

# Las partículas más energéticas del Universo



Rayos cósmicos de (Ultra-)Alta Energía y el Observatorio Pierre Auger

**Sergio Pastor**  
(Instituto de Física Corpuscular)

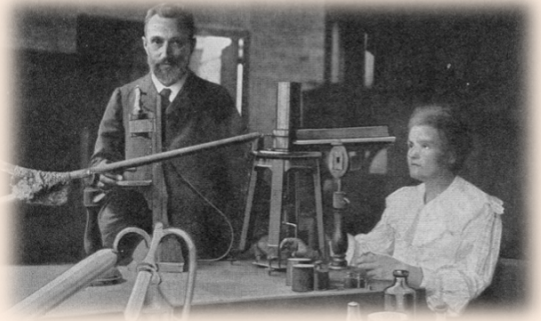


Conferencias de la Facultad de Física  
15 de Octubre de 2009



VNIVERSITAT  
ID VALÈNCIA

# La Radiación Cósmica: Breve historia



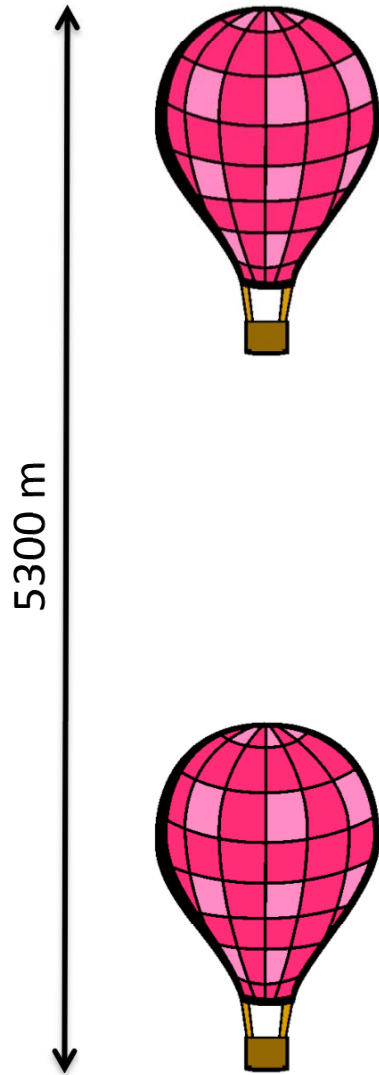
Desde 1896: descubrimiento de la **Radiactividad natural** en elementos como el uranio y el radio (**Becquerel, matrimonio Curie**). Comenzó una serie de experimentos de medida del nivel de radiación ionizante en muchos lugares.



**Victor Hess (1912):** medida de la radiación (ionización) en altura.



# La Radiación Cósmica: Breve historia



Radiación (ionización)  
unas **4 veces mayor**  
que en el suelo

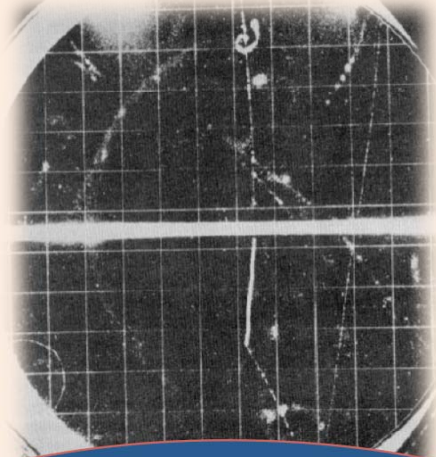
**Victor Hess** (1912) encontró que el nivel de radiación crece con la altitud, en un vuelo en globo (hasta 5300 m). Los resultados fueron confirmados por **Kohlhörster**



Descubrimiento de  
la **radiación cósmica**

# La Radiación Cósmica: Breve historia

Descubrimiento de un zoo de nuevas partículas que forman parte de los Rayos Cósmicos (RCs), gracias a la **cámara de niebla (Wilson, 1911)**:  
**positrones, muones, piones,...**



Progreso de la Física de Partículas gracias a los RCs



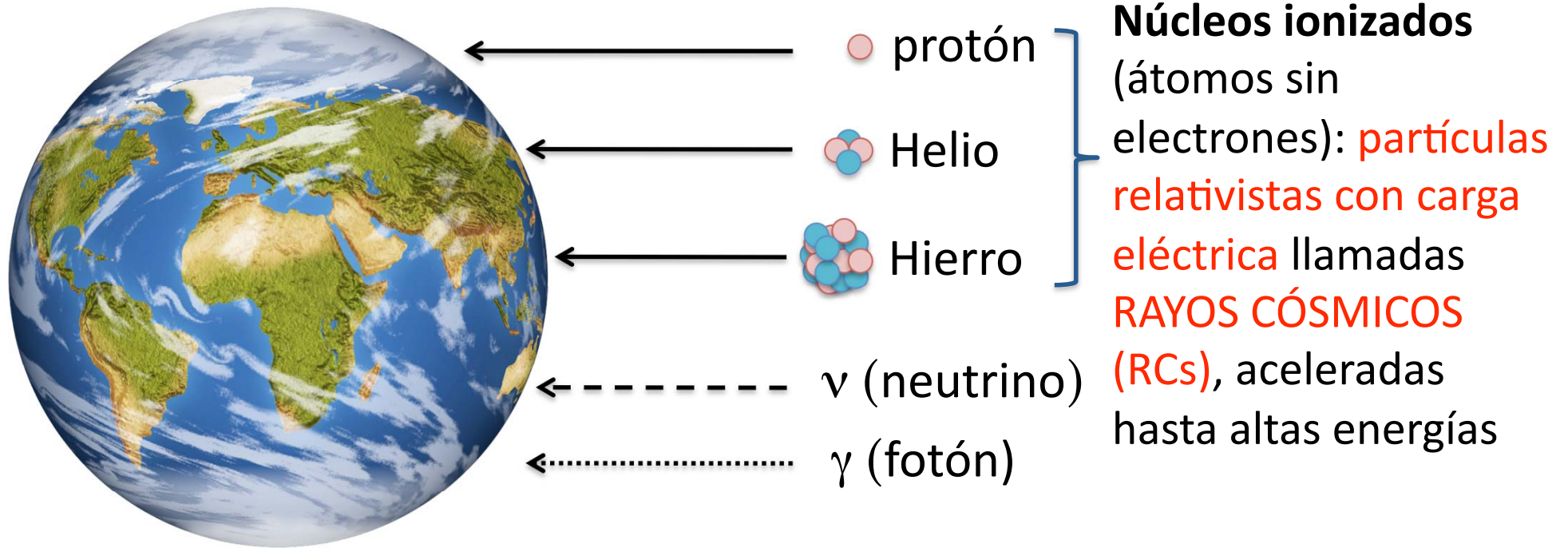
**Victor Hess (1912)** encontró que el nivel de radiación crece con la altitud, en un vuelo en globo (hasta 5300 m). Los resultados fueron confirmados por **Kohlhörster**



Descubrimiento de la **radiación cósmica**

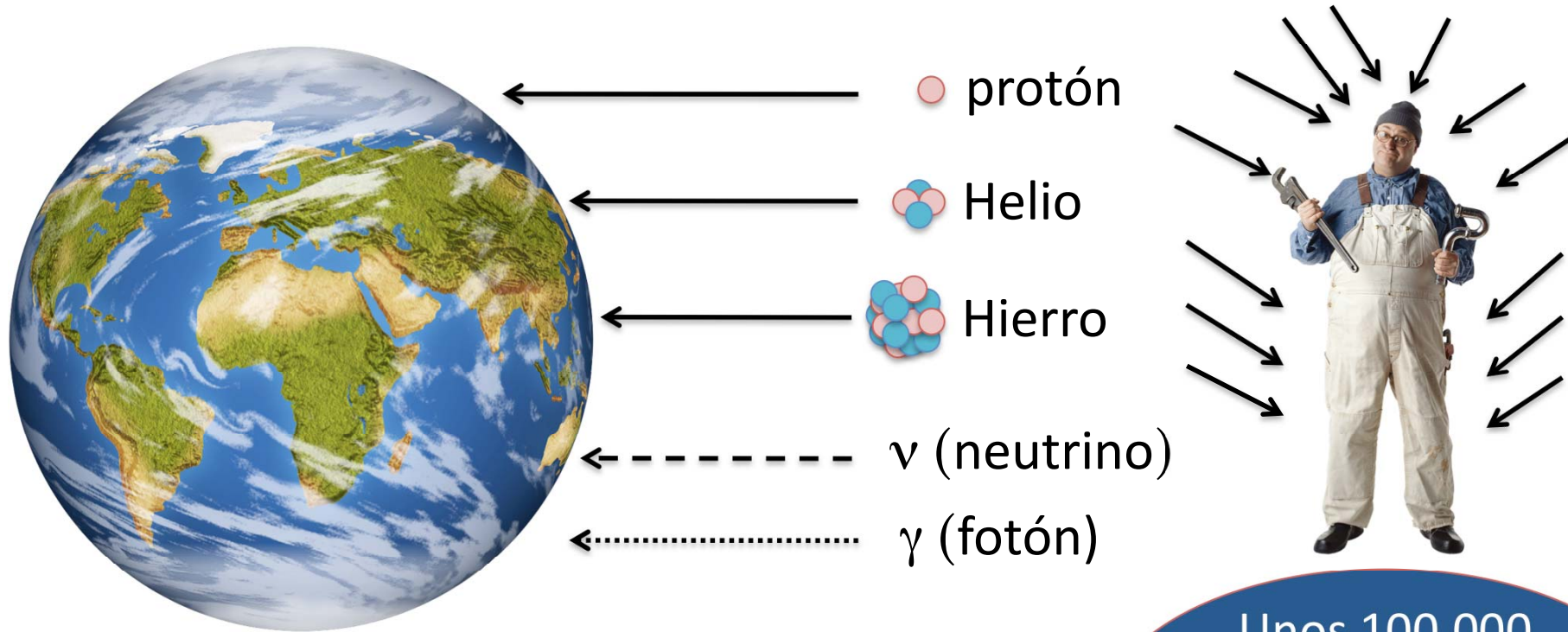
# Partículas del espacio exterior

Diversos tipos de partículas *golpean* la atmósfera de la Tierra



# Partículas del espacio exterior

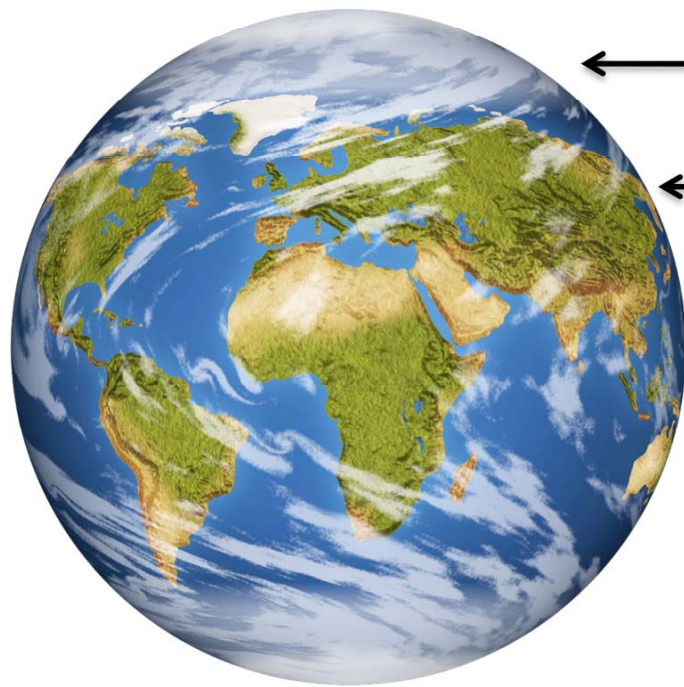
Diversos tipos de partículas *golpean* la atmósfera de la Tierra



Unos 100,000  
RCs atraviesan  
una persona  
cada hora

# Partículas del espacio exterior

Diversos tipos de partículas *golpean* la atmósfera de la Tierra



● protón

● Helio

● Hierro

RAYOS CÓSMICOS  
(RCs)

## Preguntas:

¿Qué tipo de partículas son?

¿Cuáles son sus energías?

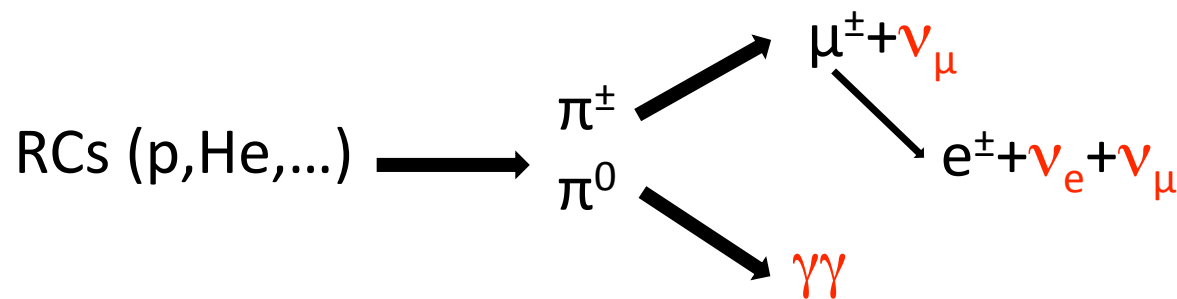
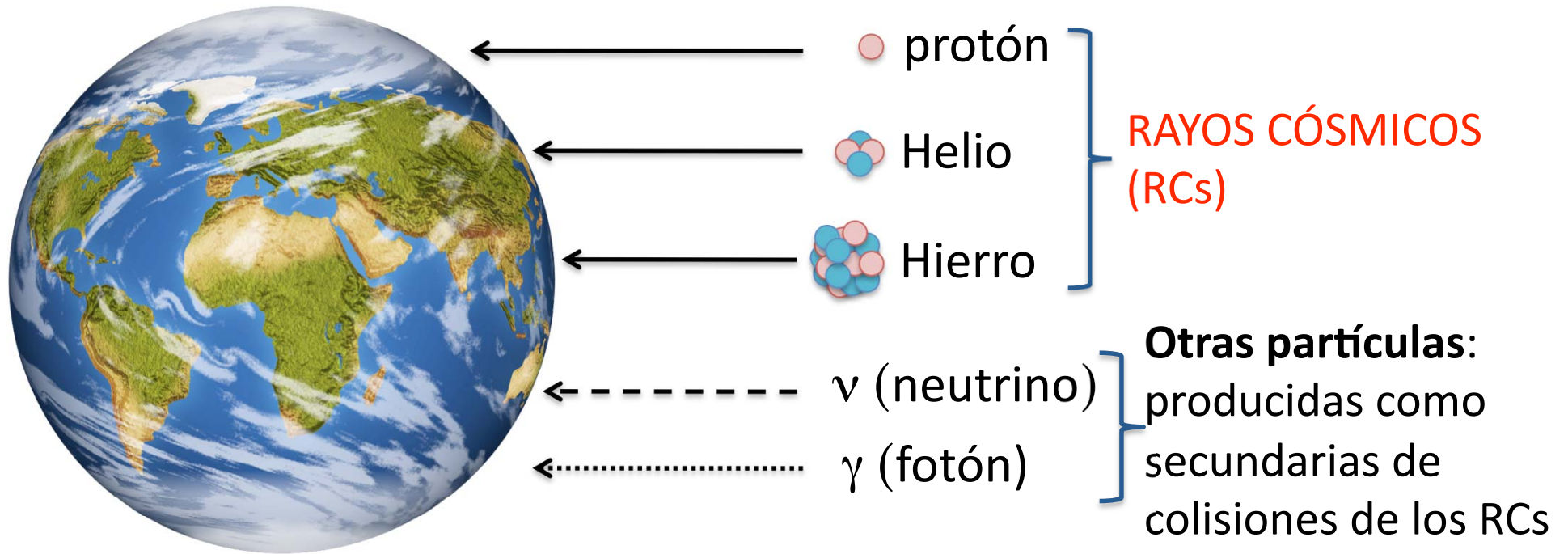
¿Dónde se originan?



