

Groupe V : Astroparticules, frontière entre la physique des particules et la thématique de l'astrophysique :

- **Détection:**

- Techniques très diverses :

- Imagerie, **Calorimétrie (gerbes atmosphériques), Interférométrie** ...

- **Messagers,**

- **Rayons cosmiques (chargés)**, Gamma,

- Neutrinos, **Ondes gravitationnelles**,



Sources possibles

Peu ou pas d'origines communes

Ondes gravitationnelles

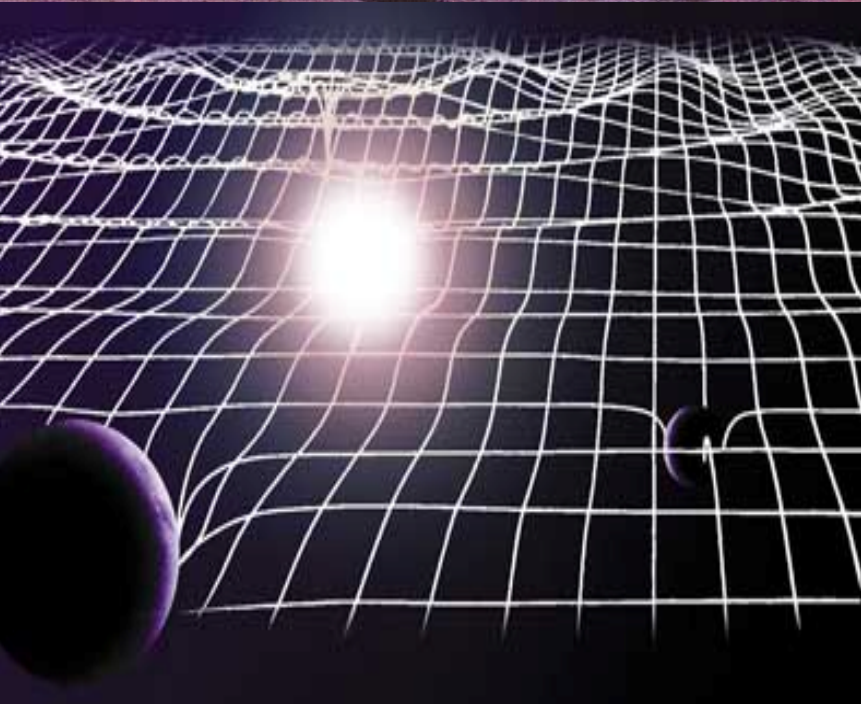
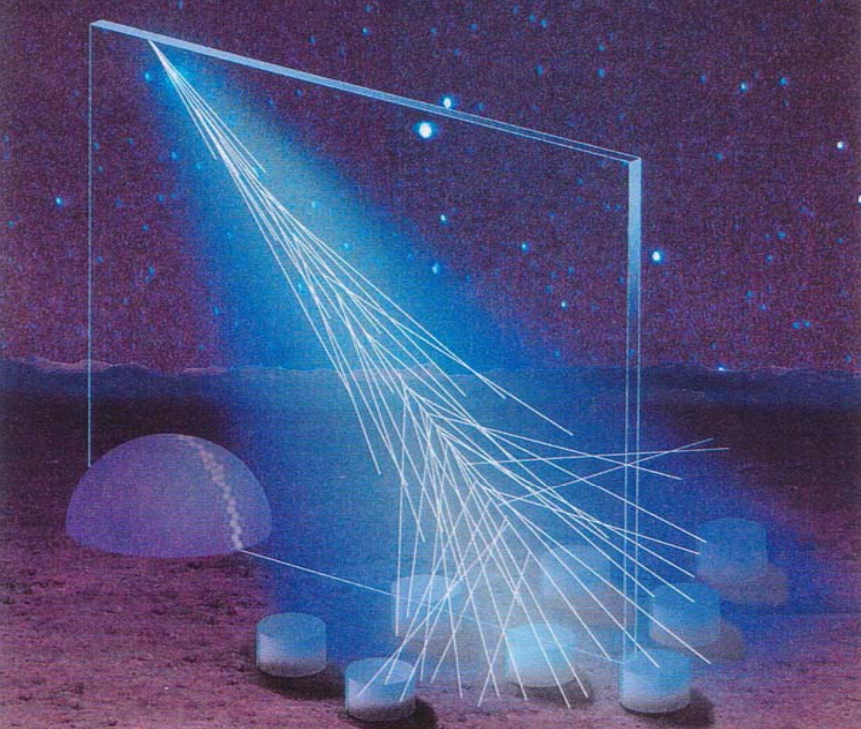
déformation d'astres compacts

- Supernovae gravitationnelles
- Binaires spiralantes
- Désexcitation trous noirs
- Pulsars (déformations)
- Sursauts gamma ?

Rayons Cosmiques

accélération de particules et/ou désexcitation de particules très massives

- Vestiges de supernovae
- Jets relativistes
- Pulsars (accélération)
- Sursauts gamma ?
- Reliques primordiales



Sommaire :

- Perspectives avec les rayons cosmiques chargés

Sylvie Dagoret-Campagne

- Perspectives avec la détection d'ondes gravitationnelles,

Nicolas Leroy

- Conclusion

Participants aux discussions

- Fabien Cavalier
- Patrice Hello
- Nicolas Leroy
- Alain Cordier
- Sylvie Dagoret-Campagne
- Delphine Monnier Ragaigue
- Xavier Garrido
- Marcel Urban

Perspectives sur les Rayons Cosmiques d'Ultra Haute Energie (RCUHE)

