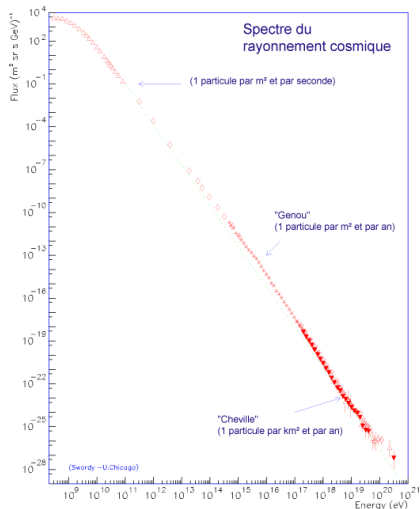


Neutrinos d'Ultra Haute Energie à l'Observatoire Pierre Auger

Mathieu Tartare

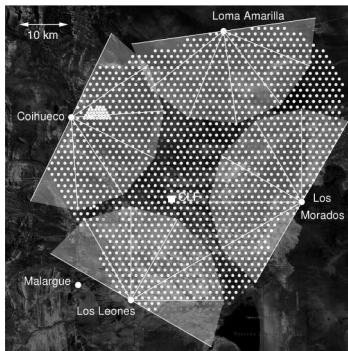
Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie (LPSC)
UMR UJF/INPG/CNRS





UHE Puzzle :

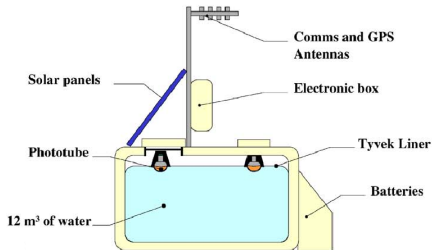
- Sources ?
 - Mécanismes d'accélération ?
 - Composition ?
 - Propagation ? (effet GZK ?)
-
- Difficulté majeure : Flux extrêmement faible !
 - Solution : Grande surface de collection → Observatoire Pierre Auger.



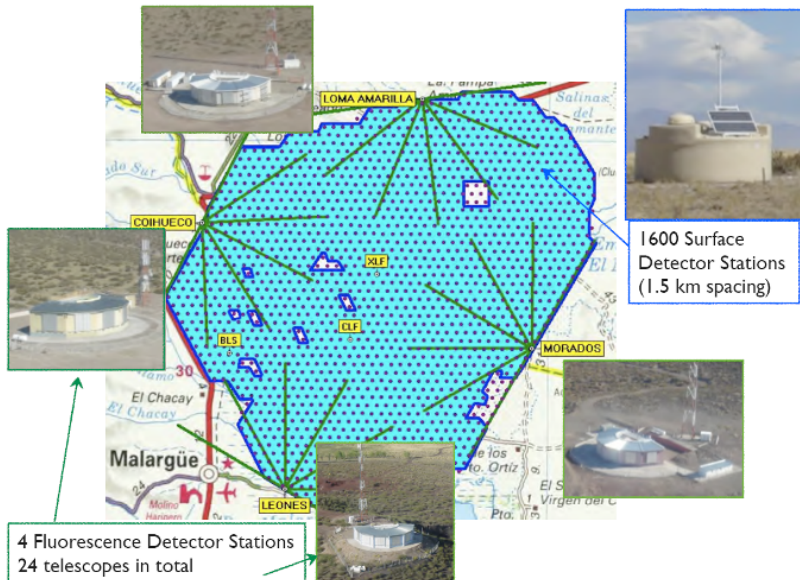
Configuration de l'Observatoire Pierre Auger.

L'Observatoire Pierre

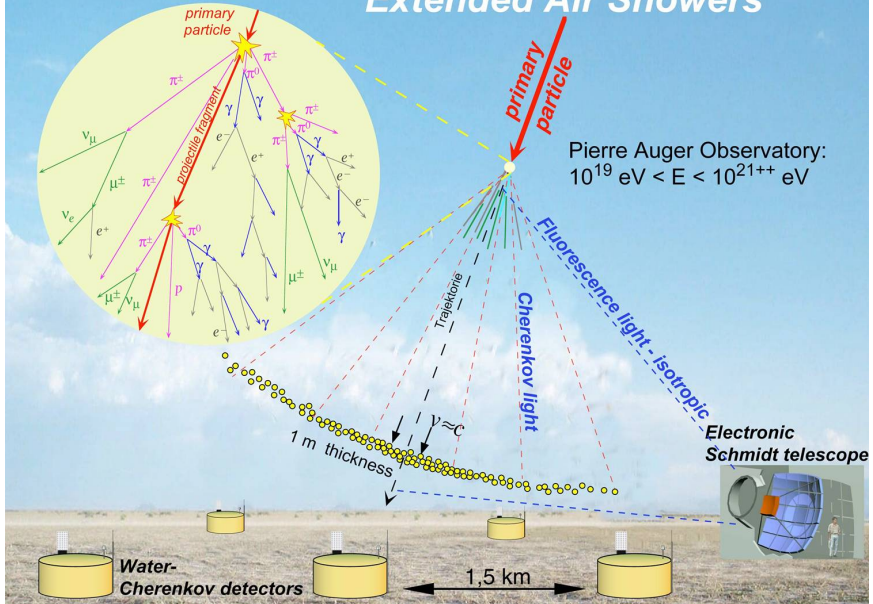
- Conçu pour mesurer le flux, la direction d'arrivée et la composition des rayons cosmiques d'énergie supérieure à 10^{17} eV.
- **Bonus** : Acceptance significative aux neutrinos UHE.



Pierre Auger Observatory : A "hybrid" detector



Extended Air Showers



Pierre Auger Observatory:
 $10^{19} \text{ eV} < E < 10^{21++} \text{ eV}$

Pourquoi les neutrinos d'ultra haute énergie ?

