

# Determinación del punto de impacto del eje de lluvias inclinadas de partículas secundarias y su efecto en la composición primaria.

Cecilia Jarne, María Teresa Dova, Hernán Wahlberg

Universidad Nacional de La Plata, IFLP - CONICET

e-mail: jarne@fisica.unlp.edu.ar

Recibido 20/06/2011; aprobado 11/01/2012

## Resumen

El Observatorio Pierre Auger ha sido diseñado como un detector híbrido combinando detectores de partículas Cherenkov cubriendo una superficie de  $3000 \text{ km}^2$  y 24 telescopios de fluorescencia en la periferia del arreglo de superficie. En este trabajo presentamos el efecto de la determinación del punto de impacto de lluvias inclinadas en el análisis de un observable que permite estudiar la composición primaria de los rayos cósmicos de ultra alta energía por encima de los  $3,16 \times 10^{18} \text{ eV}$ .

Palabras Clave: Composición, Pierre Auger, Asimetría, Risetime, Rayos Cósmicos.

The Pierre Auger Observatory has been designed as an hybrid detector using Cherenkov Detectors for a surface array of  $3000 \text{ km}^2$  and 24 fluorescence telescopes surrounding the array area. In this work we present the effect of the core reconstruction of inclined extensive air showers on the analysis of an observable to study mass composition of High Energy Cosmic Rays above  $3,16 \times 10^{18} \text{ eV}$ .

Key Words: Composition, Pierre Auger, Asimetry, Risetime, Cosmic Rays.

## 1. Introducción

Los rayos cósmicos son partículas energéticas que llegan a la atmósfera de la tierra constantemente. El flujo de estas partículas es fuertemente dependiente de la energía. Así, va desde una partícula por metro cuadrado por segundo a energías de  $10^{11} \text{ eV}$  a 1 partícula por  $\text{km}^2$  por siglo a energías de  $10^{20} \text{ eV}$  [1].

Al llegar a la Tierra, los rayos cósmicos interactúan con los átomos de la atmósfera y producen una cascada de partículas secundarias. Este fenómeno se conoce como lluvias extensas de partículas, o en inglés *Extensive Air Showers* (EAS), y es justamente a partir de la detección de estas partículas que se pueden inferir las propiedades de la partícula primaria.

Las lluvias de partículas secundarias están formadas por una componente electromagnética, que consta de electrones y fotones producidos principalmente por el decaimiento de piones neutros y una componente muónica producida inicialmente por el decaimiento de los piones cargados [4].

El **Observatorio Pierre Auger** intenta responder cuestiones tales como el origen y la naturaleza de los rayos cósmicos de ultra alta energía a través de la determinación, con una estadística sin prece-

dentos, de la masa, energía, y direcciones de arriba. La característica principal del observatorio es su diseño híbrido, que utiliza dos técnicas complementarias de observación de las EAS: un arreglo de detectores de Cherenkov y detectores de fluorescencia en la periferia del arreglo de superficie, como se observa en la Figura 1.

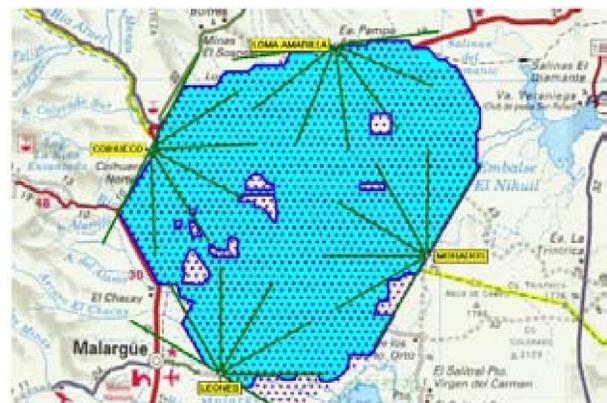


Figura 1: Esquema del Observatorio y su ubicación geográfica. Los puntos representan los detectores de superficie, mientras que las líneas representan la apertura acimutal de los detectores de fluorescencia.

