



FACULTAD DE FÍSICA
MÁSTER UNIVERSITARIO 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 (USC) & IGFAE

Julio 2022

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

CARACTERIZACIÓN DE LA EMISIÓN EN RADIO EN CAS- CADAS ATMOSFÉRICAS INICIADAS POR NEUTRINOS TAU DE MUY ALTAS ENERGÍAS EN DETECTORES A GRAN AL- TITUD

Especialidad en Física Nuclear y de Partículas

Autor: Sergio Cabana Freire

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

Fecha de presentación: Julio 2022

Declaración firmada por el autor de la originalidad del trabajo

El autor del trabajo declara que el 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 julio 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 influye 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 julio de 2022. Firmado,

• **Resumen:** La detección de neutrinos de origen astrofísico a muy altas energías es un objetivo científico prioritario dentro de la astronomía de multi-mensajeros. Entre las técnicas de detección consideradas, una de las propuestas más interesantes es el estudio de la radiación electromagnética en radiofrecuencias asociada a cascadas de partículas iniciadas por neutrinos tau de altas energías interaccionando en el interior de la Tierra. En este trabajo, describiremos mediante resultados simulados tanto el desarrollo de dichas cascadas de partículas en la atmósfera como la radiación electromagnética emitida, y comprobaremos la posibilidad de extraer información acerca de la partícula primaria a partir de su estudio.

• **Resumo:** A detección de neutrinos de orixe astrofísica a moi altas enerxías é un obxectivo científico prioritario dentro da astronomía de multi-mensaxeiros. Entre as técnicas de detección consideradas, unha das propostas máis interesantes é o estudo da radiación electromagnética en radiofrecuencias asociada a cascadas de partículas iniciadas por neutrinos tau de altas enerxías interaccionando no interior da Terra. Neste traballo, describiremos mediante resultados simulados tanto o desenvolvemento de ditas cascadas de partículas na atmosfera como a radiación electromagnética emitida, e comprobaremos a posibilidade de extraer información acerca da partícula primaria a partires do seu estudo.

• **Abstract:** The detection of neutrinos of astrophysical origin at very high energies is a priority scientific goal in multi-messenger astronomy. Among the detection techniques considered, one of the most interesting proposals is the study of electromagnetic radiation at radio frequencies associated with particle cascades initiated by high-energy tau neutrinos interacting in the Earth's interior. In this work, we will describe by means of simulated results both the development of such particle cascades in the atmosphere and the electromagnetic radiation emitted, and we will test the possibility of extracting information about the primary particle from its study.

Índice

1. Introducción	2
2. Cascadas atmosféricas	6
2.1. Desarrollo de cascadas en la atmósfera	6
Referencias	10

1. Introducción

El campo de la Física de Astropartículas ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos años gracias a resultados experimentales recientes, que han puesto de manifiesto el potencial de esta disciplina para aumentar nuestro conocimiento acerca del Universo y sus fenómenos más energéticos. Concretamente, la posibilidad de observar eventos astrofísicos a través de la detección simultánea de su emisión electromagnética, ondas gravitacionales y neutrinos, que ha sido confirmada en los últimos años gracias a experimentos como LIGO o IceCube, ha supuesto el nacimiento de una nueva disciplina: la *astronomía de multi-mensajeros*. El desarrollo de este campo, una de las opciones más prometedoras del panorama actual para explorar el Universo a muy altas energías, se ha convertido en una de las prioridades científicas por su evidente potencial [11].

En este marco, la detección de neutrinos de muy altas energías podría ser una de las claves para dar respuesta a numerosas cuestiones abiertas en este ámbito. A su vez, la detección de neutrinos conlleva enormes dificultades a nivel experimental, que obligan a mejorar las técnicas de detección existentes e incluso a desarrollar nuevas opciones para poder observar estas partículas.

El interés observacional en los neutrinos reside, fundamentalmente, en su ínfima probabilidad de interacción. Debido a su masa prácticamente nula y a que únicamente interaccionan débilmente, su propagación a través del Universo no se vería influenciada por interacciones gravitatorias, con los campos magnéticos galácticos o con el fondo cósmico de microondas (CMB). Debido a esto, los neutrinos son óptimos para realizar observaciones a nivel astronómico, al propagarse a lo largo de distancias cosmológicas casi sin perder energía ni alterar su dirección desde su origen, e incluso permitiendo obtener información de regiones electromagnéticamente opacas.