- La nature et les mécanismes de production des rayons cosmiques d'ultra haute énergie **restent inconnus**. Tout les mécanismes proposés produisent des neutrinos.
- Les neutrinos peuvent traverser des **distances cosmologiques** sans être déviés ni perturbés \implies messenger astrophysique idéal.
- Des flux de neutrinos et de photons \gg flux de noyaux signeraient des processus "top-down".
- L'étude de leur **flux** et de leurs interactions doit permettre de révéler ou de contraindre de la "nouvelle physique" à UHE.
- **Ils sont toujours non détectés !**

- Sources Ponctuelles : SNR, AGN, GRB ? \implies Flux astrophysiques incertains.
- Interactions des protons UHECR avec le CMB : neutrinos cosmogéniques ou GZK \implies Flux garantis!
- Rapport de saveur $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$:
A la source : 1/3 :2/3 :0 \rightarrow sur Terre 1/3 :1/3 :1/3.

Effet GZK

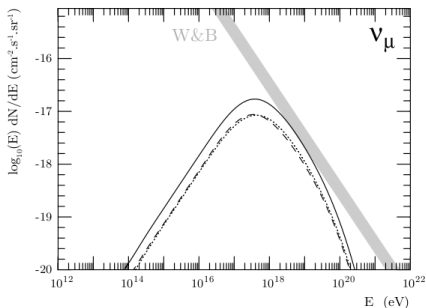
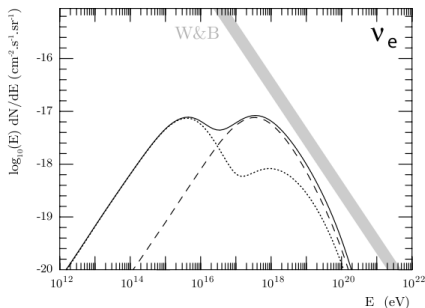
Pour $E > 10^{19.6}$ eV :

- $p + \gamma_{cmb} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$
- $p + \gamma_{cmb} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$
- $n \rightarrow p + \bar{\nu}_e + e^-$ and $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$

Limite W&B

Flux UHE ν contraint par le flux de RCUHE :

- $E^2 dN/dE = 4 \cdot 10^{-8} \text{GeV.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
- Hypothèses de source optiquement transparentes aux protons.



Effet GZK

Pour $E > 10^{19.6}$ eV :

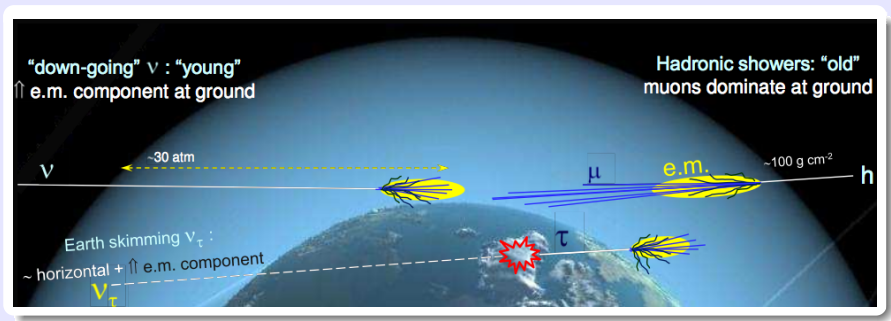
- $p + \gamma_{cmb} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$
- $p + \gamma_{cmb} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$
- $n \rightarrow p + \bar{\nu}_e + e^-$ and $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$

Limite W&B

Flux UHE ν contraint par le flux de RCUHE :

- $E^2 dN/dE = 4 \cdot 10^{-8} \text{ GeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
- Hypothèses de source optiquement transparentes aux protons.

Principe de détection des neutrinos à Auger

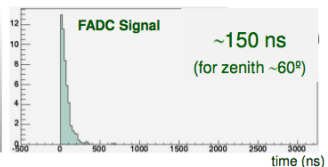
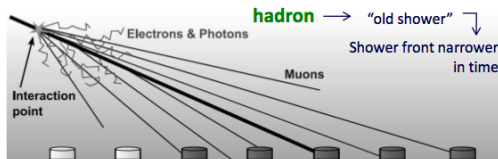
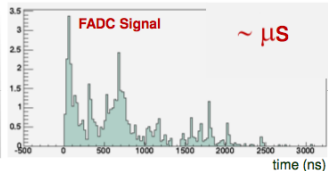
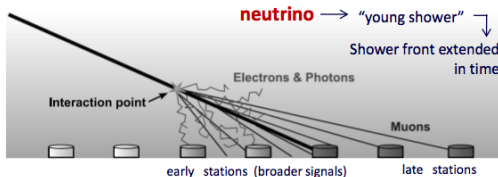


Signal

- Gerbes jeunes
- Composante EM importante.
- Courbure forte du front

Background

- Gerbes vieilles
- Composante muonique importante
- Courbure faible du front



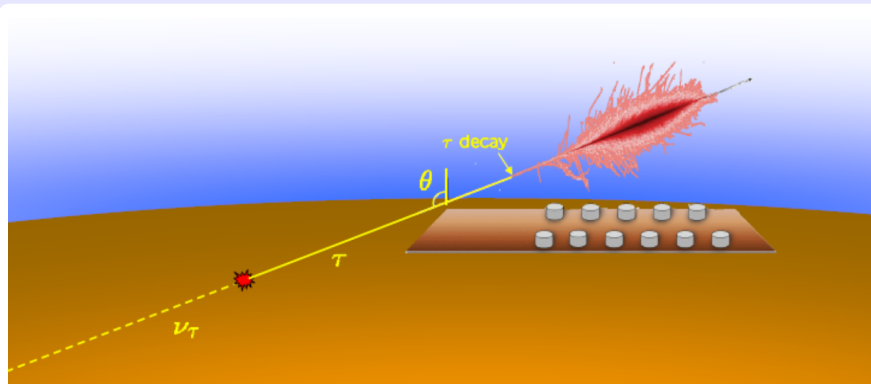
Signal

- Gerbes jeunes
- Composante EM importante.
- Courbure forte du front

Background

- Gerbes vieilles
- Composante muonique importante
- Courbure faible du front

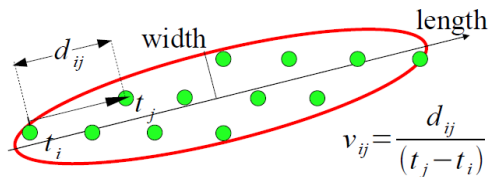
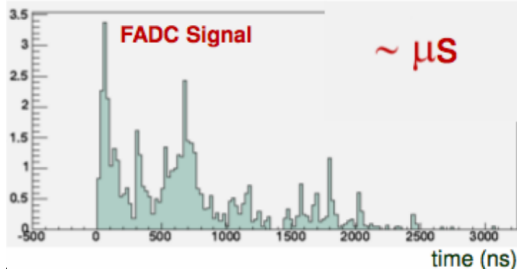
ν_τ rasants, le principe :