Núcleo de Galaxia Activa

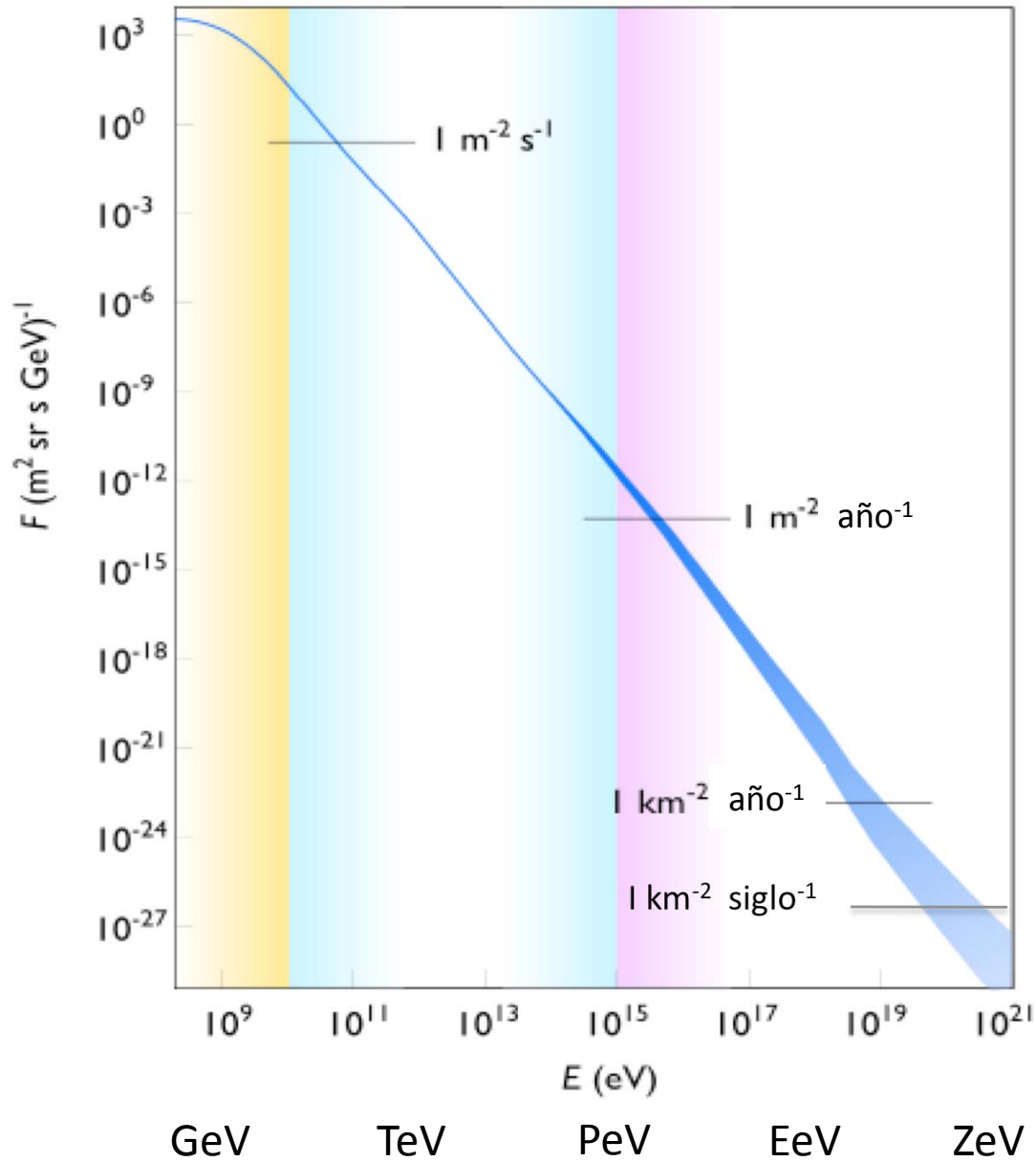
# Partículas del espacio exterior

Diversos tipos de partículas *golpean* la atmósfera de la Tierra



Telescopios de fotones de alta energía y de neutrinos

Flujo de RCs: más de 30 órdenes de magnitud !!

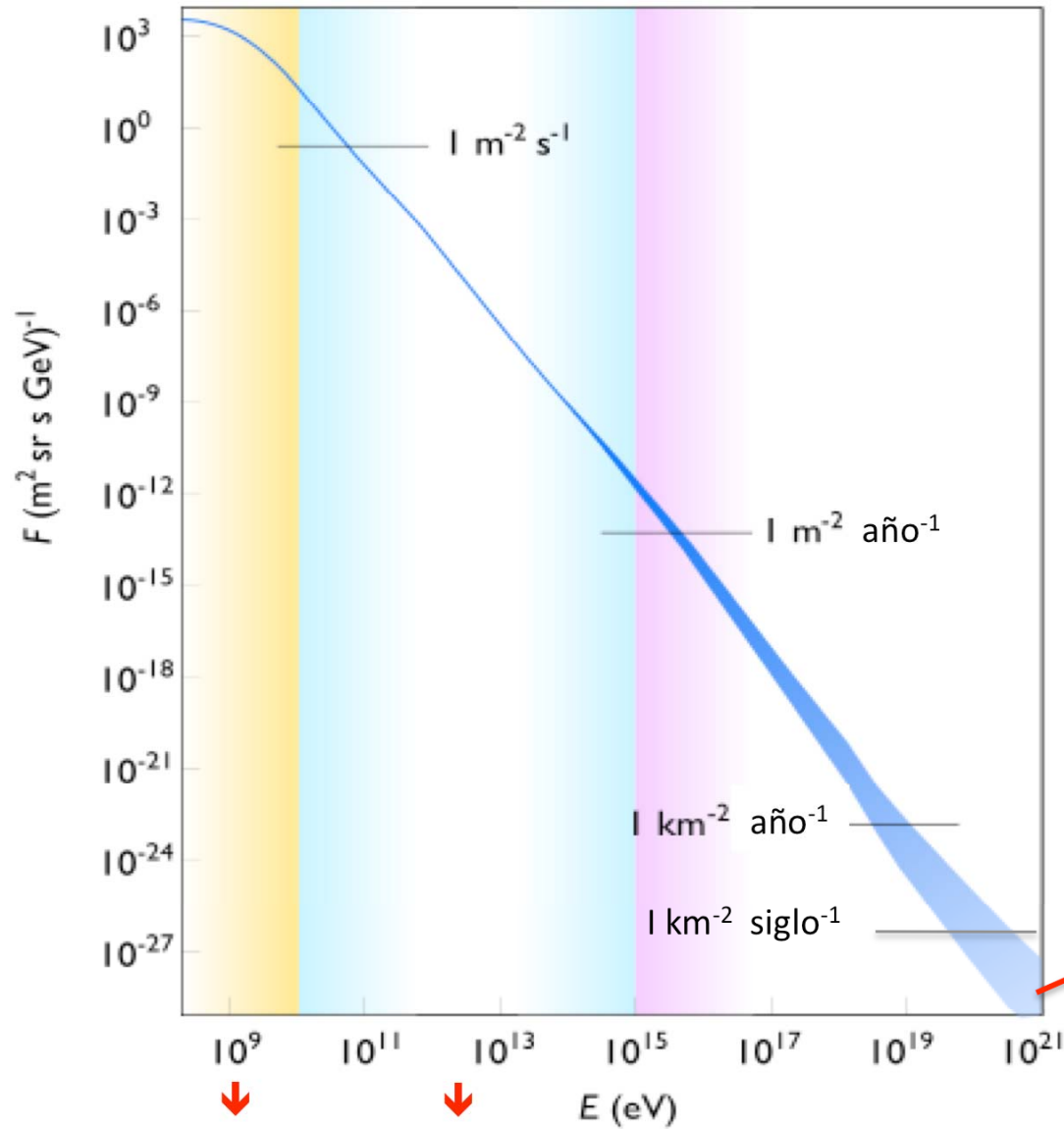


## Espectro de energías de los RCs

$6 \times 10^{18} \text{ eV} \approx 1 \text{ Julio}$

Energías de los RCs: más de 10 órdenes de magnitud !!

Flujo de RCs: más de 30 órdenes de magnitud !!



Masa de 1 protón

Energía de cada haz del LHC

## Espectro de energías de los RCs

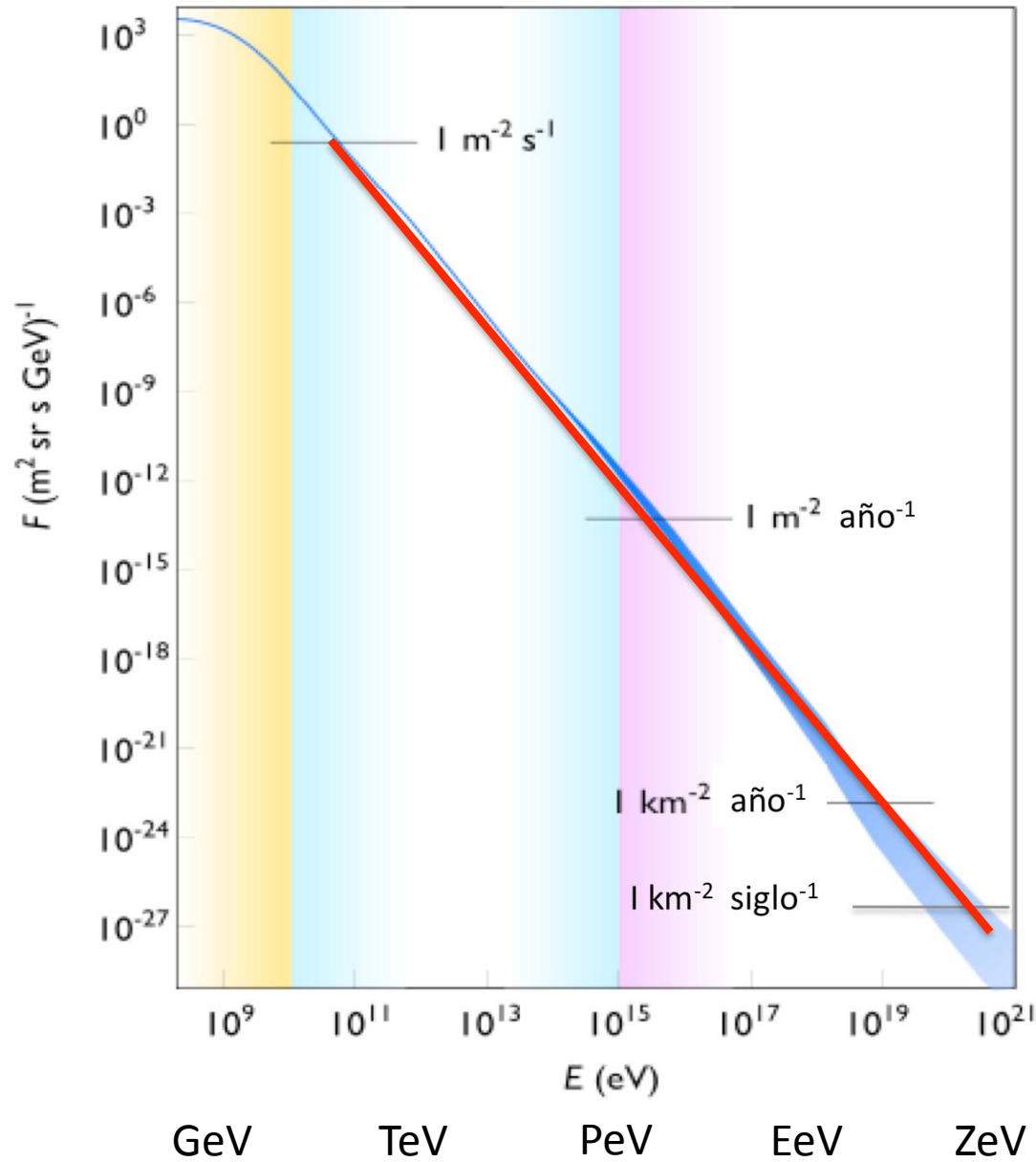


Energía cinética de una bola de béisbol a unos 100 km/h (¡en una partícula subatómica!)

$$6 \times 10^{18} \text{ eV} \approx 1 \text{ Julio}$$

Energías de los RCs: más de 10 órdenes de magnitud !!

Flujo de RCs: más de 30 órdenes de magnitud !!



## Espectro de energías de los RCs

$$\frac{dN}{dEd\Omega dA dt} \propto E^{-\gamma}$$

Espectro no térmico,  
carente casi de rasgos  
característicos

Energías de los RCs: más de 10 órdenes de magnitud !!

