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

- Au cœur de l'astrophysique et des astroparticules
- La révolution en cours (détecteurs et résultats)
- L'avenir commence aujourd'hui!

Les rayons cosmiques

(particules énergétiques sillonnant le cosmos)

- Rôle central en astrophysique
 - Énergétique : composante majeure de la Galaxie
 - ◆ Équilibre du milieu interstellaire
 - Régulation de la formation d'étoiles
 - Astrochimie et astrobiologie

écologie galactique

- Rôle pour les affaires humaines
 - ◆ Évolution biologique, santé, climatologie, Herschell et le prix du blé...
- Rôle dans l'histoire des sciences
 - Naissance de la physique des particules (positon, muon, pions, particules étranges...)

Et pourtant... origine inconnue!

Quelques grammes de matière... ...dans un monde lumineux

- Messagers de l'univers énergétique
 - ◆ Tout ce qu'on sait en astro vient de la lumière... et de 4 RC/cm²/s (1 kg/an)

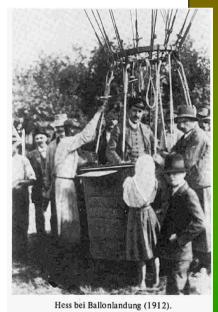


astronomie des photons



40 000 ans >> 100 ans physique des rayons cosmiques





(Hess, 1912)

Développement de l'astronomie

- « Astronomie binaire »
 - ◆ constellations...
- « Astronomie analogique »
 - intensités... (magnitudes : Ptolémée)
- Astronomie physique = « astrophysique »



(longueurs d'onde/fréquences)

