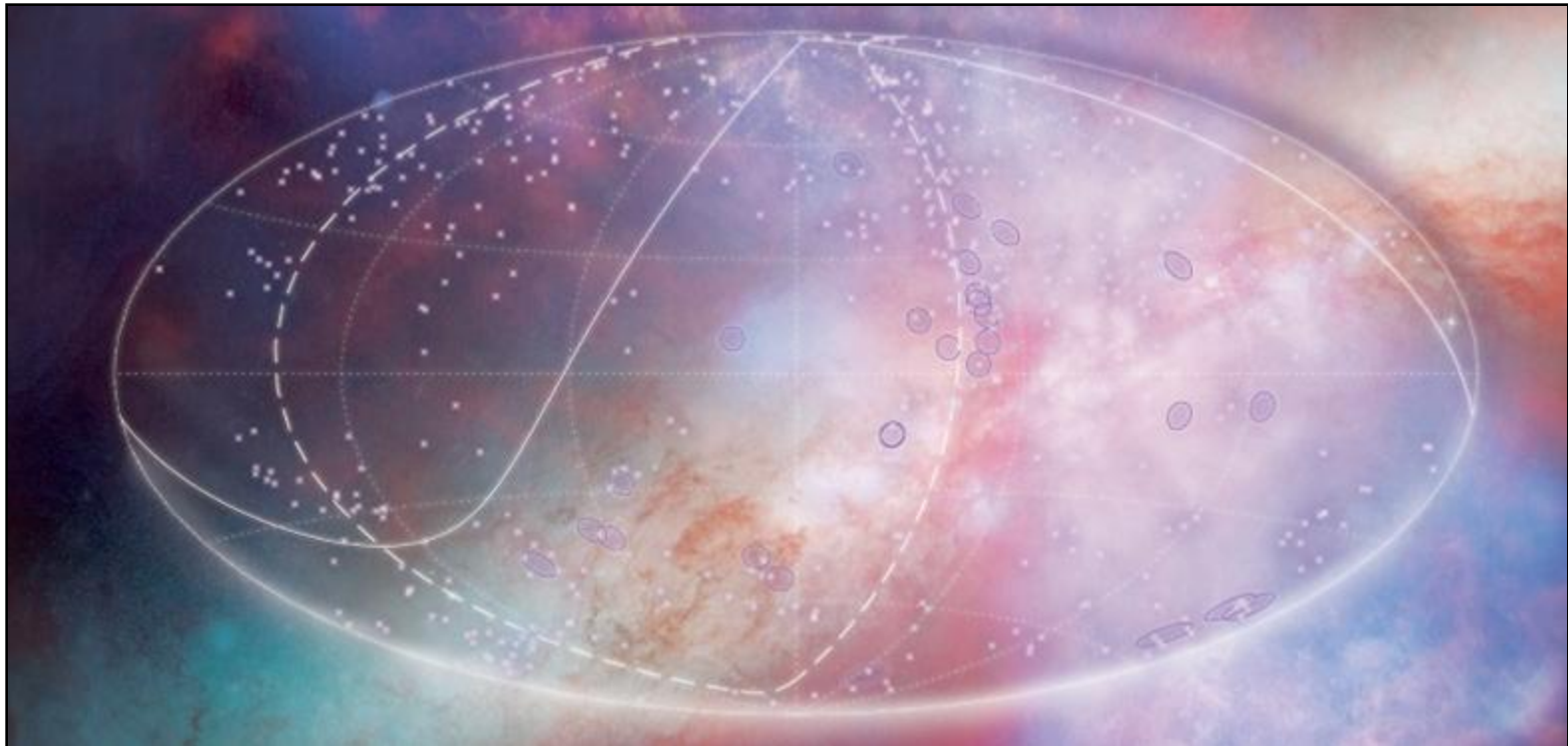


PREMIERS RÉSULTATS DE L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER



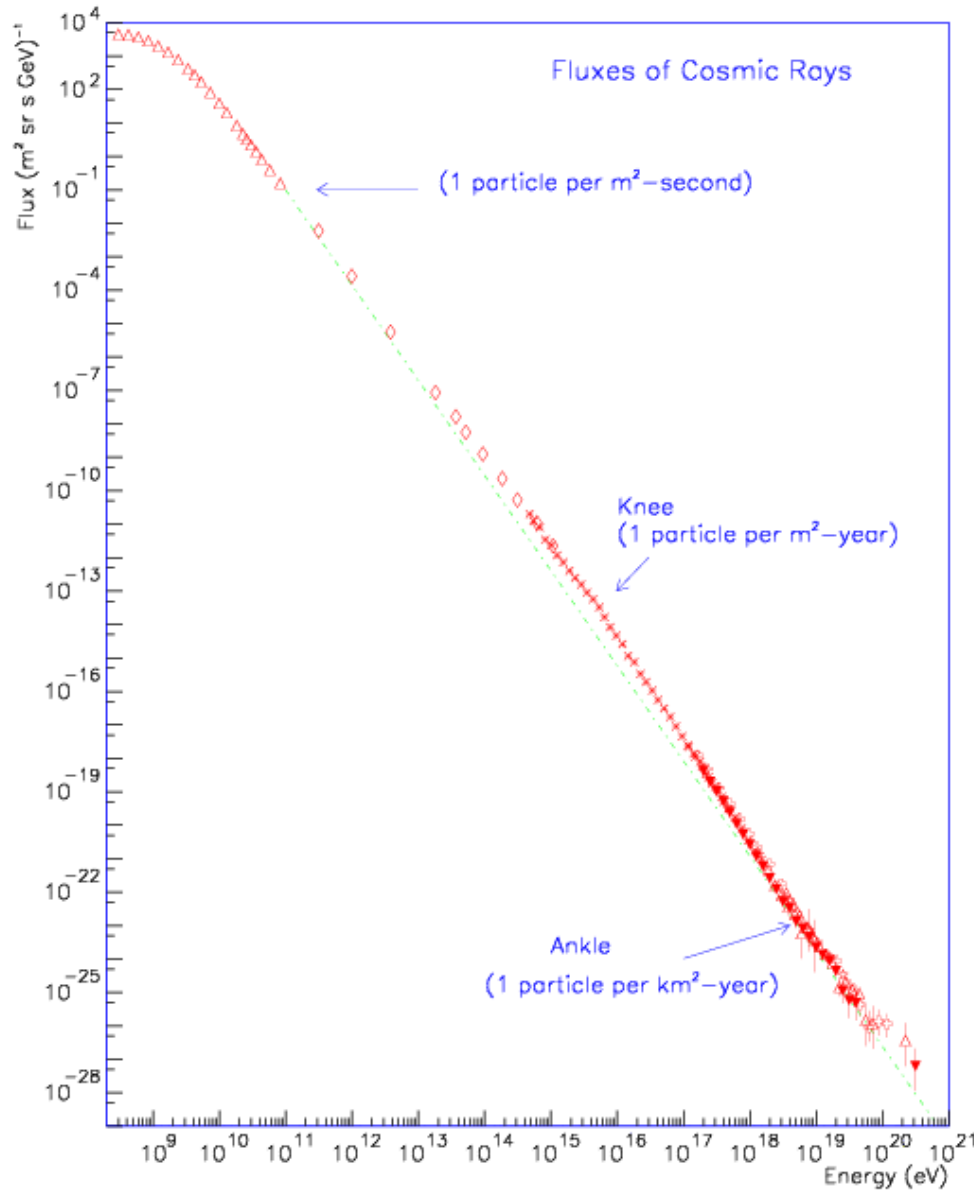
ALAIN CORDIER, SYLVIE DAGORET-CAMPAGNE, DELPHINE MONNIER-RAGAIGNE, XAVIER GARRIDO, CÉCILE GERMAIN-RENAUD, BALÁZS KÉGL, MARCEL URBAN, HANRONG WU

JEAN-NOËL ALBERT, RENÉ BILHAUT, DOMINIQUE BRETON, CHAFIK CHEIKALI, OLEG LODYGENSKY, LUDOVIC RAUX, CHRISTOPHE SYLVIA, VANESSA TOCUT

PLAN DU SÉMINAIRE

- **PROBLÉMATIQUES** LIÉES AU RAYONNEMENT COSMIQUE D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE
 - SPECTRE EN ÉNERGIE (GZK), NATURE DES SOURCES, COMPOSITION
- L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER : **UN DÉTECTEUR HYBRIDE**
- **RECHERCHE D'ANISOTROPIES** : CORRÉLATION AVEC LES AGNs PROCHES
- **IMPLICATIONS** & RÉSULTATS CONNEXES

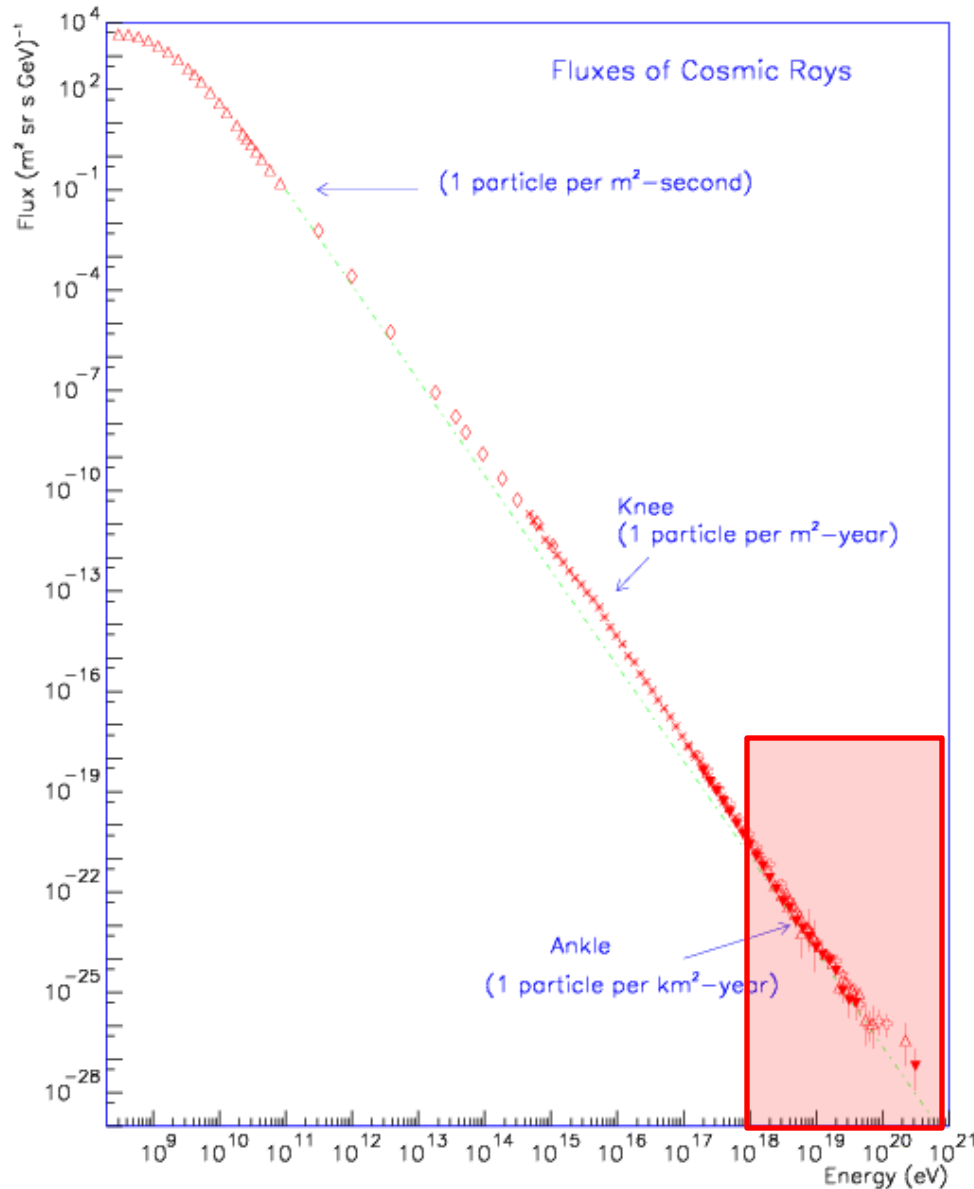
LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



