

Estudio de distribución lateral de cascadas de partículas inducidas por rayos cósmicos usando Hawc

Jorge Antonio Morales Soto

Juan Carlos Arteaga Velázquez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Reunión de la División Nacional de Rayos Cósmicos de la SMF

Puebla, Puebla

27 - 29 de Noviembre, 2019.

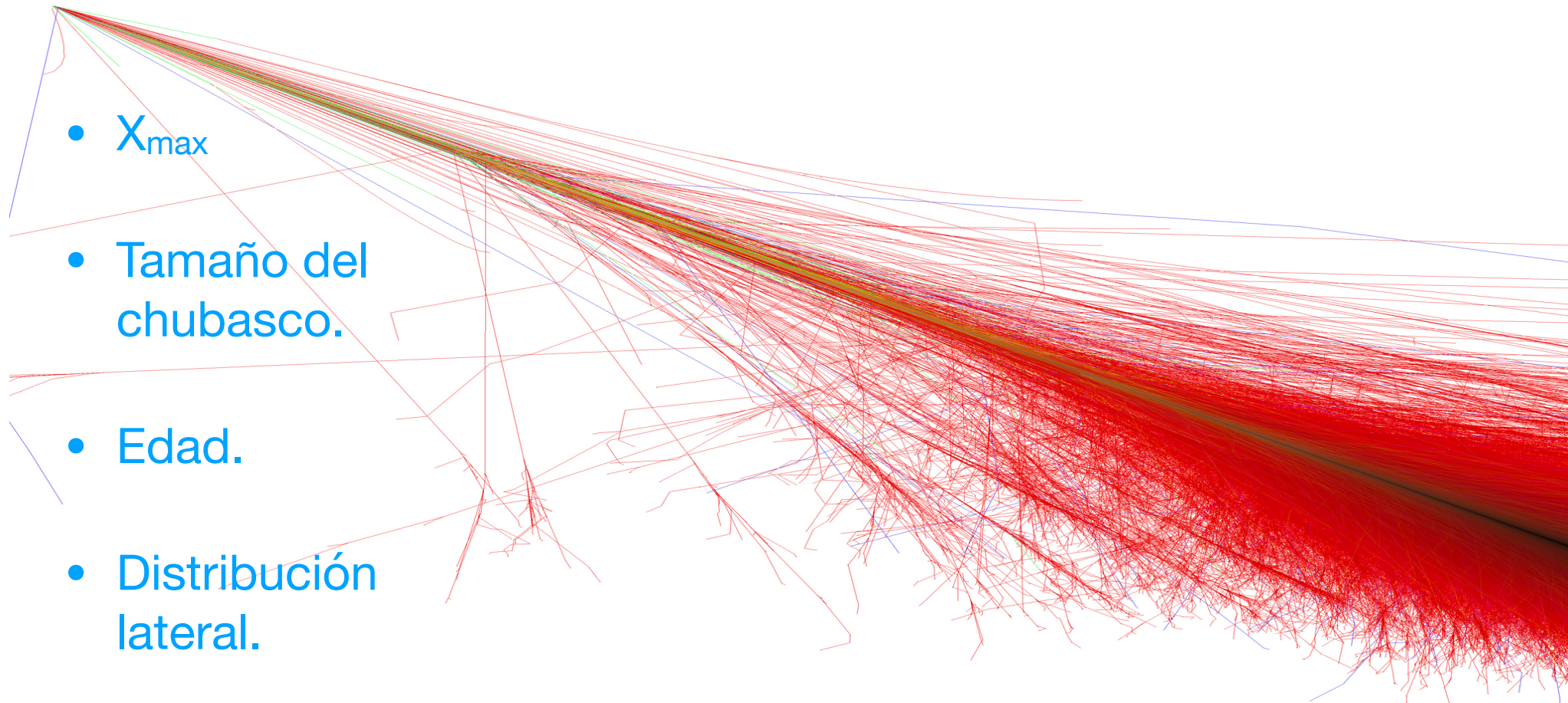


Contenido

1. Introducción
2. HAWC
3. Análisis y resultados
4. Conclusiones

Introducción

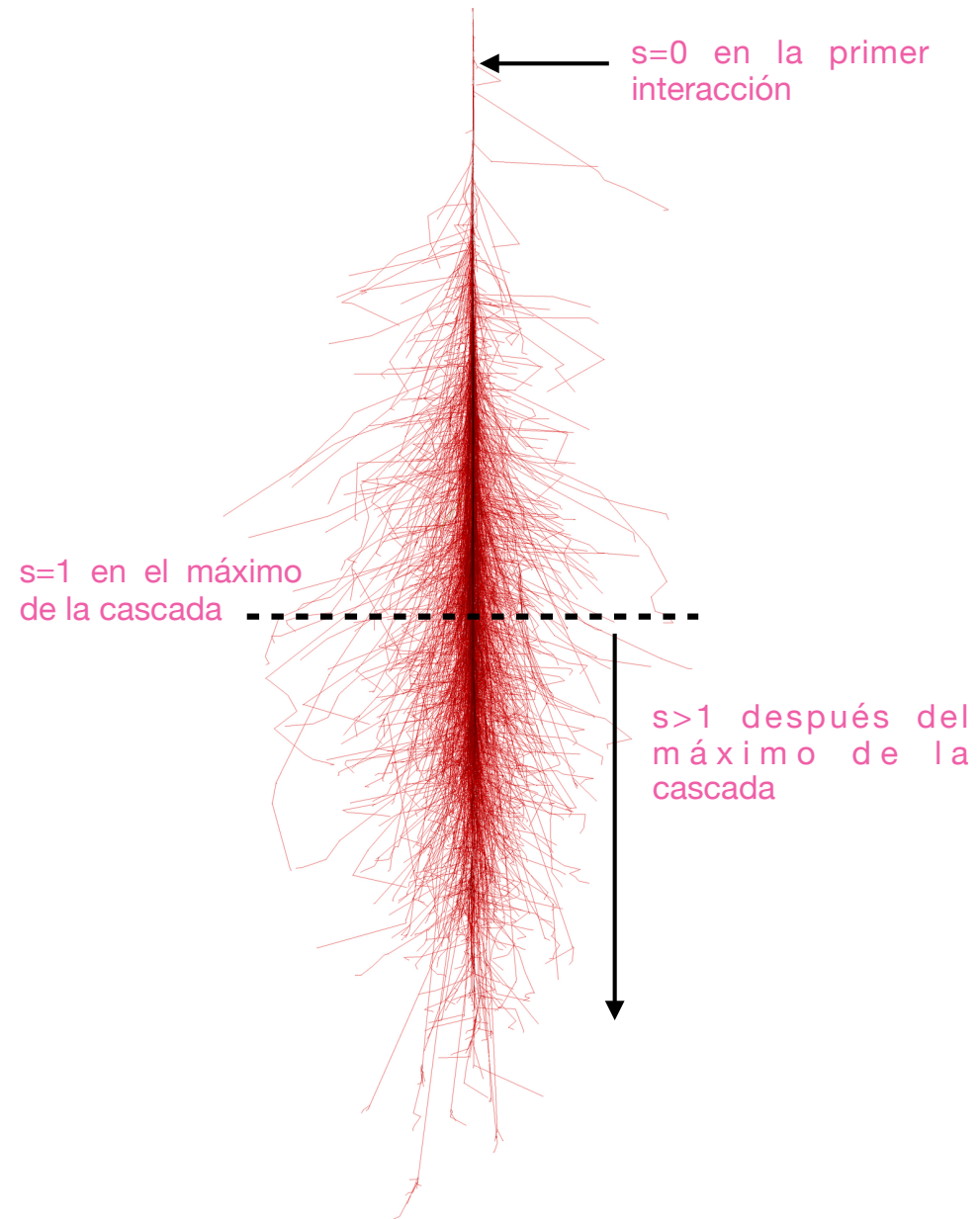
Una de las herramientas más útiles en la **investigación** de los **rayos cósmicos** es el estudio detallado de las **propiedades de las cascadas** secundarias de partículas.



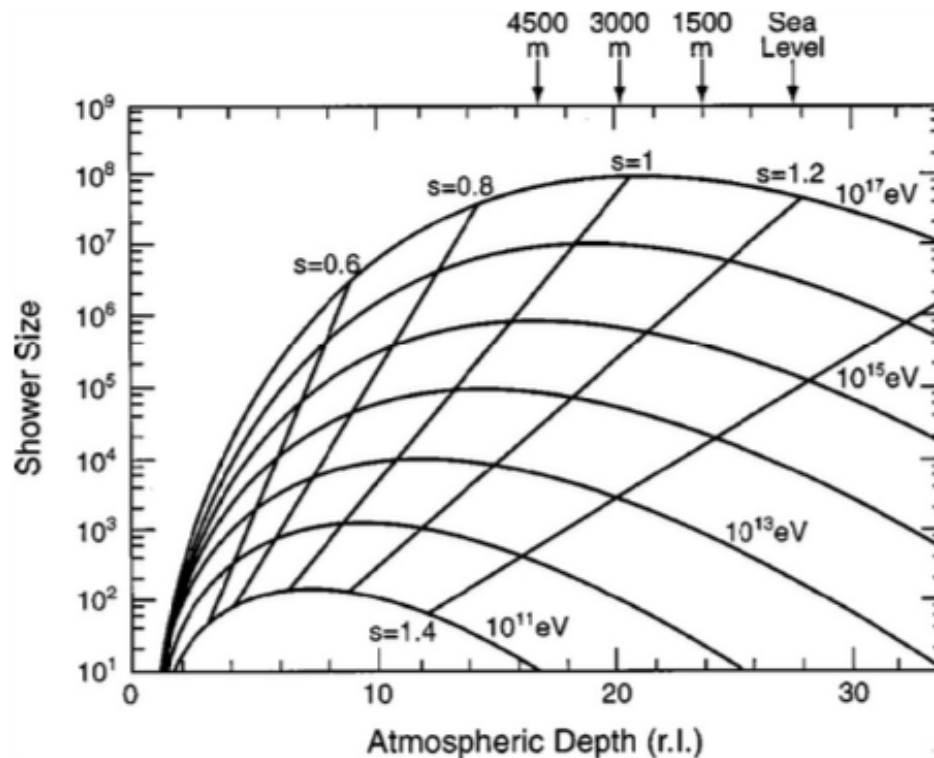
Parámetro de edad

Este parámetro describe el estado **desarrollo lateral y longitudinal de la cascada** de partículas secundarias a través de su recorrido por la atmósfera.

