

Caracterización de la emisión en radio en cascadas atmosféricas iniciadas por neutrinos tau de muy altas energías en detectores a gran altitud

Trabajo de Fin de Máster

Autor: Sergio Cabana Freire

Tutor: Jaime Álvarez Muñiz



Facultad de Física, USC

20 de julio de 2022

Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Cascadas atmosféricas
- 3 Emisión en radio: Principio físico y caracterización
- 4 Emisión en radio en cascadas hacia arriba
- 5 Conclusiones

- 1 Introducción
- 2 Cascadas atmosféricas
- 3 Emisión en radio: Principio físico y caracterización
- 4 Emisión en radio en cascadas hacia arriba
- 5 Conclusiones

- Descubrimientos recientes → Astronomía de Multi-mensajeros (EM, GW, neutrinos, rayos cósmicos, ...)
- Nuevas posibilidades de observación y estudio de fenómenos astrofísicos

- Descubrimientos recientes → Astronomía de Multi-mensajeros (EM, GW, neutrinos, rayos cósmicos, ...)
- Nuevas posibilidades de observación y estudio de fenómenos astrofísicos

Neutrinos → Baja probabilidad de interacción

- | | |
|---|---|
| • Información directa desde las fuentes | • Grandes dificultades para detección |
| • Propagación rectilínea, escasa pérdida de energía | • Escasos flujos a las mayores energías |
| • Acceso a regiones EM opacas | • Detectores de gran exposición |

$$\text{Interacción hadrónica de rayos cósmicos} \left\{ \begin{array}{l} \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \end{array} \right. .$$

$$\text{Interacción hadrónica de rayos cósmicos} \left\{ \begin{array}{l} \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \end{array} \right. .$$

$$\text{Flujo de neutrinos} \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuentes concretas} \left\{ \begin{array}{l} \text{Galácticas} \\ \text{Extragalácticas} \end{array} \right. \\ \text{Flujos difusos} \end{array} \right.$$

- Información sobre producción de CR's (interacciones en fuentes) y sobre su propagación (medio intergaláctico)

$$\text{Interacción hadrónica de rayos cósmicos} \left\{ \begin{array}{l} \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \end{array} \right. .$$

$$\text{Flujo de neutrinos} \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuentes concretas} \left\{ \begin{array}{l} \text{Galácticas} \\ \text{Extragalácticas} \end{array} \right. \\ \text{Flujos difusos} \end{array} \right.$$

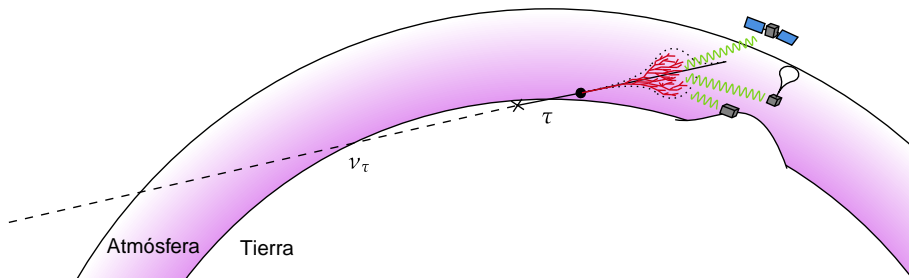
- Información sobre producción de CR's (interacciones en fuentes) y sobre su propagación (medio intergaláctico)

Posibilidad para detección

Observación de radiación electromagnética en frecuencias MHz – GHz emitida en cascadas atmosféricas de partículas

Introducción III

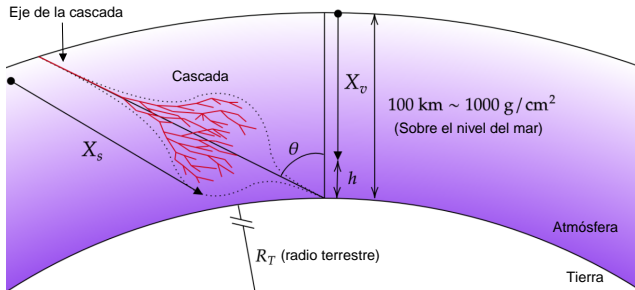
- Objetivo: Detección de neutrinos tau interaccionando en el interior de la Tierra y generando cascadas atmosféricas hacia arriba.
- Radiodetección → Monitorización de grandes áreas con detectores a gran altitud (BEACON, ANITA, PUEO). Posibilidad de emplear la Tierra como blanco de interacción.