A 1EeV :

- $L_{int}(\nu) \approx 500 \text{ km} \rightarrow \theta > 95 \text{ deg}$: La Terre est opaque
- $L_{decay}(\tau) \approx 50 \text{ km}$
- $L_{loss}(\tau) \approx 10 \text{ km}$

Sélection d'évènements : SRecherche de gerbes *jeunes* et *très inclinées*
($90 \text{ deg} < \theta < 95 \text{ deg}$) :



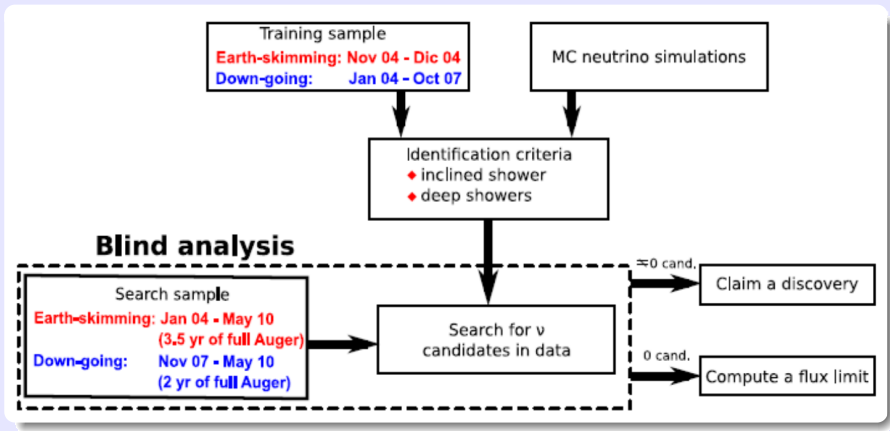
Gerbe jeune

- 13 bins of $25 \text{ ns} > 0.2 \text{ VEM}$
- Total signal/peak > 1.4

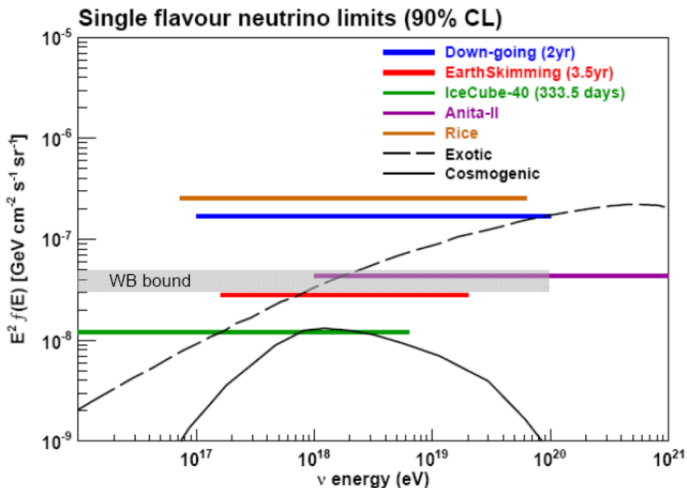
Très inclinées

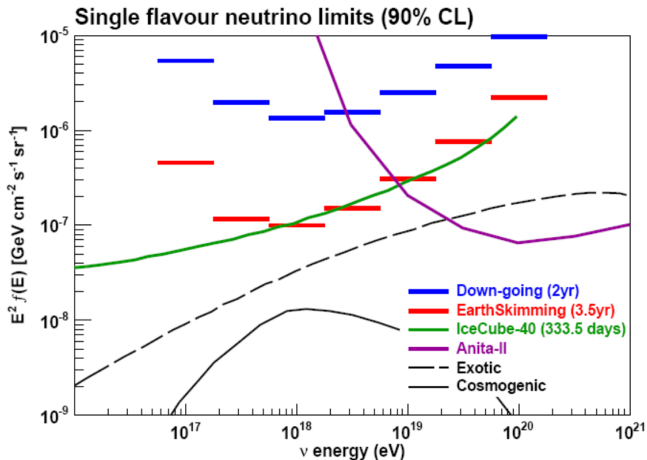
- $\text{length}/\text{width} > 5$
- $\langle v \rangle \in [0.29, 0.31] \text{ m/ns}$
- $\text{RMS}(v) < 0.08 \text{ m/ns}$

Analyse "en aveugle" et sélections basées sur un échantillon d'essai :
⇒ 0 candidats.



En l'absence de candidats \implies Limite sur les flux.



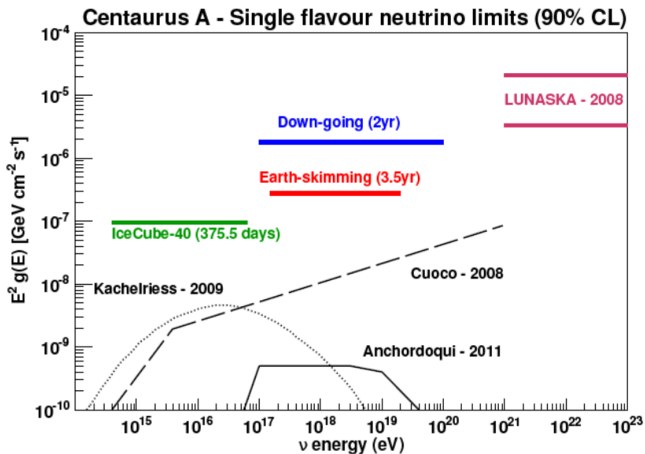


Meilleure limite dans cette gamme d'énergie !

