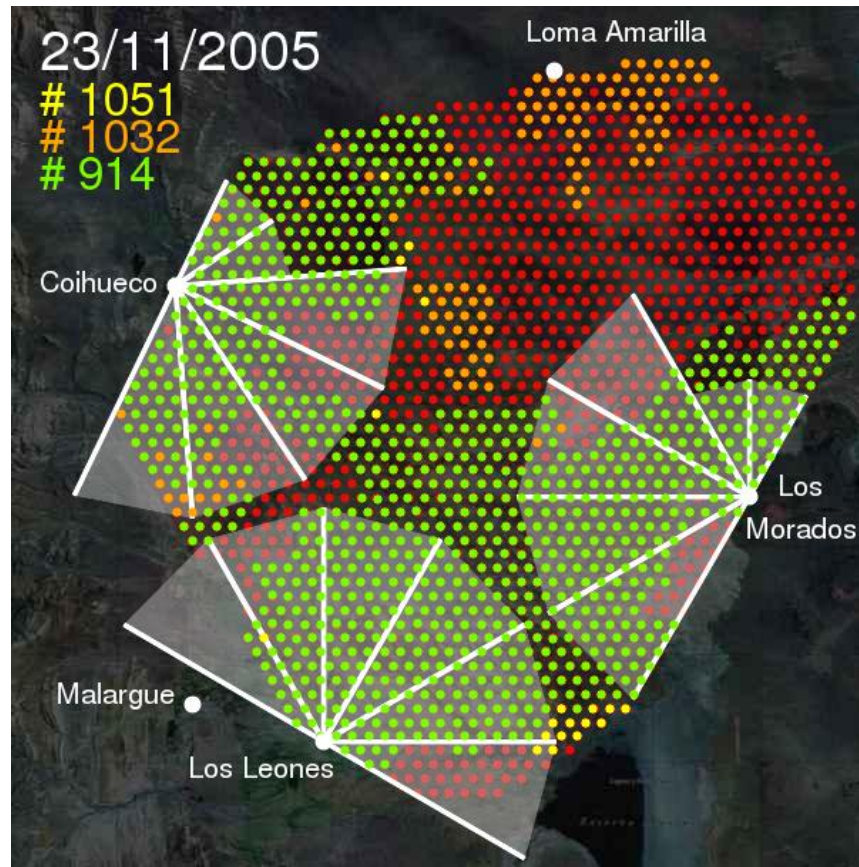
*Six télescopes regardant chacun  $30^\circ \times 30^\circ$*



**440 PMTs / télescope**  
(Photonis XP 3062)



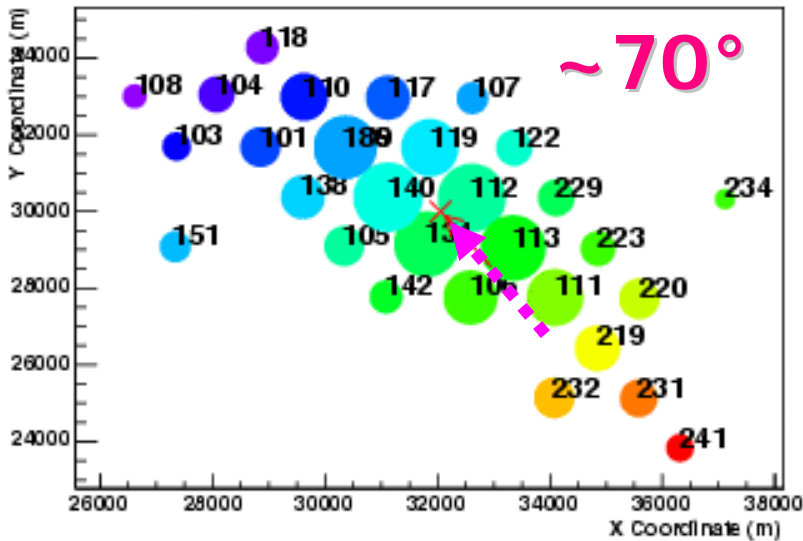
# Déploiement du réseau



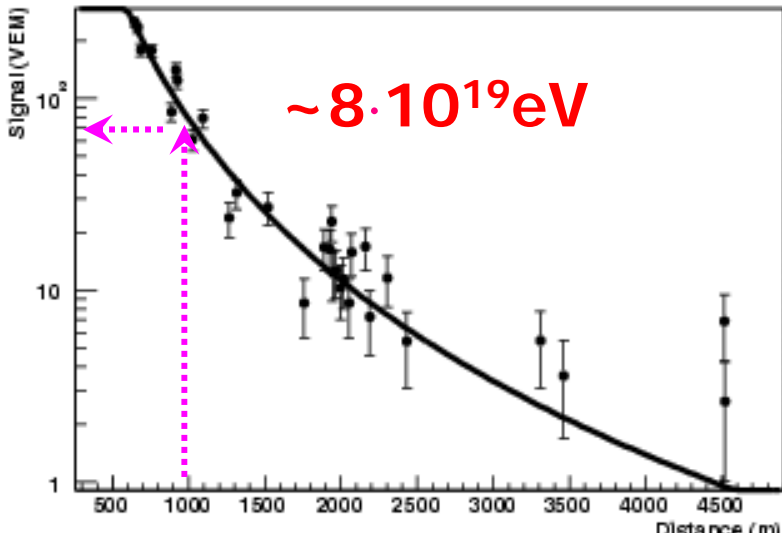


# Un événement stéréo hybride

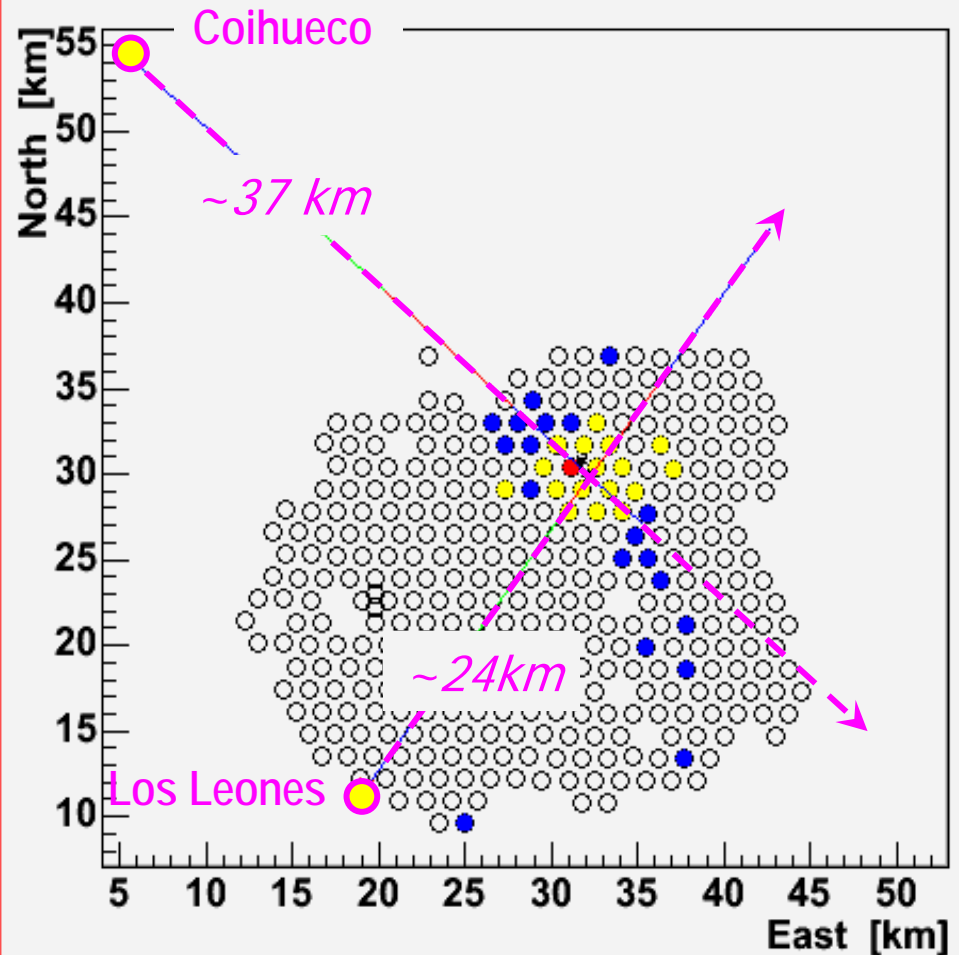
Hit Locations (Red: First, Violet: Last)



