



Estudio de la variación con la altura del flujo atmosférico de protones y neutrones secundarios producidos por rayos cósmicos

Presenta: Mata

Director de tesis: Dr. Oscar Gustavo Morales Olivares

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

¿Qué son los Rayos Cósmicos?

- ▶ Núcleos de átomos desprovistos de sus electrones.
- ▶ Consisten en $\sim 90\%$ protones, $\sim 9\%$ núcleos de helio y $\sim 1\%$ otros núcleos más pesados.
- ▶ Llegan a la Tierra desde todas direcciones.
- ▶ Descubiertos por *Victor Hess* en 1912.



Figura: Victor Hess recibió el premio Nobel de Física en 1936 por su descubrimiento de los rayos cósmicos.

Espectro de Energía

- ▶ Ley de potencia: $\Phi(E) \propto E^{-\alpha}$, donde E es la energía y α el índicepectral.
- ▶ Abarca varios ordenes de magnitud ($\sim 10^8$ a $\sim 10^{21}$) eV.
- ▶ Son muy abundantes los rayos cósmicos de **baja energía**.
- ▶ Los rayos cósmicos pueden ser detectados de manera **directa** e **indirecta**.

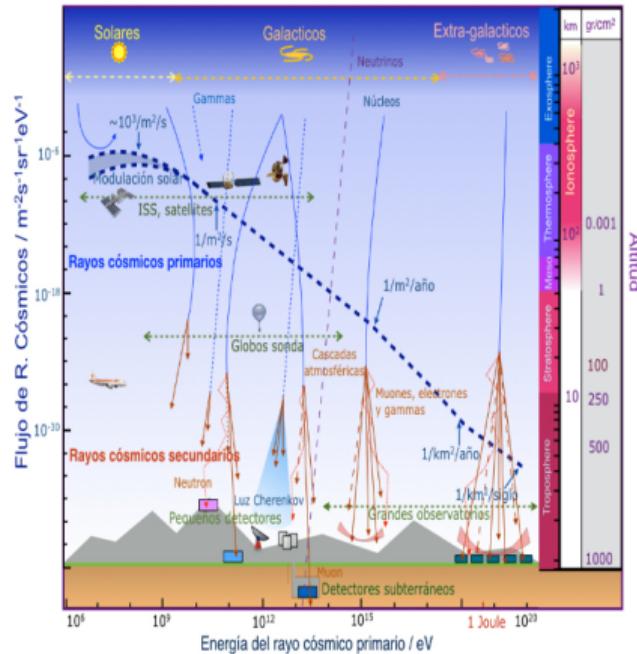


Figura: Espectro de los RC, se muestra los instrumentos usados para la detección a diferentes altitudes. Imagen tomada del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) (2023).

Origen de los Rayos Cósmicos

Galáctico



Figura: Remanente de supernova en la **nebulosa del Cangrejo**, se encuentra a 6500 años luz de la Tierra. Créditos: Rayos X: NASA/CXC/SAO; Visible: NASA/STScI; Infrarrojo: NASA-JPL-Caltech.

Extragaláctico

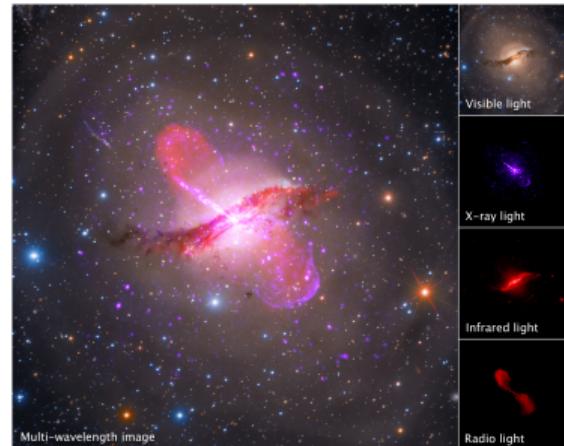


Figura: **Centaurus A** es una galaxia activa cercana a la Vía Láctea, ubicada a 3.5 megapársecs. Créditos: X-ray: NASA/CXC/SAO; optical: Rolf Olsen; infrared: NASA/JPL-Caltech; radio: NRAO/AUI/NSF/Univ.Hertfordshire/M.Hardcastle.