# Espectro de energías de los RCs

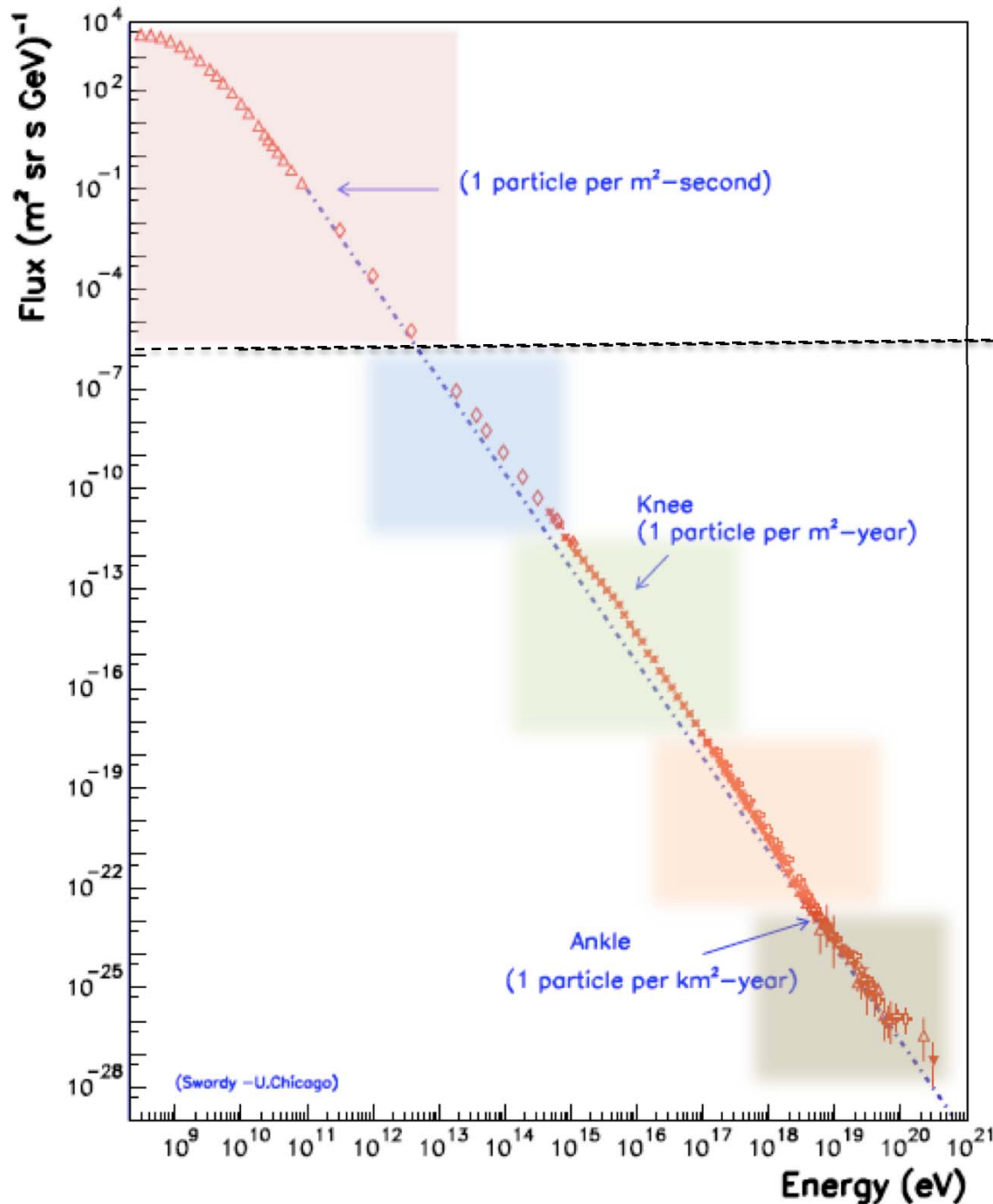
MEDIDAS DIRECTAS:  
Satélites y Globos

MEDIDAS INDIRECTAS:  
Señales producidas por  
las lluvias de partículas  
secundarias (AIR SHOWERS)

KASKADE, KASKADE GRANDE,...

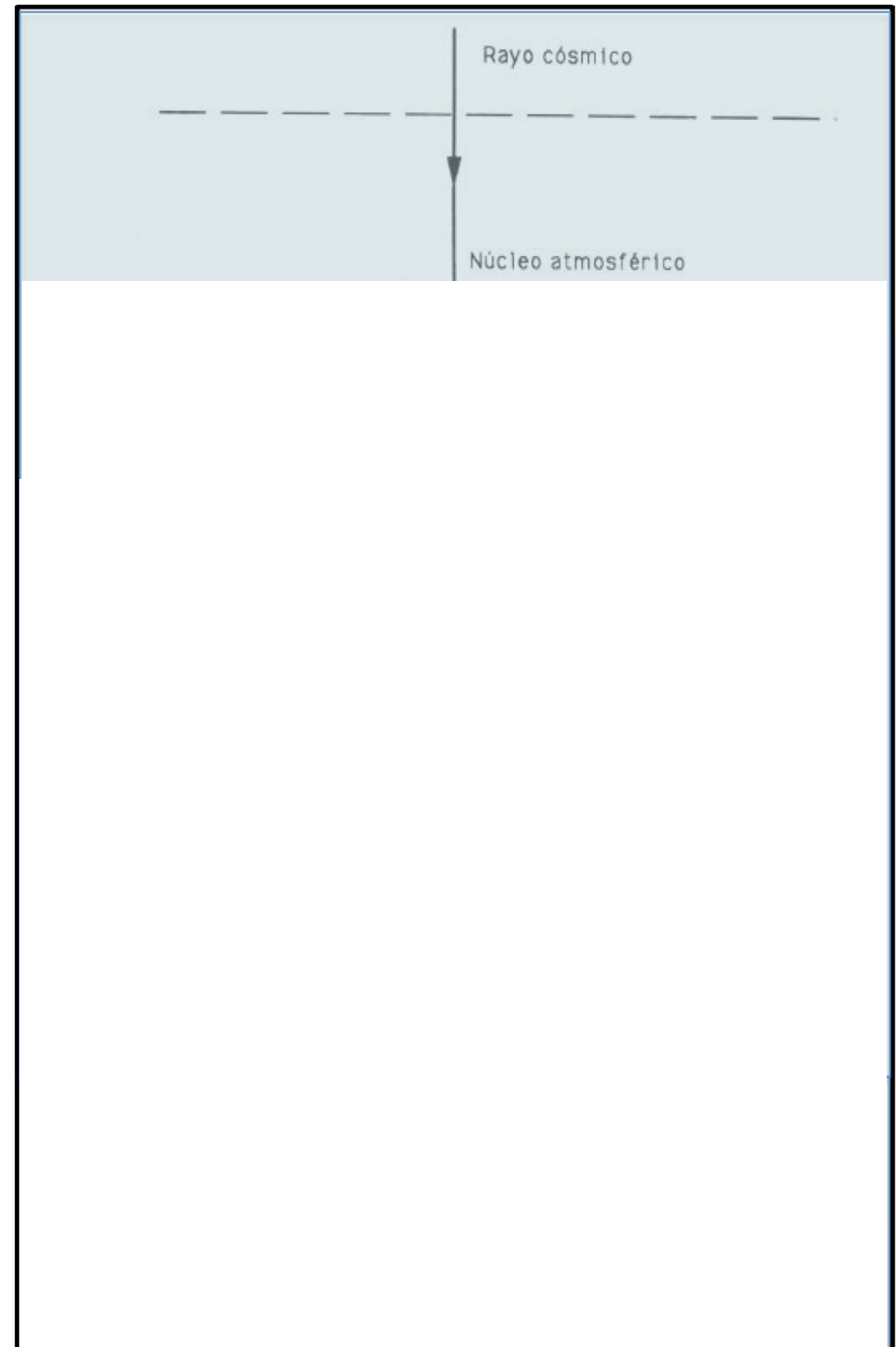
Haverah Park, Akeno, TA,...

HIRES, AGASA, AUGER,...



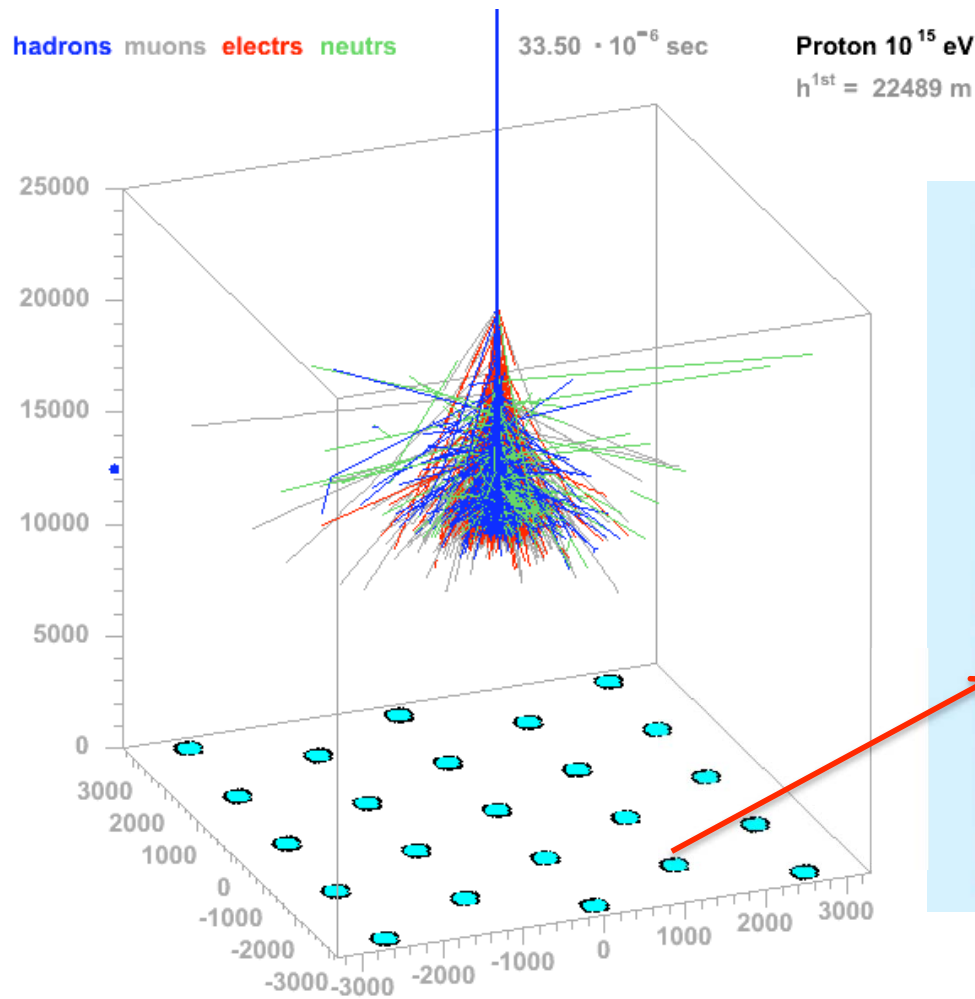
Descubrimiento de las **LLUVIAS**  
(**Cascadas**) de **partículas** en la atmósfera  
originadas por RCs de alta energía

**Pierre Auger & colaboradores (1937)**  
encuentran coincidencias en  
detectores muy separados,  
concluyendo que los RCs crean  
**lluvias de partículas** en la atmósfera.

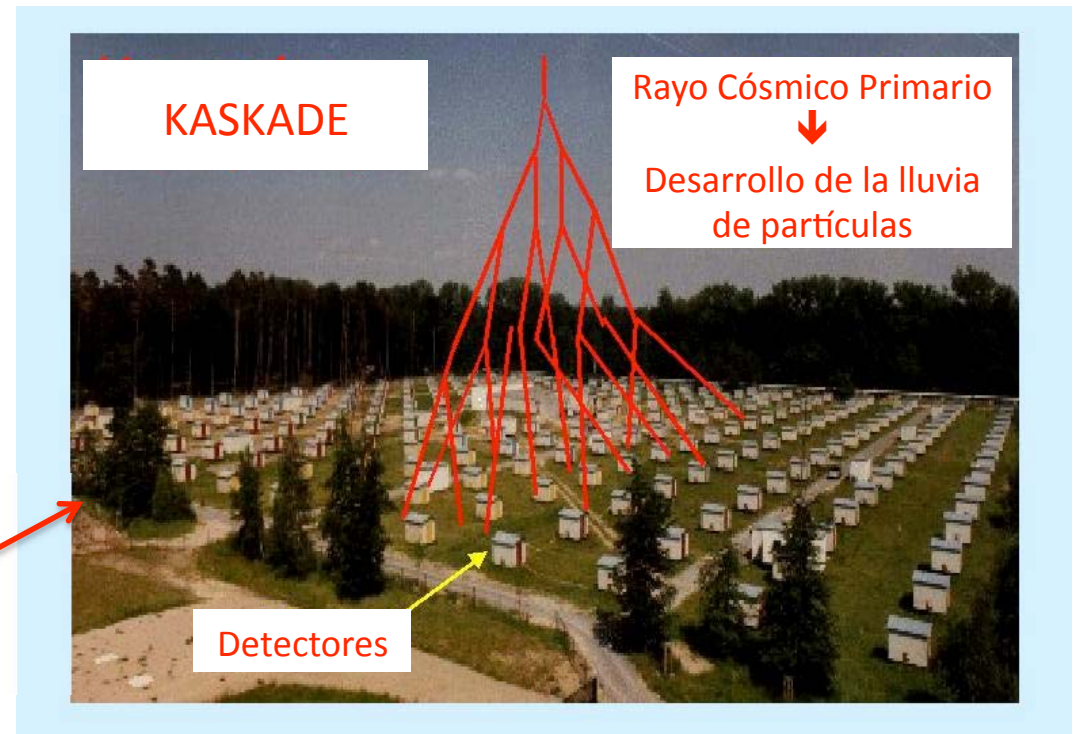


# Un RC genera una lluvia de partículas en la atmósfera

Detectable en experimentos que deben deducir las propiedades del RC primario (MEDIDA INDIRECTA)



