

## **Rayonnement cosmique au-delà du genou : résultats expérimentaux**

Martin Lemoine

*GReCO, Institut d'Astrophysique de Paris, C.N.R.S.,  
98 bis boulevard Arago, 75014 Paris*

**Abstract.** Ce texte présente les principaux résultats expérimentaux sur la composition et l'allure du spectre du rayonnement cosmique à haute énergie ( $E \gtrsim 10^{15}$  eV).

On se concentrera en particulier sur le “genou”, qui apparaît comme un raidissement du spectre à une énergie  $\simeq 10^{15}$  eV. L'expérience KASCADE suggère l'existence de plusieurs “genoux” consécutifs associés à des éléments chimiques progressivement plus lourds. Ce résultat préliminaire semble conforté par les données de l'expérience EAS-TOP.

On étudiera également la composition et l'allure du spectre autour de la “cheville”, qui apparaît comme un redressement du flux vers  $E \sim 10^{19}$  eV. Des anisotropies dans la carte angulaire de directions d'arrivée sont observées en direction du centre Galactique à  $E \sim 10^{18}$  eV et sur des petites échelles angulaires ( $\lesssim 2^\circ$ ) à  $E \gtrsim 4 \cdot 10^{19}$  eV. Aux énergies extrêmes  $E \simeq 5 \cdot 10^{19}$  eV le spectre est mal connu car les expériences AGASA et HiRes mesurent des flux d'allures sensiblement différentes. L'expérience Fly's Eye suggère que les éléments lourds dominent la composition chimique en deçà de la cheville, et que les éléments légers dominent au-delà.

Enfin on discutera brièvement la région intermédiaire entre le “genou” et la “cheville”, c'est-à-dire  $E \sim 10^{17}$  eV, pour laquelle les résultats expérimentaux sont trop peu nombreux. Cette région semble présenter un autre raidissement du spectre : une “fracture” du tibia ?

**Table des matières**

<b>1. Introduction</b>	<b>29</b>
<b>2. Détection et mesure</b>	<b>30</b>
<b>3. Autour du genou</b>	<b>32</b>
<b>4. Autour de la cheville</b>	<b>35</b>
<b>5. Conclusions</b>	<b>38</b>

## 1. Introduction

Le spectre du rayonnement cosmique apparaît comme une loi de puissance continue recouvrant une dizaine d’ordres de grandeur en énergie et une trentaine en flux. Néanmoins cette loi de puissance n’est pas parfaite et le tracé de  $E^3 dI/dE$ , le flux différentiel multiplié par le cube de l’énergie, révèle des changements de pente à différentes énergies. Ainsi, le spectre représenté dans la Fig. 1 (Nagano & Watson 2000) met en évidence le “genou” à  $E \sim 10^{15}$  eV, la “cheville” à  $E \sim 10^{19}$  eV, et ce qu’on pourrait appeler une “fracture du tibia” à  $E \sim 10^{18}$  eV.

D’un point de vue théorique, on pense comprendre l’origine des rayons cosmiques en deçà du genou<sup>1</sup>. L’accélération de particules dans les restes de supernovae (cf. le cours d’Etienne Parizot) paraît en être la source la plus probable. Cependant, l’énergie maximale prédite pour ces rayons cosmiques est  $\sim Z \times 10^{13} \rightarrow Z \times 10^{14}$  eV, où  $Z$  désigne le numéro atomique. On ne comprend donc pas l’origine du rayonnement cosmique au-delà du genou, et à vrai dire, on ne sait pas vraiment quel phénomène est à l’origine de ce genou. S’agit-il d’une rupture de pente résultant d’une modification du mode de transport des rayons cosmiques dans la Galaxie ? S’agit-il plutôt de la fin du spectre issu des supernovae et de l’émergence d’une nouvelle composante provenant d’une source différente ? Et la cheville, signe-t-elle la présence d’une autre composante de pente moins forte aux énergies extrêmes ? Quelle est l’explication de la fracture ? Dans ce contexte l’acquisition de données expérimentales de grandes qualités sur le rayonnement cosmique au-delà de  $10^{15}$  eV paraît fondamentale. La connaissance de la composition chimique et de la forme exacte du spectre au genou et au-delà sont deux indices précieux de l’origine et de la nature du rayonnement cosmique et des processus qui façonnent le spectre mesuré sur Terre.