Cette limite exclut la plupart des modèles "Top-Down"

GZK à portée d'observation \implies Contraintes très fortes sur les sources de RCUHE et leur distributions.

Limites Point Sources



Nombre d'évènements attendus inférieur à 0.1 pour les modèles actuels.

Améliorations statistiques désormais limitées

- Etude de nouveaux triggers plus efficaces (ToTd)
- Evaluation des bruits de fond physiques et “instrumentaux” $\ll 1$ événement
- Réduction des systématiques

Pour aller plus loin :

- Exploration de nouveaux canaux : ν_e rasants et effet LPM
- Confronter voir combiner les différentes observations : Neutrinos descendants/montants; Neutrinos/Photons etc...
- Aller au delà des simples observations. Par exemple : limites neutrinos UHE \implies limites sur les sections efficaces, contraintes sur de la nouvelle physique (travail en cours avec le groupe de physique théorique du LPSC).

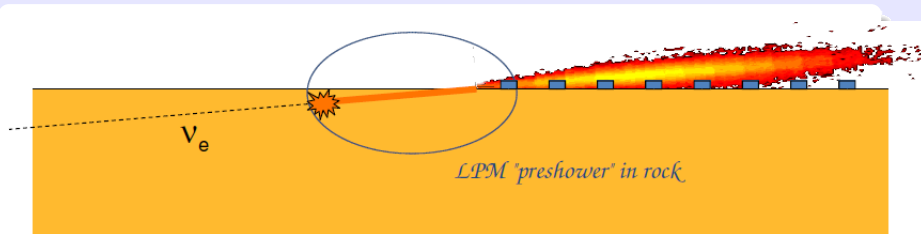
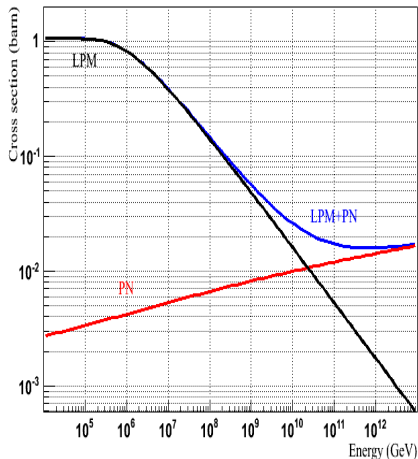


Figure: ν_e sous l'horizon (montant) interagissant dans l'écorce terrestre et produisant une gerbe EM, se développant en régime LPM dans la roche et émergeant dans le réseau de surface d'Auger.

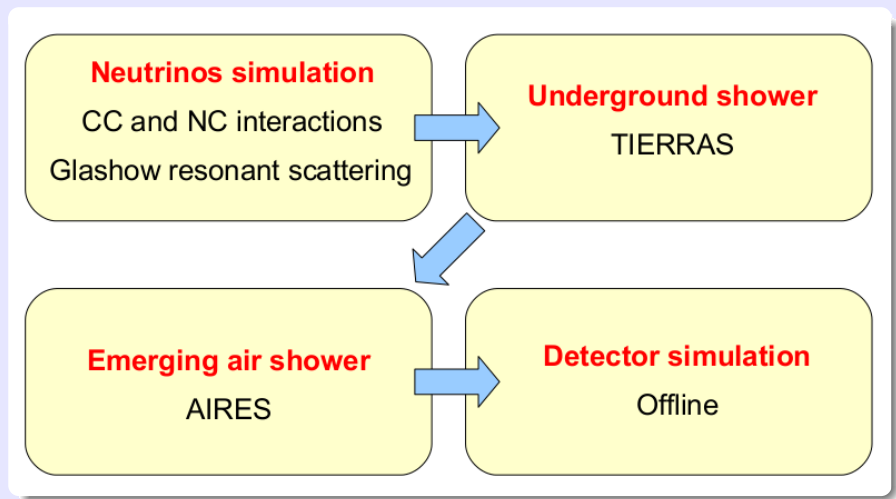
2 processus majeurs en compétition :

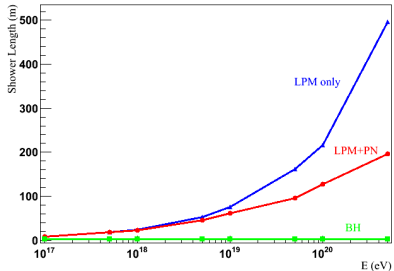
- Effet Landau Pomeranchuk Migdal (LPM)
- Interactions photonucléaires

Sections efficaces



- Energie d'intersection plus ou moins indépendante du milieu.
- Section efficace PN reste hautement **modèle dépendante !**
- Au delà de 10 EeV les interactions PN **dominent**.
- Interactions PN dans les codes existants : paramétrisations basées sur des **données anciennes**.
- Interactions PN **négligées** par HiRes. dans leur calcul de limite ν_e . (APJ 684 (2008) 790)



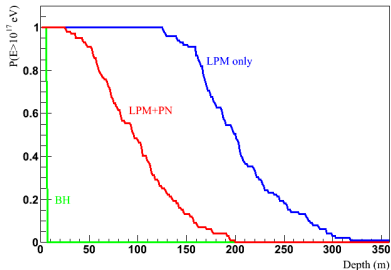


Longueur de gerbe

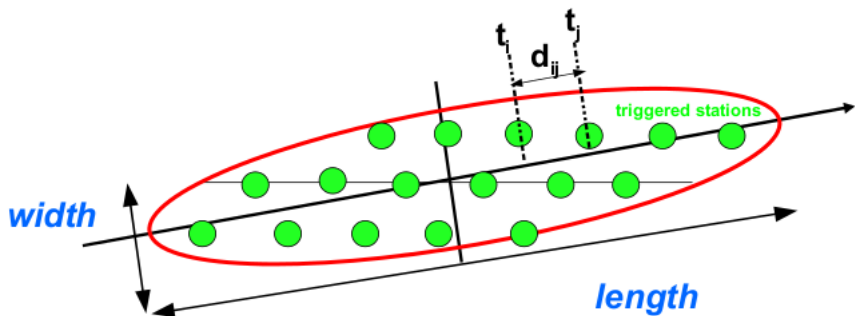
- En bon accord avec S. Klein et al. arXiv :1007.0039v2
- Augmentation de la longueur de gerbe limitée par les interactions PN