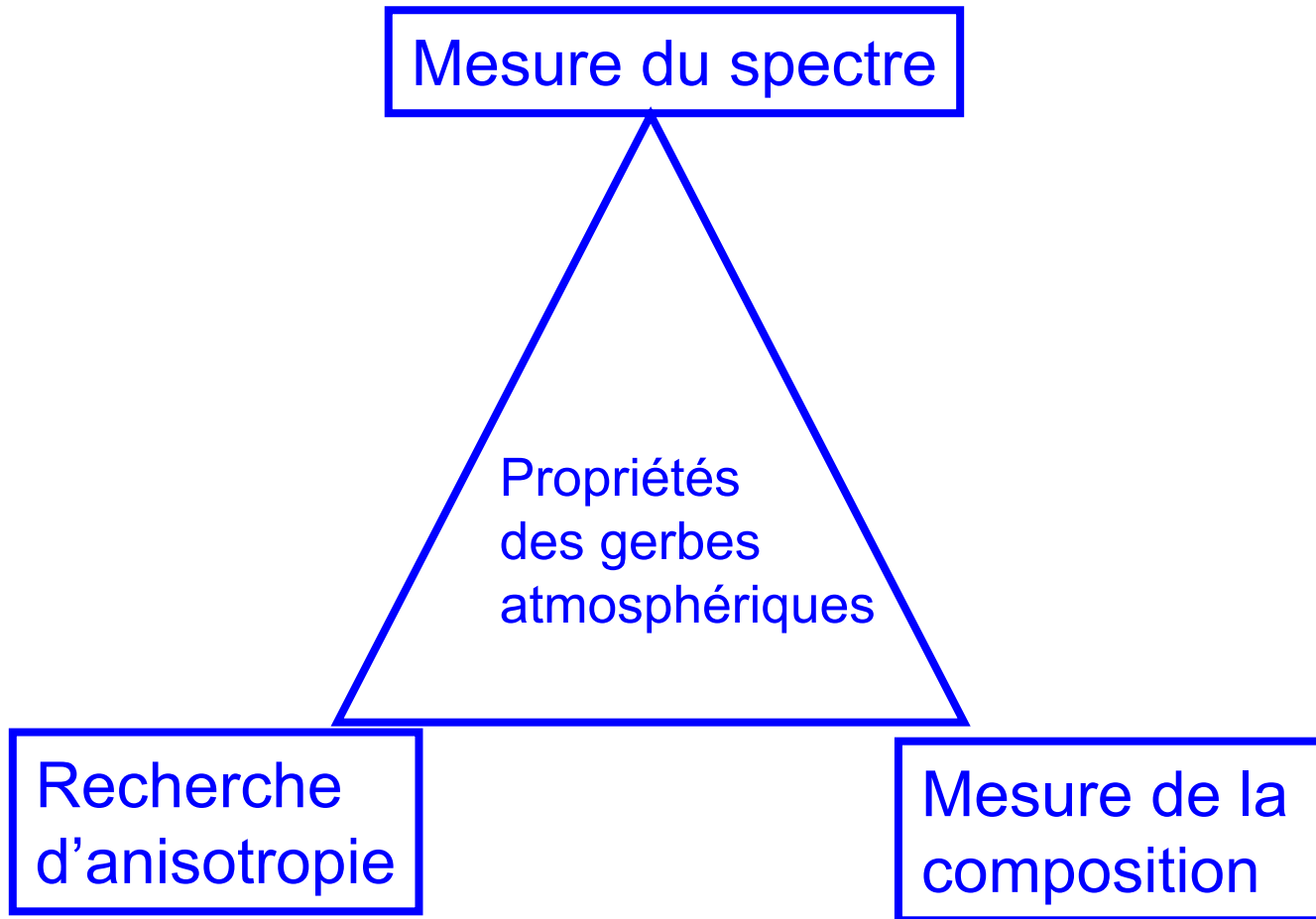
Groupe d'Astro Particules @
LAL



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 5 ans?, dans les 10 ans?
- L'avenir de la physique des RCUHEs (futurs générations de projets, R&D sur les mesures de gerbes atmosphériques)