- 1 Introducción
- 2 Cascadas atmosféricas
- 3 Emisión en radio: Principio físico y caracterización
- 4 Emisión en radio en cascadas hacia arriba
- 5 Conclusiones

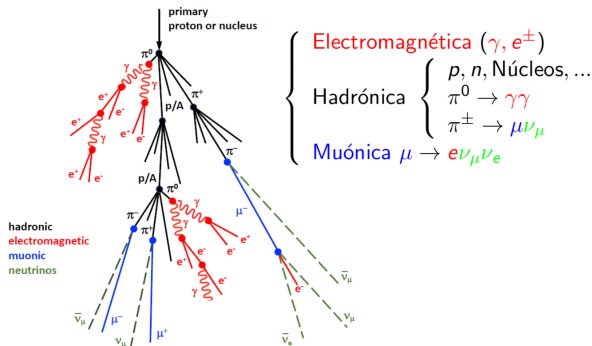
Cascadas atmosféricas

- Detección indirecta de partículas de alta energía → Interacciones producen un nº elevado de partículas propagándose en la atmósfera (cascada), detección con diversas técnicas.



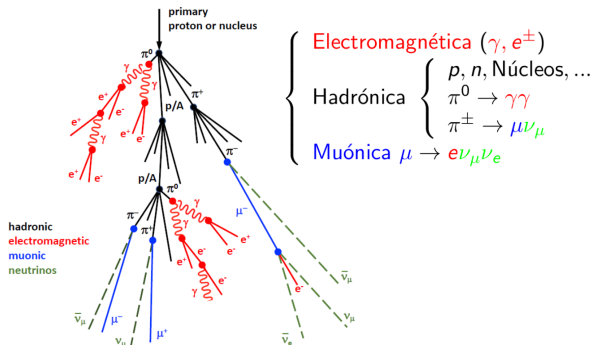
- Atmósfera inhomogénea → Materia atravesada como magnitud clave.

Cascadas atmosféricas II



- Desarrollo \rightarrow Competición entre interacción ($\uparrow n^\circ$ partículas) frente a desintegraciones.

Cascadas atmosféricas II



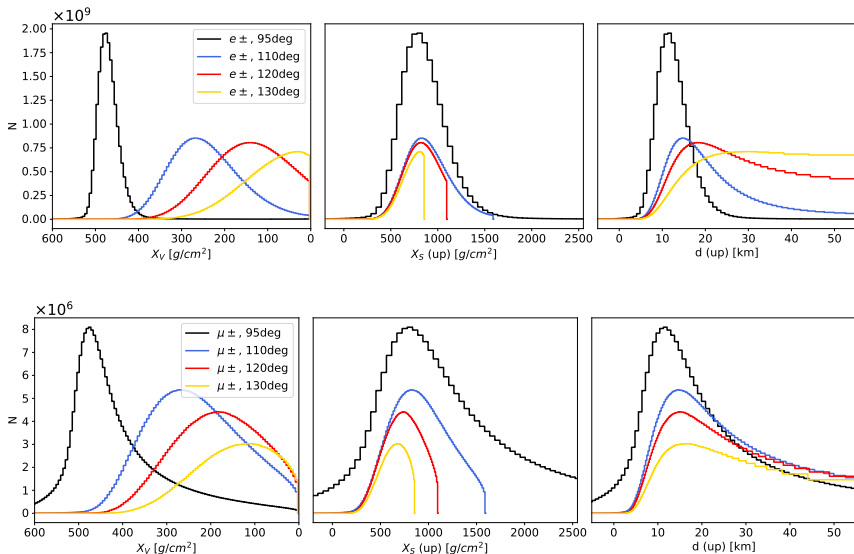
- Desarrollo \rightarrow Competición entre interacción (\uparrow n $^\circ$ partículas) frente a desintegraciones.

Simulaciones con AIRES (v. 2.8.4a)

Desarrollo de cascadas hacia arriba según ángulo cenital θ , energía y naturaleza del primario. Comparación con cascadas hacia abajo.

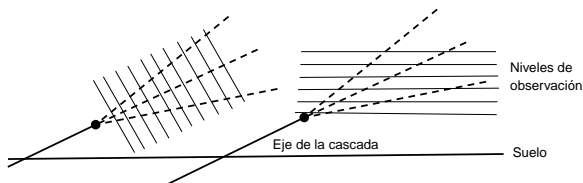
Ángulo cenital θ

- Primario protón de 1 EeV interaccionando a 5 km de altura.



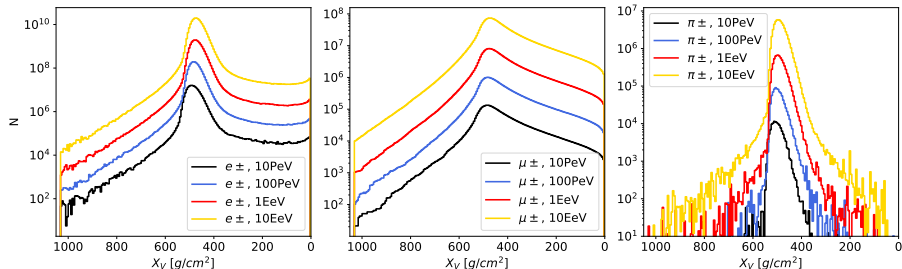
Ángulo cenital θ . Comentarios

- El máximo n^0 de partículas decrece con el ángulo (cascadas más verticales) \rightarrow Desarrollo en zonas menos densas.
- La posición del máximo de e^\pm (EM) sólo depende de la materia atravesada.
- La posición del máximo de μ^\pm depende del ángulo \rightarrow Efecto de desintegraciones en zonas menos densas.
- Al aumentar θ , se necesita recorrer una mayor distancia para alcanzar el máximo del desarrollo.