Las cascadas **jóvenes** tienen valores de edad **pequeños**, las cascadas **viejas** tienen valores de edad **grandes**.



1 Parámetro de edad longitudinal



Desarrollo **longitudinal** de cascadas electromagnéticas para diferentes valores de energía.

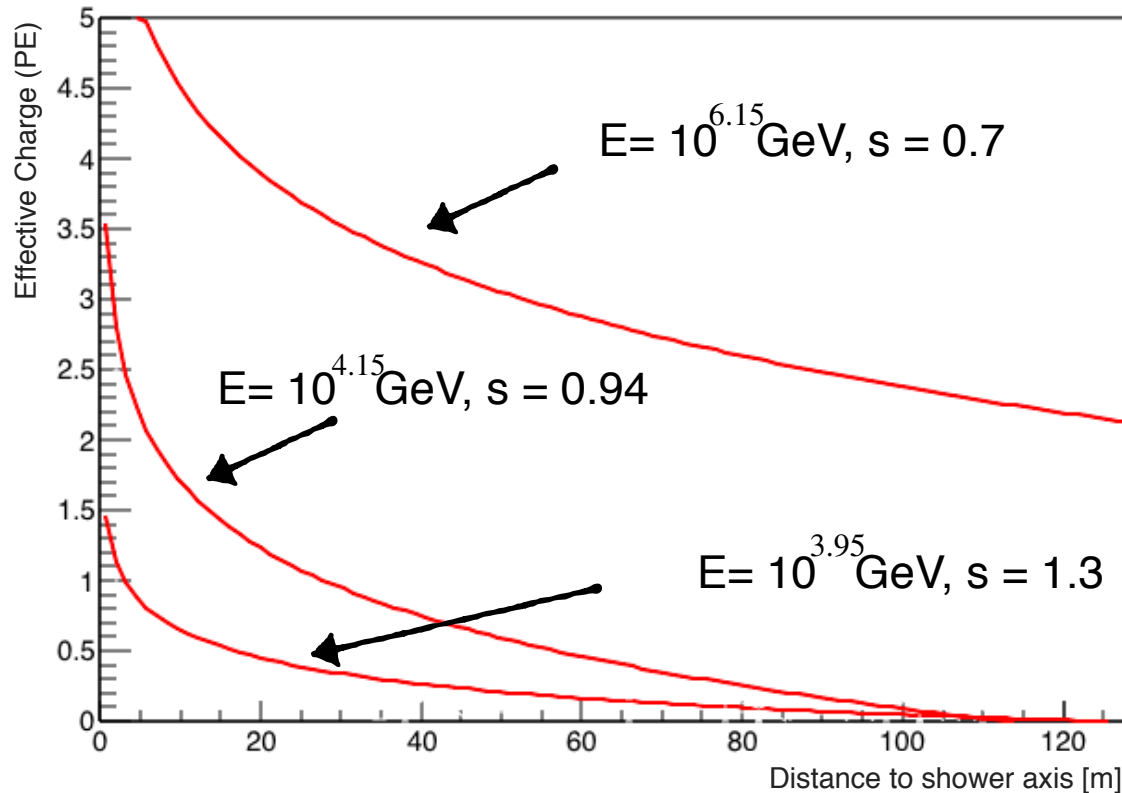
$$s = \frac{3t}{t + 2\beta}$$

$$t = \frac{X}{X_0}, \quad \beta = \ln \left(\frac{E}{E_c} \right)$$

También se puede aplicar a cascadas de origen **hadrónico**.

Edad lateral del chubasco

Relación entre la edad lateral del chubasco y la distribución lateral del chubasco.



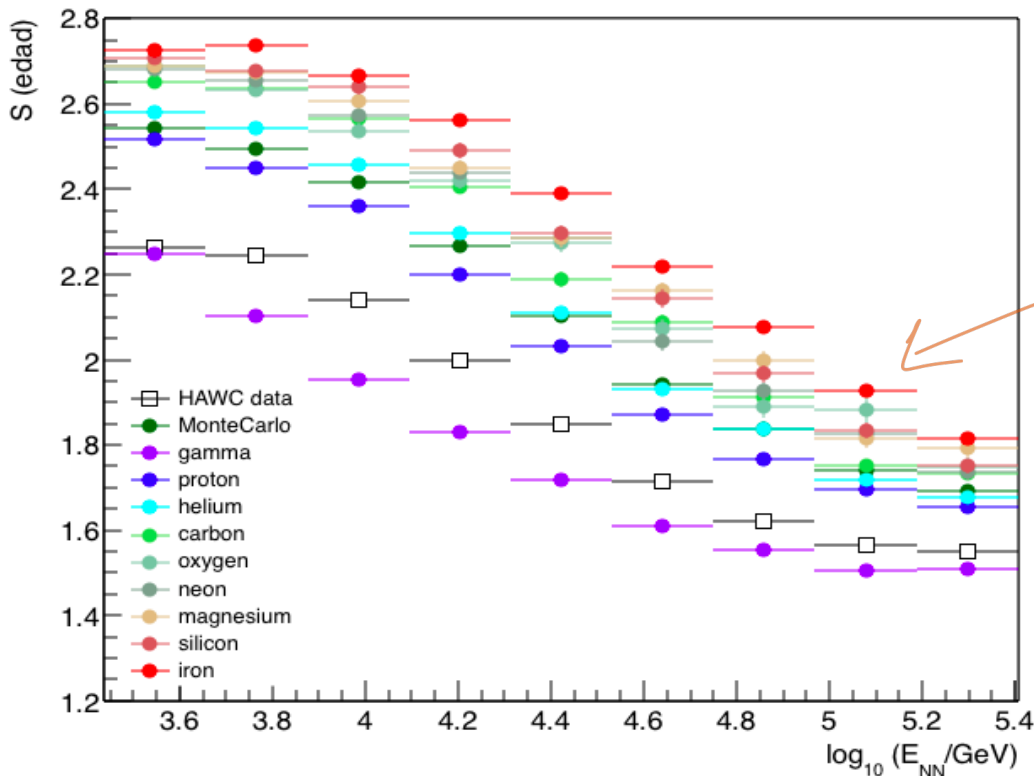
Función Nishimura-Kamata-Greisen:

$$\rho(r) = A \left(\frac{r}{r_0} \right)^{s-3} \left(1 + \frac{r}{r_0} \right)^{s-4.5}$$

Kamata, Nishimura "The Lateral and the Angular Structure Functions of Electron Showers" Progress of Theoretical Physics Supplement.

¿Cuál es la importancia del parámetro de edad?

- Juega un rol importante en los estudios de **composición** de masa de los rayos cósmicos y en la reconstrucción de los **espectros de energía de los elementos de los rayos cósmicos**.
- Separación Gamma/Hadrón.



¡Sensibilidad de la edad del chubasco a la composición de los rayos cósmicos!

High Altitude Water Cherenkov gamma ray observatory

- Diseñado para el estudio de rayos gamma (entre 100 GeV y 100 TeV) y rayos cósmicos (hasta 1PeV).
- Entre los volcanes Pico de Orizaba y Sierra Negra.
- Oficialmente inició actividades el 20 de Marzo del 2015.
- HAWC terminará su ciclo de operaciones en el año 2025.