En este trabajo se ha realizado el análisis de las

principales incertezas que afectan a la determinación de la posición del punto de impacto del eje de la lluvia de partículas y su influencia en el estudio de composición primaria, utilizando datos del detector de superficie.

## 2. El Observatorio

El Observatorio Pierre Auger está ubicado en Malargüe, al sur de Mendoza. El mismo consiste en una red de 1600 detectores de agua Cherenkov o *Water Cherenkov Detector (WCD)*, como el que se observa en la Figura 2 ubicados cada 1.5 Km en un arreglo triangular. Cada uno de ellos consiste en un tanque que contiene 12 toneladas de agua ultra pura con 3 tubos fotomultiplicadores o (PMTs) que detectan la radiación Cherenkov producida por las partículas que componen la cascada y atraviesan el detector.

Debido al tamaño del arreglo experimental, cada estación debe trabajar en forma autónoma. Así, cada estación está dotada de paneles solares combinados con baterías que proveen la energía, tal como se puede ver en la Figura 2. Las señales de cada estación son digitalizadas a 40 MHz y enviadas a través de una red LAN mediante un enlace de radio al sistema de adquisición central de datos. La referencia temporal es obtenida mediante el sistema GPS.

Este arreglo es llamado detector de superficie o **SD** (*Surface Detector*) [7]. El ciclo de trabajo del SD es del 100%.

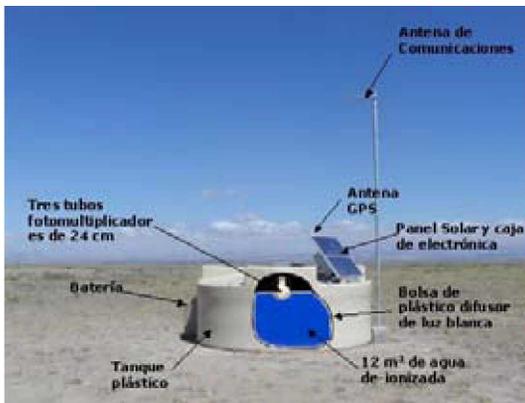


Figura 2: Esquema de un *Water Cherenkov Detector* que compone el arreglo de superficie.

El otro elemento que compone el Observatorio es un conjunto de 24 telescopios Schmidt ubicados en 4 edificios. Los mismos están diseñados para detectar la fluorescencia producida por las moléculas de nitrógeno de la atmósfera que se excitan por interacción con las partículas secundarias. Este sistema es conocido como detector de fluorescencia o **FD** (*Fluorescence Detector*). El sistema óptico consiste de un diafragma de 1,7m de diámetro con un espejo de radio de curvatura de 3,4m. Cada telescopio contiene

una cámara equipada con 440 PMTs hexagonales instalados en la superficie focal de la estructura. Las componentes del sistema óptico pueden verse en la Figura 3. El ciclo de trabajo del FD es de 13% [6], ya que solo opera en noches claras sin luna.

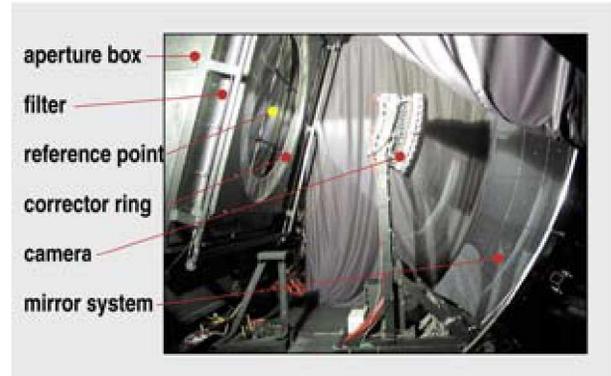


Figura 3: Imagen del Detector de fluorescencia y sus componentes.

El detector SD estudia la distribución lateral de la lluvia al nivel del suelo, mientras que el detector de fluorescencia registra el desarrollo longitudinal en la atmósfera.

