

HELEN PROGRAM

REPORTE DE ACTIVIDADES

Grant Holder: **Edith Castillo Ruiz**

Inicio de la estancia: **25 de Julio del 2006**

Término de la estancia: **29 de Septiembre del 2006**

Work Program: **AUGER. Computer simulations of the Auger Observatory.**

Host Institution: **CINVESTAV, Mexico**

Primera Etapa:

En la primera etapa de la estancia se hizo una investigación bibliográfica acerca de la detección de muones en el PAO (Pierre Auger Observatory) ([1]-[7]). Asimismo, se utilizó el sistema de simulación de cascadas aéreas AIRES [8] para estudiar el desarrollo longitudinal de rayos gamma y partículas cargadas (γ , e^+ , e^- , μ^+ , μ^- , π^+ , π^- , K^+ , K^-) producidas por dos tipos diferentes de partículas primarias (protones, núcleos de Fe) y distintas energías primarias (1EeV, 10EeV y 100 EeV). El aprendizaje del programa ROOT [9] hizo posible la visualización de los resultados de las simulaciones realizadas con AIRES.

Variación del tipo de partícula primaria:

Se trabajó con protones y núcleos de Fe. El comportamiento de las curvas de desarrollo longitudinal es similar para ambos tipos de primarias, coincidiendo en orden de magnitud en el número total de partículas. La diferencia radica en el máximo de la cascada. Como se puede apreciar en la **Fig.1**, (a) un protón primario de 1EeV produce un máximo alrededor de 800 g/cm², mientras que para (b) un núcleo de Fe de la misma energía, el máximo de la cascada se da alrededor de los 680 g/cm² de profundidad atmosférica. Esto implica que los núcleos de Fe generan cascadas cuyo máximo acontece a una menor profundidad atmosférica. De esta forma se verifica que el máximo de la cascada es un discriminante para la identificación de la primaria que origina la cascada aérea.

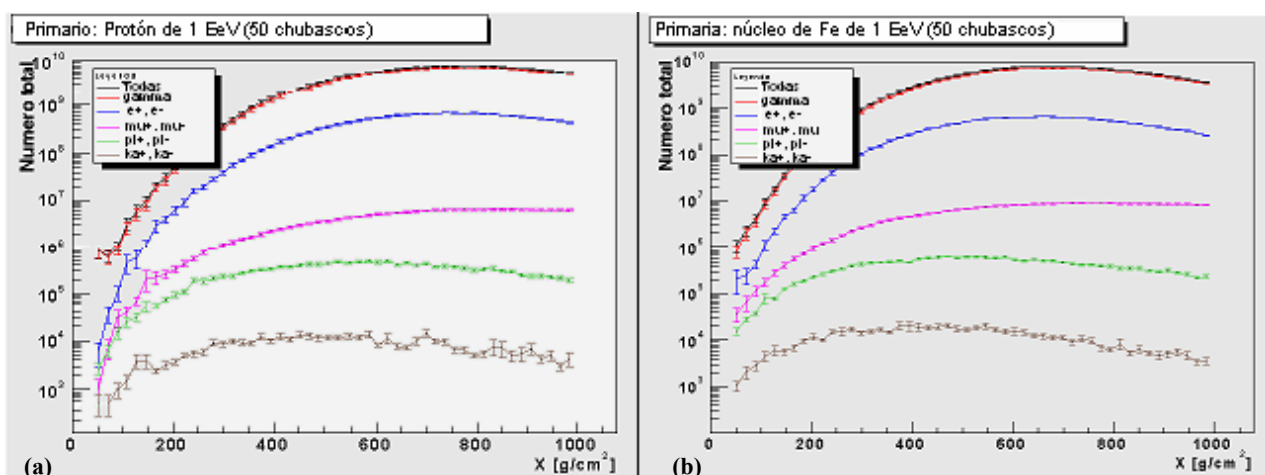


Fig1. Desarrollos longitudinales de partículas cargadas obtenidos con AIRES para (a) un protón primario de 1 EeV y (b) un núcleo de Fe primario de 1 EeV. En ambos casos se simularon 50 chubascos o cascadas.

