

# De las galaxias a la profundidad de las montañas: historia de una penetración cósmica

---

Prof. José Antonio López Rodríguez  
Escuela de Física, Facultad de Ciencias, UCV

[jose.lopez@ucv.ve](mailto:jose.lopez@ucv.ve)



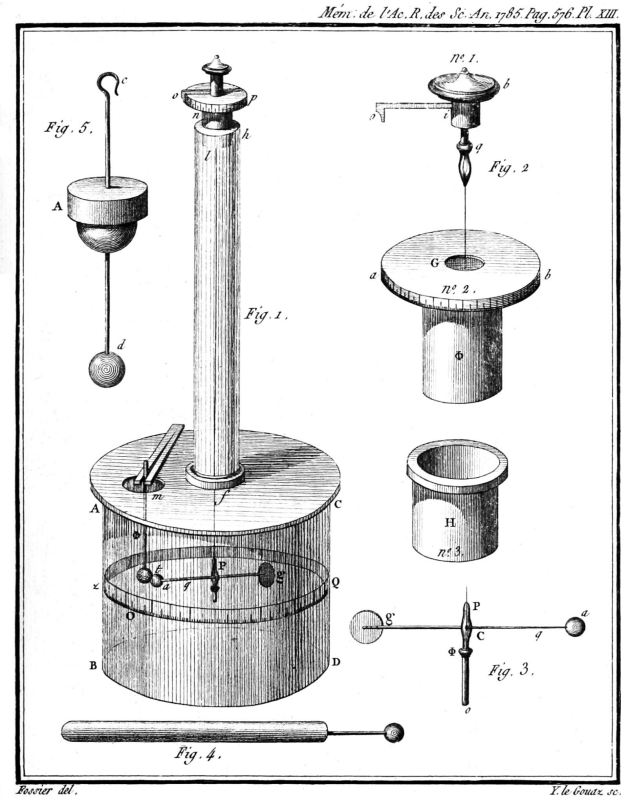
Primer acto:

Un fenómeno trivial, pero no explicado

---

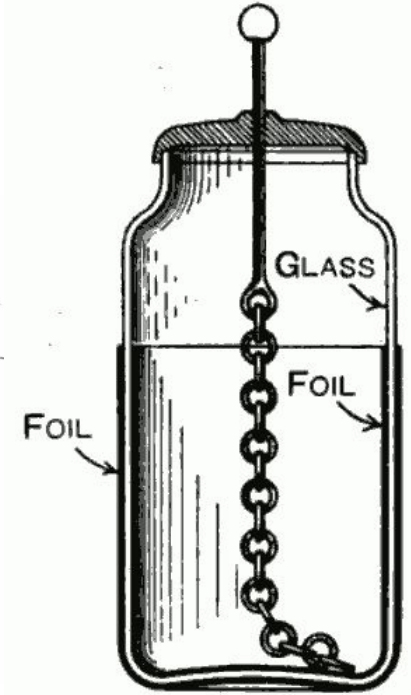
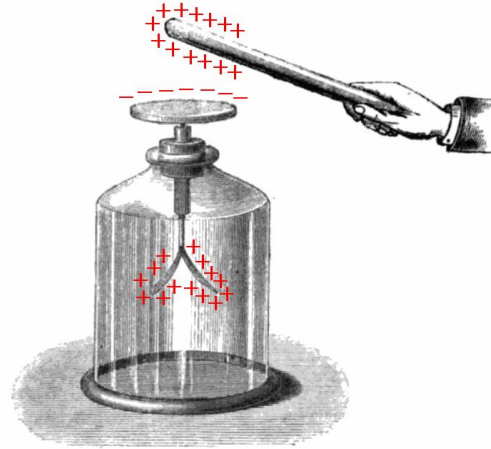
# El conocimiento de un momento único

- Era el siglo XIX
- Las balanzas de torsión son el aparato de medición más sensible de la historia.
- Se usaron para medir la fuerza de gravedad y la intensidad de la interacción entre objetos cargados.

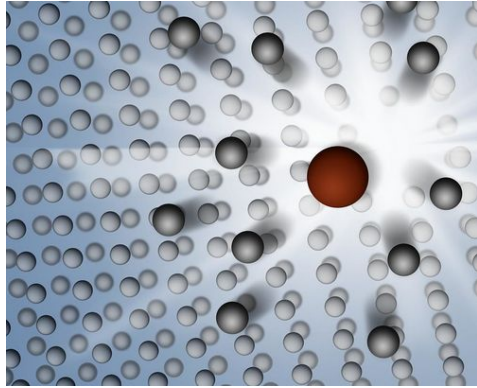


# El conocimiento de un momento único

- Los aparatos de la época:
  - La botella de Leyden
  - El electroscope
- Almacenar y medir la cantidad de carga eléctrica



# El problema

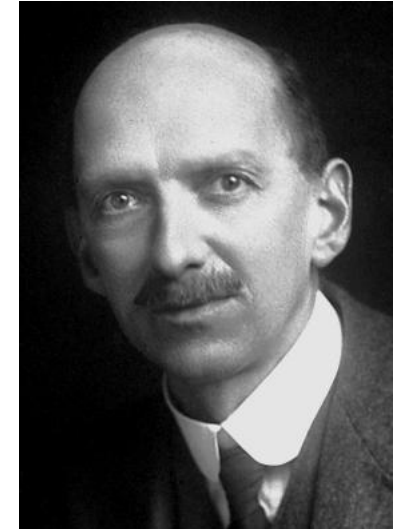
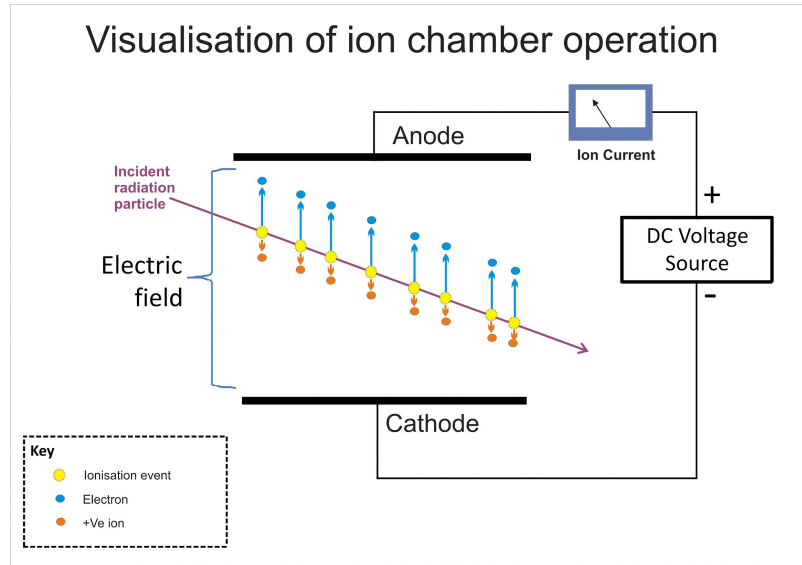


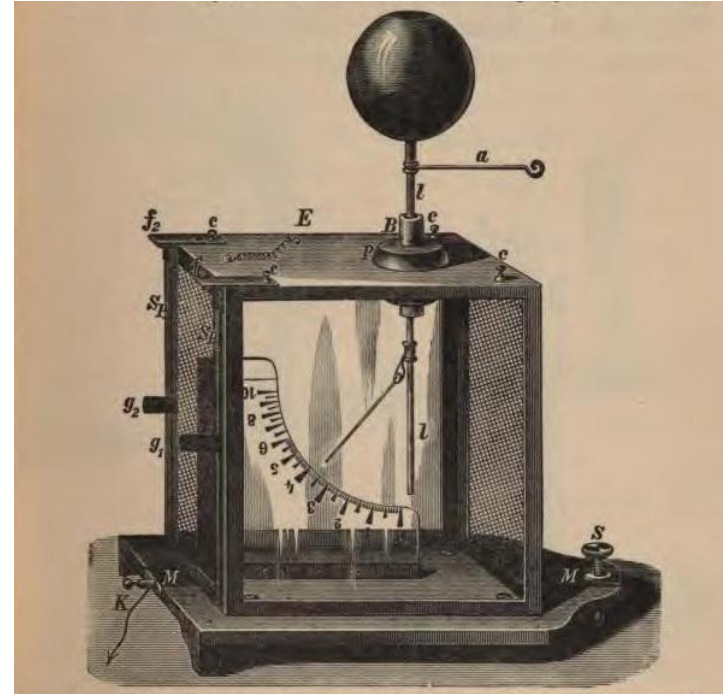
El choque con las moléculas del aire es sospechosa, pero no es suficiente

- Balanzas de torsión
- Botellas
- Se descargan de manera espontánea (ok)
- Definitivamente más pronto de lo esperado.  
¿Por qué?