Con esta ventaja en mente, resulta evidente que los neutrinos de muy altas energías¹ abren la posibilidad de aumentar el conocimiento disponible acerca de los fenómenos más energéticos que ocurren en el Universo, tanto dentro de nuestra propia Galaxia como a escalas superiores. En lo que respecta a las posibles fuentes galácticas de neutrinos, podemos citar por ejemplo remanentes de supernovas, nebulosas de viento de púlsar (PWNe) o sistemas binarios en los que existe acreción de materia entre integrantes (y que pueden dar lugar a novas, *X-ray bursts* o supernovas de tipo Ia). En lo relativo a posibles fuentes extragalácticas, se encontrarían por ejemplo núcleos de galaxia activos (AGN), galaxias *starburst* y los eventos denominados como *gamma-ray bursts* (GRB) [5, 6, 7]. En todas ellas, la interacción de rayos cósmicos de alta energía (UHECR) acelerados en la fuente con la materia y radiación presentes en la misma y sus proximidades sería la responsable de la aparición de neutrinos. Por ello, la observación de los neutrinos producidos en esta clase de eventos permitiría aumentar nuestro conocimiento sobre los mismos en gran medida, tanto a partir de la información que contendrían sobre su lugar de origen y los procesos *microscópicos* que los han creado (y que no se perdería al escapar libremente de las fuentes) como combinando dicha información con resultados de experimentos sensibles a otros *mensajeros*.

Además de los neutrinos de origen *localizado* (i.e., originados en una fuente concreta o región compacta), existiría además un flujo difuso de neutrinos, tanto a nivel galáctico como extragaláctico. El origen de dichos neutrinos estaría de nuevo en las interacciones de UHECR con la materia presente en las regiones de producción y aceleración de rayos cósmicos (*neutrinos astrofísicos*) o con el CMB

¹ $E \gtrsim 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ EeV}$

(*neutrinos cosmogénicos*).

Bien sean neutrinos difusos o de fuentes concretas, su aparición se debe a la desintegración de piones cargados y muones, que se originan en las interacciones hadrónicas de los rayos cósmicos (nos referimos indistintamente a neutrinos y antineutrinos con el símbolo ν):

$$\text{Interacción hadrónica de UHECR} \begin{cases} \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \\ \pi^\pm \rightarrow \mu\nu_\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu\nu_\mu \end{cases} . \quad (1.1)$$

Por lo tanto, no sólo la observación de neutrinos procedentes de fuentes concretas sería de interés, sino también la caracterización del espectro de neutrinos astrofísicos y cosmogénicos. Concretamente, la caracterización de los primeros podría arrojar luz sobre los mecanismos de producción y aceleración de rayos cósmicos, ya que su espectro tendría la misma dependencia que la de estos últimos en el momento de su producción, antes de verse afectados por interacciones a lo largo de la propagación. Por su parte, los neutrinos cosmogénicos permitirían aumentar nuestro conocimiento acerca de la propia propagación de rayos cósmicos en el medio intergaláctico, así como de la distribución de fuentes de UHECR en el Universo.