Variación de la energía:

La variación en la energía primaria altera el número total de rayos gamma y partículas cargadas incrementándolo aproximadamente en un factor de 10 por cada orden añadido a la energía primaria. De este

modo se comprueba que el número total de partículas (en especial de aquellas detectadas por el observatorio: γ , e^+ , e^- , μ^+ , μ^-) caracteriza a la energía primaria. En este caso se observa también un corrimiento en el máximo de la cascada: cascadas más energéticas producen sus máximos a una mayor profundidad en la atmósfera. En la **Fig.2[3]** se muestran los desarrollos longitudinales para protones [núcleos de Fe] primarios de 1 EeV **(a)**, 10 EeV **(b)** y 100 EeV .

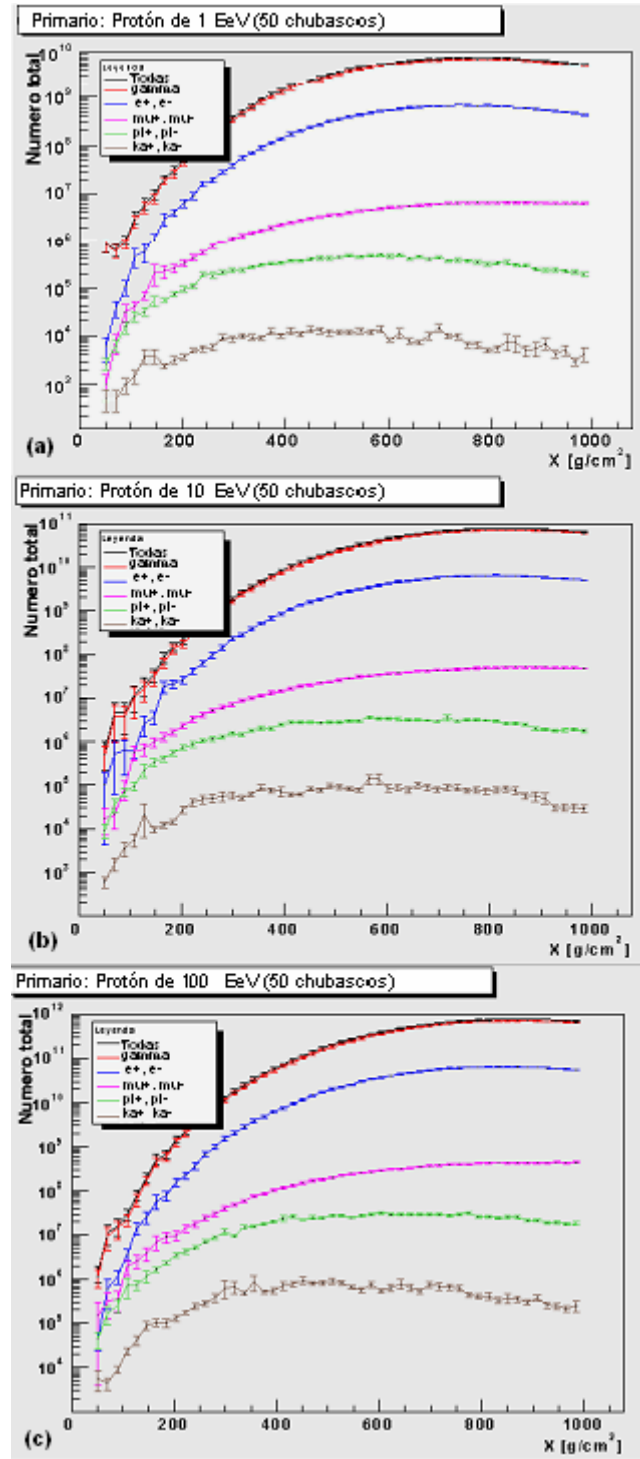


Fig2. Desarrollos longitudinales de partículas cargadas obtenidos con AIRES para un protón primario de **(a)** 1 EeV, **(b)** 10 EeV, y **(c)** 100 EeV. En todos los casos se simularon 50 chubascos.