# Llega el siglo XX

- Charles Wilson
  - Cámara de ionización





# Llega el siglo XX

- Resulta evidente
  - La radiación ionizante descarga los equipos.
- La descarga se manifiesta en ausencia de fuentes radiactivas
  - Hay un efecto independiente de las condiciones del aire
  - Incluso en condición de vacío





# Llega el siglo XX

- Es elemental:
  - Hay una radiación de origen desconocido (hasta ese momento)
- ¿De dónde proviene?
  - Elementos radiactivos en la tierra.
  - ¿El cielo? ¿Será el Sol?



Hay que hacer pruebas:

- En el día
- En la noche
- En un eclipse
- Bajo el agua
- **En lo alto de la torre Eiffel**

# Llega el héroe de la película

- Año 1912
  - Victor Hess
- Ascensos en globo a grandes altitudes
  - $\sim 5000$  m s.n.m.
  - Día vs noche
  - Eclipse



# Llega el héroe de la película



- Ascensos en globo a grandes altitudes
  - $\sim 5000$  m s.n.m.:
    - El origen es externo a la Tierra. Del cielo.
  - Día vs noche, Eclipse:
    - El origen no es solar

“Los resultados de las presentes observaciones aparentan ser fácilmente explicados asumiendo que una radiación con un poder penetrante muy alto entra a nuestra atmósfera desde arriba y aún así produce en las capas más bajas una parte de la ionización que se observa en las cámaras cerradas”.

# Llega el héroe de la película

- Victor Hess descubre los Rayos Cósmicos.
- Victor Hess es el papá de los helados.



Segundo acto:  
Conociendo los Rayos Cósmicos

---

# Tipos de radiación ionizante

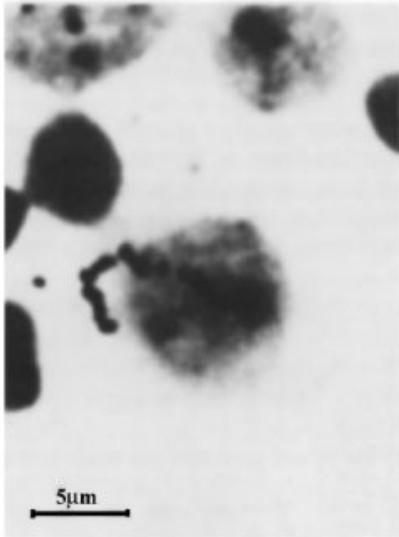
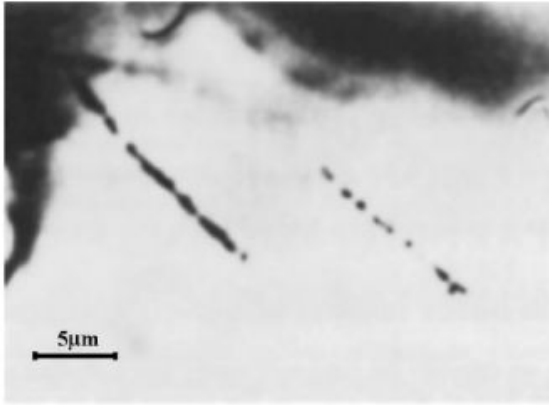
Procesos directos e indirectos

## Radiación directamente ionizante

- Partículas cargadas
- Mueven electrones debido a la interacción electromagnética

## Radiación indirectamente ionizante

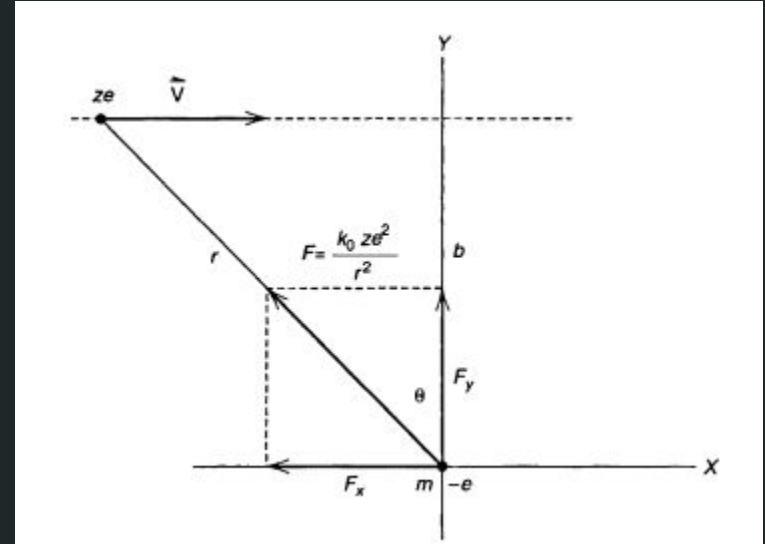
- Partículas sin carga
    - Fotones
    - Neutrones
-

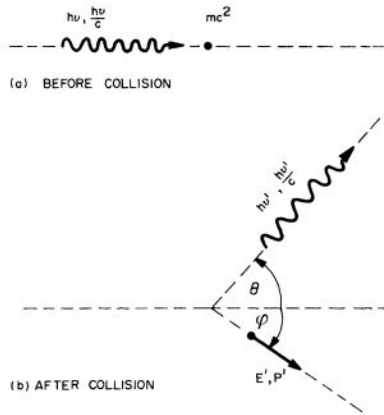


Factores a considerar:

- Energía
- Velocidad\*
- Z
- **Masa:**
  - Electrones.
  - Todas las demás.

## Las partículas cargadas empujan

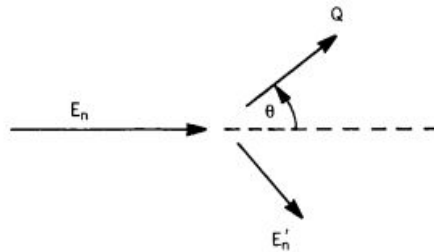




Factores a considerar en fotones:

- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Creación de pares

Las partículas sin carga actúan a dos pasos



Factores a considerar en neutrones:

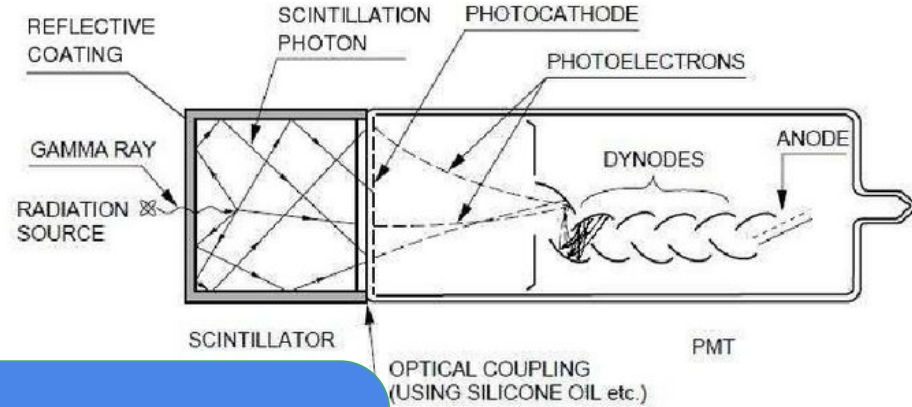
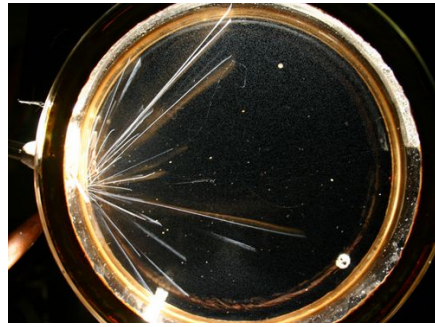
- La interacción debe ser nuclear
- Con un protón



# Midiendo la radiación ionizante

Varias técnicas

1. Cámara de ionización
2. Cámara de niebla
3. Centelladores
4. Fotomultiplicadores



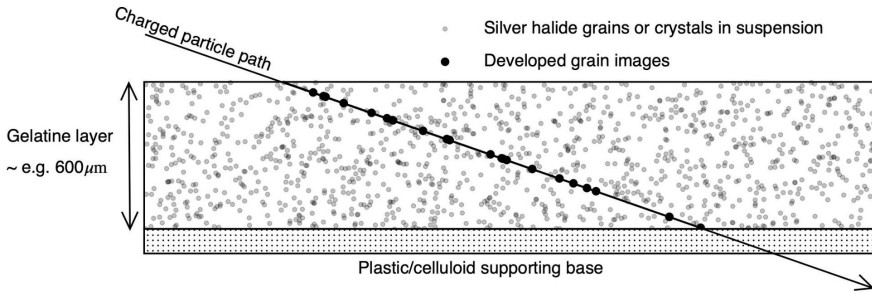
Factores clave:

