



FACULTAD DE FÍSICA

GRADO EN FÍSICA

Curso 2021-22

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN DE LA EMISIÓN EN RADIO EN
CASCADAS ATMOSFÉRICAS INICIADAS POR
NEUTRINOS TAU DE MUY ALTAS ENERGÍAS EN
DETECTORES A GRAN ALTITUD

Especialidad en Física Nuclear y de Partículas

Autor:

Sergio Cabana Freire

Tutor:

Jaime Álvarez Muñiz

Departamento de Física de Partículas & IGFAE

Junio 2022

Facultad de Física
Grado en Física
Curso 2021-22
TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN DE LA EMISIÓN EN RADIO EN CASCADAS ATMOSFÉRICAS INICIADAS POR NEU- TRINOS TAU DE MUY ALTAS ENERGÍAS EN DETEC- TORES A GRAN ALTITUD

Especialidad en Física Nuclear y de Partículas

Autor: Sergio Cabana Freire

Tutor: Jaime Álvarez Muñiz, Departamento de Física de Partículas (USC) & Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE)

Data de presentación: Junio 2022

Declaración firmada por el autor de la originalidad del trabajo

El autor del trabajo declara que e presente es un trabajo original. Autoriza asimismo al control por personal de la Universidade de Santiago de Compostela de la mencionada originalidad, eventualmente mediante el empleo de bases de datos y la inclusión en ellas.

En Santiago de Compostela, a X de junio de 2022. Firmado,

Autorización del autor a la difusión del trabajo

El autor autoriza a la difusión del trabajo a los efectos considerados en los vigentes reglamentos de TFG y TFM de la Universidade de Santiago de Compostela (Artículo 11.3) y de TFM del Máster en Física (Artículo 33), entendiendo que esta autorización no inflúye en la propiedad intelectual del trabajo ni a la posibilidad de publicar el mismo total o parcialmente por otros medios. Autoriza asimismo a que la Facultad de Física de esa Universidad disponga de copia electrónica del trabajo para su archivo, consulta y empleo para usos académicos y de investigación con la mención específica al autor.

En Santiago de Compostela, a X de junio de 2022. Firmado,

• **Resumen:** Aquí va el resumen en castellano. El orden de los idiomas puede cambiarse a voluntad. También (y aunque la hoja de resúmenes no contabiliza para el número límite de páginas, ver sección ?? de este documento) puede reducirse, si se desea, el tamaño de letra de los resúmenes en los dos idiomas que no sean el usado en el texto principal de la memoria (por ejemplo, anteponiendo `footnotesize{}` al texto). % anteponiendo `footnotesize` al texto, por ejemplo

• **Resumo:** Aquí vai o resumo en galego. Debe coincidir co introducido na secretaría virtual no momento do depósito da memoria final e solicitude de defensa. Dado que a aplicación informática de secretaría virtual non admite calqueira carácter, o regulamento permite introducir nela representacións alternativas dos caracteres problemáticos (por exemplo introducir gamma en vez de γ , introducir YBa2Cu3O(7-delta) en vez de YBa₂Cu₃O_{7- δ} , etc.). Non ten por qué coincidir co resumo do proxecto de TFG/TFM que foi feito no momento da asignación de traballo e titor (entendendo que o titor da o visto bo no seu informe final). Ten que haber resumos en (como mínimo) galego, castelán e inglés, cada un de 300 palabras máximo.

• **Abstract:** The abstract goes here.

Índice

1. Introducción	2
2. Emisión en radio: Principio físico y caracterización	3
2.1. Formalismo de la emisión	3
2.2. Caracterización de la emisión en simulaciones Monte Carlo	4
3. Caracterización de cascadas hacia arriba	5
4. Emisión en radio en cascadas hacia arriba	6
5. Conclusiones	7
Referencias	8

1. Introducción

2. Emisión en radio: Principio físico y caracterización

El objetivo fundamental de este trabajo, como hemos comentado en el apartado introductorio, es la caracterización de las radiofrecuencias emitidas en cascadas atmosféricas y el estudio de su posible aprovechamiento para la detección de neutrinos tau de origen astrofísico. Para poder avanzar en esta cuestión, debemos plantear los mecanismos físicos que originan dicha emisión, ya que una buena comprensión de los mismos es, como poco, importante para poder interpretar los resultados posteriores.

2.1. Formalismo de la emisión

Como es bien sabido, la presencia de cargas en movimiento en un determinado medio implica, casi de manera inevitable, la emisión de radiación electromagnética. Resulta entonces evidente que, en una cascada atmosférica iniciada, por ejemplo, por un protón o un neutrino de origen astrofísico en la que aparecerán un número gigantesco de partículas cargadas propagándose con una velocidad $v \sim c$, podemos esperar la aparición de radiación electromagnética.

