

ESTUDIO DE LA EXTENSIÓN DEL CAMPO DE VISIÓN DE UN DETECTOR DE FLUORESCENCIA DEL OBSERVATORIO AUGER

STUDY ON THE EXTENSION OF THE FIELD OF VIEW OF A FLUORESCENCE DETECTOR OF THE AUGER OBSERVATORY.

D.G. Melo^{a*}, A. Etchegoyen^{a,b}, M.I. Micheletti^{a,b}, And A.C. Rovero^{b,c}

^a Lab Tandar - CNEA. Av. Gral Paz 1499, San Martín - Prov. Bs. As – Argentina

^b CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

^c IAFE. Ciudad Universitaria, Ciudad de Bs. As – Argentina

e-mail: melo@tandar.cnea.gov.ar

El Proyecto Pierre Auger consta de tres tipos de detectores: telescopios de fluorescencia, detectores de superficie y contadores de muones. En este trabajo evaluamos el efecto que tendrán sobre el número de eventos reconstruidos y su calidad, los nuevos telescopios (u ‘ojos’) de campo de visión ampliado en elevación a 60°. Mediante simulaciones numéricas evaluamos la eficiencia total promedio del ojo y la resolución de la reconstrucción de los parámetros básicos que caracterizan al rayo cósmico primario (energía, profundidad atmosférica del máximo, ángulo cenital, etc.), considerando cascadas de partículas que impactan dentro de un área circular posicionada delante del ojo a distancias de 5, 7, 9 y 11 km respectivamente, para cuatro valores de energía ($\log(E/eV) = 17.5, 17.75, 18.00$ y 18.25) y dos tipos de partícula primaria (protones y hierros). La extensión del campo de visión de los telescopios muestra ser muy ventajosa en el rango de energías aquí estudiado, a raíz de que la profundidad atmosférica donde la cascada desarrolla el máximo número de partículas es observada directamente por el ojo en la mayoría de los casos. Siendo dicha profundidad un parámetro sensible a la composición química del rayo cósmico primario, su correcta determinación contribuirá en estudios futuros de composición.

Palabras clave: eficiencia telescopios fluorescencia Auger “campo de visión” 60°

The Auger Project includes three types of detectors: telescopes of fluorescence, surface detectors and muons counters. In this work we evaluate the effect that the new telescopes (or ‘eyes’) with an enhanced field of view up to 60°, will have in the number of reconstructed events and their quality. Using numerical simulations we evaluate the mean total efficiency of the eye and the resolution of the reconstruction of the basic parameters of the primary cosmic ray (energy, atmospheric depth of the maximum, zenith angle, etc.), considering cosmic ray showers impinging inside a circular area placed in front of the eye at distances of 5, 7, 9 and 11 km respectively, for four energy values ($\log(E/eV) = 17.5, 17.75, 18.00$ y 18.25) and two types of primaries (protons and irons). The extension of the field of view of the telescopes results of a great advantage in the energy range studied here, due to the fact that the atmospheric depth where the shower develops its maximum number of particles is directly observed by the eye in most cases. Being this atmospheric depth a parameter that is sensible to the chemical composition of the primary cosmic ray, its correct determination will contribute in future composition studies.

Keywords: efficiency Auger fluorescence telescopes “field of view” 60°

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

I. INTRODUCCIÓN

El observatorio Pierre Auger es un detector híbrido gigante optimizado para registrar con una estadística sin precedentes las cascadas de partículas secundarias que son originadas por los rayos cósmicos de más alta energía ($E > 0,1 \text{ EeV}$, $1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$) [1]. Un conjunto de 1666 detectores de radiación Cherenkov distribuidos sobre una superficie de 3000 km^2 conforman el detector de superficie, el cual permite registrar las partículas de la cascada que arriban al nivel del suelo (perfil lateral) [2]. Un total de 27 telescopios (3 con elevación 30° - 60° y 24 con 0° - 30°) ubicados en 4 edificios que se hallan posicionados en el perímetro del detector de superficie, conforman el detector de fluorescencia, el cual permite registrar la luz de fluorescencia que emite el nitrógeno del aire a medida que se va desarrollando la cascada en la atmósfera (perfil longitudinal) [2]. La observación directa del punto donde el perfil longitudinal logra el máximo número de partículas (profundidad atmosférica del máximo: X_{max}) mediante el detector de fluorescencia, resulta crucial para efectuar estudios de composición química de los rayos cósmicos primarios [3]. En el rango de menor energía ($17.50 \leq \log(E/\text{eV}) \leq 18.00$), donde aún hoy la composición química es incierta [4], las cascadas desarrollan su máximo en las zonas más altas de la atmósfera, con lo cual en general, el X_{max} no puede ser registrado directamente por estar fuera del campo de visión. Para suplir este inconveniente la colaboración Auger construirá 3 nuevos telescopios con un campo de visión más elevado (30° - 60°) a fin de hacerlo operativo a energías de $0,1 \text{ EeV}$ [4,5]. En forma simultánea e independiente se instalará un conjunto de detectores de radiación Cherenkov y de contadores de muones dentro de un área pequeña (llamada ‘infill’), en las proximidades de uno de los ojos de fluorescencia [1,6], a fin de registrar con alta resolución el perfil lateral producido por rayos cósmicos de energías menores a 1 EeV . A partir de simulaciones numéricas mostramos en este trabajo las ventajas de extender el campo de visión de uno de los ojos del detector de fluorescencia de Auger, el efecto que tiene sobre la eficiencia, la resolución con la cual se reconstruyen los eventos y la zona donde cabría posicionar el infill de detectores / contadores de muones, a fin de maximizar la apertura híbrida del detector en el rango de energías menores de Auger.