Rigidez umbral

- ▶ Está dada por la ecuación:

$$R = \frac{pc}{Ze},$$

donde **p** es el momento de la partícula, **c** es la velocidad de la luz, **Z** número de carga iónica y **e** la carga elemental.

- ▶ Centro de México: $R_c \sim 8.3 \text{ GV}$.

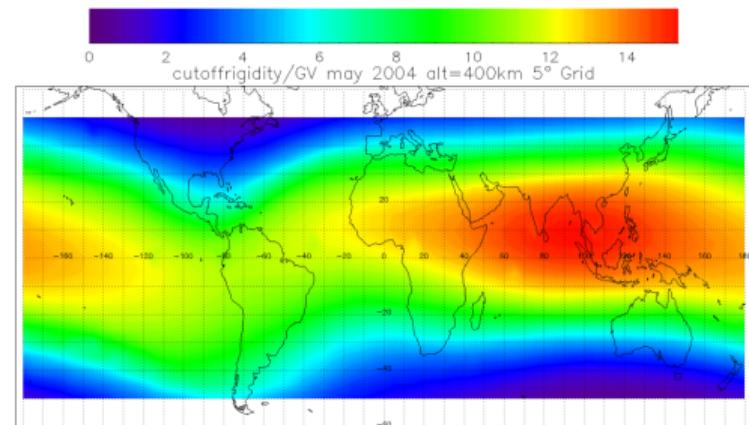


Figura: Mapa de la rigidez umbral de la Tierra [Labrenz 2014].

Cascada de partículas

► Componentes:

- Electromagnética.
- Muónica.
- Hadrónica.

► Reacciones de decaimiento:

- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
- $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$

► Vida media π^0 : $\sim 10^{-16}$ s.

► Vida media de los piones (π^+ y π^-): ~ 26 ns.

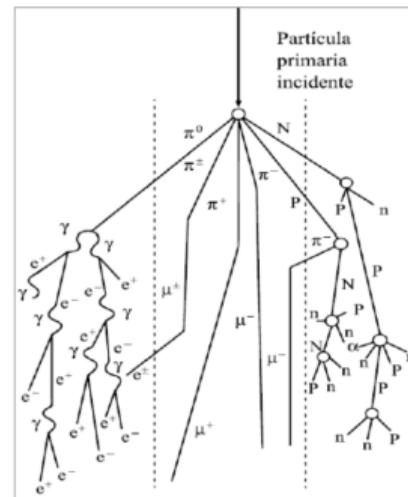


Figura: Esquema de las componentes de un chubasco de partículas [Otaola y Valdez-Galicia 1992].

Observatorios de Rayos Cósmicos en Sierra Negra

- ▶ **HAWC (High Altitude Water Cherenkov)**



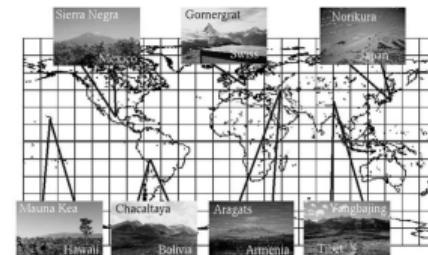
- ▶ **Telescopio de Centelleo de Rayos Cósmicos (SciCRT)**



- ▶ **Mini Monitor de Neutrinos portátil (MNM)**



- ▶ **Telescopio de Neutrinos Solares (TNS)**



Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

Objetivos

Determinar cómo cambia el flujo de protones y neutrones secundarios producidos por rayos cósmicos, desde la cima del volcán Sierra Negra hasta el nivel del mar, en el puerto de Veracruz, mediante simulaciones con **CORSIKA**.