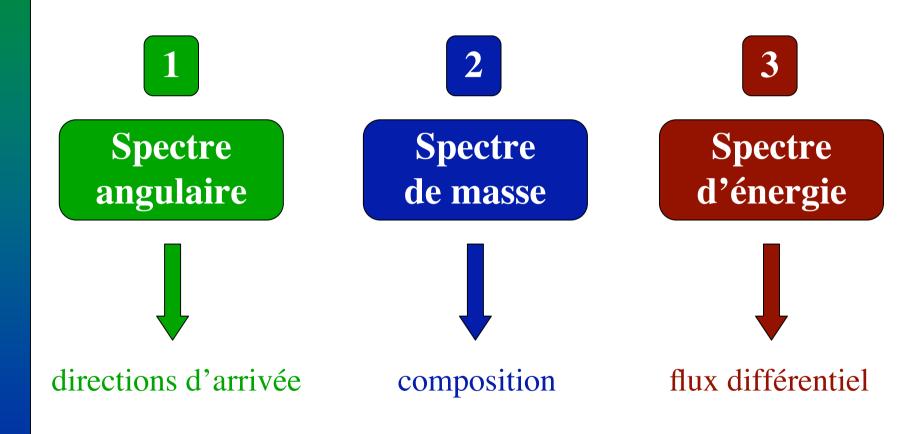
spectre d'énergie

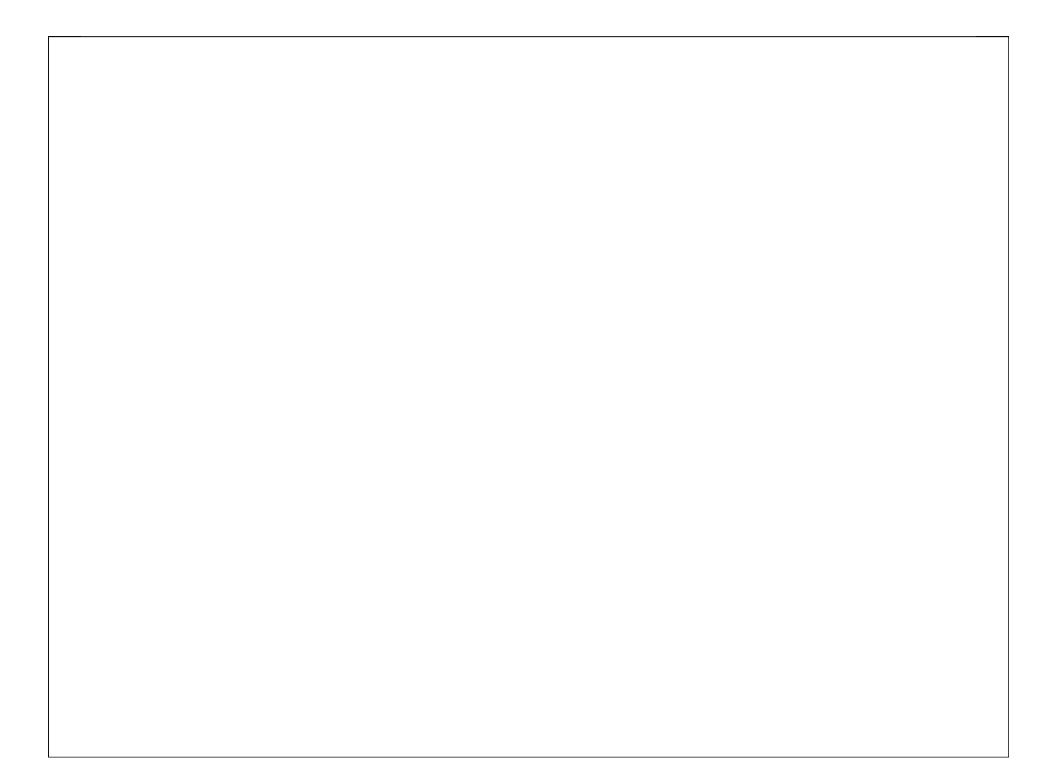
spectre angulaire

- Rayons cosmiques
 - différents types de noyaux...

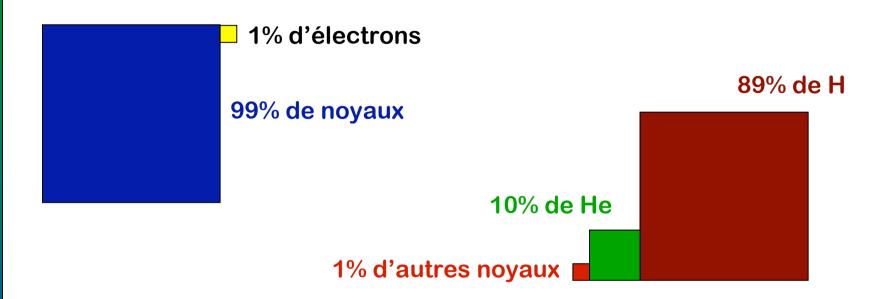
> spectre de masse

Observables fondamentales du rayonnement cosmique





Composition du rayonnement cosmique



+ noyaux secondaires!

Interactions avec le milieu interstellaire

Production d'éléments légers, de noyaux radioactifs, d'antiparticules, de photons d'énergies variées (« astronomie non thermique »), de neutrinos...

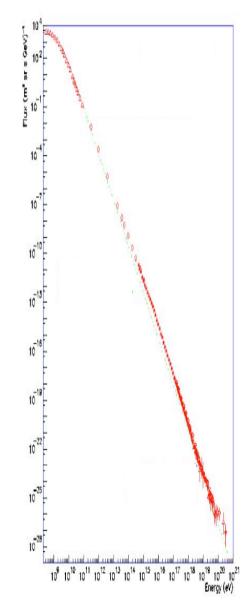
usage très fructueux de cette dimension spectrale!

(hélas encore limité aux basses énergies...)

Une des 7 merveilles du monde physique!