Una fracción de las lluvias observadas será medida simultáneamente por ambos detectores, lo cual permite controlar los errores sistemáticos existentes en ambas técnicas, permitiendo realizar la calibración absoluta de energía del Observatorio independientemente de los modelos de interacción [8].

## 3. Risetime ( $t_{1/2}$ )

Las lluvias inducidas por núcleos pesados generan un número mayor de muones que las inducidas por protones. El número de partículas electromagnéticas a nivel del suelo para una dada energía depende del valor de  $X_{max}$ , que es la profundidad en donde se genera el mayor número de partículas. El  $X_{max}$  es un observable que depende de la composición del primario [5].

Las distintas componentes de la lluvia no llegan en forma simultánea al detector. La componente electromagnética llega retrasada respecto de la componente muónica, debido a que los muones viajan directamente y las partículas electromagnéticas sufren dispersión múltiple antes de alcanzar el suelo. Así una señal típica de los detectores de superficie, generada por una lluvia de rayos cósmicos está caracterizada por tener una primera porción de la señal dominada por los muones, mientras que la componente electromagnética que arriba un poco retrasada respecto de la componente muónica, se prolonga más en el tiempo, como se observa en la Figura 4.

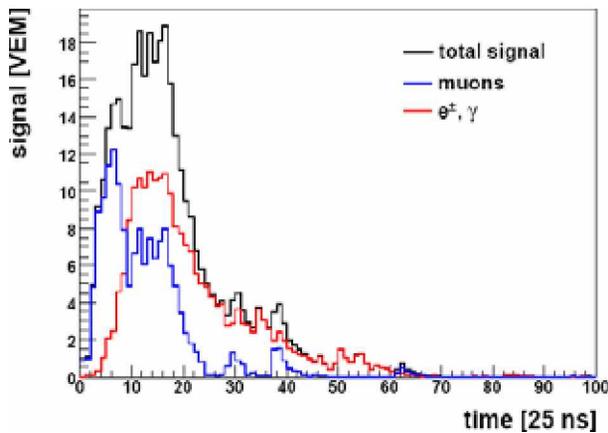


Figura 4: Componentes de la señal dejada por una lluvia de partículas en función del tiempo para un detector de superficie.

Esta característica de la lluvia puede ser medida a través del *risetime*, definido como el tiempo que la señal total integrada tarda en crecer del 10 % al 50 % para cada detector de superficie.

El *risetime* así definido está relacionado con el cociente entre el número de muones y partículas electromagnéticas en la cascada, el cual difiere para distintas especies primarias, por lo tanto es un parámetro sensible a la composición. Este parámetro depende de la distancia  $r$  al eje de la lluvia y del ángulo cenital  $\theta$ . En el caso de lluvias inclinadas, existen asimetrías acimutales en el valor de *risetime*, siendo estas las que se utilizan para inferir la composición [9].

La existencia de asimetrías en las señales dejadas por una lluvia inclinada en los detectores de superficie es de gran interés, ya que permiten realizar novedosos estudios de composición primaria. Las asimetrías de origen temporal fueron observadas por primera vez en el experimento Pierre Auger.

#### 4. Análisis

Las señales dejadas por una lluvia inclinada (entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  de ángulo cenital) en el plano del detector presentan simetría elíptica centrada en el eje de la lluvia. Aplicando una transformación simple, se pueden proyectar las posiciones de las estaciones y distribuciones temporales al plano perpendicular a la dirección del eje de la lluvia y de esta manera intentar recuperar la simetría cilíndrica.

Se puede observar en la Figura 5 el plano del detector de superficie y el plano definido por el frente de la lluvia. El ángulo  $\theta$  es la inclinación de la lluvia incidente respecto de la incidencia normal. El ángulo  $\phi$  es el ángulo acimutal sobre el plano del detector, mientras que el ángulo acimutal  $\zeta$  está medido en el plano del frente de la lluvia.