LDF

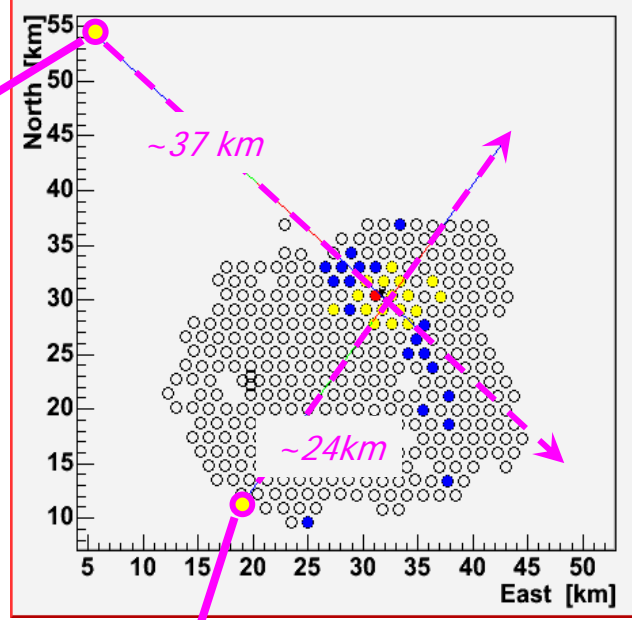


Stations-SDP Event Id: 850019

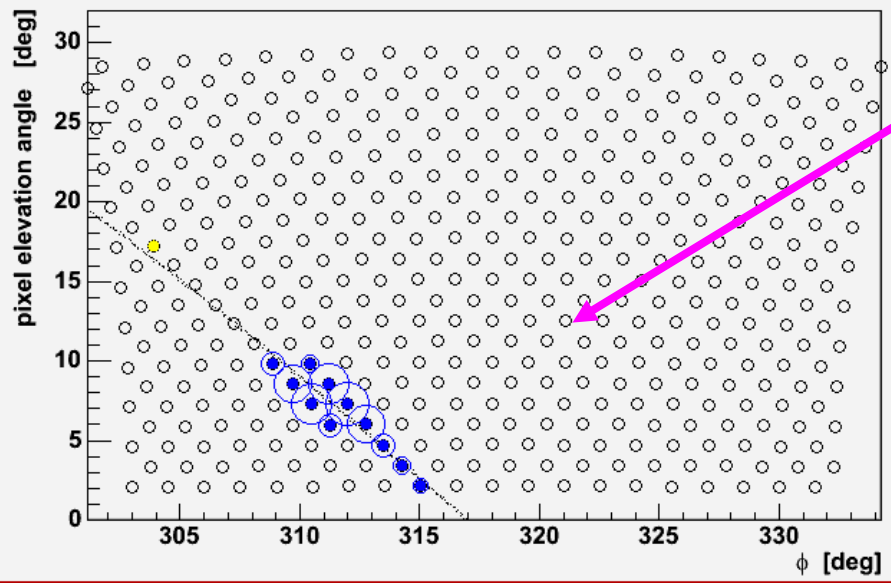




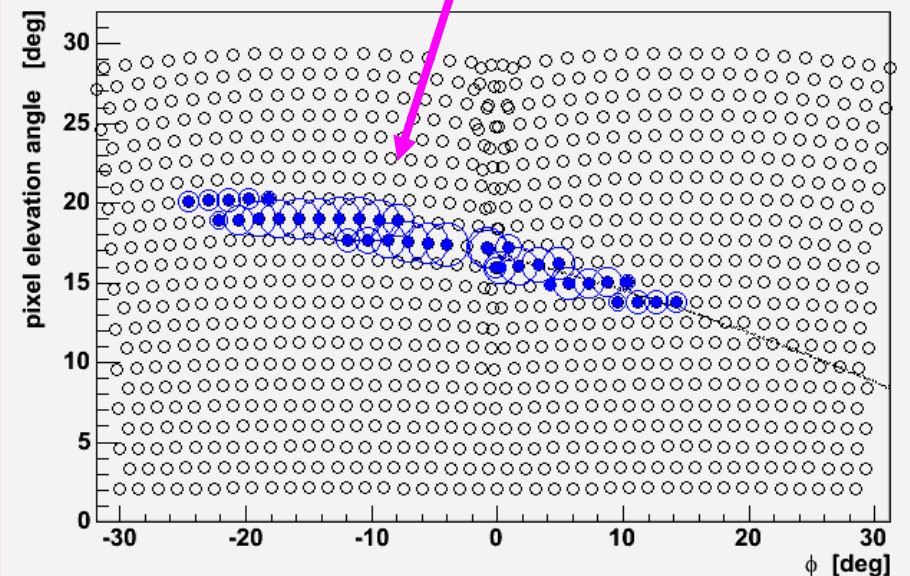
Stations-SDP Event Id: 850019



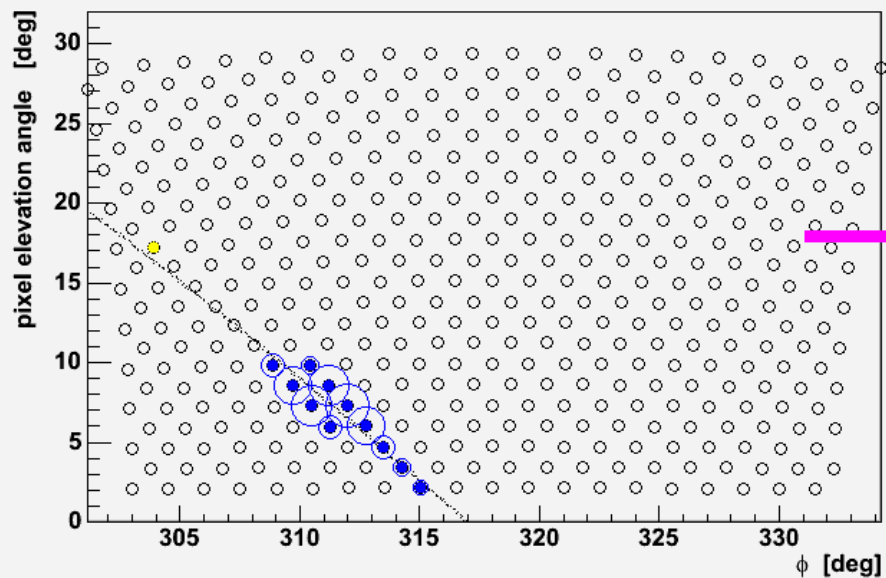
SDP Run 469 Event 197 Eye Id: 4



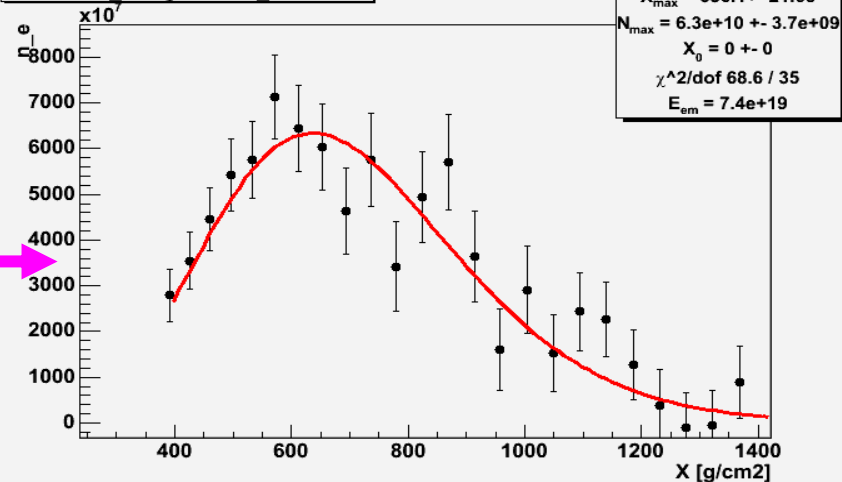
SDP Run 1 Event 687 Eye Id: 1



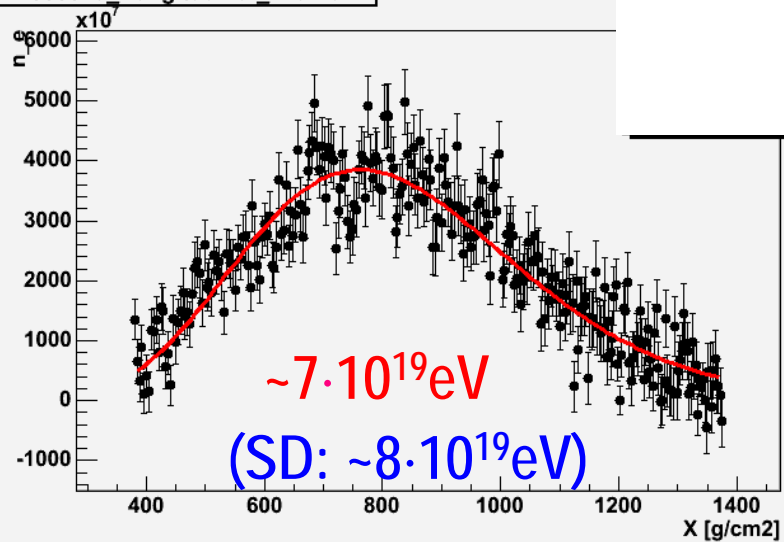
SDP Run 469 Event 197 Eye Id: 4



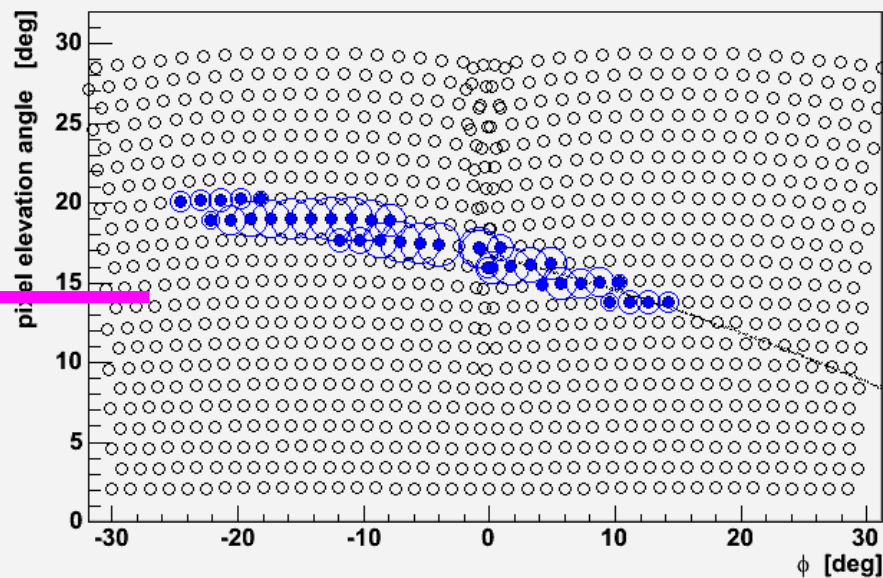