Flux des rayons cosmiques

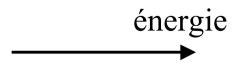




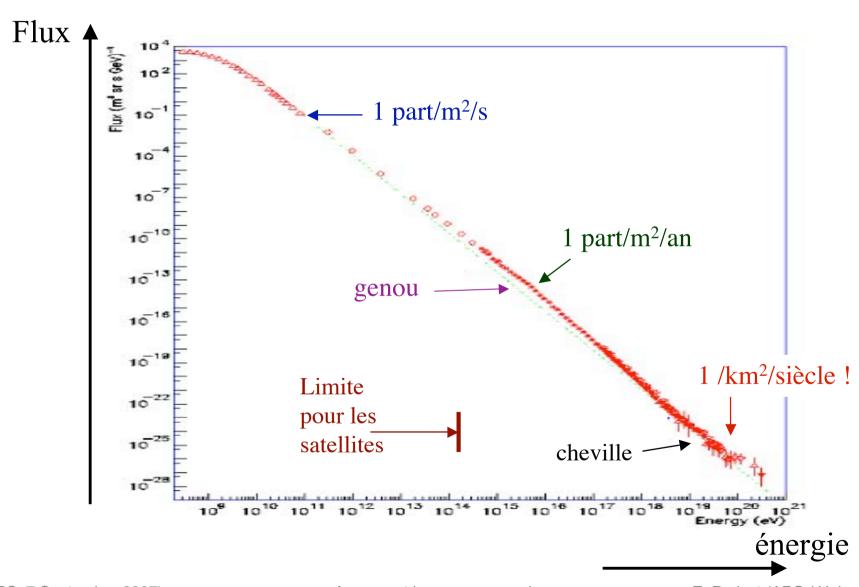
non thermique

équilibre dynamique !

(32 ordres de grandeur)



Une des 7 merveilles du monde physique!



Les rayons cosmiques ultra-énergétiques

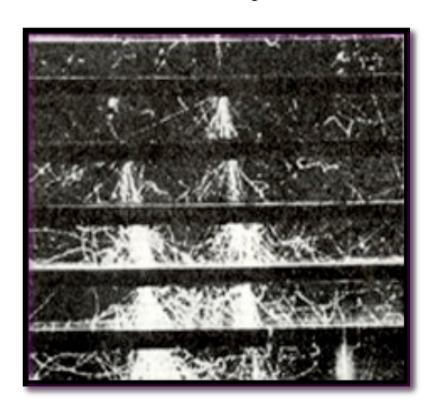
- Mystère des sources
 - Énergies inattendues : ≥ 10²⁰ eV macroscopique !
 (qq dizaines de Joules)
- Extrême difficulté expérimentale
 - ◆ 1 particule/siècle/km²

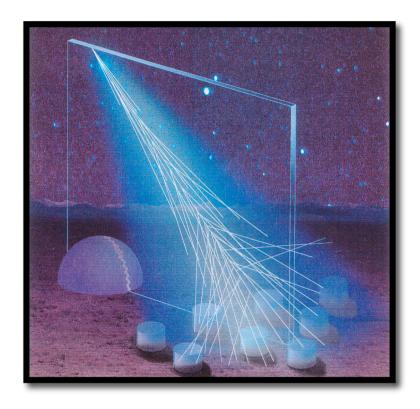
```
détecteurs gigantesques + mesures indirectes (> 3000 km²) (gerbes atmosphériques)
```

- Prédiction théorique d'une coupure vers 10²⁰ eV
 - « Coupure GZK », due à l'interaction des rayons cosmiques avec le rayonnement fossile (fonds diffus cosmologique)
- Possibilité d'une « astronomie proton » ?
 - Influence négligeable des champs magnétiques à très haute énergie