No obstante, la gran ventaja que supone la baja probabilidad de interacción de los neutrinos a la hora de *transmitir* información sobre su origen resulta a su vez un gran obstáculo para su estudio, debido a lo improbable que resulta que un neutrino interactúe de tal manera que podamos detectarlo. Más allá de esta cuestión, los propios flujos de radiación cósmica a altas energías ($< 1 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$ a 10^{15} eV , $< 1 \text{ km}^{-2}\text{siglo}^{-1}$ a 10^{19} eV) obligan a recurrir a detectores con grandes exposiciones y/o áreas efectivas. Concretamente, la detección de partículas a las energías más altas debe realizarse de manera indirecta, estudiando por ejemplo los efectos de sus interacciones en la atmósfera, que se manifiestan en forma de *cascadas extensas* de partículas. En dichos eventos, que discutiremos en detalle en la sec. 2, la producción de un elevado número de partículas en la atmósfera permite extraer información acerca de la partícula inicial o *primaria*, combinando la información obtenida con diversas técnicas entre las que se encuentran el uso de *arrays* de detectores de partículas a nivel del suelo, telescopios sensibles a la fluorescencia producida por la excitación de moléculas en la atmósfera y su posterior desexcitación, telescopios sensibles a la luz Čerenkov emitida a lo largo de la propagación de partículas cargadas en la atmósfera, etc. A la hora de estudiar neutrinos de alta energía, incluso la atmósfera no representa una cantidad de materia suficiente para que tengan lugar las interacciones que dan lugar a cascadas, y debe recurrirse a *blancos* alternativos. Quizá los ejemplos más relevante de experimentos con estas características son, respectivamente, el Observatorio Pierre Auger [12], que combina el empleo de tanques Čerenkov distribuidos en un área de 3000 km^2 con telescopios de fluorescencia; y IceCube [8], que monitoriza un volumen de hielo $\sim 1 \text{ km}^3$ mediante detectores ópticos.

Dentro de las diversas técnicas de detección existe una posibilidad alternativa a las que hemos mencionado que, a pesar de ya haber sido planteada en la década de los 60, ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años gracias tanto a avances técnicos como académicos: la detección de la radiación electromagnética a frecuencias de radio (MHz – GHz) producida por cascadas de partículas [14]. Aunque ahondaremos en el origen y características de esta emisión en la sec. ??, no es difícil convencerse de que un elevado número de partículas cargadas propagándose en la atmósfera tendrá asociada emisión de radiación electromagnética, que como veremos a lo largo de este trabajo contendrá información acerca de la naturaleza, energía y procedencia de la partícula primaria. Además

de abrir la posibilidad de acceder a esta información, la radiodetección cuenta con la ventaja de que los detectores son básicamente antenas, cuyo coste moderado permite cubrir áreas muy extensas y aumentar las opciones de detectar partículas de muy alta energía (por ejemplo en experimentos como RNO-G, LOFAR, ARA, ARIANNA, etc. [14]; e incluso con detectores asociados a instalaciones más generales como IceCube y Pierre Auger).

En el caso particular de la detección de neutrinos de muy alta energía, al no existir la limitación estricta de tener que disponer de detectores a nivel del suelo, la radiodetección permite explotar la posibilidad de emplear la Tierra como blanco de interacción, aumentando en gran medida la probabilidad de observar neutrinos. Concretamente, una de las propuestas más prometedoras y cuyo estudio será el objetivo de este trabajo es la detección de neutrinos tau interaccionando en el interior de la Tierra (Fig. 1.1). Al producirse dicha interacción, aparecería un leptón τ que se desintegraría en la atmósfera, dando lugar a hadrones o electrones de alta energía que iniciarían una cascada de partículas propagándose con gran inclinación² (prácticamente paralela al suelo) y *hacia arriba* en la atmósfera. La emisión de radiación electromagnética podría entonces detectarse en antenas dispuestas en terrenos de gran elevación (~ 5 km), en equipos a bordo de globos (~ 36 km) e incluso en satélites en órbita baja (~ 500 km). La observación desde alturas elevadas permite la monitorización de grandes áreas sobre la superficie terrestre y la búsqueda de cascadas de alta energía que parecen *emerger* de ella.

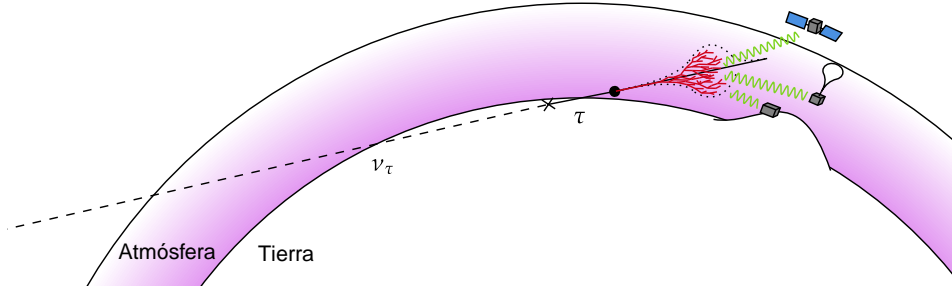


Figura 1.1: Propuesta de radiodetección de neutrinos tau de origen astrofísico con antenas ubicadas en montañas, globos estratosféricos o satélites de órbita baja.

