

L I M I T E D E L ' A T M O S P H È R E

RAPPORT DE PRE-THESE



BANAHA Mendi
DEA Champ Particules Matière
ANNEE 2004/2005

Laboratoire d'accueil : IPNHE Paris
Directeur de thèse : Pierre Billorey
Sujet : Caractérisation des rayons cosmiques de Ultra-haute Énergie avec le réseau au sol de l'observatoire Pierre Auger

1. Contexte général

Les rayons cosmiques :

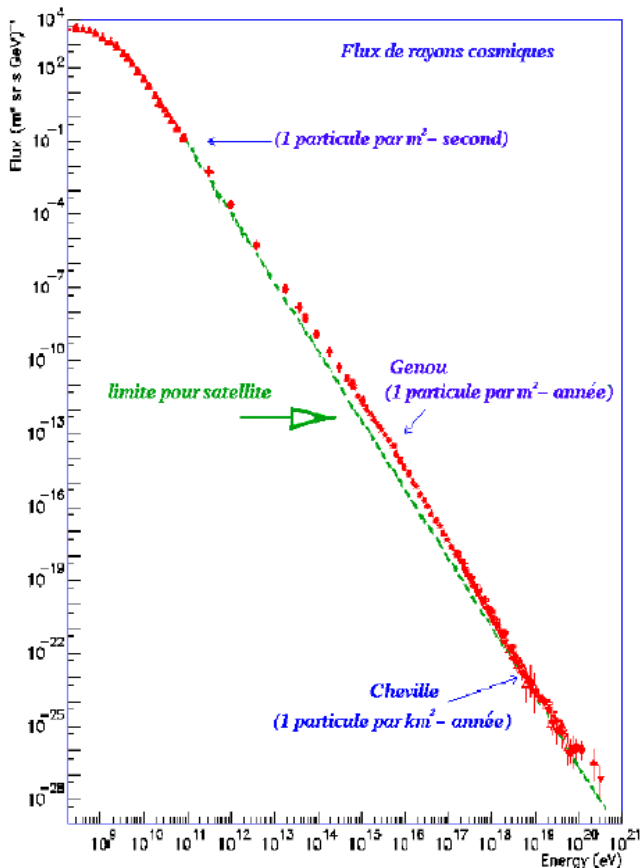


Figure 1 : spectre des RCUE ; on observe une 1^{ère} rupture (« genou ») $\sim 10^{15}$ eV et une 2nd (« cheville ») $\sim 10^{19}$ eV

protons), et que pour des énergies comprises entre 10^9 eV et 10^{15} eV les origines semblent être galactiques, en revanche entre 10^{15} eV et 10^{18} - 10^{19} eV la situation devient confuse, les sources étant reconnues de nature diverse. Surtout, au-delà de 10^{19} eV, l'origine et la nature des rayons cosmiques sont totalement inconnues. Le problème à ces énergies réside principalement dans la difficulté de détection : en raison de leur interaction avec l'atmosphère, les rayons cosmiques de haute énergie ne révèlent leur existence sur Terre que par des effets indirects, tels les phénomènes d'ionisation ou de création de gerbes de particules secondaires. Sachant de plus que le champ magnétique galactique, bien que très faible, modifie la trajectoire des particules chargées au moins jusqu'à 10^{18} eV, il devient alors très délicat de reconstituer précisément la direction d'origine de la particule, donc d'identifier les sources de ces rayons cosmiques et d'en tirer des conclusions quant à leur nature.

Les problèmes en suspens :

Les rayons cosmiques sont simplement des particules ordinaires (noyaux atomiques, photons, neutrinos) produites par des mécanismes astrophysiques plus ou moins violents, qui peuvent aller des réactions de fusion au cœur des étoiles aux phénomènes exceptionnels provoqués par des trous noirs se trouvant au centre de certaines galaxies (noyaux actifs) en passant par les supernovae (effondrement d'étoiles à bout de "carburant"), les collisions de galaxies, etc. Ces particules transportent avec elles des informations (leur énergie, direction, composition chimique etc...) qui permettent de remonter aux mécanismes qui est à leur origine et qui est le seul moyen dont nous disposons pour comprendre ces derniers.

Bien que mis en évidence dès le début du XXe siècle, les rayons cosmiques suscitent aujourd'hui encore de nombreuses questions quant à leur nature et origine, et les réponses à ces interrogations sont d'autant plus incertaines que les énergies sont élevées, les sources potentielles devenant alors de plus en plus rares. Si, pour des énergies aux environs de 10^9 eV, la source est clairement solaire (émettant des flux de

- *L'origine des Rayons Cosmiques de Ultra-Haute Energie (RCUE) :*

Au cours des décennies écoulées, une demi-douzaine de détecteurs ont observé une vingtaine de rayons cosmiques dont les énergies atteignent ou dépassent 10^{20} eV (électronvolts), c'est-à-dire plusieurs dizaines de joules ! Cette énergie (celle d'une balle de tennis servie par un champion ou un tir de penalty avec un ballon de football) est une énergie macroscopique, exceptionnelle pour une particule microscopique (rappelons que les énergies les plus élevées qu'on peut atteindre avec des accélérateurs sont un million de fois plus faibles). Selon nos connaissances présentes, aucun mécanisme astrophysique connu n'est capable d'accélérer des particules à de telles énergies.

Le problème des RCUE est avant tout un problème théorique: d'où peuvent venir ces particules de l'extrême ? Comment ont-elles été produites ou accélérées ? Quels sont les sites astrophysiques capables de leur donner naissance ? Par quels mécanismes ?

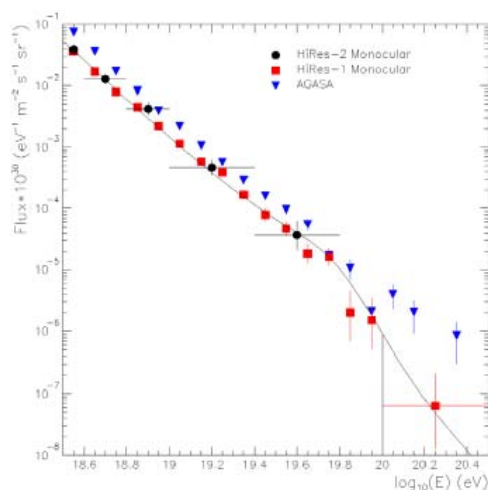
Les modèles proposés jusqu'à présent se répartissent en deux classes très distinctes :

- les modèles "top-down", selon lesquels les RCUE sont des produits de désintégration de particules supermassives pré-existantes (issues de l'univers primordial ou produites localement dans des événements à déterminer — par exemple l'interaction de défauts topologiques)
- les modèles "bottom-up", selon lesquels les RCUE sont des particules accélérées (ou directement issues de particules accélérées) dans des sites astrophysiques, à partir du milieu ambiant.

Dans les deux cas, des difficultés théoriques importantes subsistent, et un travail considérable reste à faire. Aucun modèle n'apparaît aujourd'hui pleinement satisfaisant, et les données observationnelles recueillies à ce jour ne sont pas suffisantes pour confirmer ou infirmer les différentes hypothèses.

- *La coupure GZK (Greisen-Zatsepin-Kutzmin)*

Pour une particule de cette énergie, l'univers est relativement opaque à cause du rayonnement fossile (à 2,7K) qui le baigne : la coupure GZK. Ceci est dû au fait que, au-dessus d'environ 5×10^{19} eV, la perte d'énergie par collisions entre les rayons cosmiques et les photons de ce rayonnement devient très importante. Une conséquence de cette opacité est que de telles particules ne peuvent parcourir que des distances relativement faibles (à l'échelle cosmologique s'entend), de l'ordre de quelques dizaines de mégaparsecs (1 parsec = 3 années-lumière) qui est typiquement la taille du super-amas local auquel appartient notre galaxie.



Le fait que le spectre d'énergie des RCUE ne manifeste pas la coupure GZK attendue pour des sources lointaines indique que : soit les sources sont proches, soit nos connaissances physiques liées à l'apparition de la coupure GZK ne s'appliquent pas à ce domaine d'énergie, et sont donc à revoir. La polémique autour de l'existence de la limite GZK a été relancée récemment par la publication des résultats contradictoires de deux expériences concurrentes étudiant les rayons cosmiques : l'une

Figure2 : spectre des RCUE établie par les expériences AGASA (en bleu) et Hires (en rouge). La divergence apparaît au niveau de la coupure GZK

japonaise AGASA (réseau de détecteur au sol) qui ne « voit » pas ladite coupure, l'autre américaine HIRES (télescopes à fluorescence) qui « voit » la coupure GZK (cf fig.2)

- *La nature des RCUE*

Si à basse énergie ($<10^{15}$ eV) les rayons cosmiques sont principalement constitués de protons et de noyaux légers, leur composition à partir de 10^{15} eV (niveau du « genou ») devient beaucoup plus spéculative : il est question qu'à ces énergies données, les noyaux plus lourds y prennent la place principale. Cette question est encore loin d'être tranchée.

On est donc devant un problème extrêmement rare en physique : une observation expérimentale irréfutable qui résiste à l'interprétation théorique pendant plus d'un tiers de siècle. On sait que les sources de ces rayons cosmiques existent, et qu'elles sont proches de nous, mais on n'a aucune idée de ce qu'elles peuvent être ni où elles se trouvent exactement. Il s'agit donc d'un problème tout à fait fondamental dans le domaine de l'astrophysique et de la cosmologie, d'autant plus qu'il s'agit probablement des phénomènes les plus violents existant dans l'univers. C'est à ce problème que le projet de détecteur "Observatoire Pierre Auger" se propose d'apporter des réponses.