850019 Longitudinal Profile



850019 Longitudinal Profile



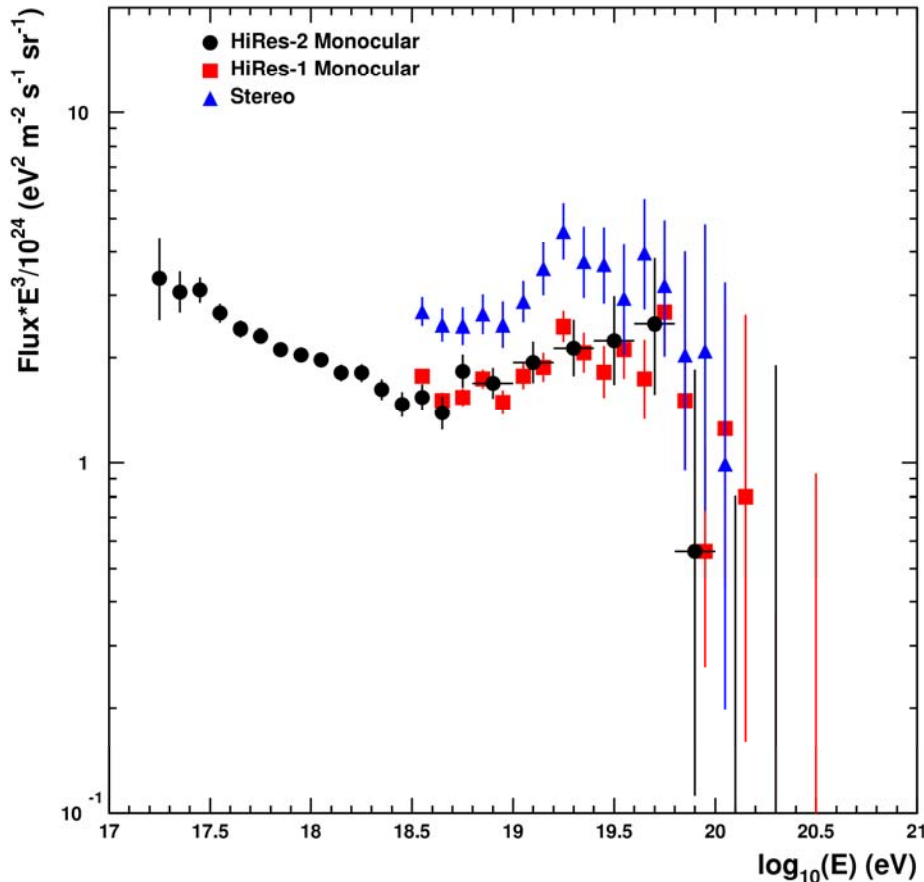
SDP Run 1 Event 687 Eye Id: 1



# 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  $1750 \text{ km}^2 \text{ sr yr} \sim \text{AGASA}$

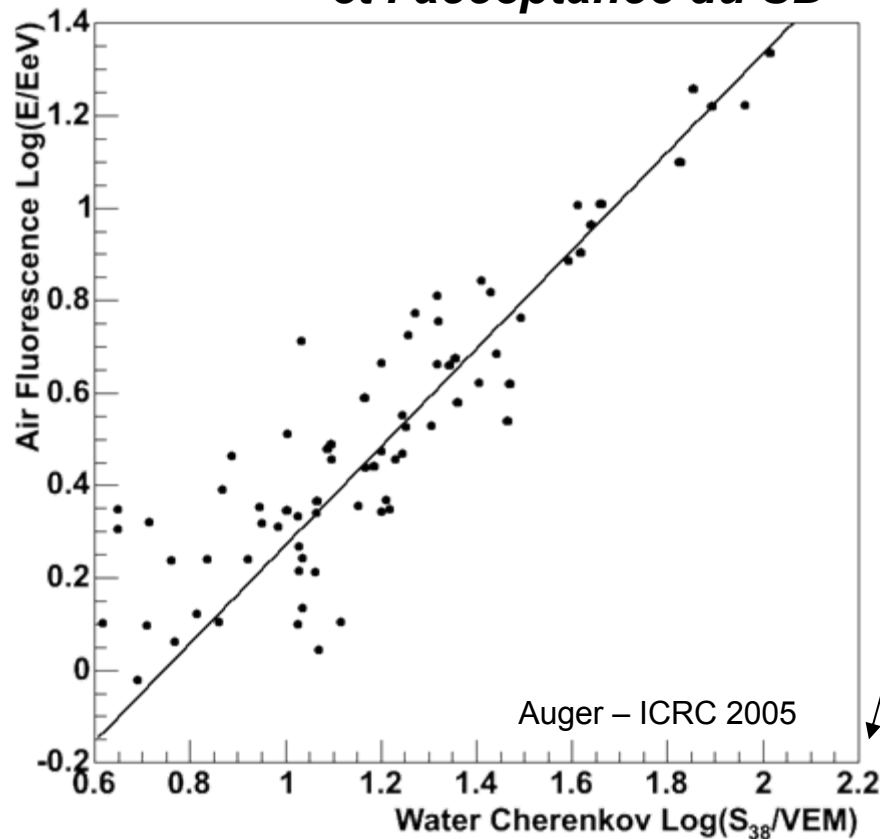
*Analyse très délicate:*

- 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)

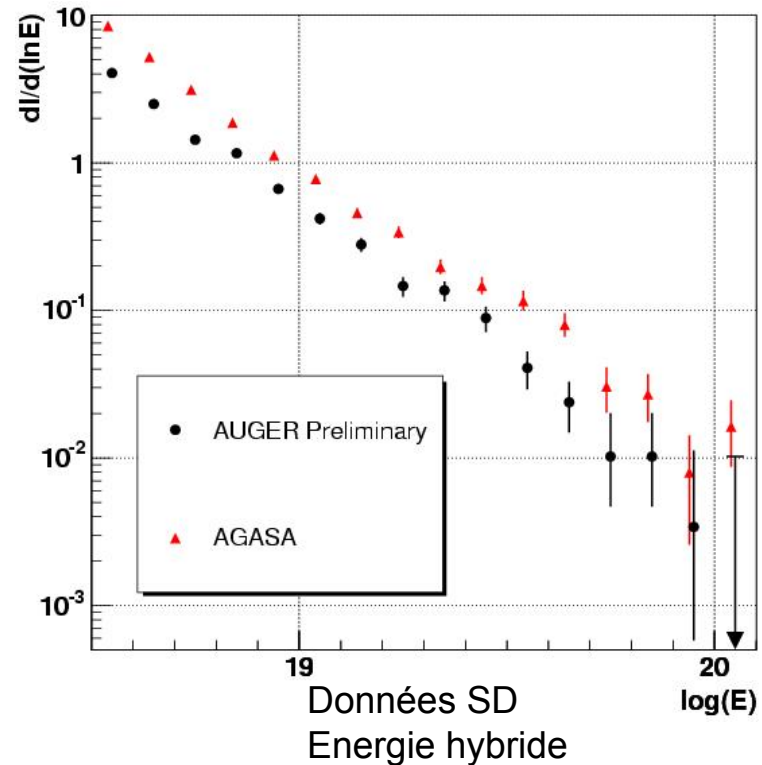
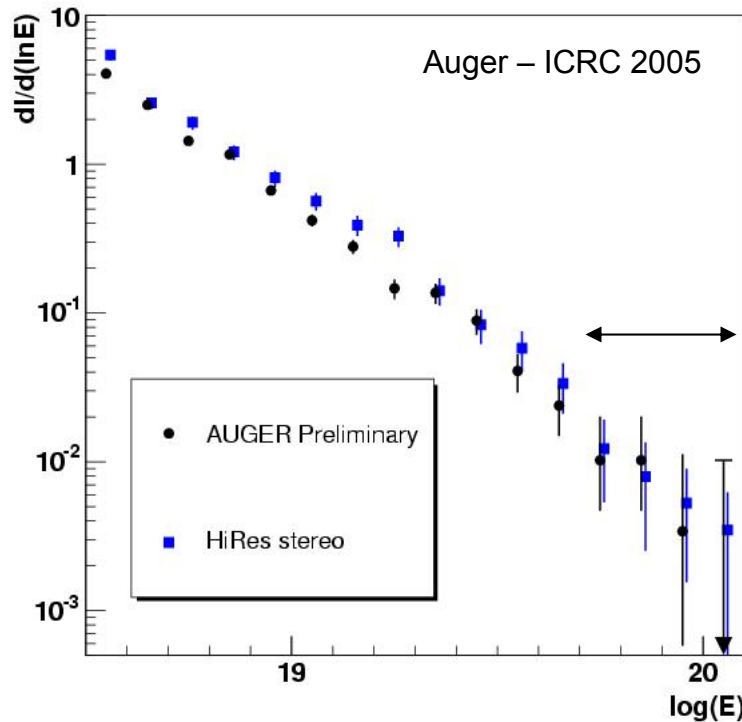