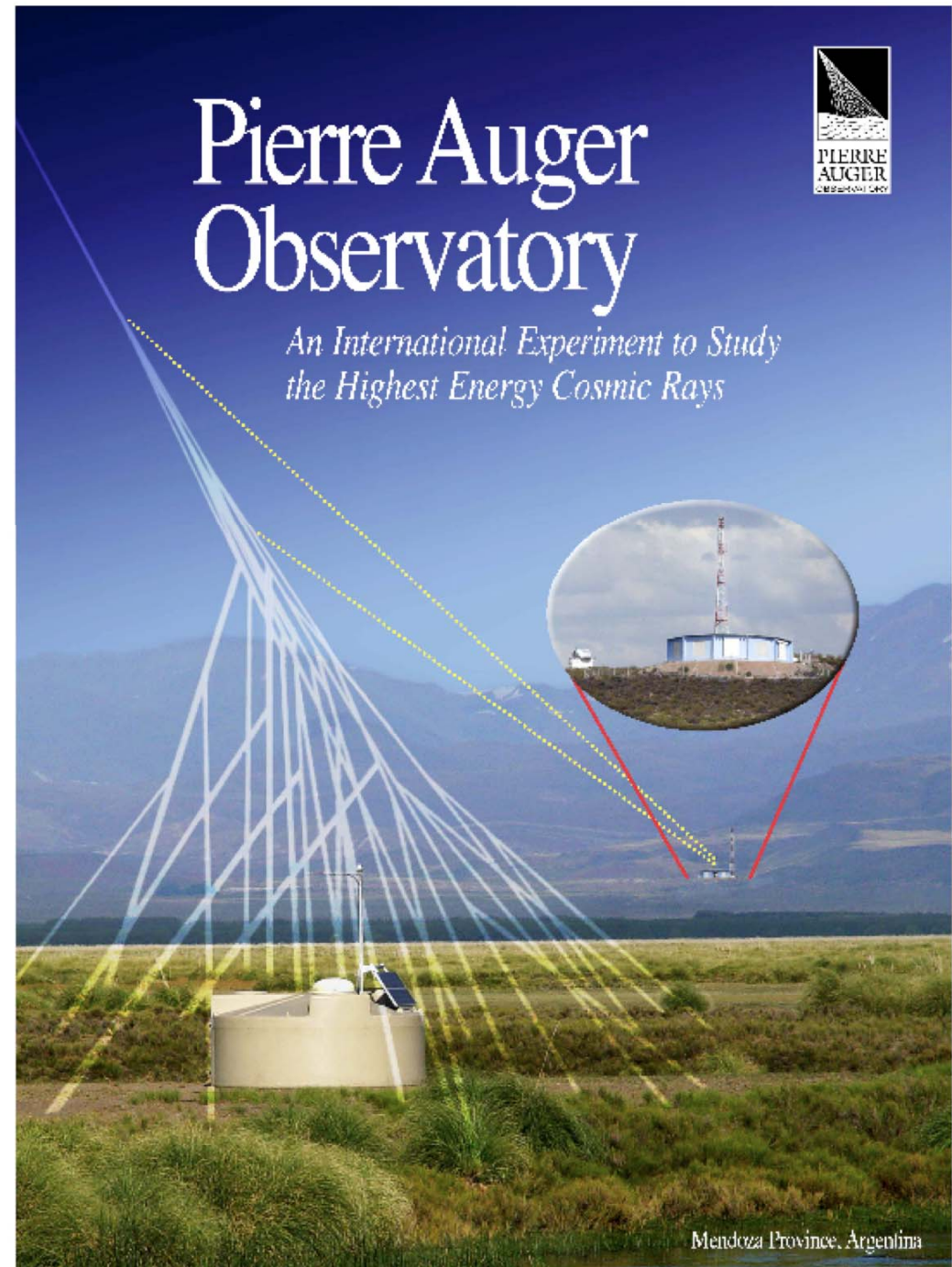
J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlruhe



Cerca de Karlsruhe (Alemania): 40,000 m<sup>2</sup> suficiente para RCs de hasta  $10^{18}$  eV

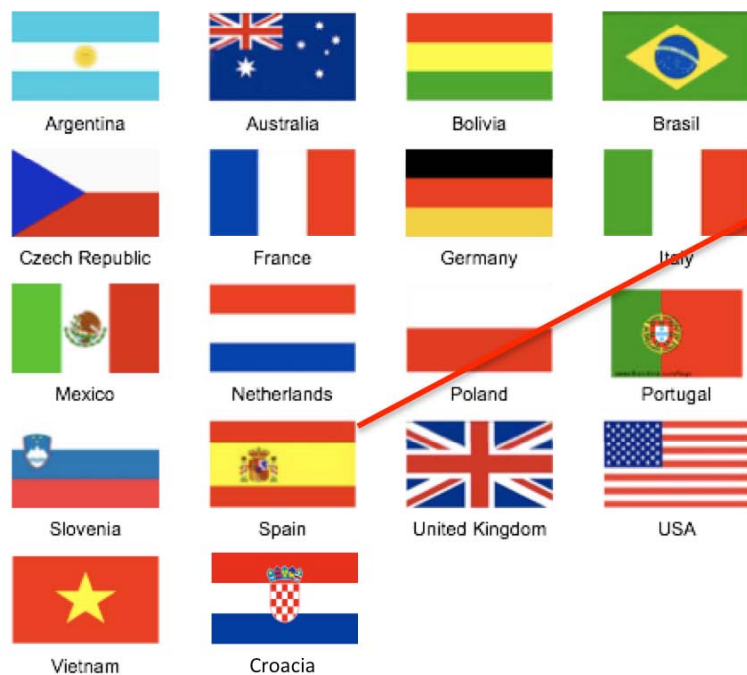
# El Observatorio Pierre Auger

~ 400 científicos y técnicos de  
70 instituciones en 17 países



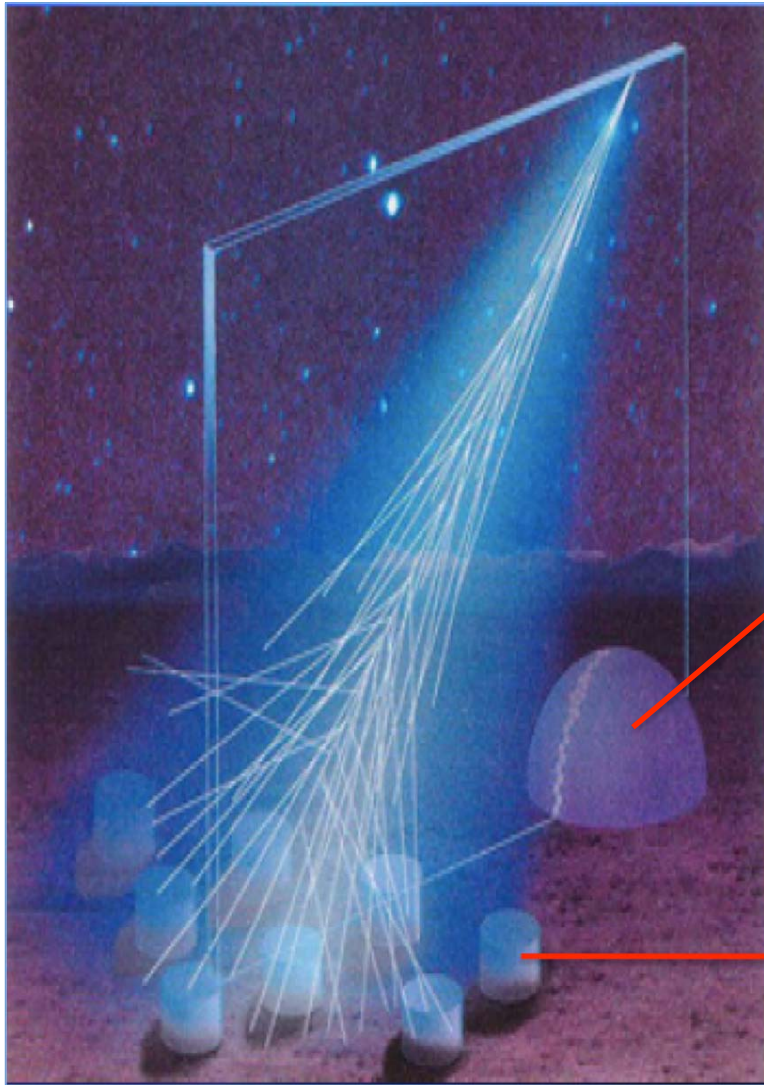
# El Observatorio Pierre Auger

~ 400 científicos y técnicos de  
70 instituciones en 17 países



# Principal ventaja de Auger: Medida de las características de las lluvias de partículas creadas por RCs de altísima energía con técnica híbrida

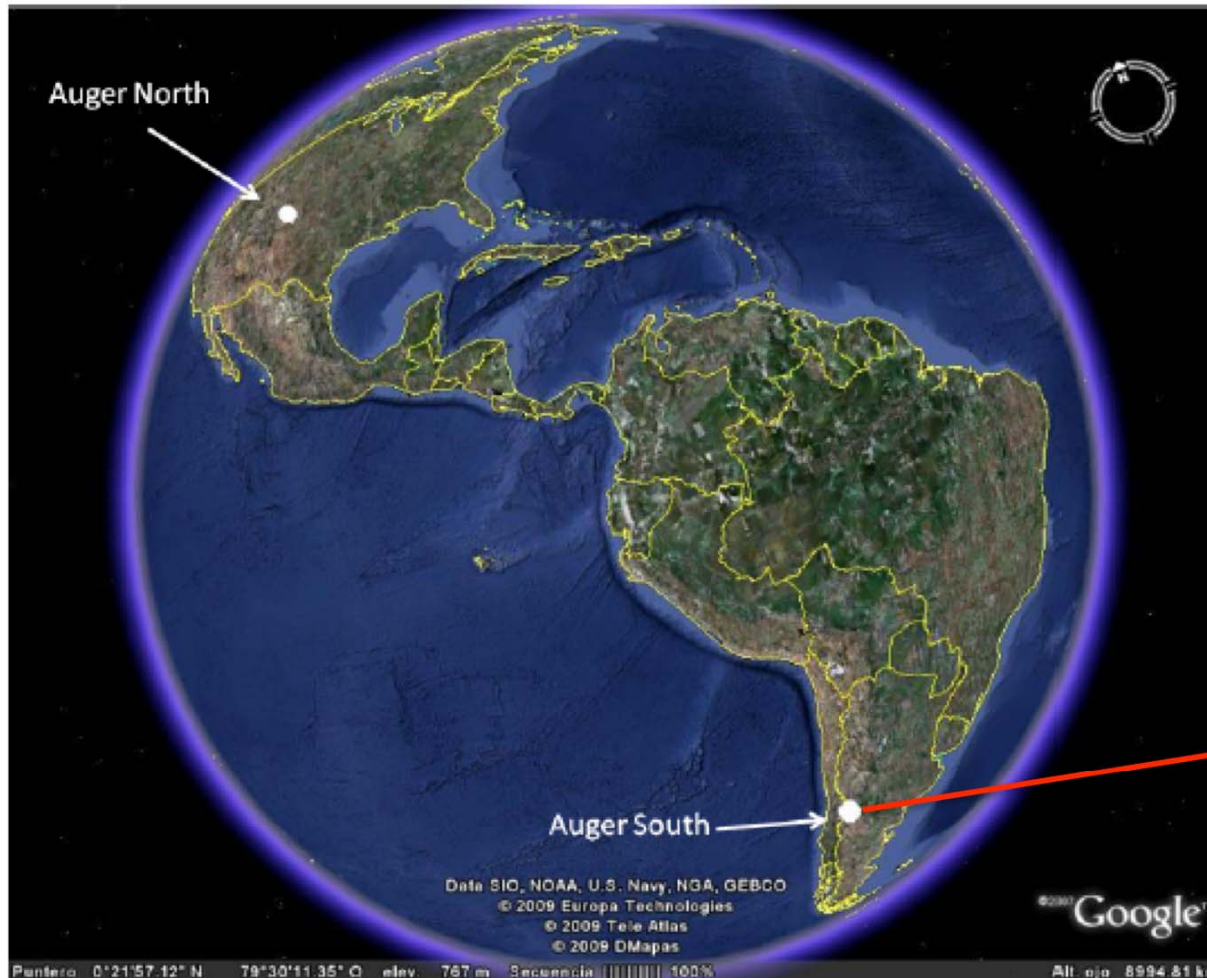
TELESCOPIOS SENSIBLES A LA FLUORESCENCIA  
(sólo en noches claras sin Luna,  $\approx 13\%$  del tiempo)



RED DE DETECTORES DE SUPERFICIE (datos las 24h)



# El Observatorio Pierre Auger en Argentina



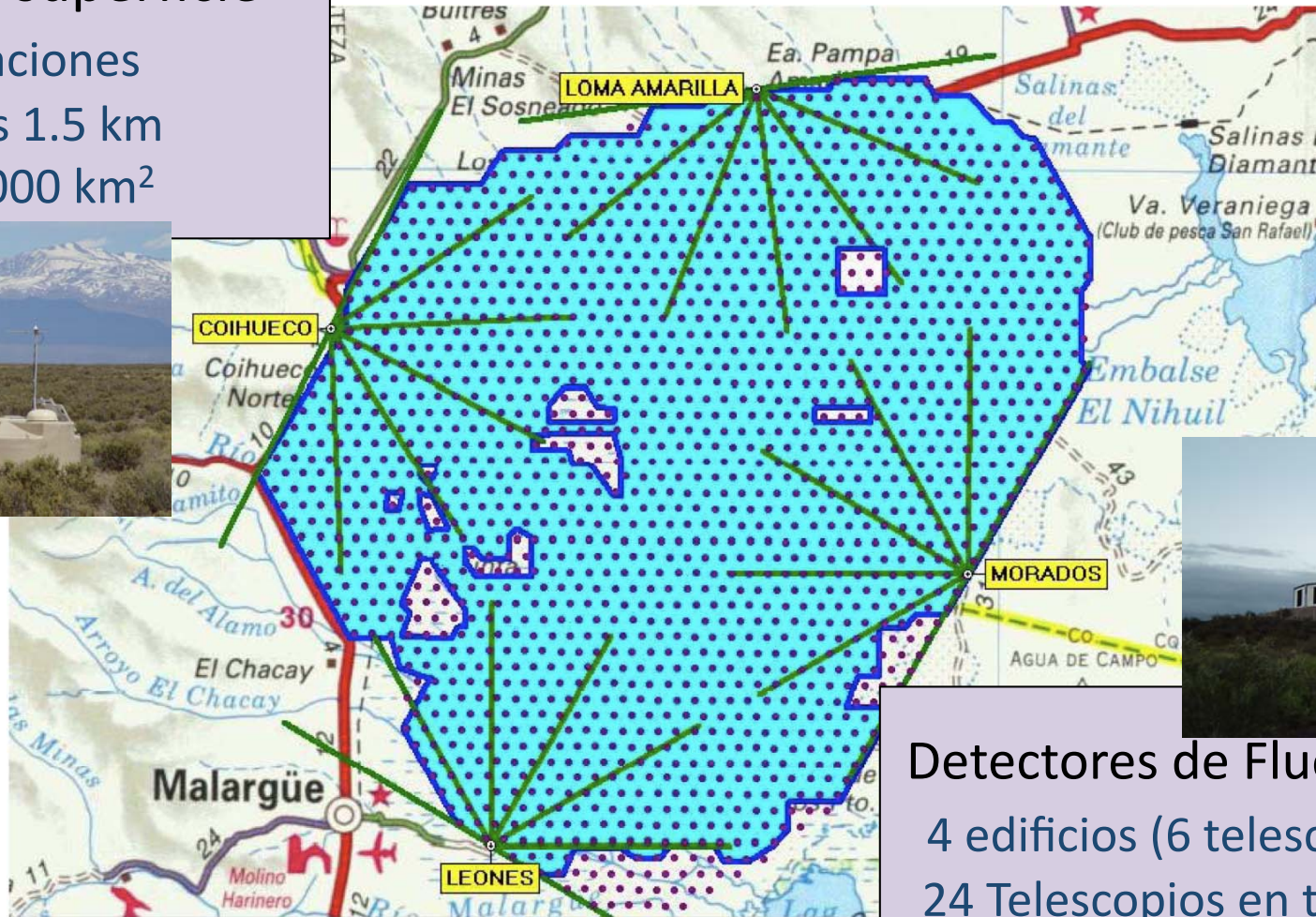
Situado en la provincia de Mendoza. Edificio de oficinas en la ciudad de **Malargüe**



