



**MCTP** Mesoamerican Centre  
for Theoretical Physics  
*Centro Mesoamericano de Física Teórica*



# ASTROPARTÍCULAS

XVIII Mexican School of Particles and Fields  
And

2018 University of Sonora School of High Energy Physics  
21-27 October 2018, Hermosillo, Sonora

Karen Salomé Caballero Mora  
FCFM+MCTP-UNACH

[karen.scm@gmail.com](mailto:karen.scm@gmail.com)

# ESTRUCTURA DE LAS SESIONES

- ¿Qué son las astropartículas?
- Un poco de historia
- ¿Qué nos interesa de las astropartículas?
- El espectro de los rayos cósmicos
- Chubascos atmosféricos
- Fuentes de los rayos cósmicos
- Mecanismos de propagación
- Modelos hadrónicos
- Composición química de la masa primaria
- Detectores
- Distintos experimentos
- Ejemplos de análisis de datos y resultados importantes

# ESTRUCTURA DE LAS SESIONES

- ¿Qué son las astropartículas?
- Un poco de historia
- ¿Qué nos interesa de las astropartículas?
- El espectro de los rayos cósmicos
- Chubascos atmosféricos
- Fuentes de los rayos cósmicos
- Mecanismos de propagación
- Modelos hadrónicos
- Composición química de la masa primaria
- Detectores
- Distintos experimentos
- Ejemplos de análisis de datos

**FIN PARTE 1**

# ¿QUÉ SON LAS ASTROPARTÍCULAS?

## PARTÍCULAS QUE VIENEN DESDE FUERA DE NUESTRO PLANETA:

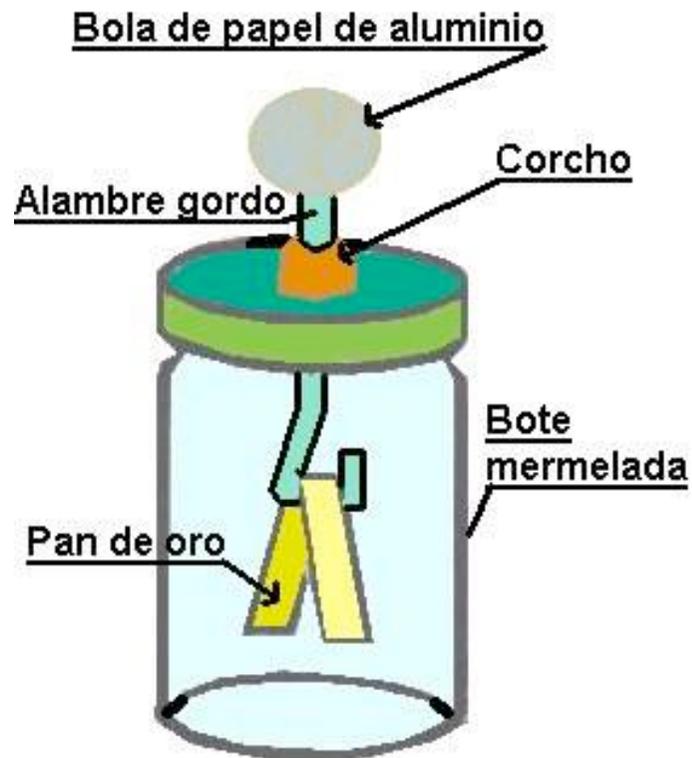
- Rayos  
Cósmicos  
(RC)
- Electrones
  - Núcleos atómicos
  - Muones
  - Neutrones

Su origen, mecanismos de aceleración y mecanismos de propagación así como su composición química no son totalmente entendidos

- Rayos gamma
- Neutrinos

# UN POCO DE HISTORIA

- Los rayos cósmicos se descubrieron cuando se observaba la descarga de un electroscopio a distintas alturas



Víctor Hess en 1911

# UN POCO DE HISTORIA

En México y a nivel mundial, uno de los pioneros en este campo de investigación fue Manuel Sandoval Vallarta

- Vallarta descubrió, junto con Georges Lemaître , que la intensidad de los rayos cósmicos variaba con la latitud porque estas partículas cargadas interactúan con el campo magnético terrestre.
- Cuando trabajó en la UNAM, realizó experimentos con Luis Álvarez y Arthur Compton para mostrar la naturaleza de los rayos cósmicos, como protones.
- Fue asesor de Richard Feynman y coautor de su primera publicación científica en Physical Review, sobre dispersión de los rayos cósmicos.



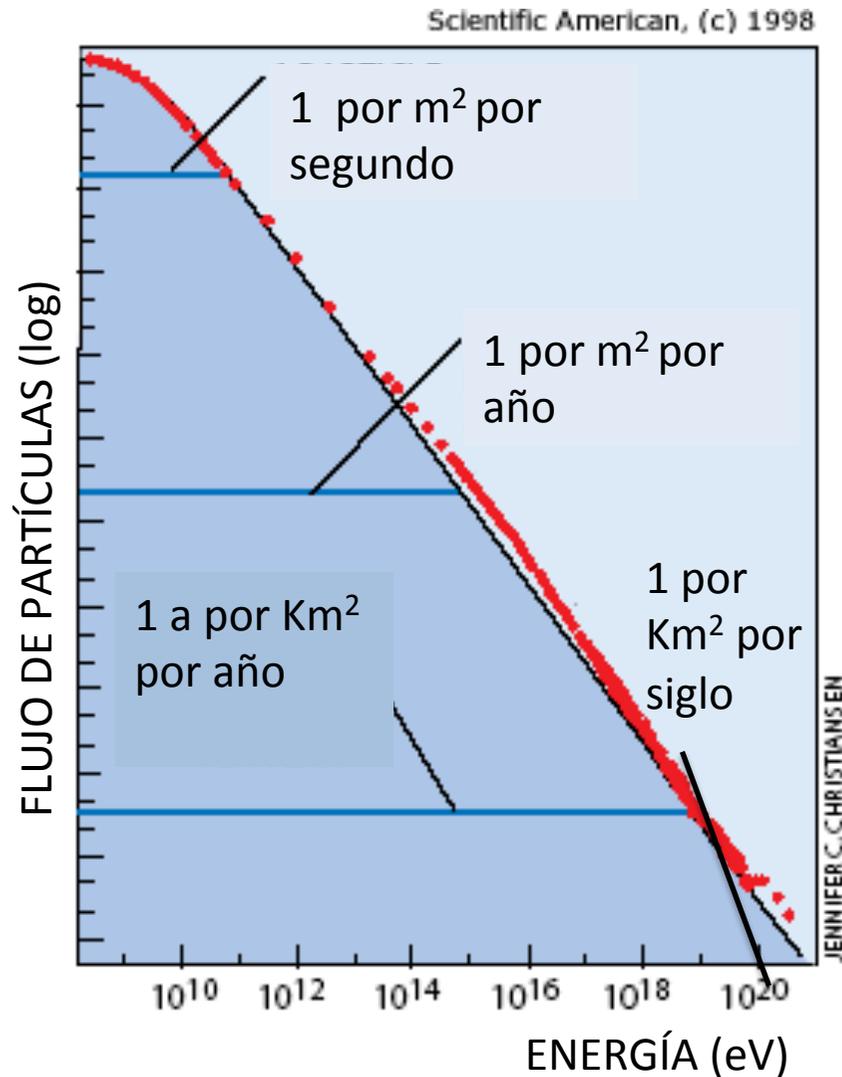
# ¿QUÉ INFORMACIÓN SE PODRÍA OBTENER DE ELLAS?