La razón para considerar únicamente neutrinos tau³ reside en el hecho de que el leptón τ combina una baja probabilidad de interacción y pérdida de energía en el interior de la Tierra con una vida media muy corta ($\sim 3 \times 10^{-13}$ s) que permite su desintegración dentro de la atmósfera y la aparición de una cascada. Por el contrario, los μ^\pm asociados a ν_μ *escaparían* de la atmósfera sin generar una cascada, al tener vidas medias largas y pocas interacciones, y los e^\pm asociados a ν_e no llegarían a la atmósfera ya que interaccionarían dando lugar a una cascada en el interior de la Tierra.

Actualmente, existen numerosos experimentos entre cuyos objetivos se sitúan la detección de esta clase de eventos. Entre ellos podemos mencionar BEACON [17], que aspira a medir el flujo de ν_τ con $E > 100$ PeV mediante técnicas interferométricas a partir de datos recolectados en arrays de

²Las distancias que tendría que recorrer el primario dentro de la Tierra para generar cascadas más *verticales* sólo podrían ser posibles en el marco de la física más allá del Modelo Estándar.

³Aunque en (1.1) vemos que las interacciones de UHECR en las fuentes darían una proporción $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 2 : 0$, las oscilaciones de sabor a lo largo de la propagación hacen que, a grandes distancias, $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \sim 1 : 1 : 1$

antenas dispuestas sobre montañas a varios km de altura, o ANITA y su futuro sucesor PUEO [1], que permiten observar mediante antenas dispuestas en globos a gran altura (~ 36 km) la radiación asociada a cascadas iniciadas en interacciones con el hielo de la Antártida.

Este trabajo se enmarca dentro de estas propuestas experimentales, y los desarrollos que haremos a continuación tendrán como objetivo describir y caracterizar tanto cascadas atmosféricas hacia arriba como la emisión en radiofrecuencias asociada, contribuyendo por medio de simulaciones al desarrollo de estas técnicas de detección.

2. Cascadas atmosféricas

Las cascadas atmosféricas representan una de las opciones más importantes para la detección y estudio de la radiación cósmica mas energética. Los escasos flujos de rayos cósmicos ($< 1 \text{ m}^{-2}\text{y}^{-1}$ a partir de $E = 10^{15} \text{ eV}$) hacen que la detección directa de estas partículas, por ejemplo en detectores situados fuera de la atmósfera, sea inviable. Por ello, el estudio de la radiación cósmica en esta región de energías se realiza observando las consecuencias de las interacciones de estas partículas en la atmósfera.

2.1. Desarrollo de cascadas en la atmósfera

Cuando un rayo cósmico de muy alta energía (por ejemplo un protón) llega a las capas superiores de la atmósfera e interacciona con la materia presente en el medio, producirá un número elevado de partículas secundarias, a su vez de altas energías, que volverán a generar más partículas sucesivamente. De este modo, se desarrolla una *cascada* de partículas propagándose a través de la atmósfera, en la que el número de partículas continúa aumentando progresivamente, hasta que la energía de las partículas no es suficiente para mantener el crecimiento (i.e., se alcanza un máximo del desarrollo). Gracias al elevado número de partículas producidas en esta clase de eventos (hasta 10^{11} para partículas primarias de $\sim 10^{20} \text{ eV}$), su estudio es posible mediante diversas técnicas (detectores de partículas a nivel de suelo, estudio de la fluorescencia provocada por las partículas en la atmósfera, medidas de la radiación Čerenkov, ...). En cierto modo, la atmósfera actúa como un calorímetro que permite extraer información acerca de la energía y dirección de llegada del rayo cósmico primario, a partir de la deposición de energía en el medio en forma de una cascada atmosférica.