# Tamaño del Observatorio (aprox. 3000 km<sup>2</sup>)

## Red de superficie

1660 estaciones  
separadas 1.5 km  
cubren 3000 km<sup>2</sup>

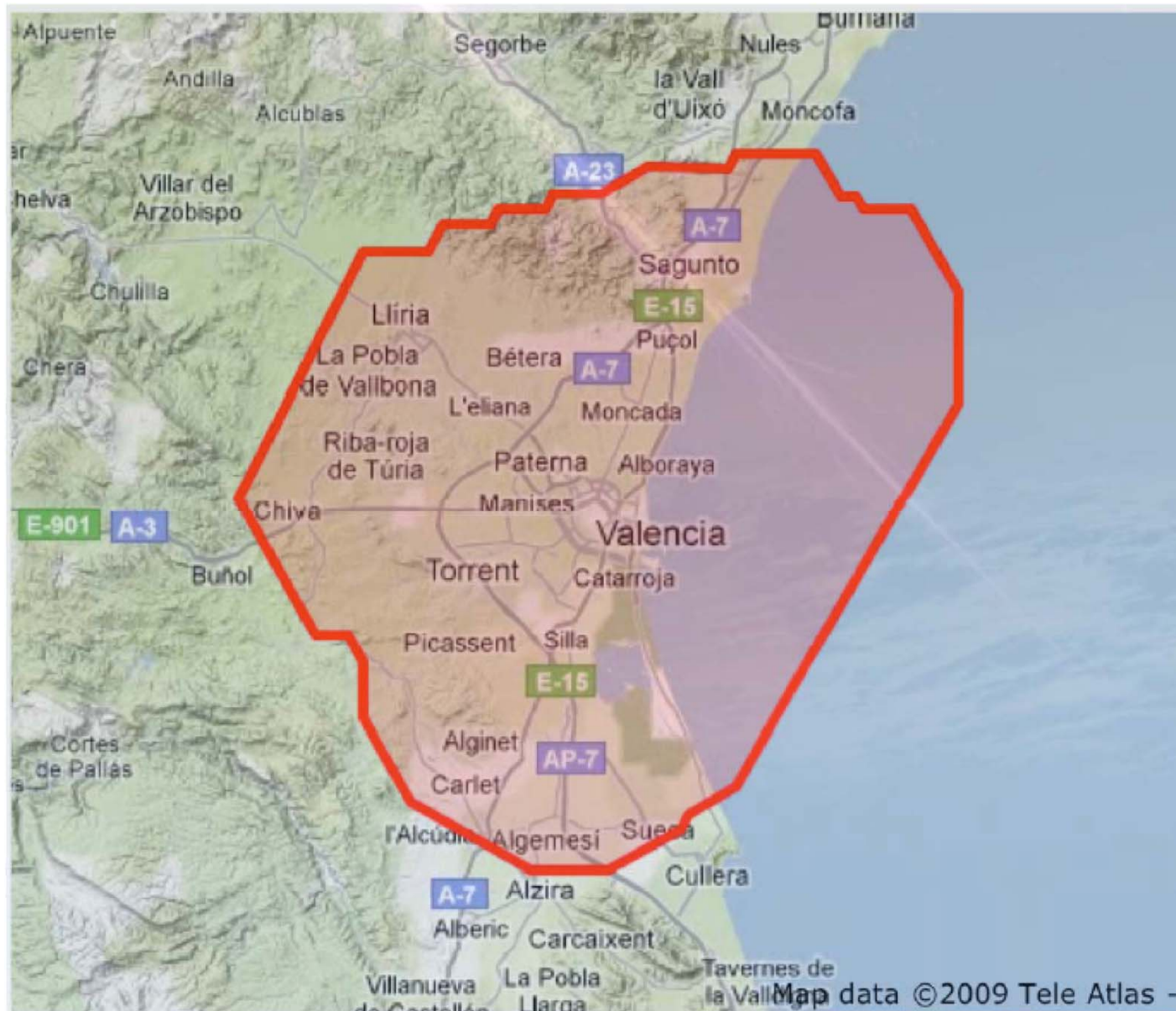


## Detectores de Fluorescencia

4 edificios (6 telescopios)  
24 Telescopios en total

Observatorio completado en Junio de 2008

# Tamaño del Observatorio (aprox. 3000 km<sup>2</sup>)



# Tamaño del Observatorio (aprox. 3000 km<sup>2</sup>)



# Imágenes y material de divulgación

- **Fotos** del Observatorio: detectores de superficie, telescopios, Pampa...
- **Animaciones** de lluvias de partículas causadas por RCs de alta energía
- **Datos públicos reales** (1% del total)
- **Tamaño** del Observatorio sobre sobre vuestra región favorita
- Explorar el Observatorio Auger con **Google Earth**

Visita <http://www.auger.org/>

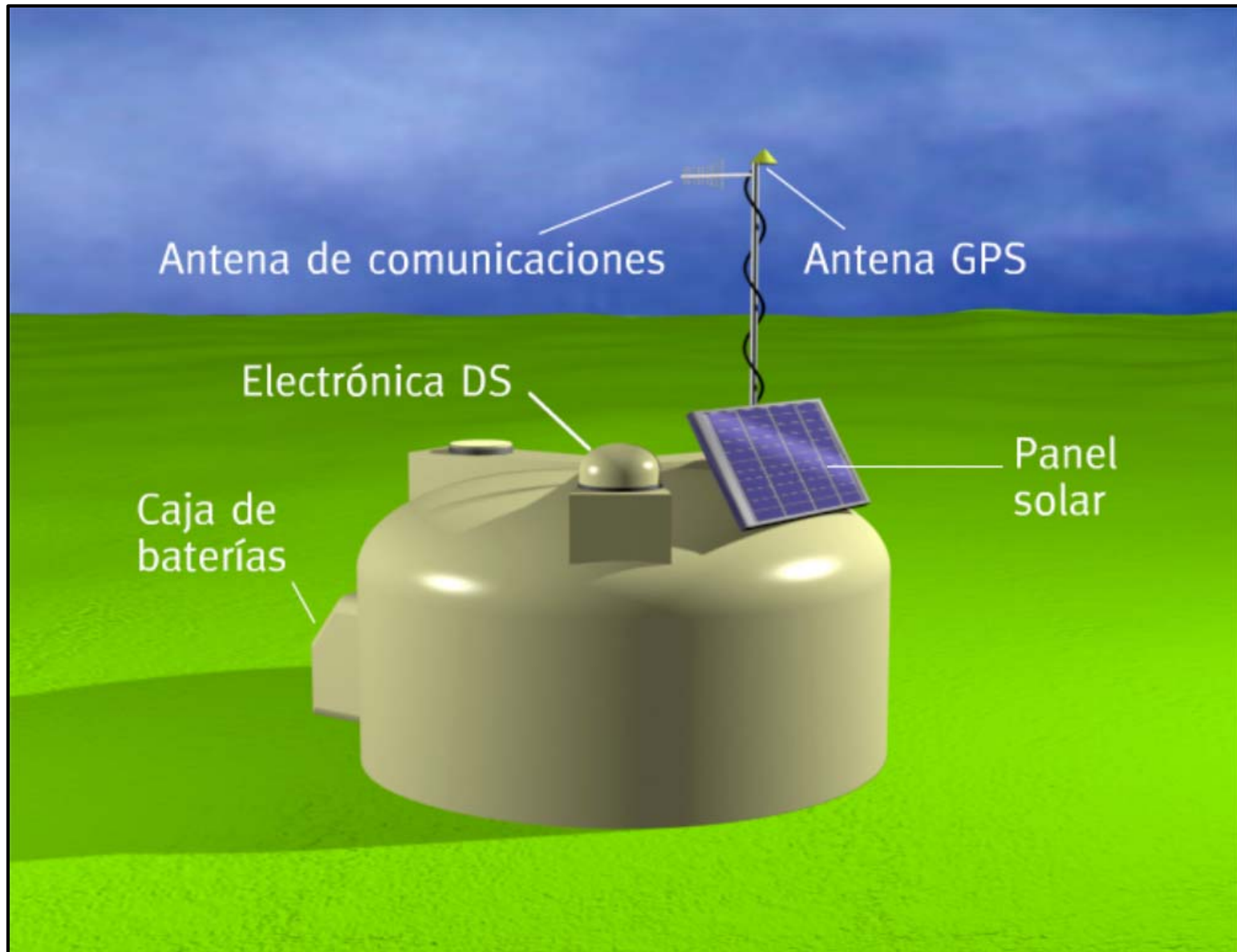


## Un *tanque* (detector de superficie)



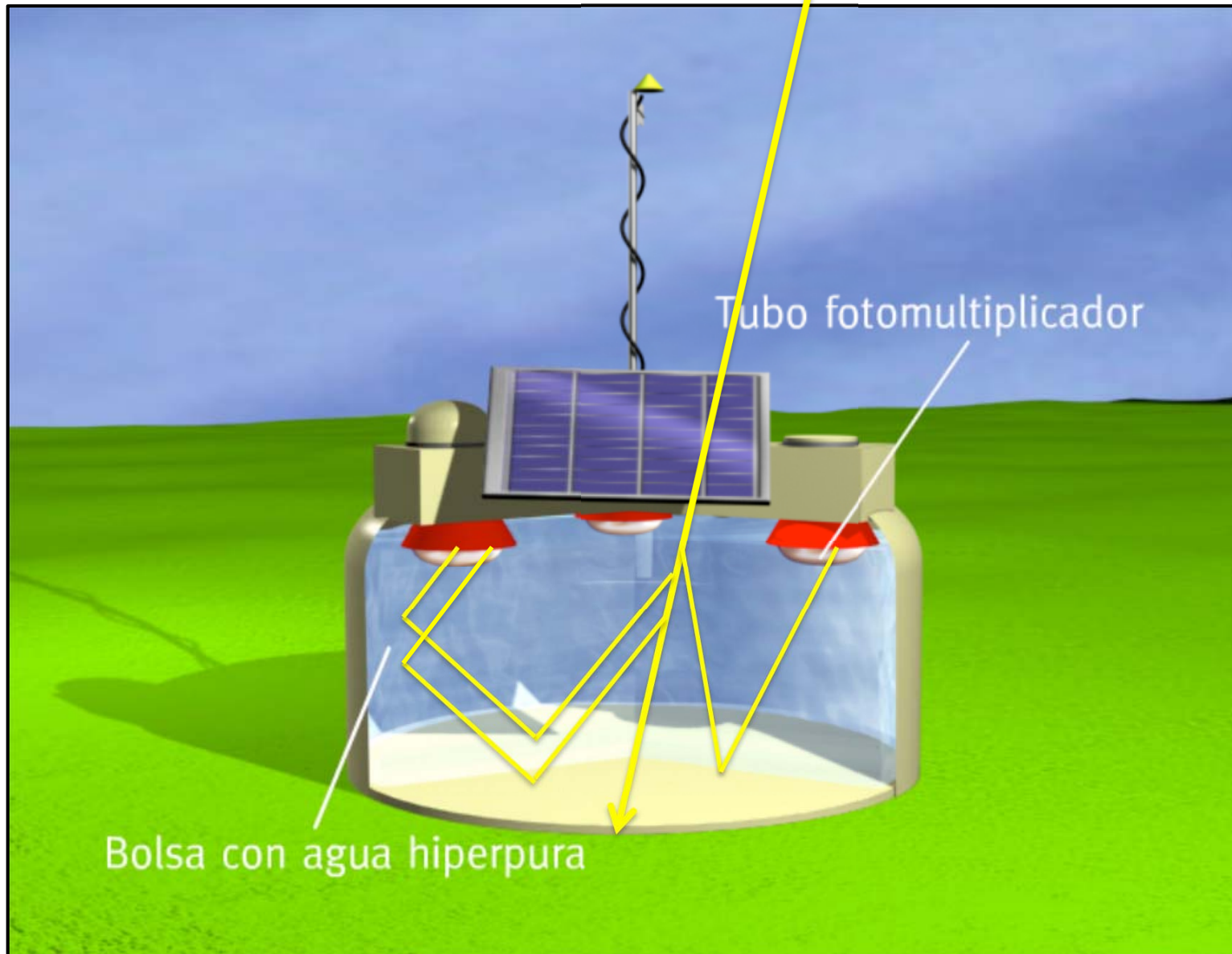
En Auger Sur hay 1660 tanques (cada uno con su nombre)

# Un *tanque* (detector de superficie)



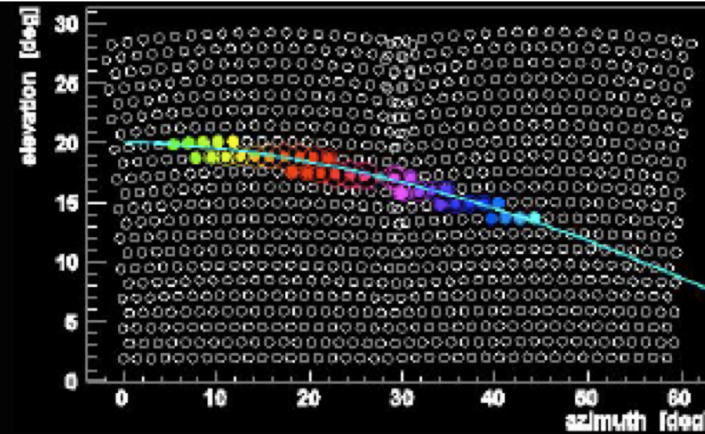
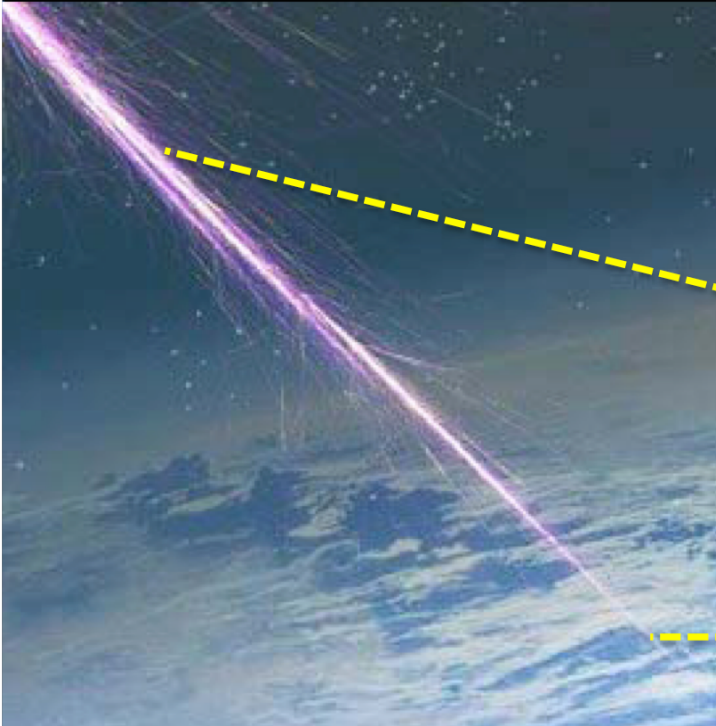
Partícula secundaria de RCs