Cet article tente de résumer les principaux résultats expérimentaux dans ce domaine. On présentera tout d’abord la méthodologie de la mesure de l’énergie et de la composition chimique pour les énergies  $\gtrsim 10^{15}$  eV par l’étude des grandes gerbes atmosphériques (Sec. 2). Puis on se concentrera sur le domaine du genou  $E \sim 10^{15} \rightarrow 10^{17}$  eV (Sec. 3) et sur les énergies extrêmes  $E \gtrsim 10^{18}$  eV (Sec. 4) pour lesquelles il existe de nombreux résultats importants. Il est important de souligner que l’auteur n’est en aucun cas expert de la détection de rayons cosmiques et ce texte est un condensat aggloméré de la bibliographie existante. On pourra trouver d’excellents articles de revue sur ce sujet dans Swordy et al. (2002), Nagano & Watson (2000), Billoir (2001), Yoshida (2001).

---

<sup>1</sup>même si divers arguments peuvent être rassemblés pour remettre en cause toute certitude dans ce domaine (NDE)

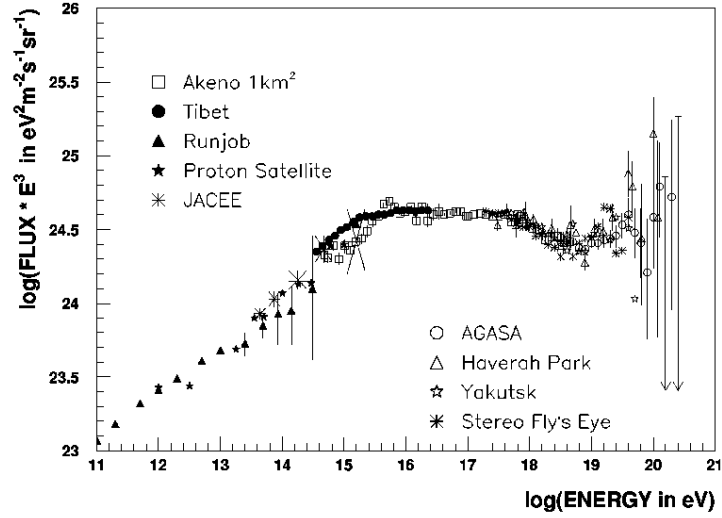


Figure 1.: *Flux différentiel  $dI/dE$  multiplié par  $E^3$  en fonction de l'énergie  $E$  du rayonnement cosmique, toutes espèces chimiques confondues, mesuré par différentes expériences indiquées dans la figure. (Figure extraite de Nagano & Watson 2000).*

## 2. Détection et mesure

Lorsqu'un rayon cosmique pénètre dans la haute atmosphère, les interactions multiples qu'il subit avec ce milieu dense dégradent son énergie et engendrent une gerbe de particules *secondaires*. On peut évaluer les caractéristiques physiques de la particule *primaire*, c'est-à-dire celle arrivant sur la haute atmosphère, de deux manières différentes. Soit on procède à une mesure *directe* de son énergie et de sa nature à l'aide d'un détecteur embarqué dans un satellite ou dans un ballon stratosphérique avant que les premières interactions aient lieu. Soit on observe le plus grand nombre possible de particules secondaires, et en comparant les données avec celles prédites par des simulations de Monte-Carlo, on peut reconstruire l'énergie et la nature de la particule primaire.

Les mesures ballon/satellite sont limitées aux basses énergies car elles requièrent un flux important : les détecteurs pouvant être embarqués sont nécessairement de faible surface collectrice. Ainsi dans la Fig. 1 les données en deçà du genou proviennent d'expériences embarquées : Runjob, Proton Satellite et JACEE. On notera que ces expériences permettent tout juste d'atteindre  $E \sim 10^{15}$  eV. Au-delà du genou, toutes les données proviennent d'expériences au sol effectuant des mesures in-

directes ; on se concentrera donc sur ces dernières dans la suite de cet article.

Dans ce cadre, on peut utiliser deux observables principales pour reconstituer la nature et l'énergie de la particule primaire : la densité de particules secondaires au niveau du sol, c'est-à-dire le profil latéral de densité (densité de particules en fonction des coordonnées  $x, y$  au sol), et le nombre en fonction de l'altitude ou profil longitudinal (nombre de particules vs  $z$  coordonnée d'axe dirigé vers le zénith).

