

# INFLUENCIA DE LOS MODELOS HADRONICOS DE ALTAS ENERGIAS EN LA DETERMINACION DE LA COMPOSICION DE LOS RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA ALTA ENERGIA

## IMPORTANCE OF THE HIGH ENERGY HADRONIC MODELS ON THE DETERMINATION OF THE MASS COMPOSITION OF ULTRA-HIGH ENERGY COSMIC RAYS

A.D. Supanitsky<sup>a\*</sup>, D.G. Melo<sup>a</sup>, M.I. Micheletti<sup>a,b</sup>, And A. Etchegoyen<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio Tandar, Comisión Nacional de Energía Atómica, <sup>b</sup>CONICET  
Av. General Paz 1499 (1650), San Martín, Buenos Aires  
*e-mail: supanits@tandar.cnea.gov.ar*

Analizamos los parámetros  $X_{max}$  (profundidad atmosférica correspondiente al máximo desarrollo de la lluvia producida por rayos cósmicos) y  $N_{\mu}$  (número de muones de la lluvia) para distintos modelos hadrónicos y distinta composición química del rayo cósmico primario. Obtenemos que la medición simultánea de  $X_{max}$  y  $N_{\mu}$  representa un aporte significativo para el esclarecimiento simultáneo de la composición química del primario y del modelo hadrónico. Se muestra entonces el interés que presenta la implementación de medidores de muones en el Observatorio Auger.

We analyze the parameters  $X_{max}$  (atmospheric depth corresponding to the maximum development of the cosmic ray shower) and  $N_{\mu}$  (number of muons of the shower) for different hadronic models and different chemical composition of the primary cosmic ray. We obtain that the simultaneous measurement of  $X_{max}$  and  $N_{\mu}$  represents a significant contribution in the simultaneous understanding of the chemical composition of the primary and of the hadronic model. Thus, we show the interest in the implementation of muon detectors in the Auger Observatory.

*Palabras Claves:* Rayos cósmicos; Composición; Modelos Hadronicos

*Keywords:* Cosmic Rays; Mass Composition; Hadronic Models

### I. INTRODUCCIÓN

El Observatorio Pierre Auger, actualmente en construcción en Malargüe Provincia de Mendoza, tiene como objetivo el estudio de los rayos cósmicos de ultra alta energía ( $E > 1$  EeV). Dichos rayos interactúan con las moléculas de la atmósfera produciendo lluvias de partículas o chubascos, las cuales son detectadas por medio de detectores de superficie y por telescopios de fluorescencia. A energías tan altas no se conocen las interacciones hadrónicas por no poder éstas ser alcanzadas en experimentos con aceleradores. Sin embargo, existen modelos que extrapolan y describen las interacciones requeridas. Los más comúnmente usados son Sibyll y QGSJET01. En este trabajo se estudia, por medio de simulaciones, la influencia de los modelos de interacción hadrónica en la determinación de la composición química de los rayos cósmicos. Los dos parámetros experimentales considerados son  $X_{max}$  (la profundidad atmosférica donde la lluvia adquiere su máximo desarrollo) y el número de muones de la lluvia.

### II. MÉTODOS Y RESULTADOS

Los chubascos cósmicos fueron simulados usando el programa de Monte Carlo ARES versión 2.4.0<sup>(1)</sup>. Se generaron cuatro conjuntos de 50 lluvias cada uno, para

primarios compuestos de protones y hierros con los modelos hadrónicos QGSJET versión 01<sup>(2)</sup> y SIBYLL versión 2.1<sup>(3)</sup>; las lluvias se generaron a una energía de  $3 \times 10^{18}$  eV (3 EeV) y ángulo cenital de  $30^{\circ}$ . Las directivas del programa fueron fijadas a fin de evaluar el perfil longitudinal de partículas en 400 niveles (espaciados cada  $10 \text{ g/cm}^2$ ), desde la parte superior de la atmósfera (altitud de  $\sim 112$  km) y el nivel del suelo donde se encuentran los detectores (altitud de  $\sim 1,4$  km), con un “thinning” relativo de  $10^{-6}$ <sup>(1)</sup>.

La simulación de la respuesta de los telescopios de fluorescencia del Proyecto Auger ante una lluvia de partículas originada por un rayo cósmico de muy alta energía se efectuó mediante los programas de Monte Carlo FDSim y FDTriggerSim<sup>(4)</sup>. FDSim se adaptó para leer directamente perfiles longitudinales de partículas generados externamente mediante el programa ARES, de esta manera las lluvias de partículas que utilizamos son mucho más reales que las dadas, por ejemplo, por simples parametrizaciones de funciones tipo Gaisser – Hillas<sup>(5)</sup>.