L'observatoire Pierre Auger :

L'Observatoire Pierre Auger est un projet de détecteur de rayons cosmiques destiné à explorer un domaine de l'astrophysique dont la compréhension échappe à la communauté scientifique depuis trente-cinq ans. Sa réalisation mobilise une collaboration de près d'une vingtaine de pays et environ deux cents physiciens et ingénieurs ; c'est la première collaboration de dimension réellement mondiale dans ce domaine. Le projet porte le nom de Pierre Auger en hommage à ce physicien français mondialement connu pour ses activités dans les domaines de la physique nucléaire et celui des rayons cosmiques (et aussi pour son action déterminante dans le développement des grandes institutions internationales telles que le CERN ou l'UNESCO). Il a été le premier, en 1938, à prédire l'existence des grandes gerbes atmosphériques et à les rattacher à celle de rayons cosmiques de très hautes énergies.

L'Observatoire Pierre Auger est en gestation depuis la première réunion constitutive qui a eu lieu à Paris en 1992. Depuis 1993, plusieurs pays sont engagés dans des activités d'étude, de recherche et de développement. De Janvier à Juillet 1995, six mois de travail intensif avec réunions fréquentes au laboratoire Fermilab près de Chicago ont conduit à une définition précise des caractéristiques techniques du projet et à la rédaction d'un rapport de conception (Design Report) de près de 300 pages (ce rapport est régulièrement remis à jour). Durant toute cette période, la collaboration a évalué le coût global du projet à 98 millions de dollars dont environ 60% correspondent à l'achat de matériels, le reste couvrant les travaux de génie civil (dont une partie pourra être prise en charge par les états-hôtes), la main d'œuvre pour les développements, et un important coefficient de sécurité (de l'ordre de 17%). Le détecteur étant modulaire, cette somme est considérée comme un plafond qui ne sera pas dépassé. Le partage souhaité par la collaboration pour le financement du projet global (deux sites) est : 30% pour les USA, 30% pour les pays d'Amérique Latine (Argentine, Brésil et Mexique), 40% pour l'Europe, l'Asie et l'Australie.

Dès le début du projet, la collaboration a décidé d'associer un certain nombre de pays technologiquement avancés qui devront apporter la quasi-totalité du financement, et des pays

en développement ou avec une activité faible dans la recherche fondamentale (Arménie, Bolivie, Chine, Vietnam,...) dont il n'est pas attendu de participation financière mais une contribution technique ou de main-d'œuvre susceptible de faire baisser les coûts de développement et de production.

Il est à noter qu'afin de ne pas défavoriser les groupes qui ont peu de moyens, l'Observatoire Pierre Auger est une structure totalement décentralisée. Il n'y a pas, à l'image du CERN ou de Fermilab, de laboratoire central où on devra être présent pour participer pleinement à l'expérience. Chaque site sera relié au réseau Internet par des lignes à haut débit. Chaque groupe, quelles que soient sa taille et sa position géographique, pourra, à partir de son laboratoire et moyennant un modeste équipement informatique, piloter à distance le détecteur et avoir accès en temps réel à toutes les données physiques.

Le détecteur :

L'Observatoire Pierre Auger vise à explorer en détail le domaine d'énergies supérieures à 10^{19} eV où l'origine des rayons cosmiques devient énigmatique. A ces énergies, les particules agissant dans les hautes couches de l'atmosphère (plusieurs dizaines de km) créent des gerbes dont l'impact au niveau du sol comporte environ 100 milliards de particules (photons et électrons essentiellement) réparties sur une dizaine de km^2 . Au cours de ce processus, les particules secondaires chargées qui ont été créées tout au long du développement de la gerbe provoquent dans l'atmosphère un phénomène lumineux dû à l'excitation des atomes d'azote de l'atmosphère qui se désexcitent en émettant une lumière de fluorescence dans toutes les directions.

L'Observatoire Pierre Auger est un **détecteur hybride** (cf fig.3) qui utilise deux des propriétés de la gerbe pour en analyser les caractéristiques et remonter au rayon cosmique initial. Il comporte un **réseau géant de détecteurs** (opérationnel en permanence) qui ont pour but de compter les particules qui les frappent au niveau du sol et un **télescope à fluorescence** (opérationnel uniquement les nuits sans lune ~10% du temps) qui observe le profil longitudinal de la gerbe en captant la lumière de fluorescence émise par le passage des particules chargées dans l'atmosphère. Ces deux techniques sont redondantes et complémentaires à la fois (d'où l'appellation "hybride"). Elles permettent (par des méthodes d'analyse compliquées) de reconstruire la direction du rayon cosmique incident, de mesurer son énergie et, jusqu'à un certain point, d'identifier sa nature.

Les sites de l'expérience :

L'Observatoire Pierre Auger est supposé accumuler des données sur de nombreuses années mais sa taille doit être suffisante pour obtenir assez rapidement des éléments de réponses aux questions que soulèvent ces "super-rayons cosmiques". Elle a été fixée de manière à accumuler 300 événements au-dessus de 10^{20} eV et 30000 au-dessus de 10^{19} eV, en l'espace de cinq ans. Elle doit être de 6000 km^2 .

Le détecteur sera en fait construit sur deux sites distincts, chacun de 3000 km^2 (typiquement la taille d'un département français). Chaque réseau sera accompagné de quatre télescopes à fluorescence conçus suivant la technique du « Fly's Eye » (Oeil de Mouche), spécialité d'un groupe de l'Université de Salt Lake City (Etats-Unis).

En l'absence totale de toute information sur la nature et la localisation des sources de ces super-rayons cosmiques, il est important de s'assurer que l'Observatoire Pierre Auger sera susceptible d'observer le ciel dans son intégralité. Or, un seul détecteur, où qu'il soit placé, ne peut avoir qu'une vision partielle de l'univers. En particulier, du fait de la position du système solaire dans la Voie Lactée et de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan galactique, un détecteur placé dans l'hémisphère Sud verra de manière privilégiée les directions orientées vers le centre de la galaxie, alors qu'un détecteur placé dans l'hémisphère Nord verra essentiellement les directions extra-galactiques. C'est la raison pour laquelle la collaboration a choisi de construire deux réseaux de 3000 km² respectivement dans les hémisphères Nord et Sud. Avec un seul site, l'Observatoire Pierre Auger serait un détecteur "borgne".

Les deux sites retenus (présentant un nombre de conditions optimales pour l'expérience) pour accueillir le projet sont : - la province de Mendoza en Argentine pour l'hémisphère sud
- le Comté de Millard, état de l'Utah aux Etats-Unis pour l'hémisphère Nord.

La construction du site Sud (pour les deux sites, voir ci-dessous) du détecteur a démarré dès la seconde moitié de 1999 et devrait durer quatre à cinq ans : actuellement 600 cuves Cherenkov sont installées sur les 1600 prévues au total ainsi que deux des quatre télescopes à fluorescence (cf fig.3). La construction du site Nord pourrait commencer en 2006/2007.

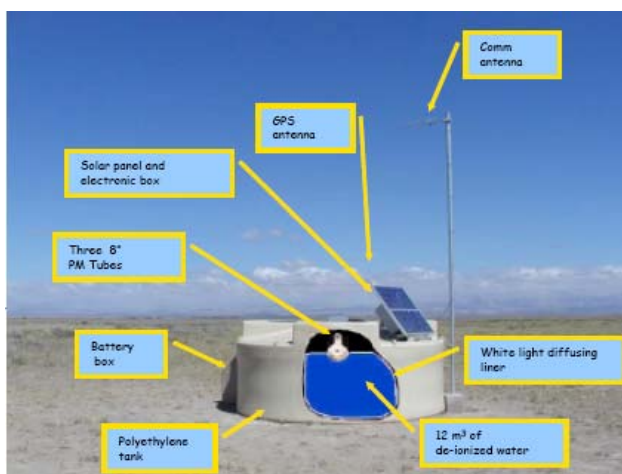
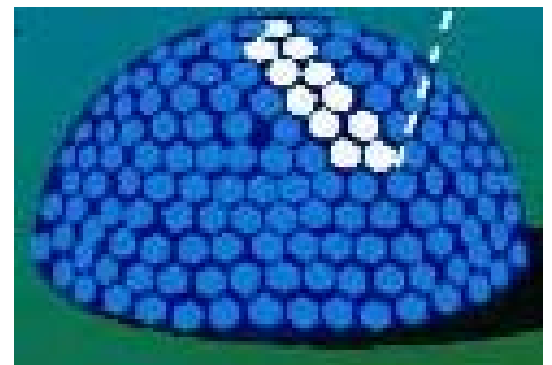
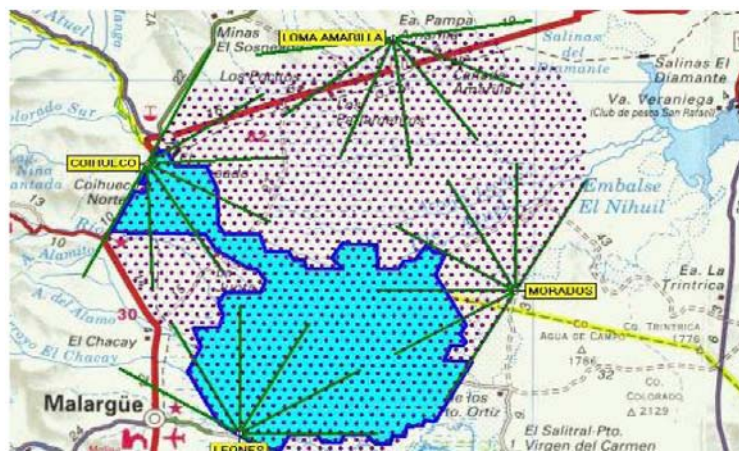


Figure 3 : disposition du site sud. 1600 cuves Cherenkov à eau (points sur la carte) espacées de 1,5 km et 4 télescopes à fluorescence « fly eye's » (disposés aux localités jaunes sur la carte). La surface bleue représente la surface déjà balisée (nov 2004) . Les télescopes de Los Leones et de Cuihuéco sont déjà opérationnel.