Outils pour cerner le mystère des RCUHE



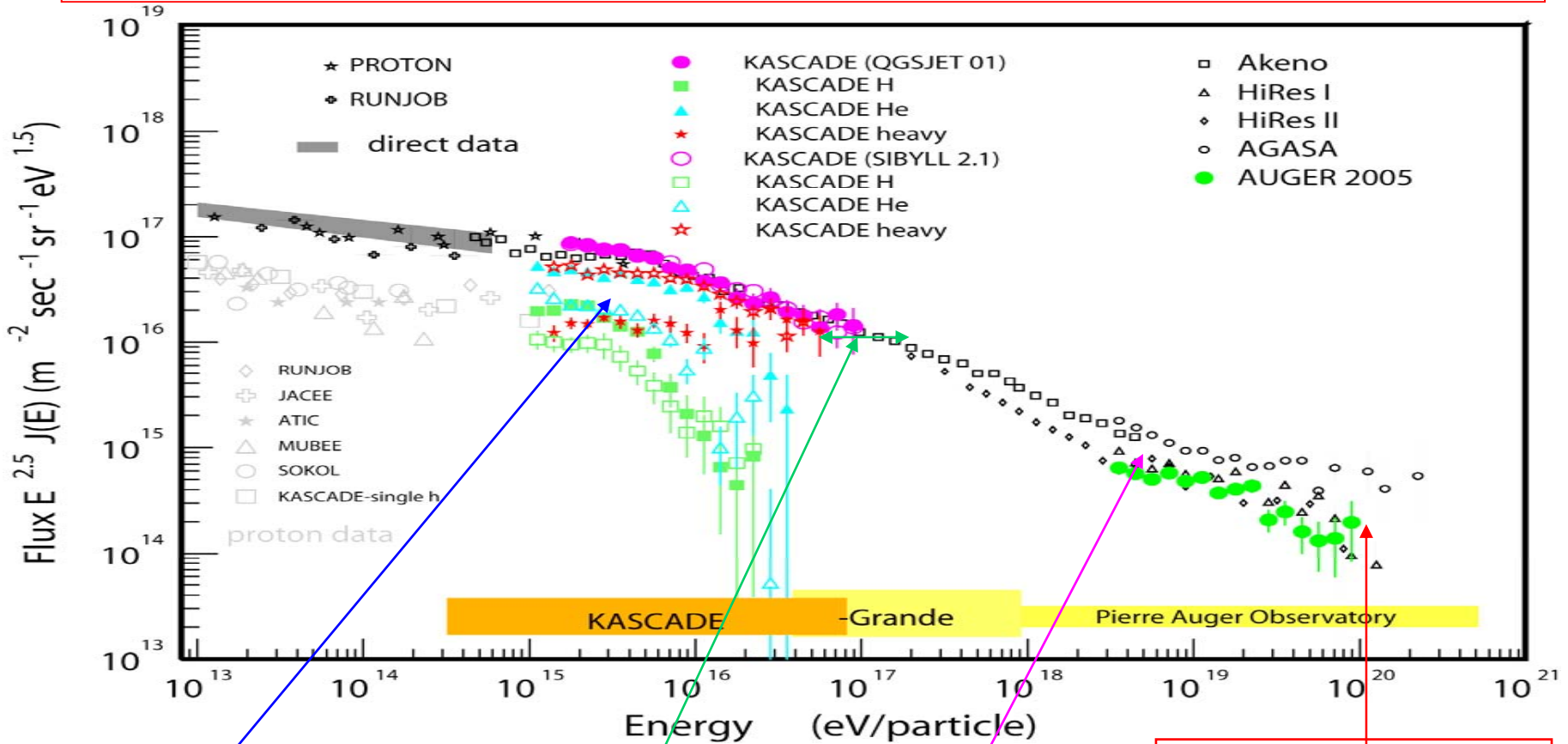
Le spectre



Biennale du LAL, Branville, mai
2006



La mesure du spectre aujourd'hui



le genou bien établi

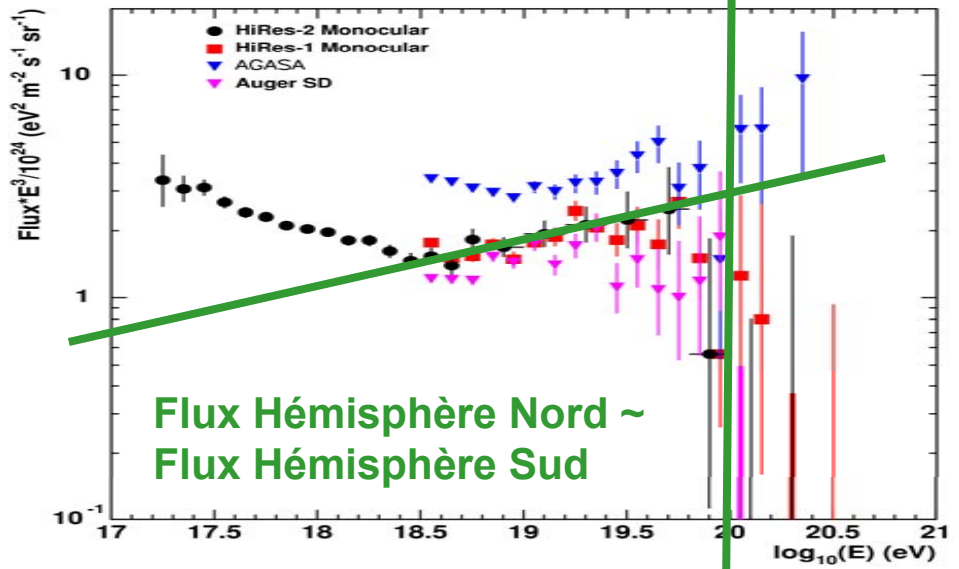
le second genou : pas clair

La cheville, presque établie

La coupure GZK : La controverse AGASA/Hires

La coupure GZK existe t'elle ?

Expérience	Exposition (km ² .sr.an)
AGASA	1645
Hires (Mono)	5000
Hires (Stéréo)	2500
Auger ICRC2005	1742
Auger/1an,	10 ⁴



ICRC2005	Nb. Ev prédits	Nb Ev observés	probabilité	écart
Hires Mono	$E > 10^{19.75} eV$ 42.8	$E > 10^{19.75} eV$ 15	$2.4 \cdot 10^{-4}$	3.5σ
Auger	$E > 10^{20} eV$ 6	$E > 10^{20} eV$ 0	$2.5 \cdot 10^{-3}$	2.4σ