Cada conjunto de 50 lluvias de un mismo tipo (primario y modelo hadrónico) fue distribuido 100 veces en forma aleatoria dentro de una circunferencia de 3 km de radio posicionada a una distancia de 7 km del

\* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

telescopio. El punto de impacto de las lluvias en el suelo se varió aleatoriamente de manera uniforme al igual que la distribución de su ángulo azimutal, este último se halla comprendido entre  $0^{\circ}$  y  $360^{\circ}$ . Se aumenta así significativamente la estadística de las simulaciones con un costo reducido del tiempo de máquina utilizando un idéntico y pequeño conjunto de lluvias generadas con AIRES. A raíz de esto, el número final de eventos simulados para cada conjunto de lluvias es de 5000.

Se consideraron en las simulaciones de la respuesta de los telescopios: i) el nivel de fotones que tiene el cielo nocturno como fondo, ii) los efectos de atenuación atmosférica para atmósfera promedio, y iii) la calibración absoluta del detector. La reconstrucción de cada lluvia fue realizada dos veces, i) monocularmente, o sea solamente con la información del telescopio y ii) un símil de reconstrucción híbrida (utilizando ambos detectores, de superficie y de fluorescencia) asumiendo la geometría real del evento. No se encontró una diferencia significativa ni con el tipo de atmósfera ni con el tipo de geometría utilizada. Un perfil longitudinal típico se muestra en la Fig. 1.

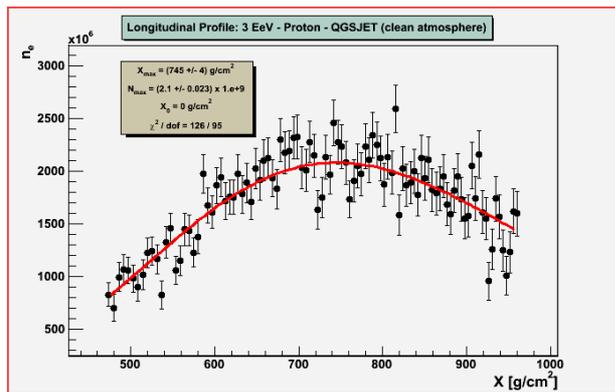


Figura 1. Perfil longitudinal de partículas, número de partículas cargadas vs. profundidad atmosférica (reconstrucción monocular).

Fueron considerados los siguientes cortes para garantizar la calidad de las lluvias reconstruidas:

- 1) Ajuste para la geometría de la lluvia, convergencia con un  $\chi^2 / ndof \leq 4$  ( $ndof$  = grados de libertad).
- 2) Ajuste para el perfil longitudinal, convergencia con un  $\chi^2 / ndof \leq 4$ .
- 3) Contaminación de luz Cherenkov  $\leq 25$  %.
- 4)  $X_{max}$  dentro del FOV (Campo de Visión) y dentro de los  $80 \text{ g/cm}^2$  respecto a los límites del FOV.
- 5) Mínima cantidad de PMT's (fotomultiplicadores) con señal = 10.

En la Fig. 2 se muestran las distribuciones correspondientes a  $\Delta\theta$  (donde  $\theta$  es el ángulo cenital del eje de la lluvia) y a  $\Delta X_{max}$  (estas cantidades se definen como las diferencias entre los valores reconstruidos y simulados,  $\theta^{rec} - \theta^{sim}$  y  $X_{max}^{rec} - X_{max}^{sim}$ ) correspondiente a 5000 eventos con hierro como primario generados con QGSJET para el caso de una atmósfera limpia; en la región rayada se muestran todos los eventos (antes de

aplicar los cortes de calidad), mientras que en la región sombreada, aquellos que pasan los cortes.

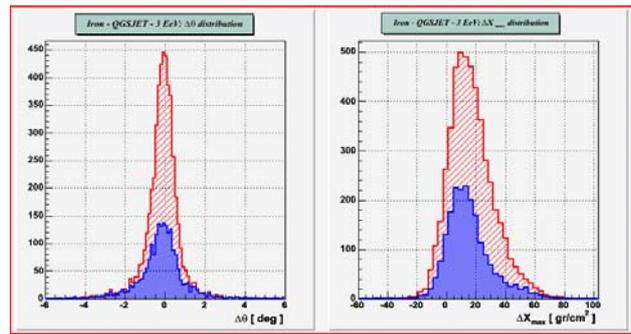


Figura 2. Distribuciones de la reconstrucción monocular. Hierros generados con QGSJET para una atmósfera limpia.