- ▶ **Objetivo particular 1:** Comparar el flujo de partículas secundarias con el flujo obtenido con el Mini Monitor de Neutrones portátil.
- ▶ **Objetivo particular 2:** Obtener el espectro de partículas secundarias a nivel de Sierra Negra.

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

Metodología

Ubicación geográfica de los puntos de observación:

- ▶ Estudio in situ realizado por Lara, Borgazzi y Caballero-Lopez 2016.
- ▶ Mediciones realizadas con el MNM portátil.
- ▶ 41 puntos de observación.
- ▶ Altitud más baja: 7 m.s.n.m.
- ▶ Altitud más alta: 4582.5 m.s.n.m.

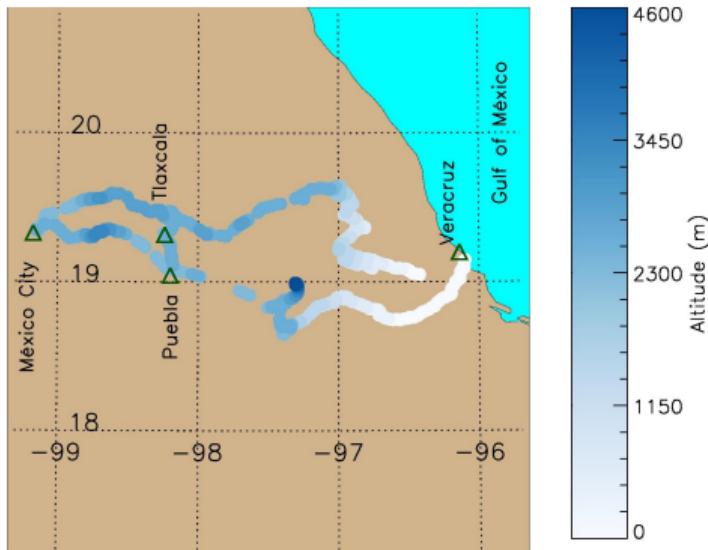
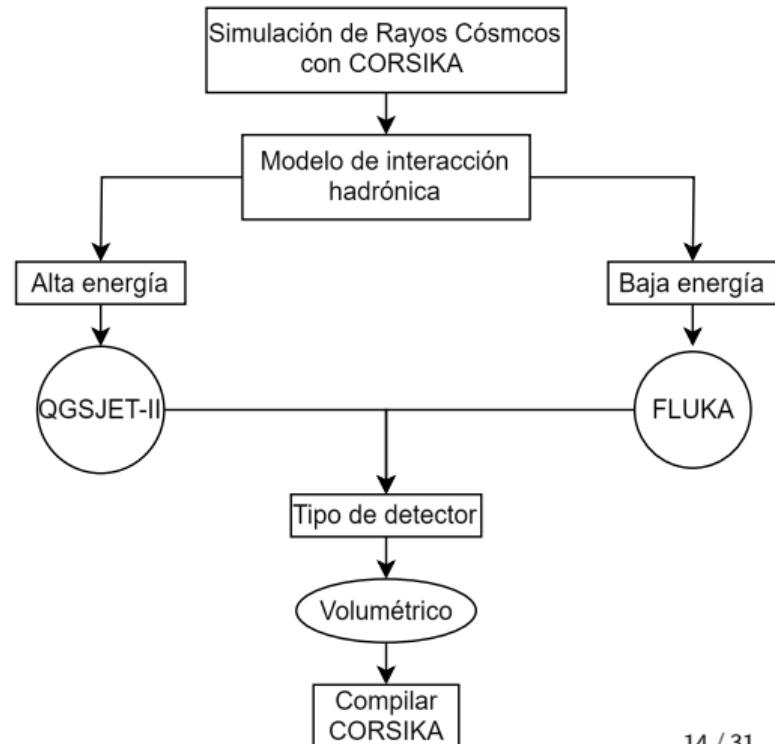


Figura: Mapa con los puntos donde [Lara, Borgazzi y Caballero-Lopez 2016] realizaron mediciones con su detector a diferentes altitudes. El color en los puntos va relacionado a la altitud. Los triángulos corresponden a las ciudades más pobladas.