2. Motivation personnelle

J'ai débuté mon cursus d'études supérieures par une DEUG Sciences de la Matière (SM) à l'université de Marne-La-Vallée. Mes centres d'intérêts en physique se situaient alors vers la physique nucléaire, la physique des particules et l'astrophysique. Je me suis ensuite engagé dans la seule formation de second cycle disponible dans cette université : Licence et maîtrise « Physique et Applications ». Ce second cycle, bien que portant la mention « applications » est très proche d'un second cycle de « *Physique générale* ». A travers cet enseignement, j'ai pu acquérir des bases solides en « *physique fondamentale* » (Physique Quantique, Physique Statistique, Ondes ...) ainsi qu'une large culture dans le domaine de la matière condensée (Hydrodynamique, Physique du solide, Rhéologie, etc...). Cependant les aspects de la physique m'ayant fait opter pour un cursus de physicien n'étant que trop peu abordés (à mon goût) au cours de ce second cycle, j'ais donc décidé de rejoindre une formation répondant à mes attentes pour le 3^{ème} cycle : c'est ainsi que j'ais été admis au DEA C.P.M.

Grâce à cette année de 3^{ème} cycle, il m'a été permis de voir les différents aspects (expérimental, simulation et théorie) de plusieurs domaines de la physique: physique des particules , nucléaire, astrophysique et physique de la matière condensée. L'astrophysique des hautes énergies, domaine qui m'était alors inconnu, a vraiment attiré mon intérêt quant au caractère très fondamental des problèmes auxquels elle est confrontée et les réponses qu'elle tente d'y apporter. J'ai donc opté pour ce profil qui se situe à un croisement entre astrophysique, cosmologie et physique des particules. Dans le souci de compléter mon profil et par intérêt pour cette physique un peu particulière, j'ai choisi l'option « neutrinos » afin de m'initier aux développements récents de la physique du neutrino notamment dans le contexte astrophysique où cet aspect y semble complémentaire et ouvrir de grandes perspectives pour l'avenir.

L'ensemble des ces considérations m'ont donc naturellement conduit à m'intéresser aux propositions de thèses concernant l'astrophysique de hautes énergies, c'est dans ce contexte que le sujet proposé par le groupe AUGER du LPNHE m'a semblé le plus répondre à ma curiosité. La perspective de pouvoir apporter quelques éléments de réponse à des questions telles que la nature des primaires constituant les RCUE dans l'objectif de pouvoir infirmer ou confirmer certains des scénarios « Top-down », me paraît très intéressante et me motive particulièrement. D'autre part, le fait que l'observatoire Auger commence à disposer de données à analyser et dont le volume va fortement augmenter dans les prochaines années, du fait du développement constant du réseau de détecteurs au sol, me semble être un atout important. D'une manière plus générale, le fait de participer à une grande collaboration internationale me paraît être une expérience particulièrement formatrice et enrichissante à plusieurs égards ne serait-ce que du point de vue de l'échange avec d'autres physiciens étrangers. Enfin, la certitude que l'expérience Auger, même si elle ne tranche pas clairement et sans équivoque la question de l'origine des rayons cosmiques, permettra au moins, au vu de la statistique accumulée dans ce domaine d'énergie(>10¹⁹ eV) encore mal connue, d'affiner notre compréhension du phénomène et d'éliminer certains scénarios « bottom-up » et/ou « top-down » les moins probables parmi le foisonnement qu'il existe à l'heure actuelle.

3. Présentation de l'équipe

La contribution française à l'expérience AUGER concerne plusieurs groupes de divers laboratoires :

- Le Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies de Paris (LPNHEP)
- Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)
- L'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO)
- Le Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie (PCC)
- L'institut d'Astrophysique de Paris (IAP)
- L'équipe Temps-Fréquence de L'observatoire de Besançon.
- L'Auger European Computer Center de Lyon

Le groupe du LPNHE est composé de :

- **5 physiciens** : - Murat Boratav : Maître de conférence à l'université Paris 6, chef du projet AUGER au LPNHEP et en France
 - Antoine Letessier-Selvon qui était l'ancien chef du projet au LPNHE et qui a été remplacé par Murat Boratav puisqu'il est parti pour une période de deux ans au Brésil, où il a rejoint une autre équipe de la collaboration. Il est rattaché au CNRS
 - Pierre Billoir : Professeur à l'université Paris 6 dont le travail porte sur la reconstruction des grandes gerbes et l'identification du primaire à partir de l'analyse de données
 - Sylvie Dagoret-Campagne : Rattachée au CNRS; dont l'activité principale est le développement de la simulation du détecteur de surface dans le cadre du framework de traitement offline des données de l'observatoire Pierre Auger. Elle travaille également sur le programme du trigger central.
 - Jean Christophe Hamilton : Responsable du groupe AARGH(Anisotropy Angular Reconstruction Golden Hybrid). Il travaille donc sur les anisotropies dans le rayonnement cosmique, la reconstruction de la direction de la particule primaire et sur l'acceptance du détecteur. Il fait lui aussi parti du CNRS.
- **Un ingénieur CNRS** : Richard Randriatoamanana, en charge de la maintenance du système d'acquisition de l'observatoire Pierre AUGER
- **2 étudiants en thèse** : - Cécile Rousselle (directeur de thèse : Pierre Billoir) qui travaille sur la recherche de particule primaires exotiques comme le

photon. Le sujet de thèse proposé s'inscrirait dans la continuité de son travail.

- Benjamin Rouillé d'Orfeuill : (directeur de thèse : Jean-christophe Hamilton) dont la thèse porte sur la recherche de sources et d'anisotropies dans le rayonnement cosmique d'ultra-haute énergie.
- **2 post-doctorants** : - A.Zech
- O.Blanch

4. Présentation du sujet de thèse

SUJET DE THESE

Le sujet générale de la thèse s'intitule : « **Caractérisation de rayons cosmiques d'Ultra-Haute Energie avec le réseau au sol de l'observatoire Pierre Auger** », avec une orientation très probable vers la recherche d'une **composante photonique** dans le flux de ces cosmiques aux ultra-hautes énergies. En effet, Les particules primaires constituant les RCUE peuvent être de différentes natures :

- des noyaux (du proton au fer essentiellement). C'est ce qui est attendu dans les modèles "bottom-up" (accélération de particules chargées dans des sites astrophysiques ou se produisent des phénomènes plus ou moins violents).
- des photons ou des neutrinos, qui peuvent être des produits de désintégration obtenus a partir d'objets ultra-lourds (reliques du Big-Bang par exemple) dans des modèles "top-down". Il est également attendu des photons et des neutrinos provenant de l'interaction "GZK" des protons avec le CMB (fond cosmique a 3K), mais dans de moindres proportions. Une abondance de photons et/ou neutrinos a très haute énergie ($> 10^{19}$ eV) serait un signe fort en faveur des modèles "top-down"

Cependant les photons ne peuvent pas voyager très loin (conversion en paires par interaction avec le CMB = coupure GZK) ; les neutrinos n'ont en principe pas d'obstacle, mais leur probabilité de détection est faible. Pour l'instant, "candidats" photon ou neutrinos n'a été observé dans les RCUE et Auger est le seul détecteur capable d'en voir dans cette gamme d'énergie. Il est important de noter que l'observation des noyaux autres que le proton, ces derniers viennent forcément d'un processus d'accélération (ils ne peuvent apparaître dans la fragmentation de quarks venant de la désintégration d'objets ultra-lourds). La distinction entre les différents primaires se fait a travers le développement de la cascade dans l'atmosphère : plus le noyau est lourd, plus les premières étapes hadroniques sont rapides, et plus la cascade se développe vite ; pour un photon primaire, le développement est purement électromagnétiques (photon->paires et bremsstrahlung de e+e-) et moins rapide que pour un noyau ; pour un neutrino, la première interaction se fait proportionnellement a la densité, donc souvent a basse altitude, donc le développement est encore plus retardé.

Par ailleurs, la teneur en muons (qui viennent de la désintégration des mésons chargés dans la haute atmosphère) est aussi liée au caractère plus ou moins "hadroniques" de la cascade. Elle est plus grande pour les noyaux lourds, un peu moins pour les protons, beaucoup moins pour les photons. Le FD (détecteur de fluorescence) voit directement le profil longitudinal (en particulier la position X_{\max} du maximum) et est pratiquement insensible aux muons, qui ne représentent qu'une faible proportion des particules chargées de la cascade. Le but de la thèse est d'évaluer le stade d'avancement de la gerbe à partir des observations du SD (détecteur de surface) pour profiter d'une plus grande statistique (environ 10 fois plus d'évènements). Les variables discriminantes envisagées sont la courbure du front de gerbe, sa structure (épaisseur) qui détermine la structure en temps des signaux dans les cuves Cherenkov, caractérisées par exemple par le temps de montée et le temps de descente, la distribution latérale (décroissance plus ou moins rapide avec la distance au cœur de la gerbe). La teneur en muons serait aussi une bonne variable discriminante, mais le degré de précision avec lequel elle pourrait être évaluée est encore incertain (c'est une direction de recherche possible pour la thèse). L'idée générale est de combiner ces différentes variables pour en déduire une évaluation indirecte du stade d'avancement des gerbes au niveau du sol afin d'obtenir une évaluation statistique de la composition du flux incident (sachant que la discrimination entre différents noyaux ne sera pas possible pour une gerbe individuelle).

Des études sur simulations ont été faites, montrant la faisabilité théorique de cette démarche. Par ailleurs le caractère hybride d'Auger permet un contrôle direct grâce aux gerbes vues à la fois par le SD et le FD : le profil longitudinal observé directement permettra « d'étalonner » les mesures indirectes du SD sur un sous-ensemble important des observations. On pourra ainsi s'affranchir en partie des erreurs systématiques dues à la modélisation des interactions à UHE (pour lesquelles on n'a aucune mesure directe sur les collisionneurs existants, puisque l'énergie dans le centre de masse s'élève à environ 100 TeV). Le fait d'avoir plusieurs variables discriminantes permettra aussi de faire des recoupements et de donner un fondement plus sûr aux évaluations.