# Un *tanque* (detector de superficie)

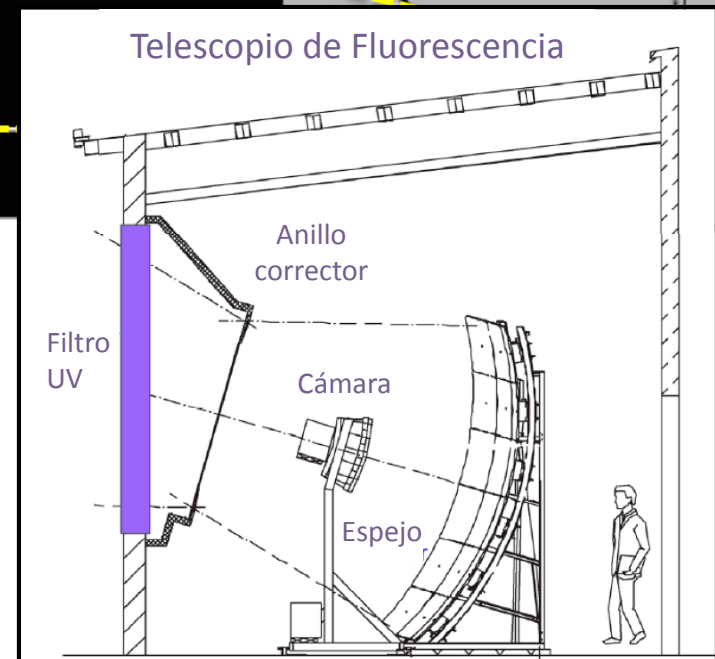


# La técnica de medida de la Fluorescencia

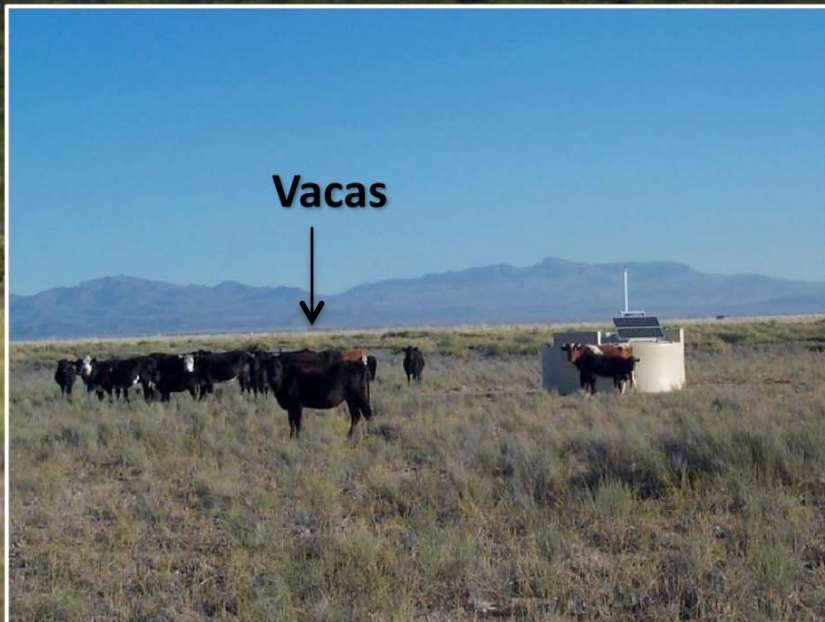
Lluvia de partículas



Los telescopios de fluorescencia detectan la luz UV emitida por el  $N_2$  del aire al pasar los electrones de la lluvia



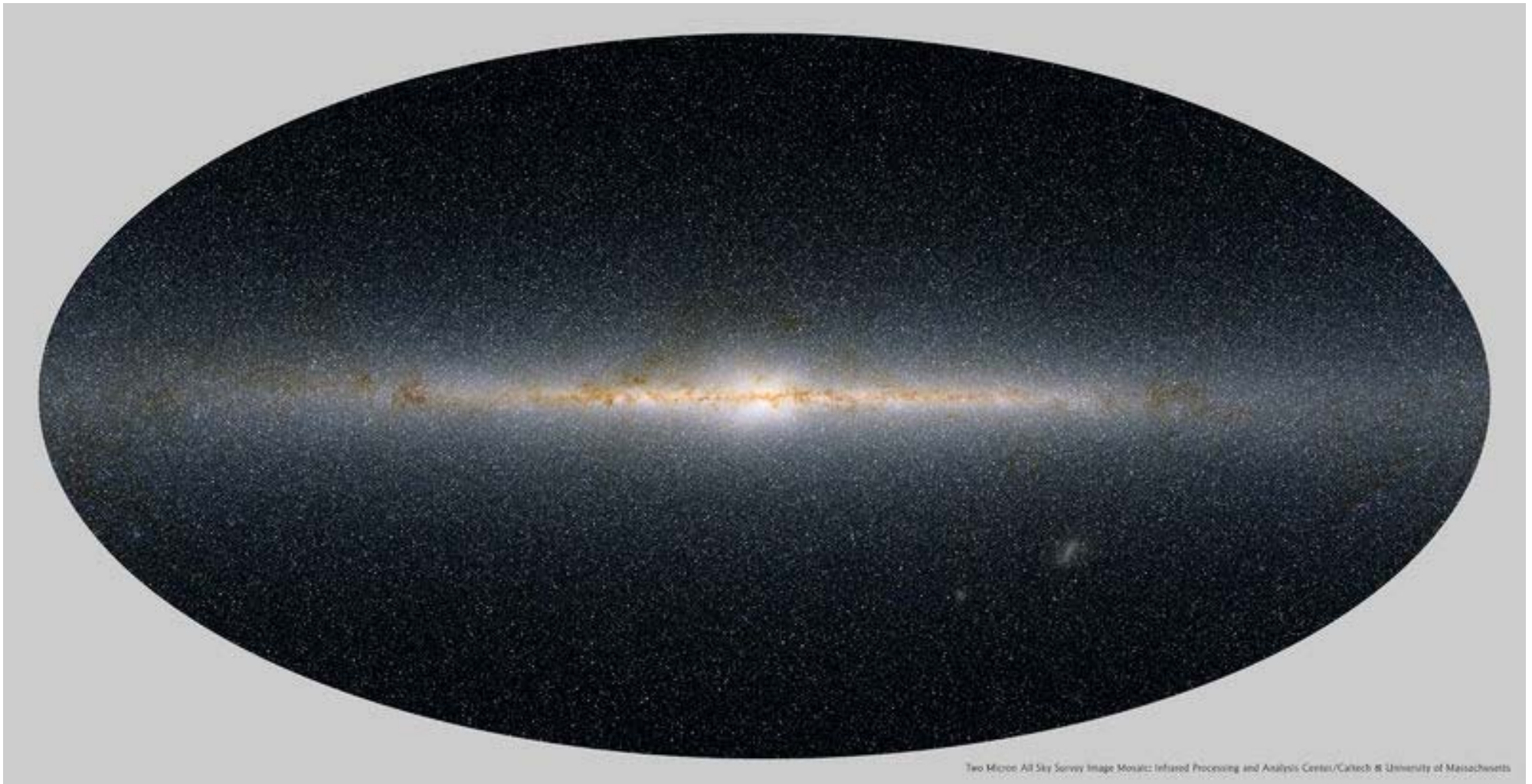
Estación de telescopios  
de Fluorescencia



Detector de superficie

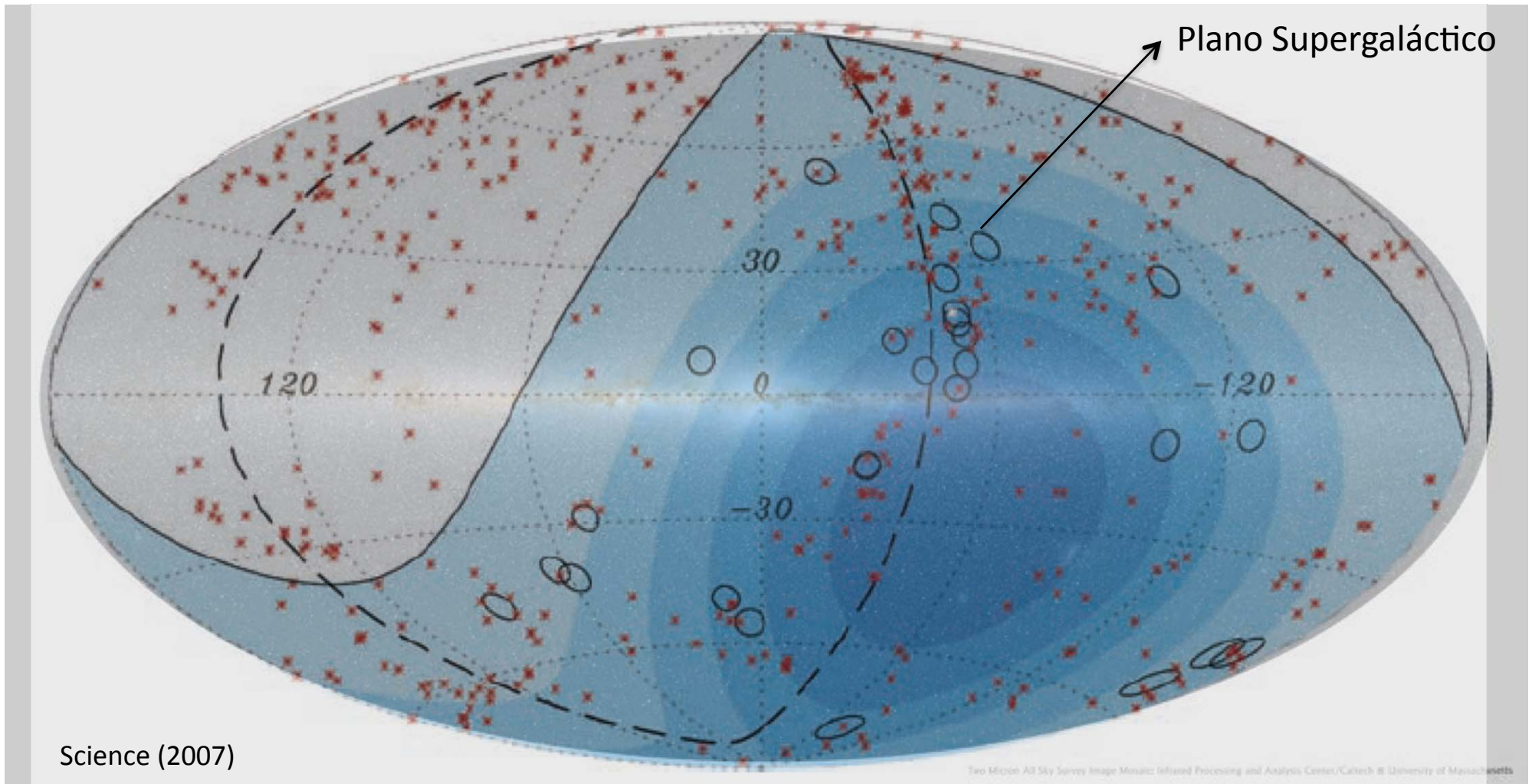
# ¿De dónde vienen los RCs más energéticos?

El Cielo en coordenadas galácticas



# ¿De dónde vienen los RCs más energéticos?

A las mayores energías, los datos de Auger parecen indicar que los RCs provienen con mayor probabilidad del llamado **plano supergaláctico** (gran concentración de materia más allá de la nuestra Vía Láctea)

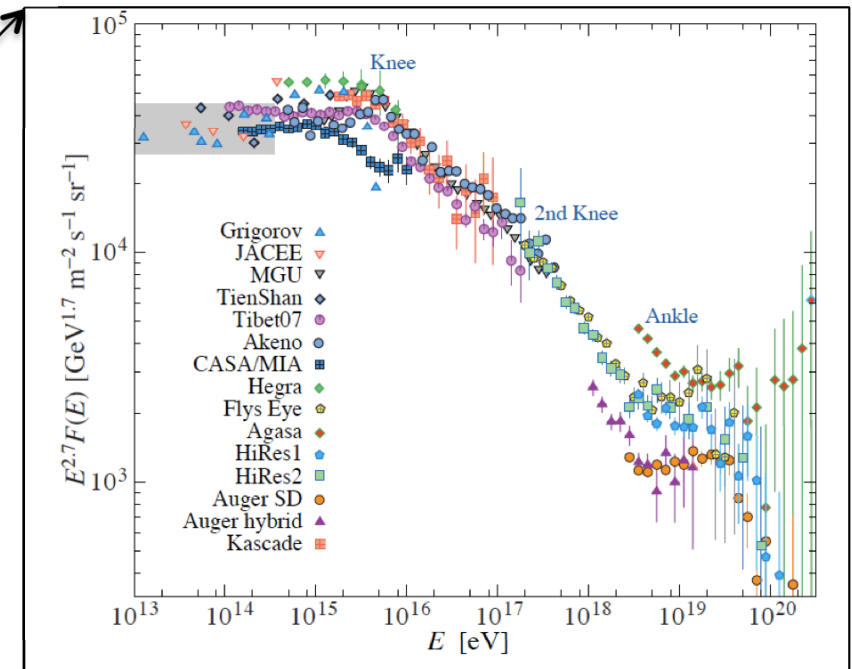
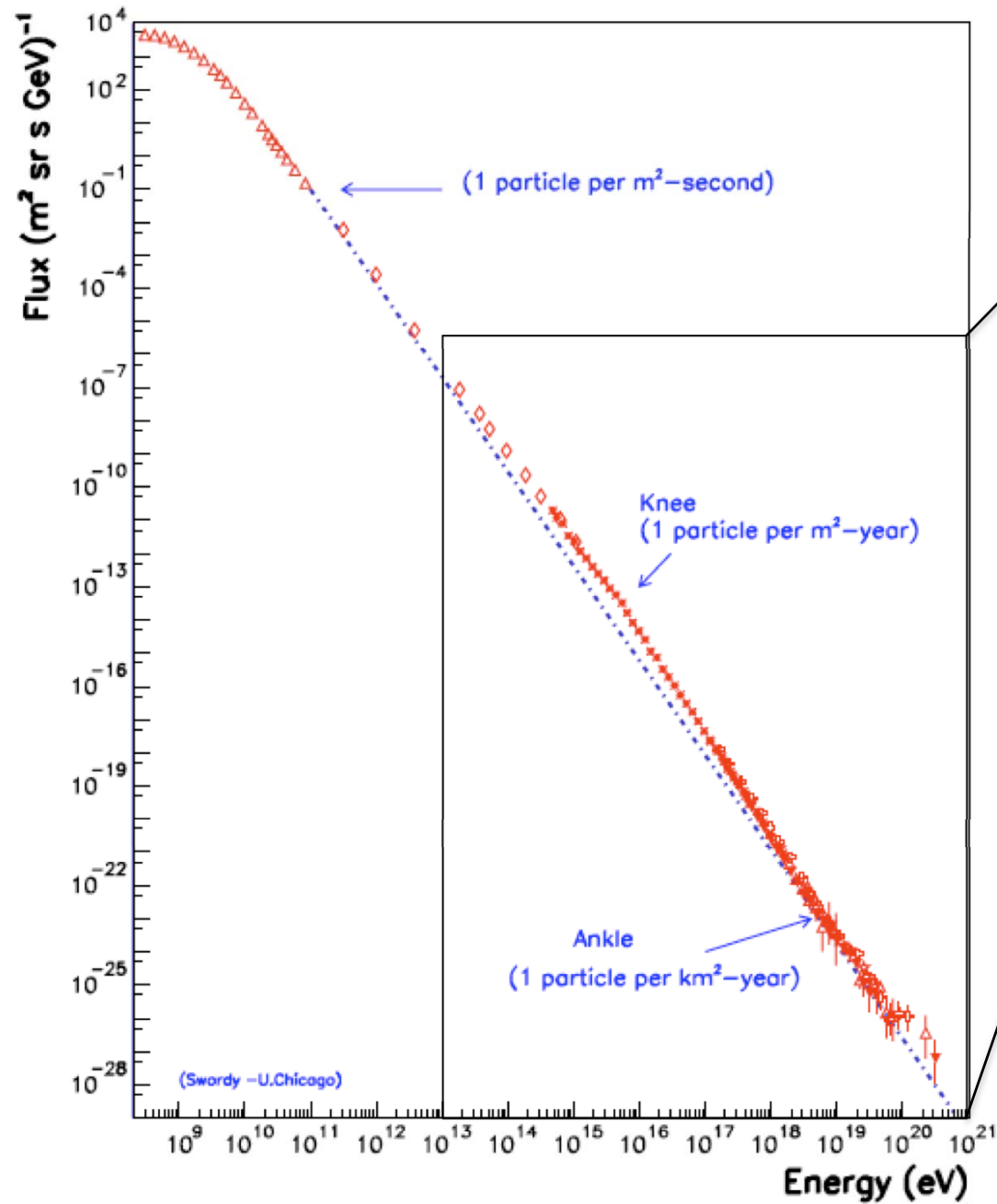