- Abundancia de elementos (qué tipo de elementos hay y en qué proporción, energía, etc.)  
C, H, Fe, O, He,...
- ¿Tiene el universo formas de materia y/o estructuras sin descubrir? **Materia oscura**, **ondas gravitacionales**, **agujeros negros**, ...
- ¿Existen estrellas o galaxias de antimateria?  $e^+$ ,  $e^-$
- ¿Son diferentes las interacciones de partículas a energías altas?

$\mathcal{LHC}$   $14 \times 10^{12}$  eV   $\mathcal{RC}$   $10^{20}$  eV

karen.scm@gmail.com

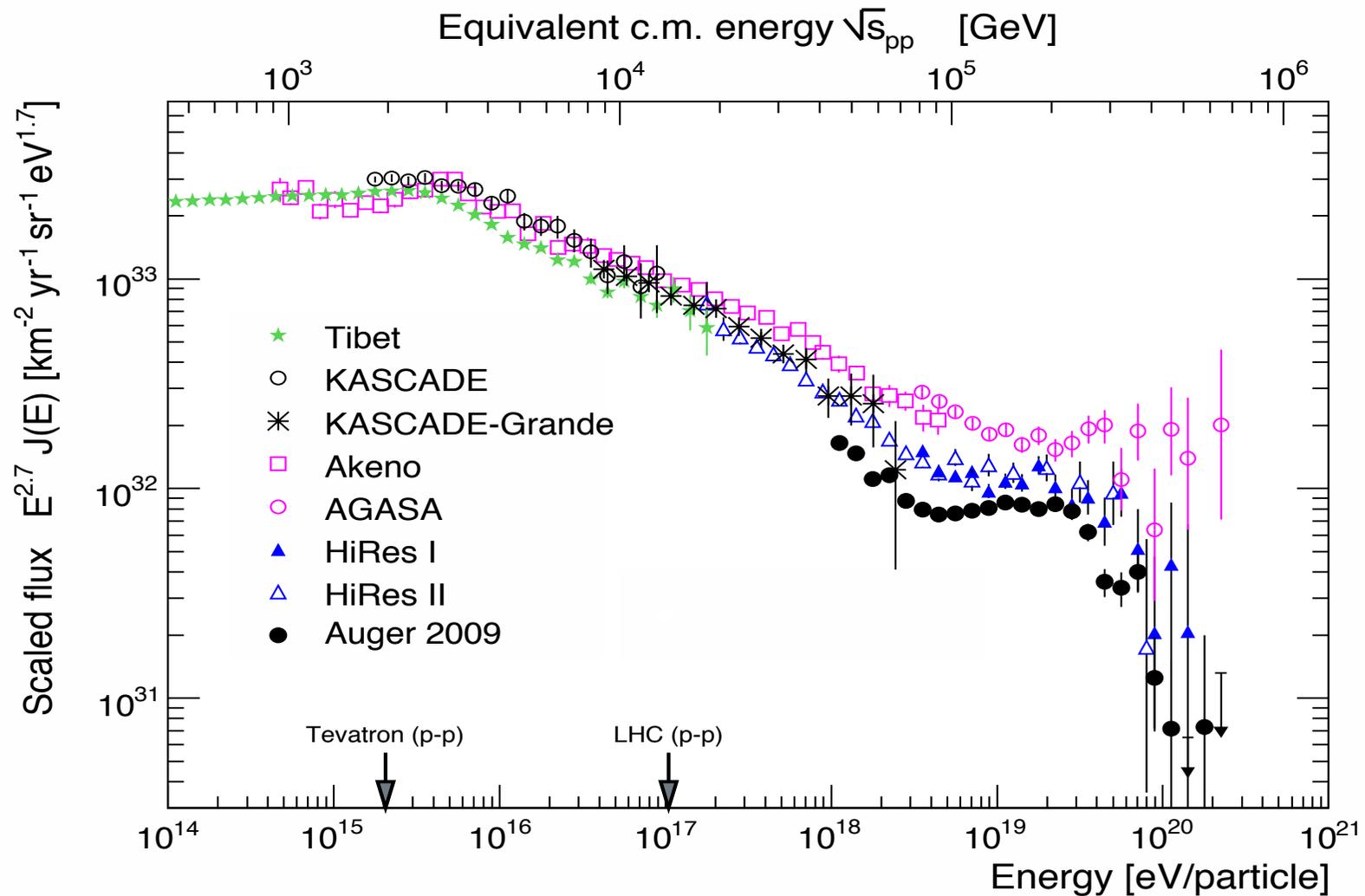
# FLUJO DE RAYOS CÓSMICOS



- Rango de energías:
- $10-10^{20}$  eV
- 1 eV: energía cinética adquirida por un solo electrón cuando se mueve a través de un potencial eléctrico de 1V
- $10^{12}$  eV es aproximadamente la energía de un mosquito en vuelo

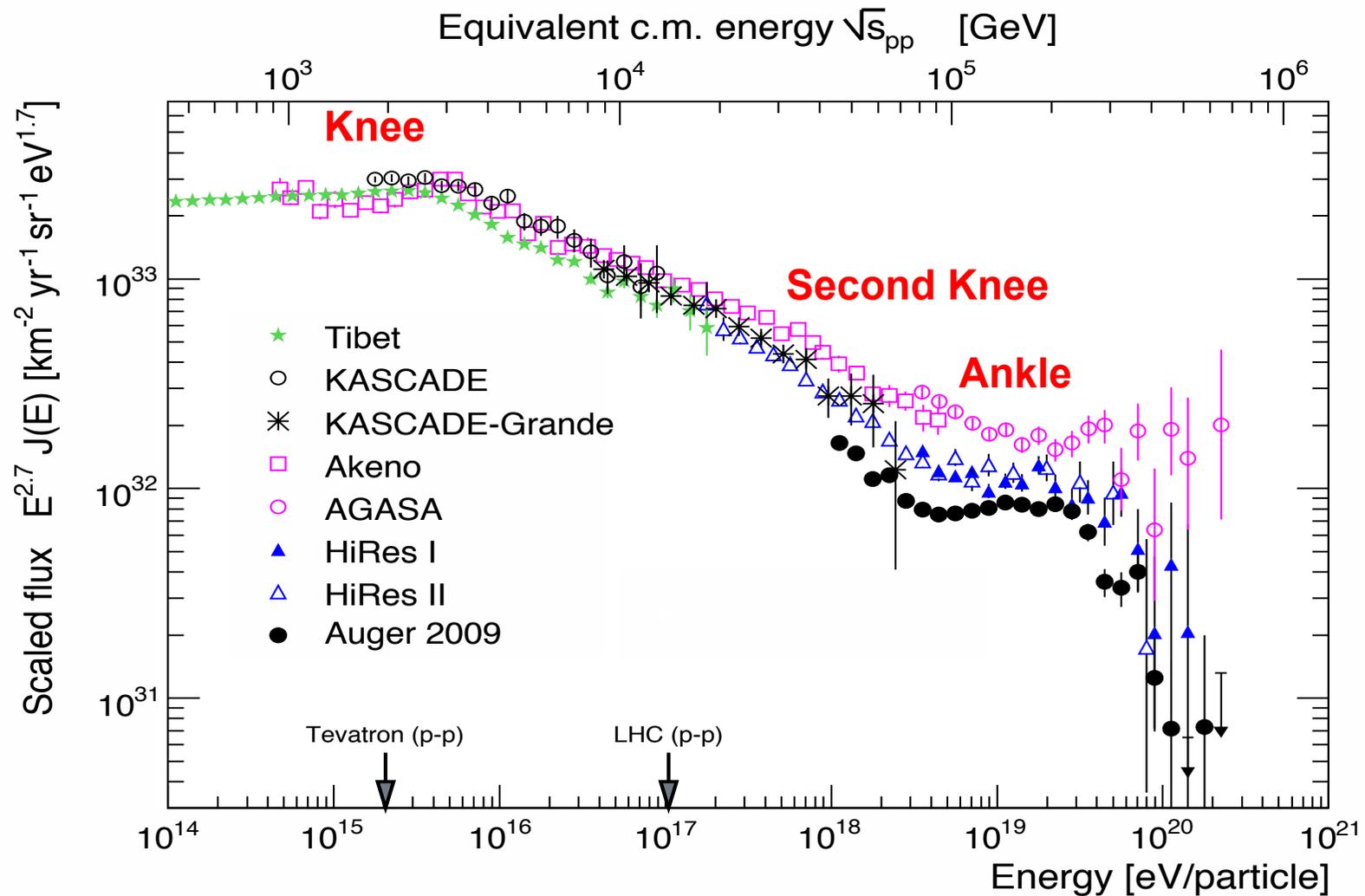
Muon Flux: <http://en.wikipedia.org/wiki/Muon>

# ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS



Flujo para altas energías: 1 /( $\text{Km}^2 \times$  siglo)

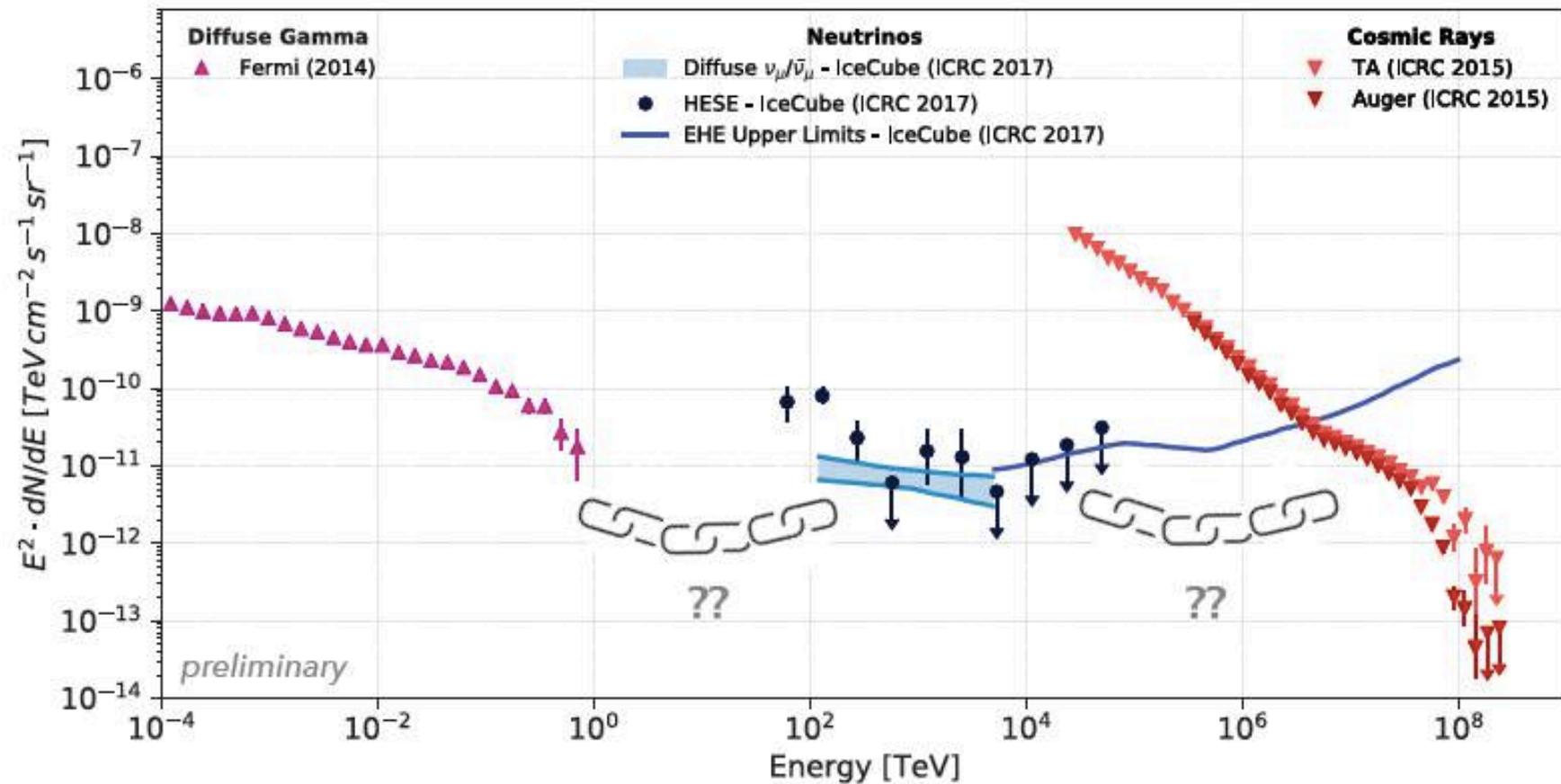
# ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS



Flujo para altas energías: 1 /( $\text{Km}^2 \times$  siglo)