High Altitude Water Cherenkov
Gamma-Ray Observatory

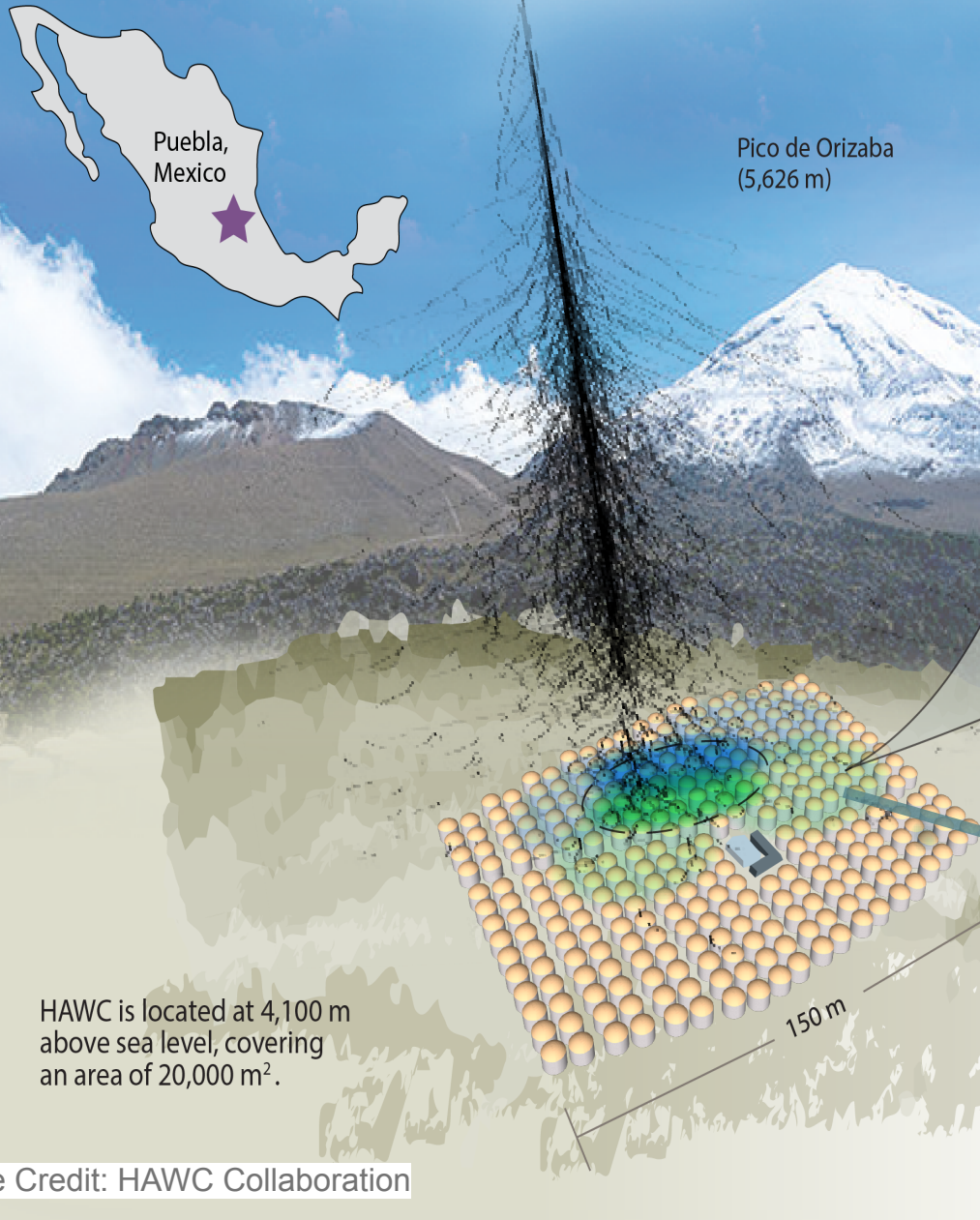
Objetivos científicos

- Extender las mediciones astrofísicas de rayos gamma hasta 100 TeV.
- Física de rayos cósmicos.
- Astrofísica galáctica y extra-galáctica.
- Participar en campañas *multimessenger* y *multiwavelength*.



HAWC Observatory

HAWC operates day and night, providing a large field of view for the observation of the highest energy gamma rays.



HAWC is located at 4,100 m above sea level, covering an area of 20,000 m².

- 4,100 m s.n.m.
- Área de 22,000 m² (62% de cobertura física).
- 300 detectores Cherenkov de agua.
- 1200 fotomultiplicadores.

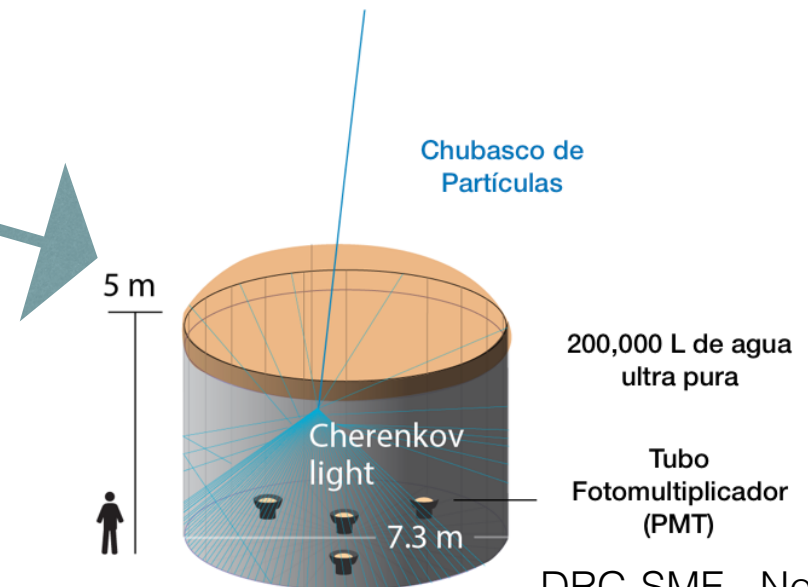




Image Credit: HAWC Collaboration



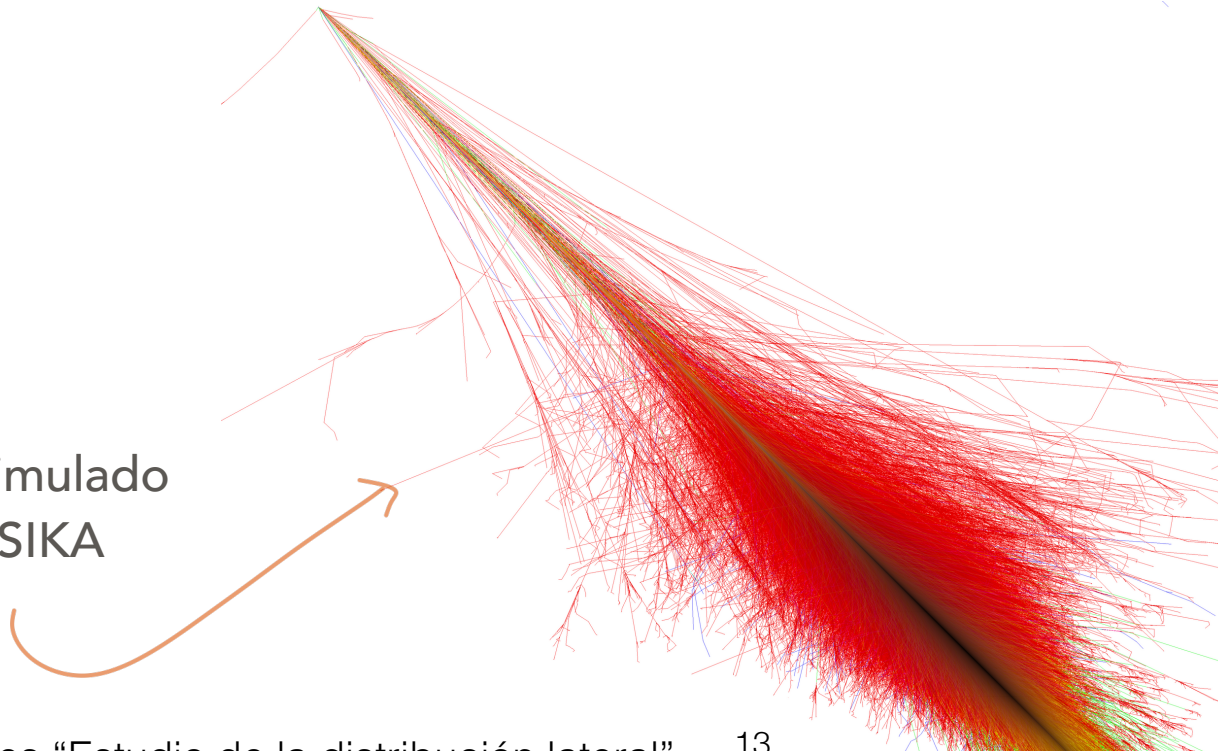
Image Credit: HAWC Collaboration

Colaboración de HAWC



- Simulados con Corsika (v740). D.Heck, J. Knapp, et al “CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers.”
- Modelos de interacción hadrónica: FLUKA (bajas energías) and QGSJet-II-03 (altas energías).
- Las interacciones de las partículas secundarias con los detectores de HAWC son simuladas via GEANT 4.