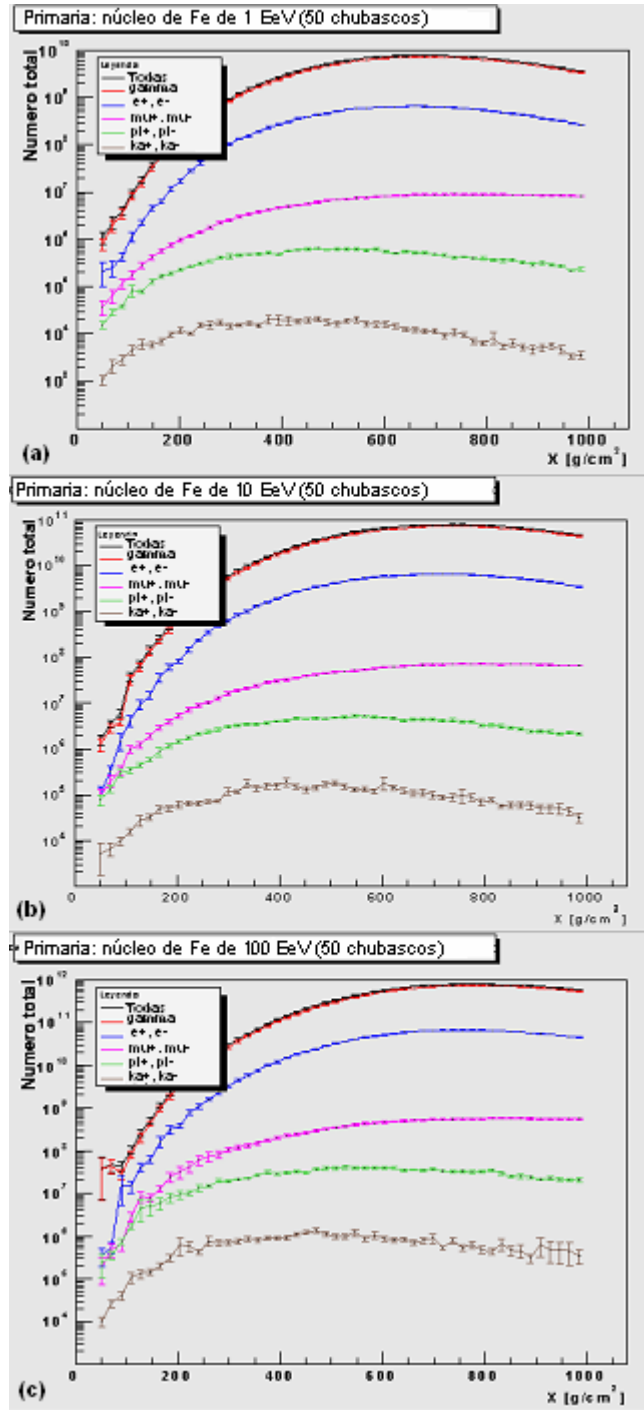


Fig3. Desarrollos longitudinales de partículas cargadas obtenidos con AIRES para un núcleo de Fe primario de (a) 1 EeV, (b) 10 EeV, y (c) 100 EeV. En todos los casos se simularon 50 chubascos.

La motivación de este análisis fue la contradicción entre las predicciones realizadas con AIRES y los resultados experimentales arrojados por el PAO, los cuales indican una cantidad total de muones 20% por encima de la prevista. Esta desestimación del número de muones estaría directamente relacionado con el modelo hadrónico (Sybill ó QGSJET) utilizado por AIRES para la simulación de cascadas hadrónicas. Este estudio constituye la base para investigaciones futuras acerca del superávit de muones en el PAO.

Segunda Etapa:

En la segunda parte de la estancia se inició la construcción de un código en F77 para la simulación de cascadas horizontales detectables por el PAO originadas por neutrinos muónicos ($\mu^+ + \mu^-$) ultraenergéticos. El objetivo de este trabajo es la predicción de la razón anual de estos eventos para diferentes flujos de neutrinos extraterrestres. Particularmente, se trabajó con el flujo de neutrinos muónicos de GRB (Gamma Ray Bursts).

Previamente a la elaboración del código se llevó a cabo una investigación bibliográfica acerca de los modelos de flujos de neutrinos extraterrestres [10], el sistema de detección del PAO y su capacidad para la observación de neutrinos muónicos [5,10,11,12], y el cálculo general de la razón de eventos para neutrinos muónicos ultraenergéticos [10].