Probabilité d'émerger

Probabilité qu'une gerbe ayant une énergie initiale de 10^{20} eV d'émerger dans l'atmosphère avec une énergie supérieure à 10^{17} eV après avoir traversé une distance donnée de roche.

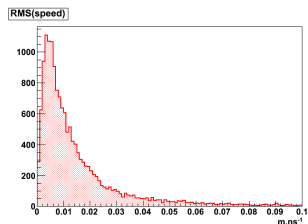
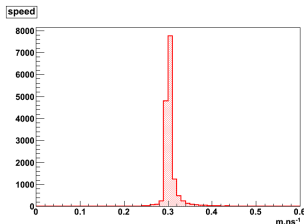
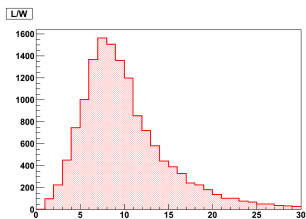


Sélection Neutrino selection :



- Longueur L et largeur W - axes majeur et mineur de l'ellipse d'inertie pondérée par le signal des stations..
- Vitesse : pour chaque paire de stations : distance projeté sur l'axe principal/différence entre les temps de départ ($d_{ij}/(t_j-t_i)$)
- Basé sur la selection neutrino "officielle".

Sélection standard appliquée aux événements ν_e



Empreinte allongée

$$L/W > 3$$

Front à c

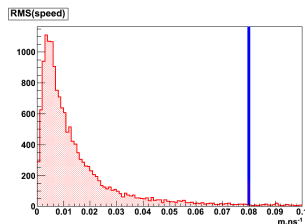
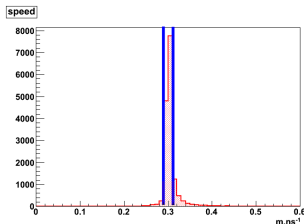
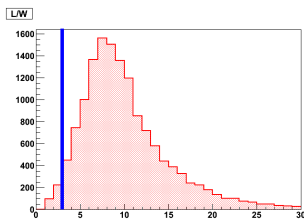
$$\langle v \rangle \in [0.29, 0.31] \text{ m.ns}^{-1}$$

Front à c

$$\text{RMS}(v) < 0.08 \text{ m.ns}^{-1}$$

Sélection standard utilisée pour les ν_τ compatible avec les événements ν_e !

Sélection standard appliquée aux événements ν_e



Empreinte allongée

$$L/W > 3$$

Front à c

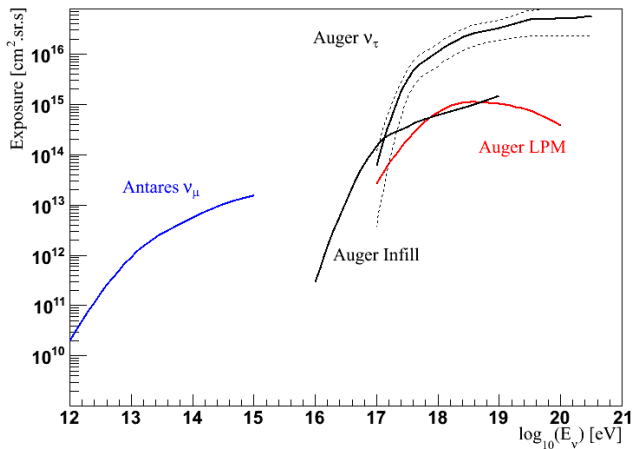
$$\langle v \rangle \in [0.29, 0.31] \text{ m.ns}^{-1}$$

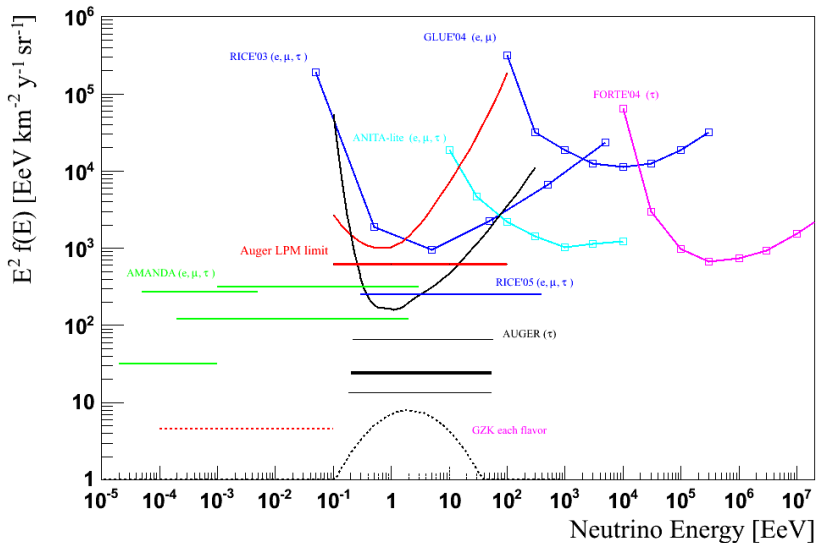
Front à c

$$\text{RMS}(v) < 0.08 \text{ m.ns}^{-1}$$

Sélection standard utilisée pour les ν_τ compatible avec les événements ν_e !