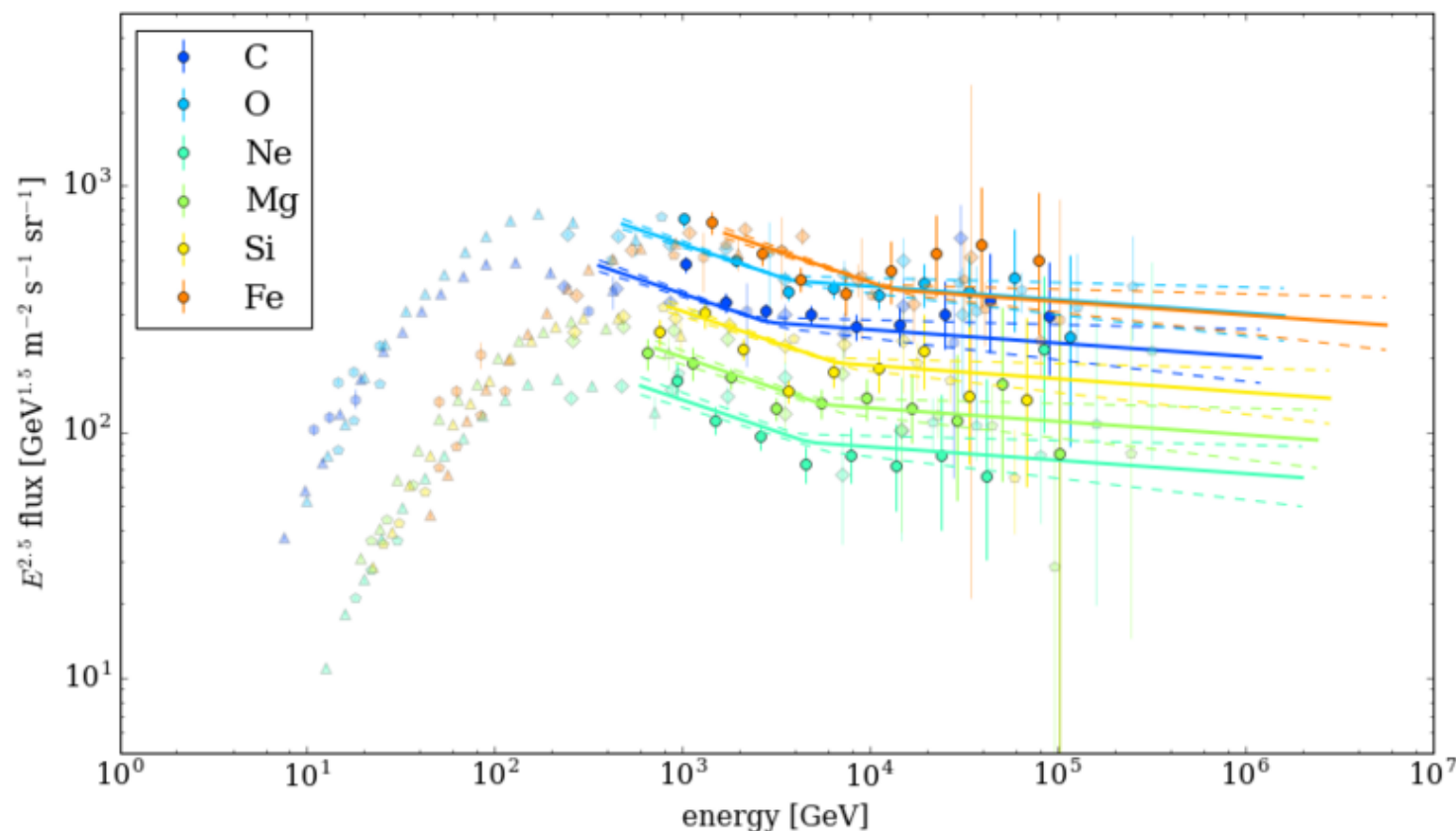
Chubasco simulado
con CORSIKA



2

Datos simulados de HAWC

- Se generan espectros para ocho especies de núcleos atómicos (^1H , ^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{56}Fe) y se calibran con las mediciones de CREAM, PAMELA y AMS.
- Energía E entre 5 GeV y 3 PeV.
- Distribuidos homogéneamente sobre un área circular con un radio de 1000 m.
- Flujo isotrópico.



2 Datos experimentales de HAWC

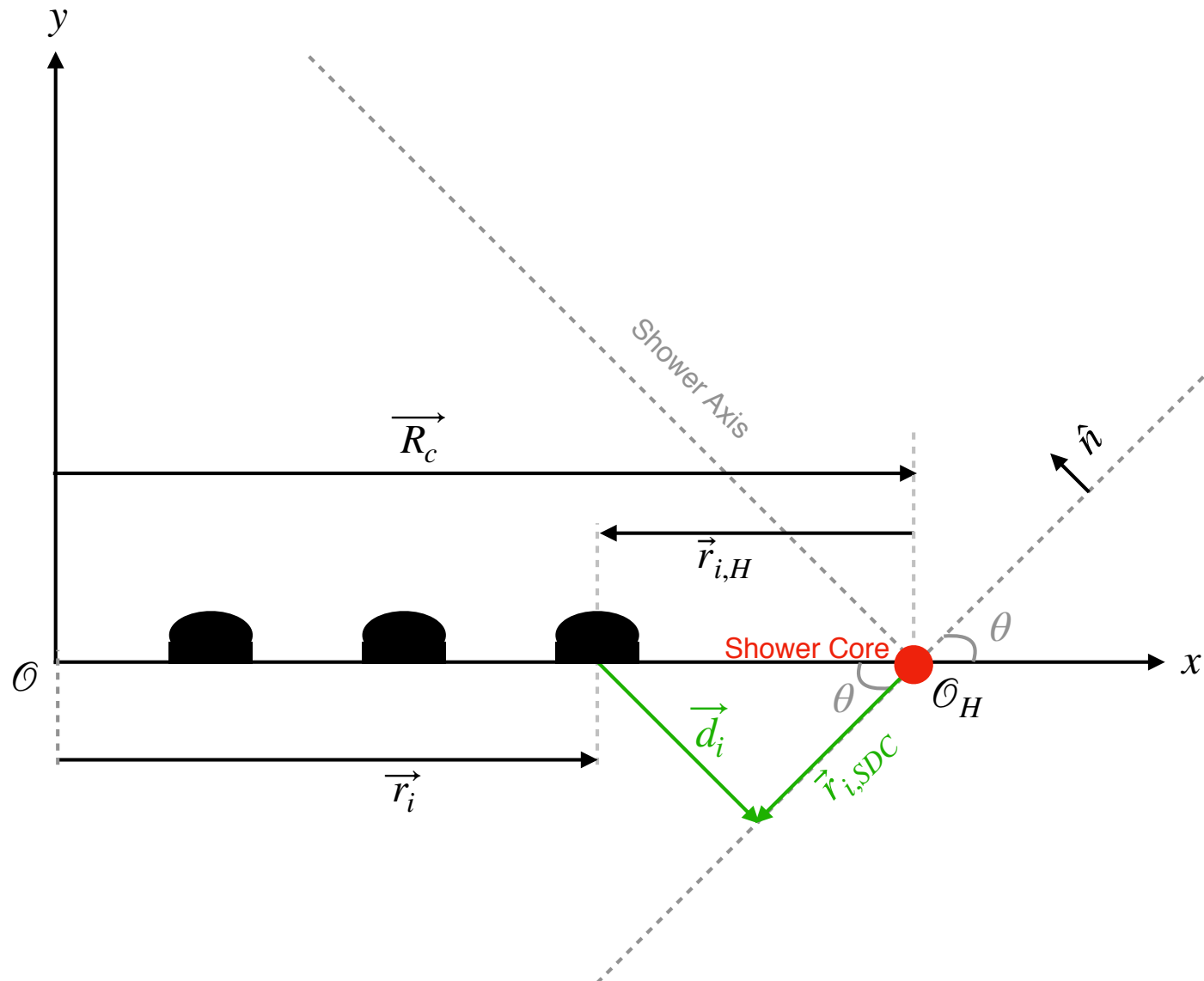
- Para este trabajo se seleccionó un subconjunto de datos detectados en el año 2016 con HAWC.
- Se seleccionaron eventos en el intervalo de energía entre $E=10^{3.5} - 10^{5.5}$ GeV

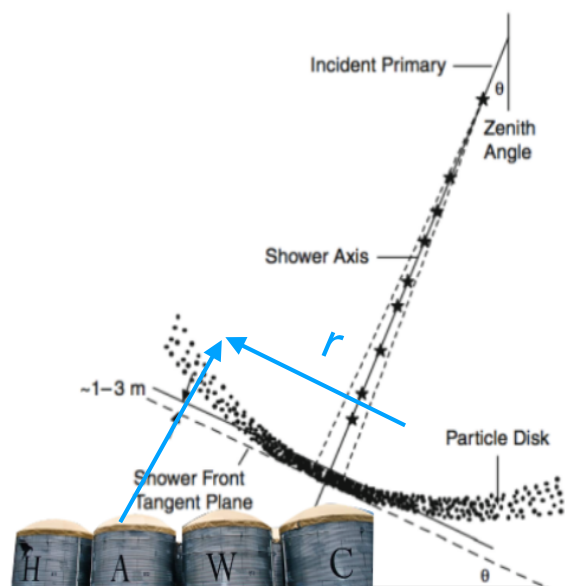
Run	Date	Duration	#events before cuts	#events after cuts
run005481	2016/06/02	t=32,168.625 s	795370112	7942997
run005489	2016/06/05	t=21,158.948 s	539856641	5362015
run005490	2016/06/05	t=35,311.425 s	900178843	8929378
run005493	2016/06/07	t=26,147.625 s	655220894	6559812
run005515	2016/06/12	t=19,499.774 s	477287788	4777653

Se aplicaron **cortes de calidad** a los datos simulados y experimentales de HAWC para **disminuir los efectos de los errores sistemáticos**.

Se seleccionaron eventos:

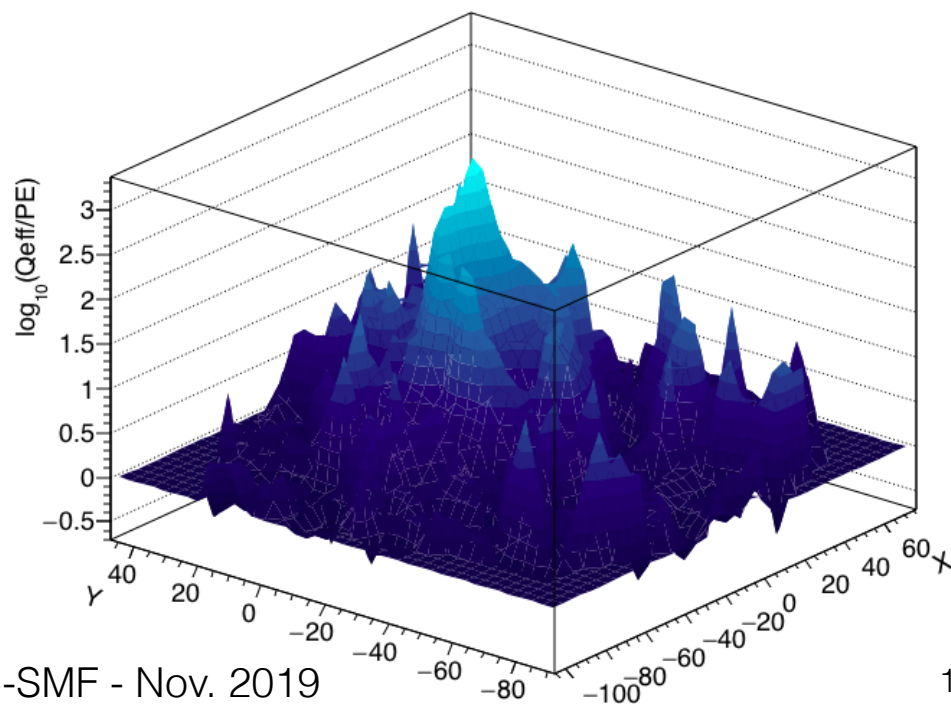
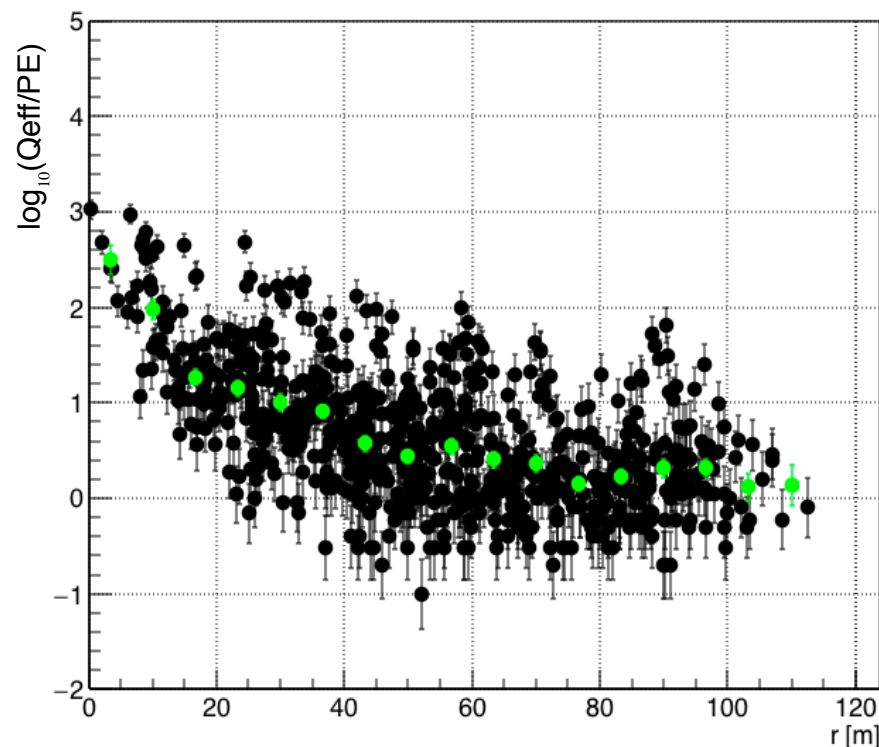
- **verticales, $\theta < 16.7^\circ$,**
- **que activaron al menos 60 canales en un radio de 40 m** desde el núcleo del chubasco,
- **que cayeron dentro del área de HAWC,**
- **que hayan registrado señal en al menos 75 canales** de un total de 1200,
- **y que hayan activado el 30 % de los canales disponibles.**





● Promedio sobre los valores de la carga efectiva

En coordenadas del frente del chubasco



Energía: $10^{4.15}$ GeV

Ángulo zenital: 8.06°

Protón

- **HAWC NKG-like**

Measurement of the Crab Nebula Spectrum Past 100 TeV with HAWC, [arXiv:1905.12518 \[astro-ph.HE\]](#).

$$\log_{10}(NKG) = \log_{10}(A) + s \log_{10} \left[\left(\frac{r}{124.21} \right) + \left(1 + \frac{r}{124.21} \right) \right] - 3 \log_{10} \left(\frac{r}{124.21} \right) - 4.5 \log_{10} \left(1 + \frac{r}{124.21} \right).$$

- **KASCADE**

Electron, Muon, and Hadron Lateral Distributions Measured in Air-Showers by the KASCADE Experiment, [arXiv:astro-ph/0004233](#)

$$\log_{10}(\rho_1) = \log_{10}(C) + (s - \alpha) \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) + (s - \beta) \log_{10} \left(1 + \frac{r}{r_0} \right).$$

- **Modified Scaling Formalism**

EAS age determination from the study of the lateral distribution of charged particles near the shower axis with the ARGO-YBJ experiment, [arXiv:1707.01412](#)

$$\log_{10}(\rho_2) = \log_{10}(C) + (-s) \log_{10} \left(\frac{r}{r_M} \right) + (s - \beta) \log_{10} \left(1 + \frac{r}{r_M} \right) + (s - \gamma) \log_{10} \left[1 + \left(\frac{r}{r_M} \right)^\phi \right].$$

- **ARGO-YBJ LDF**

EAS age determination from the study of the lateral distribution of charged particles near the shower axis with the ARGO-YBJ experiment, [arXiv:1707.01412](#)

$$\log_{10}(\rho_3) = \log_{10}(C) + (s - \alpha) \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) + (s - \beta) \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right).$$

Donde r_M es el radio de Molière, r_0 es un radio de escala constante, y C es una constante de normalización

- Haverá Park*

$$\log_{10}(\rho_4) = Kr^{-(1+\frac{r}{4000})}$$

- Egorov*

$$\log_{10}(\rho_5) = \frac{N}{r_M^2} \left(\frac{\eta - 2}{2\pi} \right) \left(\frac{r}{r_M} \right)^{-1} \left(1 + \frac{r}{r_M} \right)^{-\eta}$$

- Kaneko*

$$\log_{10}(\rho_6) = \frac{C_2 N}{2\pi r_M^2} \left(\frac{r}{r_M} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_M} \right)^{s-4.5} \left[1 + C_2 \left(\frac{r}{r_M} \right)^2 \right]$$

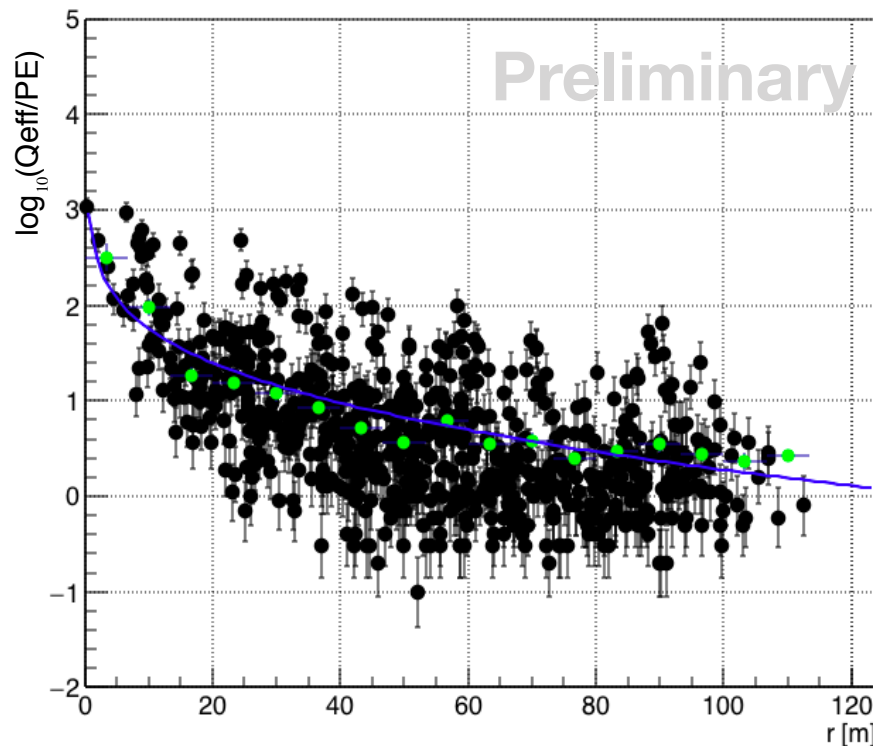
* A simulation study with CORSIKA of the lateral distribution of electrons in air showers produced by energetic cosmic protons and alpha particles, Georgios-Marios Aspiotis.

Donde r_M es el radio de Molière, r_0 es un radio de escala constante, y C es una constante de normalización

3 HAWC LDF

$$\log_{10}(NKG) = \log_{10}(A) + s \log_{10} \left[\left(\frac{r}{124.21} \right) + \left(1 + \frac{r}{124.21} \right) \right] - 3 \log_{10} \left(\frac{r}{124.21} \right) - 4.5 \log_{10} \left(1 + \frac{r}{124.21} \right).$$

Parámetros libres: s , A .