Energía del primario

- Primario protón a $\theta = 95^\circ$ interaccionando a 5 km de altura.

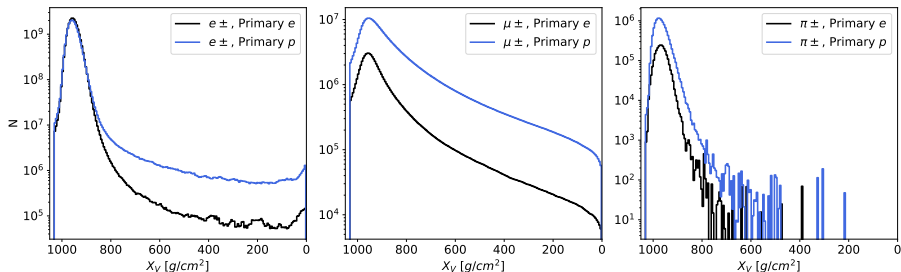


- N_0^e máximo de partículas prácticamente lineal con la energía. En base a modelos [Matthews, 2005]:

$$N_{max}^e \propto E_0 \quad ; \quad N_{max}^\mu \propto E_0^\beta \quad \text{con } \beta \sim 0,85 - 0,9$$

Naturaleza del primario (hadrón - leptón)

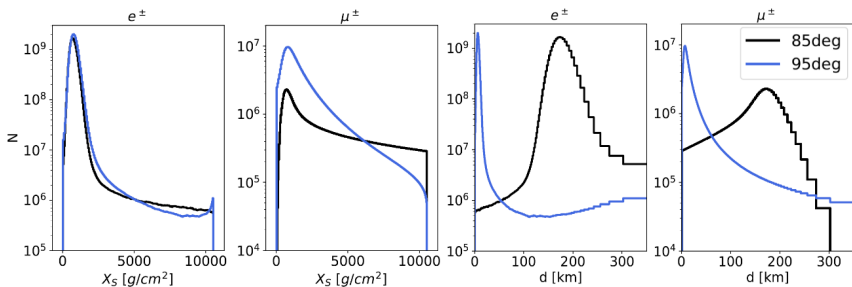
- Primario de 1 EeV a $\theta = 95^\circ$ interaccionando a nivel del suelo.



- N° máximo de e^\pm muy similar. N° máximo de μ^\pm, π^\pm menor para primario e^- en un factor ~ 4
- Cola de e^\pm para primario $p \rightarrow$ Origen en desintegración de μ^\pm

Comparación de cascadas hacia arriba - abajo

- Protón de 1 EeV a $\theta = 95^\circ$ (85°) interaccionando en $h = 0$ (100) km



- Producción de más partículas en cascadas hacia arriba (dominio de interacciones).
- Menor energía promedio por partícula en cascadas hacia arriba. Las desintegraciones contribuirán antes.
- En cascadas hacia arriba, máximo localizado en las proximidades del suelo. (Gran cantidad de materia atravesada en poco tiempo)

- 1 Cascadas atmosféricas hacia arriba \rightarrow elevado número de partículas cargadas en el máximo ($\sim 10^8 - 10^{10}$), que aumenta con la inclinación de la cascada.
- 2 Número máximo de partículas producidas lineal con la energía del primario.
- 3 La naturaleza del primario no provoca gran diferencia en el número máximo de partículas EM.
- 4 Las cascadas hacia arriba presentan máximos muy localizados en las proximidades del nivel del suelo y con una elevada producción de partículas comparadas con cascadas hacia abajo.

- 1 Introducción
- 2 Cascadas atmosféricas
- 3 Emisión en radio: Principio físico y caracterización**
- 4 Emisión en radio en cascadas hacia arriba
- 5 Conclusiones

Origen de la emisión en radio

- Cascada atmosférica \rightarrow Cargas en movimiento ($v \sim c$) en un medio.

Dos mecanismos de emisión (aparición de corrientes netas)

Deflexión geomagnética

$$\mathbf{J} \sim \hat{\mathbf{n}}_{\text{cascada}} \times \mathbf{B}$$

Efecto Askaryan

$$\mathbf{J} \sim -\dot{\hat{\mathbf{n}}}_{\text{cascada}}$$

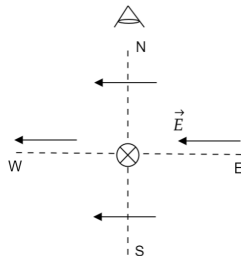
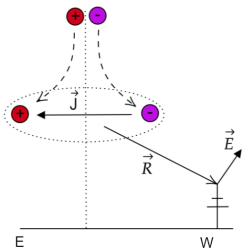
- Puede comprobarse que:
 - $\mathbf{E}_{\text{rad}} \parallel \hat{\mathbf{R}} \times (\hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{J})$ donde $\mathbf{R} \equiv$ Posición fuente-observador
 - Emisión máxima en el ángulo Čerenkov