■ SPECTRE RÉGULIER SUR 12 DÉCADES EN ÉNERGIE

-LOI DE PUISSANCE D'INDICE MOYEN -2.7

LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



- SPECTRE RÉGULIER SUR 12 DÉCADES EN ÉNERGIE

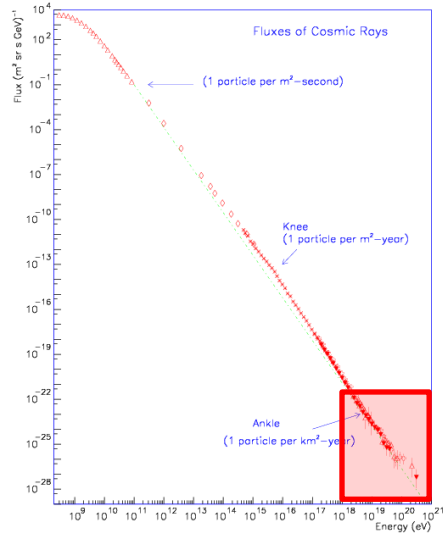
 - LOI DE PUISSANCE D'INDICE MOYEN -2.7

- RÉGION UHE : $E > 10^{18}$ eV

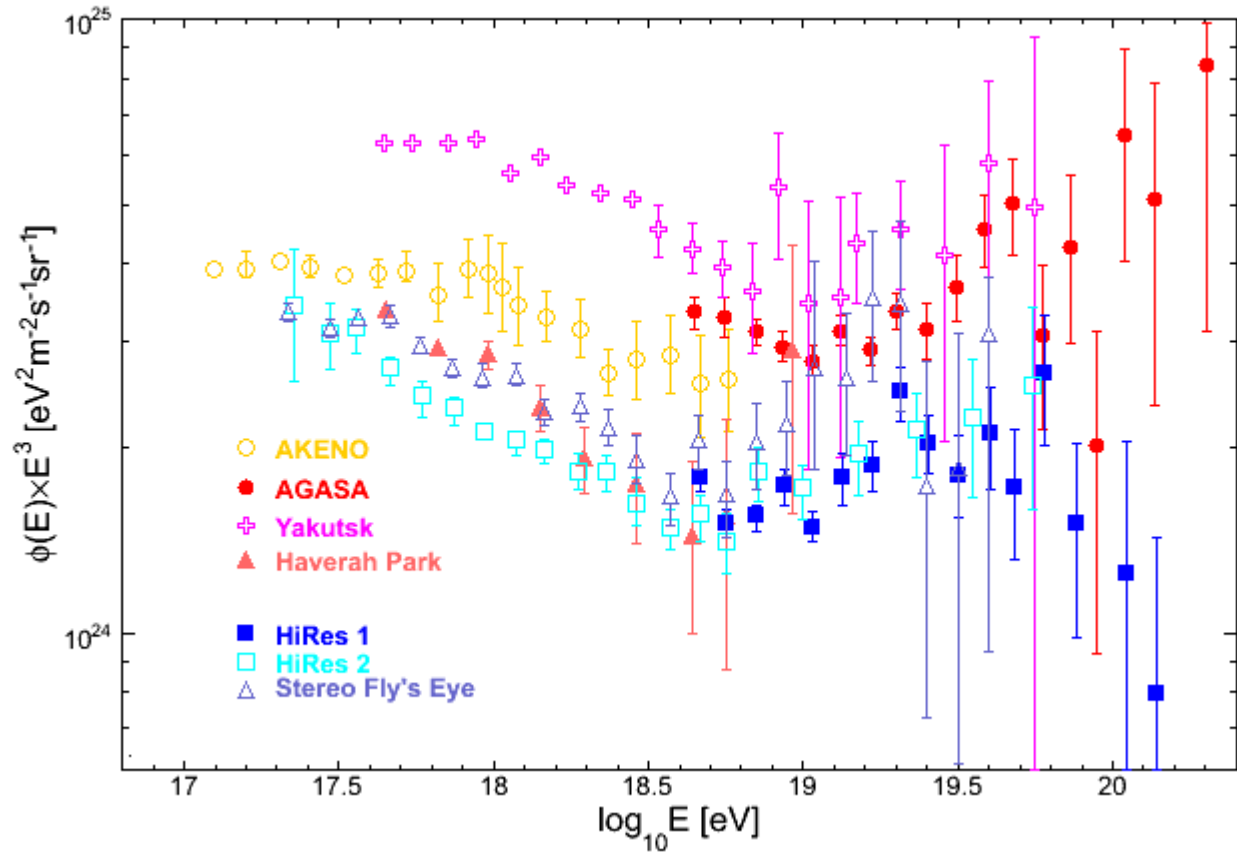
 - FAIBLE STATISTIQUE :

 - 1 PART./ KM^2 /SIÈCLE À 10^{20} eV

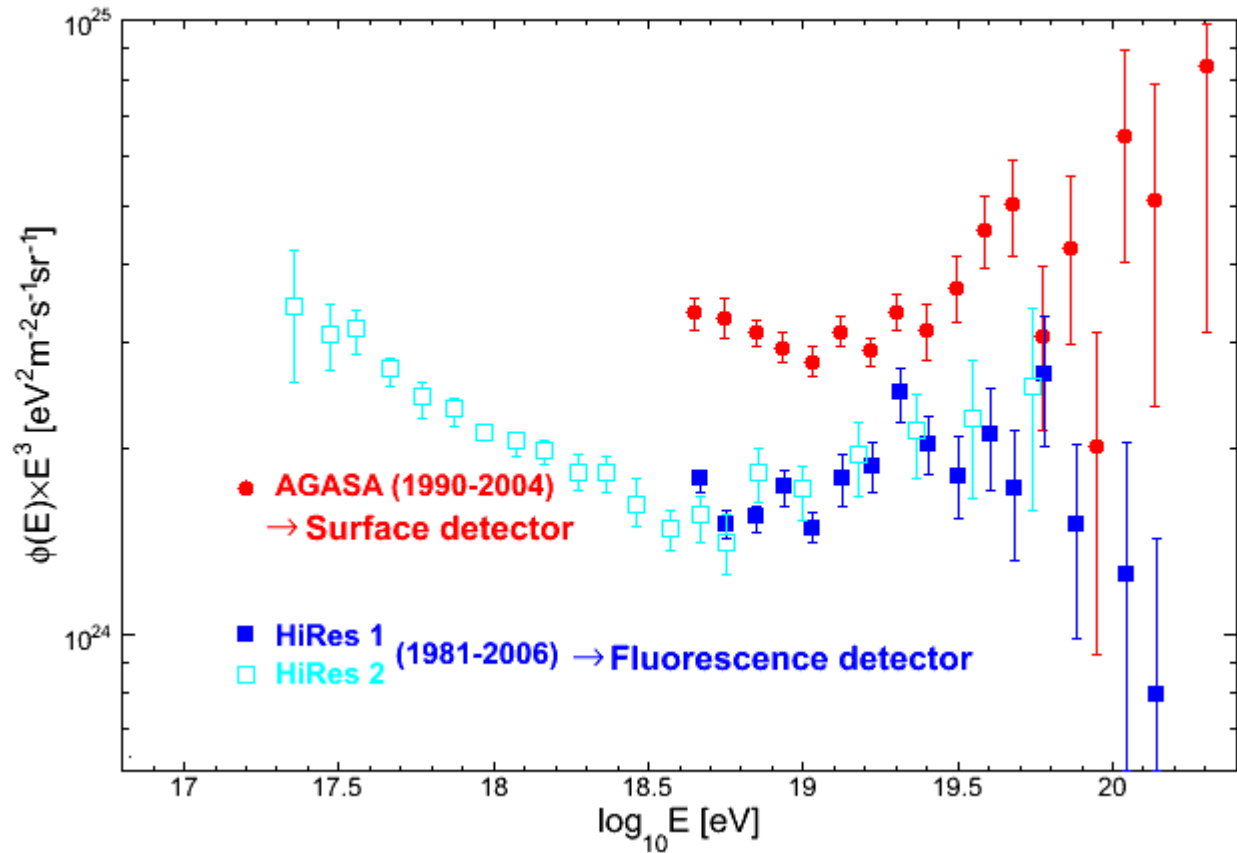
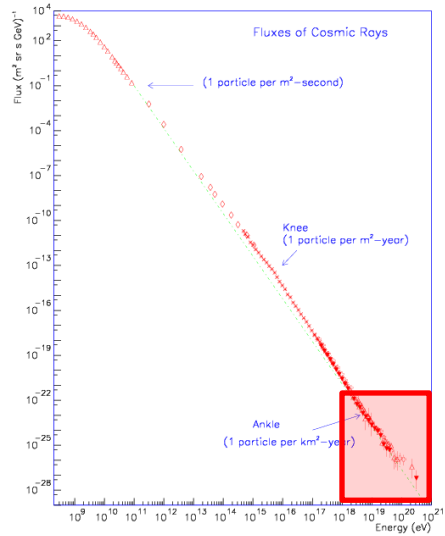
LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



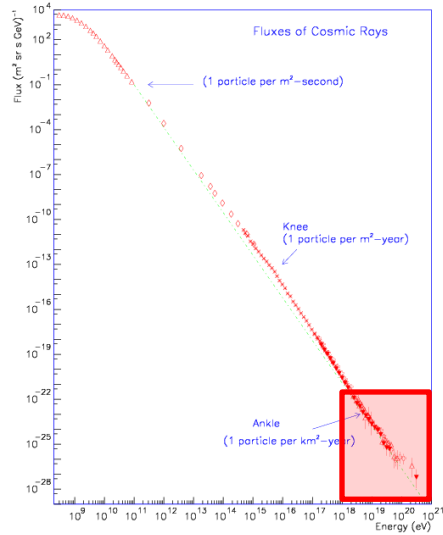
SITUATION POUR LE MOINS CONFUSE !



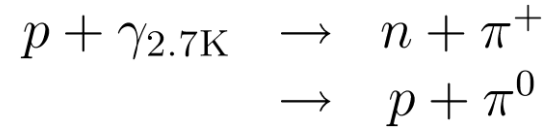
LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



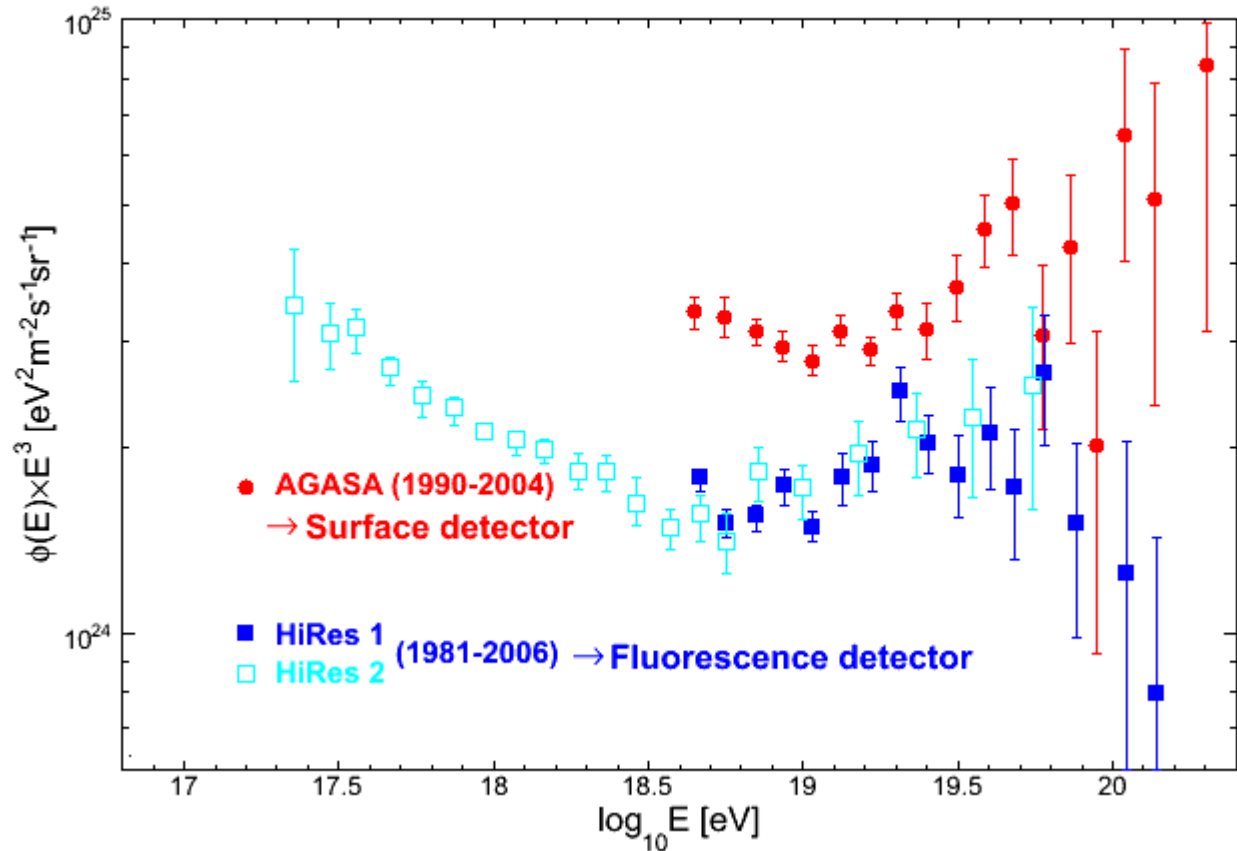
LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



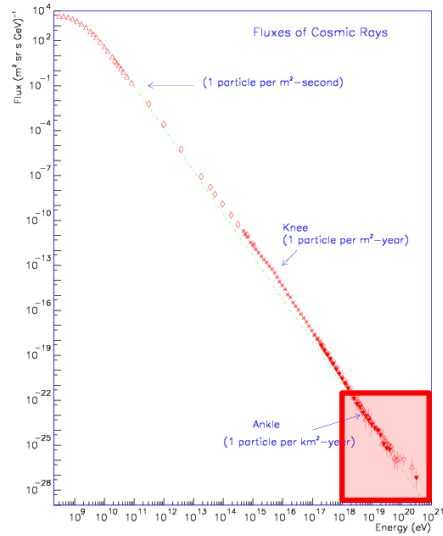
- CONTEXTE THÉORIQUE : **EFFET GZK (1966)**