El ojo del detector de fluorescencia

En la actualidad, cada uno de los 4 ojos del detector de fluorescencia está constituido por 6 telescopios de idéntica óptica y electrónica [2]. La óptica es de tipo Schmidt a fin de eliminar la aberración de coma en el spot de luz [7]. La electrónica digitaliza la señal presente en cada uno de los tubos fotomultiplicadores que constituyen las cámaras, la alta velocidad de muestreo hace factible el registro de la estructura temporal de los pulsos [8]. El campo de visión resultante de los 6 telescopios cubre 30° en elevación y 180° en azimut.

Auger ha decidido incluir 3 nuevos telescopios (idénticos a los anteriores), a fin de incrementar el campo de visión del ojo en elevación hasta un máximo de 60° . En la figura 1 se muestra la configuración de telescopios que hemos adoptado para el ojo de fluorescencia en el presente trabajo.

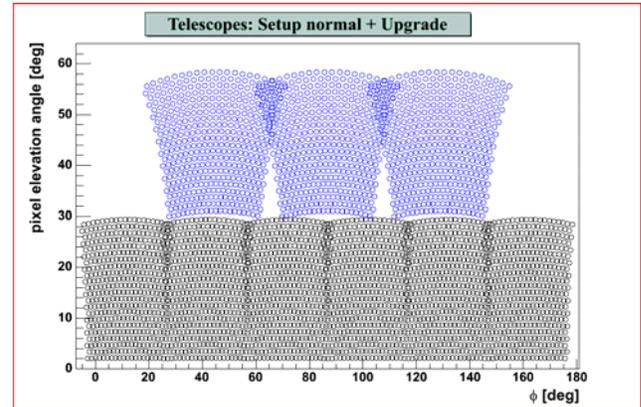


Figura 1: Configuración de telescopios del ojo extendido de fluorescencia. En negro se indica la actual configuración y en azul los 3 nuevos telescopios.

II. MÉTODOS

Simulación y reconstrucción de eventos

La respuesta detallada del ojo de fluorescencia se efectuó simulando y reconstruyendo eventos producidos por cascadas de partículas de Monte Carlo, utilizando módulos del programa de análisis Auger Offline Software [9]. Hemos modificado algunos de estos módulos, a fin de poder adicionar los 3 telescopios a la configuración de 6 telescopios ya existente.

Los perfiles longitudinales de las cascadas de partículas utilizados en este trabajo, fueron generados internamente por el mismo Auger Offline Software durante el proceso de simulación de eventos, mediante un Monte Carlo que efectúa una parametrización de los parámetros que definen a la función de Gaisser – Hillas que describe el perfil longitudinal [10][11].

Hemos considerado dos tipos de partículas primarias, *protón* y *hierro*, para las energías de: $\log(E/\text{eV}) = \{17.50, 17.75, 18.00, 18.25\}$.

El ángulo cenital de la cascada (θ) se generó considerando una distribución $\sin(\theta) \times \cos(\theta)$ con $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, mientras que el ángulo azimutal (ϕ) se distribuyó uniformemente en $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$. Para $\log(E/\text{eV}) = \{17.75, 18.00, 18.25\}$, el punto de impacto en el suelo fue distribuido de manera uniforme dentro de una circunferencia de 4 km de radio posicionada en el campo de visión del ojo, a distancias de $\{5.0, 7.0, 9.0, 11.0\} \text{ km}$, mientras que para $\log(E/\text{eV}) = 17.50$, se consideró una circunferencia de 1.5 km de radio ubicada a $\{3.5, 5.5, 7.5, 9.5\} \text{ km}$. El radio adoptado en cada circunferencia, está asociado al tamaño que tendría el arreglo de superficie

tipo infill acorde a la propuesta elaborada para el proyecto **AMIGA** [1,12].

