Rayons cosmiques ultra-énergétiques :
propagation, spectre d'énergie et composition

Decerprit Guillaume[1], Denis Allard[1], Nicolas Busca[1], Angela Olinto[1,2] & Etienne Parizot[1]

1. Laboratoire APC – Univ. Paris 7/CNRS 2. University of Chicago, USA

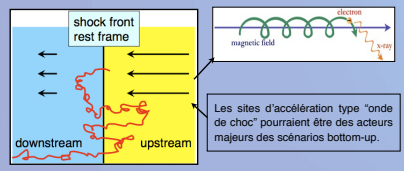
1 Les rayons cosmiques : *Introduction & problématique*

Notre spectre de connaissances

Les rayons cosmiques sont des particules énergétiques (noyaux, électrons, photons...) emplissant la Galaxie et l'univers, avec un spectre étonnamment régulier sur au moins 12 ordres de grandeur en énergie. Isotropisés par les inhomogénéités magnétiques ambiantes, ils pénètrent dans l'atmosphère terrestre dans toutes les directions, et ce n'est que très récemment que la collaboration Auger a pu enfin détecter une anisotropie significative à très haute énergie (E > 60 EeV) [*Science*, 318, 939 (2007)].

Les données spectrales s'accumulent peu à peu, et la suppression du flux aux très hautes énergies (au-delà de ~50 EeV) confirme l'existence d'une coupure d'origine physique dans le spectre, dite coupure GZK (Greisen-Zatsepin-Kusmin), liée à la propagation des rayons cosmiques.

L'abondance des photons aux énergies extrêmes a été contrainte par Auger [Astropart. Phys. 29, 243 (2008)] à des niveaux suffisamment faibles pour exclure un grand nombre de modèles exotiques ("top-down") avancés pour expliquer l'origine des rayons cosmiques ultra-énergétiques (RCUEs). Les scénarios astrophysiques dits "bottom-up", dans lesquels les particules acquièrent leur énergie par des processus d'accélération électromagnétiques fonctionnant sur de nombreux ordres de grandeur se trouvent donc largement privilégiés.



Les sites d'accélération type "onde de choc" pourraient être des acteurs majeurs des scénarios bottom-up.

*Par-delà le mystère de leur origine, une **question majeure** porte sur la composition des RCUEs : contiennent-ils uniquement des protons ou sont-ils de composition mixte, incluant des noyaux lourds ?*

Le spectre de masse des rayons cosmiques

Les données disponibles à haute énergie semblent indiquer une transition entre une composition riche en noyaux lourds et une autre, plutôt riche en protons. Ce basculement, situé selon les interprétations entre quelques 10^{17} eV et quelques 10^{18} eV, est usuellement attribué au passage d'une **composante Galactique lourde** à une **composante extragalactique légère**. Les récentes données d'Auger (ICRC 2007) sur la profondeur de développement des gerbes dans l'atmosphère (X_{max}) suggèrent la présence de noyaux lourds à très haute énergie, mais les modèles hadroniques demeurent incertains à ces énergies.

L'interaction des RCUEs avec le milieu ambiant

Les protons et noyaux qui se propagent dans l'Univers subissent des interactions avec les différents fonds diffus de photons : CMB (le plus dense), Infrarouge, Optique et Ultraviolet (IR/Opt/UV). Ceux-ci sont désormais relativement bien connus, de même que leur évolution cosmologique. Ces interactions produisent des particules secondaires et font perdre de l'énergie aux RCUEs "primaires". L'expansion de l'univers est une source additionnelle de perte d'énergie. **L'univers n'est pas donc pas transparent aux RCUEs**, et leur distance de propagation se trouve brusquement réduite à très haute énergie (seuil de photo-production de pion ou de photo-désintégration). Il en résulte une diminution brutale de leur flux : **c'est la coupure GZK** !

Pour les protons, les interactions avec le CMB dominent. Pour les noyaux, les autres fonds diffus jouent un rôle important. Dans tous les cas, le processus dominant dépend de l'énergie du photon dans le référentiel du rayon cosmique considéré. Le paramètre clef est donc son **facteur de Lorentz**, Γ.

