

Resumen

Esta tesis se basó en el análisis de las direcciones de arribo de rayos cósmicos de ultra-alta energía ($E > 10^{18}$ eV \equiv 1 EeV) con el objetivo de localizar las eventuales fuentes astrofísicas y también obtener información sobre la magnitud de los campos magnéticos galácticos o extragalácticos que atraviesan los rayos cósmicos en su camino a la Tierra. Para ello, utilizamos los datos de rayos cósmicos detectados por el Observatorio Pierre Auger, situado en Malargüe, Argentina.

En particular, estudiamos el caso en que se detecten varios eventos provenientes de una misma fuente, denominados multipletes, y analizamos su utilización para reconstruir la posición de la fuente y extraer información sobre los campos magnéticos atravesados por las partículas. Con este fin, simulamos fuentes localizadas al azar en el cielo y consideramos rayos cósmicos provenientes de las mismas, con un espectro de energía de E^{-2} en la fuente y tomando en cuenta la magnificación del flujo debido al efecto de lente magnética. Propagamos los rayos cósmicos a través de un modelo de campo magnético galáctico con componentes regular y turbulenta que intenta reproducir las propiedades generales del campo magnético galáctico determinadas experimentalmente. La componente regular fue modelada con una configuración espiral bisimétrica, simétrica con respecto al plano galáctico (BSS-S) y para la componente turbulenta se usó un campo Gaussiano al azar.

A partir de las direcciones de arribo y las energías de los eventos simulados, se analizó la correlación esperada entre la dirección de arribo y la inversa de la energía de los rayos cósmicos. Dicha correlación es debida al hecho de que los rayos cósmicos son mayormente partículas cargadas y los mismos sufren diferentes deflexiones causadas por los campos magnéticos en su camino a través de la Galaxia que dependen de su energía y por lo tanto, son observadas en diferentes direcciones de arribo que aparecen alineadas en el cielo de acuerdo a su energía. La dirección de arribo a la Tierra $\vec{\theta}$ de una partícula con energía E está relacionada con la dirección de la fuente $\vec{\theta}_s$ por $\vec{\theta} = \vec{\theta}_s + \frac{\vec{D}(\vec{\theta})}{E}$, siendo \vec{D} la integral de línea de la componente perpendicular del campo magnético \vec{B} por la carga Ze de la partícula: $\vec{D}(\vec{\theta}) = Ze \int_0^L d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{l})$. Por lo tanto, a partir de la posición de arribo vs. $1/E$ de los eventos, se puede reconstruir la posición de

la fuente y la integral de la componente perpendicular del campo magnético a lo largo de la línea de visión, realizando un ajuste lineal (aproximando $D(\vec{\theta}) \simeq D(\vec{\theta}_s)$, válido para deflexiones pequeñas) o cuadrático (siguiente corrección en $1/E$). Analizamos la exactitud de ambos ajustes, comparando los valores reconstruidos con los originales. Para estudiar el efecto de la resolución experimental en energía y ángulo, agregamos incertezas con distribución Gaussiana en la energía y en la dirección de arribo de los eventos simulados suponiendo como magnitud la resolución del Observatorio Pierre Auger. Mostramos que si diez eventos con energías mayores a 30 EeV son detectados provenientes de una misma fuente, sería posible reconstruir la posición de la fuente con una exactitud de 0.8° y la integral de la componente ortogonal del campo magnético a lo largo de la línea de visión con una exactitud de $0.8 \mu\text{G kpc Z}^{-1}$, teniendo en cuenta la resolución experimental. Este trabajo fue publicado en la revista *Astroparticle Physics* [1].