**¡Gracias por vuestra atención!**

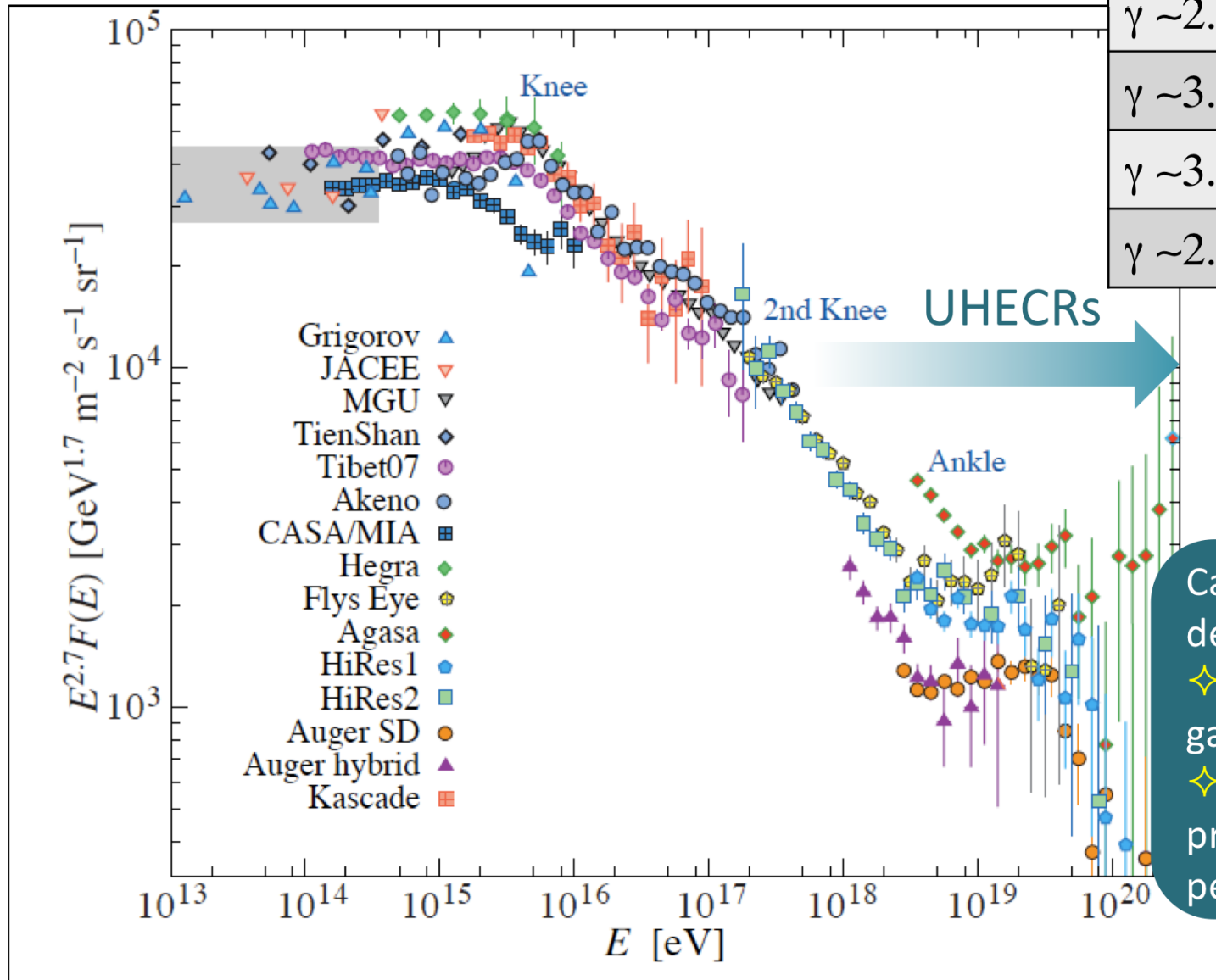
Transparencias extra

# Espectro de RCs a las energías más elevadas



# Espectro de RCs a las energías más elevadas

CR flujo de RCs multiplicado por un factor  $E^{2.7}$



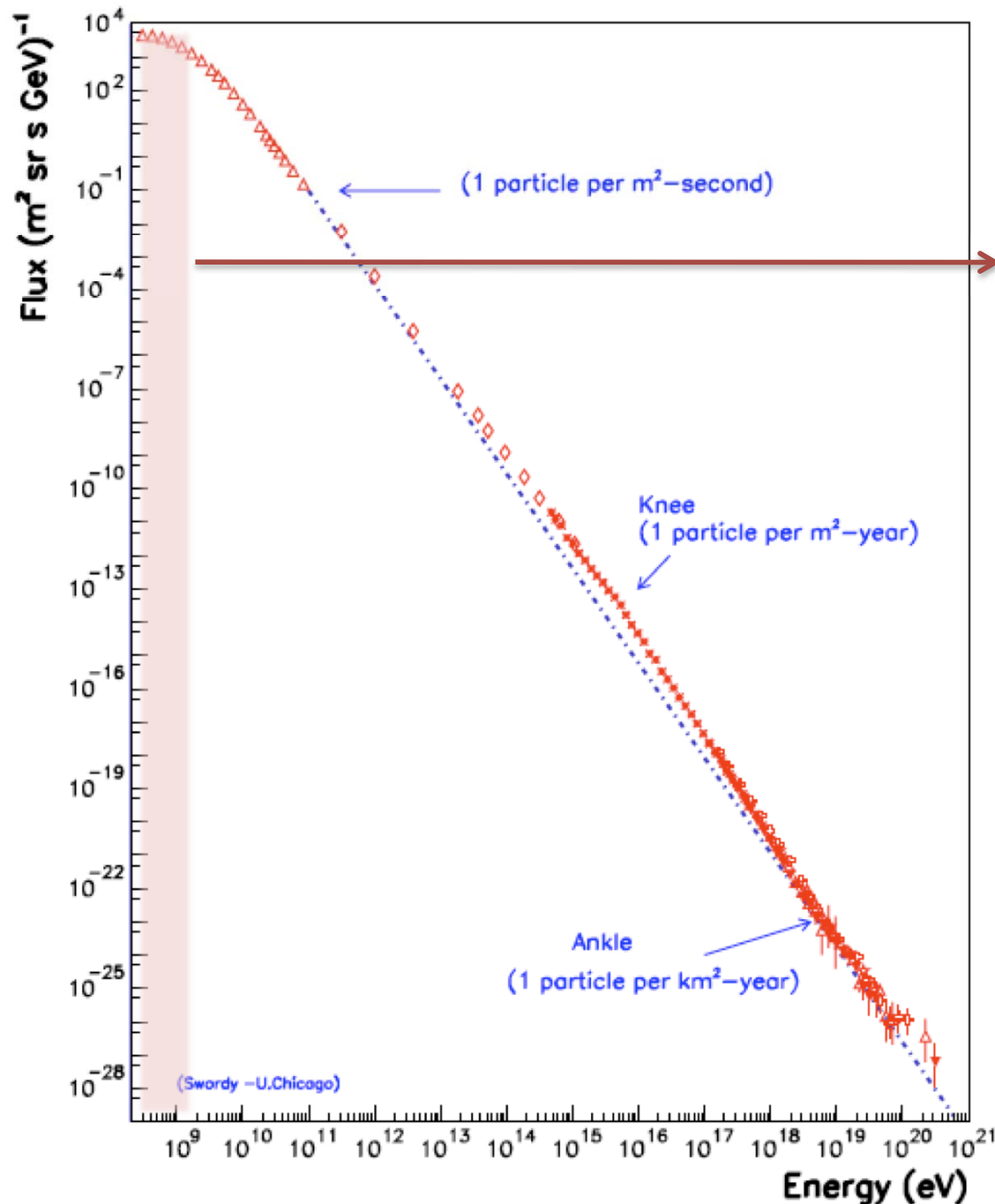
$\gamma \sim 2.7$	$E < E_{\text{knee}}$
$\gamma \sim 3.0$	$E_{\text{knee}} > E > E_{\text{2nd knee}}$
$\gamma \sim 3.1$	$E_{\text{2nd knee}} > E > E_{\text{ankle}}$
$\gamma \sim 2.7$	$E > E_{\text{ankle}}$

$$\frac{dF}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

Cambio de pendiente debido a:

- ✧ **Diferente origen:**  
galáctico vs extragaláctico
- ✧ **Diferente composición:**  
protones vs núcleos pesados

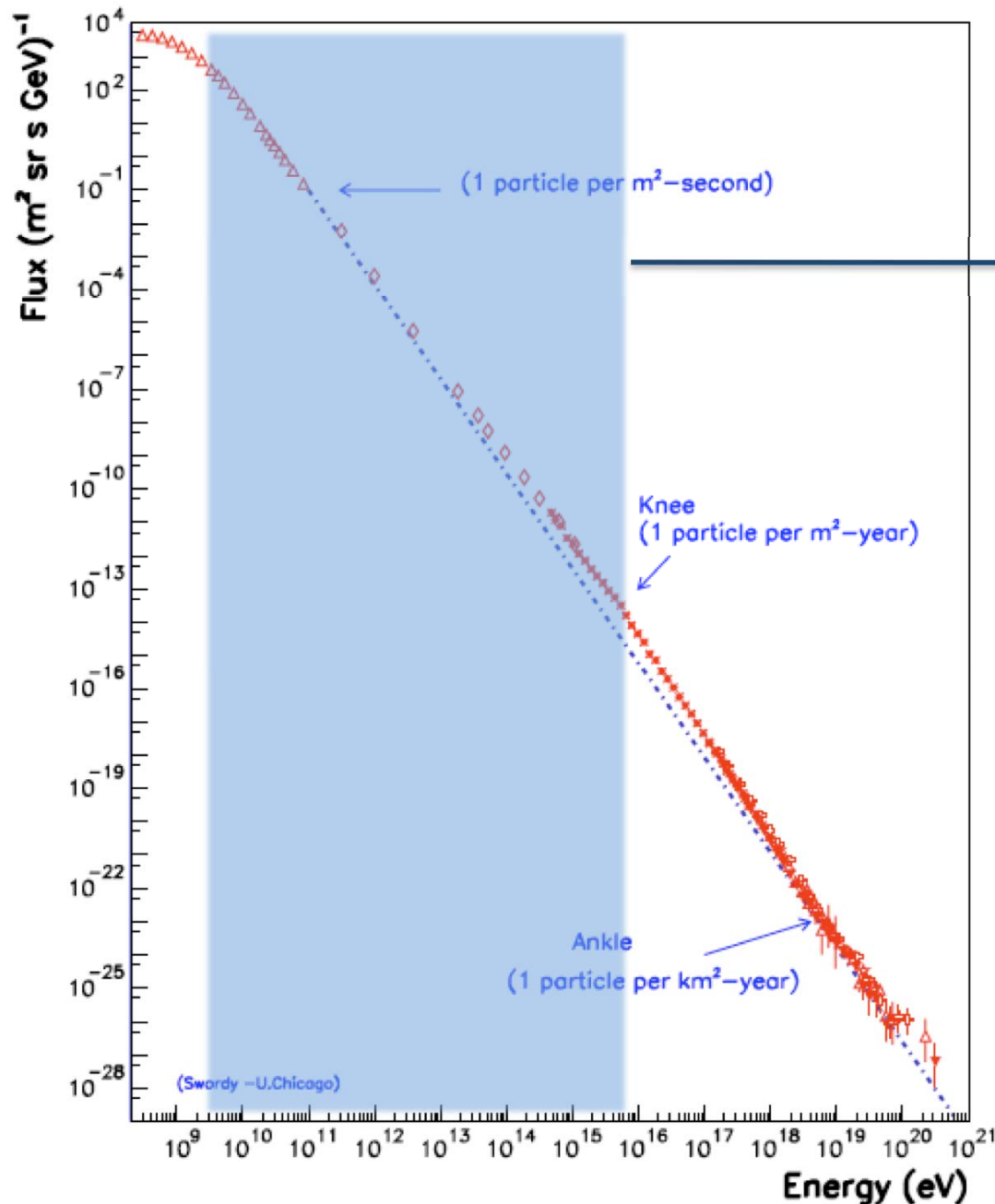
# Fuentes de los RCs



RCs con energías por debajo de 1 GeV muestran correlación temporal con la actividad solar: **ORIGEN EN EL SOL**

**Problema:** la dirección de llegada de los RCs (partículas cargadas) no se corresponde con la de sus fuentes debido a la difusión en el campo magnético galáctico