Se consideraron reacciones de corriente cargada (CC):

$$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + N \rightarrow \mu^-(\mu^+) + X \quad (1)$$

y reacciones de corriente neutra (NC):

$$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + N \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + X \quad (2)$$

En particular, en el PAO la razón total de eventos de neutrinos muónicos (dada en s) adquiere la forma [11]:

$$Razón = N_A \rho_{aire} \int_{E_{sh}^{th}}^{E_{sh}^{max}} dE_{sh} \int_{y_{min}}^1 dy \frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu}(E_\nu) \frac{d\sigma_{\nu N}^{Tot}}{dy}(E_\nu, y) A(E_{sh}) \quad (3)$$

donde (unidades entre paréntesis):

$$\nu = \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu,$$

$N_A = 6.022 \times 10^{23}$, es el número de Avogadro,

$\rho_{aire} = 10^{-3} \text{ (g/cm}^3\text{)}$, es la densidad del aire,

$E_{sh} \text{ (GeV)}$ es la energía de la cascada (E_{sh}^{th} y E_{sh}^{max} : energías umbral y máxima de la cascada),

$E_\nu \text{ (GeV)}$ es la energía del neutrino,

y es el parámetro de inelasticidad que en este caso puede tomarse como $y = E_{sh} / E_\nu$ ($y_{min} = E_{sh}^{th} / E_{sh}^{max}$),

$\frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu}$ es el espectro diferencial de neutrinos muónicos que llega a la Tierra ($[s \text{ cm}^2 \text{ sr GeV}]^{-1}$),

$\frac{d\sigma_{\nu N}^{Tot}}{dy}$ es la sección eficaz total, CC + NC, diferenciada respecto a y (cm^2), y

A es la aceptación del detector ($\text{cm}^3 \text{ de aire equivalente. sr}$).

Para este trabajo se tomó $E_{sh}^{th} = 10^8 \text{ GeV}$ y $E_{sh}^{max} = 10^{11} \text{ GeV}$, en concordancia con las suposiciones de las referencias [10] y [11].

La forma explícita del flujo de neutrinos muónicos de GRB [10,19,20] es

$$\frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu}(E_\nu) = \begin{cases} (4.0 \times 10^{-13}) E_\nu^{-1}, & E_\nu < 10^5 \text{ GeV} \\ (4.0 \times 10^{-8}) E_\nu^{-2}, & 10^5 < E_\nu < 10^7 \text{ GeV} \\ (4.0 \times 10^{-1}) E_\nu^{-3}, & E_\nu > 10^7 \text{ GeV} \end{cases} \quad (4)$$

Para la estimación de la Aceptancia ([13]-[16]) se emplearon los resultados de Pierre Billoir [16], ajustando los valores dados en la referencia [16] a una función de la forma

$$A(E_{sh}) = \begin{cases} \frac{10^{11} \times E_{sh}}{3.9 + 1.91 \times 10^{-9} E_{sh}}, & E_\nu < 10^{10} \text{ GeV} \\ 4.32 \times 10^{19}, & E_\nu \geq 10^{10} \text{ GeV} \end{cases} \quad (5)$$

Dadas las energías ultra altas consideradas, $E_{sh} \in [10^8, 10^{11}] \text{ GeV}$, el cálculo de $d\sigma_{\nu N}^{Tot}(E_\nu, y)/dy$ involucró la revisión de la teoría de DIS (Deep Inelastic Scattering) [17]. En la parte computacional se utilizó el paquete CTEQ6L1[18], para lo cual fue necesario el estudio de su estructura y manejo.

Los resultados obtenidos para el flujo de neutrinos muónicos de GRB, (3)-(5) se muestran en la **Tabla 1**:

GRB	ν_μ (eventos/año)		$\bar{\nu}_\mu$ (eventos/año)		$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ (eventos/año)
$E_{sh}^{th} \text{ (GeV)}$	CC	NC	CC	NC	Total
10^8	2.077×10^{-3}	0.956×10^{-3}	2.073×10^{-3}	0.955×10^{-3}	6.061×10^{-3}
10^9	1.794×10^{-5}	0.828×10^{-5}	1.795×10^{-5}	0.828×10^{-5}	0.525×10^{-5}

Tabla 1. Razón de eventos de neutrinos muónicos en el PAO para reacciones de corriente cargada (CC) y de corriente neutra (NC). Se muestran los resultados para dos energías umbrales: $E_{sh}^{th} = 10^8, 10^9, \text{ GeV}$.

Aunque no se hayan obtenido números muy alentadores para el caso particular de neutrinos de GRB (razones anuales despreciables, al igual que en la referencia [10]), el código desarrollado permitirá estimar las razones de eventos detectables en el PAO originados por neutrinos muónicos ultraenergéticos provenientes de distintas fuentes, tales como los AGN (Active Galactic Nuclei), TD (Topological Defects) y de la interacción de los rayos cósmicos con el Fondo Cósmico de Microondas, cuyos valores sí serían visibles para el observatorio [10].