Les gerbes atmosphériques géantes

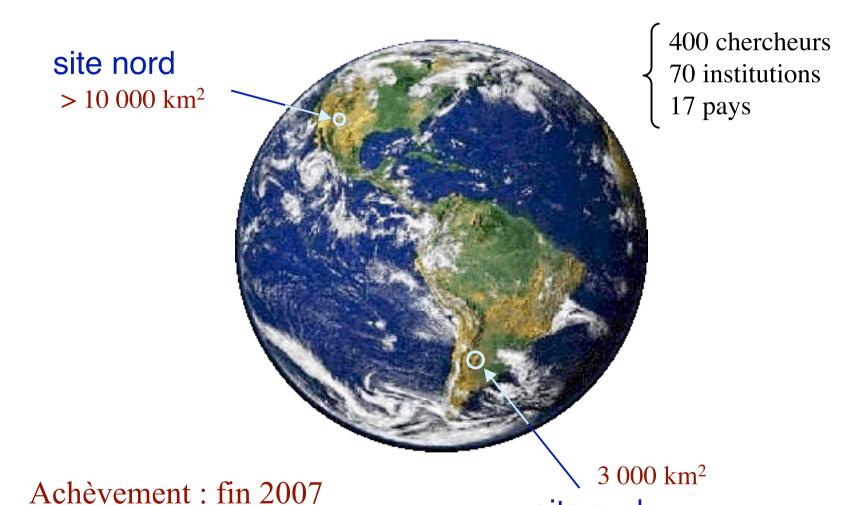
1 particule incidente (ultra-énergétique)





- des dizaines de milliards de particules secondaires (moins énergétiques) + lumière fluorescente dans l'atmosphère
- deux méthodes de détection traditionnelles (complémentaires)

L'Observatoire Pierre Auger

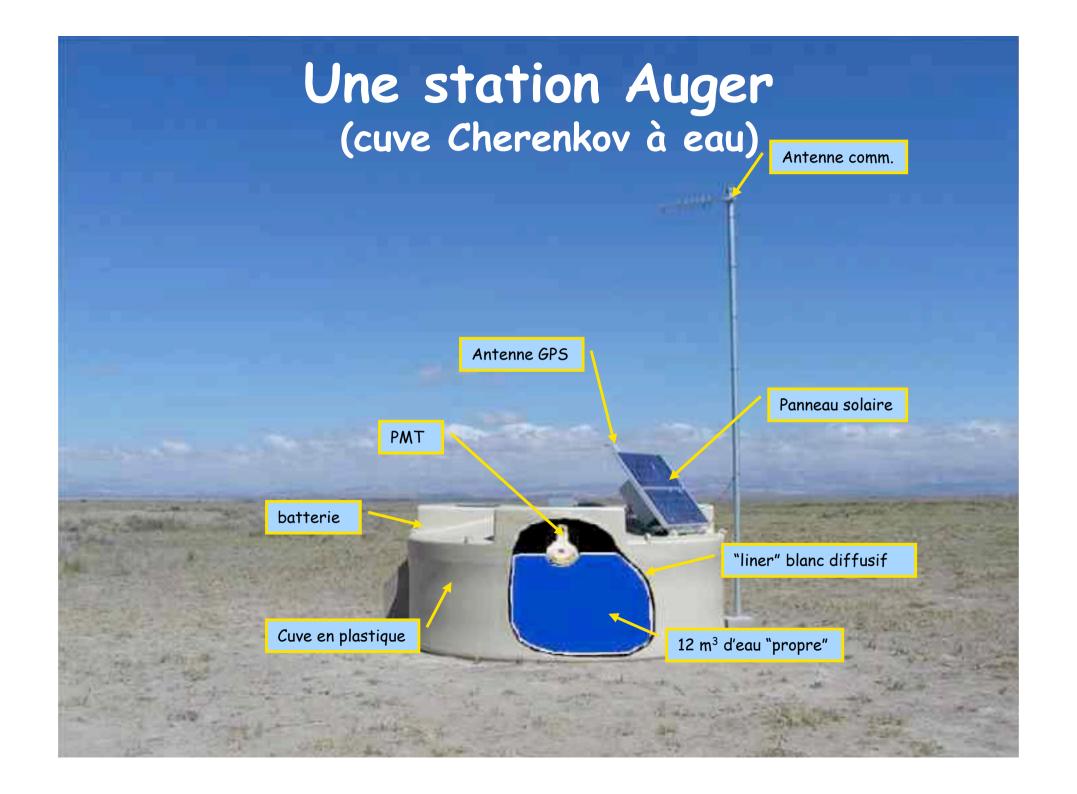


CNRS, 7 Septembre 2007)