2 La propagation des rayons cosmiques : *Méthodes et modèles*

Principales interactions subies par les noyaux

L'interaction des protons avec le CMB conduit à la création de paires e^+e^- et à la production pions, de sections efficaces sont bien connues. Pour les noyaux, les processus d'interaction sont les suivants :

- la résonance dipolaire géante (**GDR**), qui conduit à l'éjection de nucléons ou d'une particule α, intervient à partir de 10-20 MeV ;
- le processus quasi-deuteron (**QD**) intervient vers 30 MeV ;
- la photo-production de pion (Baryonic Resonance, **BR**), qui provoque l'éjection de plusieurs nucléons, apparaît vers 150 MeV et au-delà.

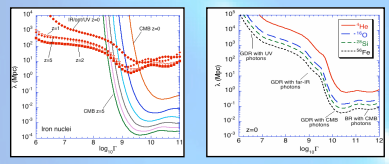


Figure 1. Libre parcours moyen des RCUEs pour l'interaction avec les fonds photoniques, en fonction de leur facteur de Lorentz (gauche : différents redshift ; droite : différents noyaux)

Evolution des noyaux au cours de leur voyage

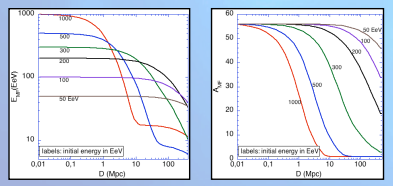


Figure 2. Évolution de l'énergie (à gauche) et de la masse (à droite) du noyau principal en fonction de la distance parcourue

Contrairement au cas des protons, pour les noyaux les courbes se croisent !
Lors des processus de photo-dissociation, l'énergie du noyau décroît parce qu'il perd des nucléons, mais le facteur de Lorentz reste constant. À une énergie donnée, un fragment issu d'un noyau de plus haute énergie aura un facteur de Lorentz plus élevé, interagira plus fortement et perdra de l'énergie plus vite...

3 Le spectre, de la source à la Terre : *Scénarios et contraintes apportées par Auger*

Les spectres propagés

Des simulations Monte-Carlo [Allard et al., 2005–2008] nous permettent de calculer des spectres propagés, i.e. observables sur Terre après propagation des RCUEs depuis leurs sources. Les résultats présentés ici correspondent à des sources distribuées uniformément, injectant dans le milieu intergalactique un spectre en loi de puissance, $E_{source} \propto E^{-\beta}$, coupé à $E_{max} \propto Z$ (charge du noyau).

Sur la Figure 3, on ajuste sur le spectre Auger observé les prédictions d'un modèle dans lequel le spectre source est dominé par les protons, mais contient aussi des noyaux avec la même composition que les rayons cosmiques Galactiques de basse énergie. (NB : au dessous de quelques 10^{18} eV, la composante Galactique doit dominer et compléter le flux mesuré.)

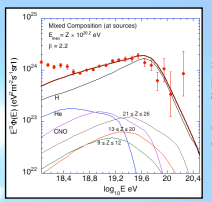


Figure 3. Données d'Auger et spectre propagé modélisé à partir d'une composition mixte à la source et d'un spectre en $E^{-2.2}$, avec une énergie maximale de $Z\times10^{20.2}$ eV. Les différentes composantes de masses sont représentées individuellement.

Un accord tout aussi acceptable avec les données d'Auger peut être obtenu à partir de compositions très variées, y compris purs-protons, purs-CNO ou purs-Fe. La Figure 4 en montre un exemple. On observe alors une coupure non GZK-standard et surtout, que la composition reste lourde à l'arrivée sur Terre !

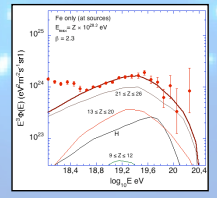


Figure 4. Données d'Auger et spectre propagé modélisé à partir de sources de noyaux Fe uniquement et de spectre en $E^{-2.3}$, avec une énergie maximale à la source de $56\times10^{20.3}$ eV. La contribution des différentes composantes de noyaux primaires et secondaires (après propagation) est indiquée.

4 Résultats, conclusions, discussions : *Du réalisme à la réalité ?*

À noter

La dynamique de la propagation des noyaux ultra-énergétiques fait que les protons et les noyaux de Fe survivent plus longtemps que les noyaux intermédiaires dans le bain de photons du CMB. Après propagation sur des distances de l'ordre de quelques Mpc ou dizaines de Mpc, les noyaux de Fe initialement injectés à très haute énergie conduisent à des protons secondaires ou des noyaux de masse élevée (entre 50 et 56 pour la plupart). Les noyaux fils de masse entre 2 et 40 sont négligeables.