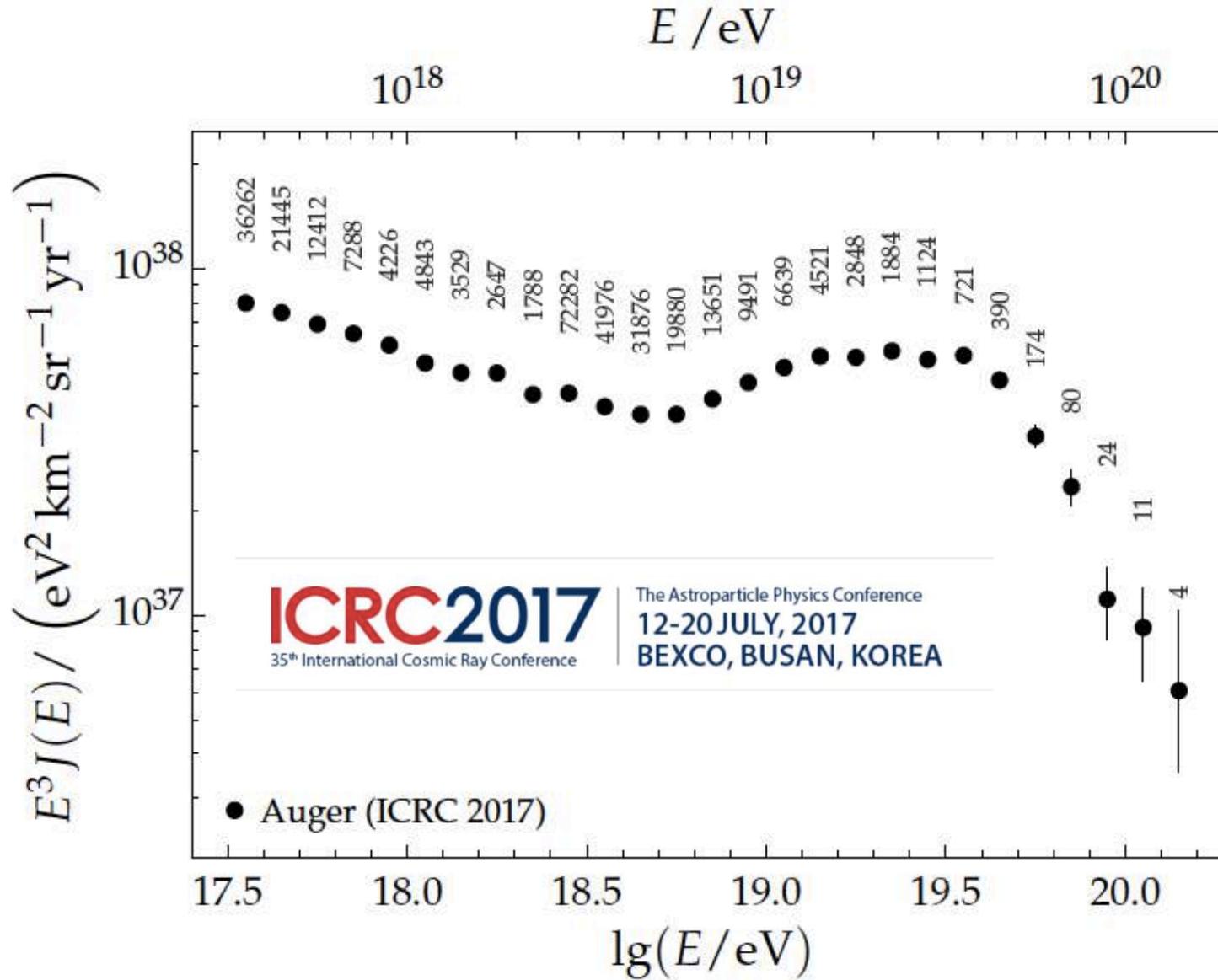
# ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS

A. Turcati, modified from L. Mohrmann, PhD Thesis (2015)



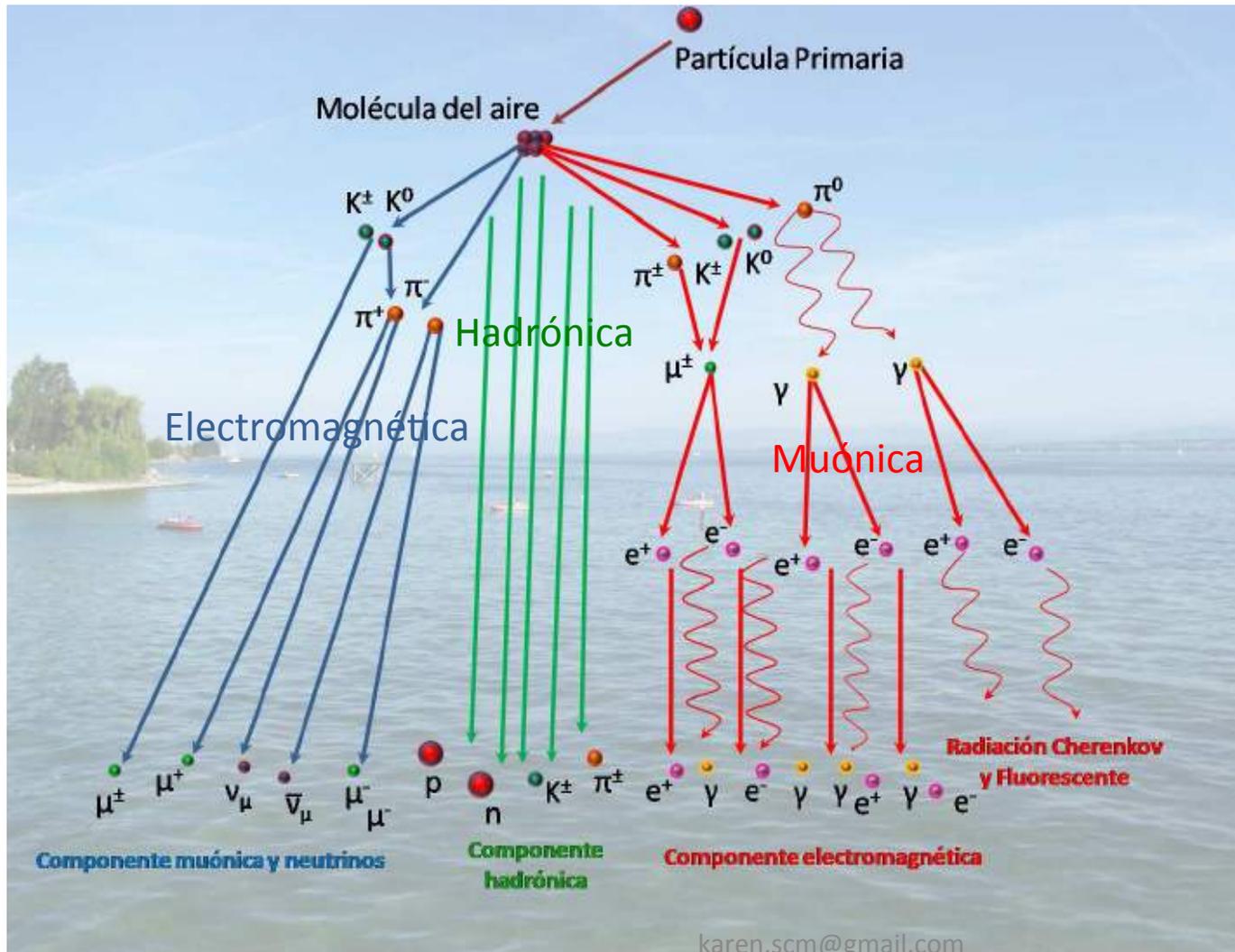
High Energy Multi-Messenger Astronomy, review talk, E. Resconi, ICRC2017

# ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS



# CHUBASCO ATMOSFÉRICO

Cuando una astropartícula alcanza la Tierra, interacciona con las moléculas de la atmósfera y produce una cascada de partículas



- Se producen a una altura de 8 a 10 Km desde la superficie terrestre
- Ocupan una extensión del orden de  $\text{Km}^2$

# PROCESOS EN LOS CHUBASCOS ATMOSFÉRICOS

1.- **Radiación de frenado (Bremsstrahlung):** Las partículas cargadas interactúan con los núcleos atómicos del medio y generan fotones. La pérdida de energía por este proceso está dada por:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{N}{A} \int_0^{E^2 - mc^2} \sigma_{br}(E, k) k dk$$

Donde  $E$  es la energía de la partícula cargada,  $k$  la energía del fotón emitido,  $A$  es la masa atómica  $\sigma_{br}$  es la sección eficaz de Bremsstrahlung para electrones (Heitler-Bethe, 1934)

