

# 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)

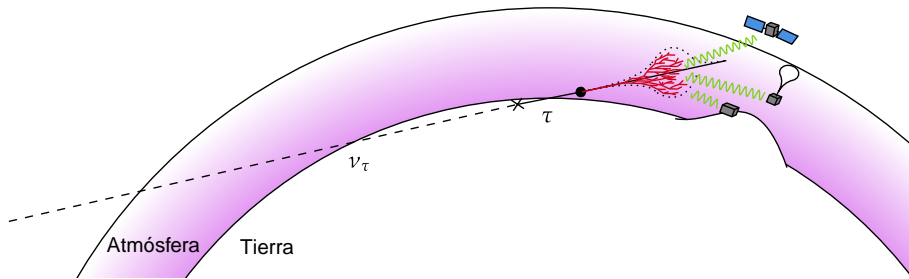
## Posibilidad para detección

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



# Introducción III

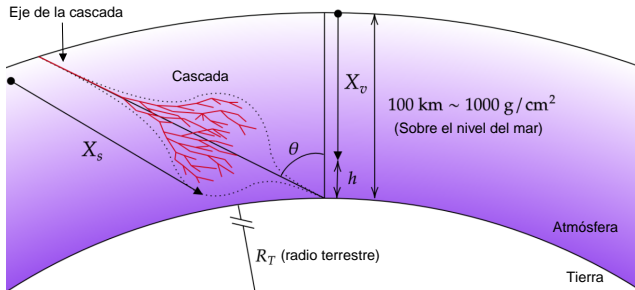
- Objetivo: Detección de neutrinos tau interaccionando en el interior de la Tierra y generando cascadas atmosféricas hacia arriba.
- Radiodetección → Monitorización de grandes áreas con detectores a gran altitud (BEACON, ANITA, PUEO). Posibilidad de emplear la Tierra como blanco de interacción.



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

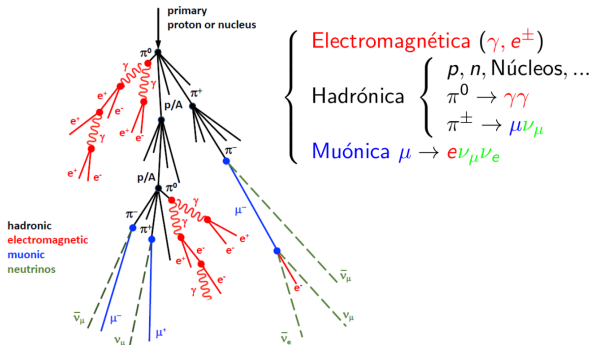
# Cascadas atmosféricas

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



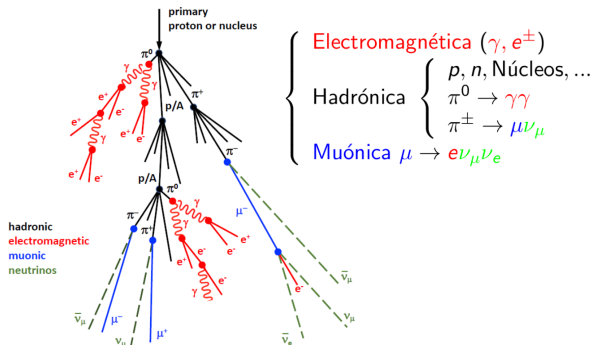
- Atmósfera inhomogénea → Materia atravesada como magnitud clave.