No obstante, usar la atmósfera como medio de detección tiene, evidentemente, la desventaja de que se trata de un medio inhomogéneo, en el que la densidad decrece con la altitud h , $\rho = \rho(h)$. Como ejemplo, uno de los modelos más simples para la dependencia de la densidad con la altura es un decrecimiento exponencial:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h/h_0) \quad ; \quad \text{donde } \rho_0 \sim 1,23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \text{ y } h_0 \sim 8,5 \text{ km} . \quad (2.1)$$

Naturalmente, este hecho tendrá consecuencias importantes en el desarrollo de la cascada. Fundamentalmente, el efecto se deberá a que, a mayor densidad, mayor probabilidad de interacción para las partículas producidas. Para tener en cuenta esta cuestión, gran parte de la discusión que haremos acerca del desarrollo de cascadas atmosféricas no se hará en términos de distancias, sino de cantidad de materia atravesada o *profundidad*, X . Dicha profundidad puede medirse en la dirección vertical (X_v) o a lo largo del eje (X_s) del desarrollo de la cascada, que sigue la prolongación de la dirección de movimiento de la partícula primaria:

$$X_v(h) = \int_h^\infty \rho(h') dh' \quad ; \quad X_s(h, \theta) = \int_h^\infty \rho(h') dl = \int_h^\infty \rho(h') \frac{dh'}{\sqrt{1 - \frac{R_T^2 \sin^2 \theta}{(R_T + h')^2}}} , \quad (2.2)$$

donde R_T representa el radio de la Tierra, θ es el ángulo cenital de la cascada respecto a la vertical al suelo (Fig. 2.1) y l la distancia a lo largo del eje de la cascada. Gracias a estas definiciones, podremos estudiar el desarrollo de cascadas en términos de magnitudes que inmediatamente incorporan la

inhomogeneidad de la atmósfera, por lo que no profundizaremos más en los modelos que describen la atmósfera y pasaremos a cuestiones de mayor interés para el objetivo de este trabajo.

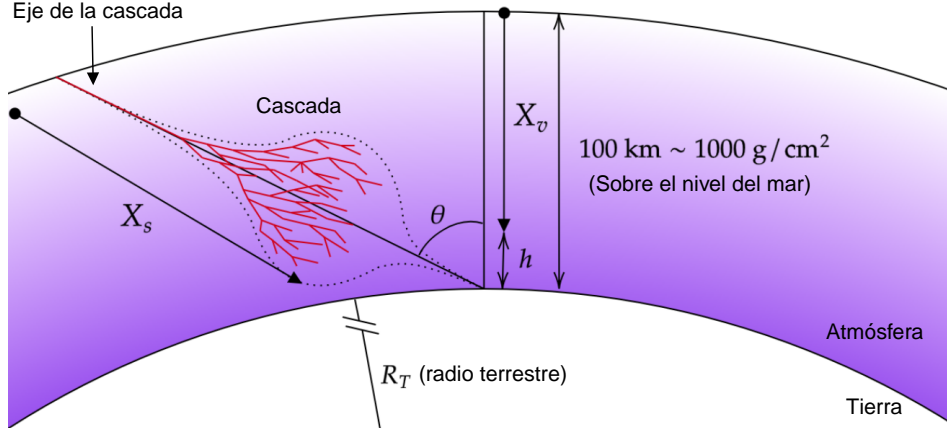


Figura 2.1: Esquema simplificado de una cascada atmosférica *al uso*. Definición de profundidad vertical (X_v) e inclinada (X_s). R_T es el radio de la Tierra, h la altura y θ el ángulo cenital.

Como hemos mencionado en la introducción, nos interesará estudiar cascadas atmosféricas que se propagan *hacia arriba*, y además iniciadas por la desintegración de un leptón τ . En esta clase de situación, por tanto, tendremos una cascada propagándose desde zonas más a menos densas, y que pueden haber sido iniciadas por leptones o hadrones de alta energía (ya que los abundantes modos de desintegración del τ permiten la producción de ambos tipos de partículas). Este tipo de cascadas *hacia arriba* están mucho menos estudiadas que las más convencionales cascadas *hacia abajo* que se observan de manera rutinaria en detectores de UHECR como Pierre Auger. Para poder comprender estos eventos, comenzaremos por repasar brevemente las tres *componentes* diferenciadas que pueden aparecer en una cascada atmosférica y su evolución a lo largo del desarrollo de la misma.