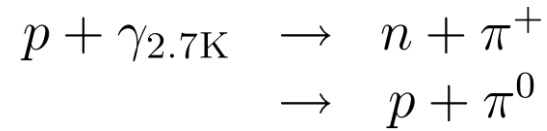
→ PERTES ÉNERGÉTIQUES ~15% / 2 MPC



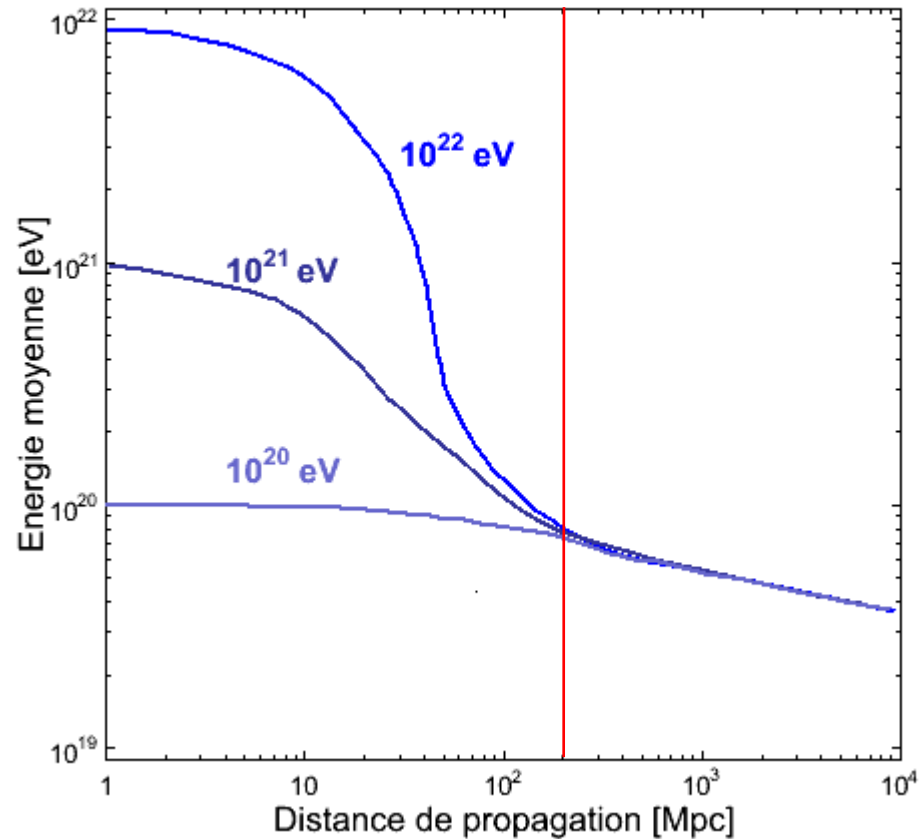
LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



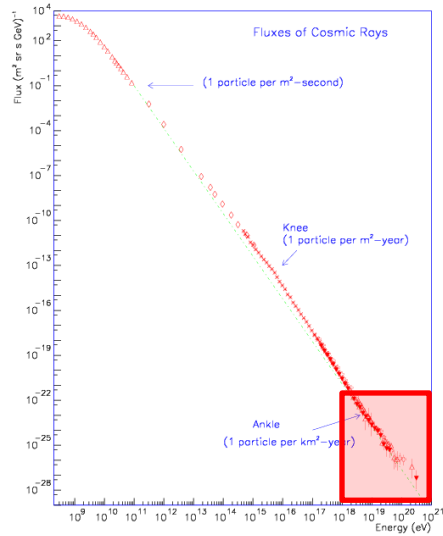
- CONTEXTE THÉORIQUE : **EFFET GZK (1966)**



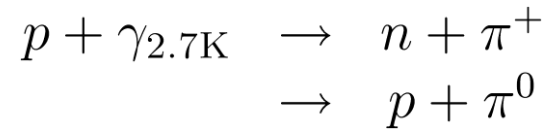
→ PERTES ÉNERGÉTIQUES ~15% / 2 Mpc



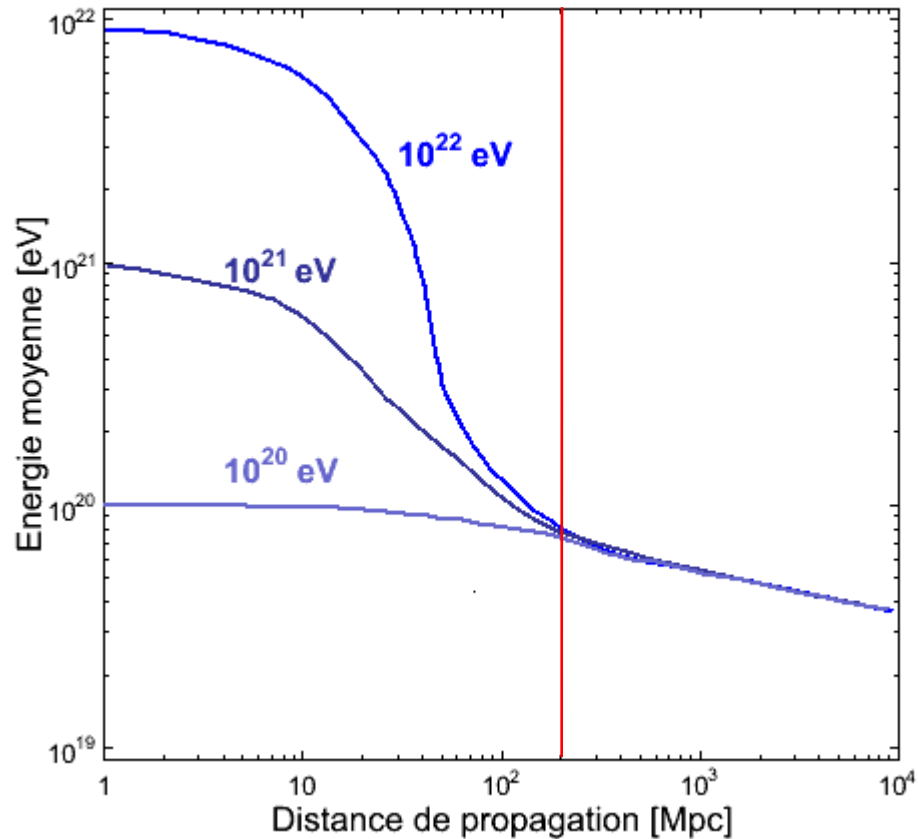
LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE



■ CONTEXTE THÉORIQUE : EFFET GZK (1966)



→ SEUL L'UNIVERS PROCHE (< 200 Mpc) CONTRIBUE AU FLUX AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19}$ eV



LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE

■ MODÈLES DE PRODUCTION DES RCUHES :

- SCENARII « BOTTOM-UP » : ACCÉLÉRATION PAR DES OBJETS ASTROPHYSIQUES

$$E_{\max} \simeq Z \left(\frac{B}{1\mu\text{G}} \right) \left(\frac{L}{1\text{Mpc}} \right) \times 10^{21} \text{eV}$$

→ CANDIDATS SÉRIEUX : NOYAUX ACTIFS DE GALAXIES (AGN), SURSAUTS GAMMA ...

- SCENARII « TOP-DOWN » : DÉSINTÉGRATION DE PARTICULES SUPERMASSIVES

→ PARTICULES DE MASSE $\gg 10^{20}$ eV

→ DÉFAUTS TOPOLOGIQUES, RELIQUES DU BIG-BANG ...

LES RAYONS COSMIQUES D'ULTRA-HAUTE ÉNERGIE

■ MODÈLES DE PRODUCTION DES RCUHES :

- SCENARII « BOTTOM-UP » : ACCÉLÉRATION PAR DES OBJETS ASTROPHYSIQUES

→ COMPOSITION : PARTICULES CHARGÉES (PROTON, NOYAUX)

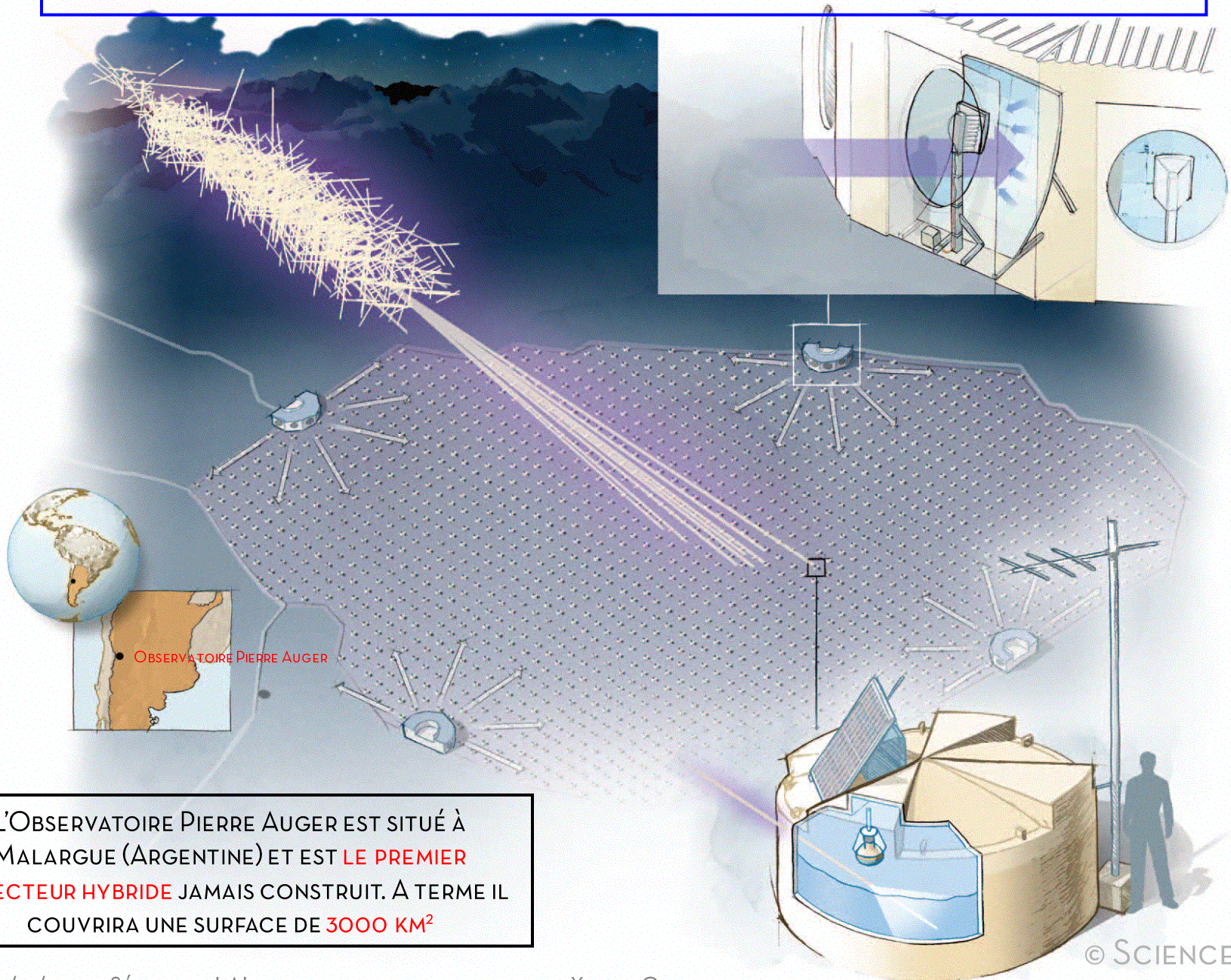
→ DISTRIBUTION DES DIRECTIONS D'ARRIVÉES : ANISOTROPE (SI EFFET GZK)

- SCENARII « TOP-DOWN » : DÉSINTÉGRATION DE PARTICULES SUPERMASSIVES

→ COMPOSITION : PARTICULES LÉGÈRES (PHOTON γ , NEUTRINOS)

→ DISTRIBUTION DES DIRECTIONS D'ARRIVÉES : ISOTROPE

L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

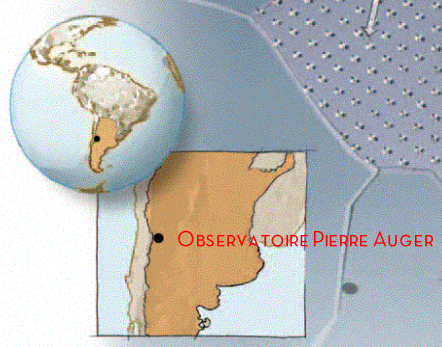
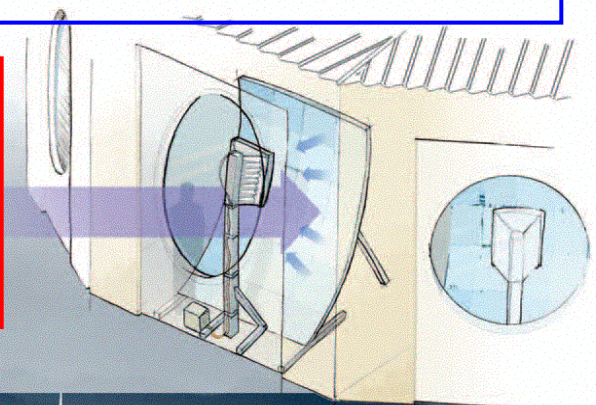


L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER EST SITUÉ À MALARGUE (ARGENTINE) ET EST **LE PREMIER DÉTECTEUR HYBRIDE** JAMAIS CONSTRUIT. À TERME IL COUVRIRA UNE SURFACE DE **3000 KM²**

L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

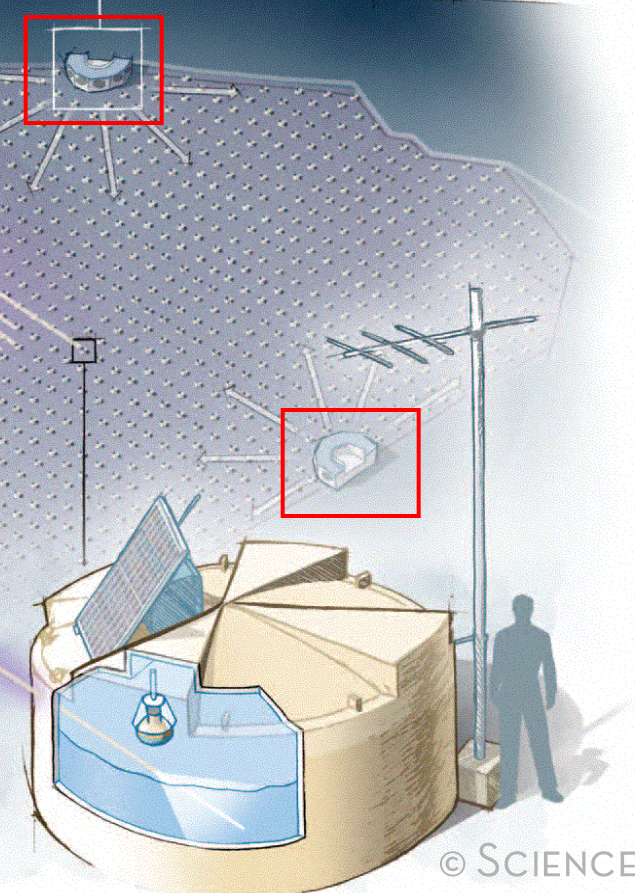
24 TÉLESCOPES DE FLUORESCENCE
DÉTECTANT LA LUMIÈRE DE
DÉSEXCITATION DU N_2 (300-400NM)
ÉMISE AU PASSAGE DES e^{\pm} DE LA
GERBE