“Signal”  
des cuves

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

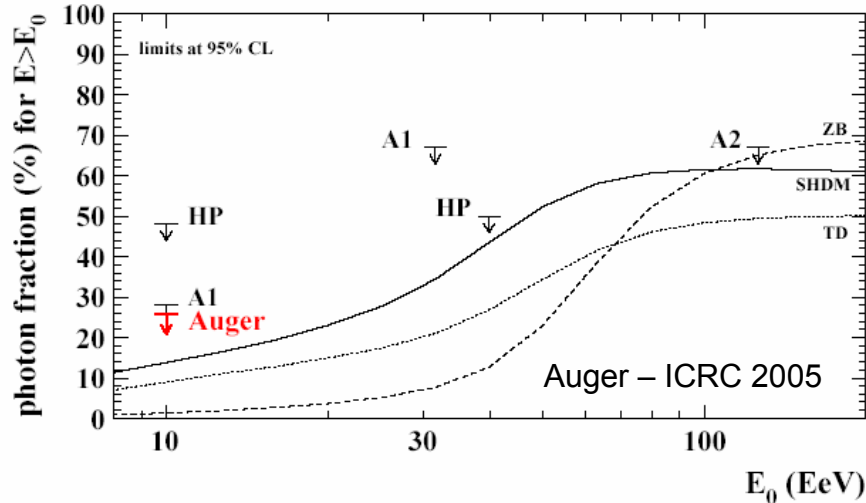


# Premier spectre Auger

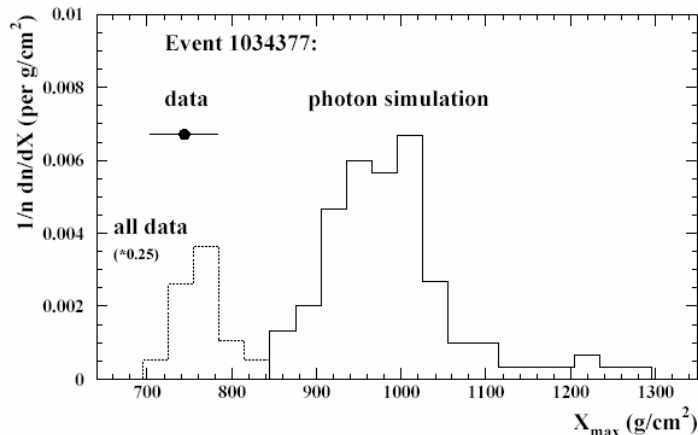


- Echelle d'énergie du FD...
- Systématiques larges, vont vite diminuer
- Lot de données restreint (trigger de niveau 5)

# 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 $E > 10 \text{ EeV}$

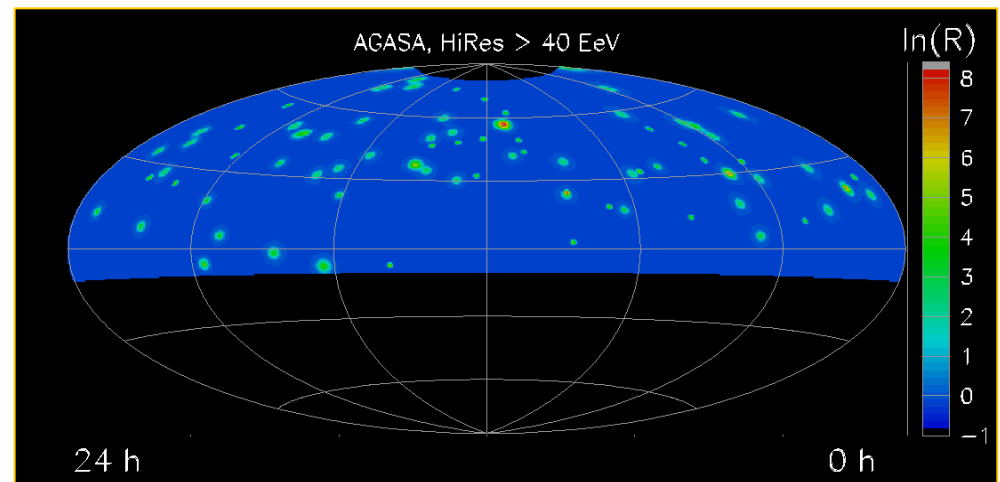
- HiRes : pas d'autocorrélation nette (mais manque de statistique encore)
- **Un amas de 5 événements** (triplet AGASA @  $E > 40 \text{ EeV}$  + 1 HiRes @  $E \sim 38 \text{ EeV}$  + 1 HiRes @  $10 < E < 30 \text{ EeV}$ )
  - Analyse HiRes :  $P(\text{amas}) \sim 28\%$
- **Corrélations avec les BI Lacs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

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

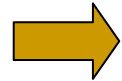


# Sujets discutés

- 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”

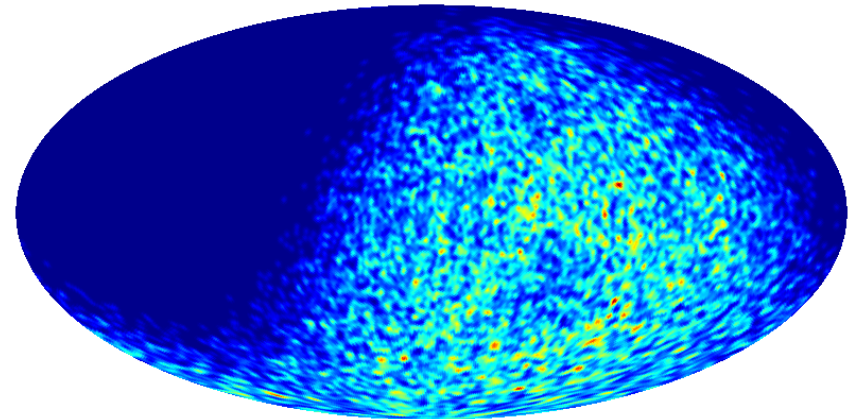
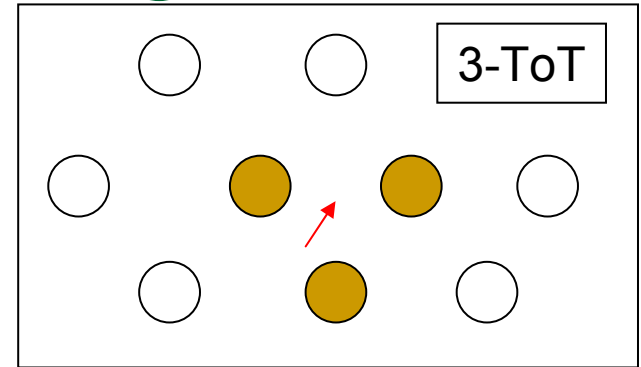
- Un trigger efficace : le “Compact 3-ToT” → événements reconstruits avec 3 cuves en configuration compacte
- Résolution angulaire  $\sim 2^\circ$  @ EeV



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

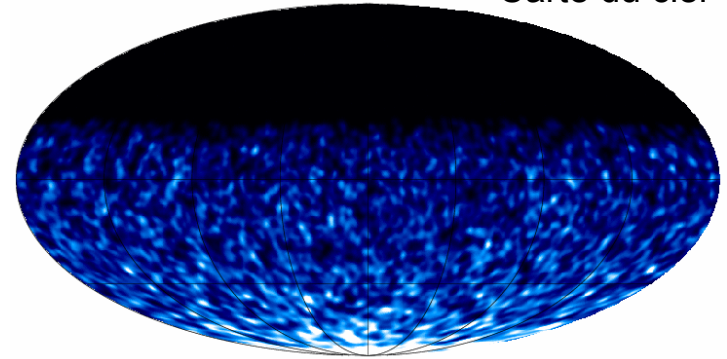


Carte des 3ToT en coord. gal.  
(année 2004)

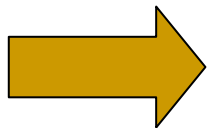
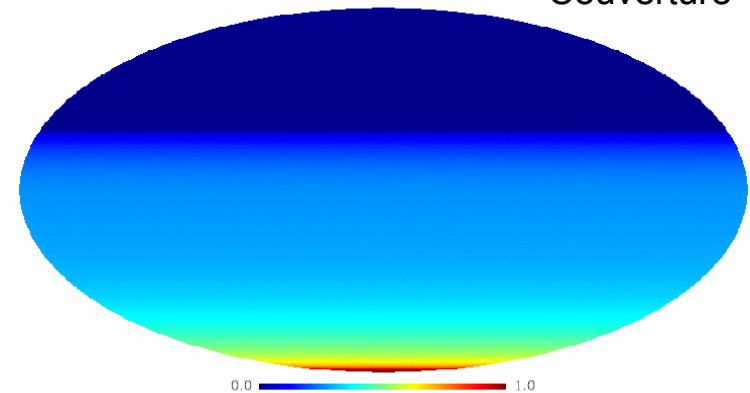
# Difficulté : couverture du ciel