El número de eventos simulados para cada primario, energía y distancia fue de 5000 siendo entonces el número total de eventos simulados de $2 \times 4 \times 4 \times 5000 = 160000$ eventos. La densidad de eventos / km^2 en cada caso resultó ser igual a 99,5 y 707 respectivamente; estos valores permiten descartar los errores estadísticos asociados.

La figura 2 muestra un área típica donde impactan los eventos y su ubicación relativa al ojo de fluorescencia.

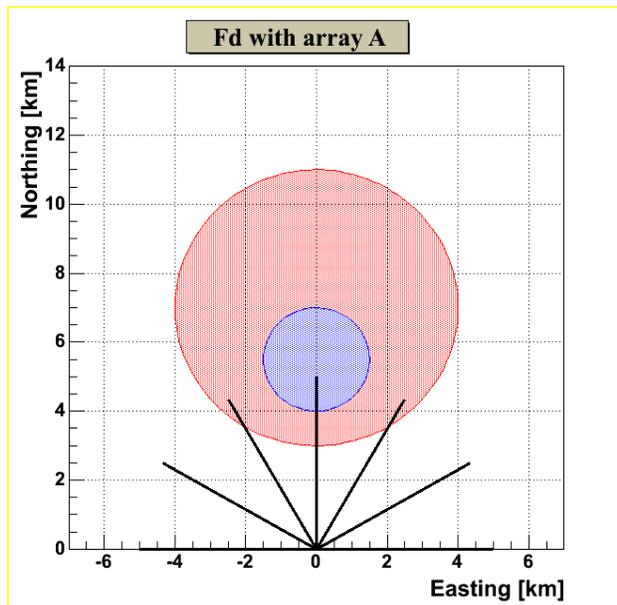


Figura 2: Área donde impactan los eventos. Círculo de 4 km de radio a 7 km del ojo (rojo), círculo de 1.5 km de radio a 5.5 km del ojo (azul). En negro se indican los límites azimutales del campo de visión de cada telescopio en la configuración de menor elevación.

En la simulación y reconstrucción de eventos adoptamos una misma e idéntica descripción de todos los procesos físicos involucrados con la generación, propagación y colección de luz, que intervienen desde la cascada hasta los tubos fotomultiplicadores del detector:

- Modelo de atmósfera estándar US 1976 para el perfil molecular de la atmósfera [13].
- Modelo de Hillas para la generación de luz Cherenkov [14].
- Modelo de Rayleigh para los efectos de atenuación de luz por moléculas de aire [15].
- Modelo de Mie para los efectos de atenuación de luz por aerosoles en aire [16], con parámetros fijos de $L_{mie} = 12$ km (longitud de extinción horizontal), $H_{mie} = 1.2$ km (altura de escala) y factor de fase dado por la función de Longtin.
- Espectro de emisión de fluorescencia dividido en 16 pasos (desde 280 nm a 415 nm)

y producción de fluorescencia basado en resultados de Nagano [17].

- Nivel de luz del cielo nocturno correspondiente al ojo ubicado en el cerro Los Leones [18].
- El efecto de la curvatura de la tierra es considerado.

Los eventos simulados se reconstruyeron 2 veces en forma monocular [19] (es decir, utilizando sólo la información que proviene del ojo):

- 1) Considerando 9 telescopios (ojo extendido).
- 2) Considerando 6 telescopios (ojo actual).

En el segundo caso, al hacer la reconstrucción, eliminamos toda información proveniente de los tubos fotomultiplicadores de los 3 telescopios adicionales, a efecto de recuperar para un mismo evento la configuración actual de 6 telescopios por ojo.

En las figuras 3 y 4 se muestran dos estadios de la reconstrucción de un evento de fluorescencia producido por un rayo cósmico simulado de primario de protón a 1 EeV, que impacta en el suelo a 8 km del ojo. En la figura 3 vemos la traza en los tubos fotomultiplicadores y en la figura 4 su perfil longitudinal reconstruido. Claramente la extensión del campo de visión del ojo permitió que haya sido registrado este perfil prácticamente en toda su extensión. Así, notamos en la figura 4, que el intervalo del perfil comprendido entre: 360 g/cm^2 y 700 g/cm^2 contiene el punto donde se desarrolló el máximo de la cascada ($X_{max} = 586 \text{ g/cm}^2$) y señalamos que esta porción del perfil es observada por dos de los nuevos telescopios.

