

Resumen

El presente trabajo provee un análisis detallado de las anisotropías a gran escala angular en las direcciones de arribo de los rayos cósmicos registrados por el detector de superficie del observatorio Pierre Auger. El observatorio está ubicado en Argentina y es actualmente el mayor y más complejo detector de rayos cósmicos de ultra alta energía. Su diseño es híbrido y consta de dos sistemas de detección: los telescopios de fluorescencia y el arreglo de detectores de superficie. Este último está conformado por una red triangular de estaciones Cherenkov en agua.

Los desarrollos realizados abarcan desde la adecuación del conjunto de datos optimizado para la búsqueda de anisotropías, pasando por la estimación y corrección de modulaciones espurias asociadas a las condiciones experimentales y finalmente ejecutando los procedimientos para reconstruir anisotropías de tipo dipolar y cuadrupolar en el flujo de rayos cósmicos en diferentes intervalos de energía.

El conjunto de datos óptimo para los estudios de anisotropía, es aquel en el que los errores sistemáticos que pueden afectar el conteo de eventos provenientes de diferentes direcciones del cielo han sido disminuidos hasta niveles por debajo de las incertezas propias del experimento y la incertidumbre estadística del método a emplear. Las condiciones atmosféricas, tales como la presión (P), la temperatura (T) o la densidad del aire ($\rho \propto P/T$), son una de las fuentes de errores sistemáticos, ya que afectan el desarrollo de las lluvias atmosféricas extendidas y por ende las características que de éstas se infieren en los experimentos ubicados en tierra. En esta tesis se actualizaron y mejoraron estudios previos sobre el impacto de la variabilidad climática en la reconstrucción de las cascadas de partículas medidas con los detectores de superficie del observatorio Auger y el modo de corregir sus efectos en la estimación de la energía del rayo cósmico primario. Los avances con respecto al análisis anterior incluyen: aumento en la estadística, lo que permitió realizar el procedimiento en un umbral de energía mayor (10^{18} eV \equiv 1 EeV) en el cual el detector es más eficiente, mejoras al acuerdo entre el modelo y la tasa de eventos observada, realización de ajustes de la dependencia de las correcciones con el ángulo cenital, útil para la implementación en el algoritmo de reconstrucción de eventos oficial del observatorio y finalmente se llevo a cabo, por primera vez, un análisis similar para una red de detectores de superficie con menor separación, dedicado a la detección de rayos cósmicos de energía más baja.

La cadena de detección en las estaciones de superficie sigue una jerarquía de disparo. En los análisis de anisotropías a escalas angulares grandes realizados hasta el momento se requería que los eventos cumplieran con el criterio de disparo más estricto, en el cual la estación con mayor señal debe estar rodeada por sus seis estaciones vecinas en funcionamiento al momento de la detección (6T5). Para este trabajo se analizó la posibilidad de relajar la condición antes mencionada e incluir también los eventos para los cuales el detector con mayor señal está rodeado solo de cinco estaciones en funcionamiento (5T5). Se encuentra que para energías por encima de 4 EeV los efectos sistemáticos que podrían inducirse con la inclusión de estos eventos están muy por debajo de las incertidumbres estadísticas y sistemáticas propias del método de reconstrucción. El número de eventos aumenta $\sim 18\%$ al adoptar el criterio 5T5.

La estimación de las componentes dipolares y cuadrupolares en el flujo de rayos cósmicos, se realiza a través del análisis de Fourier en ascensión recta y azimut de la tasa de eventos con energías arriba de 4 EeV con datos registrados durante más de 12 años. Se consideraron eventos con ángulos cenitales hasta 80° , de tal forma que se cubre el 85% del cielo. También se relaja la condición de disparo a 5T5. Las amplitudes del primer armónico en ascensión recta obtenidas para los dos intervalos de energía $4 \text{ EeV} < E < 8 \text{ EeV}$ y $E \geq 8 \text{ EeV}$ son $0.5_{-0.2}^{+0.6}\%$ y $4.7_{-0.7}^{+0.9}\%$, respectivamente. En el rango de energía menor la distribución es consistente con isotropía. Por otro lado, en el intervalo arriba de 8 EeV la amplitud es significativa, teniendo una probabilidad de surgir por azar bajo la hipótesis de una distribución isótropa de 2.6×10^{-8} . Penalizando por el hecho de que la búsqueda se realizó en dos rangos de energía, la presente anisotropía tiene una significación de 5.4σ . Combinando el primer armónico en ascensión recta y azimut se reconstruyen las componentes del dipolo en tres dimensiones. La señal en $E \geq 8 \text{ EeV}$ está descrita por un dipolo de amplitud $6.5_{-0.9}^{+1.3}\%$ apuntando en la dirección en coordenadas galácticas $(\ell, b) = (233^\circ, -13^\circ)$, a $\sim 125^\circ$ del centro de la Galaxia, lo que es indicativo del origen extra-galáctico de los rayos cósmicos a energías mayores a 8 EeV. Agregando el segundo armónico se determinan las componentes cuadrupolares, ninguna de las cuales es significativa.