- 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



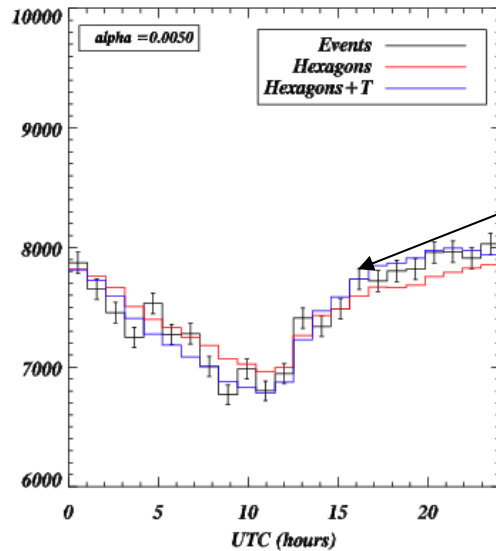
Couverture



Analyse cruciale pour les anisotropies à grande échelle

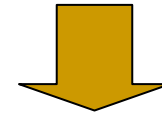


# Variations du taux d'événements

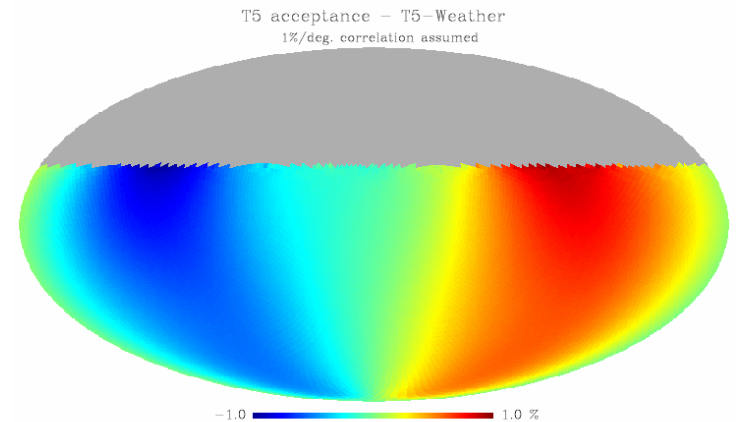
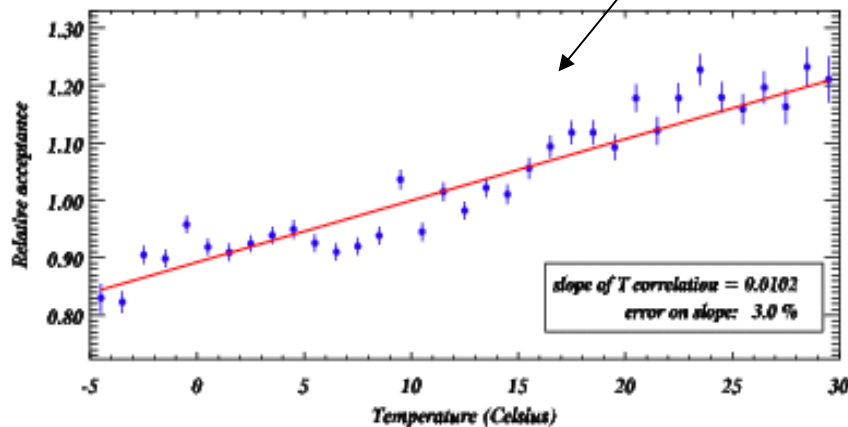


Modulation journalière  
(maintenance/déploiement du réseau)

Effets de température  
→ Modulation journalière et annuelle

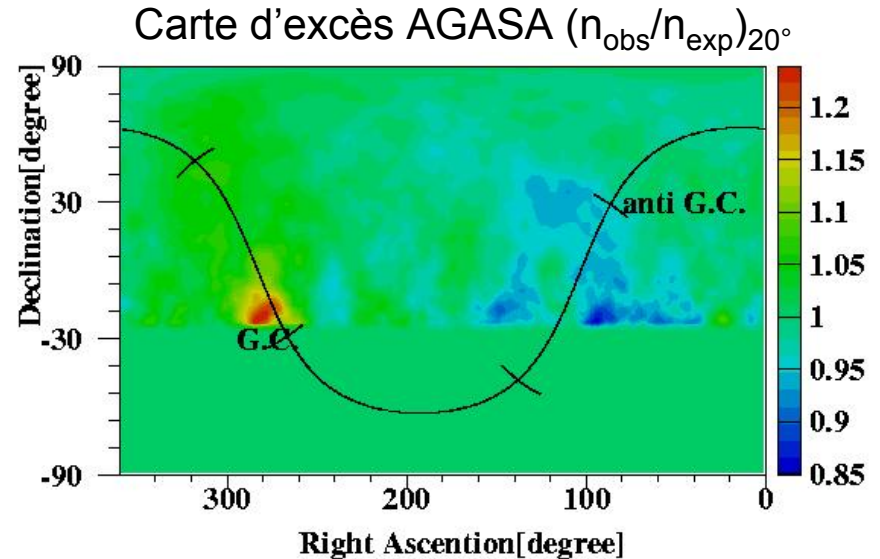


**Conséquence sur la couverture du ciel :**



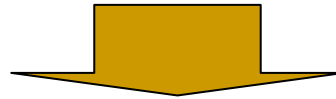
# Excès vers le centre galactique (GC)

- 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 ( $4\sigma$ )
  - Couverture supposée R.A.-invariante
- 2001 : Réanalyse de SUGAR (hémisphère Sud, années 60) :
  - Source ~ ponctuelle à 7 deg. du GC



# Une connection TeV – EeV ?

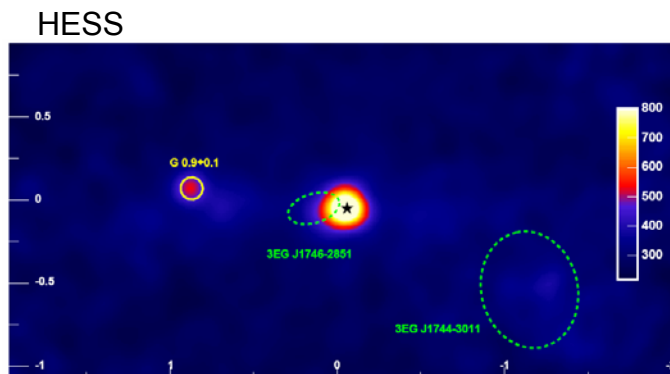
- Accélération de protons dans un (des) objet(s) du GC à l'EeV



- 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

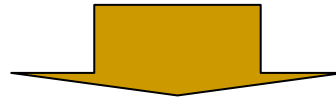


Source 3 EG J1746-2851 ?  
Source HESS au TeV~ SGR A\* ?

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

# Une connection TeV – EeV ?

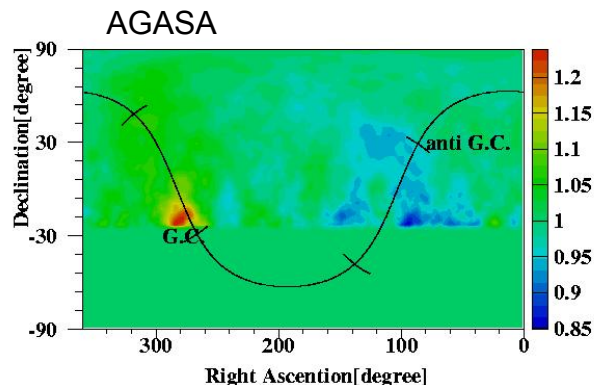
- Accélération de protons dans un (des) objet(s) du GC à l'EeV



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

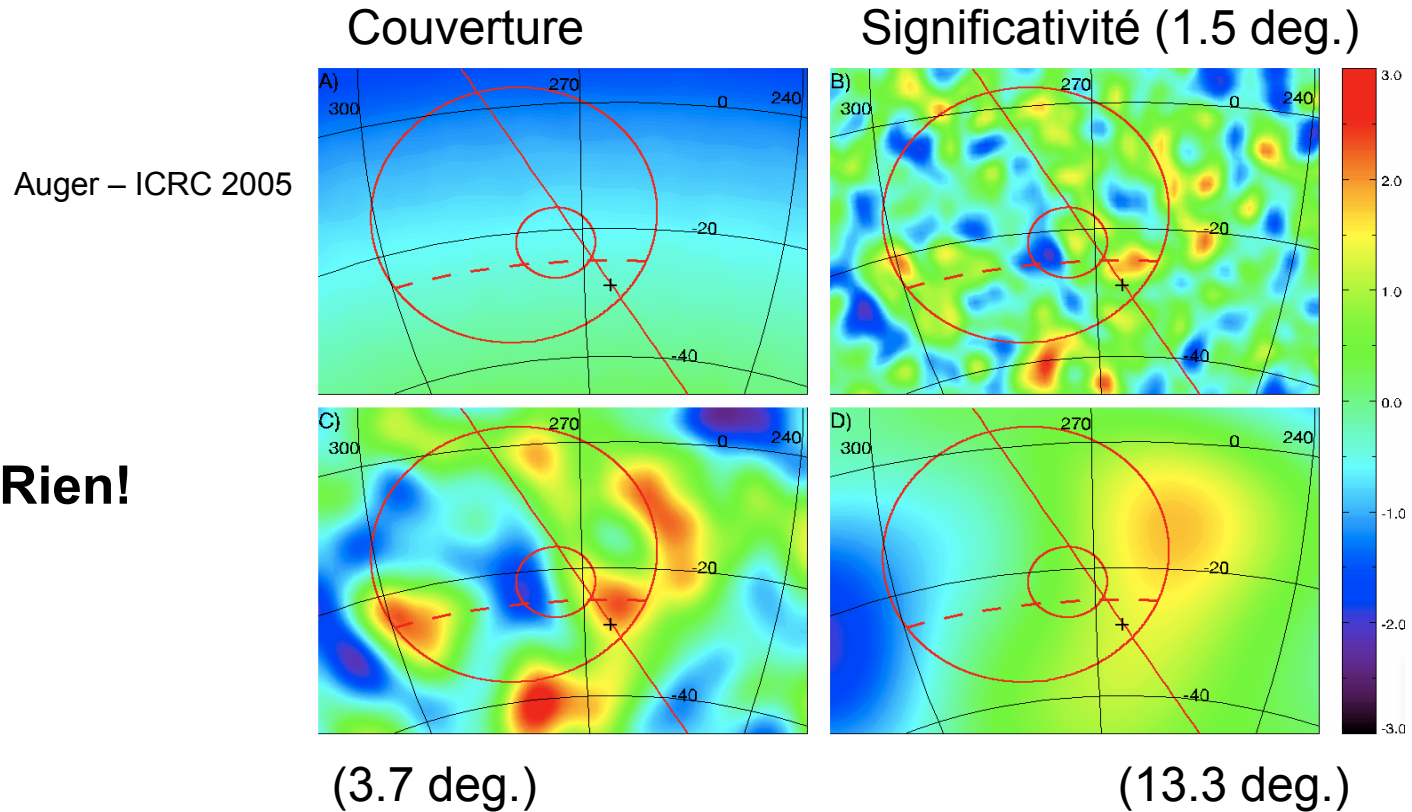
$p\gamma_{\text{IR}} \rightarrow n$  via photoproduction de pions / photodésintégration de noyaux