- Espectro de energía
- Es el DNA
- Indicios de los procesos que originan la radiación
- Predictor del efecto

# Midiendo la radiación ionizante

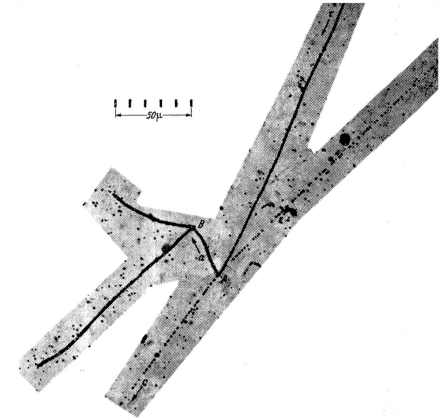
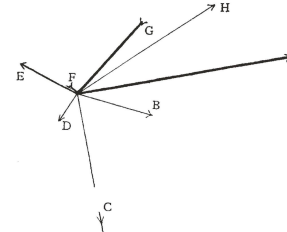
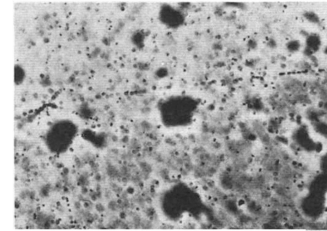
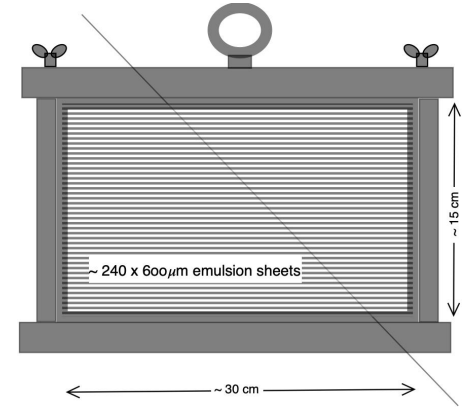
Varias técnicas

## 1. Emulsión nuclear

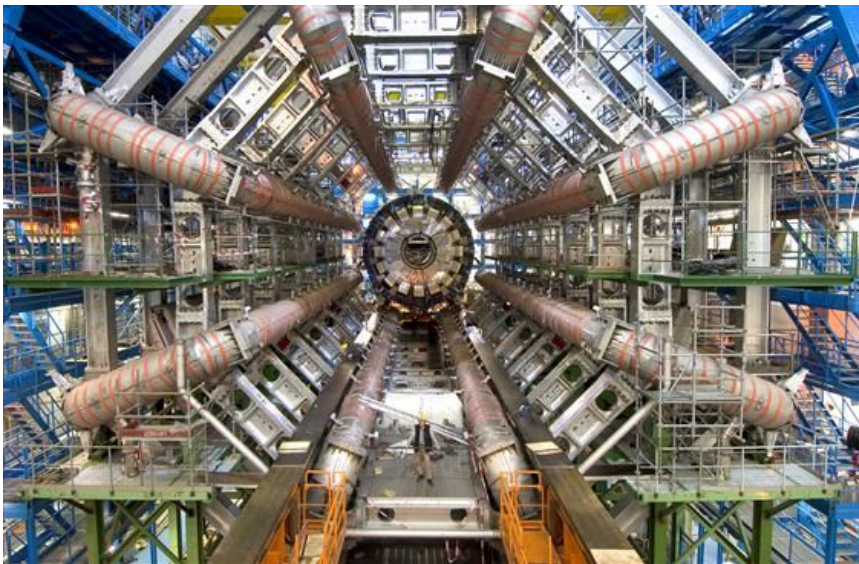


Factores clave:

- Es muy precisa
- Períodos de medición más prolongados
- Importante en el estudio de RC



# Es tan complicado como uno quiera



## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS  
Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 1\text{m}^2$   $\sim 66\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2$   $\sim 9.6\text{M}$  channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID  
Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

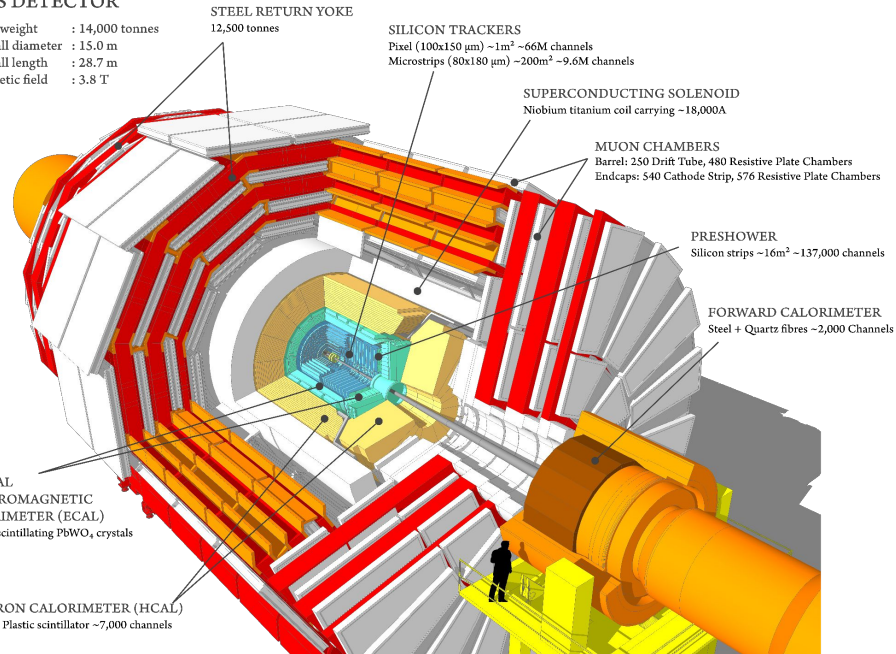
MUON CHAMBERS  
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 540 Cathode Strip, 576 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER  
Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2$   $\sim 137,000$  channels

FORWARD CALORIMETER  
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

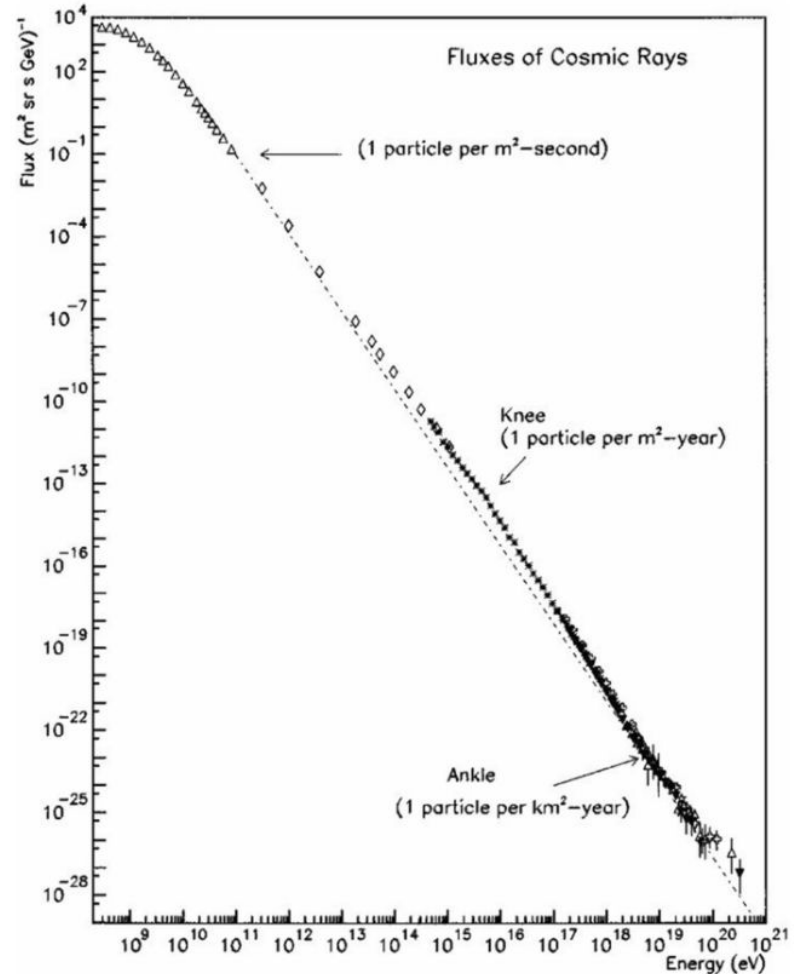
CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)  
 $\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)  
Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels



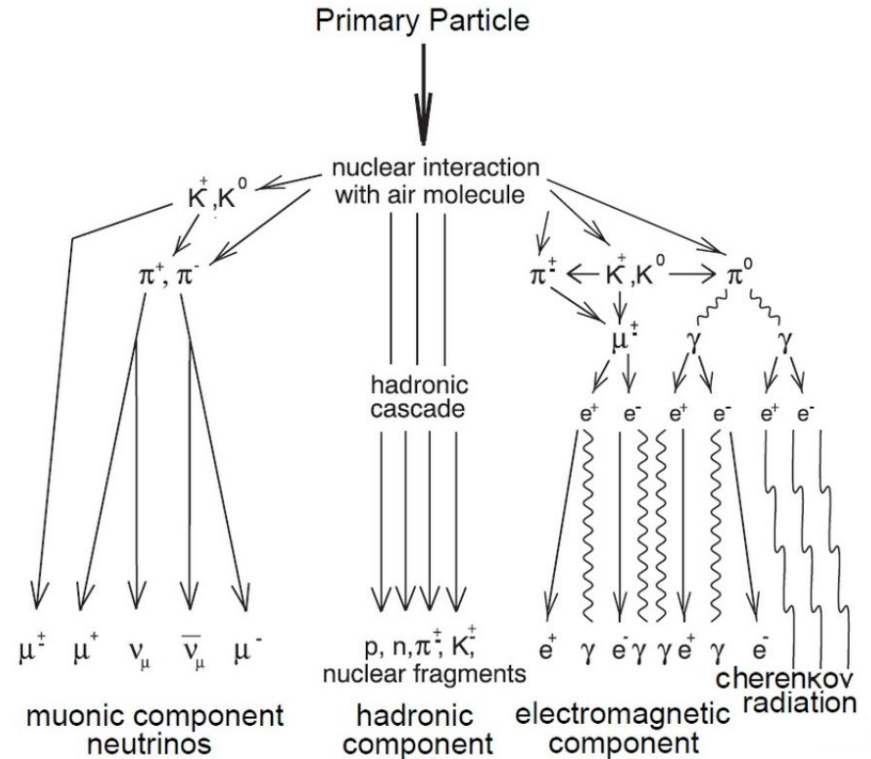
# A perseguir rayos cósmicos

1. Más observaciones en globos
2. Satelites
3. Observatorios de gran altitud
4. Son núcleos de elementos de la tabla periódica, hasta el hierro.
5. Predominan los más ligeros



# A perseguir rayos cósmicos

1. Lo que vemos en Tierra se denominan secundarios
2. Los secundarios ayudan a completar el estudio de la componente de mayor energía (muy escasa): observatorios terrestres



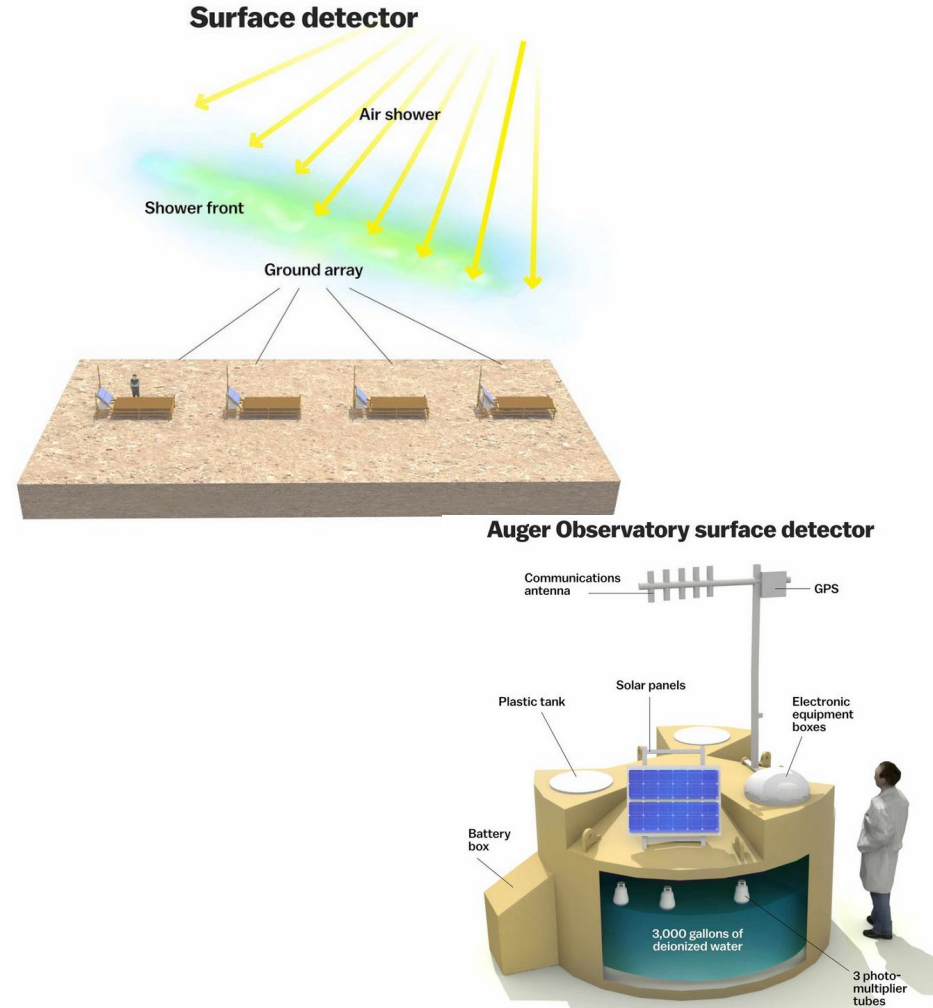


# Detección terrestre

Estaciones separadas reciben secundarios.

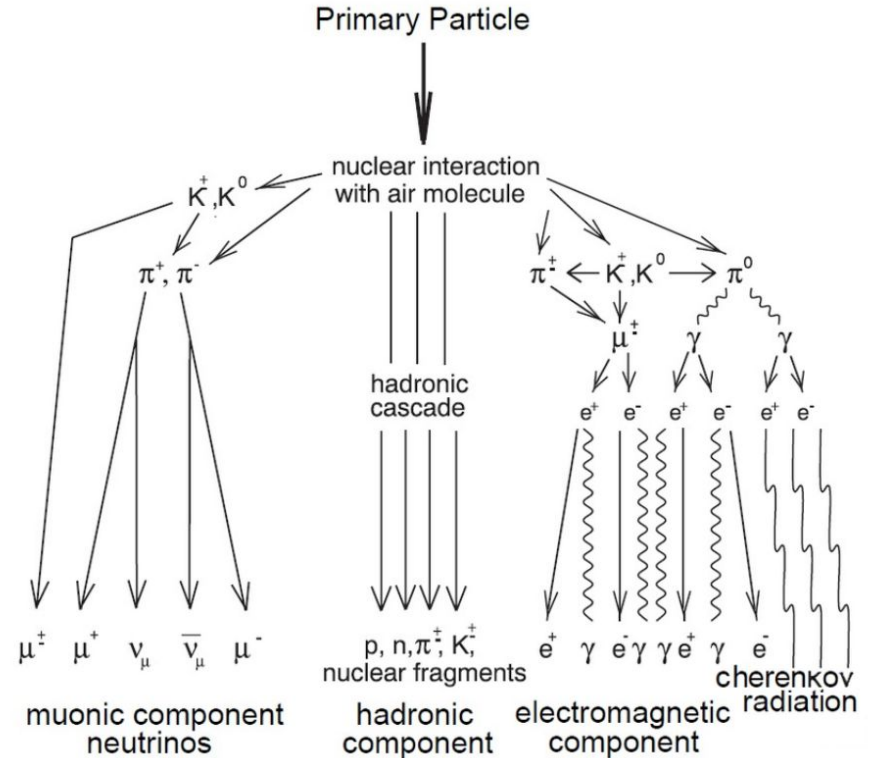
El procesamiento permite discriminar conjuntos de secundarios con un origen común.