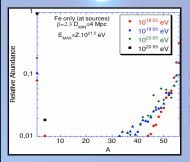


Figure 5. Répartition des noyaux secondaires issus de la propagation de noyaux de Fe injectés par des sources distribuées uniformément dans l'univers, avec les paramètres indiqués.

Un résultat important ! **(voir [1]* pour plus de détails)**

À partir de rayons cosmiques présentant à leur source une composition mixte (proton + noyaux) enrichie en éléments lourds et un spectre en loi de puissance d'indice β~2, avec une énergie limitée à basse énergie (avant la coupure GZK habituelle des protons, e.g. $E_{max} \sim Z\times10^{19.6}$ eV), on peut **reproduire le spectre mesuré par Auger** (ou HiRes), avec une composition propagée montrant un fort **alourdissement au-delà de 4×10^{19} eV**, en accord avec les indications d'Auger.

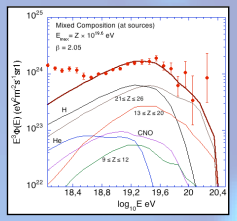


Figure 6. Données d'Auger et spectre propagé modélisé à partir de sources de composition mixte et de spectre en E^{-2}, avec une coupure en énergie à la source égale à $Z\times10^{19.6}$ eV. La contribution des différentes composantes primaires et secondaires est indiquée.

NB: Ce type de modèles **prédit un flux de neutrinos cosmogéniques extrêmement faible** à très haute énergie, et **une coupure radicale dans le spectre** des UHECRs à environ 2×10^{20} eV.

(Voir Allard et al., 2008, astro-ph/0805.4779 pour plus de détails.)

Conclusions

L'étude détaillée de la propagation des protons et des noyaux ultra-énergétiques (RCUEs) dans le milieu intergalactique montre que :

1) les données d'Auger relatives au spectre d'énergie (de 3 à 100 EeV) n'ont pas la statistique suffisante pour contraindre la composition des RCUEs à leur source ;

2) les RCUEs observés sur Terre après propagation devraient être essentiellement composés de protons et de Fe (ou sub-Fe) ;

3) les protons dominent toujours le spectre propagé lorsque leur énergie maximale à la source excède quelques 10^{20} eV ;

4) une transition vers des noyaux plus lourds (type Fe) doit être attendue vers quelques 10^{19} eV si l'énergie maximale des protons à la source est aussi de cet ordre.

La mesure du spectre avec une statistique accrue et l'étude de la composition s'avèrent cruciale pour comprendre la phénoménologie du rayonnement cosmique à très haute énergie et la transition Galactique/Extragalactique.

De quoi parle-t-on ici ?

✱ L'atténuation du flux des rayons cosmiques au-delà de ~5.10^{19} eV suggère l'existence de la fameuse "coupure GZK" : l'interaction des photons du CMB avec les particules cosmiques (protons ou noyaux) empêche ces dernières de conserver des énergies supérieures à ~10^{20} eV sur des centaines de Mpc. Nous avons ré-examiné en détail les différents processus de photo-dissociation qui influencent le spectre en énergie et la composition des rayons cosmiques. Nous avons notamment étudié en détail la phénoménologie des protons secondaires issus de la photo-dissociation de noyaux lourds.

✱ Le spectre des rayons cosmiques ultra-énergétiques (RCUEs) ne donne pas d'indications univoques sur leur composition à la source. Observés sur Terre après propagation, les RCUEs devraient se composer principalement de protons et/ou de noyaux lourds (21 ≤ Z ≤ 26). Si les sources peuvent accélérer les protons au-delà de 10^{20} eV, le "spectre propagé" (observé sur Terre) sera largement dominé par les protons.

✱ Un résultat intéressant concerne les sources à composition mixtes (e.g. 30% de Fe), avec une énergie maximale autour de 40 EeV pour les protons. Le spectre propagé est alors largement dominé par les noyaux de Fe à très haute énergie (≥ 50 EeV).

✱ De nombreux scénarios de source sont donc possibles : la connaissance actuelle du spectre d'énergie des RCUEs est insuffisante pour lever l'équivoque. L'étude de la composition des RCUEs, de la forme de la coupure GZK ou encore du flux de neutrinos cosmogéniques apportera des contraintes capitales pour résoudre l'énigme de l'origine des UHECRs.

*This whole work is treated in details in the arXiv article [1] astro-ph:0805.4779v1, "***Implications of the cosmic ray spectrum for the mass composition at the highest energies***", D. Allard, N.G. Busca, G. Decerprit, A. V. Olinto, E. Parizot.