BIBLIOGRAPHIE SUR LE SUJET :

- [1] M. Ave et al., Phys. Rev. D **65** (2002) 063007
- [2] K. Shinozaki et al., Astrophys. J. **571** (2002) L117
- [3] M. Risse et al., Astropart. Phys. **21** (2004) 479 ; astro-ph/0401629
- [4] P. Homola et al., Proc. of XIII. ISVHECRI, Pylos, Sept.2004; astro-ph/0411060
- [5] P.Homola, D.Gora, D. Heck, H.Klages, J. Pekala, M. Risse, B. Wilczynska and H. Wilczynski, *Simulation of Ultra-High Energy Photon Propagation in the Geomagnetic Field*, astro-ph/0311442
- [6] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, and T.Thouw, Report **FZKA 6019**, Forschungszentrum Karlsruhe (1998); D.Heck and J. Knapp, Report **FZKA 6097**, Forschungszentrum Karlsruhe (1998), www-ik.fzk.de/~heck
- [7] R. Aloisio, V. Berezhinsky, and M. Kachelrieß, Phys. Rev.D **69** (2004) 094023
- [8] G. Sigl, hep-ph/0109202

[9] X. Bertou, P.Billoir and S. Dagoret-Campagne, *Astropart. Phys.* **14** (2000) 121

[10] M. Risse et al., *Proc. of XIII. ISVHECRI*, Pylos, sept. 2004 ; astro-ph/0410739

SUJET DE STAGE

Pour le stage, j'étudierai plus spécifiquement la présence éventuelle de photons dans le flux incident ; dans ce cadre, j'utiliserai les variables discriminantes mentionnées plus haut pour essayer d'isoler des gerbes clairement différentes de la moyenne (ayant un développement nettement retardé), et de voir si on peut en extraire des "candidats photons" . En réalité, ces candidats sont peu nombreux pour l'instant, ne sont pas encore vraiment probants : j'étudierai les sources possibles de "bruit" dans les signaux qui peuvent peupler les "queues de distribution" des variables discriminantes, et on cherchera dans un premier temps une limite supérieure de la proportion de photons.

On utilisera pour cela, d'une part les événements réels enregistrés par Auger depuis le début 2004, d'autre part des événements simulés à partir de différentes particules primaires à différentes énergies et directions initiales. Un programme de reconstruction existe, certaines parties pourront être modifiées au cours du stage pour les besoins de l'étude. Par ailleurs on utilisera abondamment les outils de visualisation pour une bonne compréhension des données enregistrées ou simulées.

5. Perspectives Professionnelles

Les perspectives professionnelles à la suite d'une thèse en physique fondamentales semblent, en réalité, assez restreintes. Actuellement avec ce sujet classé dans la catégorie « Astroparticules », il est possible de postuler à 2 commissions CNRS :

- la commission CNRS 03 qui est la commission interdisciplinaire
- la commission CNRS 47 qui est la commission portant la mention « Astroparticules »

Il faut également noter que le CEA commence à s'impliquer de plus en plus dans ce domaine, notamment au travers du groupe travaillant sur « Antarès » et par l'embauche récente de quelques personnes en vue de constituer une équipe de travail sur l'expérience HESS. C'est donc une voix d'embauche potentielle qui commence à prendre de l'ampleur. Plus généralement, il faut ajouter à cela le fait que ce domaine de la physique relativement récent en France commence à se doter d'une réelle dynamique et est de plus en plus soutenu par le CNRS qui y favorise les embauches : plusieurs personnes ont été régulièrement recrutées depuis quelques années à des postes permanents sur des expériences « Astroparticules ».

Les postes de maître de conférence sont également une possibilité. Je ne me sens pas particulièrement intéressé par l'enseignement mais étant soucieux de ne pas juger sans réellement connaître (je n'ai dispensé seulement des cours qu'à titre particulier) et de ne pas me fermer des portes par méconnaissance, je compte demander un monitorat. Au cas où cette

demande serait rejetée, j'essaierais alors d'obtenir des vacances en université ou ailleurs : en CHU pour la première année de cycle de médecine (PCEM 1) par exemple.

En ce qui concerne le milieu du travail en entreprise, l'embauche y semble moins probable. Cependant, il est certain que les compétences en informatique (programmation essentiellement) et l'autonomie dans le travail acquises au cours de la thèse sont des atouts fort appréciés et à faire valoir dans tous les domaines de l'entreprise (informatique, technologie de pointe, finances,...)

6. Conclusion

L'observatoire Auger est un dispositif hybride (détecteurs au sol + télescopes à fluorescence) unique au monde. Il est le premier à recueillir de la statistique précise dans le domaine des Ultra-Haute Energies (10^{19} - 10^{21} eV), de plus son réseau de détecteurs présente une topologie intéressante pour la caractérisation de secondaires neutres (comme le neutrino). Le volume de données augmente constamment, parallèlement au déploiement du réseau au sol et sera pleinement opérationnel d'ici 3 ans. C'est une expérience prometteuse qui apportera un regard nouveau sur la physique d'Ultra-Haute Energie.

Le stage et la thèse s'effectueront au LPNHE paris au sein du groupe Auger . La thématique du sujet de thèse proposé est relatif à la reconstruction des gerbes cosmiques et à l'identification du primaire avec une probable orientation plus ciblée sur la recherche d'une composante photonique.

ANNEXE

LPM effect and pair production in the geomagnetic field : a signature of ultra-high energy photons in the Pierre Auger Observatory (Astroparticle Physics 14 (2000) 121-130)

Cet article traite de deux effets attendus sur les photons de hautes énergies ($\sim 10^{20}$ eV) et de leur influence sur la caractérisation de la composante photonique dans le flux des RCUE. Il s'agit de la création de paires $e+e-$ par interaction des photons avec le champs magnétique terrestre (car le champ magnétique est un photon virtuel du point de vue de la QED) et de l'effet LANDAU-POMERANCHUK-MIGDAL (LPM). Les photons de haute énergie ($\geq 10^{20}$ eV) soumis au champ magnétique terrestre commenceront à créer des paires $e+e-$ avant de pénétrer dans l'atmosphère terrestre ($\sim 10^4$ km). Les paires ainsi créées vont émettre des photons secondaires par rayonnement synchrotron. Le spectre de photons résultant aura une extension significative sur plusieurs décades en dessous de l'énergie du photon primaire (E_γ). Les photons rayonnés les plus durs par les premières paires donnent des paires secondaires avant de pénétrer dans l'atmosphère, et une cascade électromagnétique se développe, aussi longtemps que les photons sont rayonnés avec suffisamment d'énergie pour se convertir dans le champ local. Cet effet supprime la plupart des photons du spectre au-dessus de 10^{19} eV. Finalement, la « pré-gerbe » pénétrant dans l'atmosphère consiste en une ou plusieurs paires $e+e-$ aux alentours de 10^{18} eV et un grand nombre de photons transportant la plus grande partie de l'énergie du primaire.

Les quelques photons « non-convertis » survivant à cet effet et pénétrant dans l'atmosphère seront soumis à l'effet LPM dont les conséquences seront un développement de la gerbe beaucoup plus lent (que celui des photons convertis et des protons) et l'augmentation des fluctuations entre différentes gerbes à une énergie donnée. A cause du seuil de l'effet LPM, dans la haute atmosphère, un photon « non-converti » et une « pré-gerbe » avec la même énergie totale se comportent assez différemment : la « pré-gerbe » à un développement « standard » avec des fluctuations modérées, elle n'est donc pas très différente d'une gerbe induite par un proton ; dans ce cas la distinction ne peut s'obtenir que de manière statistique. Au contraire, celle induite par un photon « non-converti » est plus lente et un développement plus fluctuant. Cela peut-être vu directement par les télescopes à fluorescence sur le profil longitudinal ou bien par des variables discriminantes provenant de mesures du dispositif au sol (cuves Cherenkov) telles que la courbure du front de gerbe ou encore la forme latérale de cette dernière. Dans les deux cas, quelques événements significativement « anormaux » pourraient constituer une bonne signature pour les photons.

Le niveau de sensibilité de l'observatoire AUGER permet d'espérer environ 10 photons au-dessus de 30 EeV par an, ce qui constitue une petite fraction des 300 événements par an au dessus de 30 EeV attendus. Si la statistique est plus large alors l'hypothèse photonique sera vérifiée par la distribution en énergie de la fraction d'événements « anormaux ». L'observatoire Auger présente de bonnes conditions pour détecter les photons dans les RCUE aux alentours de 10^{20} eV grâce, notamment, à son détecteur hybride qui fournit plusieurs critères indépendants.

Tau neutrinos in the Auger Observatory: A New Window to UHECR Sources. (astro-ph/0104452).

Cet article traite des enjeux et surtout des caractéristiques de la détection des neutrinos tau avec l'observatoire Auger. L'intérêt de cette astronomie présente de multiples facettes : du point de vue théorique, l'observation de neutrinos d'ultra hautes énergies ($\geq 10^{20}$ eV) pourrait confirmer des scénarios « top-down » tels que l'effondrement de défauts topologiques (TD) ou encore la décroissance de particules reliques supermassives ; et de manières plus observationnelles, le fait que les neutrinos soient insensible à la déflexion magnétique implique qu'ils pointent directement vers leur sources et permettrait ainsi d'étudier la distribution de ces dernières (question de l'isotropie des sources des RCUE).