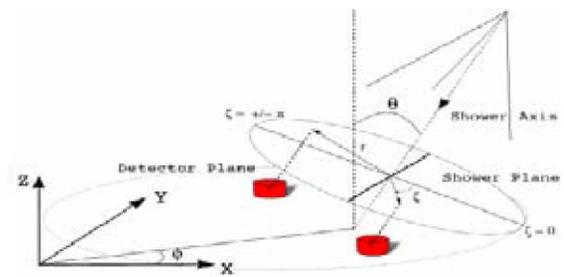


Figura 5: Esquema geométrico para una lluvia de partículas y el detector.

La dirección de arribo del primario define dos regiones para la lluvia, “early”  $-\pi/2 < \zeta < \pi/2$  y “late”  $\pi/2 < \zeta < -\pi/2$ . Si las lluvias son poco inclinadas, la señal en los detectores de superficie depende sólo de la distancia perpendicular al eje de la lluvia. Sin embargo, para una lluvia inclinada, la simetría circular se rompe debido a que una porción de la cascada se desarrolla más en la atmósfera antes que el frente de la cascada llegue al suelo, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6. Entonces esta asimetría aparece debido a que las magnitudes medidas en los WCD serán diferentes dado que están viendo distintos puntos de desarrollo de la cascada.

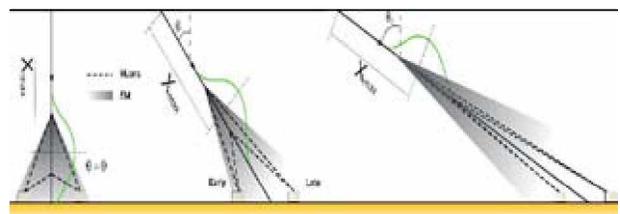


Figura 6: Geometría de una lluvia de partículas con distinto ángulo cenital.

La fuente dominante de la asimetría acimutal es la atenuación de la componente electromagnética a través del arreglo de superficie en la región “late” de la EAS.

Una lluvia con un ángulo cenital  $\theta$  es comparable con una lluvia vertical rotada un ángulo  $\theta$  y evaluada en la profundidad atmosférica  $t' = t/\cos\theta$  donde  $t$  es la profundidad atmosférica vertical. La profundidad atmosférica atravesada por las partículas de la lluvia,  $t'$  puede ser expresada usando un desarrollo de Taylor alrededor de  $t_s = t\sec\theta$  [2]:

$$\tau(r, t) = a + b\cos\zeta \quad (1)$$

donde

$$a = \tau(r, t\sec\theta) \quad (2)$$

y

$$b/a = B \frac{\partial \ln \tau}{\partial \ln t'} \Big|_{t_s} \quad (3)$$

En la Figura 7 puede verse para una dada energía, el gráfico de *risetime*/ $r$  en función del ángulo

acimutal con datos colectados por el Observatorio Pierre Auger.

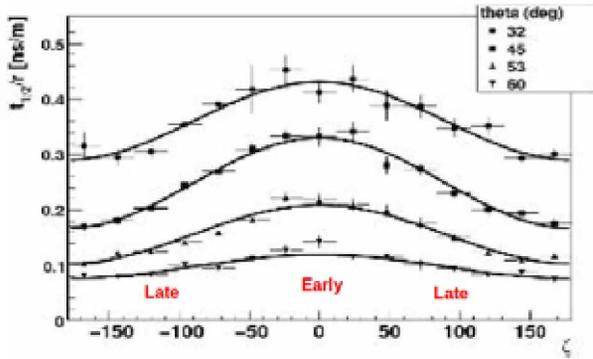


Figura 7:  $t_{1/2}/r$  en función del ángulo acimutal correspondiente a distintos ángulos cenitales.

El factor de asimetría  $b/a$  que depende de  $t_s$  puede ser usado como una medida logarítmica de la variación de  $\tau$  con la profundidad medida en la dirección de la lluvia. Este parámetro es un indicador de la evolución de la lluvia y contiene información de la composición del primario.