⇒ PROFIL LONGITUDINAL



OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER EST SITUÉ À MALARGUE (ARGENTINE) ET EST LE PREMIER DÉTECTEUR HYBRIDE JAMAIS CONSTRUIT. À TERME IL COUVRIRA UNE SURFACE DE 3000 KM²



L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

24 TÉLESCOPES DE FLUORESCENCE
DÉTECTANT LA LUMIÈRE DE
DÉSEXCITATION DU N_2 (300-400NM)
ÉMISE AU PASSAGE DES e^{\pm} DE LA
GERBE

⇒ PROFIL LONGITUDINAL

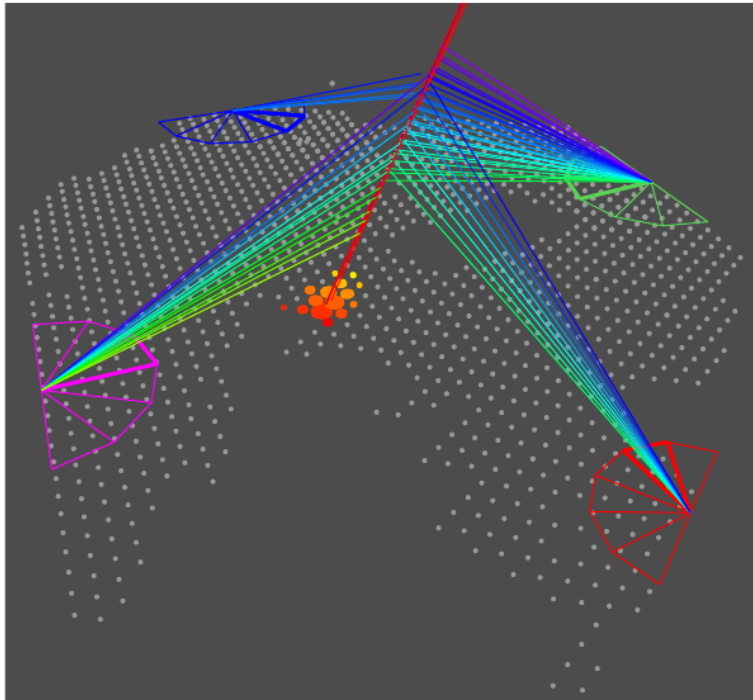
1600 CUVES D'EAU PLACÉES À 1500 M
LES UNES DES AUTRES ET CHARGÉES
DE DÉTECTER LES PARTICULES
SECONDAIRES VIA LA PRODUCTION
DE LUMIÈRE Cerenkov

⇒ PROFIL LATÉRAL

OBSERVATOIRE PIERRE AUGER

L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER EST SITUÉ À MALARGUE (ARGENTINE) ET EST LE PREMIER DÉTECTEUR HYBRIDE JAMAIS CONSTRUIT. À TERME IL COUVRIRA UNE SURFACE DE 3000 KM²

L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER



- MESURES HYBRIDES : CALIBRATION SD/FD

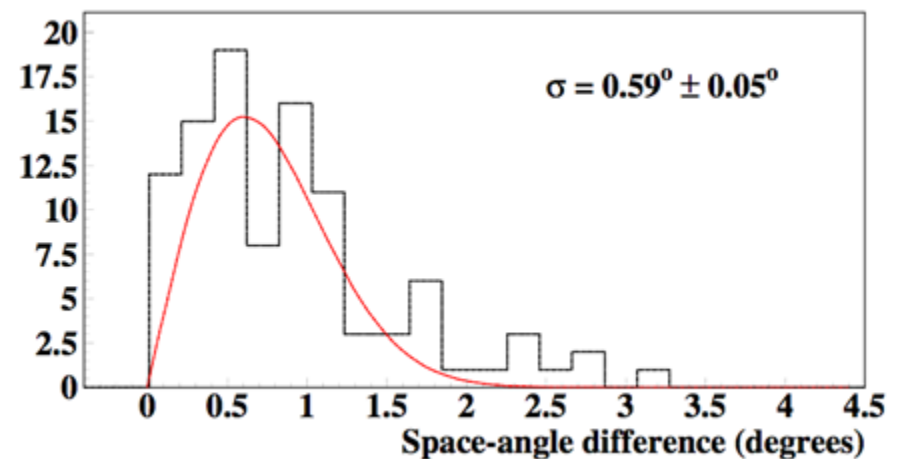
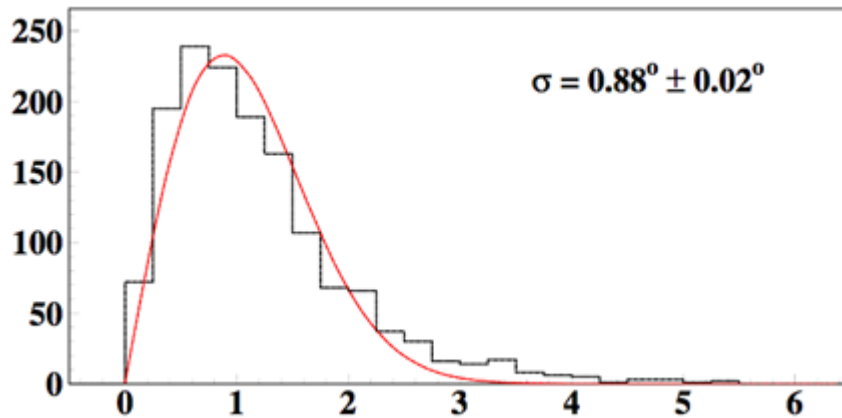
$$\text{SIGNAL(SD)} \Leftrightarrow E_{\text{CALO.}}(\text{FD})$$

- 2 TECHNIQUES INDÉPENDANTES

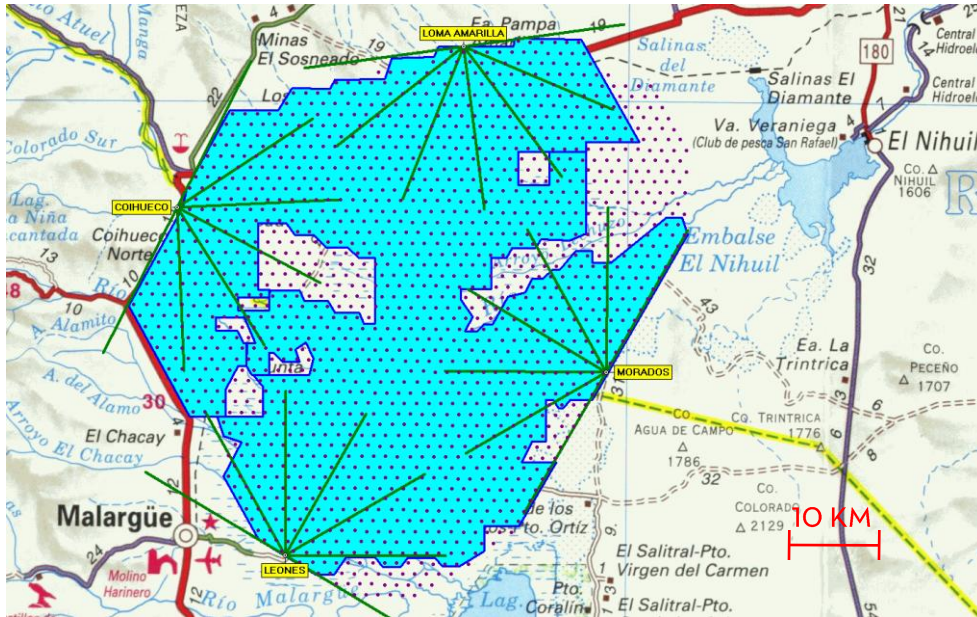
COMPRÉHENSION DES SYSTÉMATIQUES

- RECONSTRUCTION DES ÉVÉNEMENTS

MEILLEURE PRÉCISION DANS LA
RECONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE



L'OBSERVATOIRE PIERRE AUGER



- AUGER SUD : LAT. -35.2°S , LONG. 69.5°W , ALT. 1400 M
 - 154 SD ET 2 SITES FD EN JANVIER 2004
 - 1388 SD ET 4 SITES EN SEPTEMBRE 2007
- FIN DE LA CONSTRUCTION DÉBUT 2008

- ACCEPTANCE SATURÉE AU DESSUS DE $3 \cdot 10^{18}\text{E}V$ POUR DES GERBES VERTICALES ($\theta < 60^{\circ}$)
- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS : DONNÉES 1^{ER} JANVIER 2004 → 31 AOUT 2007
 - $9000 \text{ KM}^2.\text{SR}.\text{AN}$ (1750 $\text{KM}^2.\text{SR}.\text{AN}$ AGASA / 3500 $\text{KM}^2.\text{SR}.\text{AN}$ HIRES)
 - $E > 40 \cdot 10^{18}\text{E}V$ → 81 ÉVÉNEMENTS
 - $\theta < 60^{\circ}$

MÉTHODE DE RECHERCHE D'ANISOTROPIE

- DÉFINITION DU LOT DE DONNÉES PAR AJUSTEMENT DE L'ÉNERGIE MINIMUM E
- DÉFINITION DU CATALOGUE DE SOURCES PAR AJUSTEMENT DE SA PROFONDEUR Z
- COMPTAGE DU NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS K À MOINS D'UN ÉCART ANGULAIRE ψ D'UNE SOURCE (1 CORRÉLATION)
- CALCUL DE LA PROBABILITÉ D'OBTENIR CE NOMBRE DE CORRÉLATION PAR HASARD

$$P(E, z, \psi) = \sum_{j=k}^{N(E)} \binom{N(E)}{j} p(z, \psi)^j (1 - p(z, \psi))^{N(E)-j}$$

PROB. BINOMIALE CUMULÉE

PROB. POUR UN RC VU PAR AUGER
(CORRECTION D'EXPOSITION) DE TOMBER
À MOINS DE ψ° D'UNE SOURCE DU
CATALOGUE

- RECHERCHE DU MINIMUM DE $P(E, z, \psi)$ EN FONCTION DE E, z, ψ

EXPLORATION AVANT JUIN 2006

- SCAN DES PARAMÈTRES E, z, ψ POUR TROUVER LE MINIMUM DE $P(E, z, \psi)$
 - ON AJOUTE LES ÉVÉNEMENTS UN PAR UN EN PARTANT DU PLUS ÉNERGÉTIQUE ET JUSQU'À UN MINIMUM DE $2 \cdot 10^{19} \text{eV}$ (241 ÉVÉNEMENTS AU TOTAL)
 - UTILISATION DU 12^{ÈME} CATALOGUE D'AGN DE VERON-CETTY & VERON : SOURCES JUSQU'À $z=0.05$ (~200 Mpc)
 - COMPTAGE DES CORRÉLATIONS POUR ψ ALLANT DE 1.1° À 6.1°
- MINIMUM DE $P(E, z, \psi)$:
 - $E = 56 \cdot 10^{18} \text{eV}$
 - $z = 0.018$ (~75 Mpc)
 - $\psi = 3.1^\circ$
$$\left. \begin{array}{l} - E = 56 \cdot 10^{18} \text{eV} \\ - z = 0.018 \text{ (~75 Mpc)} \\ - \psi = 3.1^\circ \end{array} \right\} p(z, \psi) = 0.21$$

→ 12 ÉVÉNEMENTS PARMIS LES 15 SÉLECTIONNÉS CORRÈLENT : $P_{\text{MIN}} = 10^{-6}$
- MAIS ...