Au sol, les particules secondaires détectées sont des électrons, des muons, des photons et des hadrons (dans le cœur de la gerbe). Leur détection et la mesure de leur énergie peuvent être réalisées à l'aide de détecteurs Čerenkov, ou de scintillateurs. Pour reconstituer la direction d'arrivée de la particule primaire, il suffit de disposer de l'information des temps d'arrivée et du profil latéral de densité. En effet l'axe de la gerbe coïncide avec la direction d'arrivée de la particule primaire car le facteur de Lorentz élevé de cette dernière garantit la focalisation des trajectoires des particules produites lors des premières interactions dans l'atmosphère. Enfin, en effectuant des simulations de Monte-Carlo de développement de gerbes dans l'atmosphère pour un jeu de paramètres physiques (énergie du primaire, nature du primaire, axe de la gerbe, etc...), on peut reconstruire ces paramètres par ajustement des densités mesurées des secondaires. Les simulations numériques utilisées (MOCCA, SIBYLL, QGSJET, DPMJET) sont complexes et incertaines car elles reposent sur une extrapolation d'interactions hadroniques qui ne sont connues empiriquement qu'à plus basse énergie.

On peut résumer le principe général de la reconstruction de la manière suivante. La composition des particules secondaires (électrons vs photons vs muons vs hadrons) donne une indication de la nature de la particule primaire, tandis que le nombre total de particules secondaires donne une indication de l'énergie de la particule primaire. L'atmosphère se comporte en effet comme un calorimètre, ce qui permet d'effectuer une mesure relativement précise de l'énergie en dépit des incertitudes théoriques sur le développement des gerbes hadroniques.

L'observation du développement longitudinal de la gerbe ne peut se faire que par l'observation du rayonnement émis lors des interactions dans l'atmosphère, principalement le Čerenkov de particules chargées ou la fluorescence de l'azote excité par collisions. Le profil longitudinal en fonction de l'altitude  $z$  a l'allure d'une courbe en cloche, dont le point de développement maximum est communément appelé  $X_{\text{max}}$ . Cette quantité est écrite en unités de grammage,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , représentant une distance parcourue dans un milieu de densité massique donnée. Ainsi  $0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  correspond à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, et le niveau du sol se situe à  $\simeq 1000\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  pour une trajectoire verticale. Le nombre

de photons collectés par le télescope (Čerenkov ou à fluorescence) est proportionnel au nombre de particules chargées à une altitude donnée. Cela permet de mesurer le nombre total de particules dans la gerbe, donc l'énergie de la particule primaire. En outre, la position du maximum du développement de la gerbe dépend de l'énergie par nucléon  $E/A$  de la particule primaire. A même énergie, la valeur du  $X_{\max}$  d'une gerbe engendrée par un noyau de fer devrait être inférieure à celle d'une gerbe initiée par un proton. Cependant, cette valeur de  $X_{\max}$  est sujette à de fortes fluctuations liées à la profondeur à laquelle les premières interactions de la gerbe ont lieu. Aussi il est généralement impossible de mesurer au cas par cas la nature d'une particule primaire par cette méthode. En revanche, cette mesure de composition chimique peut être réalisée de manière statistique en accumulant en grand nombre de gerbes : on mesure alors la masse moyenne, ou plus généralement  $\langle \log(A) \rangle$ . Toutefois la calibration de la transmission atmosphérique reste un point délicat de cette technique. Le nombre de particules chargées reconstruit dans la gerbe à partir du flux collecté dépend de manière exponentielle de la profondeur optique du rayonnement dans l'atmosphère. Aussi il est nécessaire de connaître avec une bonne précision l'importance des divers processus d'absorption et de diffusion du rayonnement Čerenkov ou de fluorescence. Enfin ce mode de détection ne peut fonctionner que par nuit noire, ce qui représente  $\sim 10\%$  du temps dans un site approprié.

Globalement l'énergie peut être reconstruite avec une précision typique de l'ordre de  $\sim 30\%$  par les méthodes ci-dessus. La nature de la particule primaire est contrainte sur la base d'un grand nombre d'événements, mais cette quantité est toujours beaucoup plus délicate à extraire des expériences.