Dans cet article, on s'intéressera surtout à la détection du neutrino tau car le détecteur Auger présente une disposition particulièrement intéressante pour signer la décroissance du leptons tau provenant d'une interaction courant chargé d'un neutrinos tau avec la croûte terrestre ($\sim 90\%$ des évènements) ou les montagnes environnantes ($\sim 10\%$ des évènements). Dans la gamme d'énergie considérée (0,1 – 10 EeV) le libre parcours moyen du tau impose une topologie très particulière pour les gerbes cosmiques : il s'agira de gerbes « rasantes » qui traversent la croûte terrestre sur des distances relativement faibles (L_τ compris entre 6 et 31 km dans cette fenêtre d'énergie). Le deuxième type d'évènement intéressant à étudier pour détecter la présence de neutrinos tau dans les RCUE seront les gerbes « profondes », c'est à dire celle pour lesquelles l'interaction primaire se situe à une distance au moins 6 fois supérieure à l'atmosphère terrestre. Du fait de cette grande distance d'atmosphère parcourue, la composante électromagnétique de la gerbe aura disparue, le front de gerbe sera très plat et essentiellement constitué de muons. De cette manière, pour ce type d'évènement, si l'on détecte une gerbe « jeune » il ne pourra s'agir que d'une interaction neutrino type courant chargé.

Dans les deux cas précédents le rapport signal sur bruit est excellent (du à la direction d'émission du tau dans le premier cas et à l'excellente signature temporelle des muons dans le second). L'acceptance du détecteur est multiplié par 30 pour les gerbes induites par un tau à 1EeV. La sensibilité d'Auger à la détection des neutrinos estimée par simulation (acceptance minimale + prédictions théoriques de flux neutrinos pour différents types d'objets astrophysiques) semble être parfaitement adaptée pour la détections de neutrinos tau mais semble être insuffisante pour discriminer clairement les neutrinos électroniques et muoniques.

Tau Neutrinos in the Auger Observatory : A New Window to UHECR Sources.

X. Bertou, P. Billoir, O. Deligny, C. Lachaud, A. Letessier-Selvon ^a

^aL.P.N.H.E. Paris VI-VII, 4 place Jussieu, 75252 Paris, France

The cosmic ray spectrum has been shown to extend well beyond 10^{20} eV. With nearly 20 events observed in the last 40 years, it is now established that particles are accelerated or produced in the universe with energies near 10^{21} eV at the production site. In all production models neutrinos and photons are part of the cosmic ray flux. In acceleration models (bottom-up models), they are produced as secondaries of the possible interactions of the accelerated charged particle; in direct production models (top-down models) they are a dominant fraction of the decay chain. In addition, hadrons above the GZK threshold energy will also produce, along their path in the Universe, neutrinos and photons as secondaries of the pion photo-production processes. Therefore, photons and neutrinos are very distinctive signatures of the nature and distribution of the potential sources of ultra high energy cosmic rays. In the following we describe the tau neutrino detection and identification capabilities of the Auger observatory. We show that in the range $3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{20}$ eV the Auger effective aperture reaches a few tenths of $km^2.sr$, making the observatory sensitive to fluxes as low as a few tau neutrinos per $km^2.sr.year$. In the hypothesis of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations with full mixing, this sensitivity allows to a probe of the GZK cutoff as well as providing model independent constraints on the mechanisms of production of ultra high energy cosmic rays.

1. Introduction

The origin of Ultra High Energy Cosmic Rays observed on Earth is a long lasting mystery[1–4]. While the cosmic ray spectrum is now shown[5,6] to extend beyond 10^{20} eV, mechanisms producing or accelerating particles with energies near or above 10^{21} eV are still uncertain.

Only very powerful astrophysical objects can, in principle, produce these energies through conventional acceleration. However the environment of the source itself generally prevents the accelerated particle to escape the site without severe energy losses, making such scenarios unlikely to explain the origin of UHECR.

Alternative hypotheses involving new physics such as collapse of Topological Defects (TD) or decay of Super Massive Relic Particles (SMRP) are well suited to produce particles above 10^{20} eV but they still lack a proof of existence. Moreover such models may reproduce the power law spectrum observed for the cosmic rays only at the condition that the decaying particle is much heavier than 10^{20} eV.

Transport from the source to Earth is also an issue. At those extreme energies the Cosmic Microwave Background Radiation makes the Universe essentially opaque to protons, nuclei and photons which suffer energy losses from pion photo-production, photo-disintegration or pair production. These processes led Greisen, Zatsepin and Kuzmin[7] to predict a spectral cutoff around 5×10^{19} eV, the GZK cutoff. The available data, although still very scarce, do not support the existence of such a cutoff. Therefore the sources are either close by and locally more dense for the cutoff not to show, or new physics modifies the expected energy losses of UHECR against the CMB photons.

In this framework neutrino are an invaluable probe of the nature and the distribution of the potential sources. Essentially unaffected on their journey to Earth they may allow us to disentangle the source characteristics from the propagation distortions. In the following we will briefly describe the Auger observatory and show how ν_τ are expected to interact and propagate in the Earth crust and be detected in Auger as low altitude and

almost perfectly horizontal showers. In the framework of full $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ mixing we will then evaluate our sensitivity to potential neutrinos sources and in particular to the low but almost certain flux of GZK neutrinos.

2. Neutrino detection with the Auger detector

Large area ground based detectors do not observe the incident cosmic rays directly but the Extensive Air Showers (EAS), a very large cascade of particles, that they generate in the atmosphere. All experiments aim to measure, as accurately as possible, the direction of the primary cosmic ray, its energy and its nature. There are two major techniques used. One is to build a ground array of sensors spread over a large area, to sample the EAS particle densities on the ground. The other consists in studying the longitudinal development of the EAS by detecting the fluorescence light emitted by the nitrogen molecules which are excited by the EAS secondaries.

The Auger Observatories¹ [8] combine both techniques. The detector is designed to be fully efficient for showers above 10 EeV (1 EeV $\equiv 10^{18} eV$), with a duty-cycle of 100% for the ground array, and 10 to 15% for the fluorescence telescope. The 1600 stations of the ground array are cylindrical Čerenkov tanks of 10 m² surface and 1.2 m height filled with filtered water; they are spaced by 1.5 km into a triangular grid. The construction started in the fall of 2000 in Argentina. Once completed in 2006, the observatories will be covering one site in each hemisphere. Their surface, 3000 km² each, will provide high statistics. With a total aperture of more than 14000 km²sr, the Auger Observatories should detect every year of the order of 10000 events above 10 EeV and 100 above 100 EeV.

Previous studies on UHE neutrino interaction in the atmosphere and observation with Auger were reported in [9,10]. The idea of detecting ν_τ interactions through the shower induced by the τ decays in the atmosphere was presented in [11,12].

In the following we will describe the specificity of the tau neutrinos interaction and propagation,

¹Named after the French physicist Pierre Auger.

together with the possibility to detect the tau decay above the Auger ground array.

2.1. Relevant properties of tau neutrinos

Standard acceleration processes in astrophysical objects hardly produce any ν_τ . In top-down models there is a full equivalence between all flavors at the beginning of the decay chain but this symmetry breaks down at the end of the fragmentation process where the pions which yield most of the expected neutrino flux are produced.

This situation changes radically in the case of $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with full mixing, a hypothesis that seems to be supported by the atmospheric neutrino data and the K2K experiment [13]. In such a case the $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$ flux ratios originally of 1 : 2 : 0 evolves towards 1 : 1 : 1 for a very wide range in δm^2 (given the very large distance between the source and the Earth). Half of the ν_μ gets converted into ν_τ and all flavors are equally represented in the cosmic ray fluxes.

Unlike electrons which do not escape from the rocks or muons that do not produce any visible signal in the atmosphere², taus, produced in the mountains or in the ground around the Auger array, can escape even from deep inside the rock and produce a clear signal if they decay above the detector.

The geometrical configuration that must be met to produce a visible signal is rather severe. Neutrinos must be almost perfectly horizontal (within 5 deg.). Therefore less than 10% of the solid angle is available while the neutrino energy and the distance between the interaction and the detector must match to have a good chance of observing the tau decay. We will show in the following that indeed these criteria can be met and that most of the detectable signal (90%) comes from upward going ν_τ where the interactions occur in the ground all around the array and only 10% from downward going ν_τ coming from interactions in the mountains surrounding the array.

²The electro-magnetic halo that surrounds very high energy muons does not spread enough in space to produce a detectable signal in an array of detectors separated by 1.5 km.

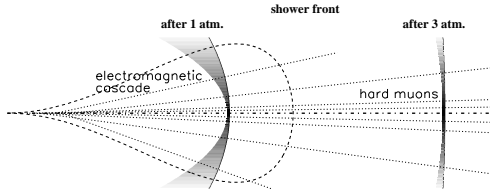


Figure 1. Horizontal shower development.

2.2. Deep showers

The UHE neutrinos may be detected and distinguished from ordinary hadrons by the shape of the horizontal EAS they produce. Ordinary hadrons interact at the top of the atmosphere. At large zenith angles (above 80 deg.) the distance from the shower maximum to the ground becomes larger than 100 km. At ground level the electromagnetic part of the shower is totally extinguished (more than 6 equivalent vertical atmosphere were gone through) and only high energy muon survive. In addition, the shower front is very flat (radius larger than 100 km) and the particles time spread is very narrow (less than 50 ns).

Unlike hadrons, neutrinos may interact deeply in the atmosphere and can initiate a shower in the volume of air immediately above the detector. This shower will appear as a “normal” one - although horizontal -, with a curved front (radius of curvature of a few km), a large electromagnetic component, and with particles well spread over time (over a few microseconds) [see Figure 1]. With such important differences, and if the fluxes are high enough, neutrinos can be detected and identified.

Showers produced from a τ decay have the same characteristics as neutrino ones. We simulated them with the AIRE program [14]. A special mode, allowing the simultaneous injection at a given point of several particles with any direction was used. The development of the cascades in air, with a thinning energy threshold of $E_{thin} =$

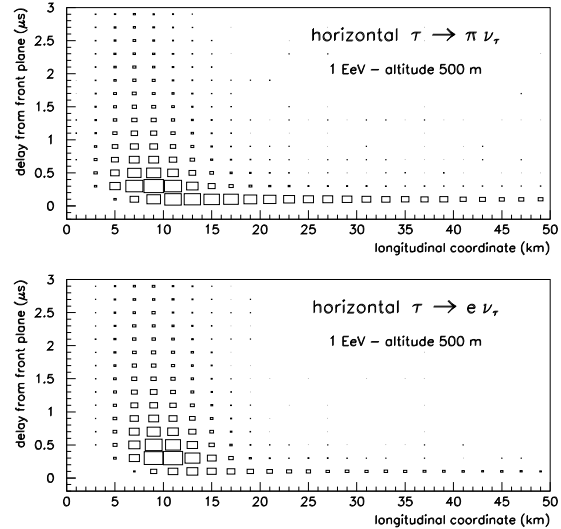


Figure 2. Time structure of horizontal showers induced by a τ of 1 EeV. The main difference is the importance of the muonic tail (concentrated at low delay times). 500m is the x altitude of the decay above the ground.