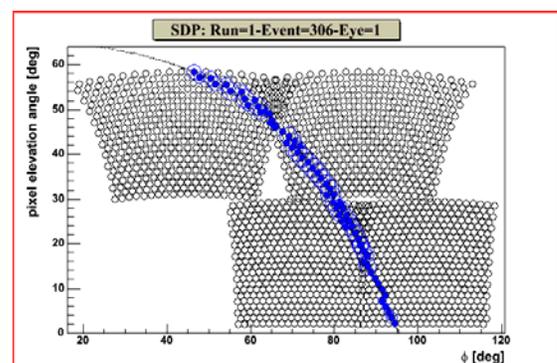


Figura 3: Trazas de tubos fotomultiplicadores con señal en las cámaras de los telescopios (Protón de $E = 1 \text{ EeV}$)

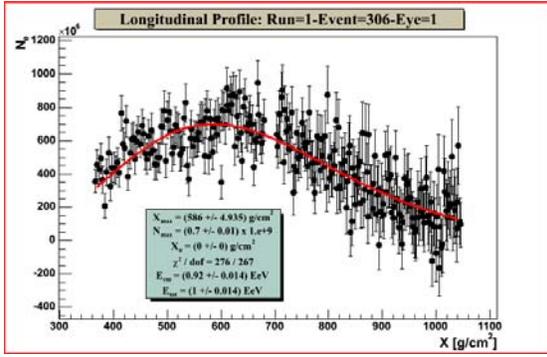


Figura 4: Perfil longitudinal reconstruido (Protón de $E = 1$ EeV)

Una vez reconstruidos los eventos simulados, éstos fueron analizados impusiendo cortes externos de calidad sobre cada evento a fin de eliminar aquellos que aun habiendo sido reconstruidos dieron una mala y/o pobre reconstrucción. Los cortes de calidad fueron:

- 1) Número de tubos fotomultiplicadores con señal en la traza ≥ 12
- 2) Reconstrucción del SDP (“Surface Detector Plano”, plano conteniendo al eje de la lluvia y al telescopio): $\text{CHI}^2 / \text{n.d.o.f} \leq 10$
- 3) Errores en los parámetros que definen al SDP: $\theta_{\text{sdp}}^{\text{error}} \leq 1^\circ$ y $\phi_{\text{sdp}}^{\text{error}} \leq 1^\circ$
- 4) Reconstrucción temporal: $\text{CHI}^2 / \text{n.d.o.f} \leq 10$
- 5) Error en el parámetro de impacto $R_p \leq 500$ m
- 6) Error en el ángulo del eje de lluvia en el SDP y el suelo, $\chi_0 \leq 2^\circ$
- 7) Error en reconstrucción del tiempo impacto de la lluvia en el suelo $T_0 \leq 600$ ns
- 8) Longitud total de la traza $\geq 22^\circ$
- 9) Duración temporal de la cascada $\geq 1 \mu\text{s}$
- 10) Ángulo cenital del rayo cósmico (θ) $\leq 60^\circ$
- 11) Fracción de contaminación por luz Cherenkov $\leq 20\%$
- 12) Ángulo de visión de la cascada $\geq 20^\circ$
- 13) Reconstrucción del perfil longitudinal: $\text{CHI}^2 / \text{n.d.o.f} \leq 10$
- 14) Extensión del perfil longitudinal $\geq 250 \text{ g/cm}^2$
- 15) Profundidad donde comienza el perfil longitudinal $\leq 650 \text{ g/cm}^2$
- 16) Error estadístico del $X_{\text{max}} \leq 25 \text{ g/cm}^2$
- 17) X_{max} bien contenido en el perfil longitudinal: $X_{\text{max}} + 1.2 \Delta X_{\text{max}} \leq X_{\text{max}} \leq X_{\text{max}} - 1.2 \Delta X_{\text{max}}$
- 18) Error estadístico en el máximo número de partículas $\leq 10\%$
- 19) Error estadístico en la energía total $\leq 10\%$

III. RESULTADOS

Se evaluó, evento a evento, la diferencia entre los parámetros reconstruidos y simulados correspondientes a los parámetros: θ_{axis} (ángulo cenital del eje), ϕ_{axis} (ángulo azimutal del eje), X_{core} (coordenada “x” del punto de

impacto), Y_{core} (coordenada “y” del punto de impacto), X_{max} , N_{max} (número máximo de partículas de la cascada) y E_{tot} (energía total), a fin de determinar las distribuciones de estas diferencias. También evaluamos el ángulo espacial entre el eje del evento simulado y el del reconstruido, a fin de determinar el error 3-D de dicho eje. Análogamente evaluamos la diferencia absoluta entre los puntos de impacto verdadero y reconstruido, a fin de evaluar el error espacial de este parámetro. De estas distribuciones obtuvimos la resolución con la cual vienen reconstruidos los eventos que satisfacen los cortes implementados. Las figuras 5, 6 y 7 muestran las distribuciones correspondientes al caso de protones con $\log(E/\text{eV}) = 17.75$ impactando dentro de una circunferencia de 4 km. de radio a una distancia de 7 km respecto al ojo.