El arreglo funciona como un telescopio



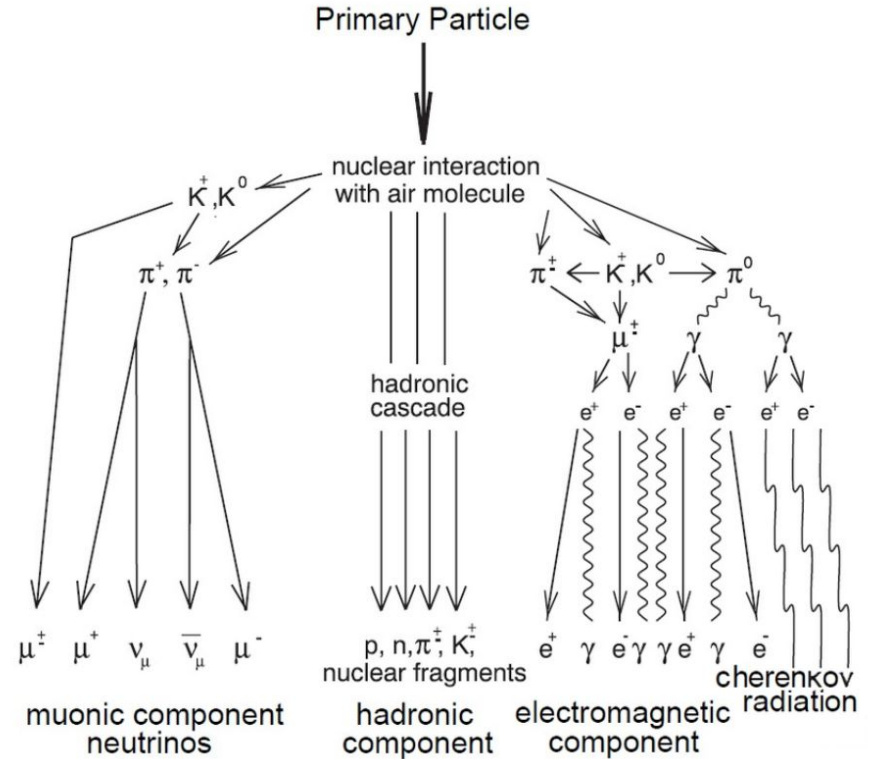
# La composición de la cascada

1. Los primeros procesos son nucleares  
Producen especies inestables.
2. Una vía produce fragmentos nucleares (componente hadrónica).
3. Otra vía produce la cascada electromagnética.
4. La tercera produce la componente muónica.



# La composición de la cascada

1. Las partículas hijas de un precursor de gran energía pueden mantener suficiente “herencia” para producir nuevos secundarios.
2. Genera esta cascada.
3. Comienza más hadrónica, termina más electromagnética.
4. El máximo de partículas  $\sim 10$  km s.n.m.



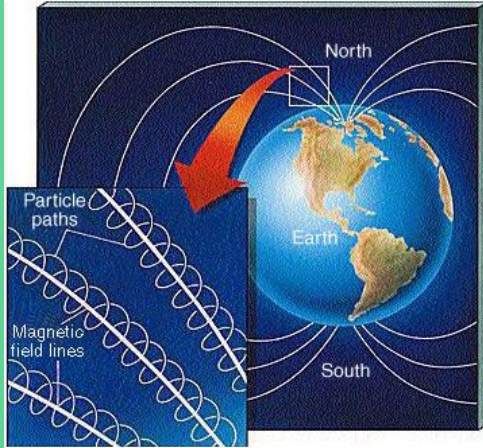
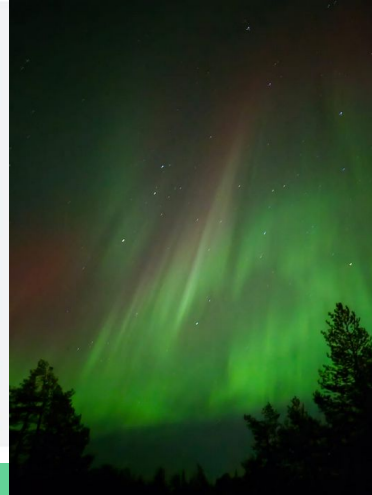
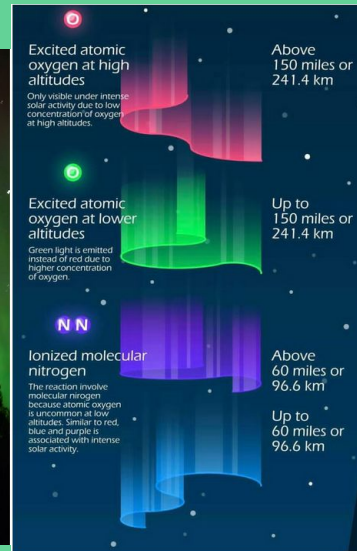
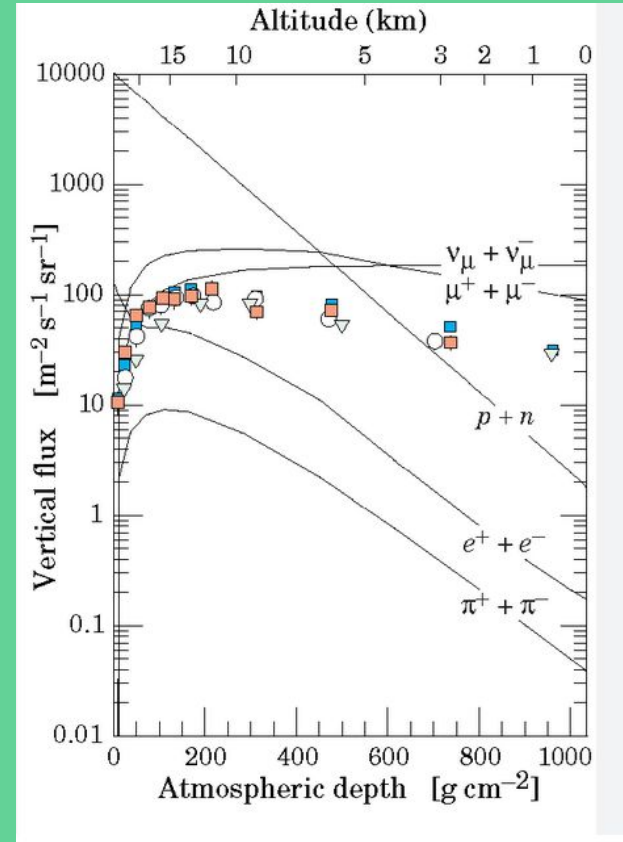


Tercer acto:

Los modificadores y los efectos

---

# Pero todo esto es radiación ...



# Es parte de nuestra vida

Es parte importante de la mayor contribución a la dosis de radiación de un ser humano

| Source                                | Annual Effective Dose (mSv) | Typical Range (mSv)                                      |
|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|
| Natural Background                    |                             |                                                          |
| External                              |                             |                                                          |
| Cosmic rays                           | 0.4                         | 0.3–1.0                                                  |
| Terrestrial gamma rays                | 0.5                         | 0.3–0.6                                                  |
| Internal                              |                             |                                                          |
| Inhalation (principally radon)        | 1.2                         | 0.2–10.                                                  |
| Ingestion                             | <u>0.3</u>                  | 0.2–0.8                                                  |
| Total                                 | 2.4                         | 1–10                                                     |
| Medical (primarily diagnostic X rays) | 0.4                         | 0.04–1.0                                                 |
| Man-Made Environmental                |                             |                                                          |
| Atmospheric nuclear-weapons tests     | 0.005                       | Peak was 0.15 in 1963.                                   |
| Chernobyl accident                    | 0.002                       | Highest average was 0.04 in northern hemisphere in 1986. |
| Nuclear power production              | 0.0002                      | See paragraph 34 in Report for basis of estimate.        |

\* Based on UNSCEAR 2000 Report.

# Riesgos a la tripulación de aeronaves

Altura típica de vuelo está en la zona de máximo desarrollo del poder ionizante de los secundarios.

ICRP: Tripulación de aeronaves es POE.

Hay evidencia que respalda.



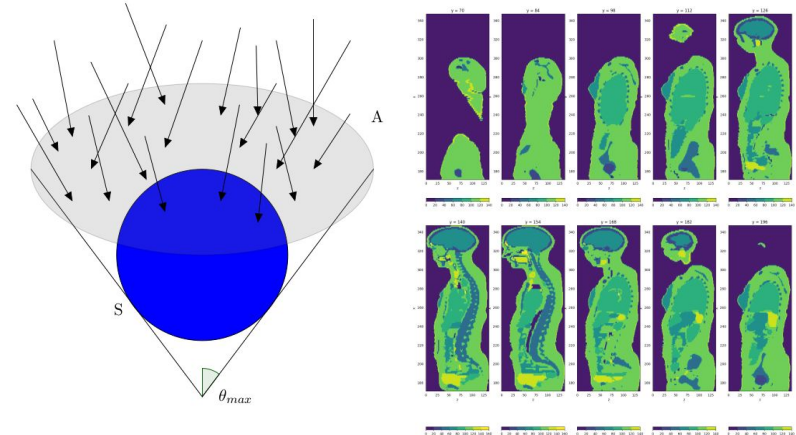
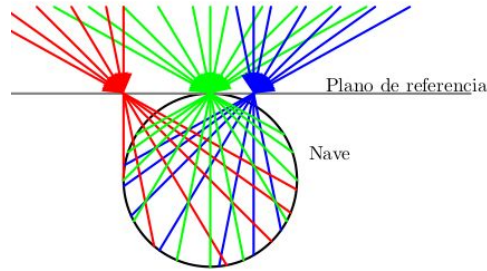
# Estimación de riesgo

Es una aplicación importante de conocimiento de la física relacionada.