$\rightarrow$  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 :

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

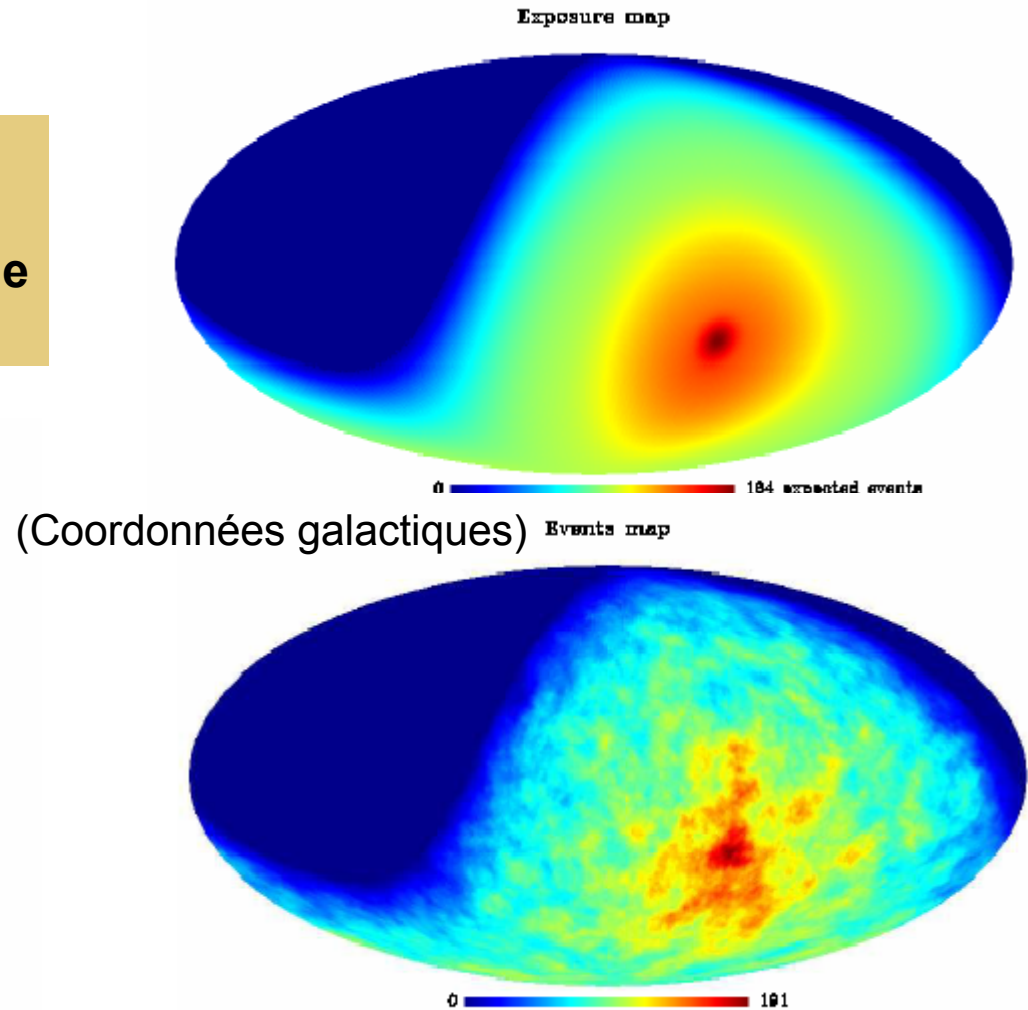
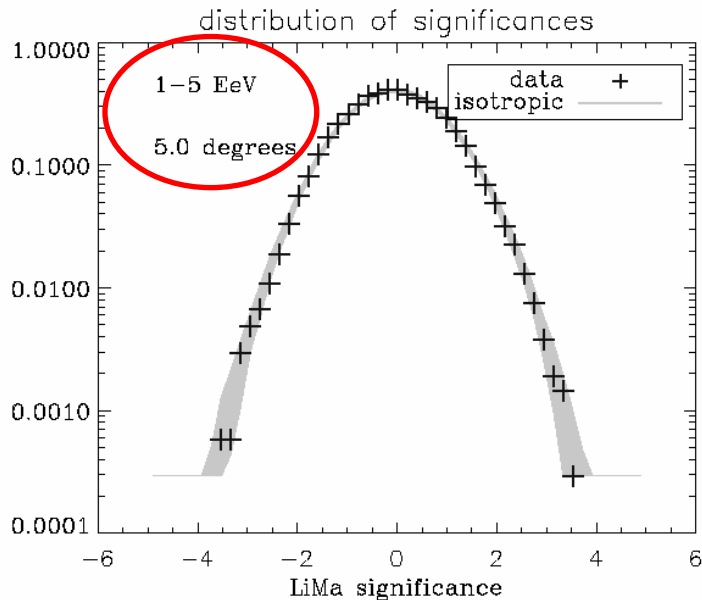
acceptance

échelle d'énergie



# Recherche aveugle de sources avec Auger

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



# 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!

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

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

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

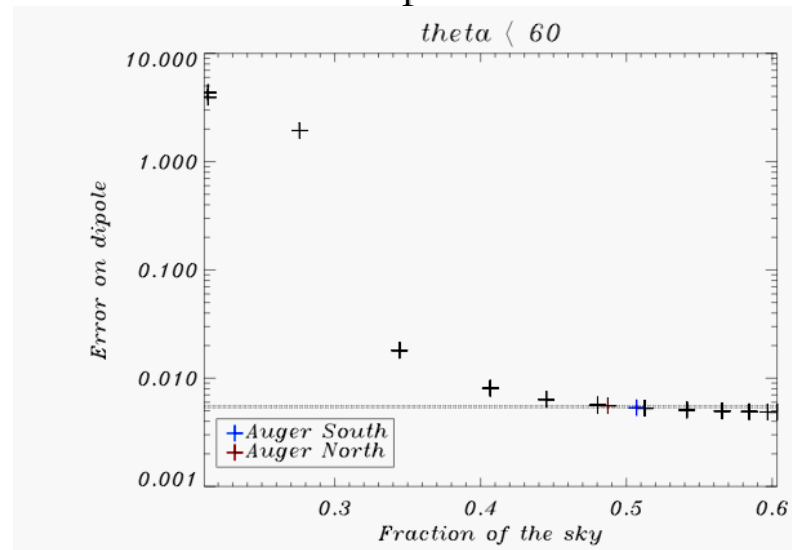
# Couverture partielle du ciel

*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:

$$\langle \tilde{C}_l \rangle = \sum_{l'=0}^{+\infty} M_{ll'} C_{l'}$$

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

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

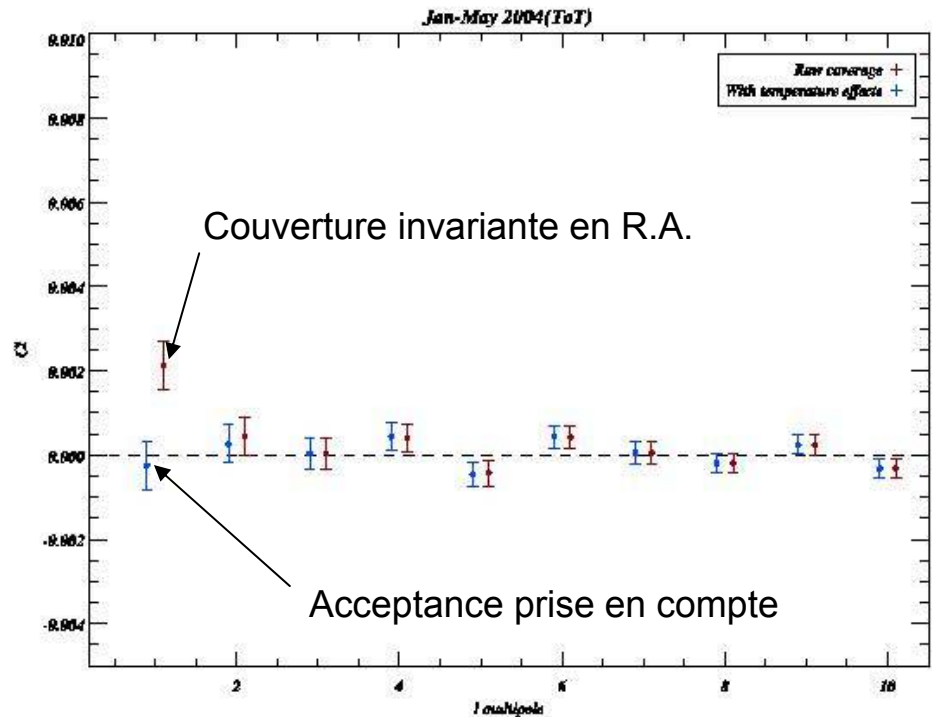


Deligny et al., JCAP, 0410:008, 2004

# Exemple de calcul de $C(1)$

## 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...

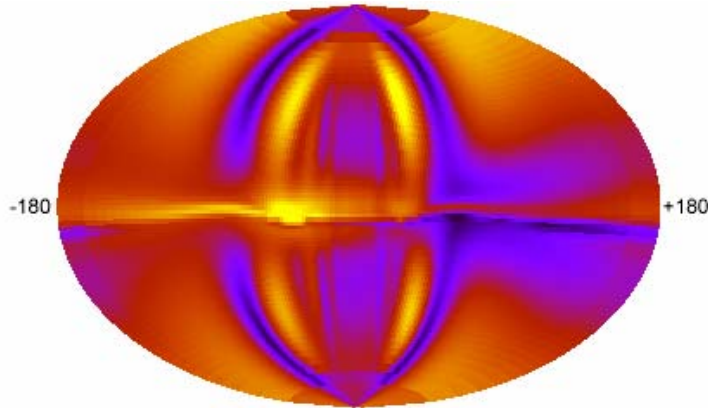




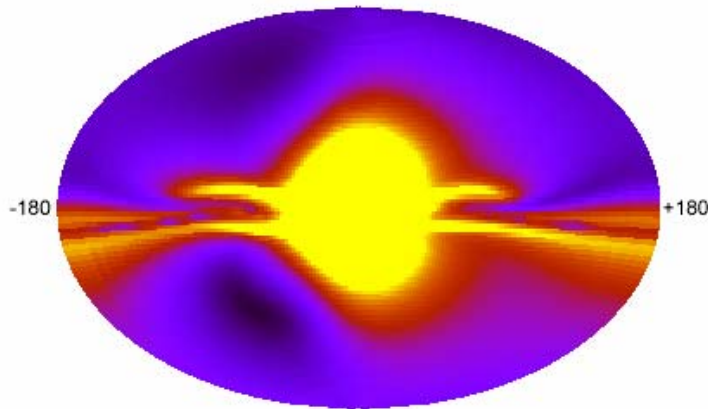
# Sujets discutés

- 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



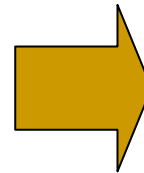
0 2 4 6 8 10 degrés



- 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 =  $4 \times 10^{19}$  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!

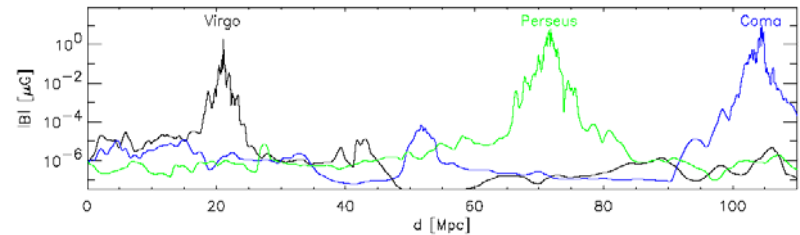
## Sigl et al. (PRD 043007) :

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

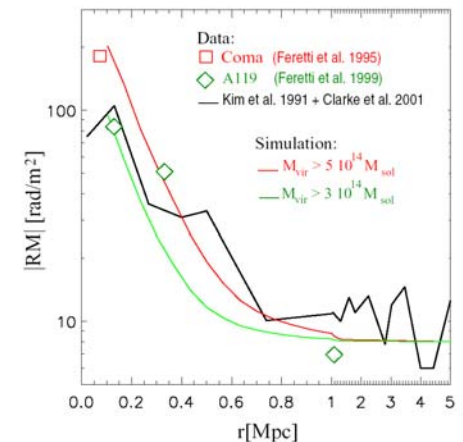
## Dolag et al. (JCAP 0501, 009) :

- 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.



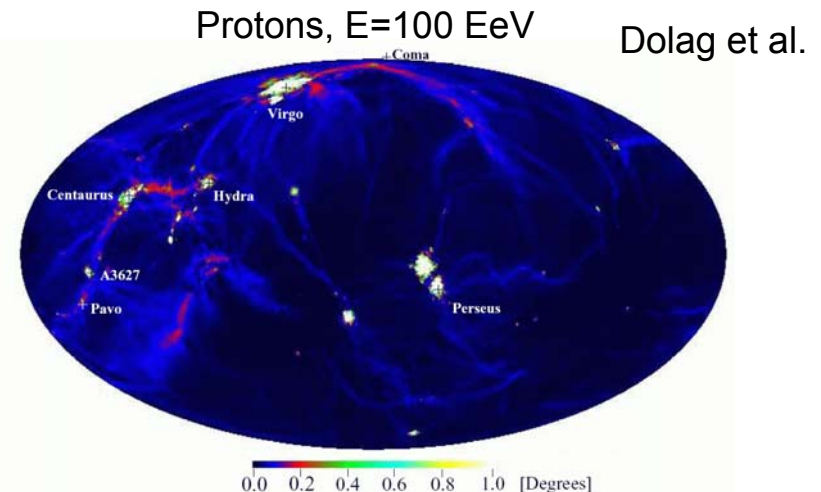
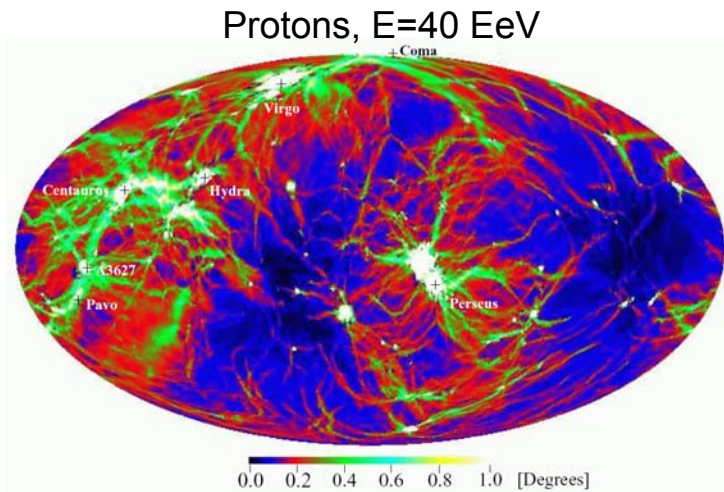
Dolag et al.



# Champs B structurés : influence sur les trajectoires des UHECRs

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

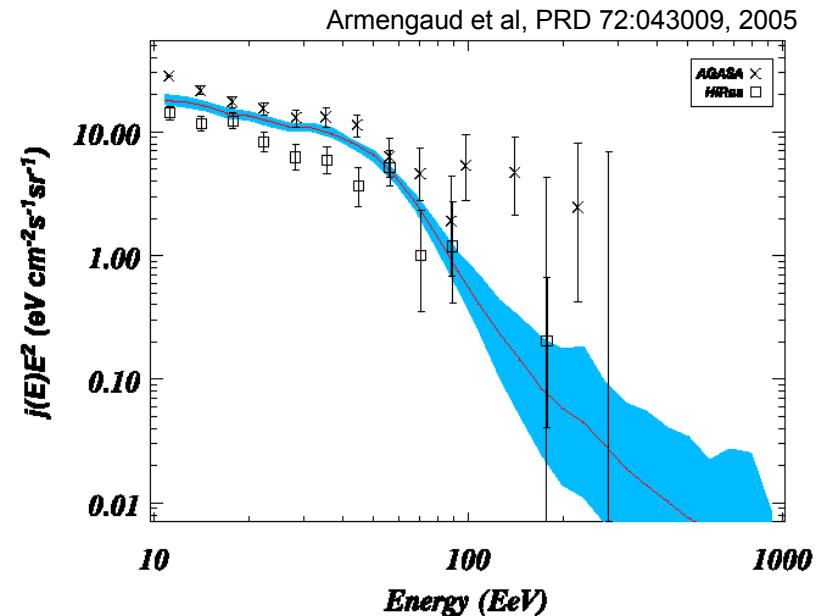
Influence négligeable hors du coeur des amas  
↓  
Astrophysique des UHECR possible sur une grande part du ciel





# Modèle de propagation des UHECRs

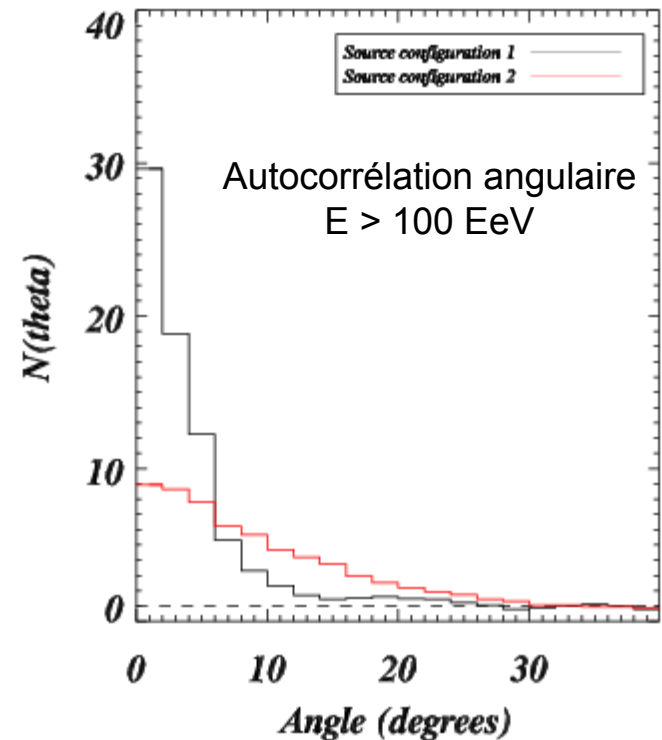
- Grille de champ B (Sigl et al.)
- Sources discrètes, densité  $\sim 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$ , distribuées selon la densité baryonique
- Injection et propagation de protons/fer
  - Suivi des secondaires
  - Enregistrement “d'événements” par un observateur = sphère de rayon  $\sim 1 \text{ Mpc}$
-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