NOUS AVONS FAIT UN SCAN DONC P_{MIN} DOIT ÊTRE CORRIGÉ (CORRECTION DE L'ORDRE DE 10^3 ÉVALUÉE PAR MC) ⇒ MOTIVATION POUR UNE PRESCRIPTION

LA PRESCRIPTION

- **TESTER LE SIGNAL SUR UN LOT DE DONNÉES INDÉPENDANT**
- ON FIXE LES PARAMÈTRES E , z , ψ À CEUX DONNANT LE PLUS GRAND SIGNAL DANS LA PHASE EXPLORATOIRE

$$E = 56 \cdot 10^{18} \text{eV} / z = 0.018 / \psi = 3.1^\circ$$

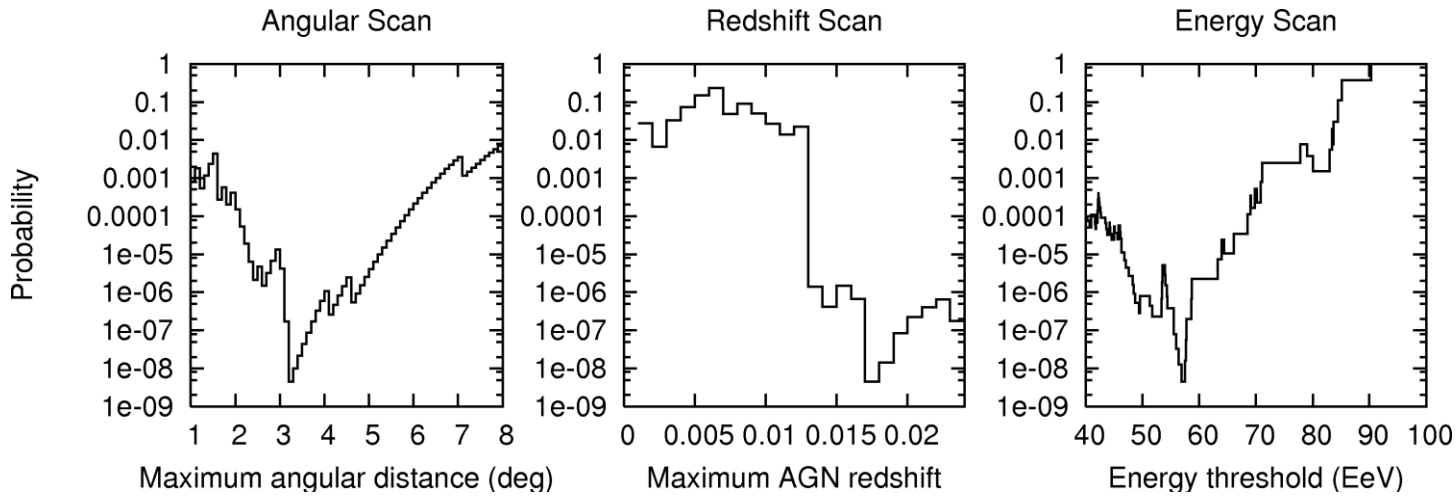
- ON CONSTRUIT **UNE SÉRIE DE TEST** DONT CHACUN EST APPLIQUÉ APRÈS L'ARRIVÉE D'UN ÉVÉNEMENT D'ÉNERGIE $> 56 \cdot 10^{18} \text{eV}$
- LES DONNÉES SONT DÉCLARÉES **ANISOTROPES (CL > 99%)** SI L'UN DES TEST EST SATISFAIT AVANT L'ARRIVÉE DU 35^{ÈME} ÉVÉNEMENTS

N	4	6	8	10	12	...	30	31	33	34
k_{min}	4	5	6	7	8	...	14	14	15	15

↳ **PRESCRIPTION VALIDÉE LE 28 MAI 2007,
1 AN APRÈS AVOIR ÉTÉ LANCÉE**

RÉSULTATS

■ SUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES DE JAN. 2004 /31 AOÛT 2007



$$- E = 57 \cdot 10^{18} \text{EeV}$$

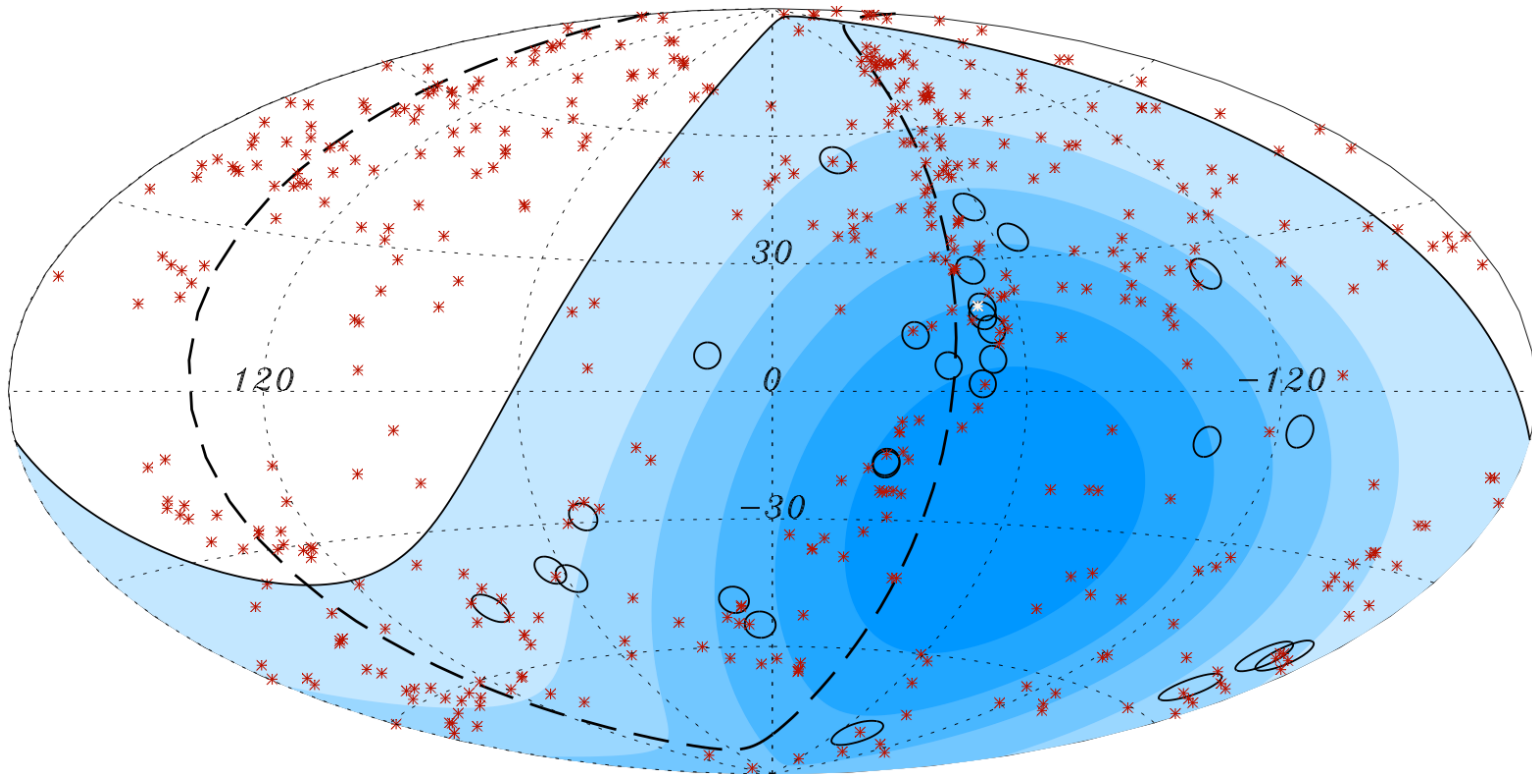
$$- Z = 0.017$$

$$- \psi = 3.2^\circ$$

20 ÉVÉNEMENTS SUR 27 SONT CORRÉLÉS AVEC LES AGN DU CATALOGUE

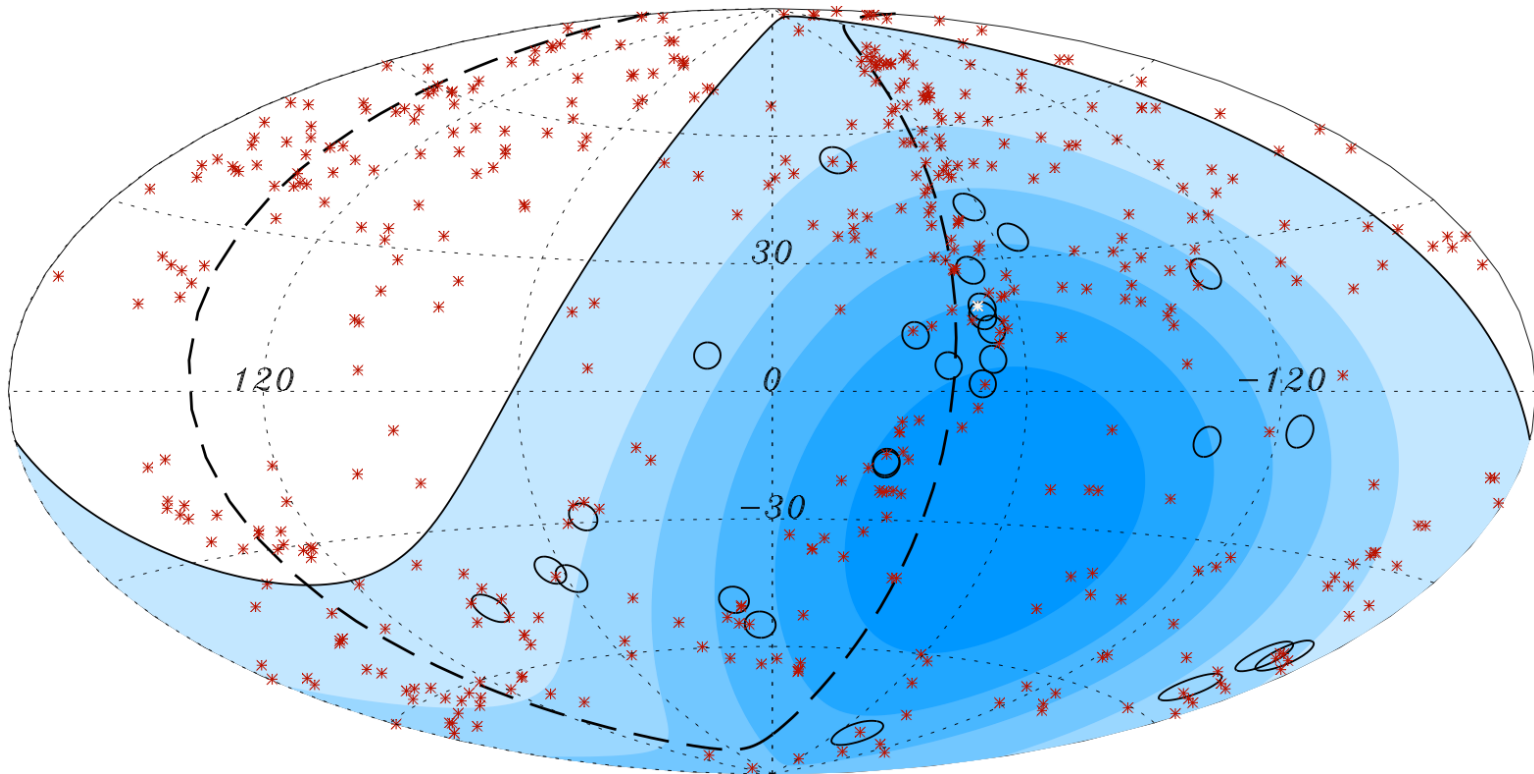
1 CHANCE SUR 10^5 D'OBTENIR UNE TELLE CONFIGURATION « PAR HASARD »

RÉSULTATS



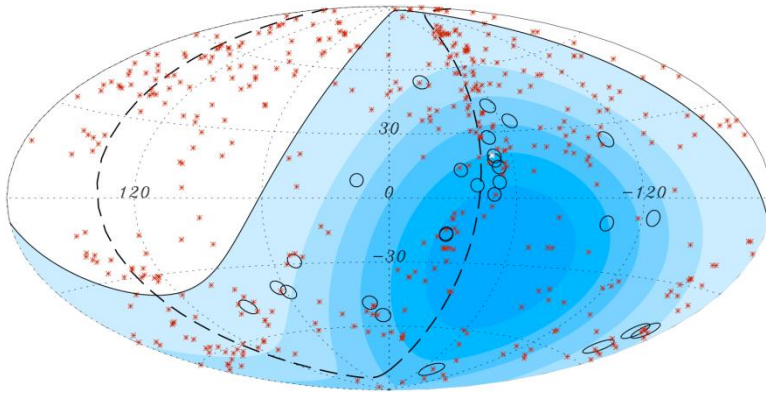
- CERCLES NOIRS (RAYON 3.1°) 27 RC AVEC $E > 57 \cdot 10^{18} \text{eV}$.
- ÉTOILES ROUGES POSITIONS DES 472 AGN (318 DANS LE CHAMPS DE VUE) AVEC $Z \leq 0.017$
- LIGNE CONTINUE, LIMITE DE CHAMPS DE VUE D'AUGER SUD. LIGNE POINTILLÉE PLAN SUPER GALACTIQUE.
- BANDE DE COULEURS, EXPOSITION RELATIVE.
- ÉTOILE BLANCHE CENTAURUS A

PREMIÈRES CONCLUSIONS



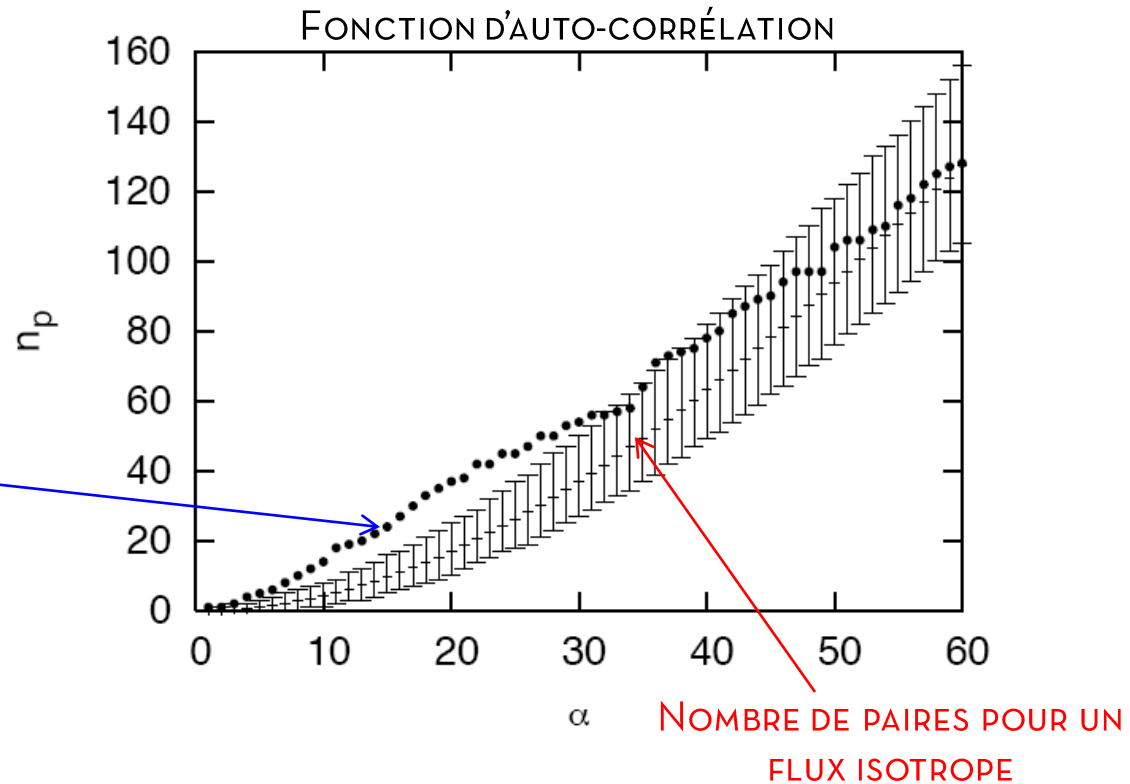
- LES SOURCES SONT **EXTRA-GALACTIQUES ET PROCHES** (N_{MIN} DE SOURCES = 61)
- LE RAYONNEMENT EST **ANISOTROPE**