### 3. Autour du genou

Le flux du rayonnement cosmique autour du genou, toutes espèces chimiques confondues, est représenté dans la Fig. 1. Cette figure semble indiquer l'existence d'un unique genou à  $E \simeq 2 \cdot 10^{15}$  eV, marquant la transition d'une loi de puissance en  $E^{-2.7}$  vers une nouvelle loi de puissance en  $E^{-3}$  jusqu'à  $E \simeq 4 \cdot 10^{17}$  eV. Par ailleurs les résultats des expériences satellite en deçà du genou semblent indiquer un accroissement de la masse logarithmique moyenne  $\langle \log A \rangle$  avec l'énergie.

Ces dernières années, une petite révolution est venue de l'expérience KASCADE (*KArlsruhe Shower Core and Array DEtector*)<sup>2</sup>. Celle-ci est composée d'un ensemble de scintillateurs pour électrons et muons cou-

---

<sup>2</sup>KASCADE : [http://www-ik.fzk.de/KASCADE\\_home\\_g.html](http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home_g.html)

vrant  $200 \times 200 \text{ m}^2$ , d'une station centrale dédiée à la détection de hadrons, et de détecteurs souterrains supplémentaires pour les muons. Les profils latéraux enregistrés sont utilisés pour reconstruire pour chaque gerbe les paramètres principaux, en particulier le nombre total d'électrons  $N_e$  et le nombre "tronqué" de muons  $N_\mu$ . Le nombre de gerbes observé est alors représenté dans ce plan  $N_e - N_\mu$ , et cette surface est ajustée pour reconstruire les spectres en énergie par groupes de masse d'éléments :  $A = 1$  (H),  $A = 4$  (He),  $A = 12$  (C, N, O),  $A = 56$  (Fe,...). En effet, comme on l'a mentionné, le nombre total de particules  $\sim N_e + N_\mu$  donne une mesure de l'énergie de la gerbe, tandis que la composition respective  $N_e$  vs  $N_\mu$  donne une indication de la nature de la particule primaire. Les résultats préliminaires sont exceptionnels (mais préliminaires!), et sont représentés dans la Fig. 2.

Il est très important de se souvenir que ces données sont préliminaires, et que les spectres d'espèces chimiques différentes sont le fruit d'une déconvolution basée sur des simulations numériques de gerbes. Aussi la même déconvolution opérée avec un outil de simulation différent donne des spectres individuels légèrement différents, même si l'allure globale est préservée. En outre, ces spectres ne donnent le spectre d'une seule espèce chimique mais d'un groupe d'éléments de masse semblable. Quoiqu'il en soit, ces résultats, s'ils sont confirmés, donnent une vision particulièrement claire du spectre total. Ainsi le genou vu dans la Fig. 1 vers  $E \simeq 2 \cdot 10^{15} \text{ eV}$  ne serait que le genou correspondant aux protons, et la loi de puissance  $\propto E^{-3}$  à plus haute énergie correspondrait à la superposition des genoux d'éléments progressivement plus lourds, apparaissant à des énergies progressivement plus élevées. Par exemple le genou du groupe du fer semble apparaître vers  $\sim 10^{17} \text{ eV}$ .

On notera qu'il est particulièrement important de comprendre la relation entre la position en énergie du genou pour une espèce donnée et sa masse atomique. En particulier, si le genou résulte d'un processus astrophysique, i.e. la coupure d'énergie maximale d'accélération ou le changement de régime de diffusion, la position de ce genou devrait dépendre linéairement du nombre atomique  $Z$ . Ces processus sont en effet gouvernés par le champ magnétique, donc seul compte le rayon de Larmor  $\propto E/Z$ . En revanche, certains modèles théoriques attribuent l'origine du genou à une déviation des sections efficaces d'interactions dans l'atmosphère de leurs valeurs extrapolées, par exemple par l'apparition de nouveaux canaux de production. Dans ce cas, le flux ne devrait dépendre que de l'énergie par nucléon  $E/A$ . Il est donc fondamental de chercher à distinguer une tendance par la mesure précise de la position du genou comparée entre les groupes  $Z = A = 1$  et  $Z \simeq A/2 \gg 1$ . Les données de KASCADE suggèrent une dépendance selon  $Z$ , telle qu'attendue dans un