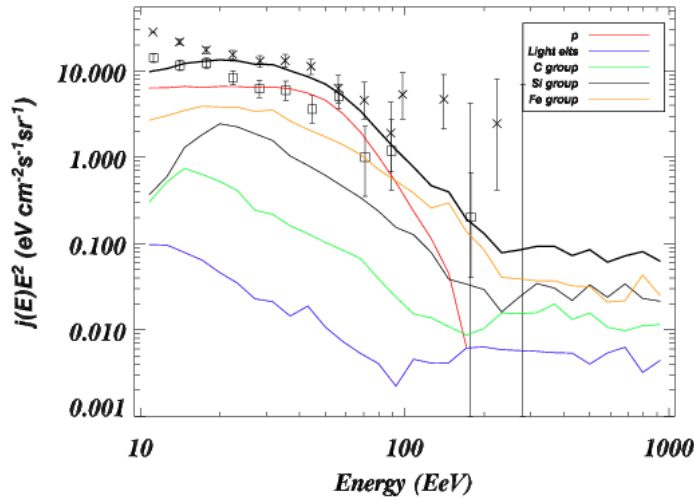
# Modèle de propagation des UHECRs

- 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**

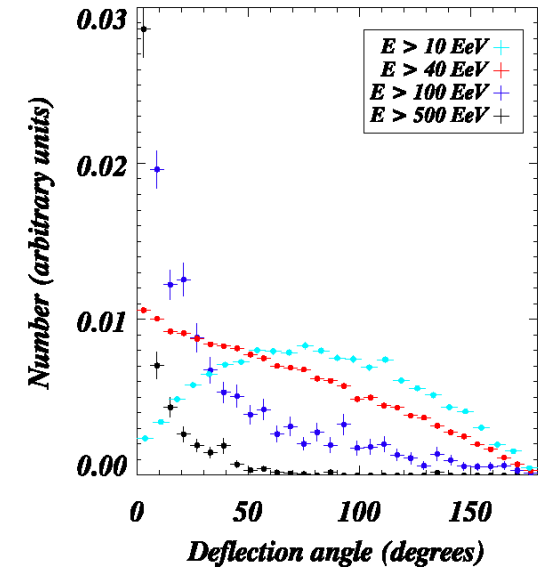


- Même scénario
- Variance cosmique considérable
- “Champs forts”  $\rightarrow$  on observe des sources étendues

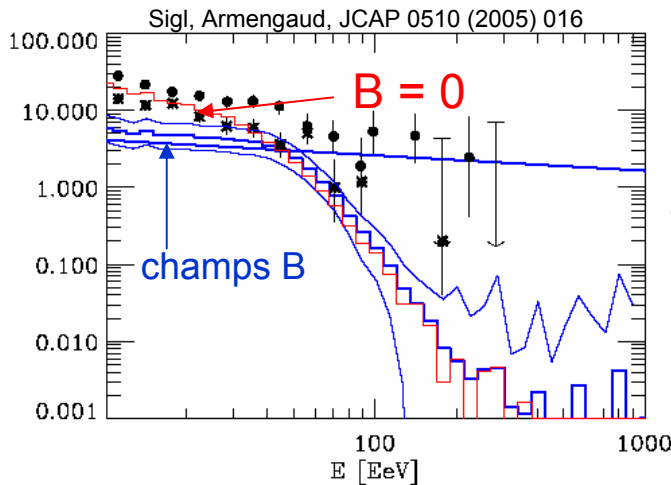
# Sources UHECR de noyaux lourds



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



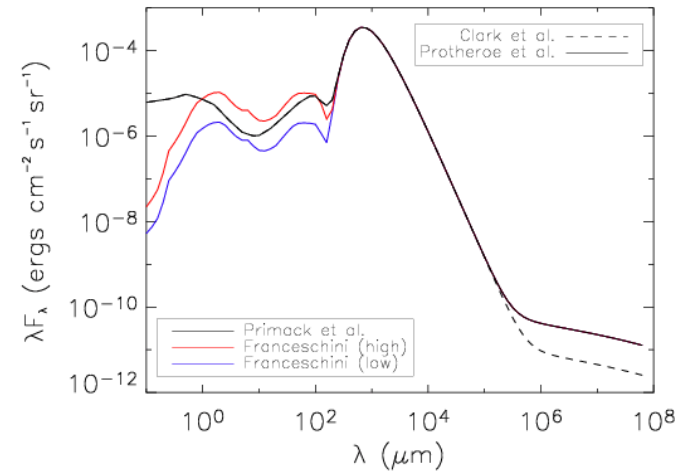
Spectre modifié  
 (interprétation de la cheville)

# 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 ( $e^+, e^-, \gamma, \nu$ ) sont générés et suivis après la propagation des protons
- Les  $e^+, e^-, \gamma$  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 :

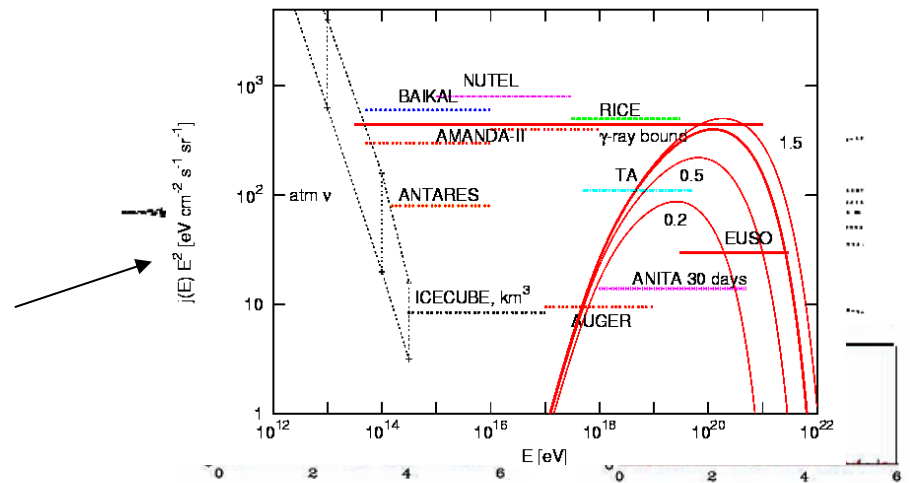
- plusieurs modèles possibles
- utilisés à la fois pour les interactions des hadrons et les cascades EM

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

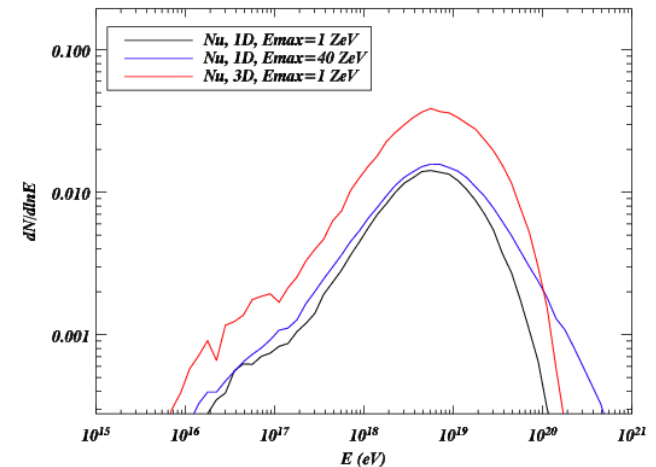


# Neutrinos GZK provenant d'une source proche et magnétisée

- 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)

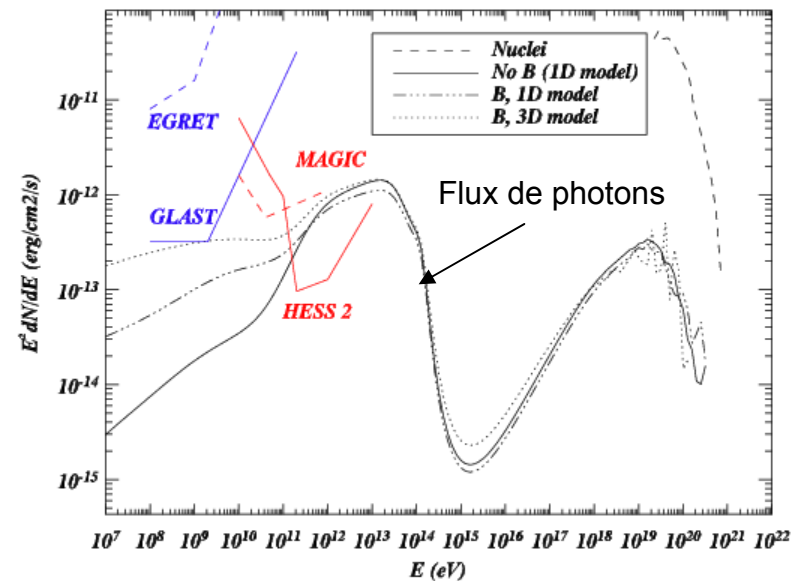


# Flux au GeV – TeV d'une source d'UHECRs magnétisée

- 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