2.- **Producción de pares:** Proceso inverso a Bremsstrahlung, la sección eficaz se calcula sustituyendo  $e^+$  y  $e^-$  por el electrón antes y después del proceso, quedando como:

$$\sigma_{pair}(k, E) = \sigma_{br}(E, k) \frac{E^2}{k^2} = \frac{AZ^2 \alpha r_e^2}{k} G(k, E)$$

Donde  $k$  es la energía del fotón primario y  $E$  la del par

# PROCESOS EN LOS CHUBASCOS ATMOSFÉRICOS

1.- **Ionización:** Excitación e ionización de átomos, la energía perdida por unidad de profundidad está dada por

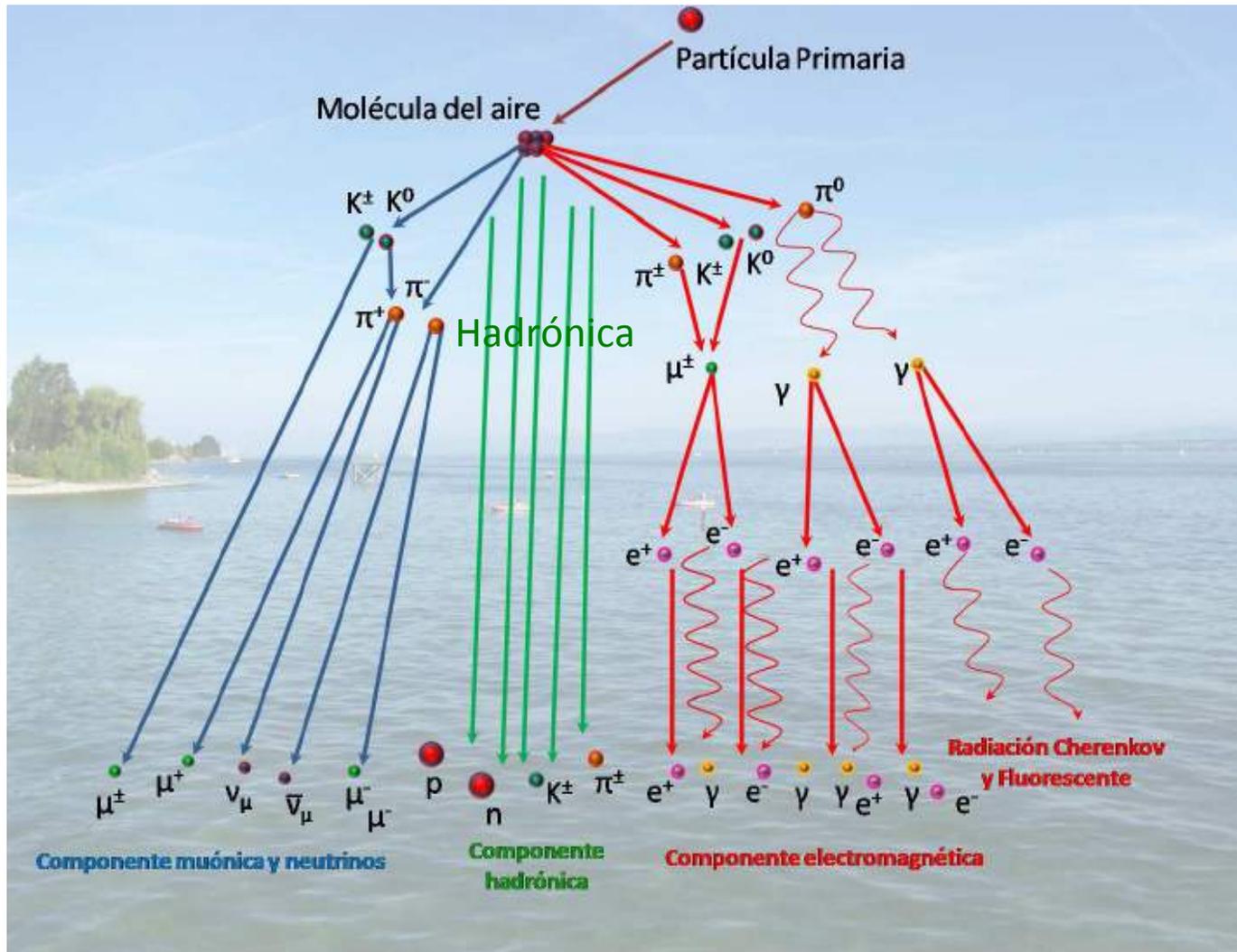
$$\frac{dE}{dx} = -\frac{N_A Z}{A} \frac{2\pi(z e^2)^2}{M v^2} \left[ \ln \frac{2M v^2 \gamma^2 W}{I^2} - 2\beta^2 \right]$$

Donde  $I$  es el potencial medio de ionización,  $W$  es la máxima energía de pérdida;  $Z$  el número atómico del medio;  $A$  el número de masa,  $N_A$ , el número de Avogadro,  $ze$  es la carga de la partícula,  $v$  su velocidad,  $M$  su masa, y  $\gamma$  y  $\beta$  caracterizan la energía y momento de la partícula a través de:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ y } \beta = \frac{v}{c}$$

# CHUBASCO ATMOSFÉRICO

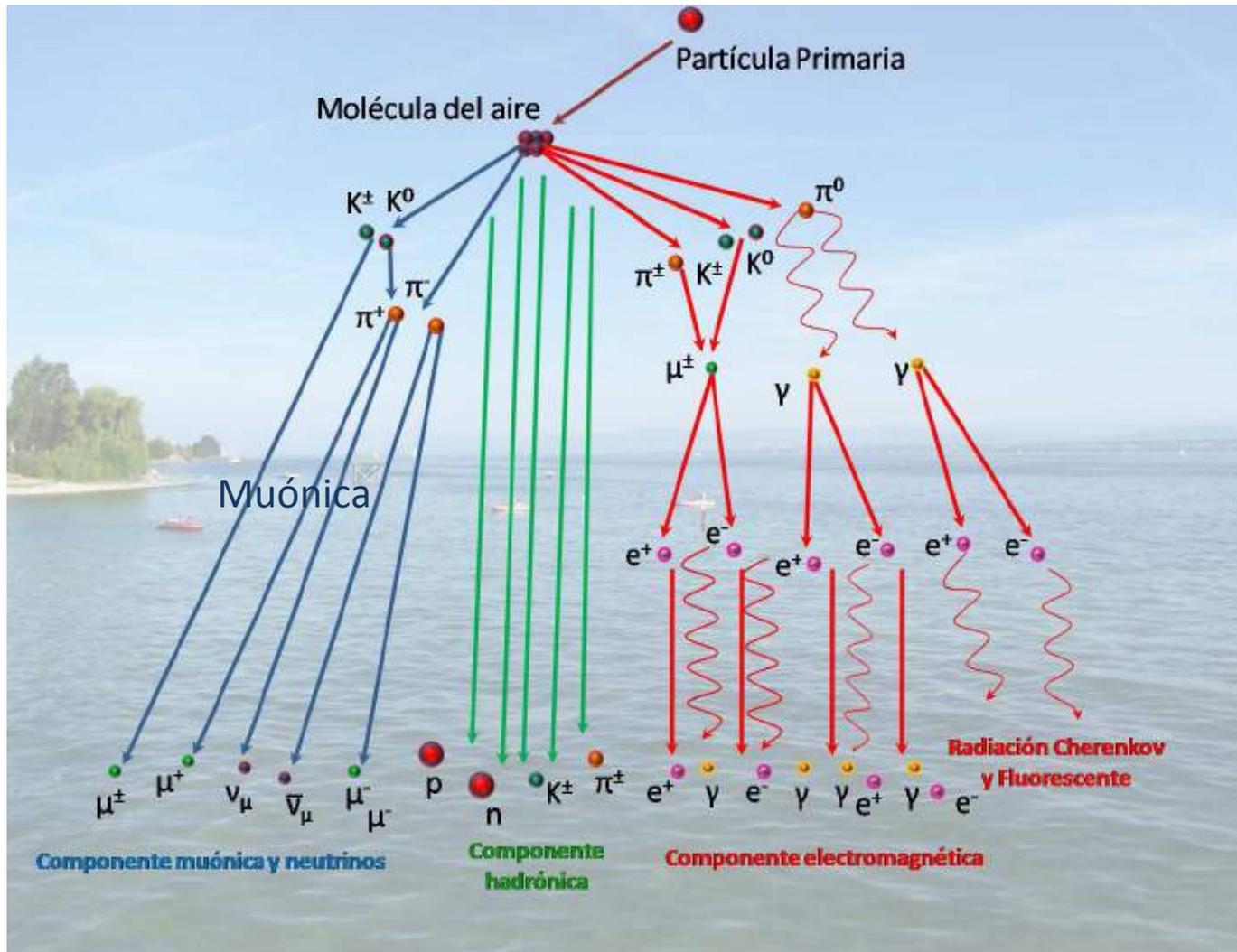
Cuando una astropartícula alcanza la Tierra, interacciona con las moléculas de la atmósfera y produce una cascada de partículas