- *Componente electromagnética (EM)*: Constituida, fundamentalmente, por fotones, electrones y positrones; que representan las partículas más abundantes en una cascada atmosférica. A altas energías⁴, las interacciones que multiplican el número de partículas asociadas a esta componente serán la producción de pares ($\gamma + \text{Nuc.} \rightarrow e^+e^- + \text{Nuc.}$) y bremsstrahlung ($e^\pm + \text{Nuc.} \rightarrow e^\pm + \gamma + \text{Nuc.}$). Cuando la energía de las partículas es suficientemente baja, aparecen pérdidas de energía mediante interacciones con los electrones del medio (scattering Compton, ionizaciones y excitaciones, aniquilación e^+e^- , ...) que detienen el desarrollo de la cascada.
- *Componente hadrónica*: Constituida por protones, núcleos, piones y demás hadrones. En este caso, las interacciones más relevantes serán las de producción de piones ($p + \text{Nuc.} \rightarrow \pi^0, \pi^\pm, p, \dots$; $\pi^0 + \text{Nuc.} \rightarrow \pi^0, \pi^\pm, \dots$). Además, a altas energías, el número de partículas producidas en cada interacción será muy superior al de los procesos electromagnéticos ($\gtrsim 75$ secundarios en promedio en cada interacción, para energías $\gtrsim 10^{15} \text{ eV}$). A diferencia de la componente electromagnética, en este caso debemos considerar también procesos de desintegración que alimentarán otras componentes de la cascada:

⁴Mayores a la energía crítica $E_C \sim 86 \text{ MeV}$, en la que las pérdidas de energía por ionización superan a las de bremsstrahlung.

- $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ($\tau \sim 8,4 \times 10^{-17}$ s). Alimenta la componente electromagnética.
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$; $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ ($\tau \sim 2,6 \times 10^{-8}$ s). Alimenta la componente muónica.

Dada la vida media tan corta del π^0 , podemos asumir con seguridad que la gran mayoría de piones neutros producidos se desintegran antes de interactuar en la atmósfera. Dado que la producción de cada tipo de pión es equiprobable, en cada interacción podemos tomar la aproximación de que 1/3 de la energía se *transfiere* a la componente electromagnética, cuyo origen en cascadas iniciadas por hadrones se debe precisamente en este proceso. Eventualmente, la mayoría de la energía asociada a hadrones se habrá transferido a la componente EM, y se acabará disipando en ionizaciones y excitaciones del medio.

Por otra parte, la desintegración del pión cargado alimenta la componente muónica. No obstante, la vida media más larga del π^\pm hace que las interacciones que multiplican el número de piones sean relevantes hasta que las energías son inferiores a ~ 20 GeV.

- *Componente muónica*: Constituida por muones y neutrinos producidos, fundamentalmente, en la desintegración de piones cargados. La interacción de estas partículas en la atmósfera será prácticamente despreciable, sufriendo fundamentalmente pérdidas de energía por ionización. Por otra parte, la larga vida media del muón ($\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$, $\tau \sim 2 \times 10^{-6}$ s) hace que, por encima de unos pocos GeV de energía, los muones atraviesen la atmósfera sin desintegrarse.

En general, el desarrollo de las cascadas atmosféricas está determinado por la competición entre interacción y desintegración que afecta principalmente a hadrones y muones. Si las interacciones dominan, el número de partículas se multiplica y la cascada *crece*, mientras que las desintegraciones alimentan la componente EM y muónica, que *extraen* energía de la componente hadrónica de la cascada y detienen su desarrollo. Mientras que las desintegraciones sólo dependen de la energía de la partícula y el tiempo de propagación, las interacciones dependen de la cantidad de materia atravesada, que como hemos visto depende de la altura en la atmósfera. Dos magnitudes clave en este aspecto que podrán ser útiles más adelante son la *distancia de interacción y desintegración*:

- *Distancia de interacción*, λ_I [g/cm²]: Cantidad de materia que debe atravesarse para que, en promedio, ocurra una interacción. En unidades de distancia, $d_I \sim \lambda_I/\rho(h)$. Para el caso de los piones interaccionando con aire, $\lambda_I = 70 - 120$ g/cm² (dependiendo de su energía).
- *Distancia de desintegración*, d_{dec} [m]: Distancia promedio que recorre una partícula antes de desintegrarse. Depende de la vida media en reposo τ y la energía. En el caso de los piones:

$$d_{dec} = \Gamma \beta c \tau \sim \frac{E}{mc^2} c \tau \begin{cases} \pi^\pm \rightarrow d_{dec} = \Gamma(7,8 \text{ m}) \\ \pi^0 \rightarrow d_{dec} = \Gamma(2,5 \times 10^{-8} \text{ m}) \end{cases} \quad , \quad (2.3)$$

donde $\Gamma = E/mc^2$ es el factor de Lorentz.