Posteriormente, se subdivide el rango de energías superiores a 8 EeV en tres intervalos: $[8,16] \text{ EeV}$, $[16,32] \text{ EeV}$ y $E \geq 32 \text{ EeV}$ para analizar una posible evolución del dipolo observado con la energía. Se encuentra que las fases no son muy diferentes en los tres rangos de energía y que la amplitud del dipolo tiende a crecer con la energía para $E > 4 \text{ EeV}$.

El análisis de la distribución de las direcciones de arribo de los rayos cósmicos con energías por debajo de 4 EeV, que es el umbral de eficiencia completa del detector, está expuesto a errores sistemáticos mayores debido a la posible dependencia de la eficiencia con el ángulo de llegada y las condiciones atmosféricas. Para tener en cuenta lo anterior se parametriza la dependencia de la eficiencia de detección con la energía y el ángulo

cenital y se propone una corrección de los efectos de las condiciones atmosféricas en dicha eficiencia. Estas correcciones permiten controlar los sistemáticos y realizar el análisis de Fourier en ascensión recta a energías menores al umbral de eficiencia completa. Usando los datos recolectados por los dos arreglos de superficie del observatorio Auger se reconstruye la componente del dipolo en el plano ecuatorial terrestre desde energías ~ 0.03 EeV hasta $E \geq 32$ EeV. Aparte de la amplitud reportada arriba de 8 EeV en ninguno de los intervalos de energía restantes existe una modulación significativa del flujo. Sin embargo, es aparente una transición en la fase de valores cercanos a la dirección del centro de la Galaxia ($\alpha_d \simeq \alpha_{CG} = -94^\circ$) a energías abajo de 1 EeV hacia direcciones casi opuestas ($\alpha_d \simeq 100^\circ$) arriba de 4 EeV.

Finalmente, se analizan las distribuciones de arribo esperadas en escenarios simples de las fuentes de rayos cósmicos ultra-energéticos, se discuten los efectos del campo magnético de la Galaxia en las anisotropías del flujo y se comparan con las anisotropías observadas. En primera instancia, se considera el caso de rayos cósmicos de origen galáctico. Para ello se suponen fuentes distribuidas de acuerdo a la densidad de materia luminosa en la Galaxia. Los resultados dependen de la relación energía-carga E/Z y se reportan para algunos valores relevantes. La dirección del dipolo en ninguno de los casos es compatible con la observada a energías superiores a 8 EeV. En segundo lugar, se estudian los efectos en un flujo de origen extra-galáctico: como primer escenario se supone una distribución perfectamente dipolar que ingresa en el halo de la Galaxia y se determina el cambio en la dirección y la magnitud de este dipolo debida a la propagación en el campo magnético galáctico para distintos valores de E/Z . El segundo escenario adopta la distribución de fuentes siguiendo un catálogo de galaxias e incluye los efectos de la propagación en el campo magnético extra-galáctico. Se construyen mapas del flujo esperado para diferentes valores de energía. Posteriormente, se estiman la dirección del dipolo y el espectro angular de potencias C_ℓ hasta $\ell = 20$ para los flujos antes y después de atravesar el campo magnético de la Galaxia. Por último, se estudia el rol de la densidad de fuentes y su distribución espacial sobre las direcciones de llegada esperadas.

Palabras clave: RAYOS CÓSMICOS, ANISOTROPÍA, CAMPO MAGNÉTICO, ANÁLISIS DE FOURIER