$10^{-7} E_{\tau}$, produced a set of weighted “ground particles”, which provides a good description of the densities expected at each Čerenkov tank. It is important to mention that up going particles were allowed throughout the cascade, as long as they remained inside a very large volume surrounding the shower maximum, while particles hitting the ground were not followed further.

Fig. 2 shows the time structure of two showers induced by horizontal tau decays at low altitude. The areas of the boxes are proportional to the particle density and one can verify that the shower maximum occurs around 10 km after the decay point and that the “fat” part of the shower extends over 10 to 15 km. As mentioned above, after 20 km or so, only muons well in time with the shower front survive. This is illustrated in the shower generated by a hadronic decay of the tau which contains more muons than a shower from an electronic decay as one can see in Fig. 2

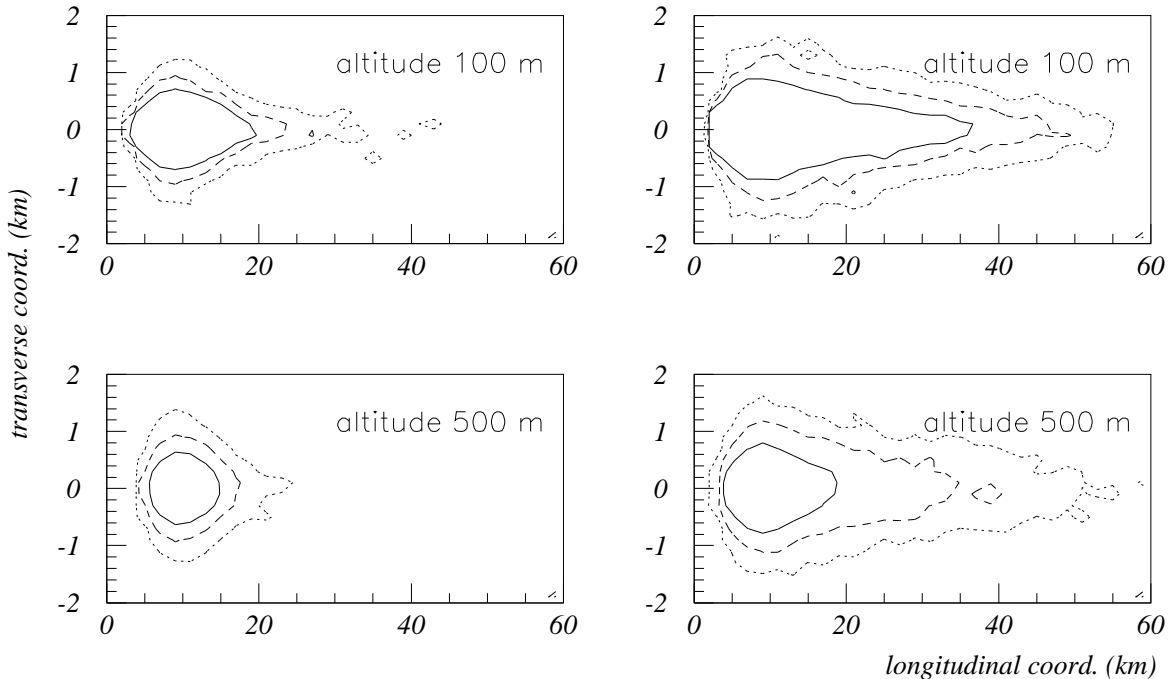


Figure 3. Ground spots of horizontal showers induced by a τ of 1 EeV. Lines are iso-density curves at the threshold of the tank local trigger (solid), at 0.3 (dashed) and at 0.1 (dotted). All of these data (even when below threshold) can be used from the global trigger generated by a set of local triggers. Left: τ decay into $e\nu_e\nu_\tau$; right: decay into $\pi\nu_\tau$

as the more important “in time” component at large distance.

Horizontal showers, due to their *longitudinal* extension and provided that their core is at sufficiently low altitude, may be seen in Auger at an energy much lower than the vertical shower threshold of 10 EeV. For example, a horizontal shower induced by a primary particle of 0.1 EeV has an effective radius larger than 300 m over 10 km; if its core is at 100 m above the ground, it may easily trigger 4 Čerenkov tanks or more. The extension of the shower core depends on the nature of the primaries. Due to the large range of the muonic component, charged hadrons give on average a larger footprint than electrons or neutral pions.

Fig. 3 shows examples of shower ground spots. The solid contours give the area where the particle density is above the local trigger threshold

of the Čerenkov tanks. On average, an electronic tau decay at 500 meters would trigger 3 stations, a pionic decay at 500 meters 5 and at 100 meters more than 10.

3. Tau events simulation

3.1. Interactions in earth

A Monte-Carlo technique has been used to simulate the tau neutrino or charged lepton interactions and propagation inside the Earth. The lepton may interact several times through deep inelastic scattering, changing charge in most cases, or eventually decay, but, in all cases, a tau neutrino or charged lepton is present in the final state. Some energy is lost at each interaction, as well as continuously along the paths. However, in our energy range, the initial direction of the incoming neutrino is always conserved (Figure 4).

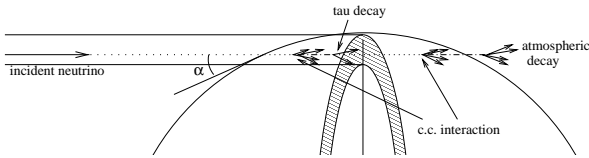


Figure 4. Chain of interactions producing an observable shower.

In our model, we assumed an isotropic incident flux of neutrinos, an homogeneous Earth with density 2.15 g/cm^3 [16], and a very high energy parameterization of the charged current (CC) cross section accurate to within 10% as given by the results of the CTEQ4-DIS parton distributions :

$$\sigma_{cc}^{\nu N} = 1.0 \left(\frac{E_\nu}{1 \text{ EeV}} \right)^{0.363} 10^{-32} \text{ cm}^2$$

A step-by-step method is used; at each step, the probabilities of different interactions and of the decay are evaluated as functions of the energy. Both CC and NC interactions are taken into account, with the cross section given above (and $\sigma_{nc} = 0.4 \sigma_{cc}$) [15] ; the energy of the outgoing lepton is computed using a parametrization of the inelasticity at 1 EeV.

Energy losses have been calculated including Bremsstrahlung (BS) and Pair Production (PP) as well as Deep Inelastic Scattering (DIS). The energy loss model is of the form :

$$-\frac{dE}{dx} = a + b(E)E$$

where the second term is dominant above a few 100 GeV.

Contributions from BS and PP have been rescaled from the muon values given in reference [16] and [17], leading to $b = 0.08 \times 10^{-7}$ and $1.4 \times 10^{-7} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^2$ respectively. We then obtained an attenuation length $L = (\rho \sum b)^{-1}$ of 31 km. DIS contributions rely on parameterization of the photo-nucleon cross sections as well as on the proper modelisation of the nucleon structure functions at very low x and/or very large Q^2 . This subject being still tentative, we decided

to use two different estimates, an energy independent contribution (DIS-low, $b = 10^{-7} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^2$) rescaled from the muon behavior given in [17] and an energy dependant one (DIS-high, $b = 6 E_{18}^{0.2} \times 10^{-7} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^2$ which dominates energy losses above 10^{15} eV) as a parameterisation of the recent calculation from [18]. This later case gives an attenuation length as low as 6 km at 10^{18} eV strongly reducing the penetrating power of the tau.

The τ is assumed to decay according to the relative probabilities into one of the most frequent modes : $e, \mu, \pi, \pi\pi^0, \pi\pi^+\pi^-$ and $\pi\pi^0\pi^0$, which cover 90% of the total decays. We simplified the kinematical distribution of the decay products, reproducing only the essential feature, namely the fraction of initial energy going into the electromagnetic shower and into the hadronic one³). A more accurate description would not modify our results as can be seen in Fig. 3 where the central ground region of a pure electromagnetic shower, although different, still compares with the hadronic one. The muons are considered to be unobservable. A possible effect of the longitudinal polarization of the tau was ignored.

Once a τ emerges from earth, and if a decay occurs within an altitude of 3 km above the ground, an atmospheric shower is simulated as described in Sec. 2.2. The detector response is then evaluated through a simulation (outlined below) of the interactions of incident particles in water.

Interactions in the mountains surrounding the detector were also simulated, using a detailed description of the relief. Their contribution was found to be much less than the material below sea level, whatever the energy. On the other hand we did not account for the lower density in Pacific Ocean, 250 km West from the southern site. The overall correction is less than 10 %.

3.2. Detector response

The set of weighted ground particles in a “sampling region” around each station is used to regenerate a set of particles entering the tank, statistically reproducing all significant characteristics of the incident flux : global normalization of the

³Note that at 1 EeV the decay length of a π^0 is 200 m, therefore comparable to the interaction length in air (750m)

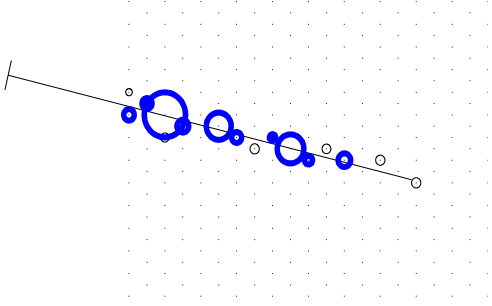


Figure 5. Simulation of the ground trace left by a τ decay shower as produced by a 5×10^{17} eV tau neutrino. Each thick circle represents a triggered station with a surface proportional to the Čerenkov signal. The τ shower had an energy of 3.63×10^{17} eV and decayed 390 meters above the ground. In this particular example energy deposition in triggered tanks ranges from 4 to almost 100 *vem*.

different particles, distribution in energy and direction.