site sud



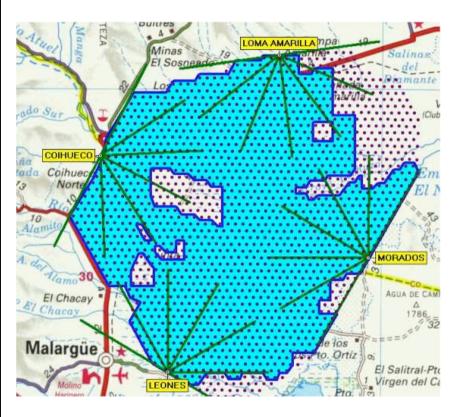


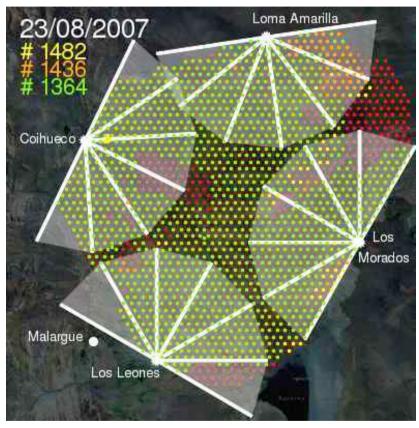




État du déploiement...

9 juillet 2007 23 août 2007



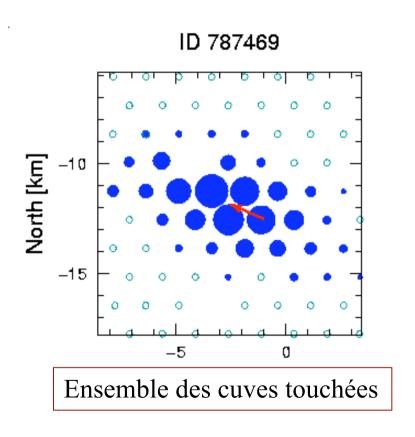


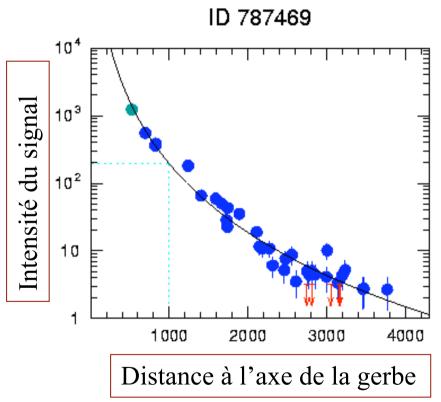
Sur les 1600 cuves prévues :

1482 déployées1436 emplies d'eau1364 opérationnelles

Reconstruction des gerbes

■ Temps d'arrivée + intensité du signal dans chaque cuve...