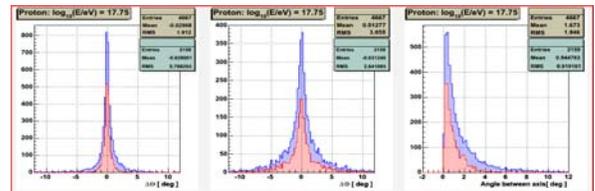


Figura 5: Resolución con la cual se reconstruyen el eje (en azul todos los eventos reconstruidos y en rojo sólo aquellos que satisfacen los cortes).

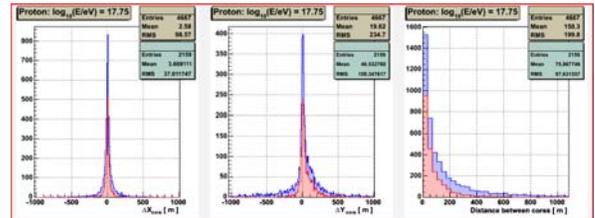


Figura 6: Resolución con la cual se reconstruye el punto de impacto en el suelo (en azul todos los eventos reconstruidos y en rojo sólo aquellos que satisfacen los cortes).

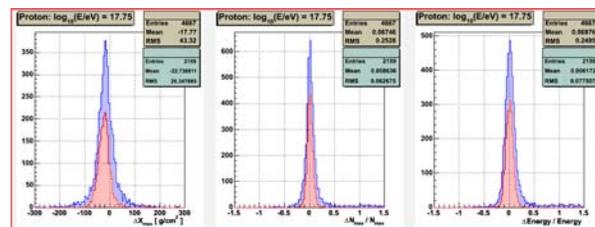


Figura 7: Resolución con la cual se reconstruye el perfil longitudinal (en azul todos los eventos reconstruidos y en rojo sólo aquellos que satisfacen los cortes).

Posteriormente evaluamos para cada primario y valor de energía, la eficiencia de reconstrucción porcentual del ojo, la cual viene expresada como:

$$\text{eff} = 100 * N_{\text{Rec}} / N_{\text{Tot}} \quad (1)$$

donde N_{Rec} es el número total de eventos reconstruidos que satisfacen los cortes de calidad y N_{Tot} el número total de eventos generados.

En la figura 8 se muestran las eficiencias obtenidas como función de la distancia entre el centro de la circunferencia y la posición del ojo. Análogamente en las figura 9, 10, 11 y 12 se muestra la resolución de los parámetros básicos que caracterizan al rayo cósmico primario: **ángulo 3-D**, **distancia espacial**, X_{max} y E_{Tot} en función del primario, energía y valor de distancia.

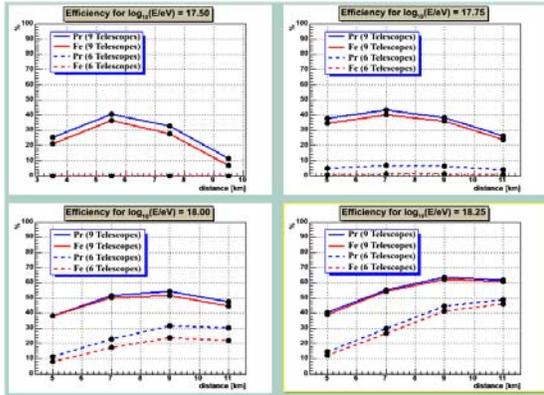


Figura 8: Eficiencias promedio en función de la distancia, para las configuraciones con 6 (línea de puntos) y 9 (línea continua) telescopios (hierro en rojo y protón en azul).

En la figura 8 vemos como la eficiencia promedio para la configuración del ojo con 6 telescopios (obtenida aplicando los mismos cortes de calidad que para el caso del ojo con 9 telescopios) presenta valores muy inferiores respecto al caso de 9 telescopios; a raíz de esto, extender el actual campo de visión del ojo de fluorescencia incrementara de manera significativa el número de eventos que finalmente pueden ser bien reconstruidos.

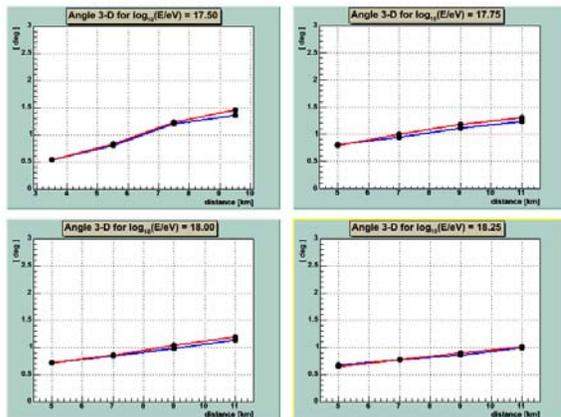


Figura 9: Resolución del eje en función de la distancia (hierro en rojo y protón en azul).