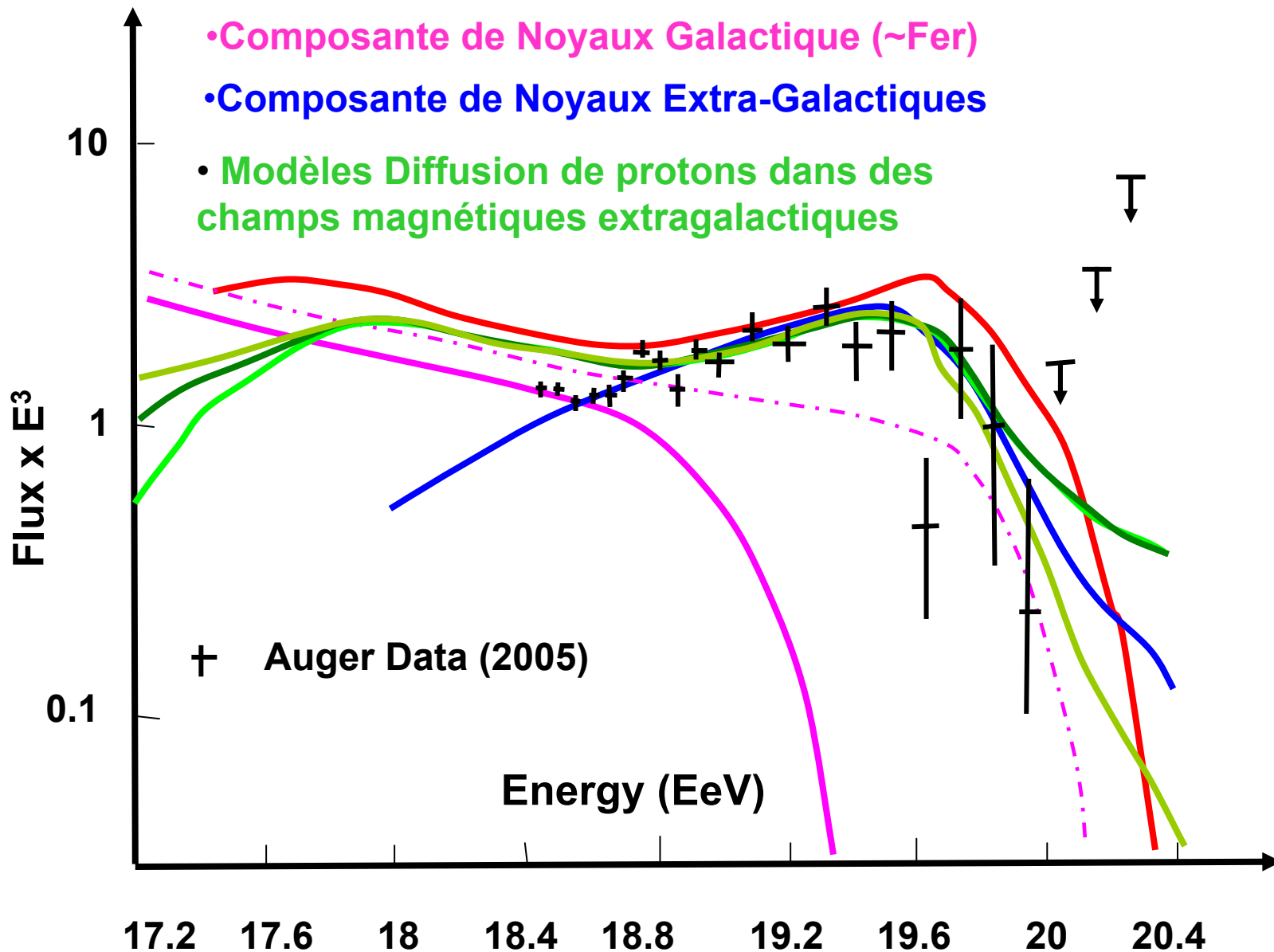
Hypothèse	Nb ev GZK dans Auger/an
Pas GZK	33
GZK optimiste	3-5
GZK pessimiste	0.4-08

• Composante de Proton Extragalactique $Q(E) \sim 1/E^{2.6}$

• Composante de Noyaux Galactique (~Fer)

• Composante de Noyaux Extra-Galactiques

• Modèles Diffusion de protons dans des champs magnétiques extragalactiques



Anisotropie



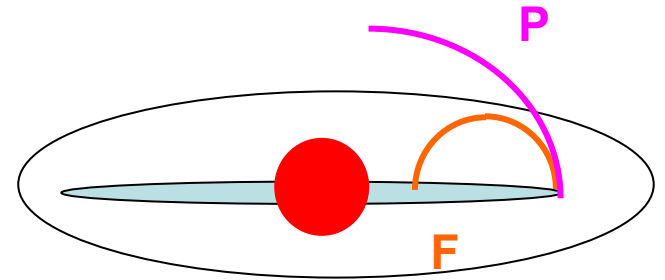
Biennale du LAL, Branville, mai
2006



Recherche d'anisotropie, Localisation de sources

1. Déflexion continue dans un champs magnétique réguliers (lentille magnétique):

$$R_{\text{larmor}} \text{ (Kpc)} = 10 E \text{ (EeV)} / B \text{ (\mu G)} / Z$$
$$\theta = 6^\circ Z D \text{ (Kpc)} B \text{ (\mu G)} / E \text{ (EeV)}$$

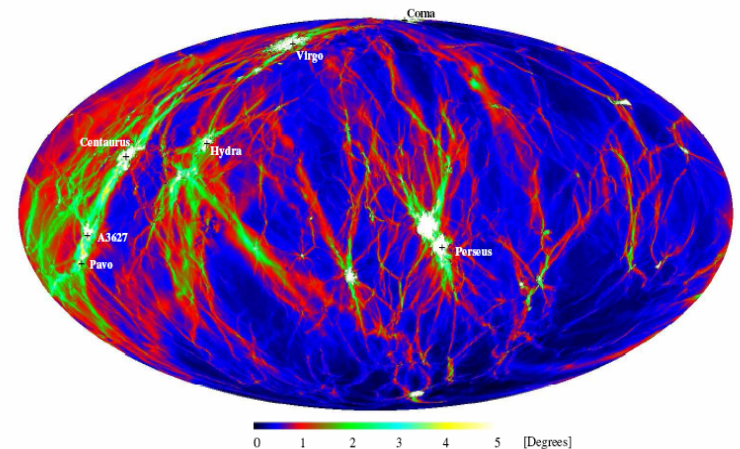


2. Dispersion angulaire due à la composante turbulente des champs magnétiques:

$$\delta\theta = 0.5^\circ Z (D/10\text{Mpc})^{1/2} (L_c/1\text{Mpc})^{1/2} (B/\text{nG}) / E (10^{20}\text{V})$$

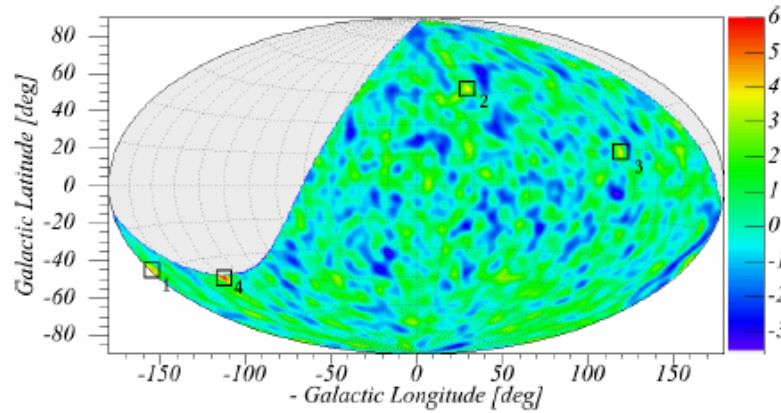
- A partir de quelle énergie peut t'on espérer apercevoir de l'anisotropie ?
 - Petite échelle (source ponctuelle) et grande échelle (structure)
- Que peut ton apprendre sur les sources?