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Programa HELEN por hacer posible la realización de este proyecto de investigación. Agradecemos también al Centro de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico (CINVESTAV) por la hospitalidad y apoyo brindados durante la permanencia en sus instalaciones, en especial al Dr. Arnulfo Zepeda y a Rodrigo Pelayo por sus enseñanzas y paciencia. Nuestros agradecimientos al Dr. Alberto Gago, a la DAI-PUCP (Dirección de Apoyo a la investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú) y a la PUCP. Un agradecimiento especial a Juan Carlos Arteaga por su amabilidad, consejos y orientación.

Referencias

- [1] P. L. Biermann, G. Sigl, Introduction to Cosmic Rays, astro-ph/0202425
- [2] Pierre Auger Observatory. <http://www.auger.org.ar>
- [3] Colaboración Auger, The Pierre Auger Project - Design Report. http://www.auger.org/reports/design_report.htmlX.
- [4] Bertou, Performance of the Pierre Auger Observatory surface array; J. Matthews, A description of some ultra high energy cosmic rays observed with the Pierre Auger Observatory; Pierre Auger Collaboration, ICRC 2005 (Pune), Auger Papers, http://www.auger.org/reports/icrc_2005.html
- [5] L. Nellen, Detection of very inclined showers with the Auger Observatory; Pierre Auger Collaboration, ICRC 2005 (Pune), Auger Papers, http://www.auger.org/reports/icrc_2005.html
- [6] P. Allison et al.: Observing muon decays in water Cherenkov detectors at the Pierre Auger Observatory; M. Aglietta et al.: Calibration of the surface array of the Pierre Auger Observatory; M. Aglietta et al.: Response of the Pierre Auger Observatory water Cherenkov tanks to shower particles; Pierre Auger Collaboration, ICRC 2005 (Pune), Auger Papers, http://www.auger.org/reports/icrc_2005.html
- [7] P. K. F. Grieder, Cosmic Rays at Earth, Elsevier Science (2001)
- [8] S. C. Sciuto, AIRES, A system for air shower simulations, User's guide and reference manual, Departamento de Física, Universidad Nacional de la Plata, Argentina (2002). Documentación y software disponible en <http://www.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/>
- [9] R. Brun, F. Rademakers, P. Canal, I. Antcheva, D. Buskulic, ROOT, an object-oriented data analysis framework, Users Guide 5.12 (2006). Documentación y software disponible en <http://root.cern.ch/>
- [10] J. C. Arteaga, Estimación del flujo detectable de neutrinos astrofísicos de muy alta energía en detectores Cherenkov y de chubascos atmosféricos, CINVESTAV (2005)
- [11] R. Ghandi, C. Quigg, M. H. Reno e Ina Sarcevic, Neutrino interactions at ultrahigh energies, Phys. Rev. 58D, 093009 (1998)
- [12] L. Anchordoqui, T. Han, D. Hooper, S. Sarkar, Exotic Neutrino interactions at the Pierre Auger Observatory, hep-ph/0508312 (2005)
- [13] J. C. Dias, M. G. do Amaral y R. C. Shellard, Weakly interacting particles viewed by fluorescence detectors, nota técnica del Auger GAP-2000-058, <http://www.auger.org>
- [14] K. S. Capelle, J. W. Cronin, G. Parente y E. Zas, On the detection of ultrahigh energy neutrinos with the Auger Observatory, Astropart. Phys. 8, 321 (1998)
- [15] G. Parente, E. Zas, Neutrino induced events in the Pierre Auger detector, astro-ph/9606091
- [16] Pierre Billoir, Estimation of the acceptance of the Auger ground detector to quasi-horizontal showers induced deeply in the atmosphere, nota técnica del Auger GAP-1997-049, <http://www.auger.org>
- [17] F. Halzen y A. D. Martin, Quarks and leptons: An introductory course in modern particle physics. Wiley, New York (1984)
- [18] J. Pumplin et al., New Generation of Parton Distribution with Uncertainties from Global QCD Analysis, JHEP 07, 012 (2002). Documentación y software disponible en <http://user.pa.msu.edu/wkt/cteq/cteq6/cteq6pdf.html>
- [19] E. Waxman y J. Bahcall, High Energy neutrinos from astrophysical sources: An upper bound, Phys. Rev. 59D, 023002 (1998)
- [20] E. Waxman y J. Bahcall, High Energy neutrinos from cosmological gamma-ray burst fireballs, Phys. Rev. Lett. D78, 2292 (1997)