# Cascadas atmosféricas II



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

# Cascadas atmosféricas II



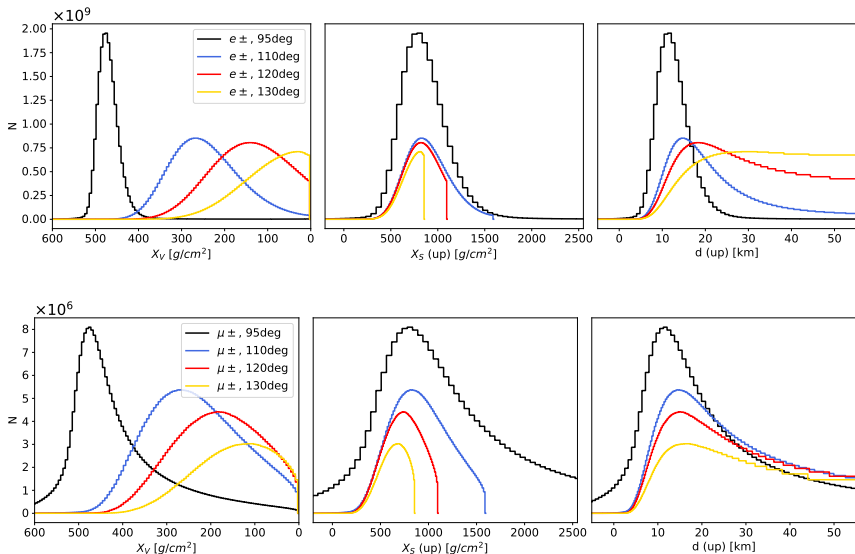
- Desarrollo  $\rightarrow$  Competición entre interacción ( $\uparrow$  n $^\circ$  partículas) frente a desintegraciones.

## Simulaciones con AIRES (v. 2.8.4a)

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

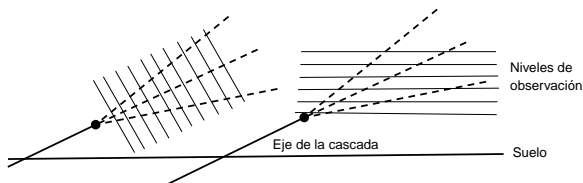
# Ángulo cenital $\theta$

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



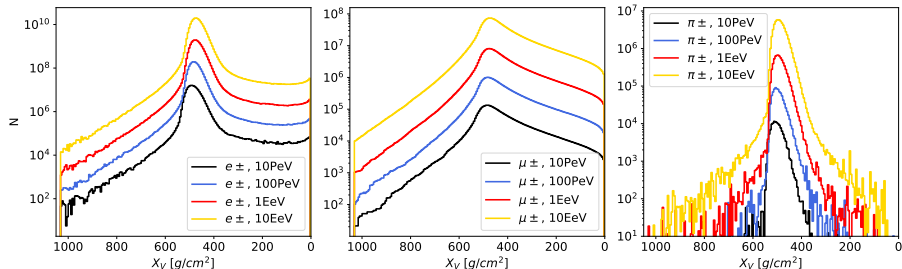
# Ángulo cenital $\theta$ . Comentarios

- 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  $\mu^\pm$  depende del ángulo  $\rightarrow$  Efecto de desintegraciones en zonas menos densas.
- Al aumentar  $\theta$ , 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.



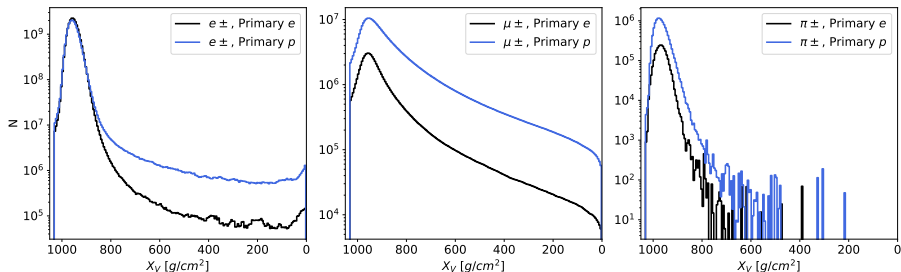
- $N_0^e$  máximo de partículas prácticamente lineal con la energía. En base a modelos [Matthews, 2005]:

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



# Naturaleza del primario (hadrón - leptón)

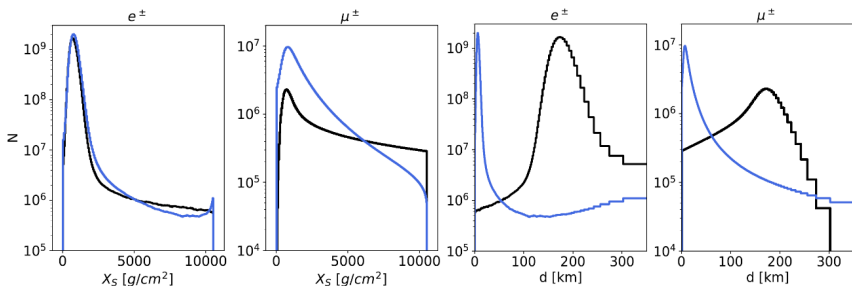
- Primario de 1 EeV a  $\theta = 95^\circ$  interactuando a nivel del suelo.



- $N^\circ$  máximo de  $e^\pm$  muy similar.  $N^\circ$  máximo de  $\mu^\pm, \pi^\pm$  menor para primario  $e^-$  en un factor  $\sim 4$
- Cola de  $e^\pm$  para primario  $p \rightarrow$  Origen en desintegración de  $\mu^\pm$

# Comparación de cascadas hacia arriba - abajo

- Protón de 1 EeV a  $\theta = 95^\circ$  ( $85^\circ$ ) 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*

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

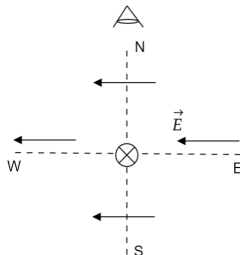
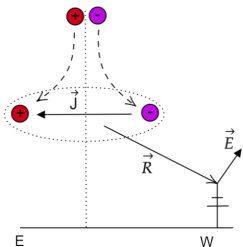
- Puede comprobarse que:
  - $\mathbf{E}_{\text{rad}} \parallel \hat{\mathbf{R}} \times (\hat{\mathbf{R}} \times \mathbf{J})$  donde  $\mathbf{R} \equiv$  Posición fuente-observador
  - Emisión máxima en el ángulo Čerenkov

# Origen de la emisión en radio II

## *Deflexión geomagnética*

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

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

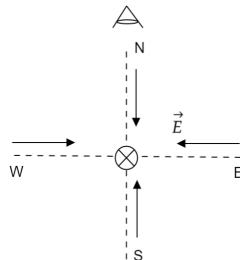
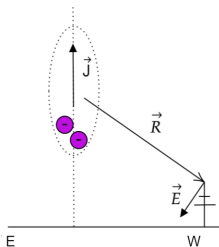


# Origen de la emisión en radio III

## *Efecto Askaryan*

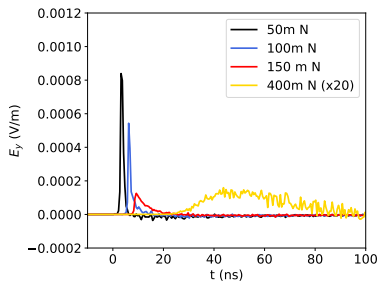
Aparición de carga neta a lo largo del eje (e.g. aniquilación  $e^+e^-$ )