Energía: 10^6 GeV

Ángulo zenital: 15.57°

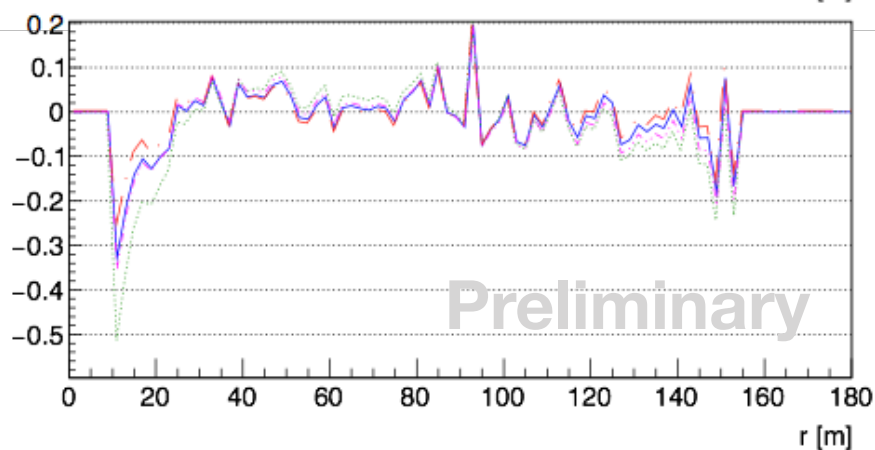
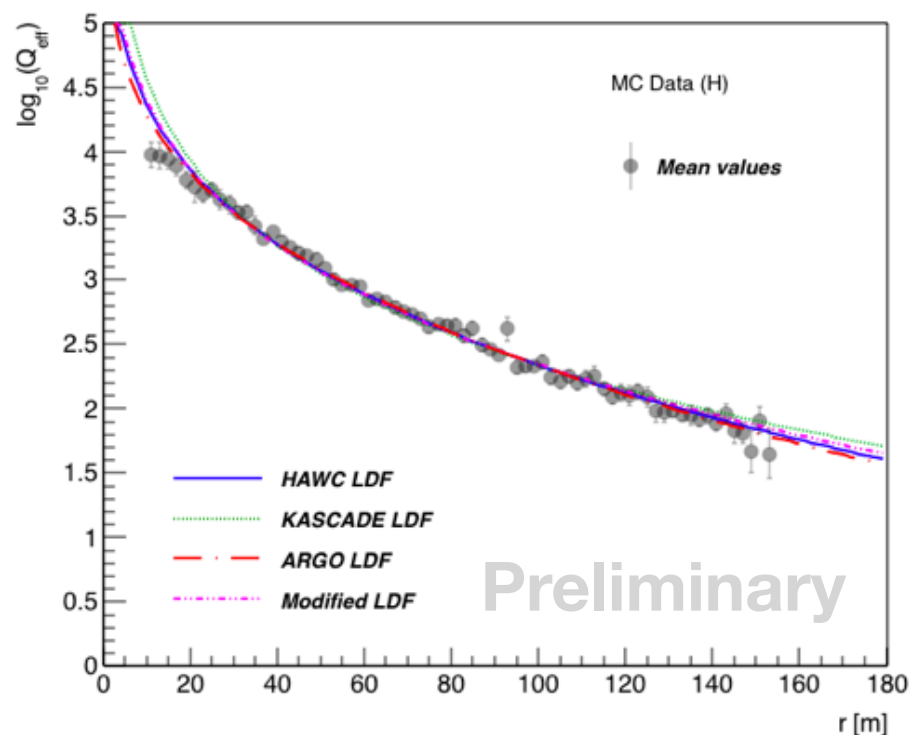
Protón

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{Q}_{eff,i} - f(r_i)}{\sigma_i} \right)^2$$

Donde n es el número de bins radiales, $\bar{Q}_{eff,i}$ es el valor promedio del valor medido de la carga depositada por bin radial, $f(r_i)$ es el valor promedio predicho de la carga depositada y σ_i es la incertidumbre del valor de los datos.