Then a simplified simulation is performed for interactions (cascade of Compton scattering and pair production for photons, energy loss for charged particles) and Čerenkov emission in the water. The production of Čerenkov photons and their propagation in the tank is performed until they hit a PMT or are absorbed in the water or in the tank walls. The PMT response is assumed to be proportional to the amount of light emitted. This is a good approximation in most cases, in particular for the sum over the three PMTs collecting the light from the tank.

The level of the local trigger (one tank) is set to 4 *vem* (vertical equivalent muons), and a global trigger is built if at least 4 stations are locally triggered within 20 μ s with a relatively compact topology. For example at least two stations must be within 3 km from a “central” one, and an additional one within 6 km. If needed, some long-shaped configurations with nearly aligned stations and the right time spacing could be added to the global trigger processor. These allow to a gain of up to 50 % in the acceptance at energies between 0.1 and 0.3 EeV. However, we did not include these additions in this study.

Fig. 5 shows a simulation of the ground trace of a tau, produced by a 5×10^{17} eV neutrino, as sampled by the Auger stations. The signal is clearly visible and 10 stations pass the 4 *vem* trigger requirement (thick circles).

The probability to detect a shower with a given visible energy depends essentially on the altitude of the core at the maximal lateral development. It is not very sensitive to the exact definition of the local trigger threshold nor to the global configuration. For example, detecting all events with 3 locally triggered stations would not increase sensibly the rate, except on the edges of the acceptance below a few times 0.1 EeV. This is illustrated on Fig.6, where the equivalent area for detecting a shower has been plotted for various trigger conditions : triangles 3 stations, squares 4 stations and circles 4 stations plus the above condition on the global configuration.

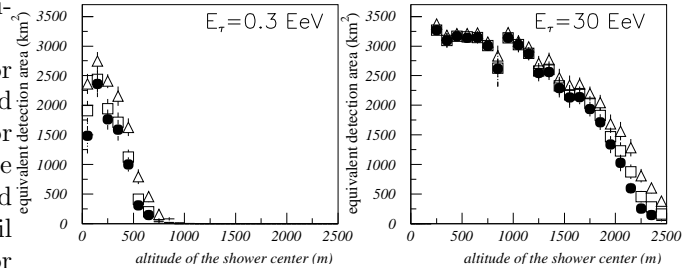


Figure 6. Equivalent detection area of tau showers averaged over all decay channels versus the shower center (defined 10 km after the decay point) altitude. Triangles : 3 stations global trigger, squares 4 stations, circles 4 stations and the compact topology restriction.

3.3. Reconstruction

The direction of origin may be estimated from the times of arrival of the shower front on the stations, which is, as a first approximation, a plane moving at speed c . The precision on the azimuthal angle φ is of the order of 1 deg, and could be improved by taking into account the front curvature and by weighting each station contribution

according to its integrated amplitude.

As a horizontal array is only sensitive to $\sin\theta$ the zenith angle θ is quite difficult to obtain precisely. However, taus are all produced with $|\theta - 90| < 5$ deg. Therefore one can isolate them from the standard horizontal neutrino shower as can be seen on Fig. 7.

The reconstruction of the energy E_i of the incident neutrino is much more delicate :

- The energy E_τ of the emerging tau may be much less than E_i , in particular for $E_i \gg 1$ EeV, where many intermediate interactions may have occurred reducing E_τ to a few 0.1 EeV. As θ is not well known, it is difficult to evaluate even an order of magnitude of the energy loss.
- An arbitrary fraction of E_τ goes into neutrinos and will not be visible while the decay type will influence the hadronic to electromagnetic ratio of the decay products. This may be corrected for only if the tail of the shower is visible on the ground.
- The estimation of the shower energy depends strongly on the altitude of the shower core which is *a priori* unknown. If many stations are hit, there is a hope to evaluate it from the transverse distribution.

Given these difficulties, we can predict the rate of events knowing the energy spectrum of the original neutrinos. The inverse will be difficult.

A careful statistical analysis of all observable characteristics such as tank multiplicity, longitudinal and transverse profile of the ground spot and time structure will certainly give additional information on the original spectrum. We also believe that for events where a large number of tanks are struck we can obtain an estimate of the neutrino energy but those studies need to be done. Of course, the hybrid reconstruction (involving both the ground array and the fluorescence detector of Auger) will be extremely valuable to remove some ambiguities (zenith angle, visible energy), but such “golden” events are expected to be less than 10% of the total event rate.

3.4. Evaluation of the acceptance

The rate of observable events on a given surface A (surface covered by the Ground Array) is simply the rate over the whole earth, multiplied by $A/(4\pi R_T^2)$, where R_T is the radius of the earth. This rate may be evaluated from a parallel flux crossing the earth section (πR_T^2) as the integration over the solid angle just gives an additional factor of 4π .

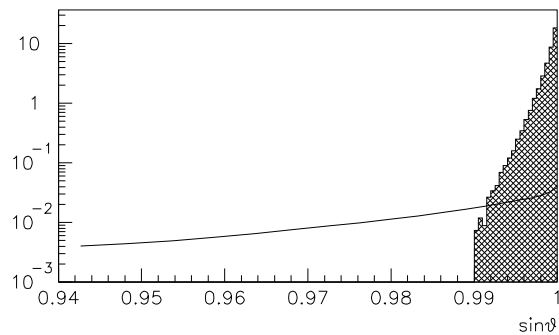


Figure 7. $\sin\theta$ distribution of accepted events. Solid line : neutrino interaction in the atmosphere, filled area : tau neutrino interaction in the ground. The normalization between the two curves (1:20) roughly corresponds to $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with full mixing and an E^{-2} flux. The RMS on the reconstructed $\sin\theta$ is at most 0.005.

A tau emerging with an angle α over the horizon greater than $\alpha_m = 0.3$ rad has no chance of producing an observable shower at ground level. Therefore we only simulated incident neutrinos close to the earth surface for which $\alpha \leq 0.3$ rad (hatched area on Fig.4). For various incident energies, $N_{sim} = 10^6$ neutrinos were simulated and the complete history up to the trigger was followed, giving the total number N_{acc} of accepted events.

The aperture at a given energy may then be defined as:

$$\begin{aligned} A_{\text{eff}} &= 4\pi \pi R_T^2 \sin^2 \alpha_m \frac{A}{4\pi R_T^2} \frac{N_{\text{acc}}}{N_{\text{sim}}} \\ &= \pi A \sin^2 \alpha_m \frac{N_{\text{acc}}}{N_{\text{sim}}} \end{aligned}$$

and the rate of events (integrated over the solid angle) coming from neutrinos of energy between E_1 and E_2 as :

$$\frac{dN_{\text{acc}}}{dt} = \int_{E_1}^{E_2} f(E) A_{\text{eff}}(E) dE$$

where $f(E)$ is the incident flux.

3.5. Analytic estimation

A simple analytic computation of the acceptance is easy if :

1. the energy loss of tau leptons in the earth can be neglected;
2. only events with a unique interaction (single bang) in earth are considered;
3. the tau is assumed to carry always the same fraction (80%) of the neutrino energy;
4. a simple geometric condition on the position of the tau decay can model the detection condition.

From our full Monte-Carlo studies of the probability of detection of a tau shower in Auger, given its energy, zenith angle, and altitude of decay we found that a reasonable description of the largest detection altitude of the shower maximum was given by :

$$h_m = 1000 + 500 \times \log(E_{18})$$

where h_m is the altitude in meters of the shower maximum.

A more complete estimation can be done taking into account multiple interaction in earth (multi-bang events). Taking into account multi-bang events increases considerably the acceptance at larger angles whatever the energy.

Fig. 8 shows the probability of producing and detecting a tau shower as a function of its zenith angle. The contribution of the various multi-bang events can be seen.

The acceptance can then be computed and compared with our full Monte-Carlo results (see Fig 9). Differences come mainly from the approximations of the geometrical detection condition and from the absence of energy loss in our analytical calculation.

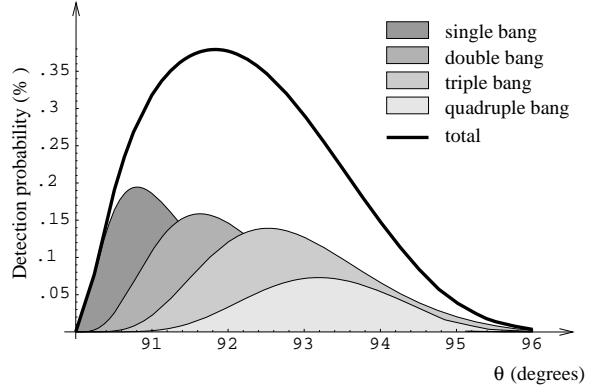


Figure 8. Probability of detection of a tau shower for a 3.10^{18}eV neutrino hitting the Auger array as a function of zenith angle.

4. Expected event rate

4.1. Acceptance

The acceptance for ν_τ interaction in the rocks surrounding the Auger array is shown on Fig.9. It may be represented either by the “effective cross section” defined in Sec. 3.4, or, by introducing the event rate per decade :

$$\begin{aligned} I_{10}(E) &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{E-\epsilon}^{E+\epsilon} f(e) A_{\text{eff}}(e) de}{\log_{10} \left(\frac{E+\epsilon}{E-\epsilon} \right)} \\ &= \ln 10 E f(E) A_{\text{eff}}(E) \end{aligned}$$

With this definition, one can directly obtain the number of events detected per year measuring the area under the curve $I_{10}(E)$ on a $I_{10}(E)$ versus $\log E$ plot as shown on Fig. 10.