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

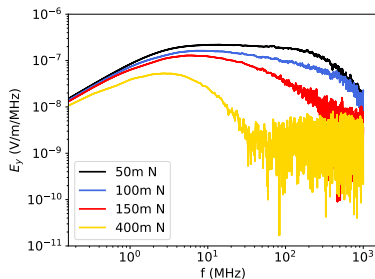


# Caracterización en simulaciones con ZHAireS

- 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,  $\sim 10$  ns*

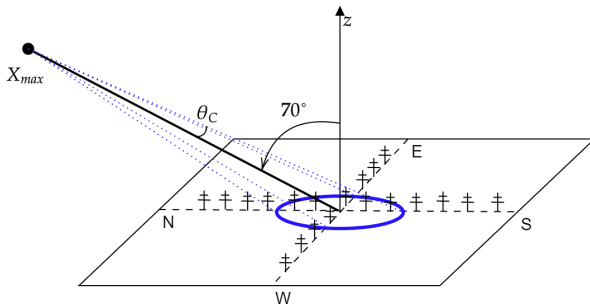


*Emisión coherente hasta  
 $\sim 10 - 100$  MHz (RF)*

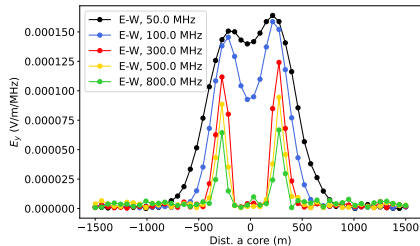
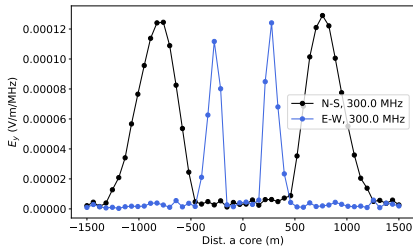


# Caracterización en simulaciones con ZHAireS II

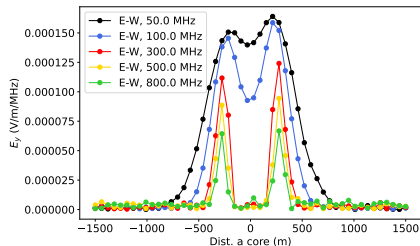
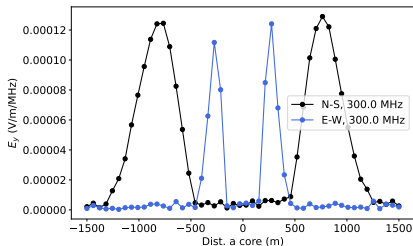
- Ejemplo de cascada inclinada: Primario  $p$  de  $10^{19}$  eV a  $\theta = 70^\circ$
- Señal máxima observando el máximo del desarrollo bajo el ángulo Čerenkov