La dependencia del factor de asimetría  $b/a$  con  $sec\theta$  permitió encontrar un observable para determinar la composición de masa del primario.

Para poder distinguir la composición primaria utilizando el valor de  $t_{1/2}/r$  se siguen los siguientes pasos

1. Se seleccionan eventos en intervalos de ángulo  $\theta$  y energía  $E$  reconstruidos. Para estos eventos se determina el  $t_{1/2}/r$ . Para cada intervalo de  $E$ ,  $sec\theta$  y  $\zeta$ , se calcula el valor medio y la desviación estándar. Es importante mencionar que el  $t_{1/2}/r$  crece aproximadamente lineal con la distancia al  $core$ . De modo que el parámetro que se usa es  $t_{1/2}/r$ , para poder utilizar todo el rango de  $r$  para el análisis.
2. Para cada intervalo ( $E$ ,  $\theta$ ) se realiza un ajuste del  $t_{1/2}/r$ . Esto provee el factor de asimetría  $b/a$ .
3. Para cada tipo de primario e intervalo de energía se estudia la dependencia del factor de asimetría con  $sec\theta$ . En la Figura 8 se puede ver la evolución del valor de  $b/a$ . En el desarrollo longitudinal de la asimetría se ve claramente un valor máximo que es diferente para diferentes especies primarias. La posición de este máximo, llamado  $X_{AsymMax}$ , se obtiene ajustando una función normal [2].

Así  $X_{AsymMax}$  es un observable con gran sensibilidad a la composición y estable frente a las predicciones de los diferentes modelos de interacción

hadrónica y del número de muones a nivel del suelo [2].

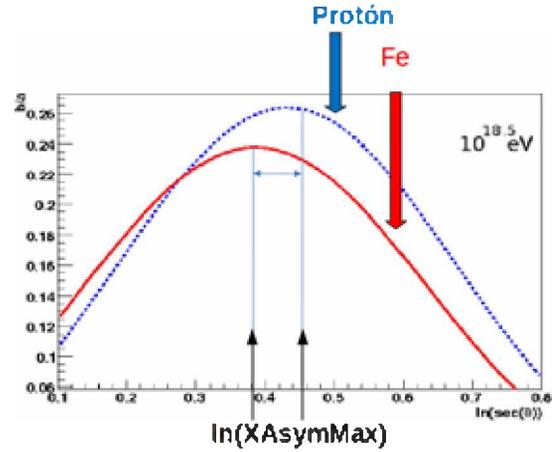


Figura 8: Desarrollo longitudinal de la asimetría para protón y hierro a una energía de  $10^{18.5} eV$ .

A partir de los valores de  $X_{AsymMax}$  en función de la energía, para lluvias originadas con primarios de distintas especies, se puede observar una clara separación para diferentes composiciones. Una de las principales fuentes que contribuyen al error sistemático en la determinación del valor de  $X_{AsymMax}$  es la incerteza en la determinación del  $core$  o punto de impacto del eje de la lluvia.

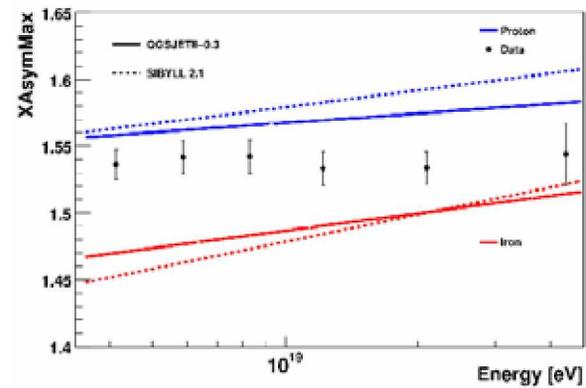


Figura 9:  $X_{AsymMax}$  en función de la energía para distintos primarios y modelos de interacción.