Exposure to LPM events



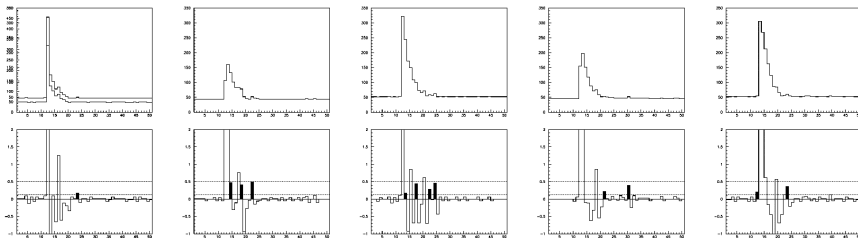


Limite sur le flux : $k_{90} = 1.97 \cdot 10^{-6} \text{ GeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$

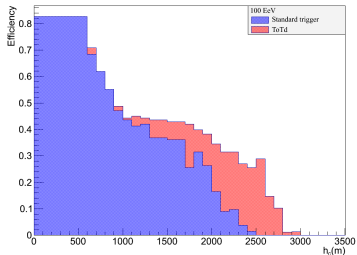
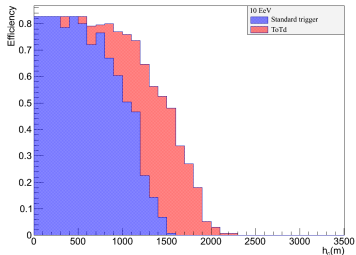
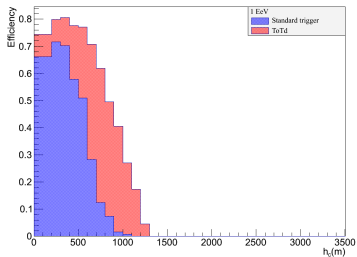
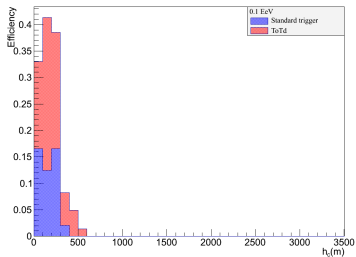
Le trigger ToTd

- Trigger ToTd basé sur la déconvolution des traces FADC (ToTd = ToT déconvolué).
- Déconvolution $A'_i = (A_i - fA_{i-1})/(1 - f)$ avec $\tau = 70$ ns et $f = \exp(-25/\tau) \sim 0.7$
- Fenêtre utilisée dans cette étude : 120 slots (3 μsec).
- Seuil utilisé dans cette étude (après déconvolution) = 0.2 VEM.

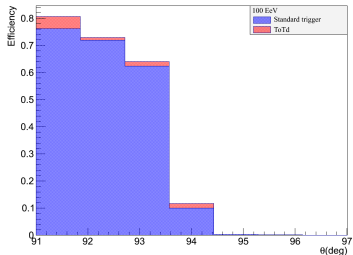
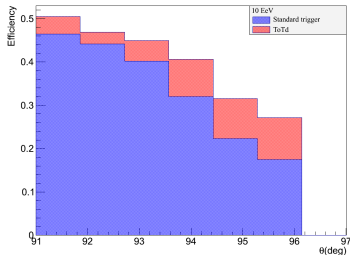
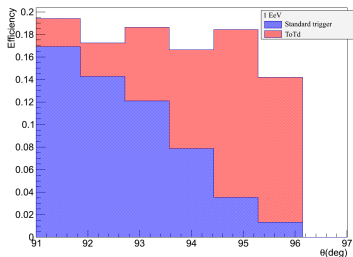
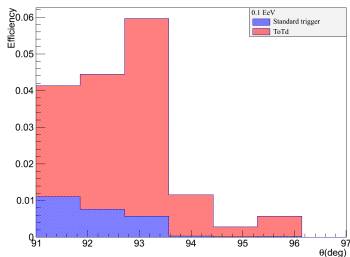
Exemple de traces FADC déconvoluées.



Efficacité de déclenchement pour les ν_τ



Efficacité de déclenchement pour les ν_e



Resultats

- Gain en efficacité : avec le ToTd : au moins ~ 3 fois plus efficace à 10^{17} eV.
- Evènements gagnés : essentiellement des gerbes de basses énergie ou produites à haute altitude.

Reste à faire :

- Même étude avec les neutrinos descendants.
- Evaluer le gain en acceptance.
- Une modification des variables de sélection est elle nécessaire avec le ToTd.

Bilan

- L'observatoire Pierre Auger à une sensibilité **non négligeable** aux UHE ν .
- Les flux GZK sont à **portée d'observation**.
- Les interactions photonucléaires lorsqu'on considère les gerbes en régime LPM sont non négligeables.
- Les gerbes induites par des ν_e montant sont **compatibles avec les sélections sur les ν_τ** .
- Obtention d'une limite **indépendante** sur une autre **saveur** de neutrinos..
- Combinaison des limites ν_e et ν_τ : amélioration de l'exposition ? Erreurs Systematiques?

To Do list :

- Quelle est la contribution des ν_e **traversant les Andes** aux évènements descendants?
- Mise à jour des interactions photonucléaires dans les codes de simulation de gerbes.
- Influence de la **section efficace photonucléaire** sur le nombre de muons au sol ?

LPM Characteristic Energy :

In standard rock :

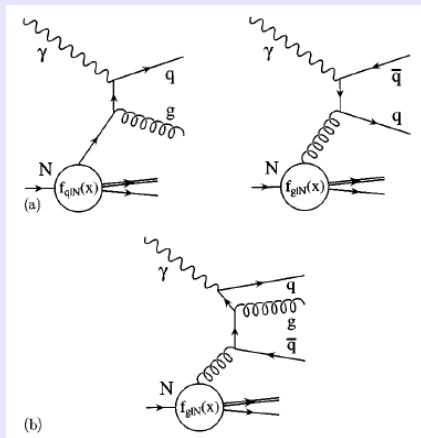
$$E_{LPM} = \frac{m^4 X_0}{E_s^2} = 7.7 \text{TeV/cm} \cdot X_0 \simeq 77 \text{TeV}$$

Increase of the radiation length

Under LPM regime radiation length increased like :

$$X = X_0 \sqrt{\frac{E}{5E_{LPM}}}$$

At 10^{18} eV, the radiation length rise from 0.1 m without LPM to 22 m !