HPC



<https://gitlab.com/jalop/estimacionfactoresriesgoradioaeronaves/-/releases/1.0.0>



# Cuarto acto: Los muones exploradores

---

# Leptones

Familia de los electrones

Hay tres conocidos

No conocen la fuerza nuclear

Hay dos primos más pesados

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^+$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^+$$

$$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Three generations of matter (fermions)

|         | I                                         | II                                    | III                                  |                                 |
|---------|-------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| mass    | 2.4 MeV/c <sup>2</sup>                    | 1.27 GeV/c <sup>2</sup>               | 171.2 GeV/c <sup>2</sup>             | 0                               |
| charge  | 2/3                                       | 2/3                                   | 2/3                                  | 0                               |
| spin    | 1/2                                       | 1/2                                   | 1/2                                  | 1                               |
| name    | <b>u</b><br>up                            | <b>c</b><br>charm                     | <b>t</b><br>top                      | <b>γ</b><br>photon              |
| Quarks  | 4.8 MeV/c <sup>2</sup>                    | 104 MeV/c <sup>2</sup>                | 4.2 GeV/c <sup>2</sup>               | 0                               |
|         | -1/3                                      | -1/3                                  | -1/3                                 | 0                               |
|         | 1/2                                       | 1/2                                   | 1/2                                  | 1                               |
|         | <b>d</b><br>down                          | <b>s</b><br>strange                   | <b>b</b><br>bottom                   | <b>g</b><br>gluon               |
| Leptons | <2.2 eV/c <sup>2</sup>                    | <0.17 MeV/c <sup>2</sup>              | <15.5 MeV/c <sup>2</sup>             | 91.2 GeV/c <sup>2</sup>         |
|         | 0                                         | 0                                     | 0                                    | 0                               |
|         | 1/2                                       | 1/2                                   | 1/2                                  | 1                               |
|         | <b>ν<sub>e</sub></b><br>electron neutrino | <b>ν<sub>μ</sub></b><br>muon neutrino | <b>ν<sub>τ</sub></b><br>tau neutrino | <b>Z<sup>0</sup></b><br>Z boson |
| Leptons | 0.511 MeV/c <sup>2</sup>                  | 105.7 MeV/c <sup>2</sup>              | 1.777 GeV/c <sup>2</sup>             | 80.4 GeV/c <sup>2</sup>         |
|         | -1                                        | -1                                    | -1                                   | ±1                              |
|         | 1/2                                       | 1/2                                   | 1/2                                  | 1                               |
|         | <b>e</b><br>electron                      | <b>μ</b><br>muon                      | <b>τ</b><br>tau                      | <b>W<sup>±</sup></b><br>W boson |

Gauge bosons



# RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES TRIDIMENSIONALES A TRAVÉS DE LA MUGRAFÍA



## MUOGRAFÍA

Es una técnica de imagen no invasiva que utiliza muones generados en la atmósfera para analizar las variaciones de densidad y crear imágenes de la estructura interna de un objeto o volumen específico.



## MUON

- Es un leptón con masa ~ 207 veces mayor a la del electrón.
- Alto poder de penetración.
- Los muones atmosféricos suelen generarse a una altitud de alrededor de 10-15 Km s.n.m.



## MUOGRAFÍA POR ABSORCIÓN

- Evalúa la reducción del flujo de muones como consecuencia de su interacción con la materia.
- Emplea al menos un par de detectores.
- Se obtienen imágenes bidimensionales de la distribución de densidades del objeto.
- Se pueden reconstruir imágenes tridimensionales usando múltiples radiografías.



## MUOGRAFÍA POR DESVIACIÓN

- Se basa en la dispersión múltiple de Coulomb para calcular la densidad del objetivo en cuestión.
- Emplea un doble par de detectores.
- Se obtienen imágenes tridimensionales de la distribución de densidades del objeto.



## TÉCNICAS DE RECONSTRUCCIÓN EN 3D



### INVERSIÓN LINEAL

La inversión lineal consiste en adquirir mediciones del flujo de muones desde diferentes puntos de observación y de segmentar el espacio en unidades volumétricas conocidas como voxels.



### RETROPROYECCIÓN FILTRADA

- La retroproyección filtrada es un algoritmo analítico de reconstrucción.
- Utilizado en tomografía computarizada.
- Este filtra las proyecciones obtenidas del volumen, encuentra la reconstrucción elemental y suma cada segmento filtrado.



### PUNTO DE MÁXIMA APROXIMACIÓN

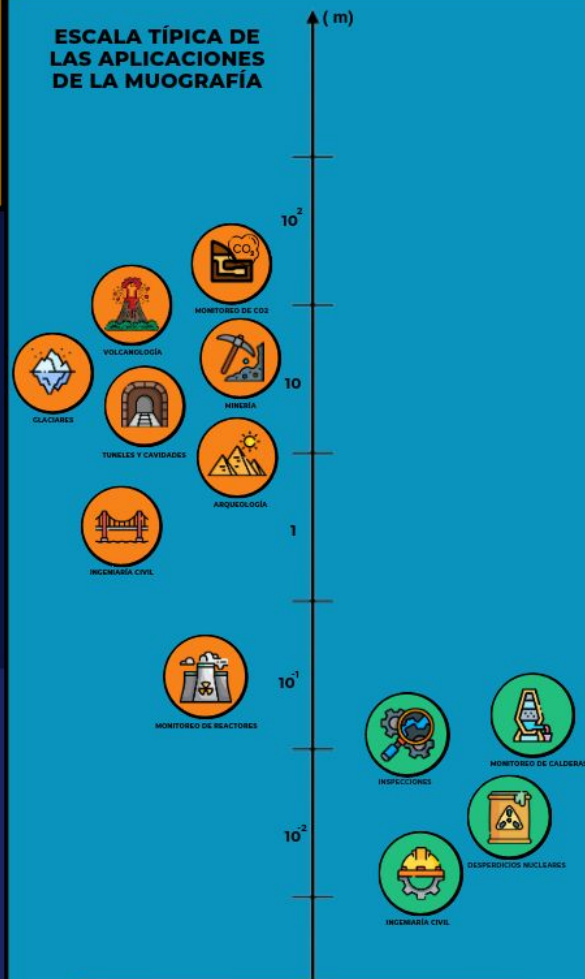
Asume que la dispersión de cada muon individualmente está concentrado en un solo punto que coincide con el Punto de Máxima Aproximación para calcular la trayectoria del muon.