Ahora bien, uno podría pensar de manera ingenua que, en las escalas de energía y número de partículas que involucra una cascada atmosférica, el balance *macroscópico* de cargas positivas y negativas debería ser nulo, y por lo tanto las respectivas contribuciones a la radiación electromagnética emitida deberían cancelarse. Sin entrar en demasiado detalle, basta recordar que los potenciales electromagnéticos pueden expresarse como:

$$\Phi(\mathbf{r}, t) \propto \int_{\text{fuente}} \frac{\rho(\mathbf{r}', t_{\text{ret}})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r' \quad ; \quad \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \propto \int_{\text{fuente}} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t_{\text{ret}})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r' \quad (2.1)$$

Si uno toma que, en promedio, $\langle \rho \rangle \sim 0$ y $\langle \mathbf{J} \rangle \sim 0$, no cabría mucha opción para detectar radiación electromagnética a partir de una cascada atmosférica.

Evidentemente, esta situación desaparece inmediatamente cuando tenemos en cuenta que la cascada se desarrolla en presencia del campo magnético terrestre, y por lo tanto las cargas sufren una deflexión en un sentido u otro según el signo de su carga. En la perspectiva *macroscópica*, podemos interpretar que este efecto de deflexión geomagnética origina una corriente neta perpendicular tanto al desarrollo de la cascada como al campo magnético terrestre, generando entonces un campo eléctrico $\mathbf{E} = -\dot{\mathbf{A}}$

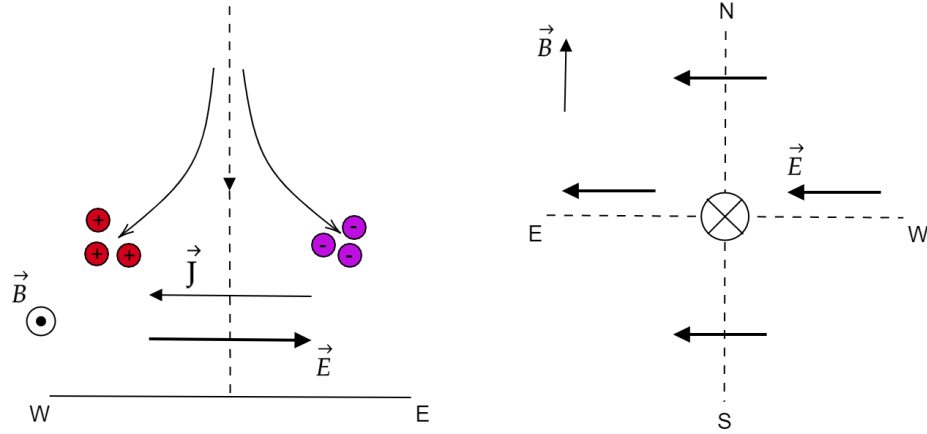


Figura 2.1: Imagen macroscópica del campo eléctrico generado debido a la deflexión geomagnética, para una cascada vertical. De manera muy simplificada, $\mathbf{E} = -\dot{\mathbf{A}} \parallel -\mathbf{J}$. Las direcciones N, S, E, W son relativas al polo norte magnético.

2.2. Caracterización de la emisión en simulaciones Monte Carlo

3. Caracterización de cascadas hacia arriba

4. Emisión en radio en cascadas hacia arriba

5. Conclusiones

Referencias

- [1] Alvarez-Muñiz, J., Carvalho, W. R., Romero-Wolf, A., Tüeros, M., and Zas, E. (2012a). Coherent radiation from extensive air showers in the ultrahigh frequency band. *Physical Review D*, 86(12):123007.
- [2] Alvarez-Muñiz, J., Carvalho, W. R., and Zas, E. (2012b). Monte carlo simulations of radio pulses in atmospheric showers using ZHAireS. *Astroparticle Physics*, 35(6):325–341.
- [3] Alvarez-Muñiz, J., Romero-Wolf, A., and Zas, E. (2011). Practical and accurate calculations of askaryan radiation. *Physical Review D*, 84(10):103003.
- [4] Griffiths, D. (2013). *Introduction to electrodynamics*. Pearson, Boston.
- [5] Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. WILEY.
- [6] Zas, E., Halzen, F., and Stanev, T. (1992). Electromagnetic pulses from high-energy showers: Implications for neutrino detection. *Physical Review D*, 45(1):362–376.