Como fuera mencionado anteriormente, el número de muones de la lluvia fue el otro parámetro analizado en este trabajo.

Auger no tiene instalado detectores de muones, pero hay un significativo interés de implementarlos. El diseño de base de dichos contadores consiste en centelladores de  $30 \text{ m}^2$  cada uno de ellos enterrado en la cercanía de un detector de superficie, emplazados a  $750 \text{ m}$  de distancia entre sí, o sea la mitad de la actual en Auger. Ya se han construido prototipos basados en varillas centelladoras de  $4,1 \text{ cm} \times 2 \text{ m}$  y  $1 \text{ cm}$  de espesor, con fibras ópticas para canalizar la luz hacia tubos fotomultiplicadores, similares a los usados por la Colaboración MINOS <sup>(6)</sup>. Esta fina segmentación es para intentar evitar la llegada de más de un muón en cada segmento en el tiempo de procesamiento del sistema.

La pérdida de energía de los muones al atravesar la tierra fue tenida en cuenta en los cálculos. El programa SDSim v3r0<sup>(7)</sup> de simulación de los detectores de superficie de Auger fue modificado para incorporar a los detectores de muones. La reconstrucción de la lluvia es realizada por los detectores de superficie de Auger, la única función de los detectores de muones es evaluar el número de muones a cierta distancia del eje de la lluvia. A tal efecto se ajustan los datos simulados con el siguiente perfil lateral de muones:

$$N_{\mu}(r) = P_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \left( 1 + \frac{r}{r_0} \right)^{-\beta} \left( 1 + \left( \frac{r}{10 r_0} \right)^2 \right)^{-\gamma} \quad (1)$$

donde  $r$  es la distancia al eje de la lluvia,  $\alpha = 0,75$ ,  $\gamma = 2,93$  and  $r_0 = 320\text{m}$ , mientras que  $P_0$  y  $\beta$  son los parámetros de ajuste. El valor obtenido del número de muones a  $600 \text{ m}$ ,  $N_{\mu}(600)$ , es el utilizado en este trabajo. En la Fig. 3 se aprecian los resultados de la reconstrucción de los 4 conjuntos de lluvia en función de  $X_{max}$  y  $N_{\mu}(600)$ . A simple vista se observa que la separación es muy buena, siendo el número de muones un discriminante más efectivo. Se señala, sin embargo, que aún falta incorporar la pérdida de resolución por la incerteza en la reconstrucción de la energía del chubasco.

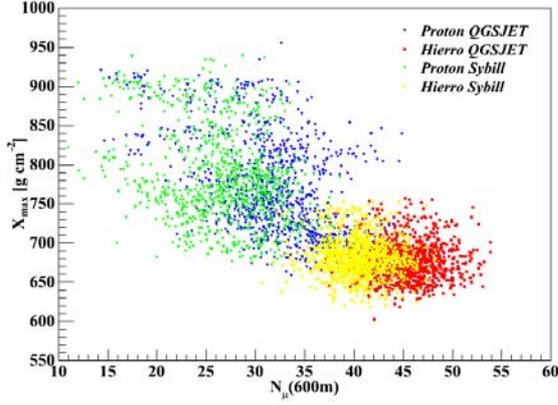


Figura 3. Distribuciones de  $X_{max}$  vs.  $N_{\mu}$  después de la simulación los detectores y del proceso de reconstrucción.

Se puede hacer una estimación de la probabilidad de clasificación correcta estimando las densidades de probabilidad de los resultados mostrados en la figura anterior. A tal efecto se define,  $\vec{x} = (N_{\mu}(600), X_{max})$  y  $A_j \in \{\text{Pr-Q}, \text{Pr-S}, \text{Fe-Q}, \text{Fe-S}\}$  y lo que se desea evaluar es, habiendo medido el vector  $\vec{x}$ , cuál será la probabilidad de que pertenezca a uno de los 4 conjuntos de simulaciones realizadas (Fe, Pr con QGSJET y Sybill). Dado un conjunto de  $N$  eventos se puede estimar la densidad de probabilidad en forma no paramétrica<sup>(8)</sup>,

$$P(\vec{x}/A_j) = C \sum_{i=1}^N \exp\left[-\frac{(\vec{x} - \vec{y}_i)^T V_{A_j}^{-1} (\vec{x} - \vec{y}_i)}{2h^2}\right] \quad (2)$$

donde  $V_{A_i}$  es la matriz de covarianza,  $N$  es el número de lluvias del conjunto  $A_i$ ,

$$C = \frac{1}{N |V_{A_j}|^{1/2} (2\pi)^{k/2} h^k} \quad (3)$$

y  $h = N^{-1/(k+4)}$ .