Carte des déflexions de protons ($4 \cdot 10^{19}\text{eV}$) émis par des sources extragalactiques ($d < 107\text{Mpc}$) dans les champs extragalactiques

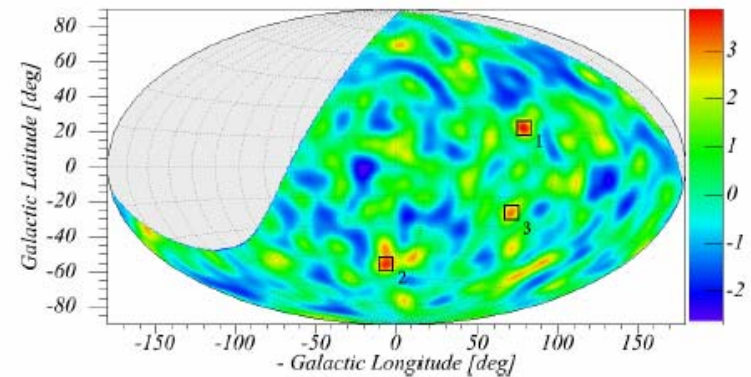


Recherche de points sources : Résultats d'Auger à basse énergie

**Significance map $1\text{EeV} < E < 5\text{EeV}$
 2° filtering (~ 27500 events)**

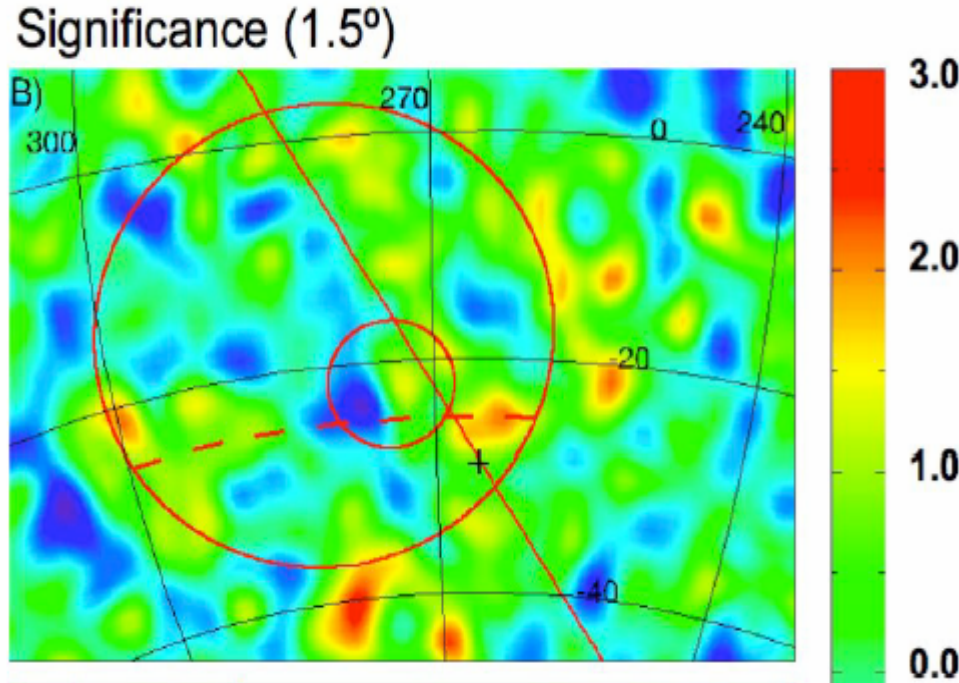


**Significance map $E > 5\text{EeV}$
 4° filtering (~ 1400 events)**



Besoin de plus de statistique à haute énergie:
 ~ 10000 événements $10^{19}\text{eV} < E < 6.10^{19}\text{eV}$ en 5 ans,

Résultat d'Auger: Pas d'anisotropie en direction du centre Galactique ($\alpha=274^\circ, \delta=-22^\circ$)



Etude d'Auger:

$0.8\text{EeV} < E < 3.2\text{EeV}$

Rayon de 5° autour du centre galactique

Nombre d'év détectés: 24.3

Nombre d'év prédits: 23.9

Excès d'AGASA (4.5σ) et de SUGAR (2.9σ) non confirmés

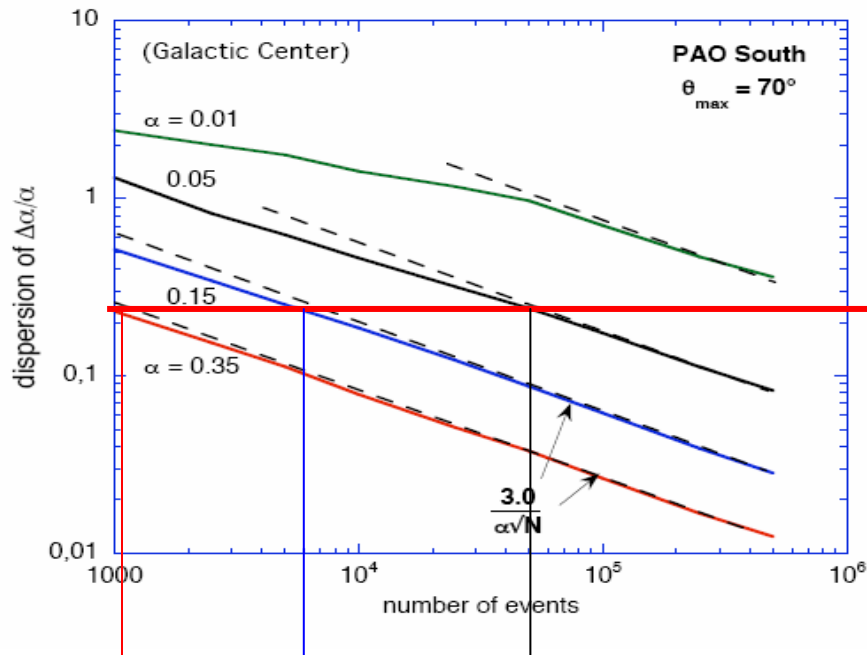
Source de neutrons exclue

Limite supérieure sur le flux d'une source en plus du flux de CR:

$\Phi_s (\text{SD}) < 2.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à 95% CL

$\Phi_s (\text{Hybrid}) < 1.2 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à 95% CL

Anisotropie à grande échelle : dipole, quadripole, spectre de puissance angulaire...



$$I(\vec{u}) = \frac{N}{4\pi} (1 + \alpha \vec{D} \cdot \vec{u}), \alpha \vec{D} = \int I(\vec{u}) \vec{u} d\Omega$$

α amplitude de la composante dipolaire,
 N nombre d'événements

Sensibilité à 5σ

$\alpha=35\%$
6mois

$\alpha=15\%$
2.7ans
3.6 mois

$\alpha=5\%$
25 ans
3 ans

$\alpha=1\%$
 impossible

$10^{19}\text{eV} < E < 5 \cdot 10^{19}\text{eV}$ (2000 ev par an)

$5 \cdot 10^{18}\text{eV} < E < 10^{19}\text{eV}$ (19000 ev par an)

Composition



Biennale du LAL, Branville, mai
2006



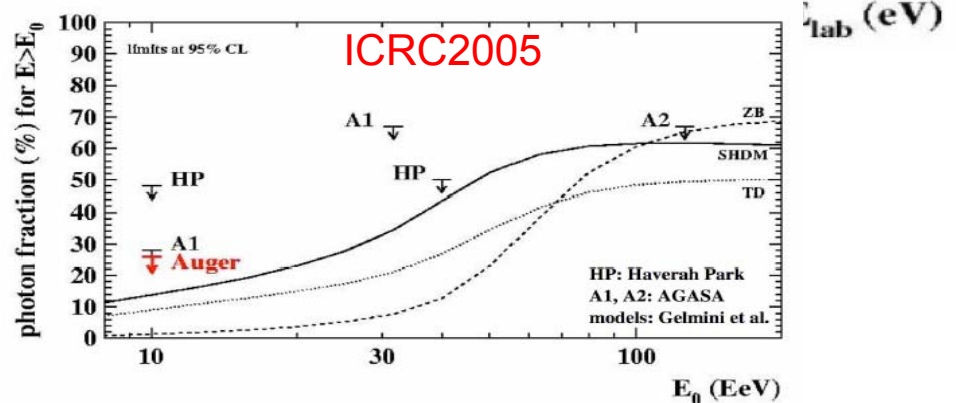
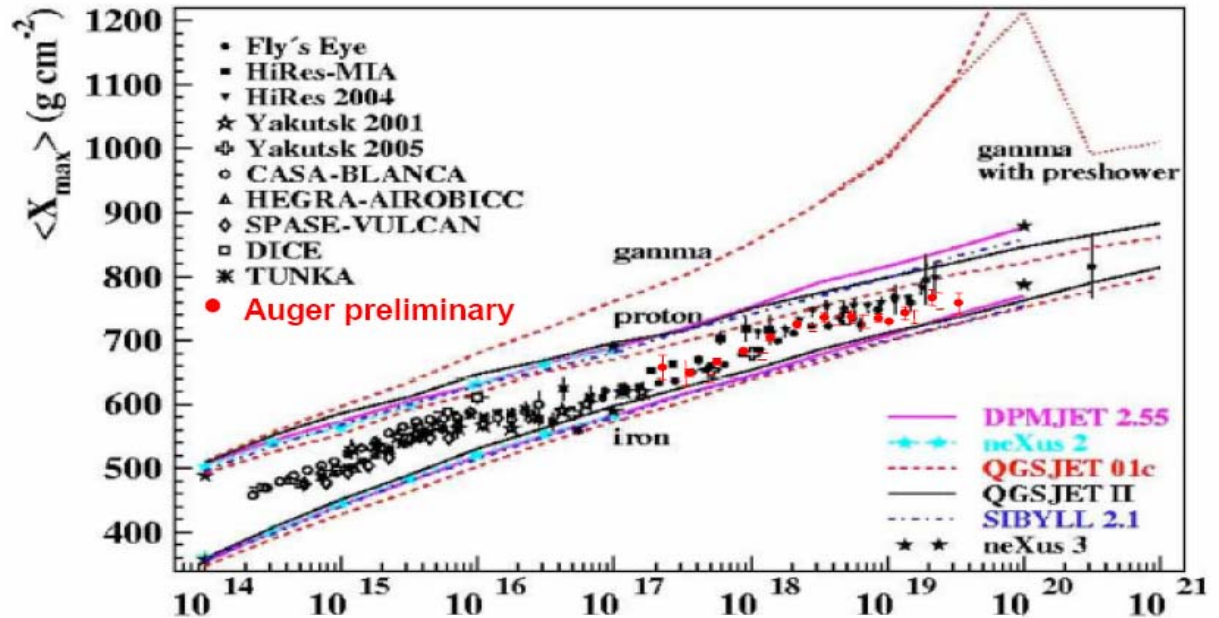
Etude de la composition avec la Fluorescence: Mesure de la profondeur du maximum de la gerbe X_{\max}

Transition lourd \rightarrow léger
entre 10^{17} eV et
 10^{19} eV ?