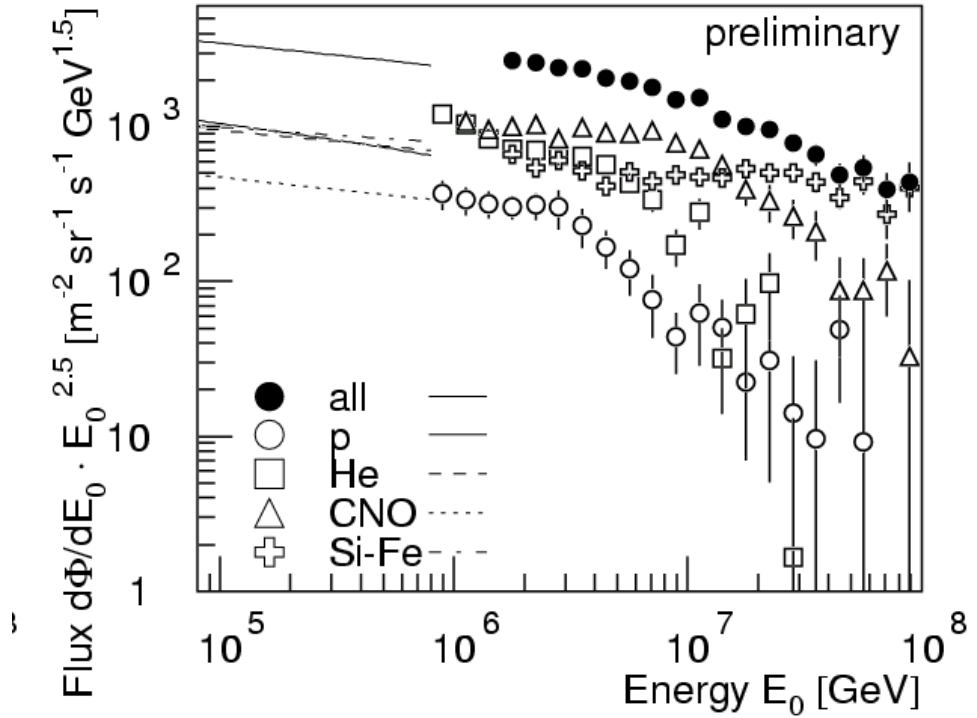


Figure 2.: *Flux différentiel  $dI/dE$  multiplié par  $E^{2.5}$  en fonction de  $E$  mesuré par l'expérience KASCADE. Les cercles pleins représentent le flux toutes espèces chimiques confondues ; les cercles vides correspondent au flux des espèces du groupe  $A \sim 1$ , les carrés aux éléments  $A \sim 4$ , les triangles à  $A \sim 12$ , et les croix à  $A \sim 56$ . Ces spectres ont été reconstruits avec SIBYLL. (Figure issue de Hörandel et al. 2003).*

s scénario “astrophysique”, mais il est encore trop tôt pour conclure avec certitude.

Les résultats récents de l'expérience EAS-TOP<sup>3</sup> indiquent une transition de la quantité  $\langle \log(A) \rangle$  de  $\simeq 2$  ( $A \sim 7$ ) à  $2 \cdot 10^{15}$  eV vers  $\simeq 3.3$  ( $A \sim 30$ ) à  $3 \cdot 10^{16}$  eV, en bon accord avec les mesures de KASCADE.

L'expérience KASCADE-Grande<sup>4</sup> est une extension de l'expérience KASCADE. Elle couvre une surface de l'ordre de  $0.5 \text{ km}^2$ , soit environ

<sup>3</sup>EAS-TOP : [http://www.lngs.infn.it/site/exppro/eastop/eas\\_top.html](http://www.lngs.infn.it/site/exppro/eastop/eas_top.html)

<sup>4</sup>KASCADE-Grande : [http://www-ik.fzk.de/KASCADE\\_home\\_g.html](http://www-ik.fzk.de/KASCADE_home_g.html)