We defined the Auger flux sensitivity as the neutrino flux giving at least one observed event per decade of energy every year i.e. for which $I_{10}(E) = 1$. This sensitivity is shown on Fig. 11 together with the expected fluxes from a model calculation by Protheroe [19]. All predicted fluxes are ν_μ fluxes, in the full mixing hypothesis ν_τ fluxes are half of those. The limits from atmospheric neutrino interaction formerly calculated in [10] and from our present calculation of ν_τ interactions in the rocks are shown.

For standard neutrino interactions in the atmo-

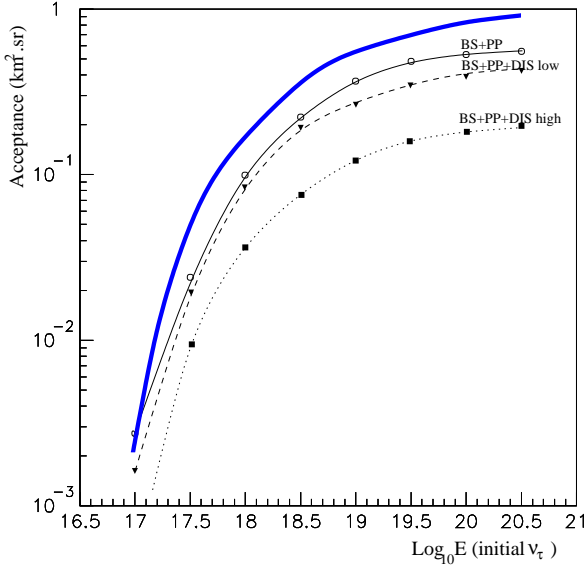


Figure 9. Auger array effective aperture to ν_τ . Various continuous energy loss models are presented. BS : bremsstrahlung, PP pair production, DIS deep inelastic scattering. The thick solid line is our analytical calculation without energy loss.

sphere, each site of the Auger observatory reaches 10 km^3 water equivalent (w.e.) of target mass at 1 EeV , and only the models classified as speculative by Protheroe [19] are expected to yield a detectable signal. However, for tau induced showers the target mass is increased by a factor of about 30 at 1 EeV , allowing for a detectable signal even for the lowest expected fluxes. The expected number of events per year from various UHECR production models and from the GZK⁴ neutrinos (a very low but almost certain flux) are presented in Table 1.

The data in the table demonstrate the capability of the Auger detector to probe the GZK neutrino flux. This is a crucial test as most acceleration mechanisms of protons in cosmologically

⁴One should note that the GZK neutrino model that we have taken from [19] is almost one order of magnitude lower than the prediction given in [20] therefore we feel quite confident that the Auger observatory will observe a few ν_τ candidates if the $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillation results are confirmed.

Table 1

Expected number of events per year for the source models presented in Fig. 11 and various DIS contributions to continuous energy losses.

DIS	AGN-1	TD	GRB	GZK	AGN-2
none	27.0	2.3	0.5	1.7	2.9
low	24.0	1.8	0.4	1.5	2.5
high	10.0	0.8	0.2	0.6	1.1

distributed sources as well as top-down models will produce a neutrino flux at least equal to this one.

5. Conclusions

The Auger observatories are found to have an optimal geometry for the detection of ν_τ interaction in earth in the $0.1 - 100 \text{ EeV}$ energy range (the GZK range). Indeed, above 10^{17} eV the earth

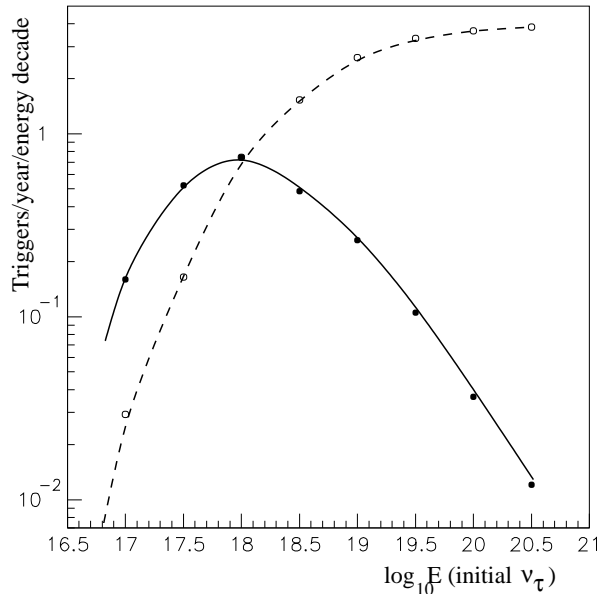


Figure 10. The event rate per decade for BS+PP energy loss only.

solid line $f(E) = 3.1 E_{18}^{-2} \text{ EeV}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1} \text{ sr}^{-1}$;
dashed line $f(E) = 3.1 E_{18}^{-1} \text{ EeV}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.
($3.1 \text{ EeV km}^{-2} \text{ y}^{-1} \equiv 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

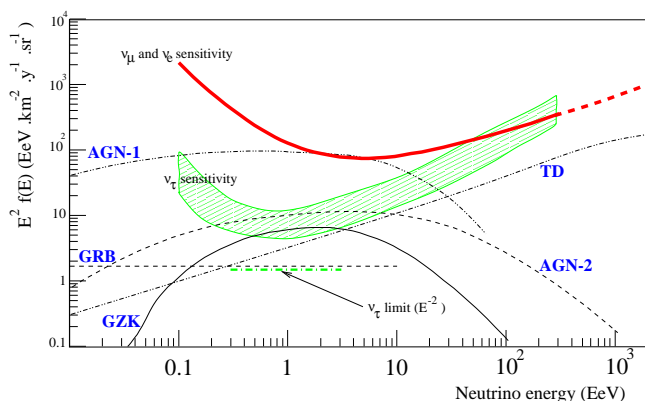


Figure 11. Muon or tau neutrino and anti-neutrino fluxes from various sources in the full mixing hypothesis, taken from [19] (and divided by 2). Dotted lines are speculative fluxes, dashed probable and solid certain. The thick solid line and the hatched area represent the Auger sensitivity defined by $I_{10}(E) = 1$, i.e. one event per year and per decade. Top line for horizontal shower from ν_e and ν_μ interactions in the atmosphere hatched area for tau induced showers under strong DIS loss (top of the area) or no DIS loss (bottom). Any flux lying above those curves for at least one decade will give more than one events per year in Auger. We also plotted the 90% C.L. limit (background free detection) for an E^{-2} flux between 0.3 and 3 EeV that Auger could achieve after five years.

is not transparent to neutrinos and for tau or muon neutrinos successive charged/neutral current interactions will degrade the energy below 10^{16} eV, mixing the high energy signal with the more standard and far more numerous low energy one. Therefore a maximum of a few 100 km of rocks should intersect the neutrino trajectory to limit the number of interactions and allow a high energy lepton (above 10^{17} eV) to escape. Only nearly horizontal neutrinos interacting in mountains or in the top few kilometers of the Earth fulfill this requirement.

At a few tens of EeV, the tau decay length is over 1000 km and the probability of a decay inside the field of view of current or foreseen detectors

becomes very small. Therefore, only the energy range 0.1 – 10 EeV is truly visible. At these relatively “low” energies the fluorescence signal is rather small and will be difficult to see from far away (a few tens of km), a necessary condition to have enough acceptance for observing a few events a year.

REFERENCES

1. S. Yoshida, H. Dai, *J. Phys.* **G24** (1998) 905.
2. P. Bhattacharjee, G. Sigl, *Phys. Rept.* **327** (2000) 109.
3. X. Bertou, M. Boratav, A. Letessier-Selvon, *Int. J. Mod. Phys.* **A15** (2000) 2181.
4. M. Nagano, A. A. Watson, *Rev. Mod. Phys.* **72** No. 3 (2000), 689.
5. J.N. Matthews, C.C.H. Jui, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **B87**, (2000) 411.
6. M. Takeda *et al.*, *Astrophys. J.* **522**, (1999) 225; N. Hayashida *et al.*, **astro-ph/ 0008102**.
7. K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16** (1966)748.; G.T.Zatsepin, V.A.Kuzmin, *JETP Lett.* **4** (1966) 78.
8. *The Pierre Auger Project Design Report*, Fermilab (1995), www.auger.org/admin/.
9. G. Parente, E. Zas, **astro-ph/ 9606091**; K. S. Capelle, J. W. Cronin, G. Parente, E. Zas, *Astropart. Phys.* **8** (1998) 321; S. Coutu, X. Bertou, P. Billoir, *John Hopkins Workshop (Neutrinos in the Next Millenium)*, 1999 (sub. to World Scienc.).
10. P. Billoir, *8th International Workshop on Neutrino Telescopes*, (1999) 111.
11. D. Fargion, **astro-ph/ 0002453** and **astro-ph/ 0101565**.
12. A. Letessier-Selvon, **astro-ph/ 0009444**.
13. S. Fukuda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, (1998) 156; and updates in C. McGrew, "9th International Workshop on Neutrino Telescopes", Venice (Italy), March 6-9 (2001).
14. S.J. Sciutto, AIREs, a system for air shower simulations, version 2.2.1 (2000).
15. R. Gandhi, C. Quigg, M. H. Reno and I. Sarcevic, *Phys. Rev. D* **58** (1998).
16. Particle Data Group, D.E. Groom *et al.*, *European Physical Journal* **C15**, (2000) 1.
17. A.V Ginneken *Nucl. Instrum. Methods* **A251**,

- (1986) 21.
18. S.I. Dutta, M.H. Reno, I. Sarcevic and D. Seckel, *Phys.Rev.* **D63**, (2001) 094020; also in **hep-ph/0012350**.
 19. R.J. Protheroe, **astro-ph/ 9809144**.
 20. C.T. Hill and D.N. Schramm, *Phys. rev. D* **31**, (1985) 564.