CORSIKA:

- ▶ Simulación de chubascos de partículas.
- ▶ Escrito en el lenguaje de **FORTRAN**.
- ▶ Modelo de interacción hadrónica para alta energía:
 - **QGSJET-II**.
- ▶ Modelo de interacción hadrónica para baja energía:
 - **FLUKA**.



FLUKA:

- ▶ Paquete de rutinas que usa el método *Monte Carlo*.
- ▶ Permite hacer un análisis del comportamiento de las partículas en la materia.
- ▶ Se instala de manera independiente y luego se liga a *CORSIKA*.

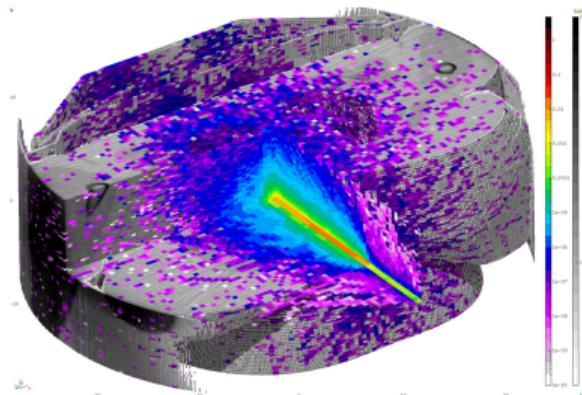
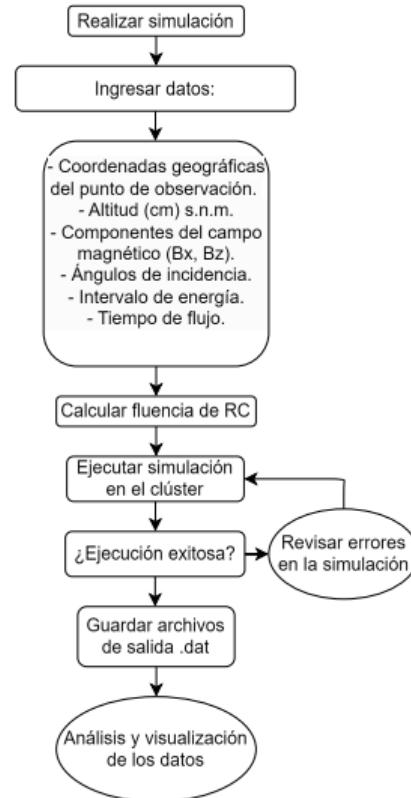


Figura: Visualización de un haz de partículas atravesando un material, realizado con FLUKA.

Procesamiento de datos y simulaciones:

- ▶ Uso del clúster **LARCAD** (Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño).
- ▶ Simulación de millones de cascadas de partículas.
- ▶ Espacio de almacenamiento para guardar los resultados de cada simulación.
- ▶ Automatizar procesos mediante scripts para ejecutar CORSIKA en el clúster.



Cálculo de la fluencia:

- ▶ Rígidez $R_c(\text{Lat}, \text{Long}, \text{Alt}, t, \theta, \phi)$.
- ▶ Donde: $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$; $\phi \in [0^\circ, 360^\circ]$.
- ▶ Rango de energía para los rayos cósmicos primarios:
 $5 \times 10^9 \text{ eV}$ hasta 10^{15} eV .
- ▶ En cada punto de observación se simuló un tiempo,
 $t = 1$ hr de flujo.
- ▶ Se requirió **simular** ~ 450 millones de cascadas para 41 puntos de observación.

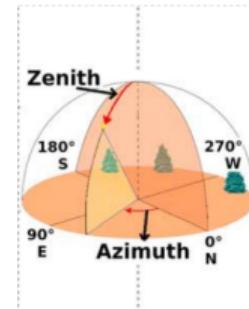


Figura: Definición geométrica de los ángulos **zenital** (θ) y **azimutal** (ϕ) [Asorey, Núñez y Suárez-Durán 2018].