PREMIÈRES CONCLUSIONS

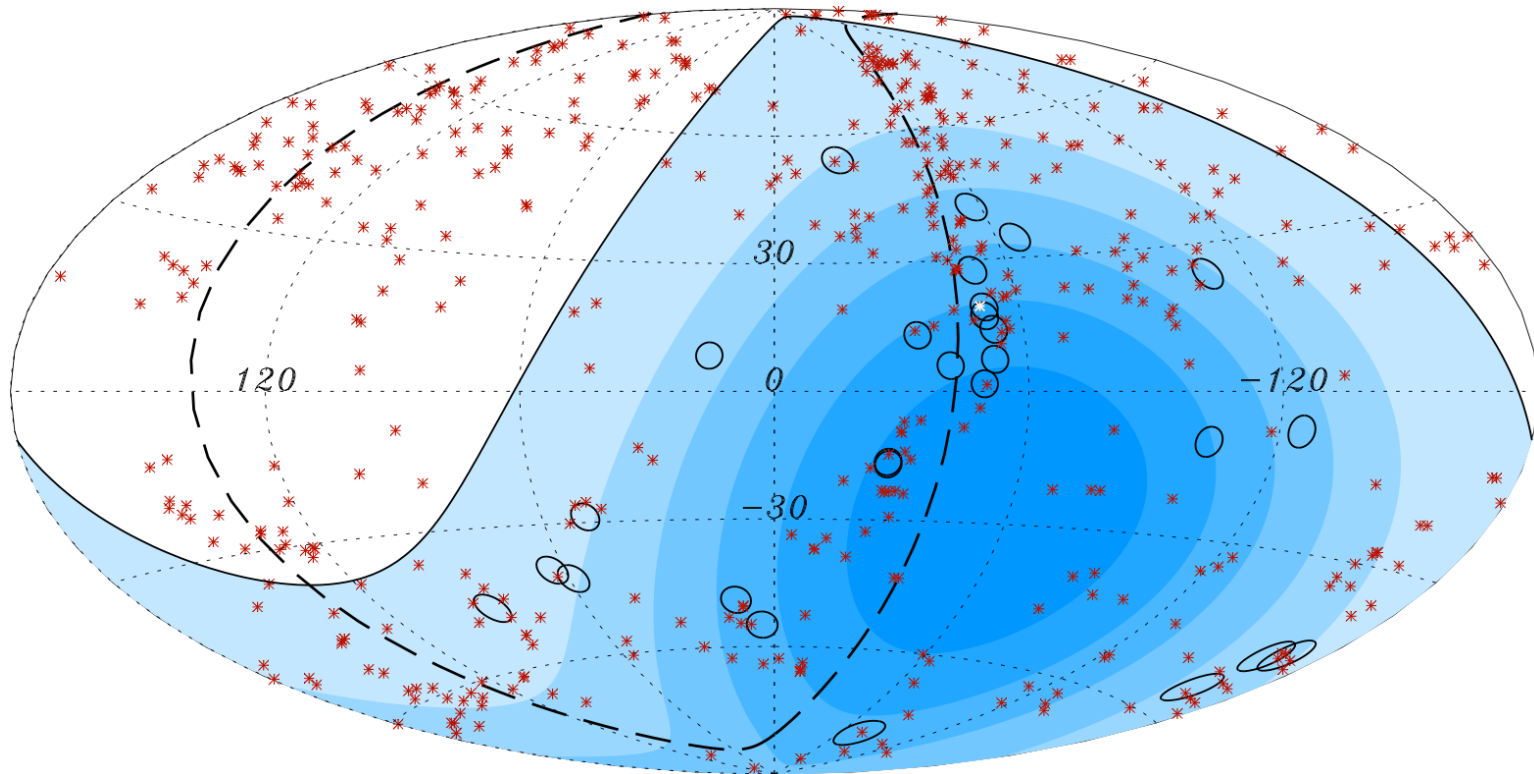


- LES SOURCES SONT **EXTRA-GALACTIQUES**
- LE RAYONNEMENT EST **ANISOTROPE**

NOMBRE DE PAIRES POUR
LES 27 ÉVÉNEMENTS



PREMIÈRES CONCLUSIONS

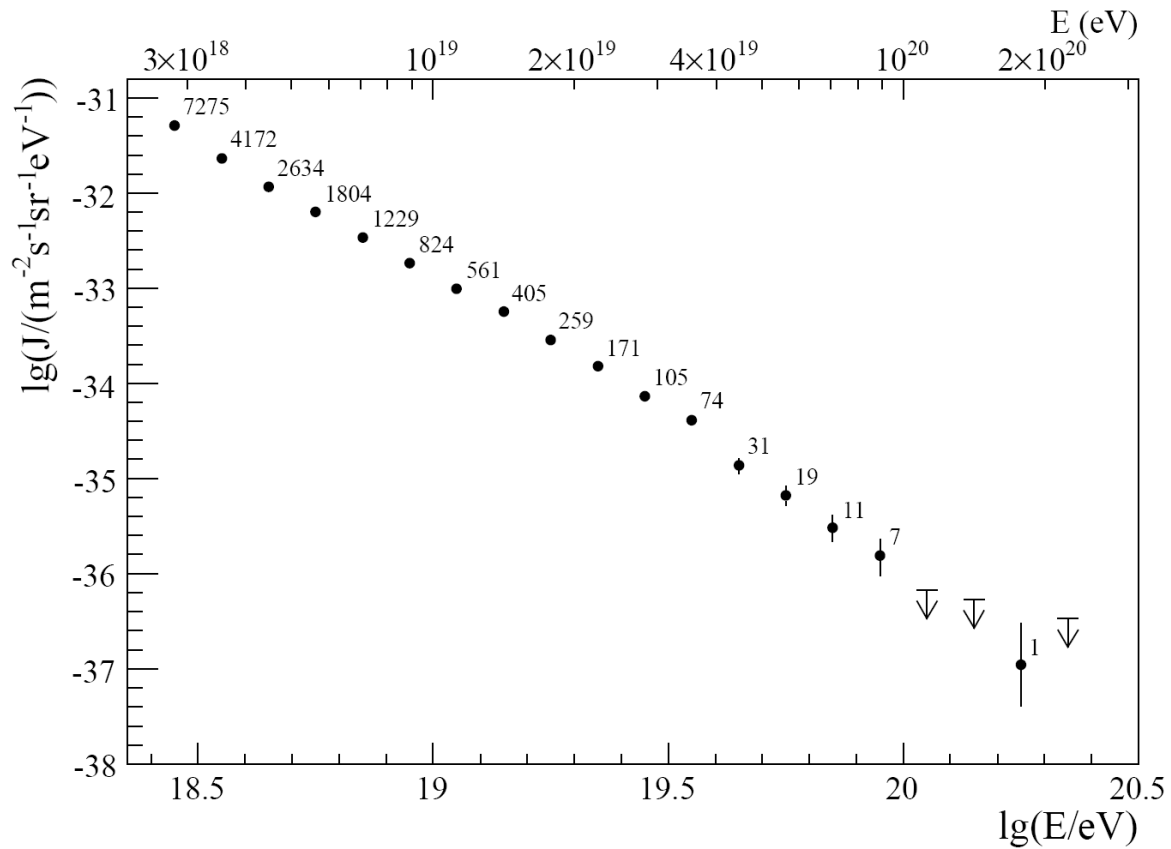


- LES SOURCES SONT **EXTRA-GALACTIQUES ET PROCHES** (N_{MIN} DE SOURCES = 61)
- LE RAYONNEMENT EST **ANISOTROPE**
- LES GALAXIES ACTIVES SONT DES **CANDIDATS PLAUSIBLES**

PLUS DE DONNÉES POUR IDENTIFIER LES SOURCES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

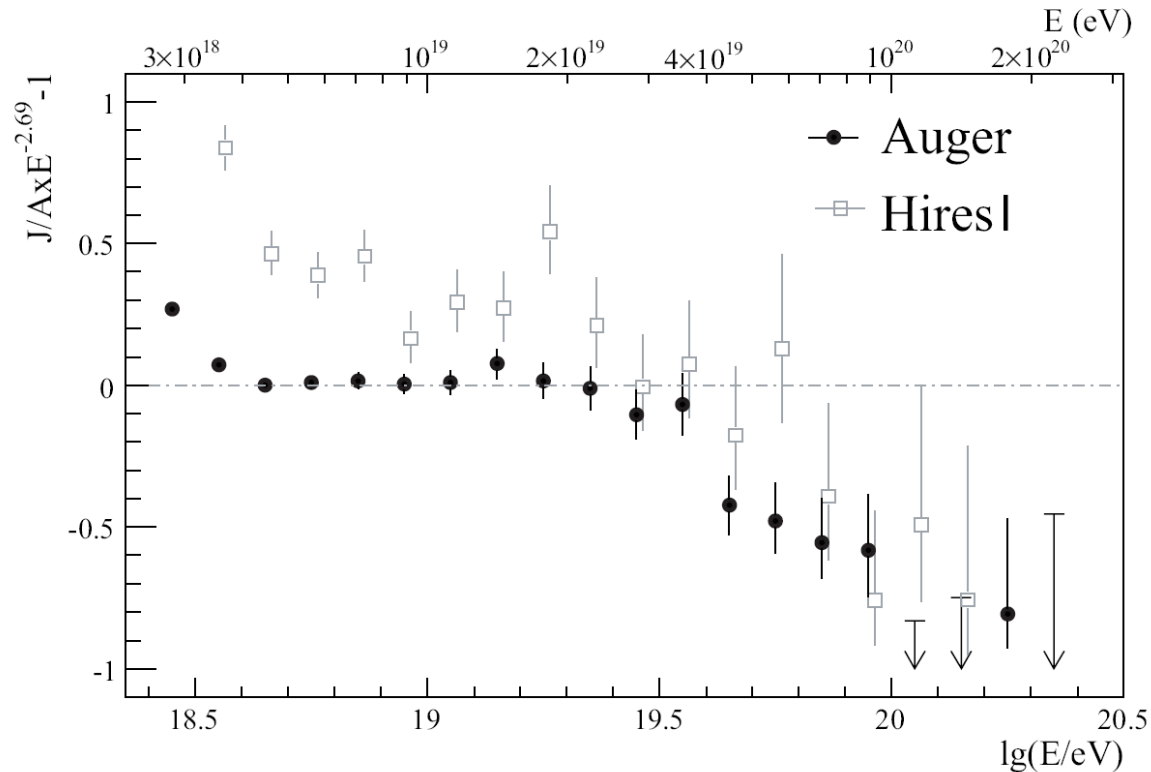
IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

■ LE SPECTRE EN ÉNERGIE



IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

LE SPECTRE EN ÉNERGIE

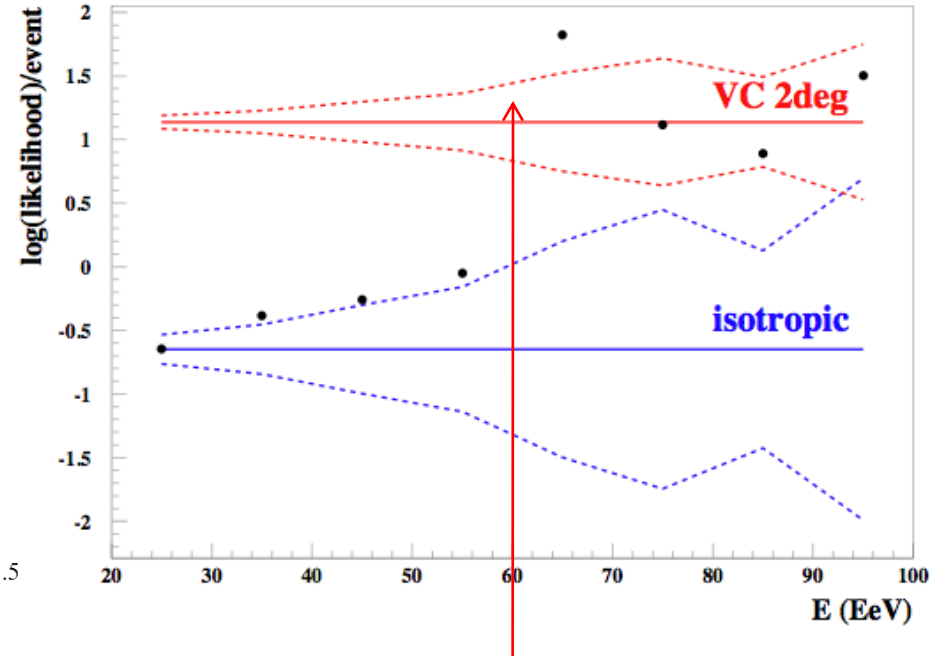
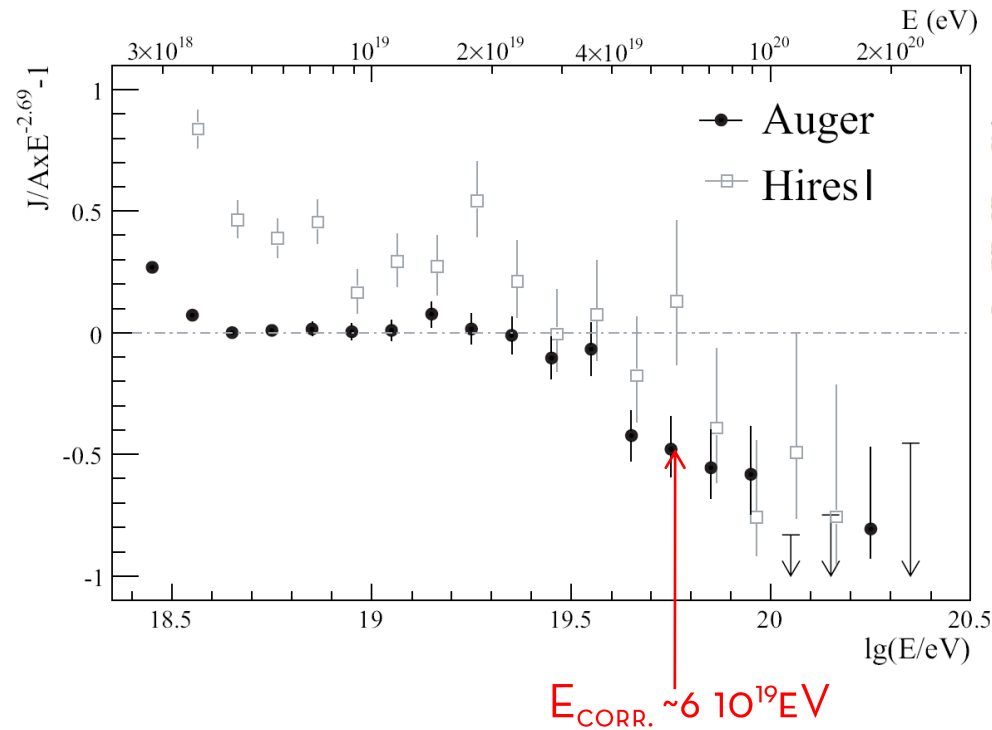