## 5. Reconstrucción de la posición del $core$ y su influencia en $X_{AsymMax}$

Debido a que el método de reconstrucción de los datos con el detector SD supone simetría cilíndrica en el plano de la lluvia, al reconstruir la posición del punto de impacto del eje de las lluvias se observa un corrimiento en la dirección de incidencia de la misma. Este efecto puede verse en la Figura 10. Para construir este gráfico se tomaron conjuntos de datos correspondientes a varias lluvias simuladas iniciadas por protón, en las que se ha dejado libre la posición del  $core$  ( $core_{free}$ ) y el mismo conjunto de datos

donde se ha fijado la posición del *core* en la reconstrucción (*corefix*). Con ello se realizó un histograma en dos dimensiones para las diferencias de coordenadas en  $x$  e  $y$  de la posición del *core*.

Así la Figura 10 muestra para todo ángulo de incidencia cenital y a una energía dada, la diferencia entre la coordenada simulada y reconstruida norte y este, proyectadas en la dirección de incidencia de la lluvia. Se puede observar que el valor medio de la posición del *core* se encuentra siempre desplazado en la dirección de incidencia de las lluvias, lo que corresponde a un valor de  $\Delta x$  negativo, mientras que el valor de la diferencia  $\Delta y$  se mantiene alrededor de cero.

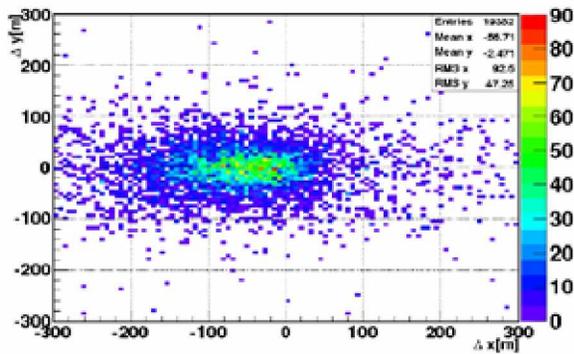


Figura 10: corrimiento de la posición del *core* para un conjunto de lluvias iniciadas por protón con una energía de  $10^{19} eV$ . La escala a la derecha esta relacionada con el numero de entradas.

A fin de estudiar en detalle la diferencia de la reconstrucción del *core* con la inclinación de la lluvia, se realizó un estudio de este corrimiento a energía fija, para distintos intervalos de  $\theta$ . Como resultado se observó que el valor medio del corrimiento aumenta con  $\theta$  y llega a un valor máximo alrededor del máximo de asimetría, que es de aproximadamente  $50^\circ$  [2].

En primer lugar se estudió el efecto de fijar la posición del punto de impacto de la lluvia sobre la señal de  $t_{1/2}/r$ , donde  $r$  es la distancia al *core*. Así se observa en el gráfico de la Figura 11 la dependencia del  $t_{1/2}/r$  en función del ángulo acimutal, para una dada energía, composición y ángulo cenital, para ambos casos, *corefix* y *corefree*. Los valores de *risetime* obtenidos en este caso corresponden al intervalo de energías entre  $10^{19,3} eV$  y  $10^{19,7} eV$  y para  $\theta$  entre  $36^\circ$  y  $41^\circ$ , con lluvias iniciadas por protones.

Como el *core* se desplaza en la dirección de incidencia de la lluvia, se puede interpretar como que se dividió la señal de *risetime* por un valor de  $r$  más chico en la parte *early* de la señal, con lo cual el *risetime/r* aumenta, mientras que en la parte late de la señal, el  $r$  es mayor y así el valor de *risetime/r* disminuye.

Este análisis permite propagar las incertezas al parámetro de asimetría **XAsymMax**, estudiando el desarrollo longitudinal de la asimetría, como se ve

en la Figura 12. En esta Figura se incluyó el ajuste correspondiente a una función Gaussiana, que como ya se ha mencionado, permite hallar el valor de la *sec $\theta$*  para el que  $b/a$  es máximo, **XasymMax**, para ambos casos, *core* libre y fijo.