Naturalmente, la condición $d_{dec} \sim \lambda_I/\rho$ determina la energía típica E_{dec} por debajo de la cual las partículas dejan de interactuar y se desintegran:

$$d_{dec} \sim \lambda_I/\rho \implies E_{dec} \sim \frac{\lambda_I mc^2}{\rho c \tau} \quad . \quad (2.4)$$

Por lo tanto, estas magnitudes nos permiten estimar, de manera sencilla, en qué fase del desarrollo se encuentra cada componente de la cascada. Además, vemos claramente las dependencias tanto con la densidad como con la energía en y (2.4). Por lo tanto, podemos intuir que habrá diferencias sustanciales entre una cascada *convencional* en la que las partículas de mayor energía se producen en las zonas menos densas de la atmósfera, y una cascada hacia arriba en que las partículas más energéticas aparecen en la región de mayor densidad para propagarse hacia zonas menos densas. Exploraremos esta posibilidad a continuación.

Referencias

- [1] Abarr, Q., Allison, P., Ammerman-Yebra, J., Alvarez-Muñiz, J., Beatty, J., Besson, D., Chen, P., Chen, Y., Xie, C., Clem, J., et al. (2021). The Payload for Ultrahigh Energy Observations (PUEO): A White Paper. *Journal of Instrumentation*, 16(08):P08035.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Alvarez-Muñiz, J., Romero-Wolf, A., and Zas, E. (2010). Čerenkov radio pulses from electromagnetic showers in the time domain. *Physical Review D*, 81(12):123009.
- [5] Gaisser, T. K. (2018). Neutrino Astronomy 2017. *arXiv preprint arXiv:1801.01551*.
- [6] Gaisser, T. K., Engel, R., and Resconi, E. (2016). *Cosmic rays and particle physics*. Cambridge University Press.
- [7] Gaisser, T. K., Halzen, F., and Stanev, T. (1995). Particle astrophysics with high energy neutrinos. *Physics Reports*, 258(3):173–236.
- [8] Halzen, F. and Klein, S. R. (2010). Invited review article: IceCube: an instrument for neutrino astronomy. *Review of Scientific Instruments*, 81(8):081101.
- [9] Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. WILEY.
- [10] Jackson, J. D. (2002). From Lorenz to Coulomb and other explicit gauge transformations. *American Journal of Physics*, 70(9):917–928.
- [11] Neronov, A. (2019). Introduction to multi-messenger astronomy. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1263, page 012001. IOP Publishing.
- [12] Pierre Auger Collaboration (2015). The Pierre Auger cosmic ray observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 798:172–213.
- [13] Reno, M. H., Krizmanic, J. F., and Venters, T. M. (2019). Cosmic tau neutrino detection via cherenkov signals from air showers from earth-emerging taus. *Physical Review D*, 100(6):063010.
- [14] Schröder, F. G. (2017). Radio detection of cosmic-ray air showers and high-energy neutrinos. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 93:1–68.
- [15] Sciutto, S. J. (2019). *AIRES A system for air shower simulations. User’s guide and reference manual*. [<http://aires.fisica.unlp.edu.ar/>].
- [16] Spurio, M. (2014). *Particles and astrophysics*. Springer.
- [17] Wissel, S., Alvarez-Muniz, J., Burch, C., Cummings, A., Carvalho, W., Deaconu, C., Hallinan, G., Hughes, K., Ludwig, A., Oberla, E., et al. (2021). Concept Study for the Beamforming Elevated Array for Cosmic Neutrinos (BEACON). In *36th International Cosmic Ray Conference*, volume 358, page 1033. SISSA Medialab.
- [18] 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.