UN COMPORTEMENT EN LOI DE PUISSANCE D'INDICE SPECTRAL -2.69 EST REJETÉ AU-DELÀ DE $4.10^{19}E\text{V}$ AVEC UNE SIGNIFICATIVITÉ DE 6σ

MAIS LE SPECTRE À LUI SEUL NE PEUT CONFIRMER L'EFFET GZK !

IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

LE SPECTRE EN ÉNERGIE

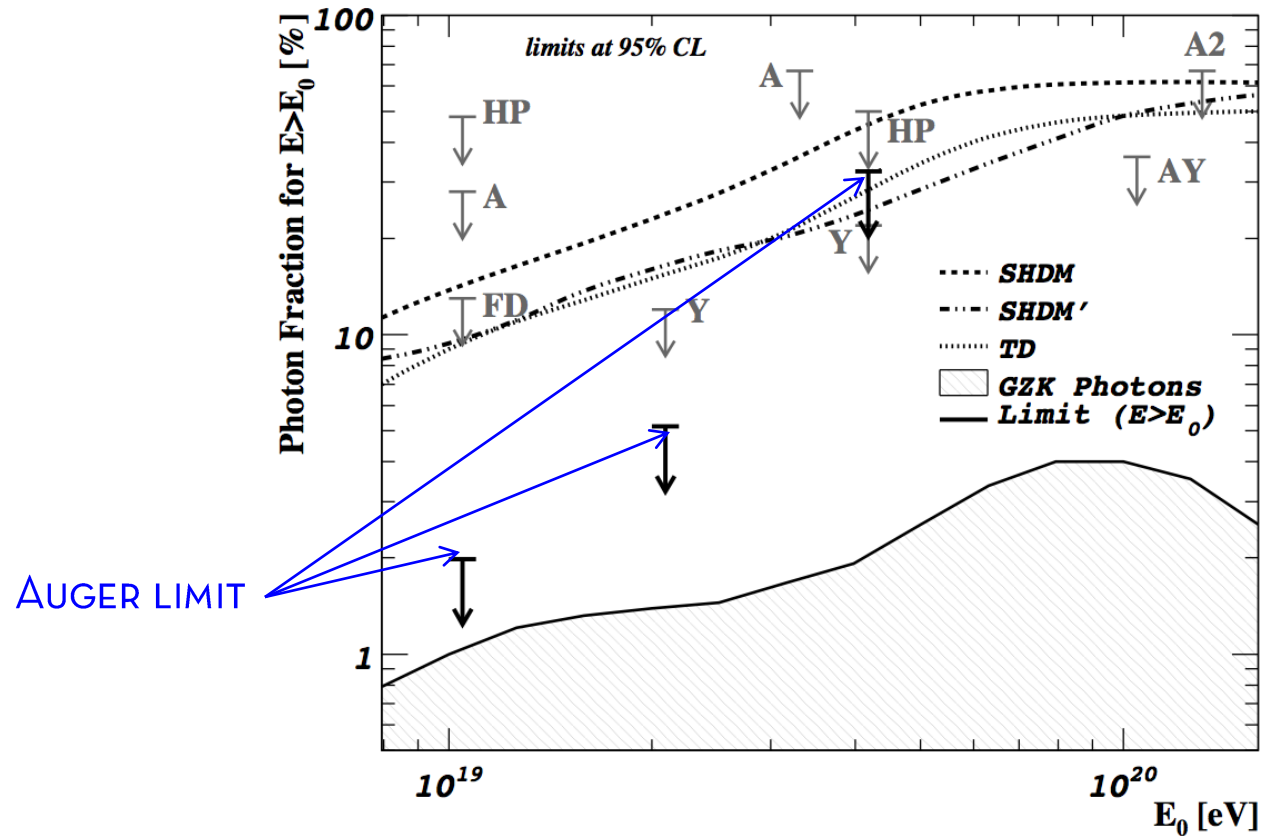


LA STRUCTURE DU SPECTRE + L'ANISOTROPIE DES SOURCES \Rightarrow EFFET GZK

IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

LA COMPOSITION DU RCUHE

→ L'ANISOTROPIE DES SOURCES DÉFAVORISE LES MODÈLES « TOP-DOWN »



→ RÉSULTATS CORROBORÉS PAR LES MESURES SUR LE FLUX DE PHOTONS

IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

■ LA COMPOSITION DU RCUHE

- LES DÉFLECTIONS DANS LE CHAMP MAGNÉTIQUE GALACTIQUE SONT PROP. À LA CHARGE DU RC

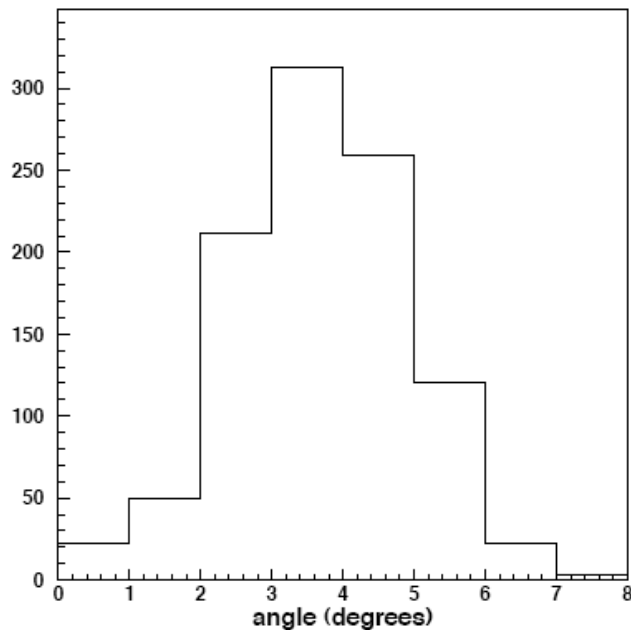
$$\delta \simeq 2.7^\circ \frac{60 \text{ EeV}}{E/Z} \left| \int_0^D \left(\frac{d\mathbf{x}}{\text{kpc}} \times \frac{\mathbf{B}}{3\mu\text{G}} \right) \right|$$

IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

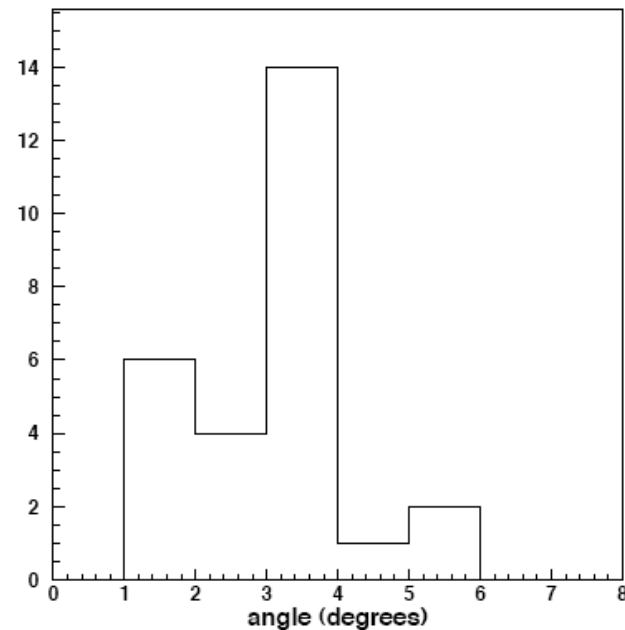
■ LA COMPOSITION DU RCUHE

- LES DÉFLECTIONS DANS LE CHAMP MAGNÉTIQUE GALACTIQUE SONT PROP. À LA CHARGE DU RC

DISTRIBUTION DES ANGLES DE DÉFLECTION POUR DES PROTONS



MODÈLE BSS-S :
PROTON $E = 6 \cdot 10^{19} \text{eV}$



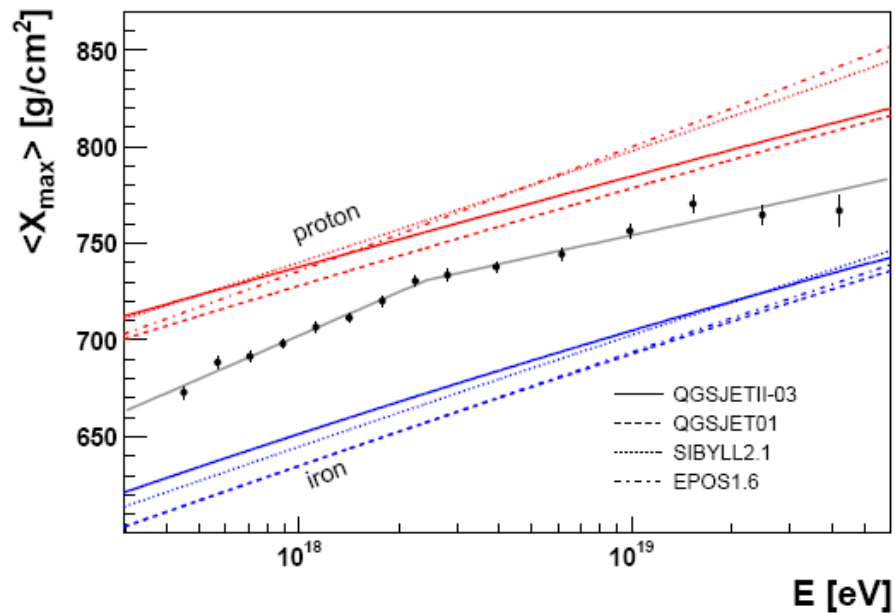
DONNÉES AUGER :
27 ÉVÉNEMENTS $E > 5.7 \cdot 10^{19} \text{eV}$

→ SOUS L'HYPOTHÈSE QUE LE MODÈLE BSS-S SOIT CORRECT ALORS L'ÉCHELLE ANGULAIRE DE LA CORRÉLATION EST COMPATIBLE AVEC UNE MAJORITÉ DE PROTONS

IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

■ LA COMPOSITION DU RCUHE

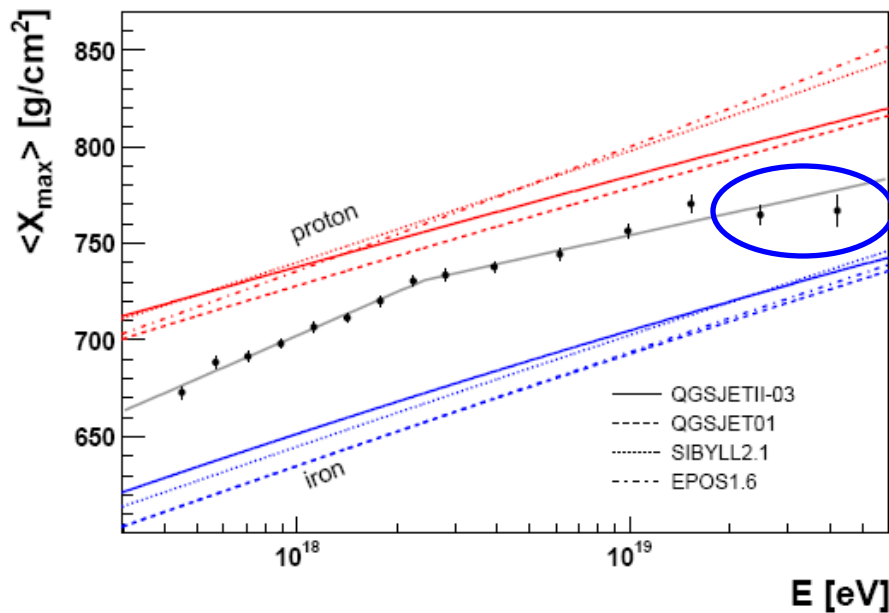
- SI LE RAYONNEMENT COSMIQUE EST DOMINÉ PAR DES PROTONS AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19} \text{eV}$ ALORS



IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

LA COMPOSITION DU RCUHE

- SI LE RAYONNEMENT COSMIQUE EST DOMINÉ PAR DES PROTONS AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19}$ eV ALORS