- Nucleones y otros hadrones de alta energía
- Permanece cerca del eje
- La mayoría de la energía se transfiere a las otras componentes durante todo el tiempo que dura el chubasco

# CHUBASCO ATMOSFÉRICO

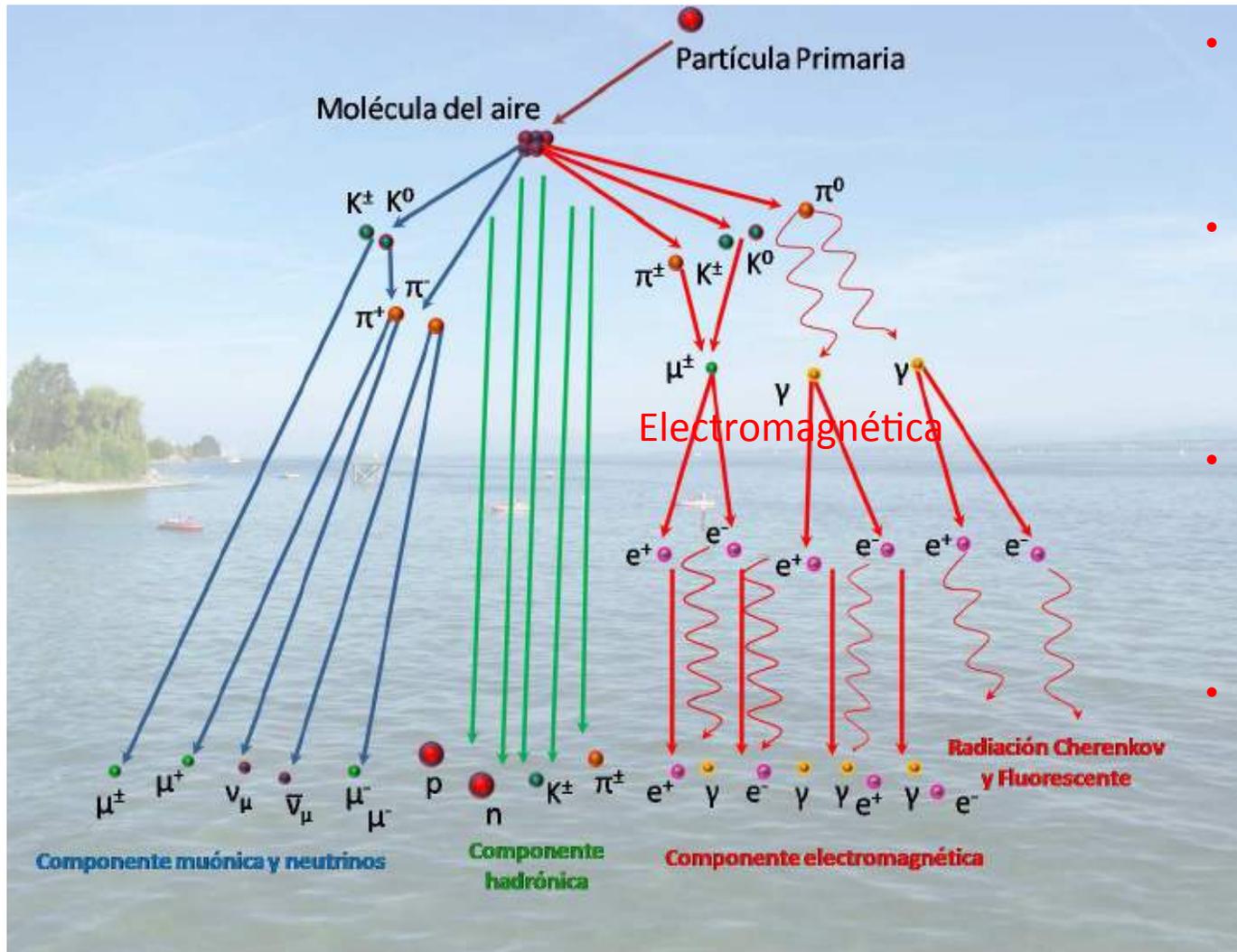
Cuando una astropartícula alcanza la Tierra, interacciona con las moléculas de la atmósfera y produce una cascada de partículas



- Se genera por el decaimiento de  $\pi$ 's de baja energía y K's
- ~10% de las partículas cargadas del chubasco son  $\mu$ 's
- Casi no interactúan, penetran muy profundamente
- Sólo algunos  $\mu$ 's
- de baja energía decaen antes de llegar al suelo, por ionización

# CHUBASCO ATMOSFÉRICO

Cuando una astropartícula alcanza la Tierra, interacciona con las moléculas de la atmósfera y produce una cascada de partículas



- Formada por  $\gamma$ 's del decaimiento de  $\pi$ 's neutros y partículas  $\eta$
- En cada interacción hadrónica más de 1/3 de la energía va a esta componente
- Se desarrolla rápido por medio de radiación de frenado y producción de pares
- Después de la  $E_{crit}$  empieza la pérdida por ionización y el chubasco se absorbe en la atmósfera



# PROTÓN DE $1 \times 10^{18}$ eV

Referencias:

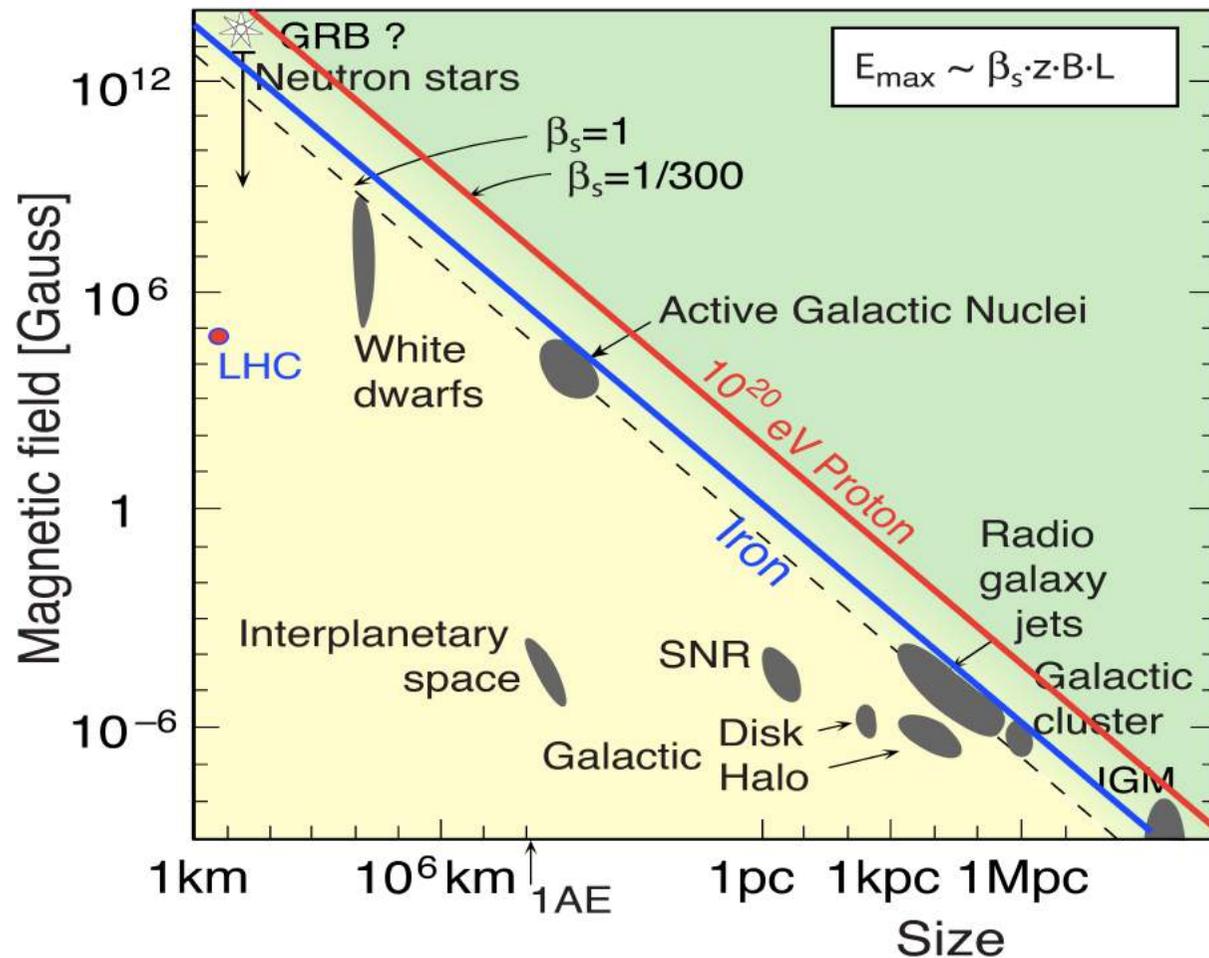
Prpyecto COSMUS:

<http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/aires/>

Sergio Sciutto, programa AIRES:

[http://www2.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/eg\\_Aires.html](http://www2.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/eg_Aires.html)

## GRÁFICA DE HILLAS (1984): POSIBLES FUENTES



Sitios candidatos para  $E=100E$  eV y  $E=1Z$  eV, donde  $1E$  eV= $10^{18}$  eV y  $1Z$  eV= $10^{21}$  eV. Se muestra el tamaño de la región de aceleración  $R$  contra el campo magnético  $B$  de la región capaz de acelerar hasta  $E \sim 10^{20}$  eV. Se observa que SNR y enanas blancas se excluyen

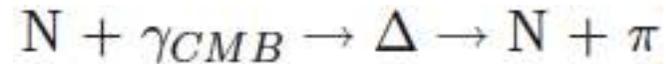
# MODELOS DE ACELERACIÓN Y PROPAGACIÓN:

- **Aceleración de Fermi** (1949) de primer orden o aceleración difusiva de choque (DSA): las partículas ganan energía de forma estocástica cuando atraviesan una nube magnética y encuentran un frente de choque. Hasta un 10% de la energía del choque se transfiere a la partícula. La energía máxima que puede obtenerse es:

$$E_{\max} = kZeB\beta_s R$$

Donde  $B$  es la fuerza del campo magnético en la región del choque,  $\beta_s$  es la velocidad del frente de choque a través del medio interestelar,  $k < 1$  y  $R$  es el tamaño de la región de choque.

- **Efecto GZK:** Supresión del flujo de RC sobre energías alrededor de  $5 \times 10^{19}$  eV (Auger midió una supresión a esa energía)



Con  $N$  nucleón y  $\Delta$  resonancias

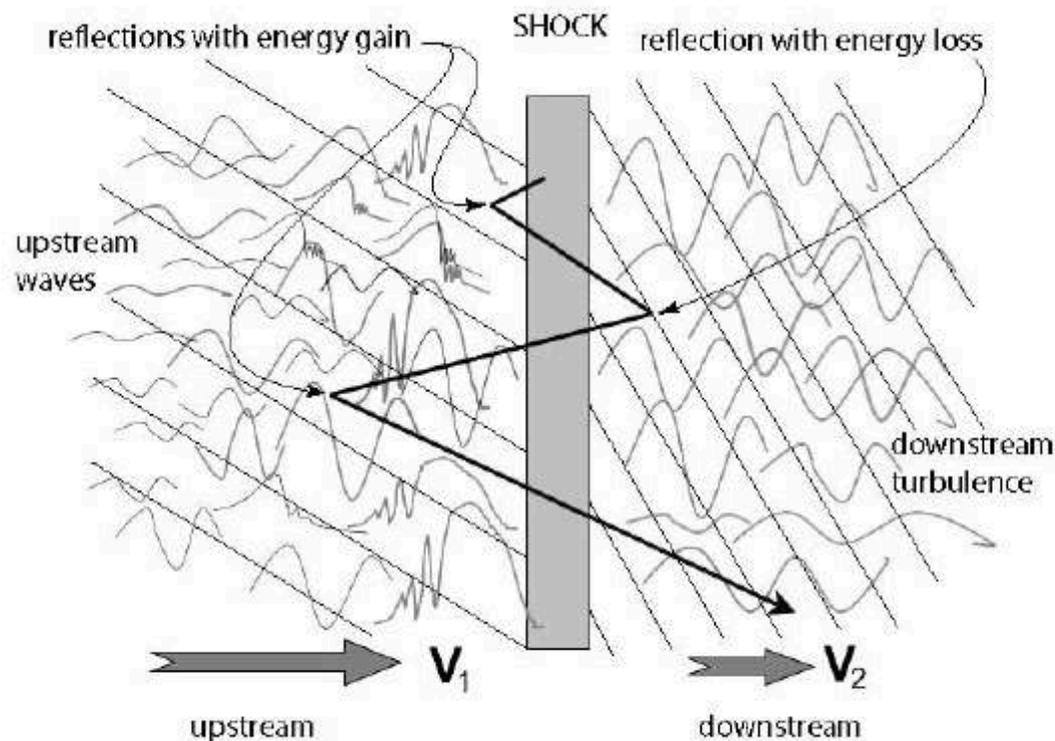
- **Protones interactuando con el CMB (Cosmic Microwave Background):** A través de la producción de pares con un límite de energía de  $10^{18}$  eV, proceso dominante entre la segunda rodilla y el tobillo.
- **Núcleos pesados interactuando con el CMB y la IBR (Infrared Background Radiation):** fotodesintegración y producción de pares con el mismo límite de energía.