dix fois plus que KASCADE, et doit étudier le spectre et la composition du rayonnement cosmique dans la région  $10^{16} \text{ eV} \rightarrow 10^{18} \text{ eV}$ . On notera au passage que la taille d'un détecteur doit évoluer avec l'énergie étudiée, pour deux raisons essentielles. La première vient du flux fortement décroissant avec l'énergie, approximativement  $I(> E) \propto E^{-2}$ . La deuxième raison vient du fait que la taille de la gerbe au sol croît avec l'énergie de la particule primaire. Les scintillateurs doivent donc être suffisamment espacés pour pouvoir échantillonner de manière satisfaisante le profil latéral des secondaires. La partie du spectre que KASCADE-Grande étudie est à l'heure actuelle mal connue, parce que les expériences s'étaient jusqu'alors concentrées sur la région du genou ou sur les ultra-hautes énergies au-delà de la cheville. On attend le genou du groupe du fer autour de  $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ eV}$  (cf Fig. 2), et celui-ci devrait donc être détecté par KASCADE-Grande. Cela permettra de confirmer ou d'infirmer les résultats de KASCADE. On remarquera que la "fracture du tibia" apparaît dans la Fig. 1 autour de  $\sim 3 - 10 \cdot 10^{17} \text{ eV}$ ; elle n'est donc pas compatible avec le genou du fer si ce dernier est situé un ordre de grandeur en deçà. L'étude de cette rupture de pente et une détermination précise du spectre du rayonnement cosmique dans cette région seront deux résultats importants de KASCADE-Grande. Si la cassure du genou représente l'énergie maximale d'accélération dans les restes de supernovae, une autre composante doit prendre le pas à plus haute énergie. Savoir à quelle énergie cette transition a lieu, et connaître la composition chimique de cette nouvelle composante, apporteront des indices très précieux sur la nature de la source.

Autour du genou, les cartes angulaires de directions d'arrivée sont isotropes. On peut le comprendre aisément car le rayon de Larmor d'une particule d'énergie  $E = E_{15} \times 10^{15} \text{ eV}$  dans le champ magnétique Galactique  $B \sim \mathcal{O}(\mu\text{G})$  est  $r_L \sim E_{15}/Z \text{ pc}$ . Ces rayons cosmiques diffusent donc dans le milieu interstellaire et les directions d'arrivée apparaissent isotropes.

#### 4. Autour de la cheville

A plus haute énergie, vers  $10^{18} \text{ eV}$ , on s'attend en revanche à observer des anisotropies dans les cartes de directions d'arrivée car le rayon de Larmor des protons devient comparable à la hauteur du disque Galactique. L'expérience AGASA (*Akeno Giant Air Shower Array*)<sup>5</sup> a bien rapporté l'existence de telles anisotropies en notant un excès en provenance du centre Galactique et un manque en provenance de l'anti-centre. Cette

---

<sup>5</sup>AGASA : <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>

expérience couvre une surface de  $100 \text{ km}^2$  avec 111 détecteurs au sol composés de scintillateurs et 27 détecteurs souterrains de muons. L'expérience Fly's Eye<sup>6</sup>, qui fonctionne sur le principe d'imagerie du développement longitudinal par lumière de fluorescence, a également rapporté l'existence d'anisotropies entre  $2 \cdot 10^{17} \text{ eV}$  et  $3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$  avec un excès dans le plan Galactique.

A plus haute énergie,  $E \gtrsim 10^{19} \text{ eV}$ , l'expérience AGASA obtient une carte de directions d'arrivée isotrope. Le nombre de gerbes enregistré devient modeste ( $\sim 600$ ) et le niveau de bruit n'est pas négligeable. A plus haute énergie toujours,  $E \geq 4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ , cette même expérience a observé parmi 47 gerbes la présence d'un triplet et de trois doublets d'événements, c'est-à-dire des particules primaires provenant de directions semblables à la résolution angulaire ( $\sim 2.5^\circ$ ) près. La probabilité de coïncidence aléatoire de ces gerbes est faible,  $\lesssim 1\%$ . Ces amas d'événements sont des indices potentiels très précieux sur la nature de la source des rayons cosmiques d'énergies extrêmes. Une analyse conjointe des cartes d'arrivées des différentes expériences (Uchihori *et al.* 2000) a mis en évidence la présence de 2 triplets et 6 doublets parmi 92 événements d'énergie  $E \geq 4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ . Cela réhausse très sensiblement le niveau de confiance dans la détection d'une anisotropie à petite échelle angulaire. La mise en œuvre d'expériences à haute résolution angulaire et grande statistique d'événements, notamment l'Observatoire Pierre Auger<sup>7</sup>, apportera des informations extrêmement précieuses dans ce domaine. Ces amas d'événements sont-ils bien réels? Correspondent-ils à un ensemble de particules issues d'une même source située dans la direction d'arrivée de l'amas? Quels rôles jouent les champs magnétiques cosmiques dans ces amas? La réponse à ces questions devrait permettre de faire un grand pas vers l'élucidation de la nature de la source des rayons cosmiques aux énergies extrêmes.