### MÁXIMA EXPECTACIÓN DE LA VEROSIMILITUD

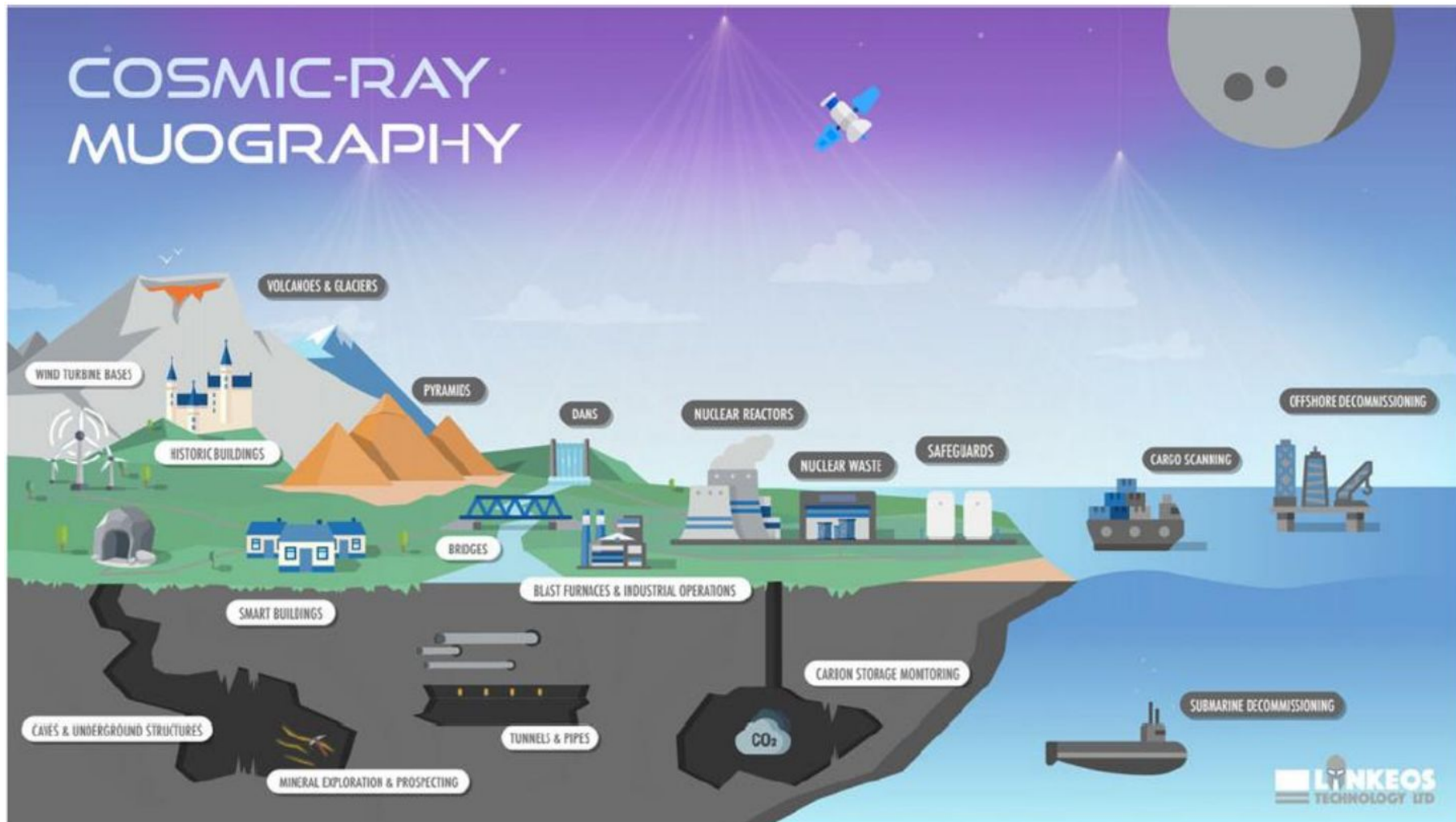
- Este método se basa en estimar la distribución tridimensional de la densidad de dispersión lineal del material dentro del volumen estudiado.
- Se enfoca en reconstruir imágenes tratando el problema como una estimación de parámetros.

## ESCALA TÍPICA DE LAS APLICACIONES DE LA MUOGRAFÍA

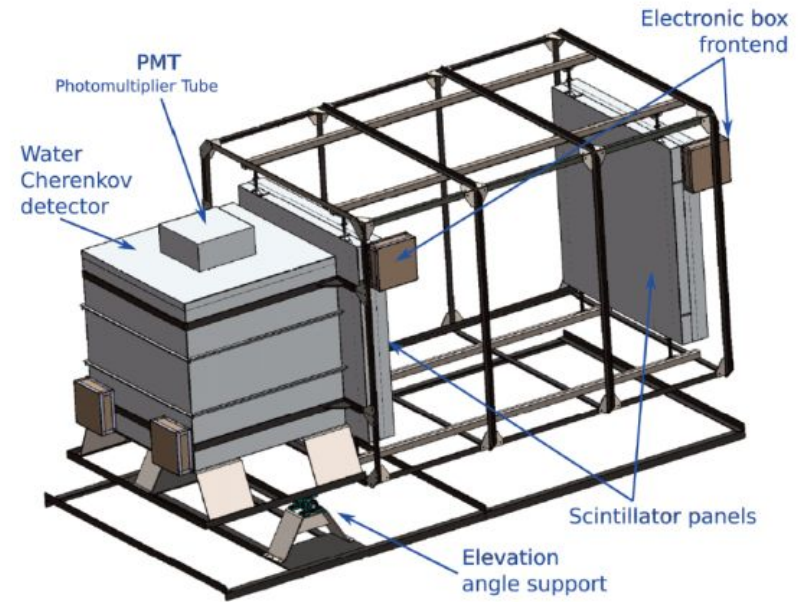
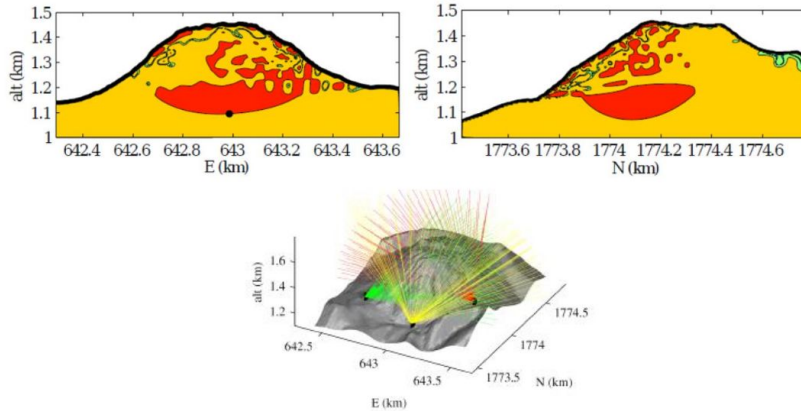




# COSMIC-RAY MUGRAPHY



# Radiografía

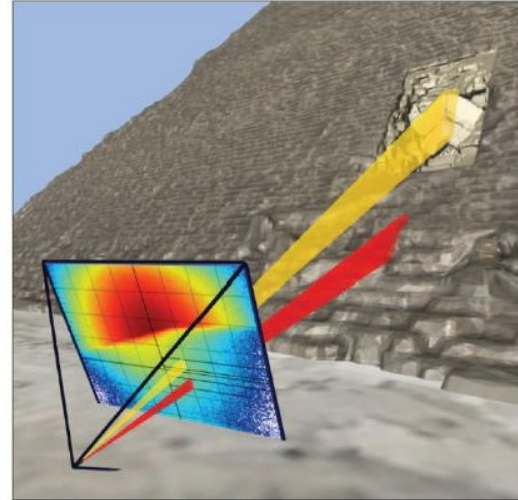


Alejandra Vesga-Ramírez, David Sierra-Porta, Jesús Peña-Rodríguez, José David Sanabria-Gómez, Martha Valencia-Otero, Christian Sarmiento-Cano, Mauricio Suárez-Durán, Hernán Asorey, and Luis A Núñez. Muon tomography sites for colombian volcanoes. arXiv preprint arXiv:1705.09884, 2017

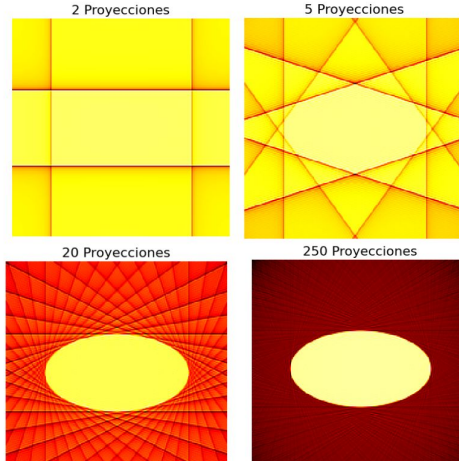
# Radiografia

Kunihiro Morishima, Mitsuaki Kuno, Akira Nishio, Nobuko Kitagawa, Yuta Manabe, Masaki Moto, Fumihiko Takasaki, Hirofumi Fujii, Kotaro Satoh, Hideyo Kodama, et al. Discovery of a big void in khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nature, 552(7685):386–390, 2017.