# Fuentes de los RCs

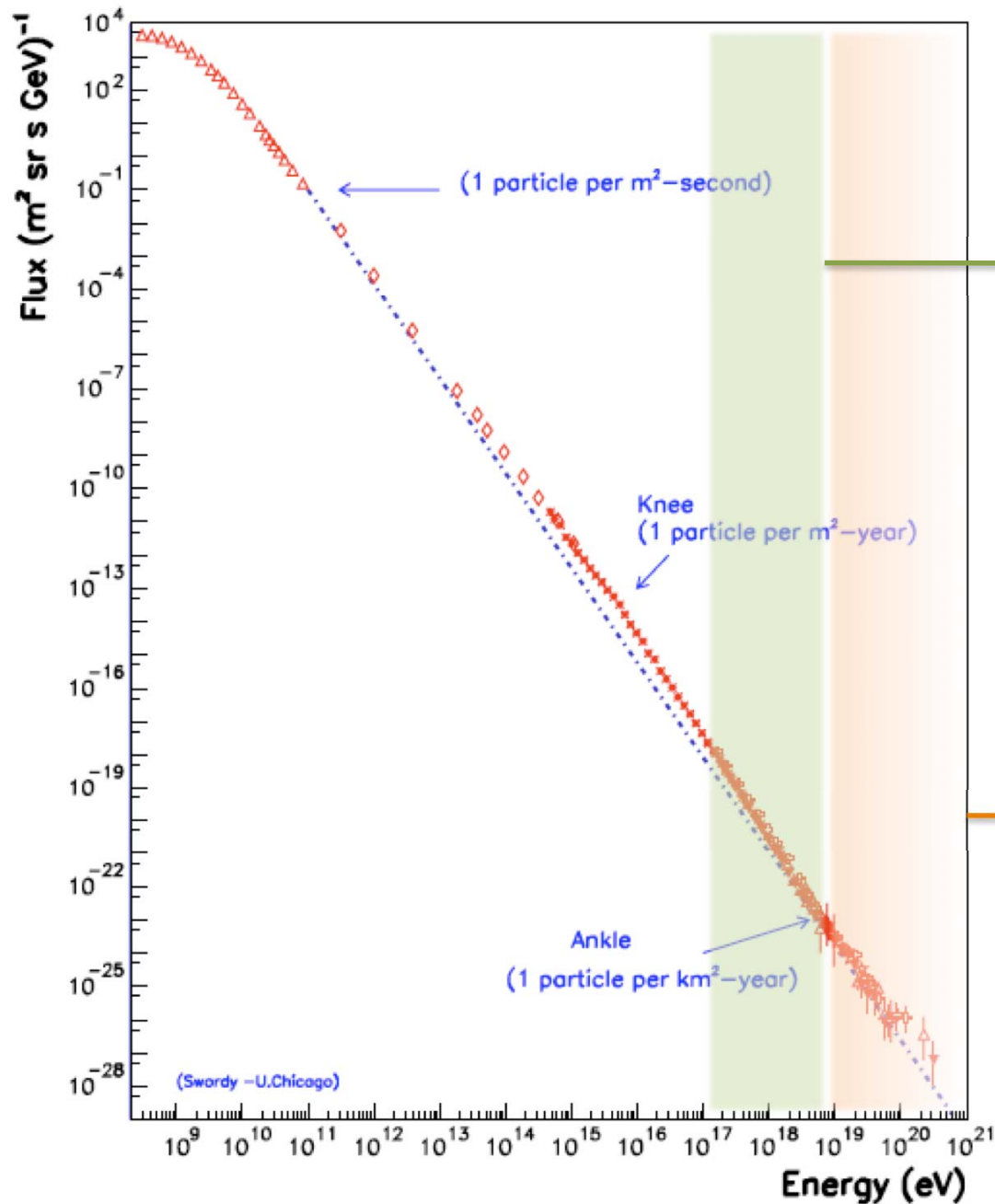


A energías mayores, el flujo de RCs presenta anticorrelación temporal con la actividad solar: **VIENEN DE MÁS ALLÁ DEL SISTEMA SOLAR**

Existen varios argumentos que sugieren que la mayor parte de los RCs desde 1 GeV hasta, al menos, la región de la *rodilla* están confinados en nuestra Galaxia.

Probablemente el grueso de RCs en esta región de energías ( $<10^{14}$  eV) se produce en los **REMANENTES DE SUPERNOVA**

# Fuentes de los RCs

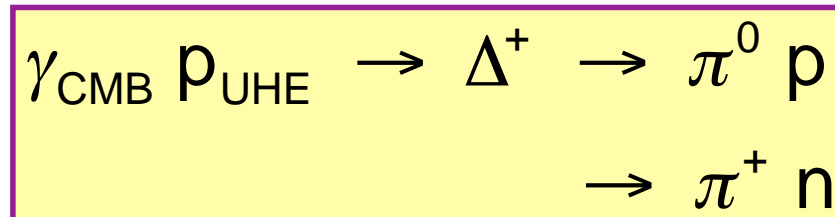
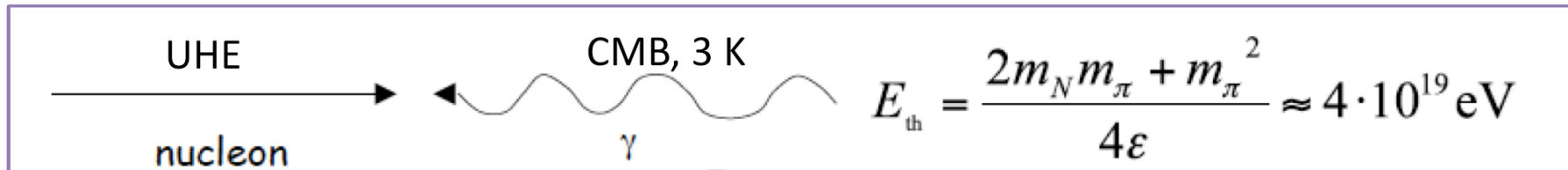


Alrededor de la región del tobillo, la interpretación es una transición de una componente **galáctica a una extragaláctica**.

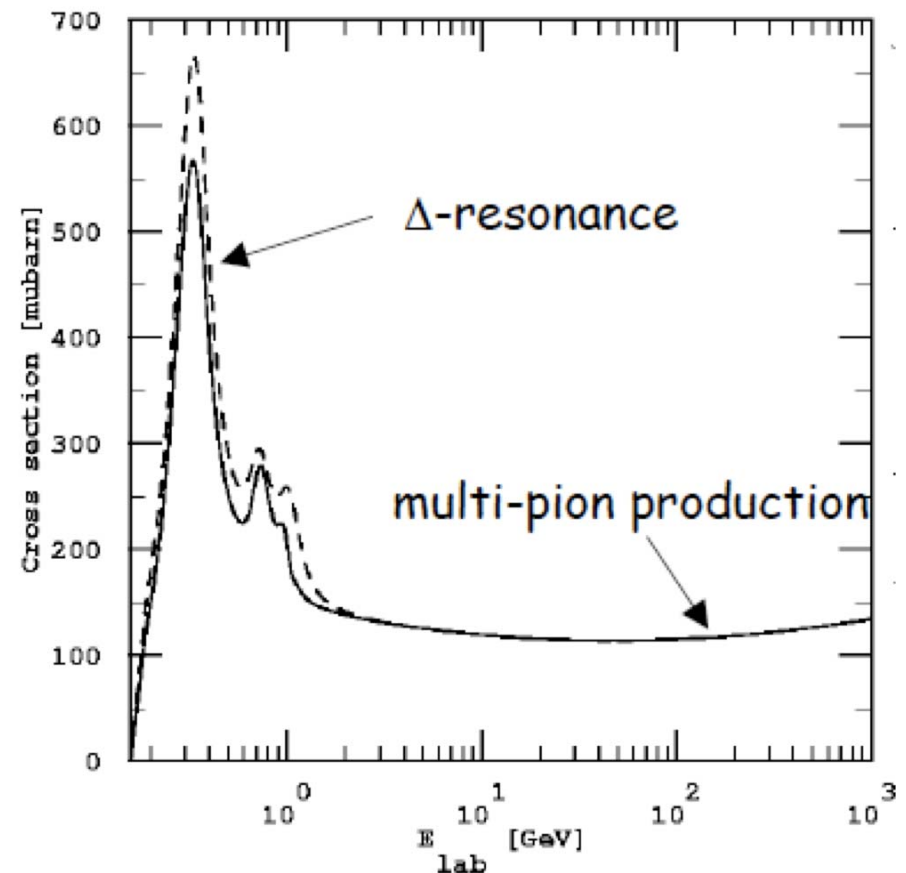
Más allá de  $10^{19}$  eV, se espera que los RCs tengan, en general, un origen **extragaláctico**

# El efecto GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin)

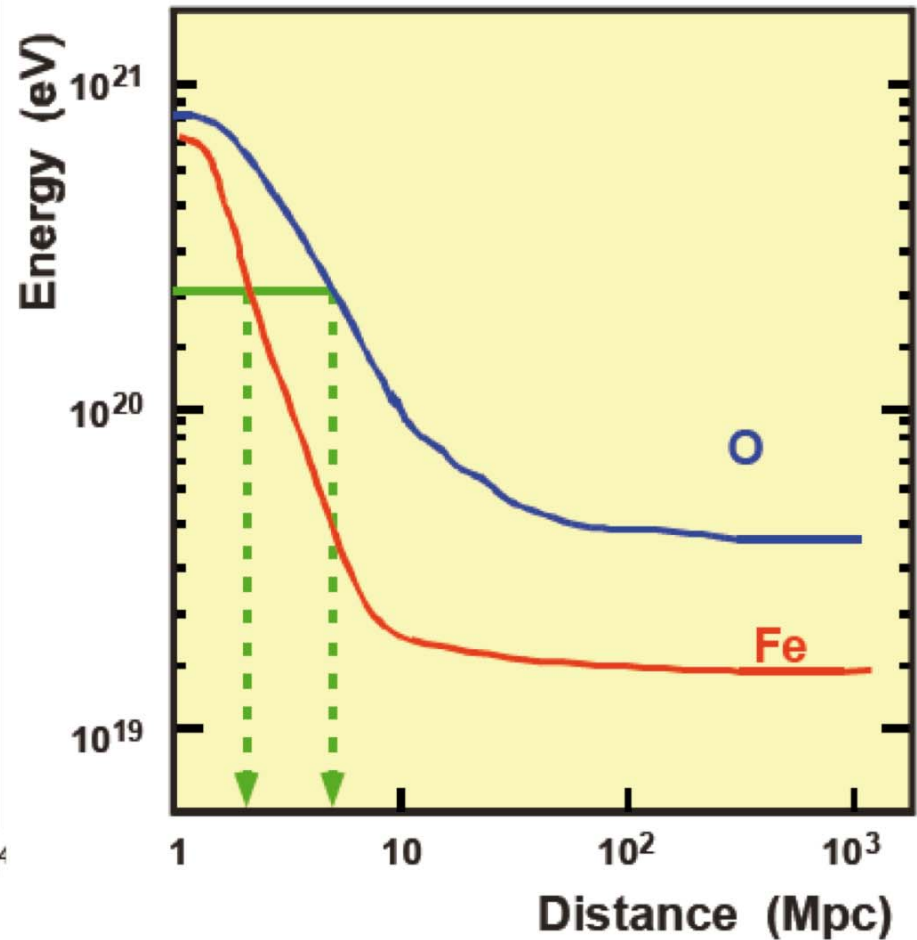
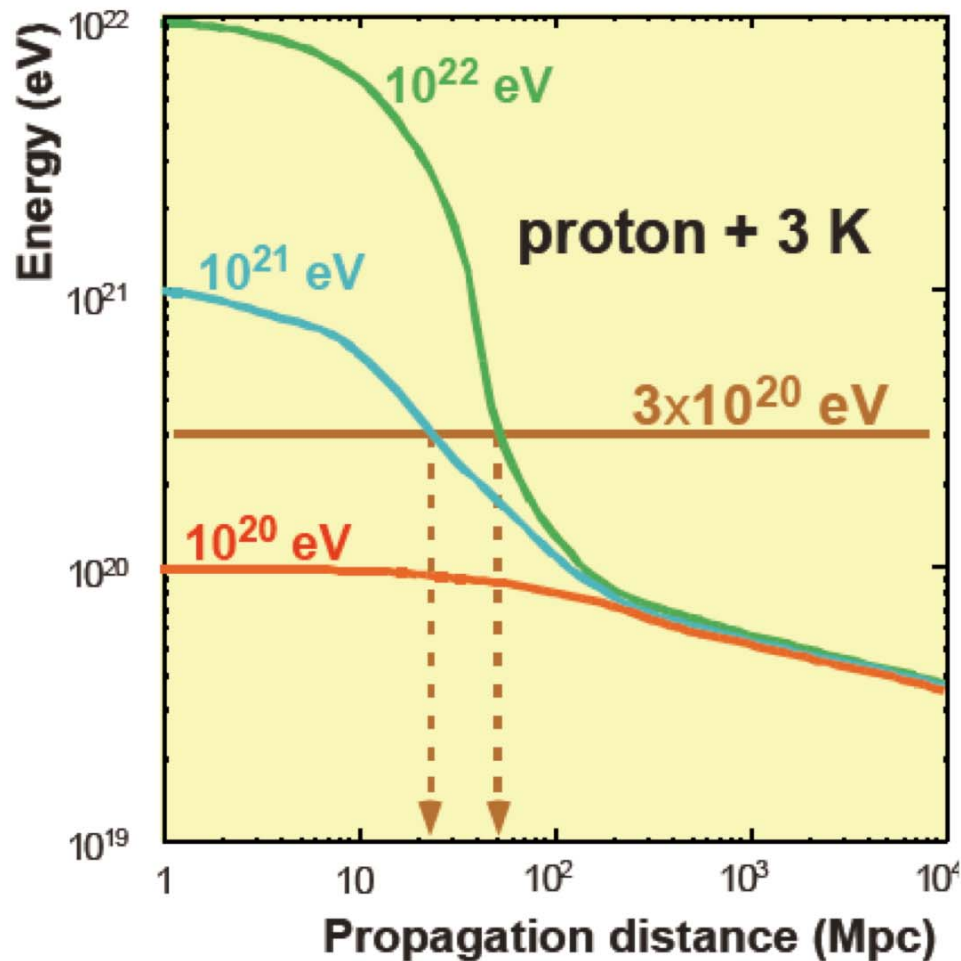
Los nucleones de alta energía pueden producir piones al interactuar con los fotones del Fondo Cósmico de Microondas



Los núcleos pesados de alta energía  
Sufren foto-disociación



# El “corte” GZK (cut-off): pérdidas de energía



Las fuentes de UHECRs con  $E > 10^{20}$  eV deben estar “cerca” (distancia  $< 50$ - $100$  Mpc,  $z < 0.01$ ). Los campos magnéticos no son lo bastante grandes para desviar los RCs

**Astronomía con UHECRs ??**