Origen de la emisión en radio II

Deflexión geomagnética

Campo magnético terrestre \mathbf{B} (deflexión de cargas según signo)

$$\mathbf{J} \sim \hat{\mathbf{n}}_{\text{cascada}} \times \mathbf{B}$$

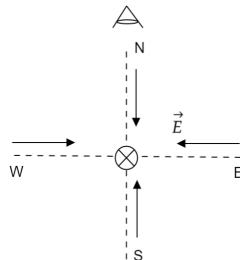
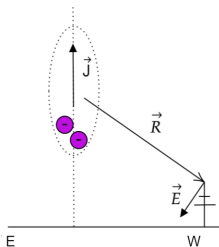


Origen de la emisión en radio III

Efecto Askaryan

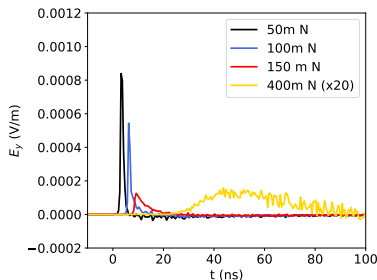
Aparición de carga neta a lo largo del eje (e.g. aniquilación e^+e^-)

$$\mathbf{J} \sim -\hat{\mathbf{n}}_{\text{cascada}}$$

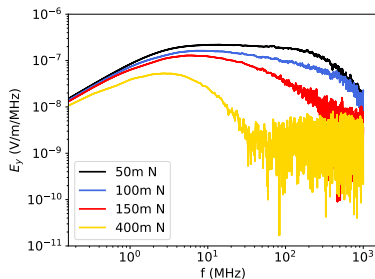


Caracterización en simulaciones con ZHAireS

- Simulación de la emisión en radio: ZHAireS (AIRES + algoritmo ZHS)
→ Primeros principios del EM, cálculo numérico a nivel microscópico.
- Componente EW de campo al N del core de una cascada vertical (Primario p de 10^{17} eV):



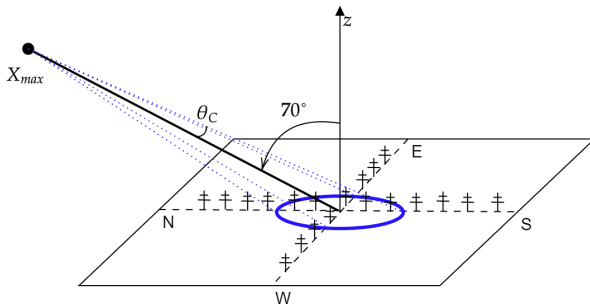
Pulso bipolar, ~ 10 ns



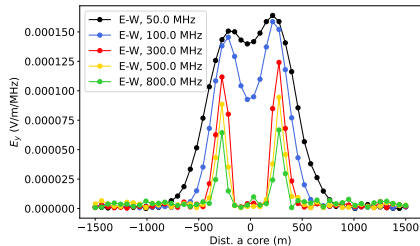
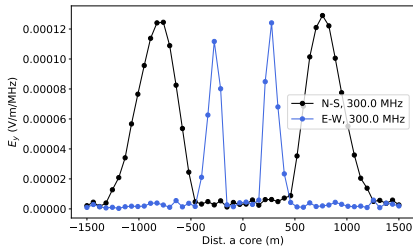
*Emisión coherente hasta
 $\sim 10 - 100$ MHz (RF)*

Caracterización en simulaciones con ZHAireS II

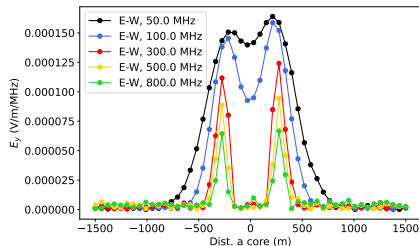
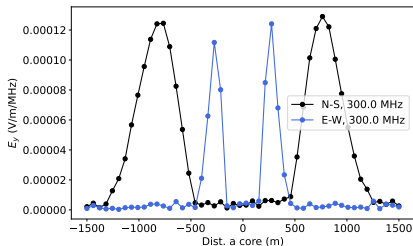
- Ejemplo de cascada inclinada: Primario p de 10^{19} eV a $\theta = 70^\circ$
- Señal máxima observando el máximo del desarrollo bajo el ángulo Čerenkov



Caracterización en simulaciones con ZHAireS III



Caracterización en simulaciones con ZHAireS III



Ideas clave

- Contribuciones geomagnética + Askaryan (diferente polarización)
- Frecuencias de interés (coherencia): Banda $\sim 10 - 100$ MHz
- Emisión máxima en *ellipse* Čerenkov. Definición mayor a mayor frecuencia.