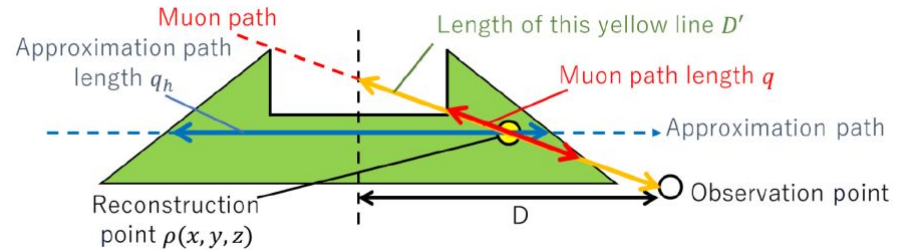
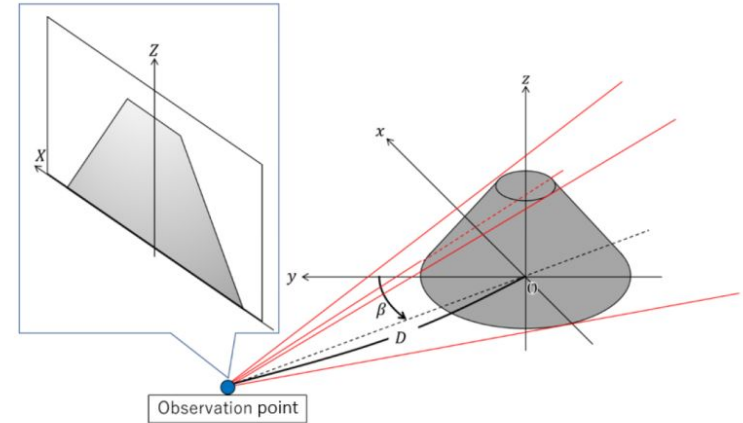
- Se compara el flujo de muones provenientes del objeto con el flujo a 'cielo abierto'



# Tomografía

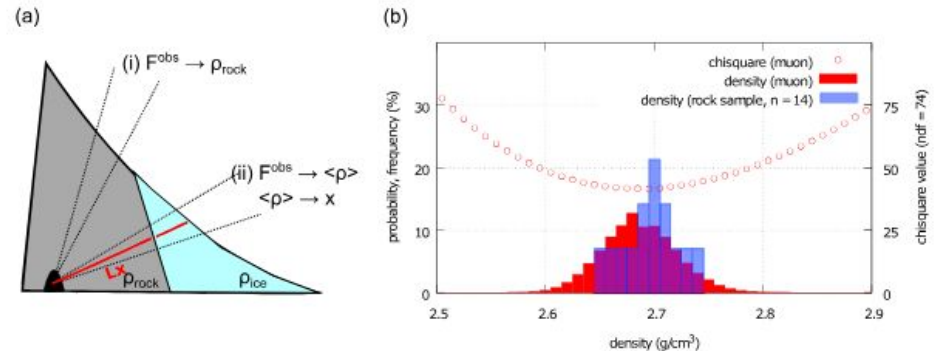
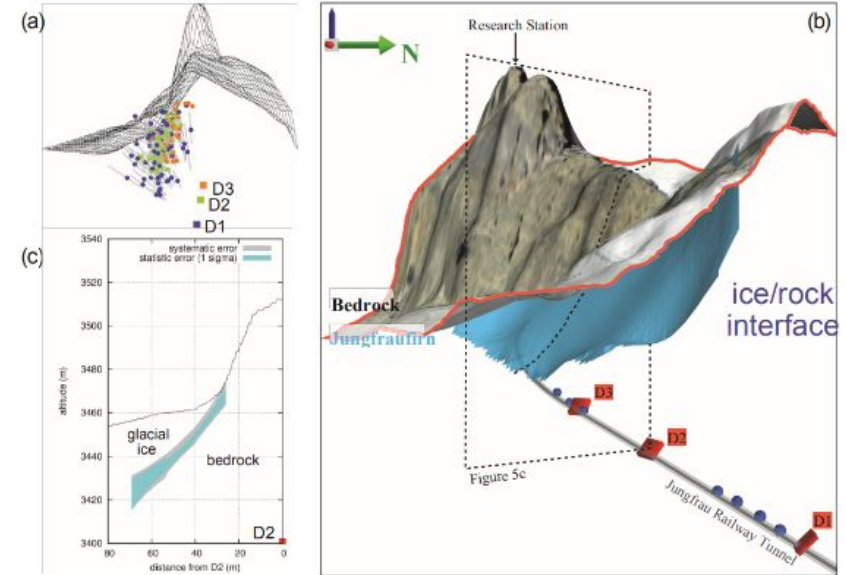


Shogo Nagahara and Seigo Miyamoto. Feasibility of three-dimensional density tomography using dozens of muon radiographies and filtered back projection for volcanos. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(4):307–316, 2018



# Volcanes, pirámides ¿y glaciares?

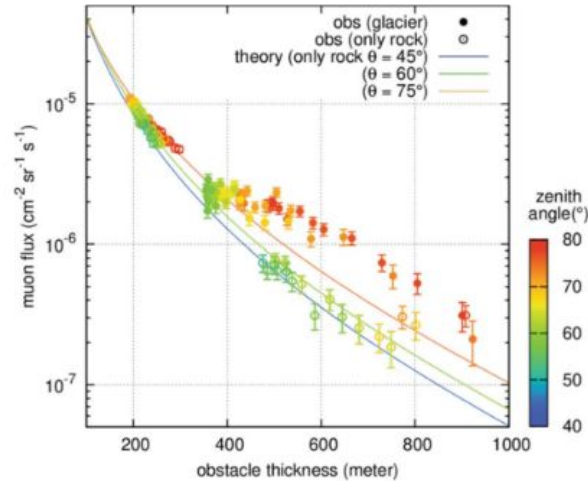
Nishiyama, Ryuichi, et al. "First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography." *Geophysical Research Letters* 44.12 (2017): 6244-6251.



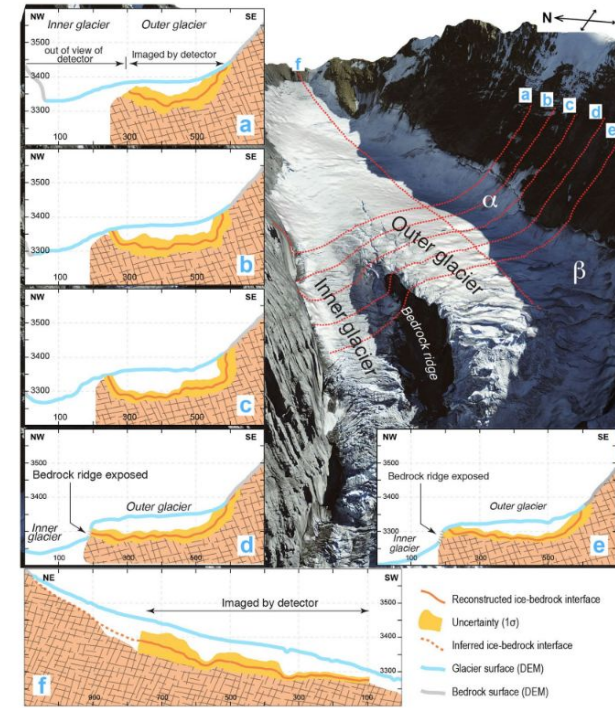


# Volcanes, pirámides

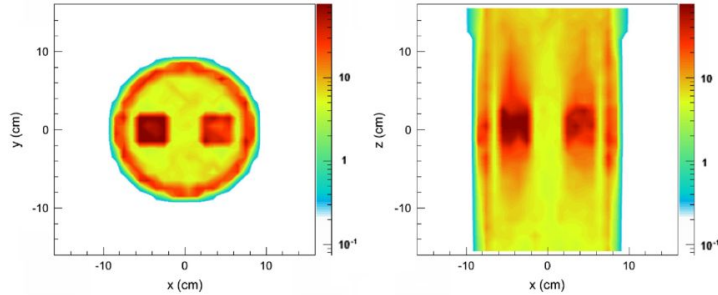
## ¿y glaciares?



Nishiyama, Ryuichi, et al. "Bedrock sculpting under an active alpine glacier revealed from cosmic-ray muon radiography." *Scientific reports* 9.1 (2019): 6970.

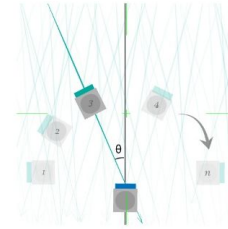


# Objetos pequeños (si la densidad es adecuada)

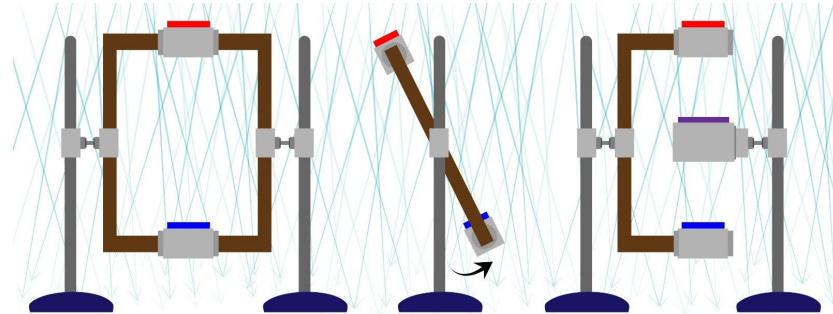


Anthony Clarkson, et al. Geant4 simulation of a scintillating-fibre tracker for the cosmic-ray muon tomography of legacy nuclear waste containers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 746:64–73, 2014.

1.- Caracterización de la distribución angular y del espectro de energía de muones.



2.- Simulación muográfica de una muestra con muones atmosféricos verticales.





Gracias por su atención

---