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

Resultados/Discusión

Espectro de partículas a 7 m.s.n.m.

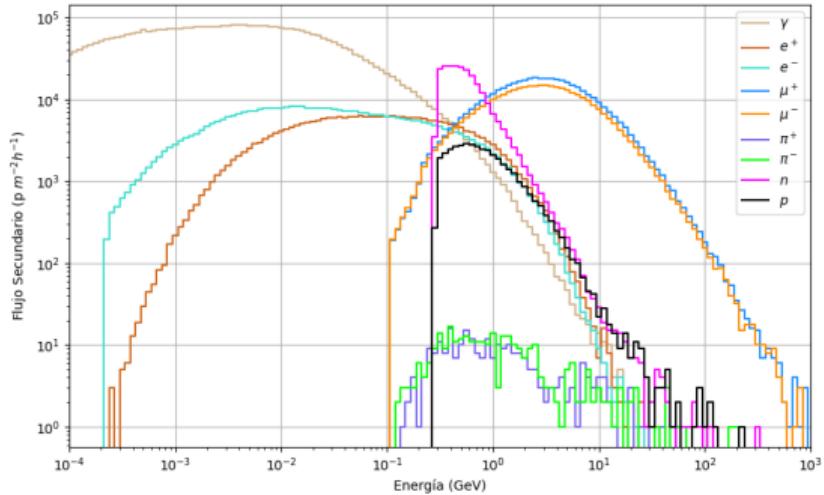


Figura: Espectro de partículas secundarias obtenido a una altura de 7 m s.n.m. Los colores corresponden a las diferentes partículas secundarias que lograron llegar al nivel de observación.

Espectro de partículas a 4582.5 m.s.n.m.

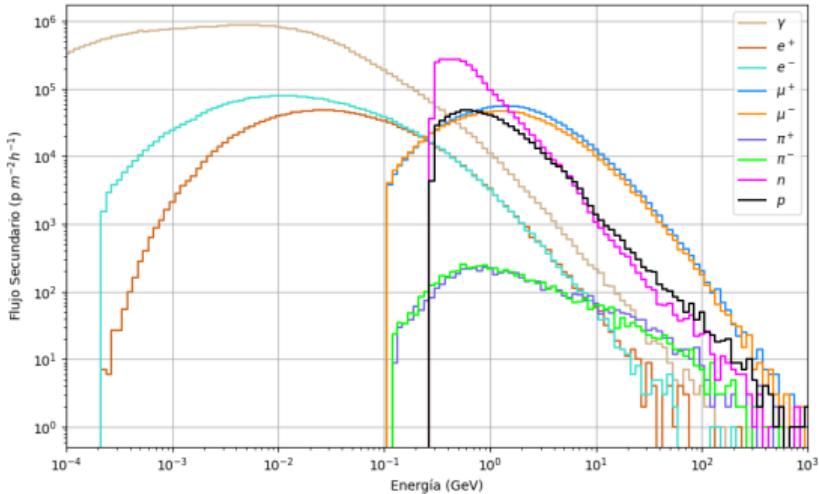


Figura: Espectro de partículas secundarias obtenido a una altura de 4582.5 m s.n.m. Los colores corresponden a las diferentes partículas secundarias que lograron llegar al nivel de observación.