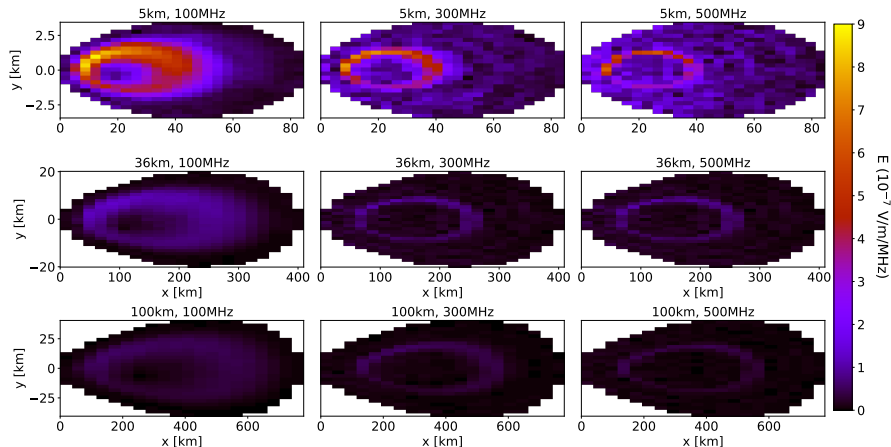
- 1 Introducción
- 2 Cascadas atmosféricas
- 3 Emisión en radio: Principio físico y caracterización
- 4 Emisión en radio en cascadas hacia arriba**
- 5 Conclusiones

- Desintegraciones del leptón $\tau \rightarrow \begin{cases} \text{Hadrones} + \nu_\tau (\sim 64 \%) \\ e\nu_e\nu_\tau (\sim 17 \%) \\ \mu\nu_\mu\nu_\tau (\sim 17 \%) \end{cases}$
- Poca influencia de la naturaleza del primario en el máximo \rightarrow Primario p interaccionando a 0 km de altura.
- Evento realista \rightarrow Cascada hacia arriba muy inclinada, $\theta = 95^\circ$

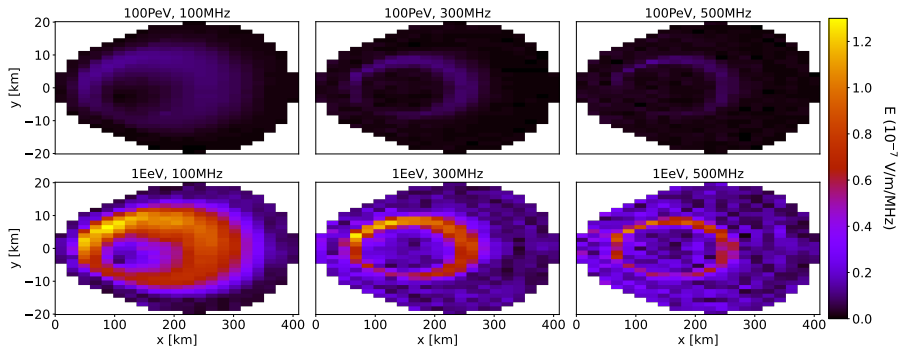
- Desintegraciones del leptón $\tau \rightarrow \begin{cases} \text{Hadrones} + \nu_\tau (\sim 64 \%) \\ e\nu_e\nu_\tau (\sim 17 \%) \\ \mu\nu_\mu\nu_\tau (\sim 17 \%) \end{cases}$
- Poca influencia de la naturaleza del primario en el máximo \rightarrow Primario p interaccionando a 0 km de altura.
- Evento realista \rightarrow Cascada hacia arriba muy inclinada, $\theta = 95^\circ$

Altura de obs.	Energía del primario	Frecuencia
5 km (BEACON)	10 PeV	100 MHz
36 km (PUEO)	100 PeV	300 MHz
100 km	1 EeV	500 MHz

Resultados: Altura de observación

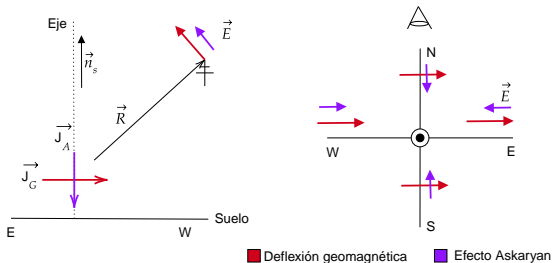
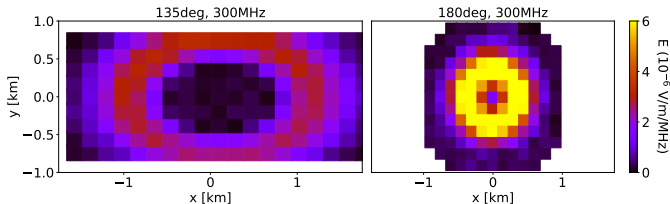


Resultados: Energía del primario



Emisión en radio en cascadas hacia arriba

- Desarrollo hacia arriba en la atmósfera y observación de la radiación por encima del máximo → Asimetría opuesta a cascadas hacia abajo