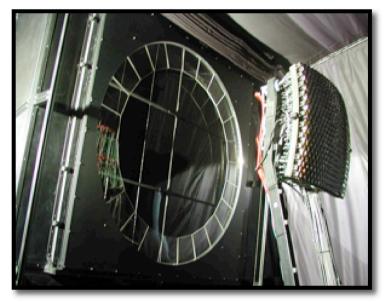


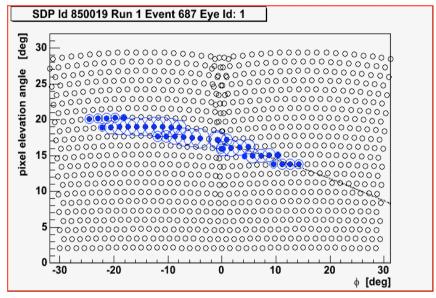


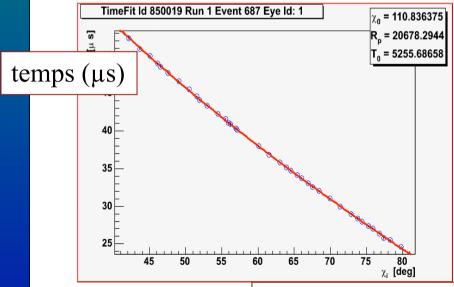


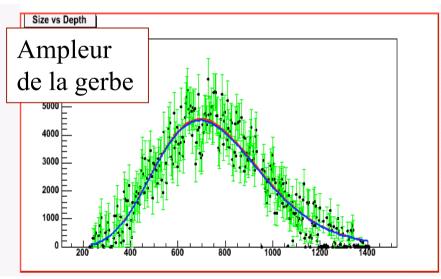


Détecteur de fluorescence









élévation angulaire

Profondeur d'atmosphère

Déjà des résultats majeurs!

5165 km² sr yr ~ 0.8 année du détecteur complet

1

Spectre de masse

Y a-t-il ou non des noyaux lourds parmi les RC de très haute énergie?

Crucial pour la phénoménologie des RC et de la transition Gal./Extragal. 2

Spectre d'énergie

La coupure GZK tant discutée estelle observée ?

Intense débat théorique et expérimental + implications pour la physique 3

Spectre angulaire

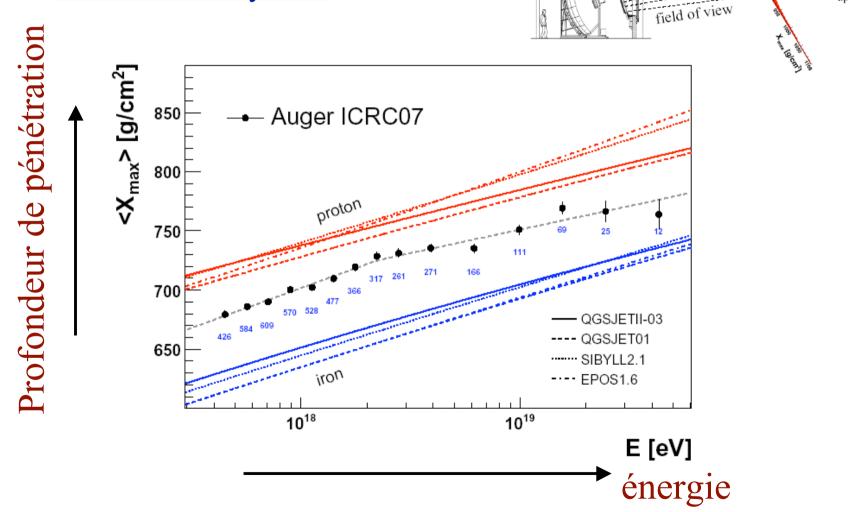
La distribution angulaire des RC à très haute est-elle toujours isotrope?

L'astronomie proton est-elle à notre portée ?

Composition (1)

Apparemment...

Présence de noyaux!



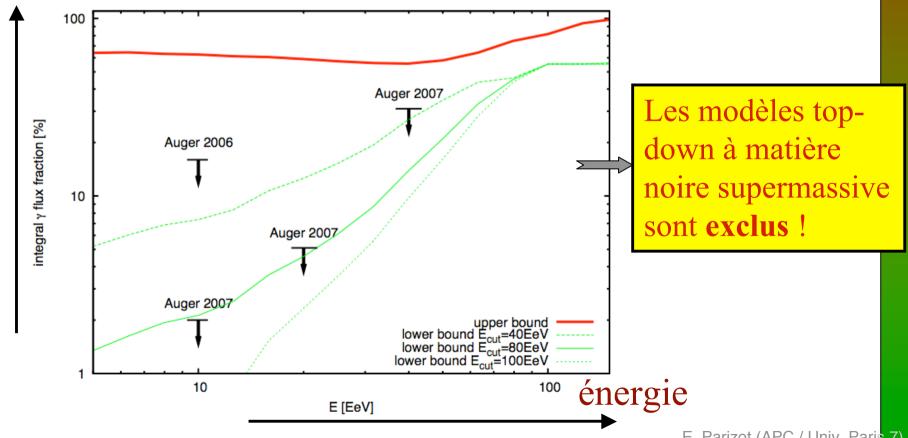
Composition (2)