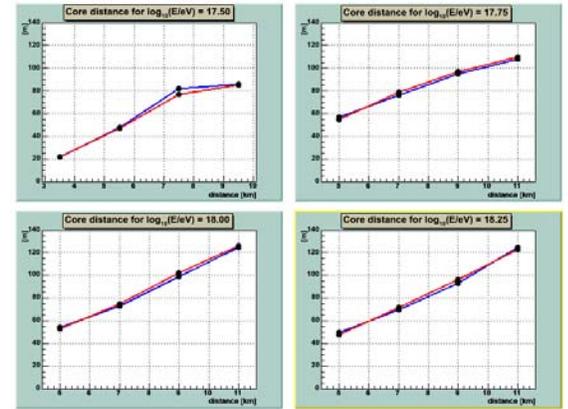


Figura 10: Resolución del punto de impacto en función de la distancia (hierro en rojo y protón en azul).

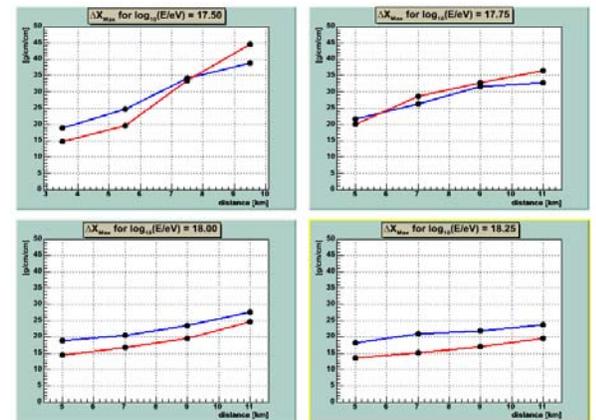


Figura 11: Resolución del X_{max} en función de la distancia (hierro en rojo y protón en azul).

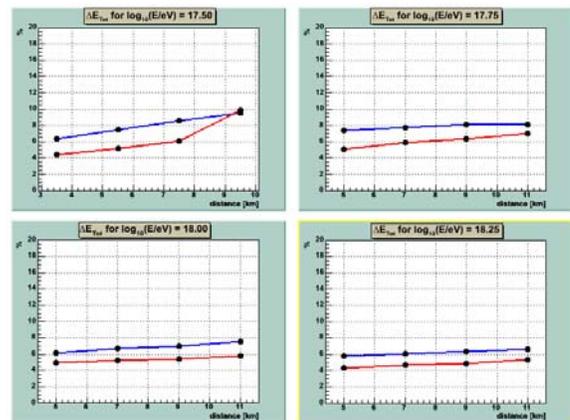


Figura 12: Resolución de la E_{Tot} en función de la distancia (hierro en rojo y protón en azul).

Las distribuciones en ΔX_{max} (ver figura 7) señalan un corrimiento de su valor medio respecto a cero. Esto, dificulta la correcta determinación del X_{max} . A fin de establecer un posible origen de esta desviación, hemos reconstruido los eventos asumiendo que la geometría de cada evento es idéntica a su geometría real (la cual conocemos de la simulación). De este modo, evaluamos el error introducido en la determinación del

X_{max} al reconstruir la geometría en forma monocular. Estas nuevas reconstrucciones muestran que conocer la geometría de forma exacta reduce aproximadamente en un 40 % la desviación de ΔX_{max} , pero es insuficiente para explicar por completo su origen. Esta cuestión queda abierta y será materia de estudio en un futuro trabajo.

En las figuras 13 y 14 mostramos la desviación del X_{max} reconstruido versus el X_{max} simulado para cascadas de protones con $\log(E/eV) = 17.75$ (que impactan dentro de una circunferencia de 4 km posicionada a 7 km del ojo), para el caso de reconstrucciones monoculares (figura 13) y reconstrucciones con la geometría verdadera (figura 14). La desviación $X_{max}^{(Rec)}$ vs $X_{max}^{(Sim)}$ (o $X_{max}^{(True)}$) queda evidenciada por la recta a 45° indicada a la derecha de cada gráfica

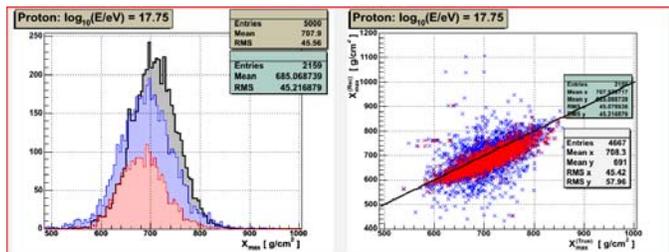


Figura 13: X_{max} para la reconstrucción monocular. Simulada (en negro), eventos reconstruidos (azul) y reconstruidos que pasan los cortes de calidad (rojo).