- At UHE, photons can interact hadronically with a nucleus of the medium (via direct or resolved process).
- Several different interaction models and cross sections
- Photonuclear cross section dominates pair production cross section.

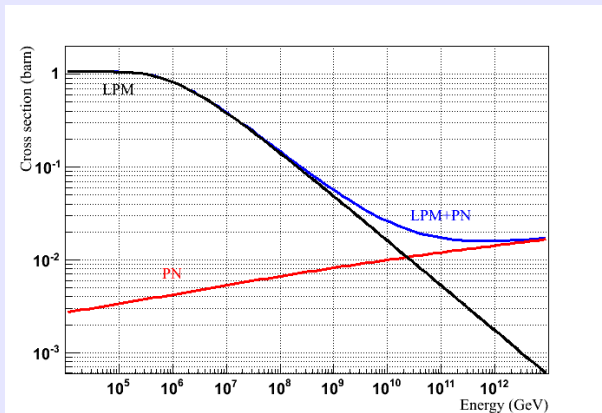
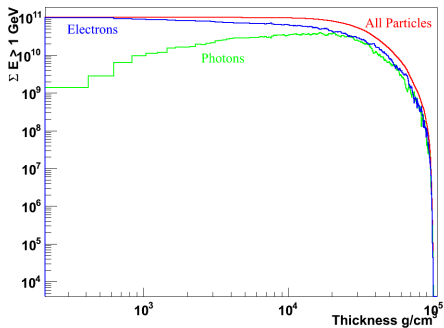
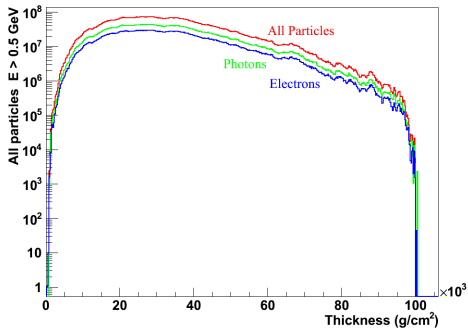


Figure: Pair production (black) and photonuclear interaction (red) cross sections in standard rock used in TIERRAS

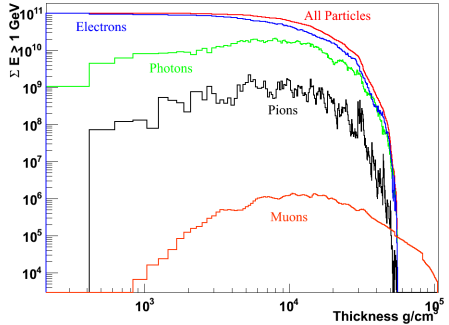
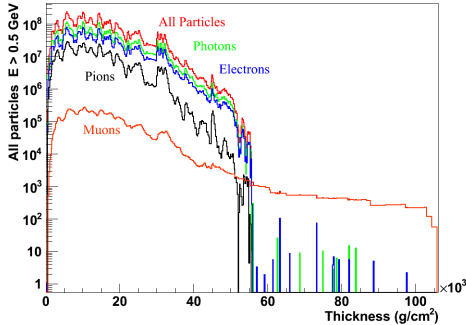
- PN cross section used in TIERRAS \neq modern calculations.

LPM only



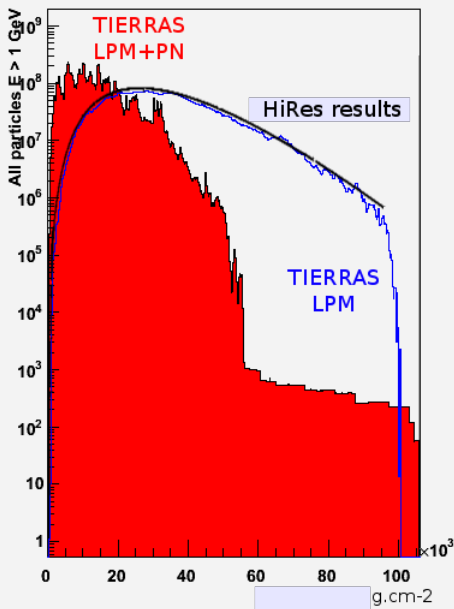
Longitudinal profile (left) and energy (right) for shower induced by a 100EeV electron (LPM only).

LPM+PN



Longitudinal profile (left) and energy (right) for shower induced by a 100EeV electron (LPM + PN).

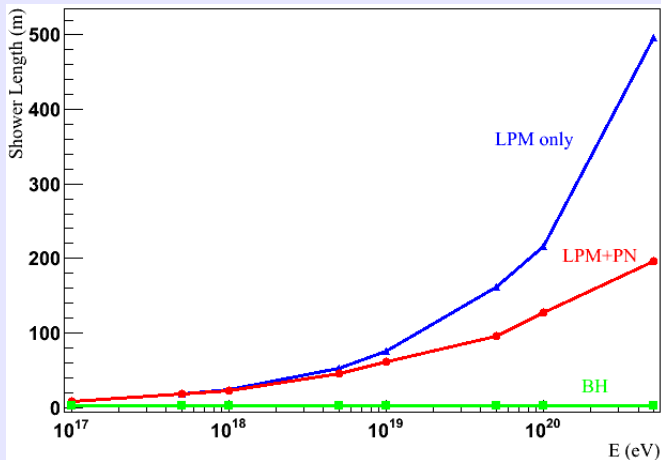
- Particular need of detailed LPM+PN underground shower simulation mentioned in S. Klein : arXiv :1012.1407v1



> Tierras vs. HiRes

Longitudinal profiles for 100 showers induced by 10^{20} eV electrons with TIERRAS (with and without photoproduction) compared to profile given in HiRes paper.