(Composante galactique \rightarrow
extragalactique par
exemple)



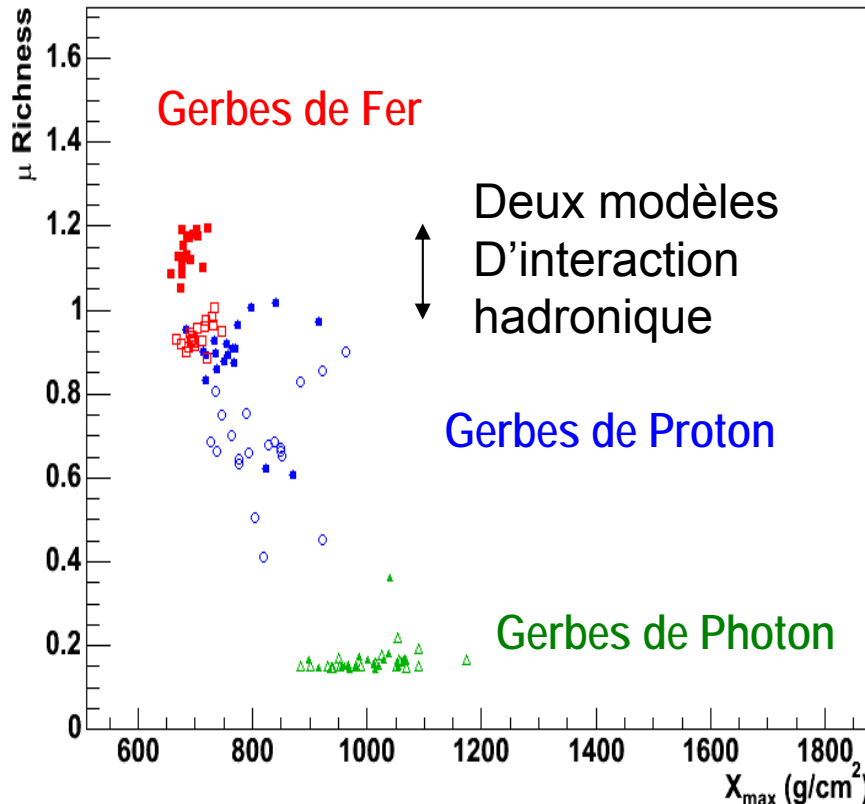
La fraction de photons dans
Le flux de rayons cosmiques
est inférieure à 26 %



Perspectives sur la mesure de la composition : la séparation des composantes muonique / électromagnétique combiné avec la mesure du X_{\max}

Thèse de Xavier Garrido en 2008 !

S_{μ}/S_{em} à 1km ($E=10^{19}eV$, $\theta=45^{\circ}$)



Objectifs:

- Identification
- Mesure de $\sigma_{p-air}(E)$

Muons:

- Analyse détaillée des traces de FADC, reconnaissance de pics ,
- Scintillateurs de muons pour Auger Sud (Upgrade d' Auger Sud),
- FADC(100 MHz) pour Auger Nord,

X_{\max} :

- Élévation maximale des télescopes 30° -> 60° (Upgrade d' Auger Sud)

En résumé

- A court terme :
 - Existence de la coupure GZK avec AUGER (acceptance = $10^4 \text{km}^2 \cdot \text{sr}$),
 - Limite supérieure du flux de photons,
- A moyen terme (5ans):
 - mesure précise de la cheville (spectre et composition)
 - Auger Upgrade (au sud 2007-> 2010)
 - TA/TALE (cette année dans l'UTAH) ($1400 \text{ km}^2 \cdot \text{sr}$)
 - recherche de sources (et multiplets), pour $E > 10^{19} \text{ eV}$
- A plus long terme (10-20 ans) :
 - Etudes des anisotropies à grande échelle (AUGER N+S)
 - Etude des anisotropies à petite échelle et la mesure du spectre devrait permettre de déterminer la densité des sources pour $E > 10^{19} \text{ eV}$ dans les 10-15 ans (limitation possible du champ magnétique extragalactique)
 - **Mesure détaillée de la coupure GZK** : il faut une acceptance 10 à 100 fois plus grande que celle d'Auger.
 - Satellite mesurant la fluorescence,
 - Grands réseaux radio,

Futurs projets

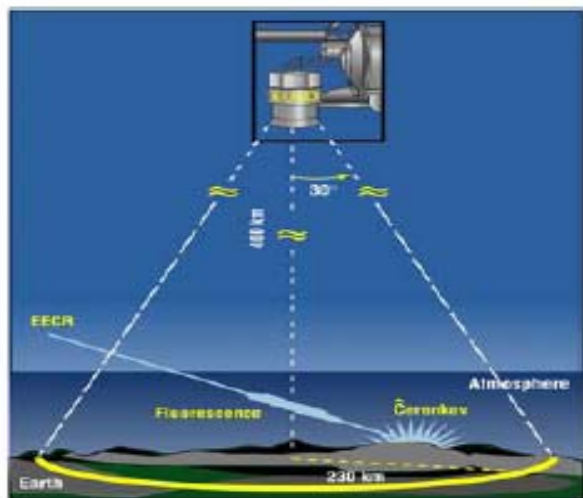


Biennale du LAL, Branville, mai
2006



Les projets basés sur des techniques « standards »

- **Upgrade d'Auger Sud**: dédié à l'étude de la cheville et à la composition
- **Auger Nord**: spécialement dédié pour la recherche des anisotropies à grande échelle $10^4 \text{km}^2 \cdot \text{sr}$ par an,
- **Telescope Array (TA/TALE) + Hires (Nord)**, (acceptance $\sim 15\%$ Auger)
- **Fluorescence satellites** acceptance effective $\sim 10^5 \text{km}^2 \cdot \text{sr}$ par an, couverture complète du ciel:
 - EUSO, OWL (stéreo mode),