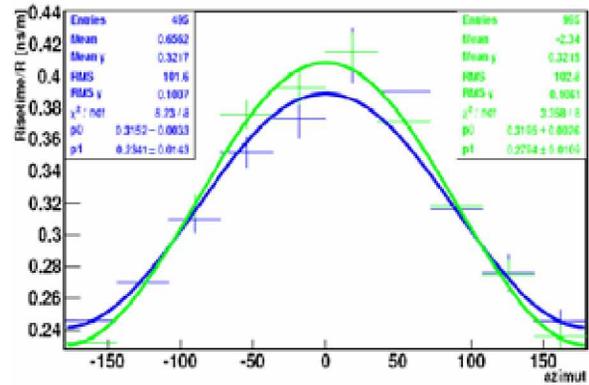


Figura 11: *Risetime* en función del ngulo acimutal. La línea azul representa el ajuste correspondiente a los datos con el *core* fijo y la verde con el *core* libre.

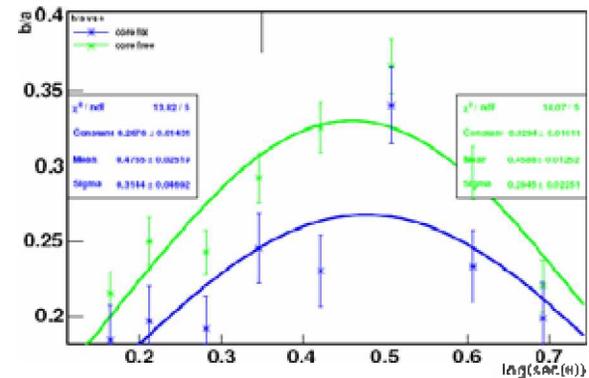


Figura 12:  $b/a$  para distinto valores de  $\theta$  correspondientes a *core* fijo y libre, para una energía fija de  $10^{18,95} eV$ .

El análisis se repitió para diferentes valores de energía del primario. Finalmente graficando **XasymMax** para distintas energías reconstruidas se obtiene el comportamiento de este parámetro en el caso del *core* fijo o libre. En la Figura 13 se presenta el resultado para primarios protones en el rango de energías desde  $10^{18,5} eV$  hasta  $10^{21} eV$ . Se observa que la recta correspondiente al conjunto de datos con el *core* fijo está para todas las energías por debajo de la recta correspondiente a los datos con el *core* como parámetro libre. Esto significa que el error sistemático en la determinación de la posición del *core* genera un desplazamiento en el parámetro de asimetría **XasymMax** siempre en la misma dirección. La diferencia entre estas rectas da una medida del error sistemático máximo cometido al reconstruir la posición del *core* y cómo éste afecta a la determinación de **XAsymMax**.

Los resultados presentados hasta aquí corresponden a lluvias iniciadas por protones, ya que es la

composición que da la mayor desviación en la posición del *core*, y por lo tanto la incerteza más grande asociada al valor de **XAsymMax**. En la Figura 14 se comparan los resultados obtenidos tanto para primarios protón como para núcleos de Fe. Se observa que para el Fe el corrimiento es menor, pero dada la baja estadística de la muestra, la diferencia de los valores de asimetría no es apreciable por encima de las fluctuaciones estadísticas.

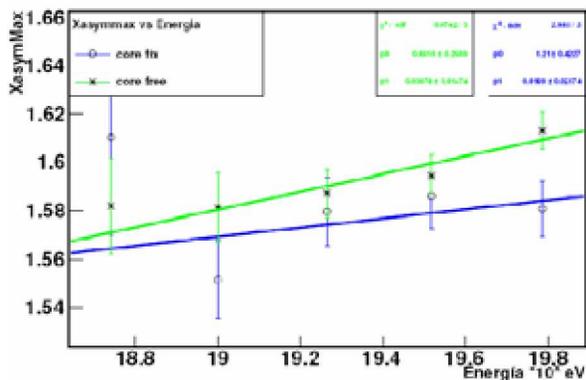


Figura 13: **XAsymMax** en función de la energía para protón, *core fit* y *free*.