- LES RÉSULTATS DE COMPOSITION MONTRENT AU CONTRAIRE UN CHANGEMENT DE COMPOSITION DE LÉGER VERS LOURD

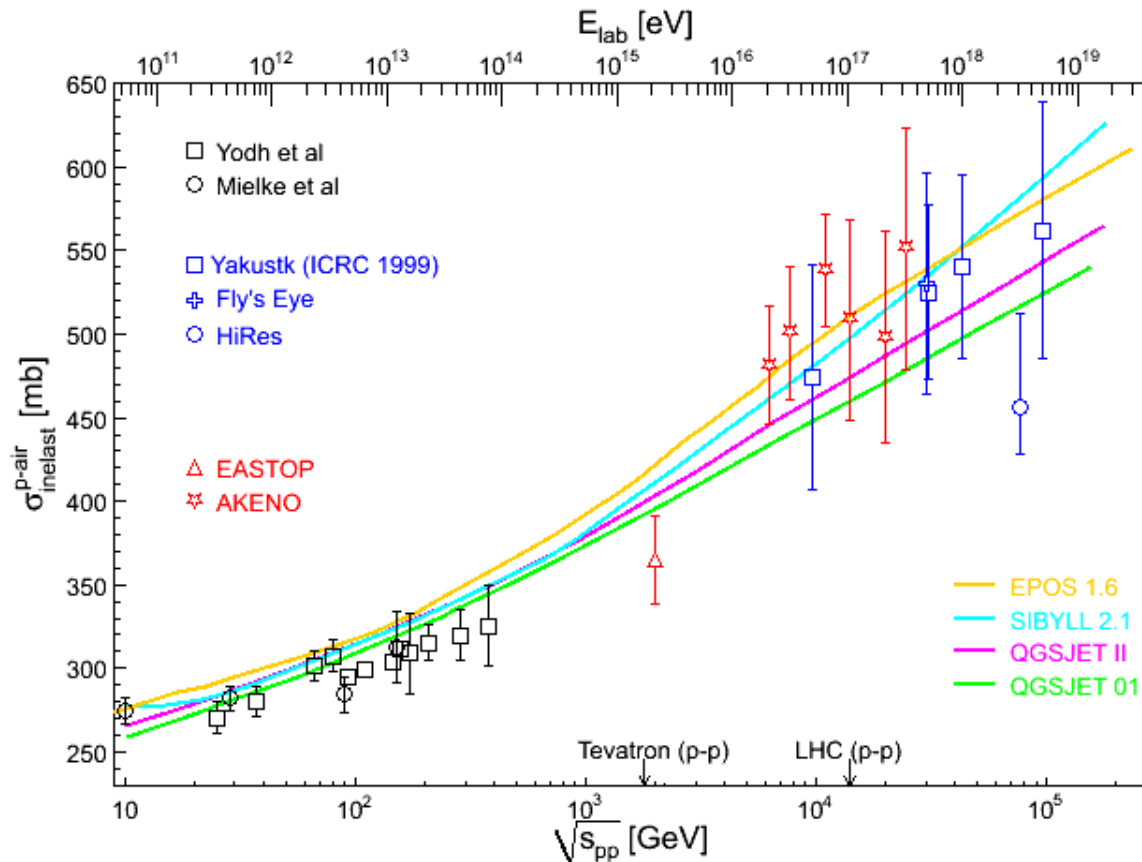
→ CHANGEMENT DE LA PHYSIQUE HADRONIQUE À CES ÉNERGIES ?

IMPLICATIONS DE L'ANISOTROPIE

LA COMPOSITION DU RCUHE

- LES RÉSULTATS DE COMPOSITION MONTRENT AU CONTRAIRE UN CHANGEMENT DE COMPOSITION DE LÉGER VERS LOURD

→ CHANGEMENT DE LA PHYSIQUE HADRONIQUE AU-DELÀ DE 10^{18} eV



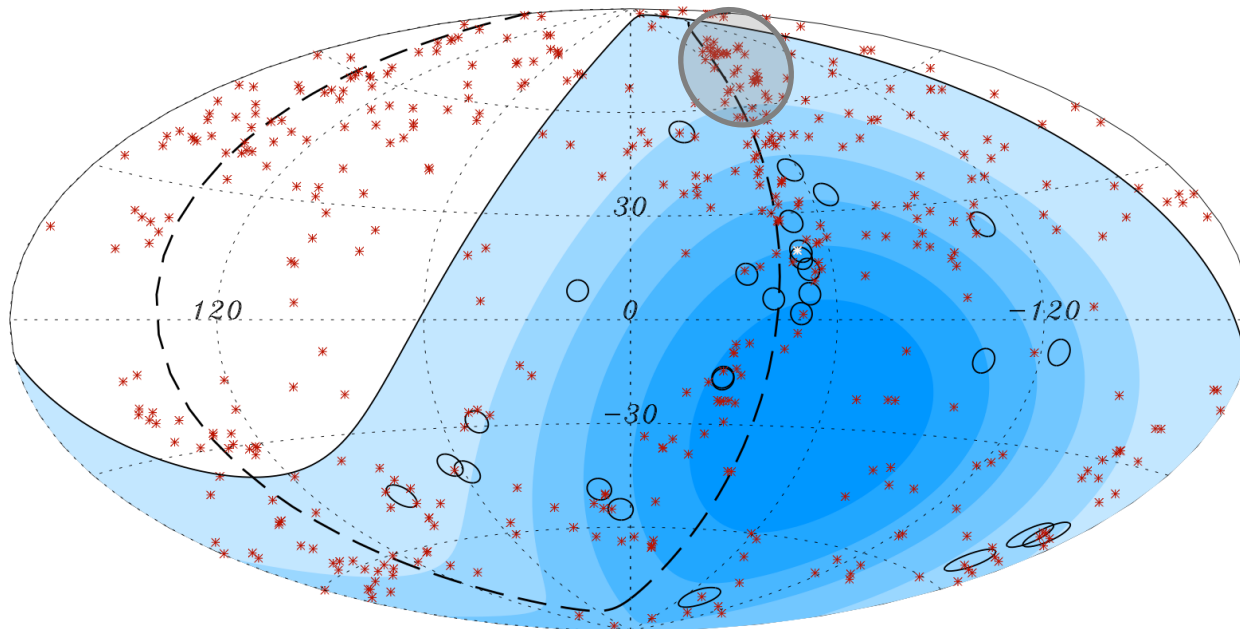
CONCLUSIONS

- L'ANISOTROPIE DU RAYONNEMENT COSMIQUE AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19} \text{EeV}$ EST ÉTABLIE
- LES AGNs SONT DES CANDIDATS SÉRIEUX MAIS SEUL L'ACCUMULATION DE DONNÉES PERMETTRA RAISONNABLEMENT D'IDENTIFIER LES SOURCES DU RCUHEs

CONCLUSIONS

- L'ANISOTROPIE DU RAYONNEMENT COSMIQUE AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19} \text{eV}$ EST ÉTABLIE
- LES AGNs SONT DES CANDIDATS SÉRIEUX MAIS SEUL L'ACCUMULATION DE DONNÉES PERMETTRA RAISONNABLEMENT D'IDENTIFIER LES SOURCES DU RCUHES

(AUCUN ÉVÉNEMENT DU CLUSTER DE VIRGO !!)



CONCLUSIONS

- L'ANISOTROPIE DU RAYONNEMENT COSMIQUE AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19} \text{eV}$ EST ÉTABLIE
- LES AGNs SONT DES CANDIDATS SÉRIEUX MAIS SEUL L'ACCUMULATION DE DONNÉES PERMETTRA RAISONNABLEMENT D'IDENTIFIER LES SOURCES DU RCUHES
- L'ANISOTROPIE COUPLÉE AUX RÉSULTATS SUR LE SPECTRE EN ÉNERGIE CONFIRMENT L'EXISTENCE D'UNE COUPURE GZK
 - VALIDITÉ DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE JUSQU'À DES FACTEURS $\Gamma = 10^{11}$
- L'ANISOTROPIE COUPLÉE AUX RÉSULTATS SUR LE FLUX DE PHOTONS EXCLUENT L'ENSEMBLE DES MODÈLES « TOP-DOWN »

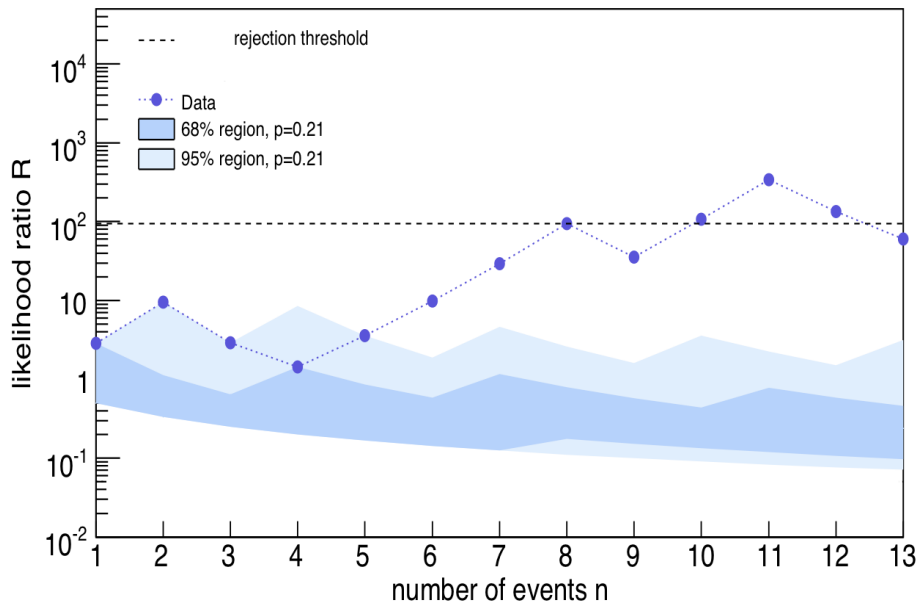
CONCLUSIONS

- L'ANISOTROPIE DU RAYONNEMENT COSMIQUE AU-DELÀ DE $6 \cdot 10^{19} \text{eV}$ EST ÉTABLIE
- LES AGNs SONT DES CANDIDATS SÉRIEUX MAIS SEUL L'ACCUMULATION DE DONNÉES PERMETTRA RAISONNABLEMENT D'IDENTIFIER LES SOURCES DU RCUHES
- L'ANISOTROPIE COUPLÉE AUX RÉSULTATS SUR LE SPECTRE EN ÉNERGIE CONFIRMENT L'EXISTENCE D'UNE COUPURE GZK
 - VALIDITÉ DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE JUSQU'À DES FACTEURS $\Gamma = 10^{11}$
- L'ANISOTROPIE COUPLÉE AUX RÉSULTATS SUR LE FLUX DE PHOTONS EXCLUENT L'ENSEMBLE DES MODÈLES « TOP-DOWN »
- LA CORRÉLATION OBSERVÉE ACCRÉDITE L'HYPOTHÈSE QUE LES RC SONT EN MAJORITÉ DES PROTONS
 - DÉSACCORD AVEC LES PRÉDICTIONS DES MODÈLES HADRONIQUES
 - CHANGEMENT DE LA PHYSIQUE HADRONIQUE À DES ÉNERGIES $\times 3 E_{\text{CM}}(\text{LHC})$

BACKUP SÉMINAIRE
INTERNE LAL
22/01/2008

Rapport de vraisemblance

$$R = \frac{\int_{0.21}^1 p_1^k (1 - p_1)^{n-k} dp_1}{0.21^k (1 - 0.21)^{n-k+1}}$$



Rapport R comme fonction des événements au dessus de 57 EeV.

L'hypothèse nulle (isotropie) rejetée avec 99% de confiance au 10^{ième} événement.

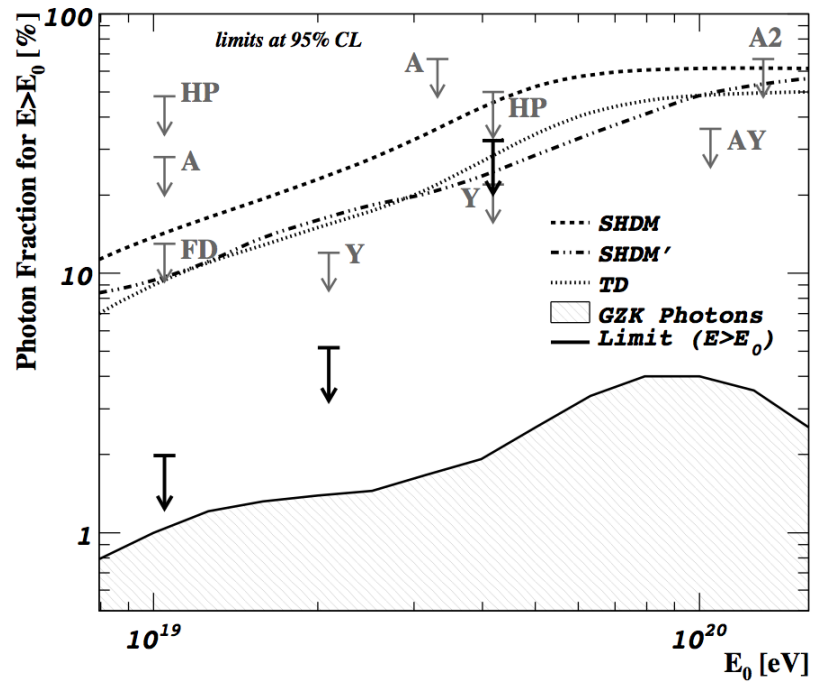
Les régions colorées indiquent les valeurs attendues pour R dans 68% et 95% des cas isotropes.

Test erreur de type I α , Test erreur de type II β

$R < \beta / (1 - \alpha)$ Accepter H_0 (données isotropes)

$R > (1 - \beta) / \alpha$ Accepter H_1 (données anisotropes)

Photon Limit



Neutrino Limit