# 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.

5 km (BEACON)  
36 km (PUEO)  
100 km

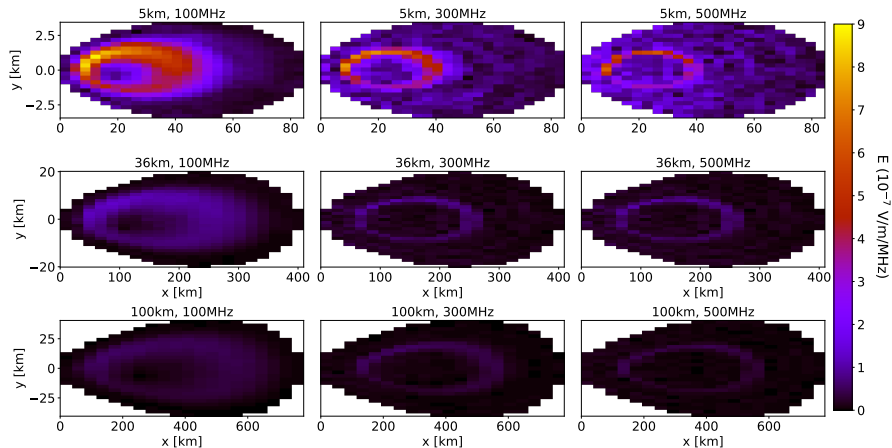
## Energía del primario

10 PeV  
100 PeV  
1 EeV

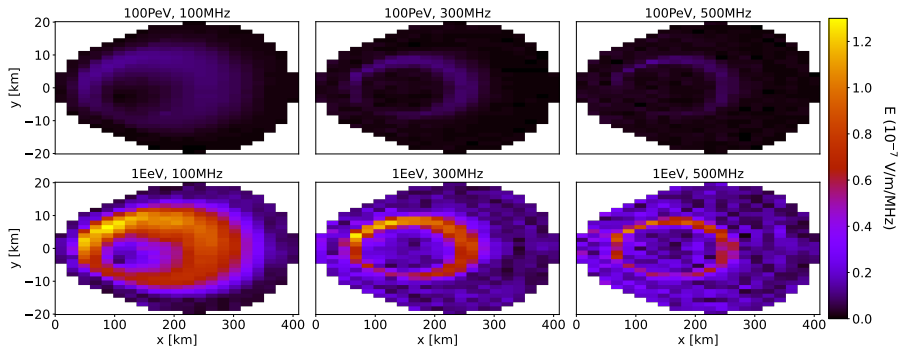
## Frecuencia

100 MHz  
300 MHz  
500 MHz

# Resultados: Altura de observación



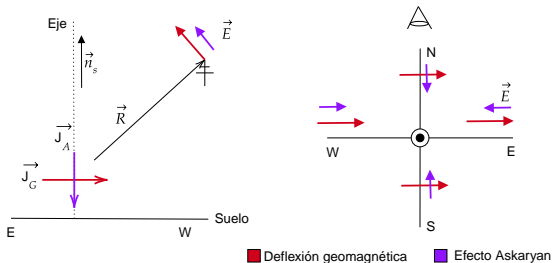
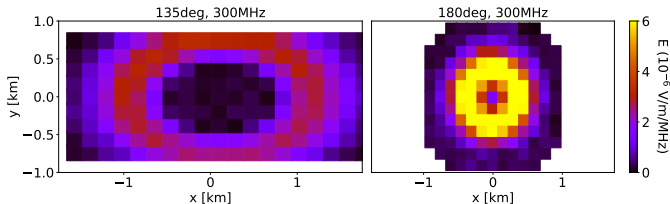
# Resultados: Energía del primario





# 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

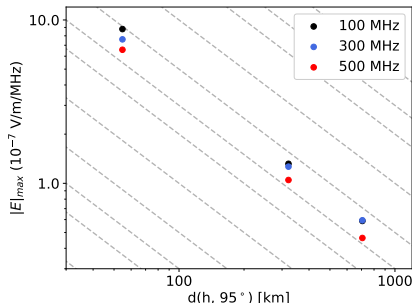
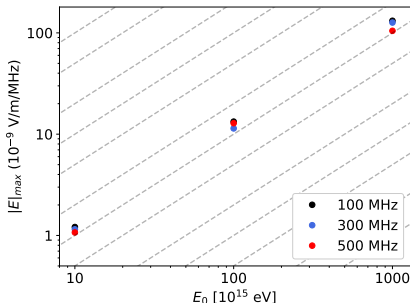


# Propiedades del primario a partir de la señal

- 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,  $\lambda_I$  [g/cm<sup>2</sup>]. En uds. de distancia,  $d_I \sim \lambda_I/\rho(h)$ .
- Distancia de desintegración,  $d_{dec}$  [m]:

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

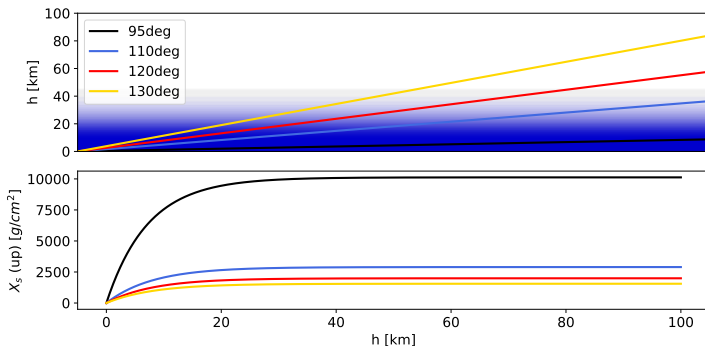
- Energía a la que comienzan a dominar desintegraciones:

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

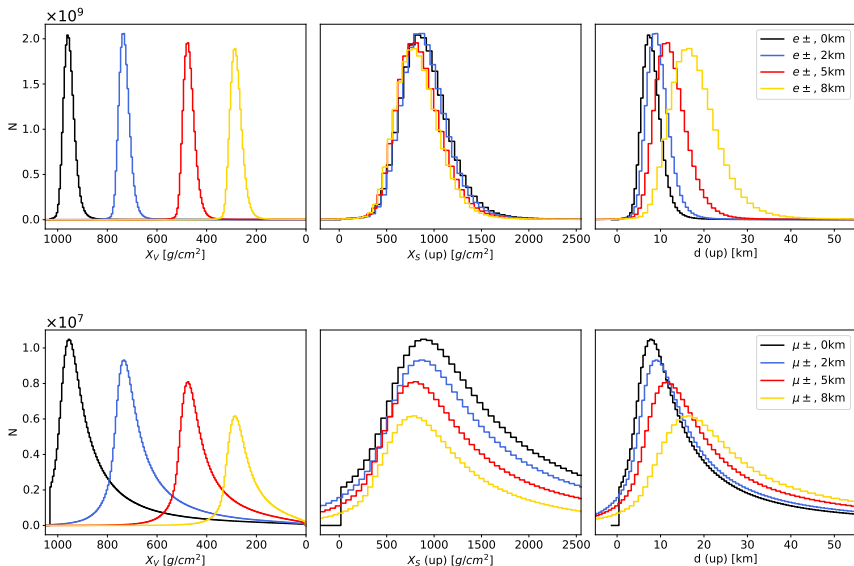
Partícula	Interacciones
$\gamma$ $e^\pm$	Efectos Compton y fotoeléctrico Bremsstrahlung y producción de pares Aniquilación $e^+e^-$ Emisión de $e^-$ knock-on (scattering Møller, Bhabha) Reacciones fotonucleares, ...
$\mu^\pm$	Bremsstrahlung y producción de pares Emisión de $e^-$ knock-on Desintegración
$\nu$ '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. $\theta$

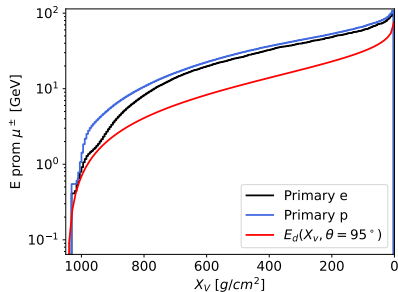
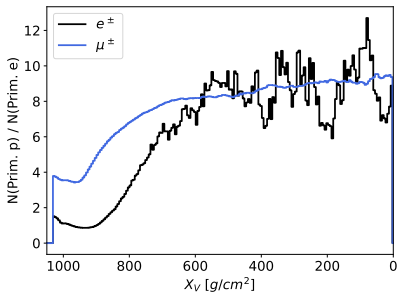
$$X_s^{\text{up}}(h, \theta) = \int_0^h \rho(h') dl = \int_0^h \rho(h') \frac{dh'}{\sqrt{1 - \frac{R_T^2 \sin^2 \theta}{(R_T + h')^2}}}.$$