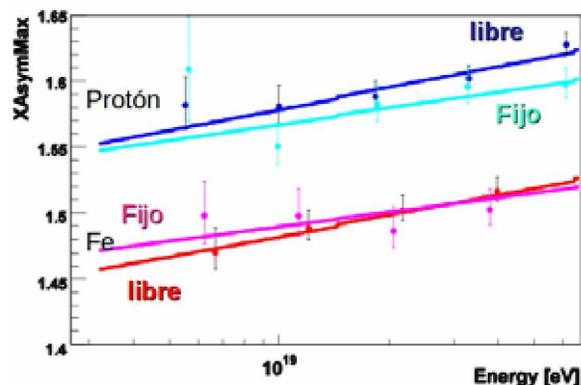


Figura 14: **XAsymMax** vs energía. La línea azul y la línea celeste corresponden a una composición primaria de protón, respectivamente *core* libre y fijo, mientras que las líneas rosa y roja corresponden a una composición de Fe, *core* fijo y libre respectivamente.

## 6. Discusión y Conclusiones

La posición del *core* en el plano del detector, se desplaza en la dirección de incidencia de la lluvia hasta un máximo de 140 metros para una energía de  $10^{20}$  eV, dependiendo de la energía y del ángulo cenital. La incerteza en el *core* debido a la reconstrucción es aproximadamente 60 metros, que corresponde al corrimiento de lluvias iniciadas por protones a  $\log(E/\text{ev})=18.5$  en el análisis. Este corrimiento se traduce en una variación menor que 0.5% para el parámetro de asimetría **XAsymMax** que se utiliza para inferir la composición de la partícula primaria.

## 7. Agradecimientos

El análisis presentado en este trabajo está basado en varias discusiones y aplicaciones desarrolladas por la Colaboración Pierre Auger, por esto queremos agradecer a todos sus miembros. En particular a Diego García Pinto, el grupo Offline y el uso del centro de cómputos de IN2P3 Lyon.

## Referencias

- [1] Diego García Pinto, *Time Asymmetry in UHE Cosmic Ray Showers. Mass Composition Studies in the Pierre Auger Observatory*, Memoria para optar al grado de Doctor en Física por la Universidad Complutense de Madrid.
- [2] M. T. Dova, M.E. Manceñido, A.G. Mariuzzi, H. Wahlberg, F. Arqueros, D. García-Pinto, *Time asymmetries in extensive air showers: a novel method to identify UHECR species*, Astroparticle Physics, Volume 31, Issue 4, May 2009, Pages 312-319.
- [3] H. Wahlberg for the Pierre Auger Collaboration, *Study of the nuclear mass composition of UHECR with the surface detectors of the Pierre Auger Observatory*, 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 2009.
- [4] Luis Anchordoqui, María Teresa Dova, Analisa Mariuzzi, Thomas McCauley, Thomas Paul, Stephen Reucroft, John Swain, *High Energy Physics in the Atmosphere: Phenomenology of Cosmic Ray Air Showers*, Annals Phys. 314, 4 July 2004.
- [5] Pierre Auger Collaboration, *Measurement of the Depth of maximum of Extensive Air Showers above  $10^{18}$  eV*, arXiv:1002.0699v1 [astro-ph.HE], submitted for publication.
- [6] The Pierre Auger Collaboration, *The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory*, Nucl. Inst. Meth. arXiv.0907.4282v1[Astro-ph.IM], submitted for publication.
- [7] Ioana Codrina Maris, *Measurement of the Ultra High Energy Cosmic Ray Flux using Data of the Pierre Auger Observatory*, Fakultät für Physik der Universität (TH)Karlsruhe, Tesis de Doctorado 2008.
- [8] F. Schussler for the Pierre Auger Collaboration, *Measurement of the Cosmic ray energy spectrum above  $10^{18}$  eV using the Pierre Auger Observatory*, 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, July 2009.
- [9] H. Wahlberg *Mass composition studies using the surface detector of the Pierre Auger Observatory*, Nucl.Phys. Proc. Suppl. **196**, 195-198 (2009).