$$\chi^2/NDOF \sim 1$$

MUESTRA DE UN EVENTO MC

Comparación χ^2/NGL

HAWC: 1.08

—

Scaling: 1.3

—

KASCADE: 2.2

—

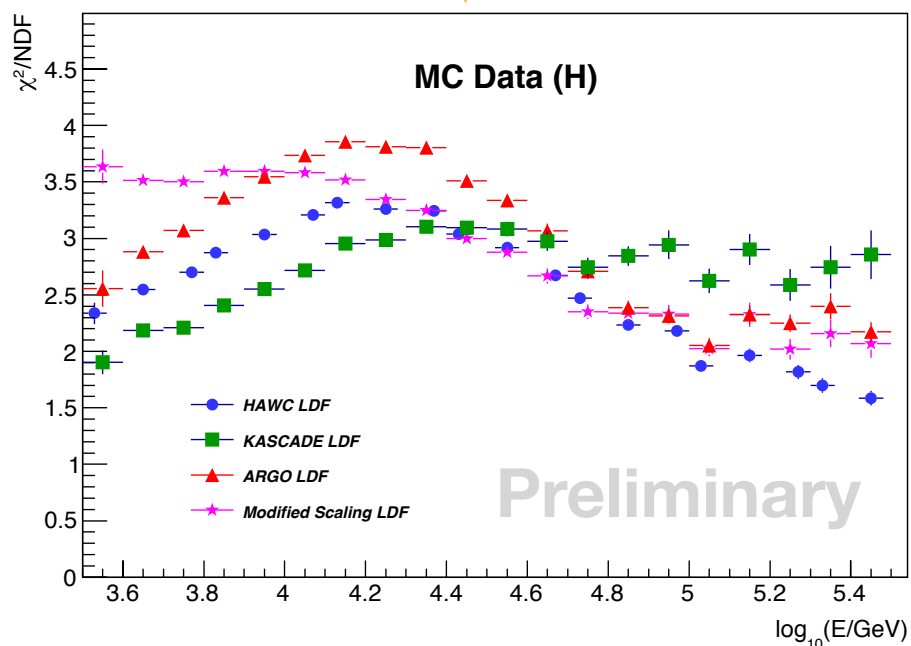
ARGO-YBJ: 0.8

—

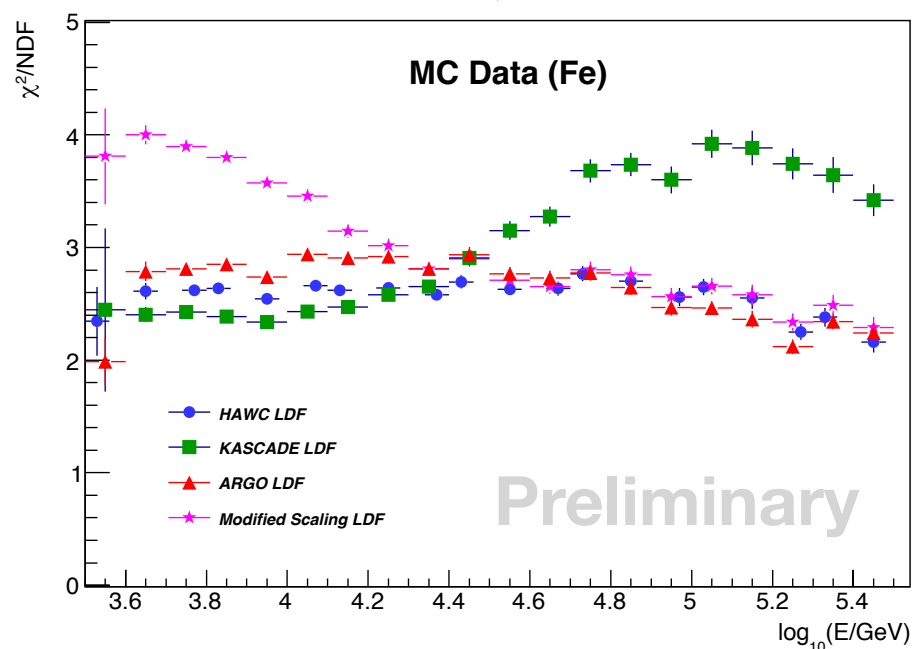
Energía: 10^6 GeVÁngulo zenital: 15.57°

Protón

Hidrógeno

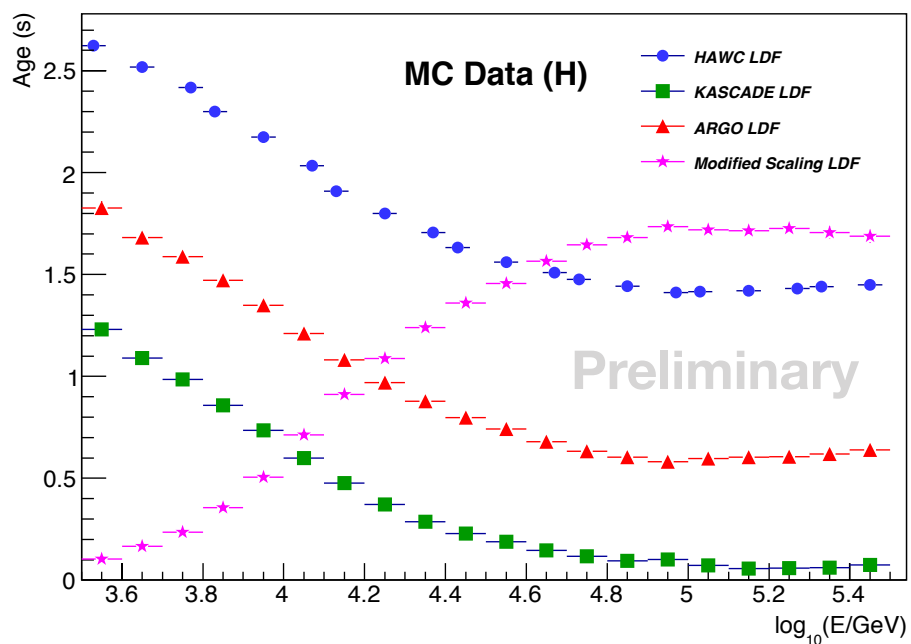


Hierro

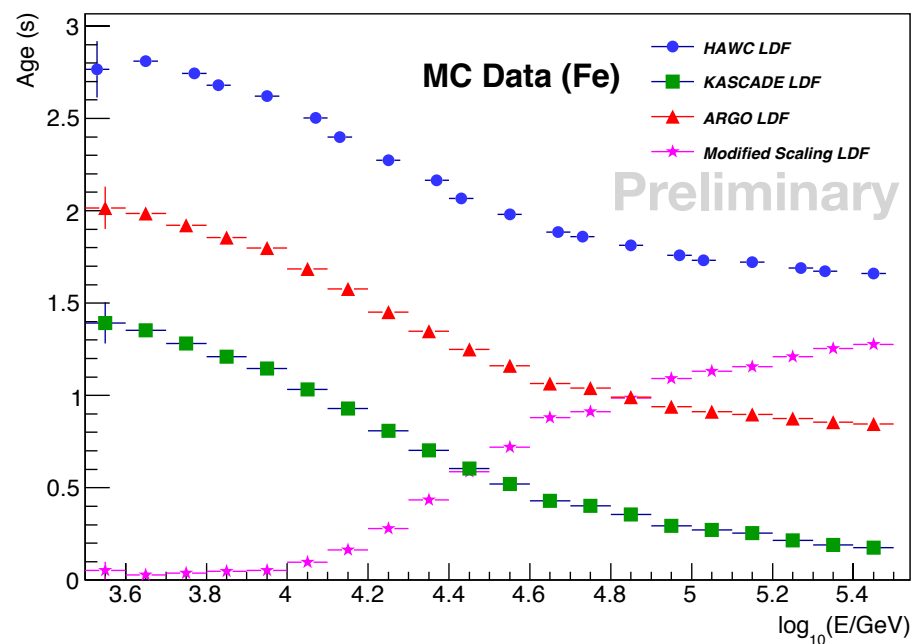


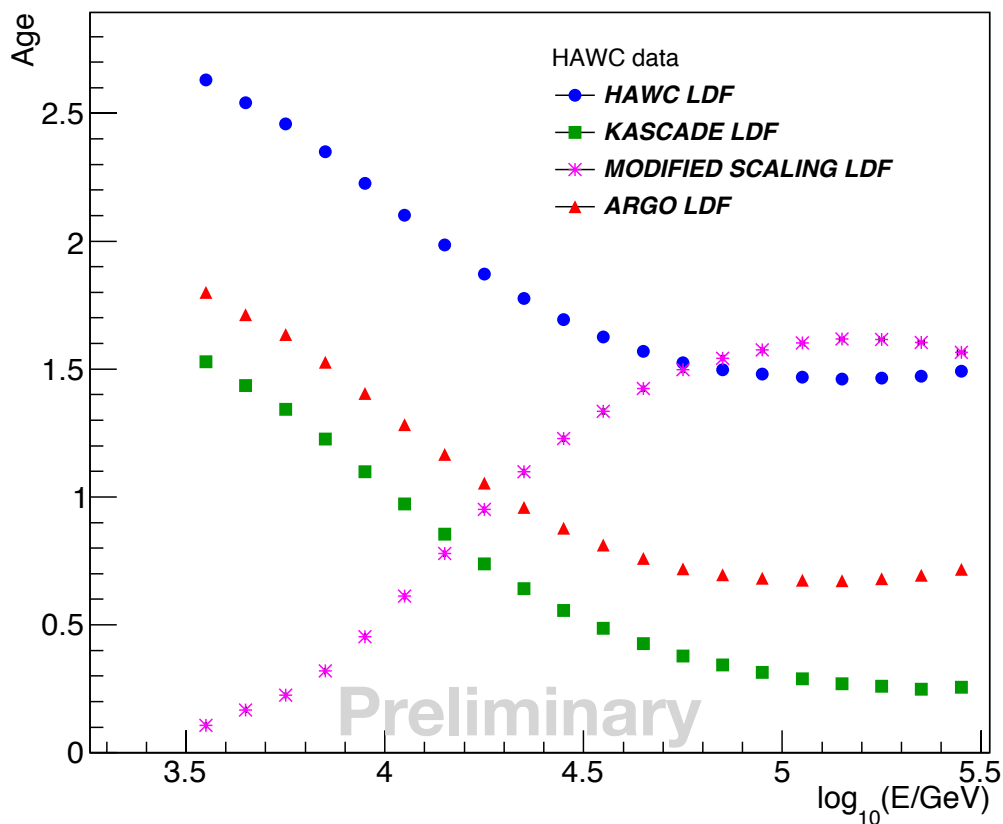
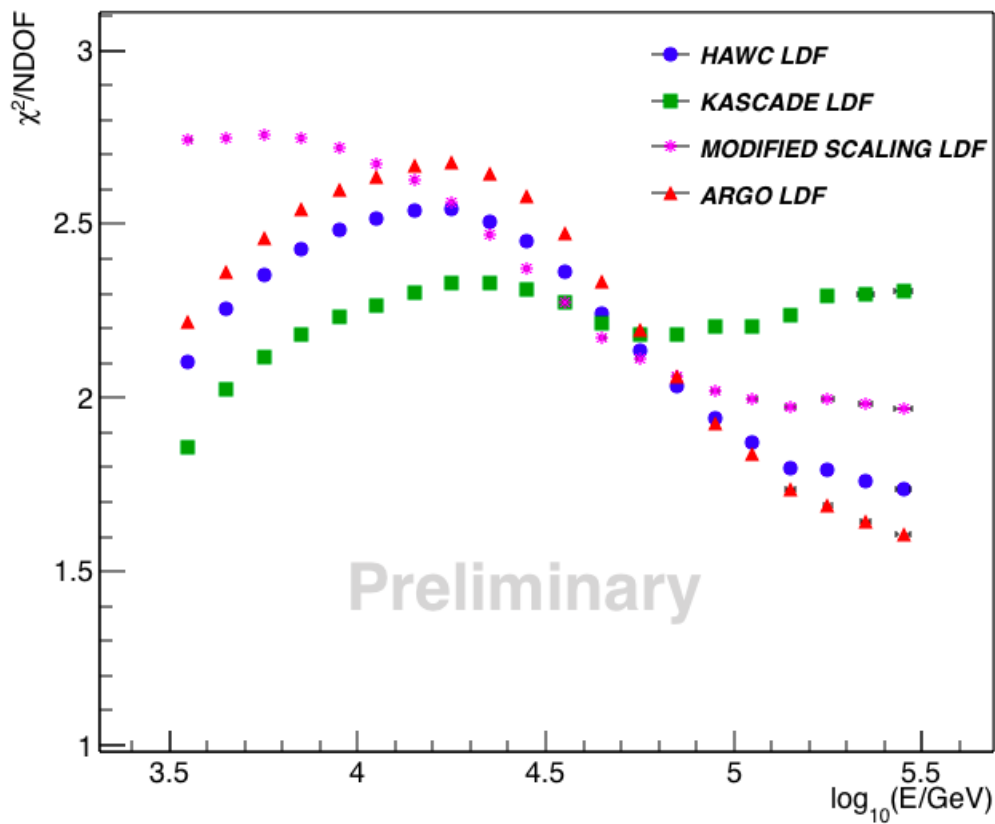
$\chi^2/NDOF$ más pequeño $\longrightarrow$ mejor descripción