A su vez, estudiamos métodos de detección de multipletes en el caso realista en que varios eventos de una misma fuente se observen superpuestos con eventos del fondo (eventos que no provienen de esa fuente). Realizamos estudios de los datos de rayos cósmicos con energías mayores que 20 EeV detectados por el Observatorio Pierre Auger y analizamos los multipletes con los métodos de reconstrucción detallados anteriormente. Desarrollamos métodos para seleccionar conjuntos de eventos que puedan corresponder a una misma fuente y estudiamos criterios para diferenciarlos del fondo. Para ello, aplicamos un corte en el coeficiente de correlación lineal entre el ángulo de deflexión u y la inversa de la energía, $C(u, 1/E) > C_{\min}$, y un corte en la dispersión angular en la dirección perpendicular a la deflexión w , $W = \text{máx}(|w_i - \langle w \rangle|) < W_{\max}$. Para determinar el valor óptimo de C_{\min} y W_{\max} , realizamos simulaciones de multipletes provenientes de fuentes y comparamos la cantidad de eventos que se retienen aplicando diferentes valores para los cortes con su significancia. Dicha significancia es cuantificada contando la fracción de simulaciones de eventos con distribución isótropa en las cuales un multiplete de la misma o mayor multiplicidad y pasando los mismos cortes de selección aparece al azar. De esta manera, determinamos que el mejor compromiso entre maximizar la señal de una fuente verdadera y minimizar el fondo proveniente de alineaciones al azar para la cantidad de eventos analizada (~ 1500) se obtiene para $C_{\min} = 0,9$ y $W_{\max} = 1,5^\circ$. Aplicando estos cortes en los datos detectados por el Observatorio Pierre Auger entre el 1 de enero de 2004 y el 31 de diciembre de 2010 hallamos un multiplete con 12 eventos y dos multipletes con 10 eventos. Para los multipletes correlacionados hallados reconstruimos la posición de la posible fuente y la integral de la componente ortogonal del campo magnético a lo largo de la línea de visión. Calculamos la probabilidad de que los multipletes encontrados en los datos se originaran a partir de eventos distribuidos al azar teniendo en cuenta la exposición del Observatorio y determinamos que dichos

multipletes no son estadísticamente significativos. Además, realizamos una propuesta para el seguimiento de los multipletes hallados con los futuros datos con el objetivo de determinar cuales de ellos corresponden a fuentes reales. Con este fin, calculamos la probabilidad de que un multiplete correlacionado crezca con eventos que provengan del fondo y no de la fuente original y con ello si uno de los multipletes crece después de n eventos nuevos, se puede determinar la probabilidad de que haya ocurrido por azar. Estos resultados se encuentran descritos en notas técnicas de la Colaboración Pierre Auger [2–4] y en un artículo a nombre de la Colaboración Auger que fue publicado en la revista *Astroparticle Physics* [5].

Otra línea complementaria de estudio ha sido la de desarrollar un método para detectar imágenes secundarias de una fuente debidas al efecto de lente magnética. Dicho efecto provoca que rayos cósmicos de la misma energía provenientes de la misma fuente arriben a la Tierra desde diferentes direcciones. Estas imágenes secundarias podrían ser detectadas gracias a la magnificación que presenta su flujo cerca de la energía crítica a la cual aparecen. Para ello, caracterizamos la distribución angular típica de las mismas con simulaciones y a partir de ello, desarrollamos un algoritmo para la búsqueda de este tipo de excesos en los datos. También determinamos el número mínimo de eventos que se requieren para detectar una señal con probabilidad menor que 10^{-3} de ocurrir al azar en una distribución isótropa de direcciones de arribo y estimamos un límite superior a la densidad de fuentes de rayos cósmicos necesaria para poder detectar esa cantidad de eventos de una fuente. La detección de un exceso de eventos debido a la aparición de imágenes secundarias permitiría obtener la localización de las líneas críticas y la energía a la cual aparecen las primeras cáusticas y ello sería una valiosa información que ayudaría a desentrañar el campo magnético galáctico. Este trabajo fue publicado en la revista *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* [6]. Aplicamos el algoritmo desarrollado a eventos con energías mayores que 9 EeV detectados en el Observatorio Pierre Auger desde el 1 de enero de 2004 al 4 de noviembre de 2011, realizando una adaptación del cálculo de la significancia para tener en cuenta la exposición no uniforme del Observatorio. Los excesos con mayor significancia hallados no son estadísticamente significativos.

Palabras clave: RAYOS CÓSMICOS DE ULTRA-ALTA ENERGÍA, OBSERVATORIO PIERRE AUGER, CAMPOS MAGNÉTICOS GALÁCTICOS