Modèles « top-down » (SHDM ou TD) prédisent des flux de photons abondants

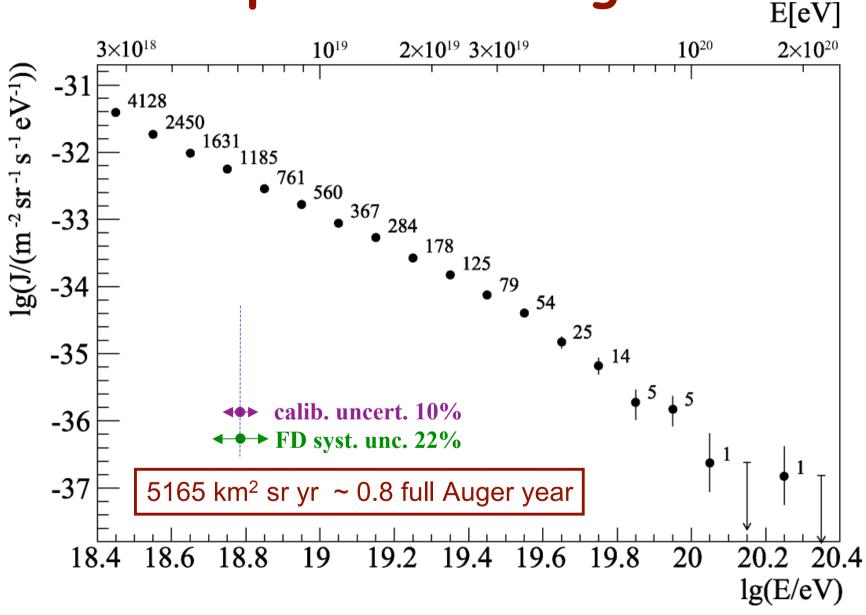


Les gerbes induites par des photons sont très spécifiques...