Pour ce qui concerne le spectre en énergie, la situation est particulièrement confuse. L'énergie la plus élevée jamais observée est  $\simeq 3.2 \pm 0.9 \cdot 10^{20} \text{ eV}$  par l'expérience Fly's Eye (Bird *et al.* 1995). L'expérience AGASA a enregistré des événements avec des énergies allant jusqu'à  $\simeq 2 \cdot 10^{20} \text{ eV}$ . A ces énergies les événements se comptent sur le bout des doigts : le flux est tombé à une particule par  $\text{km}^2$  et par siècle ! L'expérience HiRes n'a observé qu'un seul événement au-delà de  $10^{20} \text{ eV}$ , et le spectre mesuré, représenté dans la Fig. 3, est en flagrant désaccord avec celui obtenu par l'expérience AGASA. Toutefois, pour mieux apprécier cette différence, il faut noter qu'une incertitude dans la mesure de l'énergie se traduit dans

---

<sup>6</sup>HiRes Fly's Eye : <http://hires.physics.utah.edu/>

<sup>7</sup><http://auger.cnrs.fr>

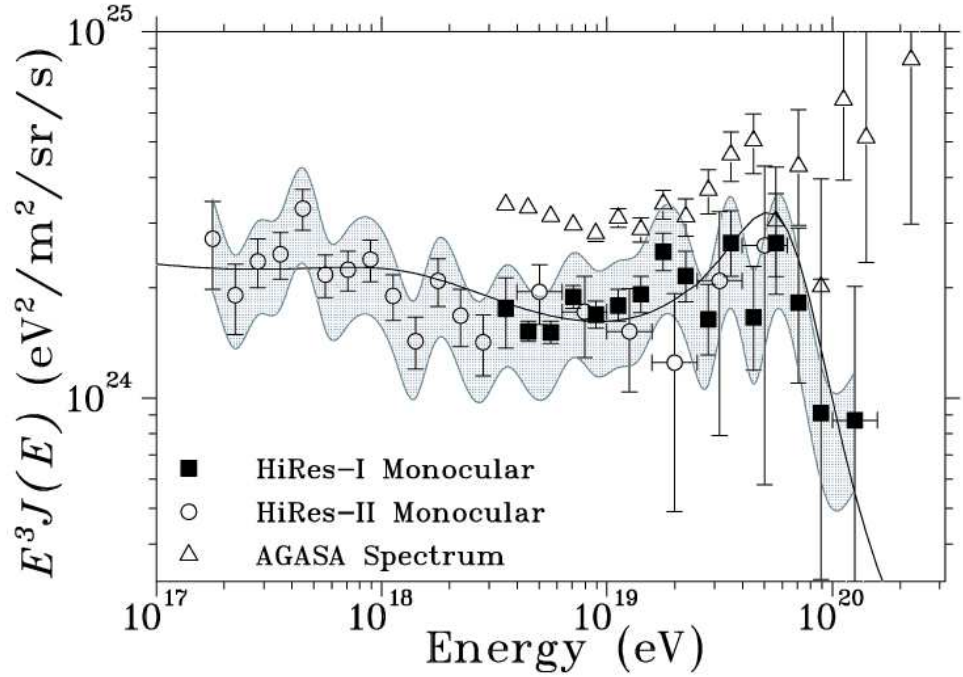


Figure 3.: Flux différentiel  $dI/dE$  multiplié par  $E^3$  en fonction de  $E$  mesuré par l'expérience HiRes. Les carrés pleins et les cercles indiquent les données recueillies par les deux télescope à fluorescence HiRes-I et HiRes-II; les triangles correspondent aux mesures de l'expérience AGASA. (Figure issue de Abu-Zayyad et al. 2002).

cette figure par un déplacement en diagonale, car l'ordonnée représente  $E^3 dI/dE$ . Il est ainsi possible de réconcilier les deux spectres si l'échelle d'énergie de l'une des deux expériences est décalée vers l'autre de  $\sim 30\%$ . Ce nombre est-il raisonnable? Quel est le flux à ultra-haute énergie? Il est impossible de répondre à l'heure actuelle.