Shower length



Good agreement with S. Klein et al. arXiv :1007.0039v2

Emerging energy

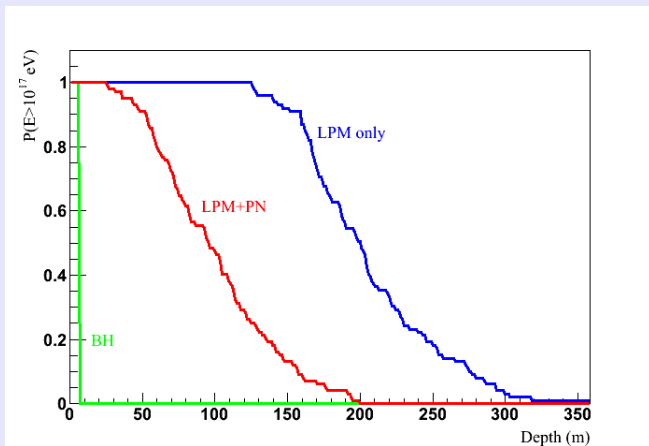


Figure: Probability for a shower of primary energy 10^{20} eV to emerge into the atmosphere with an energy above 10^{17} eV after crossing a certain amount of rock.

Emerging energy

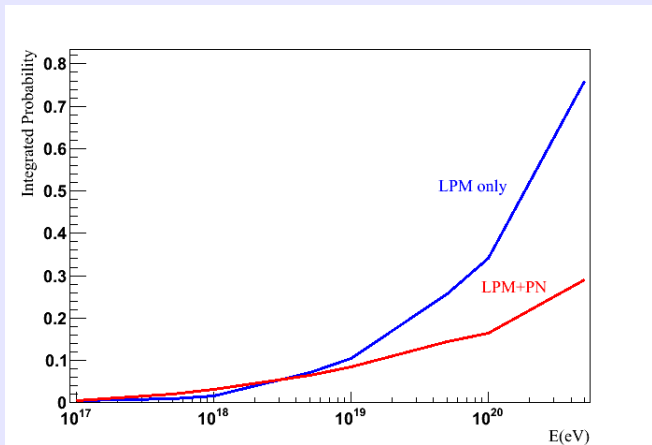


Figure: Integrated probability to emerge into the atmosphere with an energy above 10^{17} eV for an electron produced between 0 and 600 m of the surface

Aperture

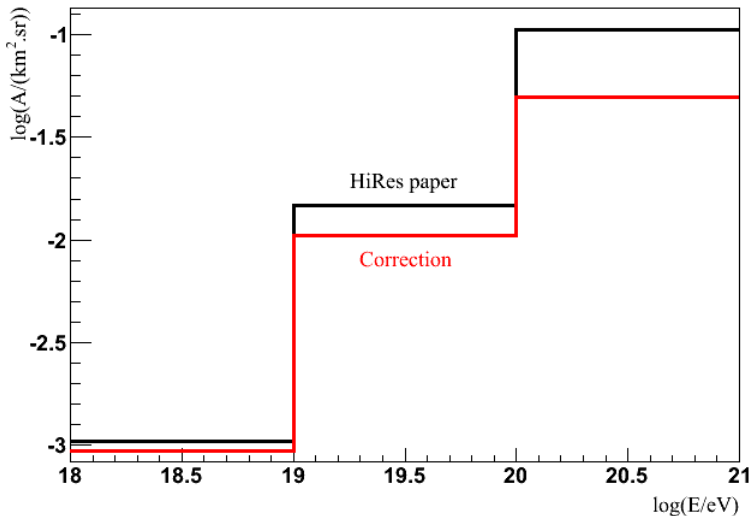


Figure: HiRes aperture to ν_e event. Original and corrected aperture.

Simulation of neutrino propagation in rock.

- CC and NC interactions
- Glashow resonant scattering



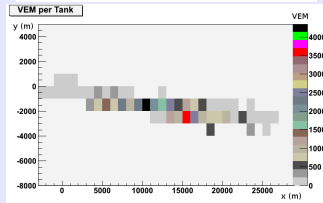
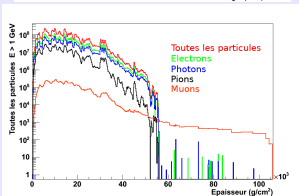
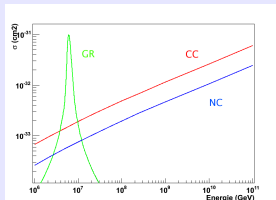
Injection module to TIERRAS

Underground showers simulation
TIERRAS

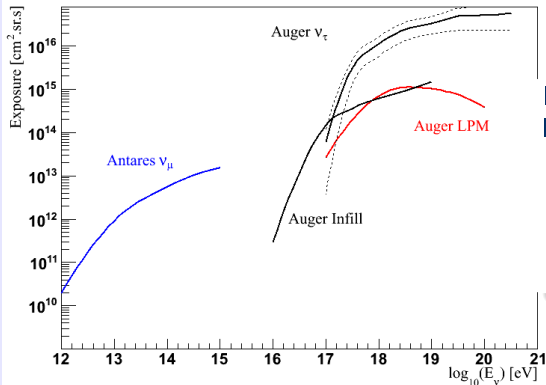


Injection module to AIRES

Air shower simulation
AIRES



Exposure to LPM events



Evaluation of the exposure to LPM event.

- Energy density at ground
- Evaluation of the trigger efficiency
- Exposure for one year

Next step -> SD simulation using offline

- Photonuclear effect is non negligible. HiRes limit on ν_e flux is probably overestimated.
- First exposure evaluation to LPM event
- Detector simulation and horizontal unthinning -> next step to identify LPM event and evaluate precisely the exposure.

To Do List

- Check that upgoing and nearly horizontal particles are kept by the Cached Shower regenerator (GAP-2008-064)
- Effect of ToTd on ν_e with lower energy? (GAP 2009-179)
- Evaluation of the exposure with different interactions models.