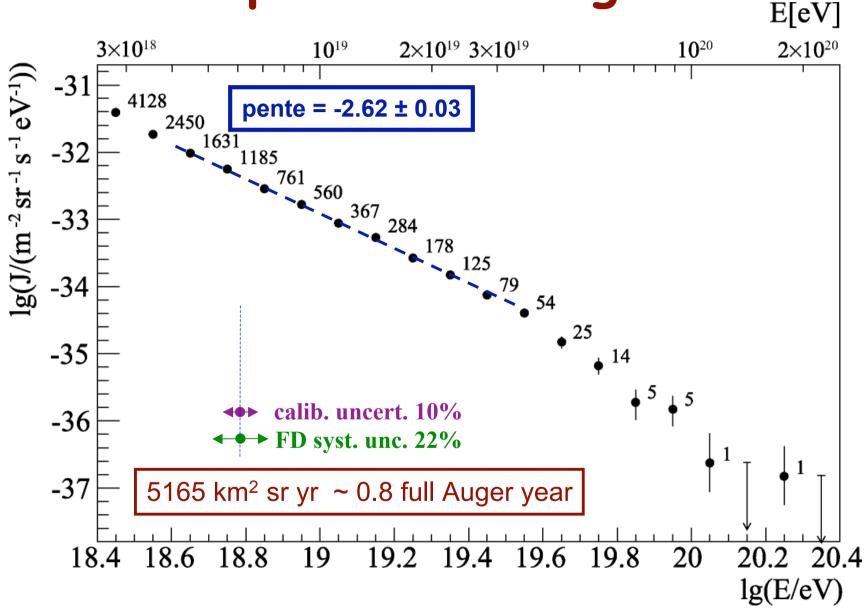
fraction de photons



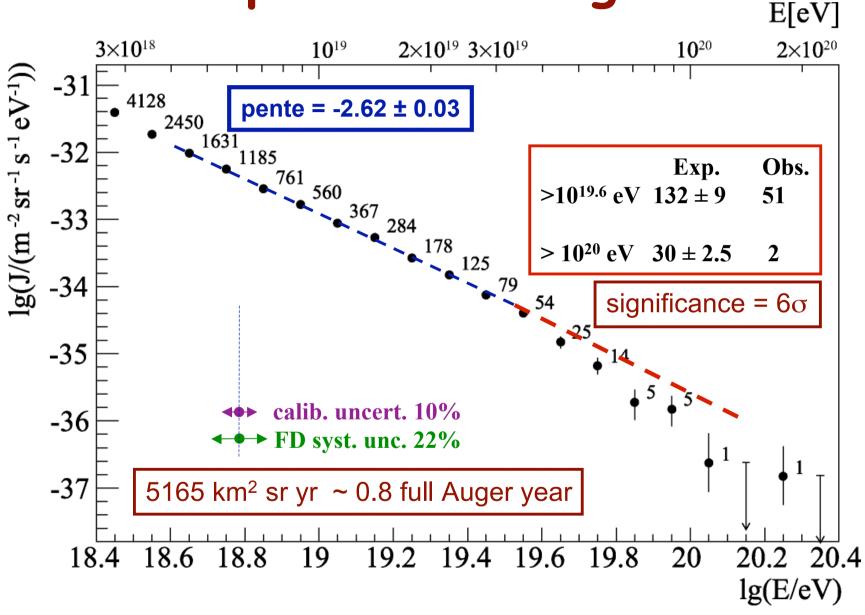
Spectre d'énergie



Spectre d'énergie



Spectre d'énergie



Distribution angulaire

Les rayons cosmiques ultra-énergétiques sont anisotropes!

- Au-delà d'une certaine énergie, les RC ont une distribution incompatible avec l'isotropie (significativité établie à partir d'une prescription a priori, sur un lot de données indépendant)
- Un lien peut être établi (globalement) entre les directions d'arrivée des rayons cosmiques les plus énergétiques et des structures extragalactiques relativement proches
- Une série d'articles est en cours de finition (merci d'attendre un peu pour les détails ;-))

Résumé : résultats majeurs d'Auger

masse

des noyaux, peu de photons

Conforme aux attentes astrophysiques

Résout certains problèmes liés à la **transition** gal./extragal.

Unité avec le reste de la science des rayons cosmiques et des sources

Richesse supplémentaire pour le domaine (dimension spectrale!)

énergie

cheville + coupure GZK

Excellente nouvelle! Prédiction de 40 ans!

⇒ sources proches⇒ « astronomie proton » !+ isolement des sources !

+ physique à haute énergie étude des gerbes (muons, modèles hadroniques, échelle d'énergie...)

cf. genou + LHC!

direction

ciel anisotrope

Résultat le plus important depuis 100 ans !

⇒ « l'astronomie rayons cosmiques » est possible (elle vient de débuter !)

> ⇒ rayons cosmiques intégrés au *corpus* scientifique de l'astrophysique

Rayons cosmiques, année zéro!

- Ouverture historique d'une astronomie non photonique !
 - ♦ À terme, identification et étude de sources individuelles
 - Nécessité d'augmenter la puissance de collection à haute énergie

⇒ Auger Nord (Lamar, Colorado)

(les sources sont là : allons les chercher !)

- Nombreuses questions
 - ◆ sources, origine des RC, mécanisme d'accélération, fonctionnement des sources énergétiques de l'univers, écologie galactique, équilibre des composantes (champ magnétique, rayonnement, phases du milieu interstellaire, formation d'étoiles, chimie interstellaire...), lien avec les autres rayonnements (radio, X, gamma, neutrinos...)
- Tout cela commence aujourd'hui!

À suivre...