Flujo de neutrones con EXPACS

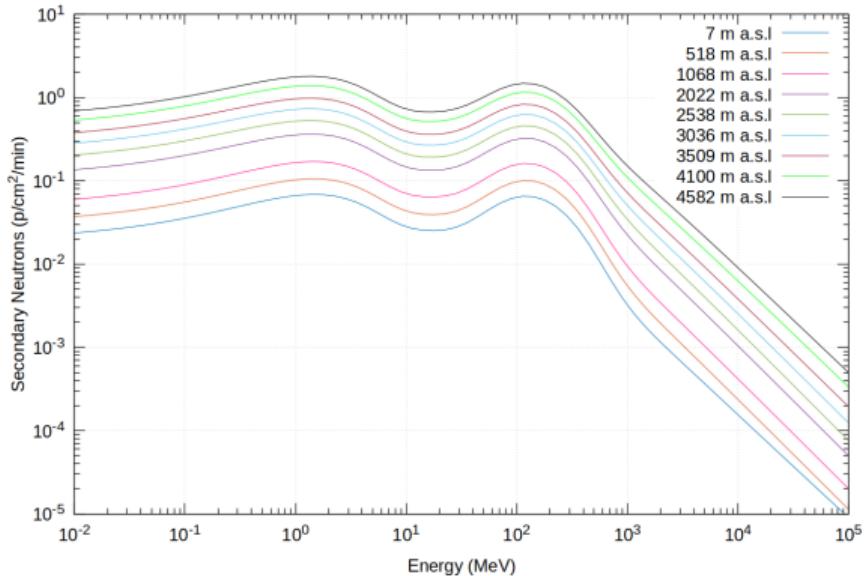


Figura: Espectro de neutrones a diferentes alturas utilizando EXPACS [Sedrati y Bouchachi 2022].

Flujo de protones y neutrones vs altura

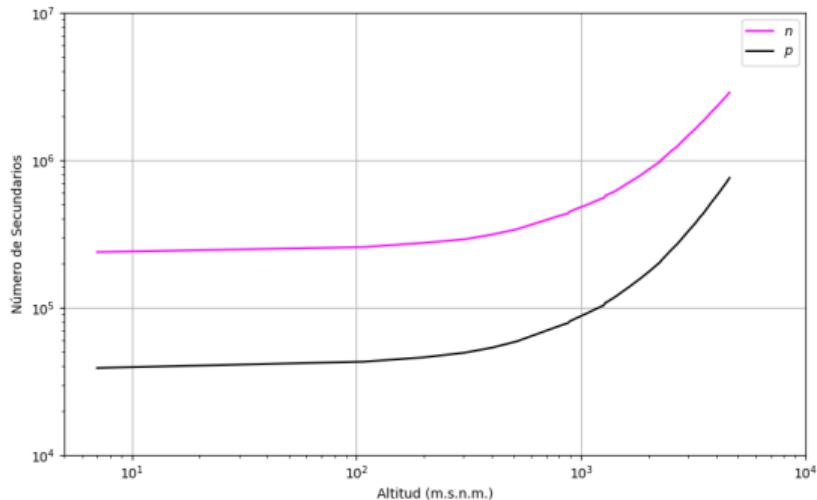


Figura: Flujo total de protones (negro) y neutrones (rosa) desde nivel del mar hasta cima del volcán Sierra Negra (4582.5 m s.n.m.) obtenido a través de las simulaciones con CORSIKA.

Número de cuentas registrado con el MMN

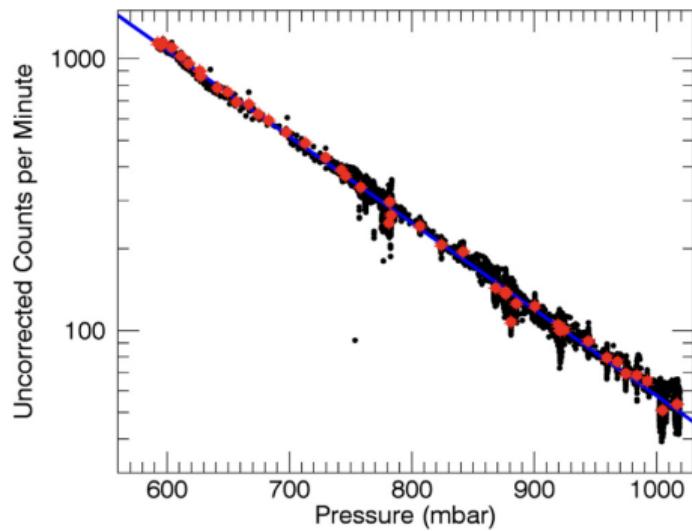


Figura: Número de cuentas por minuto en función de la presión observada registrada por el MMN. Estudio realizado por Lara, Borgazzi y Caballero-Lopez 2016.