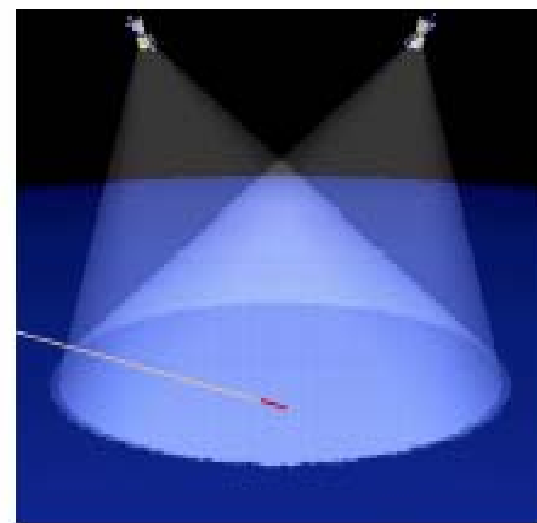


H=400km, R=230km

EUSO (mono)
~effective aperture:
16xAuger

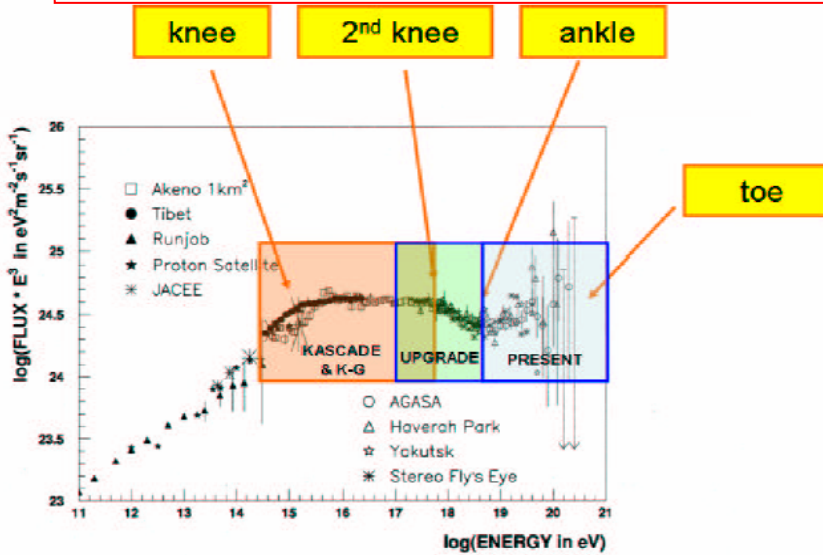


OWL (stéreo)
~effective aperture:
20xAuger

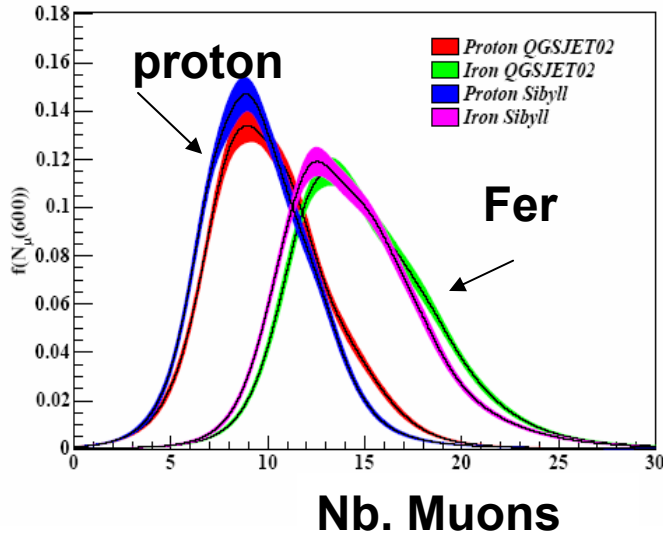


H=1200km, R=600km

Upgrade d'Auger



- Elévation des Telescopes 0 ->60° pour mieux mesurer le X_{\max} les gerbes de faible énergie,
- Réseau Infill (espacement des cuves 1.5km-750m)
- Scintillateurs enterrés (projet AMIGA) pour compter les muons



• 20 km²

Reconstruction du nb de muons avec AMIGA



(minos)

Les projets basés sur la radio détection

- **Les grand réseaux radio** ,
 - On utilise l'émission radio des gerbes en remplacement de l'émission de fluorescence ou de lumière Cerenkov optique (antenne peu chère ou cornet) cycle utile 100 % (mais beaucoup de bruit anthropomorphique).
 - R&D Codalema(LAL), Lopes(Kascade) , Radio à Auger-Sud, Amber à TA,
 - Réseaux de Radio Astronomie en large bande utilisés en interférométrie (potentialité à long terme si aménagement pour la détection des gerbes).
 - LOFAR (20-240 MHz), Acceptance~ $\sim 10^5$ km² pour la radioastronomie,
 - SKA (100 MHz-25GHz), Acceptance $\sim 10^6$ km² pour la radioastronomie,
- **Echo Radar** sur la charge de la colonne de densité induite par une gerbe atmosphérique (pas de R&D), Acceptance $\sim 10^5$ km².sr à 10^{20} eV.

Radio detection associated with particle detectors : The measurement



- (Coherent ?) Geosynchrotron emission with dipole antenna by Codalema group (R&D in Auger South, 10-100MHz)



- Coherent Molecular Bremstrahlung emission detection with microwave by Hawaii group (AMBER, R&D in TA, 5-20 GHz)
 - 4 pixels here, 4 channels per pixels (2 orthogonal polarisation, 2 frequency channels in microwave)



Conclusions sur les perspectives

- La compréhension de l'origine des RC nécessite la combinaison de 3 mesures: le spectre détaillé (et notamment la coupure GZK), l'anisotropie du ciel entier et la composition des RCs
- Durant les **~10 prochaines années**, le programme d'upgrade d'Auger sud est particulièrement intéressant pour l'étude de la composition (grâce au comptage de muons) dans la gamme **10^{18} eV - 10^{19} eV**,
- Auger Nord permet l'étude des anisotropies à grande échelle **~10 ans**,
- Enfin la radio détection des gerbes pourrait atteindre une couverture suffisante (**$>10^5 \text{km}^2 \cdot \text{sr}$**) pour la mesure détaillée de la coupure GZK
 - R&D **~ 5-10 ans**
 - Les grands réseaux radio dans **10-20 ans**.