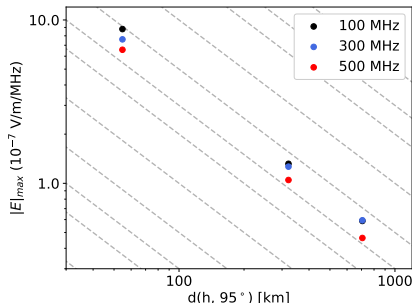
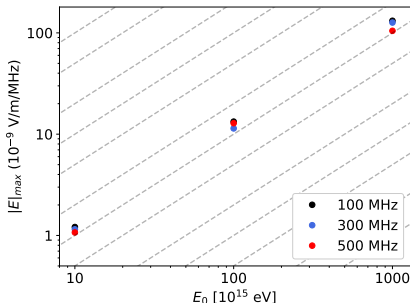


Propiedades del primario a partir de la señal

- Elipse Čerenkov \leftrightarrow Naturaleza del primario y dirección de llegada.
- Observación de la elipse en arrays de detectores, estudio de retardos en señal \rightarrow **Dirección de llegada** (técnicas interferométricas)
- Dimensiones del patrón \rightarrow Posición del máximo (vértice) \rightarrow **Naturaleza del primario** (masa)
- Dirección de llegada *debajo del horizonte* \iff Neutrino tau

Propiedades del primario a partir de la señal II

- Magnitud del campo \leftrightarrow Energía, naturaleza y dirección de llegada del primario



$|E|_{\max} \propto N_e^{\max} \propto E_0$
Dependencia lineal con la energía
del primario

Dependencia $1/d$ con la distancia
al máximo (radiación). Información
sobre naturaleza y dirección.

- 1 Introducción
- 2 Cascadas atmosféricas
- 3 Emisión en radio: Principio físico y caracterización
- 4 Emisión en radio en cascadas hacia arriba
- 5 Conclusiones

- 1 Observación de neutrinos de muy altas energías y origen astrofísico como objetivo científico clave.
- 2 Radiodetección → Monitorización de grandes áreas, Tierra como blanco de interacción.
- 3 Posibilidad de extraer información acerca del primario a partir de la radiación electromagnética emitida en cascadas atmosféricas.
- 4 Experimentos planeados, técnicas de análisis avanzadas (interferometría, estudio de flujos de energía y espectro de frecuencias, ...)

Referencias I



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.



Alvarez-Muñiz, J., Carvalho, W. R., Romero-Wolf, A., Tueros, M., and Zas, E. (2012a).
Coherent radiation from extensive air showers in the ultrahigh frequency band.
Physical Review D, 86(12):123007.



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.



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.



Gaisser, T. K. (2018).
Neutrino Astronomy 2017.
arXiv preprint arXiv:1801.01551.

Referencias II



Gaisser, T. K., Engel, R., and Resconi, E. (2016).
Cosmic rays and particle physics.
Cambridge University Press.



Gaisser, T. K., Halzen, F., and Stanev, T. (1995).
Particle astrophysics with high energy neutrinos.
Physics Reports, 258(3):173–236.



Halzen, F. and Klein, S. R. (2010).
Invited review article: IceCube: an instrument for neutrino astronomy.
Review of Scientific Instruments, 81(8):081101.



Jackson, J. D. (1998).
Classical Electrodynamics.
WILEY.



Jackson, J. D. (2002).
From Lorenz to Coulomb and other explicit gauge transformations.
American Journal of Physics, 70(9):917–928.



Matthews, J. (2005).
A Heitler model of extensive air showers.
Astroparticle Physics, 22(5-6):387–397.

Referencias III



Neronov, A. (2019).

Introduction to multi-messenger astronomy.

In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1263, page 012001. IOP Publishing.



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.



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.



Schoorlemmer, H., Belov, K., Romero-Wolf, A., García-Fernández, D., Bugaev, V., Wissel, S., Allison, P., Alvarez-Muñiz, J., Barwick, S., Beatty, J., et al. (2016).

Energy and flux measurements of ultra-high energy cosmic rays observed during the first ANITA flight.

Astroparticle Physics, 77:32–43.

Referencias IV



Schoorlemmer, H. and Carvalho, W. R. (2021).

Radio interferometry applied to the observation of cosmic-ray induced extensive air showers.

The European Physical Journal C, 81(12):1–8.



Schröder, F. G. (2017).

Radio detection of cosmic-ray air showers and high-energy neutrinos.

Progress in Particle and Nuclear Physics, 93:1–68.



Sciutto, S. J. (2019).

AIRES A system for air shower simulations. User's guide and reference manual.

[<http://aires.fisica.unlp.edu.ar/>].



Southall, D., Deaconu, C., Decoene, V., Oberla, E., Zeolla, A., Alvarez-Muñiz, J., Cummings, A., Curtis-Ginsberg, Z., Hendrick, A., Hughes, K., et al. (2022).