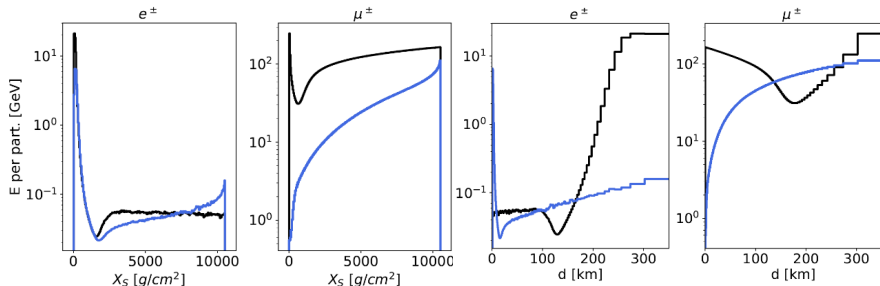
# Aux.: Altura de interacción en cascadas hacia arriba



# Aux.: Desintegración de muones en cascadas hacia arriba



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





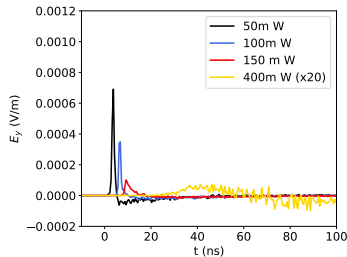
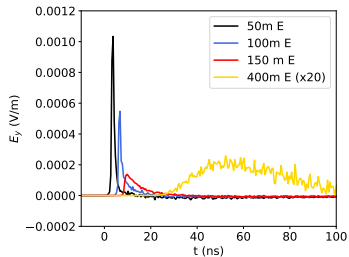
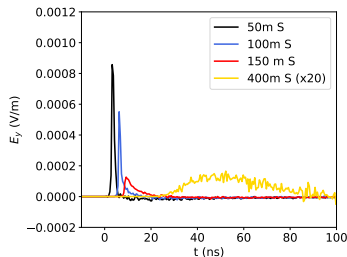
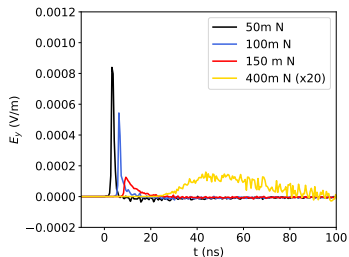
$$\mathbf{J}_{\perp}(\mathbf{r}', t') = q\mathbf{v}_{\perp} \delta^{(3)}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0 - \mathbf{v}t') [\Theta(t' - t_1) - \Theta(t' - t_2)] ,$$

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

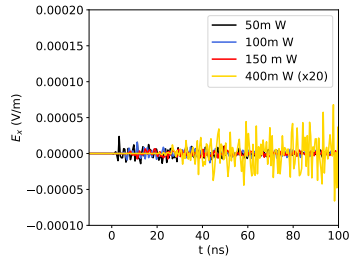
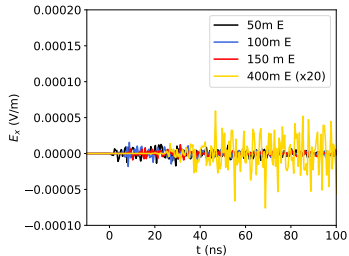
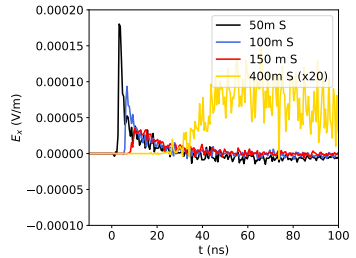
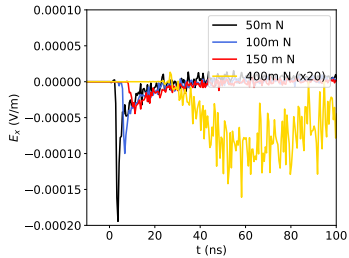
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \approx -\frac{\mu q}{4\pi R} \mathbf{v}_{\perp} \frac{\delta[t - nR/c - (1 - n\beta \cos \theta) t_1] - \delta[t - nR/c - (1 - n\beta \cos \theta) t_2]}{1 - n\beta \cos \theta} ,$$

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

# 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