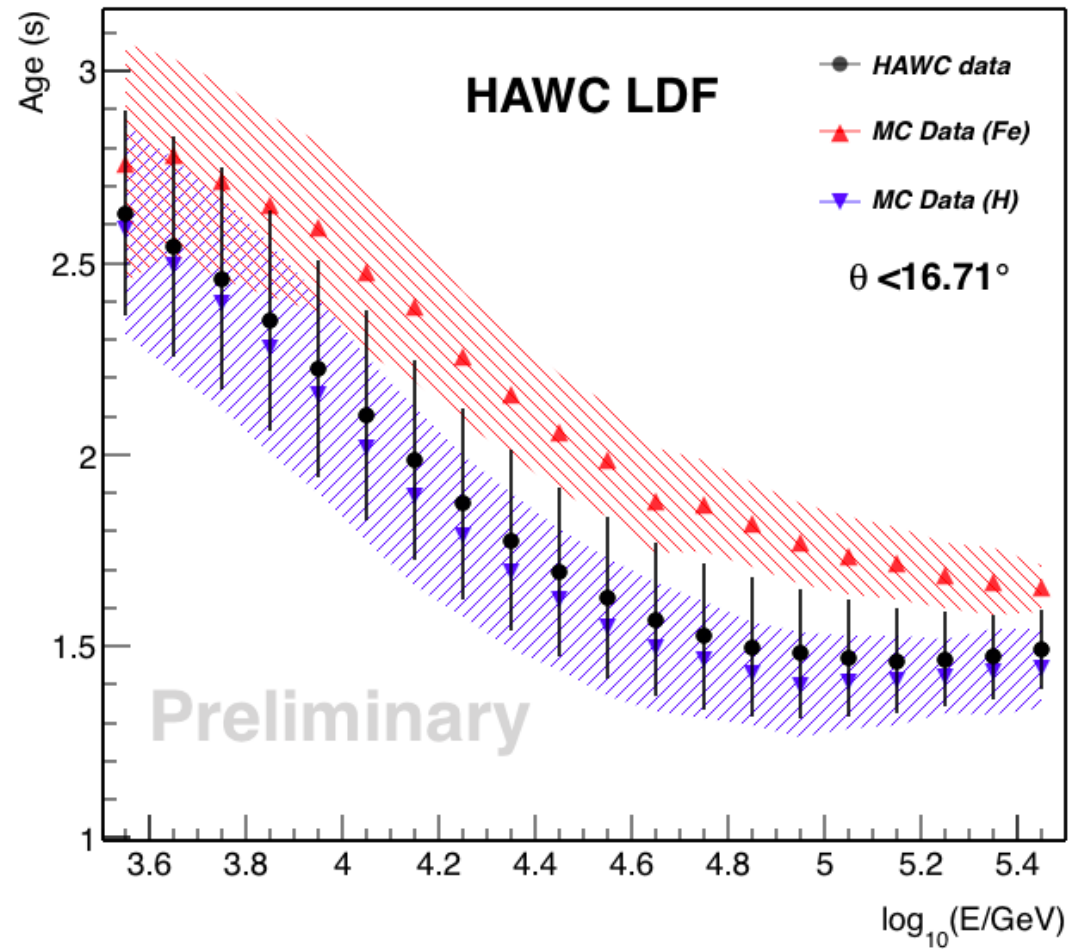
Hidrógeno



Hierro





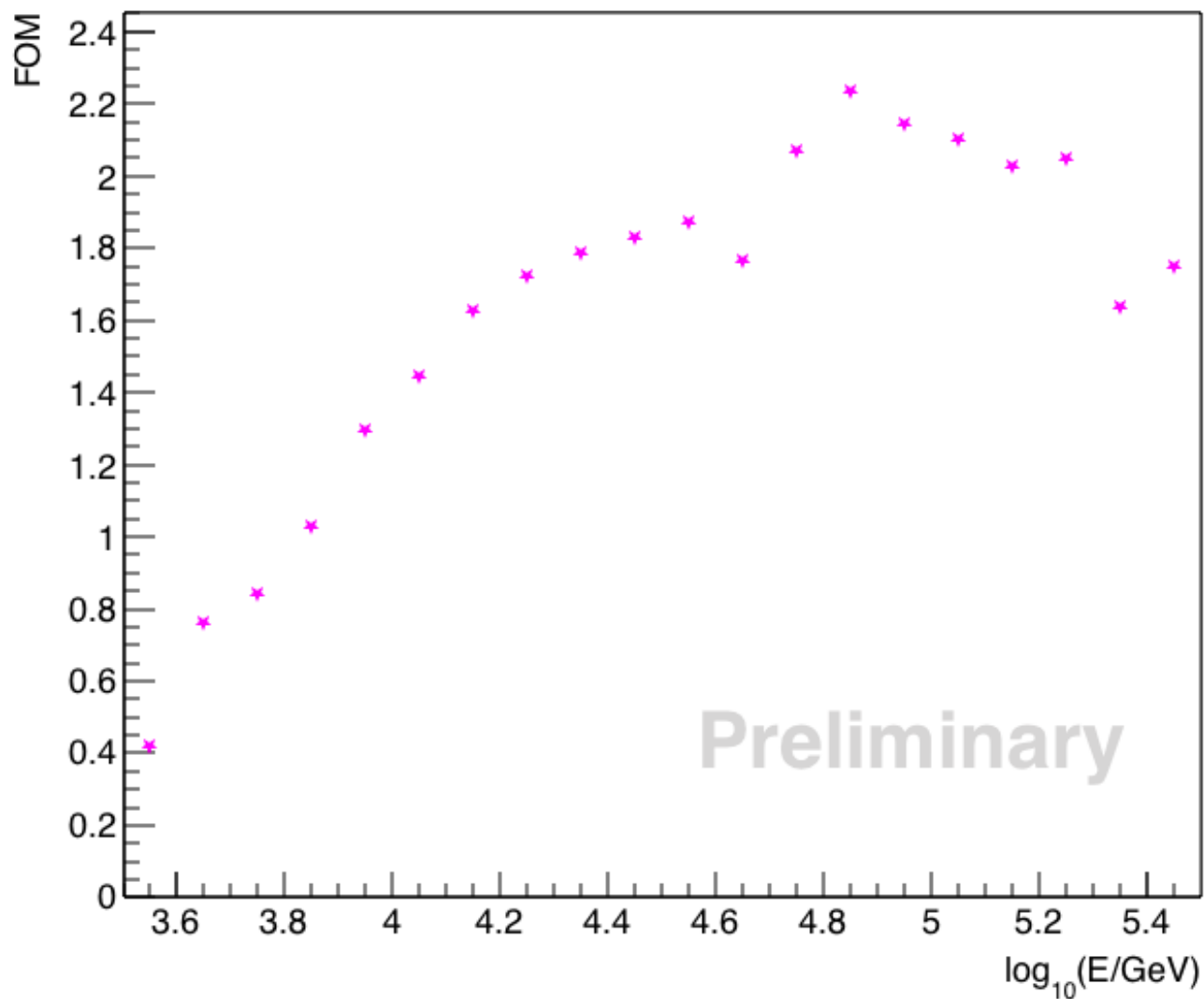


3 Sensibilidad del parámetro de edad a la composición de los rayos cósmicos

$$FOM = \frac{|s_{Fe} - s_p|}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{Fe}^2}},$$

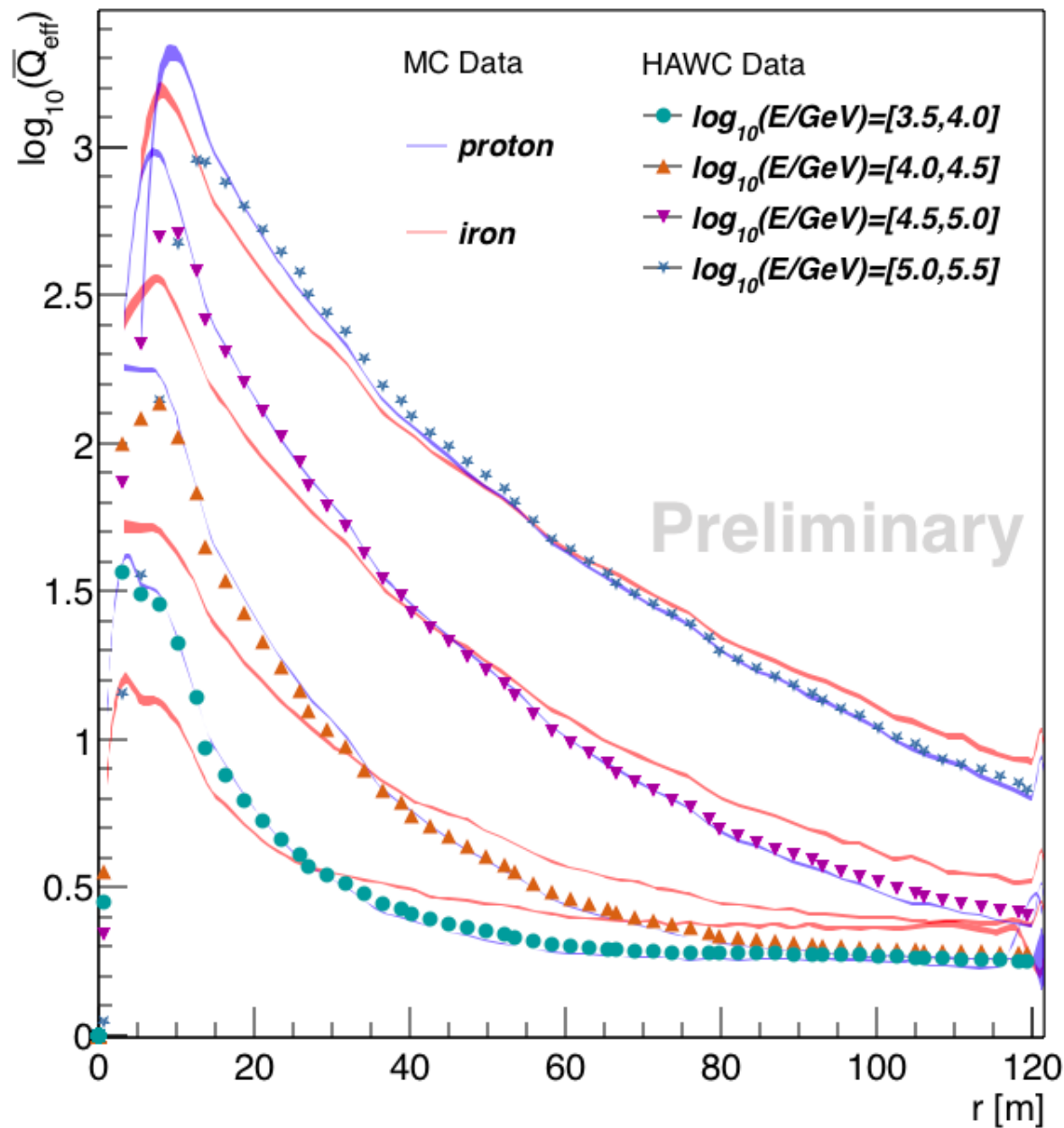
La **figura de mérito** (FOM) describe la separación entre dos poblaciones, en este caso, la separación entre **H** y **Fe** por medio del parámetro de la **edad lateral del chubasco**.

Si **FOM = 1** quiere decir que las poblaciones están separadas por **una desviación estándar**.



Se pueden realizar estudios de composición para $\text{FOM} > 1$.

Comparación de la edad experimental y las predicciones del modelo de interacción hadrónica



- No se encontró una LDF que mejor describa los datos de HAWC, sin embargo, la LDF usada para la estimación del parámetro de edad en HAWC funciona adecuadamente y da buenos resultados.
- Reducir los sistemáticos en el parámetro de edad es importante para llevar acabo estudios de la composición de los rayos cósmicos con precisión.
- Es posible realizar estudios de la composición de los rayos cósmicos con HAWC usando el parámetro de edad en el rango de energía entre $10^{3.8}$ GeV a $10^{5.5}$ GeV.
- Las mediciones experimentales con HAWC de las LDF de chubascos inducidos por rayos cósmicos están dentro las predicciones de los datos simulados en el rango de energía entre $E = 10^{3.5} - 10^{5.5}$ GeV.

¡Gracias!