Design and Initial Performance of the Prototype for the BEACON Instrument for Detection of Ultrahigh Energy Particles.

arXiv preprint arXiv:2206.09660.



Spurio, M. (2014).

Particles and astrophysics.

Springer.

Referencias V



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.



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.

Aux.: Desintegración vs. interacción

- Distancia de interacción, λ_I [g/cm²]. En uds. de distancia, $d_I \sim \lambda_I/\rho(h)$.
- Distancia de desintegración, d_{dec} [m]:

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

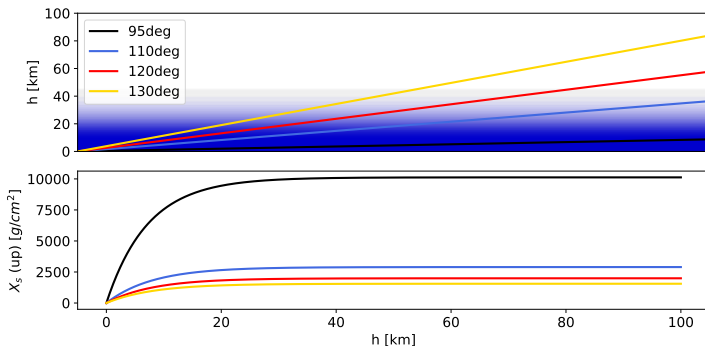
- Energía a la que comienzan a dominar desintegraciones:

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

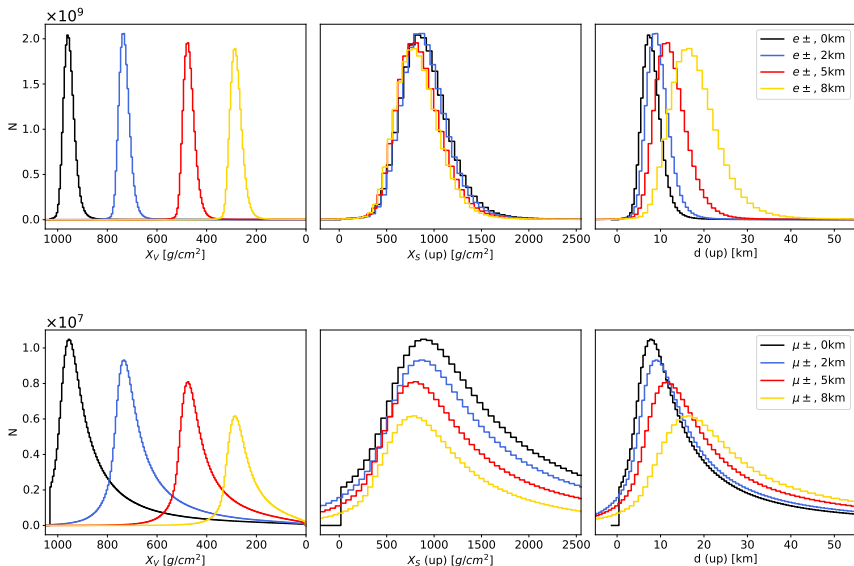
Partícula	Interacciones
γ e^\pm	Efectos Compton y fotoeléctrico Bremsstrahlung y producción de pares Aniquilación e^+e^- Emisión de e^- knock-on (scattering Møller, Bhabha) Reacciones fotonucleares, ...
μ^\pm	Bremsstrahlung y producción de pares Emisión de e^- knock-on Desintegración
ν 's	Aparición en desintegraciones
$p, \bar{p}, n, \bar{n}, \Lambda$	Colisiones hadrónicas y núcleo-núcleo
$\pi^0, \pi^\pm, K_{L,S}^0, K^\pm$	Emisión de e^- knock-on
Núcleos $Z \leq 36$	Desintegraciones

Aux.: Materia atravesada vs. θ

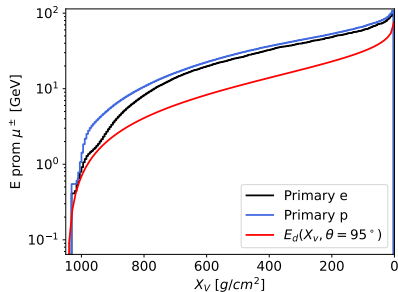
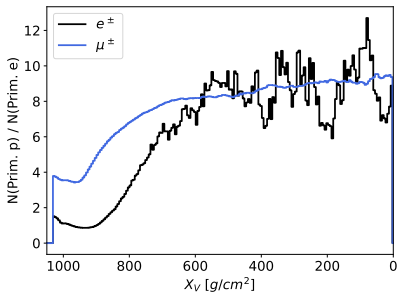
$$X_s^{\text{up}}(h, \theta) = \int_0^h \rho(h') dl = \int_0^h \rho(h') \frac{dh'}{\sqrt{1 - \frac{R_T^2 \sin^2 \theta}{(R_T + h')^2}}}.$$