Il est à noter que les deux expériences HiRes et AGASA fonctionnent avec des principes différents : AGASA collecte le développement latéral de la gerbe, tandis que HiRes enregistre le profil longitudinal. L'ironie veut que la méthode "traditionnelle" d'AGASA, qui comptabilise toutes les particules secondaires pour reconstituer l'énergie du primaire, donne un résultat qui n'était pas prévu par les modèles théoriques, tandis que la méthode "nouvelle" de HiRes donne une coupure du spectre là où elle était attendue. Ce point sera expliqué dans la partie sur les modèles de sources du rayonnement cosmique de ultra-haute énergie. Bien évidemment, comprendre cette différence Hires vs AGASA et me-

sur le spectre avec précision sont deux objectifs de toute première importance. L'Observatoire Pierre Auger fonctionnera avec un principe de détection hybride, conjugant mesure au sol du profil latéral avec observation du profil longitudinal par lumière de fluorescence. Il permettra donc de résoudre cette différence et de comprendre le spectre à ultra-haute énergie.

Enfin, la composition chimique n'est pas connue aux énergies extrêmes. L'expérience Fly's Eye semble détecter une transition d'une domination des éléments lourds à  $E \sim 10^{18}$  eV vers des éléments progressivement plus légers à plus haute énergie. Toutefois ce résultat n'est pas confirmé par les résultats de l'expérience AGASA. Par ailleurs l'incertitude théorique sur la position du point de développement maximal des gerbes  $X_{\max}$  en fonction de la masse de la particule primaire est comparable au signal recherché. Il n'est donc pas possible de conclure avec certitude sur cette transition ou sur la composition chimique.

## 5. Conclusions

En physique du rayonnement cosmique de haute énergie, les découvertes expérimentales donnent le pas. On dispose de nombreux modèles théoriques pour tenter d'expliquer la structure du genou, l'apparition de la cheville, la forme du spectre aux énergies extrêmes, la composition chimique ou les cartes angulaires de direction d'arrivée. Mais il est difficile de trouver un modèle préféré de la nature et de l'origine de ce rayonnement cosmique de haute énergie. Aussi on attend beaucoup des résultats expérimentaux à venir. Les expériences récentes ont permis de soulever un coin du voile et ont apporté de nouvelles questions auxquelles on doit répondre. Aujourd'hui on pense entrevoir la structure du genou : celui-ci serait la superposition de multiples genoux associés à des espèces chimiques différentes. Ces ruptures de pente seraient d'origine astrophysique, mais s'agit-il de la limite d'accélération des restes de supernovae, ou d'une modification du mode de transport des rayons cosmiques dans la Galaxie ? L'étude du spectre à plus haute énergie, c'est-à-dire au genou du fer et au-delà, qui est actuellement en cours, devrait permettre d'éclaircir ce mystère. Aux énergies extrêmes, le suspense reste entier. Ou le spectre se termine-t-il ? Est-ce toujours une loi de puissance, y a-t-il une coupure à  $5 \cdot 10^{19}$  eV ? Quelle est la nature des particules primaires ? Les directions d'arrivée sont-elles isotropes ? Voit-on vraiment des amas d'événements, et à quoi correspondent-ils ? Là encore, on peut espérer que les grands détecteurs futurs, en particulier l'Observatoire Pierre Auger, permettront d'élucider ces énigmes.

## Références

- [1] Abu-Zayyad, T. *et al.* (HiRes Fly's Eye collaboration), 2002, [arXiv :astro-ph/0208243](#).
- [2] Billoir, P., *Phenomenology of ultra-high energy atmospheric showers*, in “Physics and astrophysics of ultra-high energy cosmic rays”, eds. M. Lemoine & G. Sigl, Lecture Notes in Physics 576 (Springer-Verlag : Berlin), p.27.
- [3] Bird, D. J. *et al.* (Fly's Eye collaboration), 1995, ApJ 441, 144.
- [4] Hörandel, J. R. *et al.* (KASCADE collaboration), 2003, [arXiv :astro-ph/0311478](#).
- [5] Nagano, M., Watson, A. A., 2000, Rev. Mod. Phys. 72, 689.
- [6] Swordy, S. P. *et al.*, 2002, Astropart. Phys. 18, 129.
- [7] Uchihori, Y. *et al.*, 2000, Astropart. Phys. 13, 151.
- [8] Yoshida, S., *The air fluorescence method for measuring extremely high energy cosmic rays*, in “Physics and astrophysics of ultra-high energy cosmic rays”, eds. M. Lemoine & G. Sigl, Lecture Notes in Physics 576 (Springer-Verlag : Berlin), p.45.



*Route menant au château de Goutelas*



*La belle campagne du Forez*