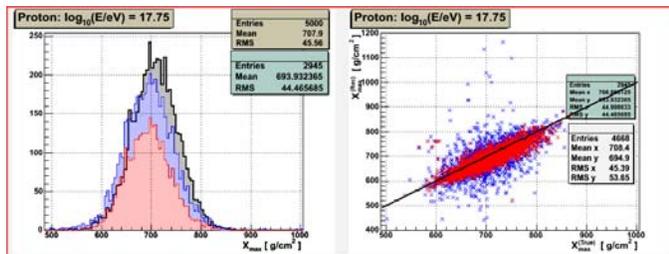


Figura 14: X_{max} para la reconstrucción con geometría verdadera. Simulada (negro), eventos reconstruidos (azul) y reconstruidos que pasan los cortes de calidad (rojo).

Finalmente en la figura 15 mostramos las curvas del “elongation rate” [20], variación de X_{max} con el logaritmo de la energía del rayo cósmico primario, para chubascos iniciados por protón y por hierro obtenidas a partir de la reconstrucción monocular, en función de la distancia entre el ojo de fluorescencia y el centro de la circunferencia. Las curvas reconstruidas muestran un apartamiento por defecto respecto a las curvas teóricas, debido a la existencia de un valor de “offset” en las correspondientes distribuciones de ΔX_{max} , el apartamiento máximo entre los “elongation rate” (teórico - reconstruido) ronda los 30 g/cm² para protón y 18 g/cm² para hierro.

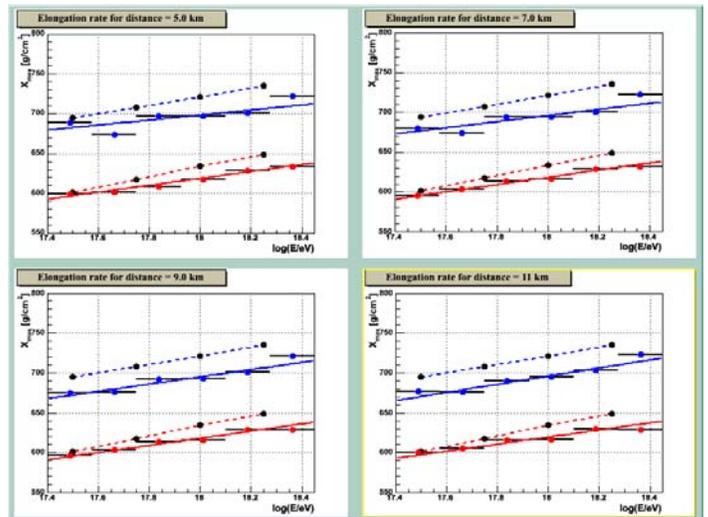


Figura 15: Elongation rate para la reconstrucción monocular (hierros en rojo y protones en azul). En línea de puntos se indican los valores simulados y en línea continua los reconstruidos. La existencia de un offset en la determinación del X_{max} promueve la diferencia respecto a las curvas teóricas.

Si bien el error sistemático en la reconstrucción de X_{max} perjudica a la identificación de la masa del primario, vale la pena recalcar que un cambio de composición se vislumbraría claramente como un cambio en la pendiente en la alineación de los puntos experimentales. Por ejemplo el pasaje de primarios pesados a livianos implicaría una mayor pendiente para pasar de la recta inferior a la superior. Estos estudios son bastante conclusivos para encontrar cambios en composición y no para determinar composiciones absolutas pues las rectas límites para protones y hierros dependen fuertemente del modelo hadrónico usado en la simulación (una interacción más fuerte desarrolla más rápido la lluvia) lo cual genera una incerteza grande en la confiabilidad de los valores absolutos obtenidos.

IV. CONCLUSIONES

El efecto de la extensión del campo de visión de un ojo de fluorescencia atmosférica del observatorio Pierre Auger, fue estudiado detalladamente haciendo uso de simulaciones numéricas. Extender el campo de visión hasta un máximo de 60° incrementa de manera significativa la cantidad de eventos bien reconstruidos (que incluyen la observación directa del X_{max}) respecto a la configuración actual de 6 telescopios por ojo. La resolución de los parámetros que caracterizan al rayo cósmico primario fue evaluada en función de la distancia, tipo de primario y energía.