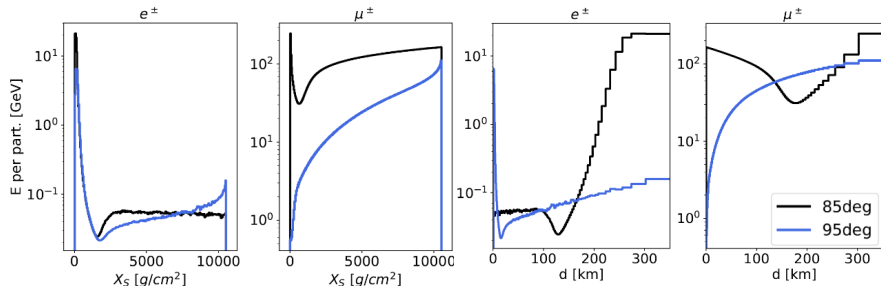
Aux.: Altura de interacción en cascadas hacia arriba



Aux.: Desintegración de muones en cascadas hacia arriba



Aux.: Energía por partícula en cascadas hacia arriba-abajo



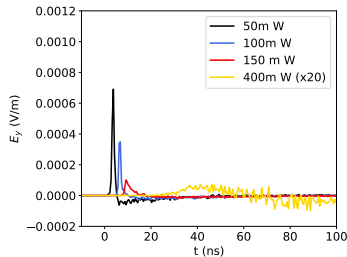
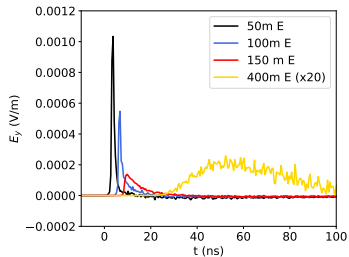
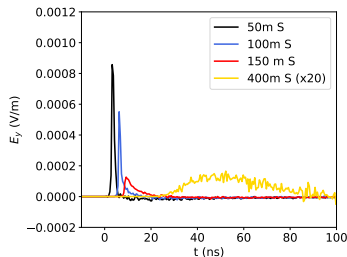
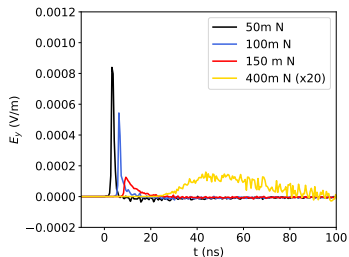
$$\mathbf{J}_{\perp}(\mathbf{r}', t') = q\mathbf{v}_{\perp} \delta^{(3)}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0 - \mathbf{v}t') [\Theta(t' - t_1) - \Theta(t' - t_2)] ,$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \approx \frac{\mu q}{4\pi R} \mathbf{v}_{\perp} \frac{\Theta[t - nR/c - (1 - n\beta \cos \theta) t_1] - \Theta[t - nR/c - (1 - n\beta \cos \theta) t_2]}{1 - n\beta \cos \theta} ,$$

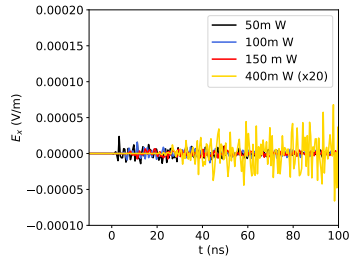
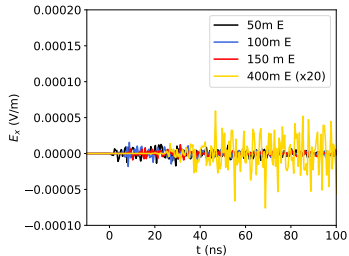
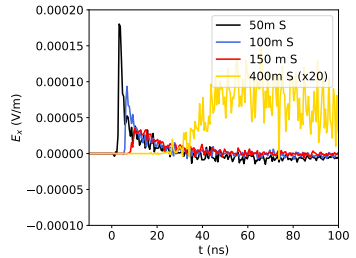
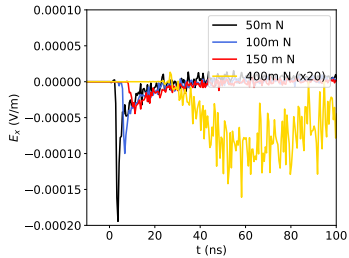
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \approx -\frac{\mu q}{4\pi R} \mathbf{v}_{\perp} \frac{\delta[t - nR/c - (1 - n\beta \cos \theta) t_1] - \delta[t - nR/c - (1 - n\beta \cos \theta) t_2]}{1 - n\beta \cos \theta} ,$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \approx -\frac{\mu q}{2\pi R} \mathbf{v}_{\perp} \exp\left(i\omega \frac{nR}{c}\right) \frac{e^{i\omega(1-n\beta \cos \theta)t_1} - e^{i\omega(1-n\beta \cos \theta)t_2}}{1 - n\beta \cos \theta} .$$

Aux.: Señal de radio en cascada vertical hacia abajo (E_y)



Aux.: Señal de radio en cascada vertical hacia abajo (E_x)



Aux.: Modelo geométrico para la coherencia de la señal