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

Conclusiones

- ▶ Se **obtuvo** el espectro de partículas secundarias a nivel de *Sierra Negra* y a nivel del mar, en el *Puerto de Veracruz*.
- ▶ En *Sierra Negra* se produjeron más partículas, en **un orden de magnitud mayor** que en el *Puerto de Veracruz*.
- ▶ Los resultados mostraron que el flujo de partículas se va **incrementando** a medida que la altitud es mayor, lo que coincide con lo **observado por el MMN**.
- ▶ El **flujo** de protones y neutrones se **incrementa** a medida que la altura es mayor.

- ▶ La principal **fuente de ruido** para los detectores en *Sierra Negra* son los **positrones** y **electrones**, ya que se producen en una cantidad muy parecida a la de los **muones**.
- ▶ Observamos que CORSIKA tiene **limitaciones** para seguir partículas con energías **< 300 MeV**.
- ▶ Para estudiar partículas con bajas energías **< 300 MeV** se puede hacer uso de **EXPACS**.

Contenido

1 Introducción

2 Objetivos

3 Metodología

4 Resultados/Discusión

5 Conclusiones

6 Referencias

Referencias

-  Asorey, Hernan, Luis A Núñez y Mauricio Suárez-Durán (2018). "Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain". En: *Space Weather* 16.5, págs. 461-475.
-  Labrenz, Johannes (2014). "Radiation field in low Earth orbit: measurements from MATROSHKA DOSTEL onboard ISS". Tesis doct.
-  Lara, A, A Borgazzi y R Caballero-Lopez (2016). "Altitude survey of the galactic cosmic ray flux with a Mini Neutron Monitor". En: *Advances in Space Research* 58.7, págs. 1441-1451.
-  Otaola, Javier A y José F Valdez-Galicia (1992). *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de Cultura Económica.
-  Sedrati, Rafik y Dallel Bouchachi (2022). "Calculation of the atmospheric cosmic ray flux and dosimetry with EXPACS code". En: *Journal of the Korean Physical Society* 80.9, págs. 940-947.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

*"At times, I will sing you these sad songs.
On the edge, we will beat the rhythm together on the drum.
There, beyond the fog, is the very world I saw in my childhood."*



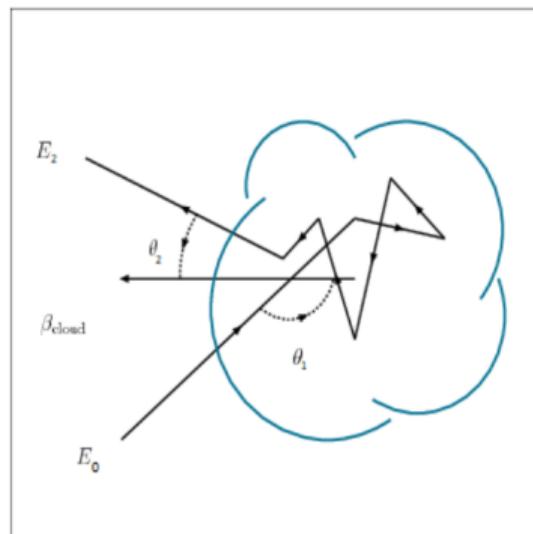
Mecanismos de aceleración

Mecanismo de Fermi de segundo orden:

- ▶ Nubes de plasma en movimiento.
- ▶ Puede acelerar partículas mediante la transferencia de energía cinética.
- ▶ La energía se expresa como:

$$E_n = E_0 \left(1 + \frac{4}{3} \beta^2 \right)^n$$

- ▶ $\beta = v/c$.



Mecanismo de Fermi de primer orden:

- ▶ Frentes de choque (e.g. supernovas).
- ▶ La energía se expresa como:

$$E_n = E_0 \left(1 + \frac{4}{3} \beta \right)^n$$

- ▶ Es el mecanismo más eficiente.
- ▶ Reproduce una ley de potencia con $\alpha \simeq 2$.