Acorde a la eficiencia promedio obtenida resultaría conveniente posicionar un futuro arreglo de detectores de superficie y/o muones a una distancia comprendida entre: **5.5 km – 7.0 km** a fin de maximizar la eficiencia híbrida del detector. En este rango de distancias, la resolución obtenida en forma monocular, para los parámetros del perfil longitudinal, es de: **4 % ≤ E_{Tot} ≤ 8 %** en la energía

y $10 \text{ g/cm}^2 \leq X_{\text{max}} \leq 35 \text{ g/cm}^2$ en la profundidad atmosférica del máximo.

Las distribuciones de ΔX_{max} muestran un corrimiento respecto al cero, el origen de esta discrepancia deberá ser estudiado cuidadosamente a futuro.

Referencias

1. **“Pierre Auger Design Report”**. Second Edition, Revised March 14 (1997);
“AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array) Design Report”, Sept. 2006,
“HEAT (High Elevation Auger Telescopes)”, Sept. 2006.
2. **“Properties and Performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory”**. J. Abraham et al (the Auger Collaboration). Nucl. Inst. And Meth. In Phys. Res. A523 (2004).
3. **“A Study of the Composition of Ultra High Energy Cosmic Rays Using the High Resolution Fly’s Eye”**. R. U. Abbasi et al (the Hires Collaboration). Astro-ph/0407622 (2004).
4. **“Observations of Ultra-High Energy Cosmic Rays”**. A. A. Watson, Nucl. Phys. Proc. Suppl 151 (2006) 83.
5. **“FD Enhancement”**. H. Klages, **Auger Enhancements Meeting** - Buenos Aires, 13 Mar 2006.
6. **“Infill and Muons”**. A. Etchegoyen, **Auger Enhancements Meeting** - Buenos Aires, 13 Mar 2006.
7. **“The Performance of the Corrector Lenses for the Auger Fluorescence Detector”**. R. Sato and Carlos O. Escobar for the Auger Collaboration, 29th ICRC Pune (2005) 00, 101–106.
8. **“The Auger Fluorescence Detector Electronics”**. H. Gemmeke for the Auger Collaboration, 27th ICRC Hamburg (2001).
9. **“The Offline Software Framework of the Pierre Auger Observatory”**. S. Argiro, S.L.C. Barroso, S. Dagoret–Campagne, J. Gonzalez, L. Nellen, T. Paul, T. Porter, L. Prado Jr., M. Roth, R. Ulrich and D. Veberic for the Auger Collaboration, 29th ICRC Pune (2005) 00, 101–106.
10. **“Reliability of the method of constant intensity cuts for reconstructing the average development of vertical showers”**. T. K. Gaisser and A. M. Hillas, Proc 15th ICRC Plovdiv (1977) 8, 353.
11. **“Gaisser-Hillas Profiles and FD Simulation”**. L. Perrone, S. Petrerá and F. Salamida. GAP–2005–087.
12. **“Acceptance and Angular resolution of an Infill Array for the Pierre Auger Surface Detector”**. C. Medina, M. Gomez Berisso, I. Allekotte, A. Etchegoyen, G. Medina Tanco and D. Supanitsky. Acta Physics Hungarica, Heavy Ion Physics (2006), aceptado.
“Enhancing the Pierre Auger Observatory to the 10^{17} to $10^{18.5}$ eV Range: Capabilities of an Infill Surface Array”. C. Medina et al. Nucl. Inst. and Methods, aceptado y astro-ph/0607115 (2006).
13. **“US Standar atmosphere 1976”**. NASA technical report NASA–TM–X–74335 (1976).
14. **“Angular and Energy distributions of charged particles in electron-photon cascades in air”**. A. M. Hillas. J. Phys. G: Nucl. Phys 8 (1982).
15. **“New Rayleigh Scattering Implementation in the Offline”**. B. Dawson. GAP–2006–007
16. **“Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics”**. P. Sokolsky. Addison–Wesley, Redwood City (1989).
17. **“New measurement on photon yields from air and the application to the energy estimation of primary cosmic rays”**. M. Nagano, K. Kobayakawa, N. Sakaki and K. Ando. Astropart. Phys. (2004) 22, 235–248.
18. **“Measurement of the Sky Photon Background Flux at the Auger Observatory”**. R. Caruso, A. Insolia, S. Petrerá, P. Privitera, F. Salamida and V. Verzi for the Auger Collaboration, 29th ICRC Pune (2005) 00, 101–106.
19. **“The Angular Reconstruction and Angular Resolution of air Showers Detected at the Auger Observatory”**. P. Privitera for the Auger Collaboration, 28th ICRC Tsukuba (2003) 357–360.
20. **“Validity of Scaling to 10^{20} eV and High–Energy Cosmic–Ray Composition”**. J. Linsley and A. A. Watson, Physical Review Letters (1981) 46, 459.