A cada vector  $\vec{x}$  correspondiente a un dado evento se lo separa del conjunto total y con el resto se calculan los estimadores de las densidades de probabilidades, dados por (3), para cada  $A_j$ , luego se evalúan las probabilidades en los cuatro conjuntos y se asigna esa lluvia al conjunto con mayor probabilidad. Llamemos  $P_{CL}$  a la probabilidad de clasificar bien un evento, tanto en composición química como en modelo hadrónico, o sea,

$$P_{CL} = \frac{N_B}{N_T} \quad (4)$$

donde  $N_B$  son los eventos bien clasificados y  $N_T$  los totales. En la Fig. 4 se muestran los resultados

obtenidos.

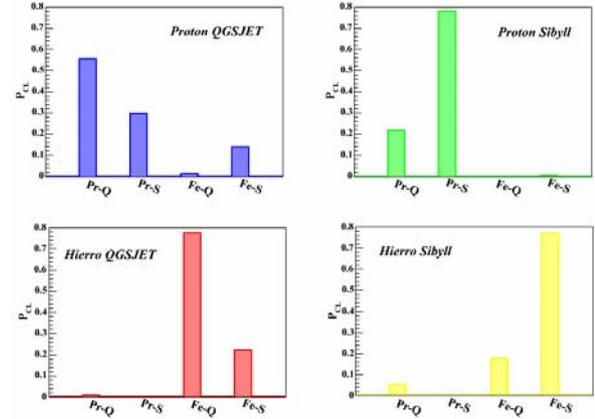


Figura 4. Probabilidad de clasificar un evento en composición y modelo hadrónico.

La probabilidad  $P_{CL}$  global dio como resultado 72% mientras que la probabilidad de clasificar correctamente en composición química para los modelos de interacción considerados dio como resultado 92%.

### III. CONCLUSIONES

La medición simultánea de  $X_{max}$  y el número de muones parece aportar significativamente al esclarecimiento simultáneo de la composición química del rayo cósmico primario y al modelo hadrónico.

Si bien no hemos incluido aún la incerteza en la reconstrucción de la energía, se concluye que el parámetro que permite una mejor discriminación en cuanto a modelo hadrónico y composición química del primario es el número de muones. Actualmente la discriminación se basa principalmente en el estudio del  $X_{max}$  a partir de los perfiles longitudinales de las lluvias de rayos cósmicos. La implementación de contadores de muones en el Observatorio Auger, tema en el que estamos trabajando, permitirá por tanto lograr esa mejor discriminación mencionada, ayudando a mejorar la comprensión de la física involucrada en el problema.

### Referencias

- 1- Sciutto, S.J. (2004). AIRES System 2.4.0. <http://www.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires>.
- 2- Kalmykov, N.N., S.S. Ostapchenko and A.I. Pavlov, "Quark-Gluon String Model and EAS Simulation Problems at Ultra-High Energies" Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 52B, 17 (1997).
- 3- Fletcher, R.T., T.K. Gaisser, P. Lipari and T. Stanev, "Sibyll: An Event Generator for Simulations of High-Energy Cosmic Rays" Phys. Rev. D, 50, 5710 (1994).
- 4- Prado, L. Jr, B. R. Dawson, S. Petrer, R. C. Shellard, M. G. Do Amaral, R. Caruso, R. Sato and J. Bellido, "Simulation of the Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory" A, 545, 632 (2005).
- 5- Nagano, M and Watson A. A., "Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays", Rev. Mod. Phys., vol. 72, 3 (2000).
- 6- The MINOS Detectors – Technical Design Report, Version 1.0, Oct 1998.

- 7- The SDSim User's Guide, S. Dagoret-Campagne, Nota Interna de la Colaboración Auger GAP-2002-072.
- 8- R. K. Bock et al., "Methods for multidimensional event classification: a case study using images from a Cherenkov gamma-ray telescope", Nucl. Instr. and Meth. A, 516 (2004) 511.