## MODELOS DE ACELERACIÓN Y PROPAGACIÓN:

- **Aceleración de Fermi** (1949) de primer orden o aceleración difusiva de choque (DSA): las partículas ganan energía de forma estocástica cuando atraviesan una nube magnética y encuentran un frente de choque. Hasta un 10% de la energía del choque se transfiere a la partícula. La energía máxima que puede obtenerse es:

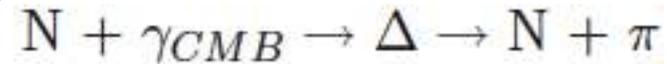
$$E_{\max} = kZeB\beta_s R$$

Donde  $B$  es la fuerza del campo magnético en la región del choque,  $\beta_s$  es la velocidad del frente de choque a través del medio interestelar,  $k < 1$  y  $R$  es el tamaño de la región de choque.

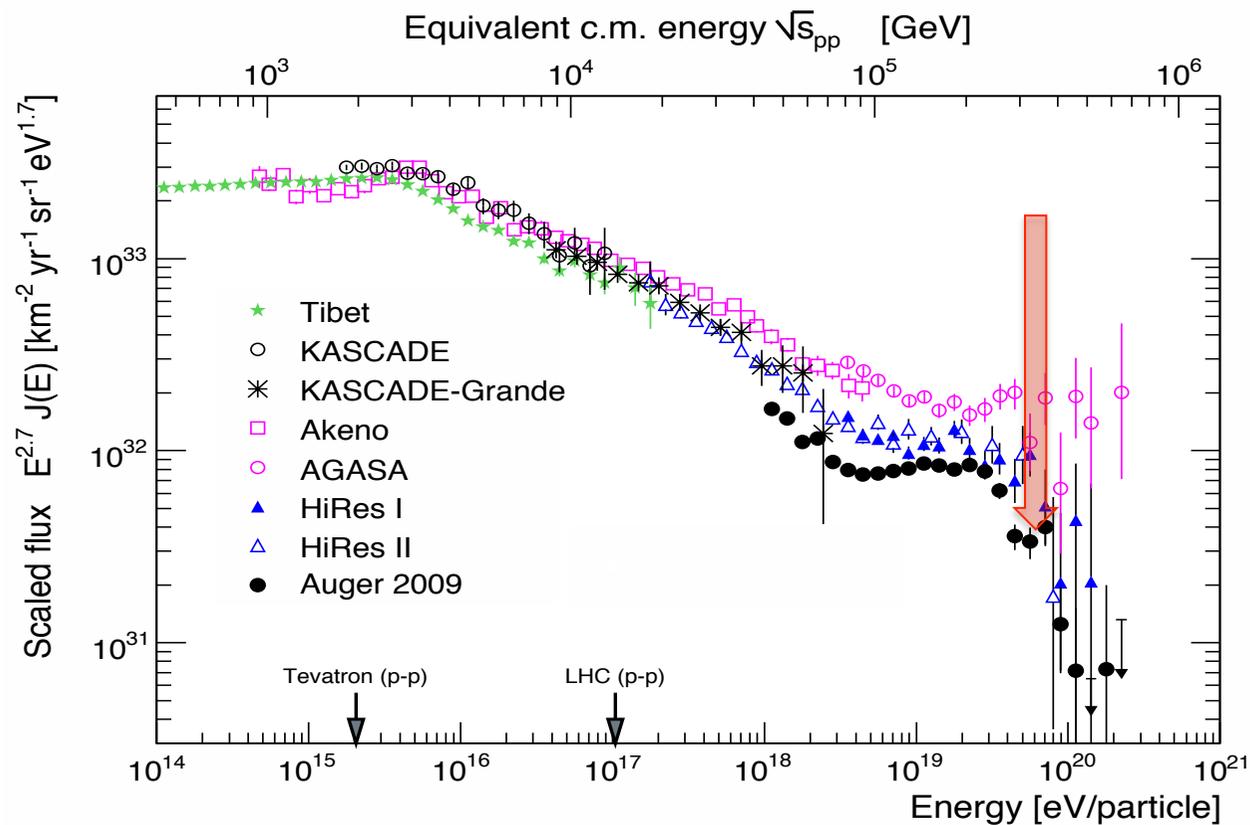


# MODELOS DE ACELERACIÓN Y PROPAGACIÓN:

- **Efecto GZK:** Supresión del flujo de RC sobre energías alrededor de  $5 \times 10^{19}$  eV (Auger midió una supresión a esa energía)



Con N nucleón y  $\Delta$  resonancias



# MODELOS DE ACELERACIÓN Y PROPAGACIÓN:

- **Aceleración de Fermi** (1949) de primer orden o aceleración difusiva de choque (DSA): las partículas ganan energía de forma estocástica cuando atraviesan una nube magnética y encuentran un frente de choque. Hasta un 10% de la energía del choque se transfiere a la partícula. La energía máxima que puede obtenerse es:

$$E_{\max} = kZeB\beta_s R$$

Donde  $B$  es la fuerza del campo magnético en la región del choque,  $\beta_s$  es la velocidad del frente de choque a través del medio interestelar,  $k < 1$  y  $R$  es el tamaño de la región de choque.

- **Efecto GZK:** Supresión del flujo de RC sobre energías alrededor de  $5 \times 10^{19}$  eV (Auger midió una supresión a esa energía)



Con  $N$  nucleón y  $\Delta$  resonancias

- **Protones interactuando con el CMB (Cosmic Microwave Background):** A través de la producción de pares con un límite de energía de  $10^{18}$  eV, proceso dominante entre la segunda rodilla y el tobillo.
- **Núcleos pesados interactuando con el CMB y la IBR (Infrared Background Radiation):** fotodesintegración y producción de pares con el mismo límite de energía.

# MODELOS DE ACELERACIÓN Y PROPAGACIÓN:

Se consideran otras características del medio interestelar como la densidad de materia o peso (gramaje) en la trayectoria recorrida por las partículas.

## Top-down (no tradicionales):

- Decaimiento de partículas exóticas como Defectos Topológicos (TD), materia oscura super masiva (SHDM), interacciones de neutrinos con neutrinos reliquia del fondo (Z-burst).
- Estos modelos se podrían estudiar a través de flujos de fotones y neutrinos, lo cual no ha sido posible, ya que los flujos esperados no han sido medidos. Por tanto estos modelos están desfavorecidos

➤ Modelos específicos: **Fire balls**, **cannon balls**, etc.

Estos mecanismos se simulan: Galprop, Dragon2 (transporte en la galaxia), etc.

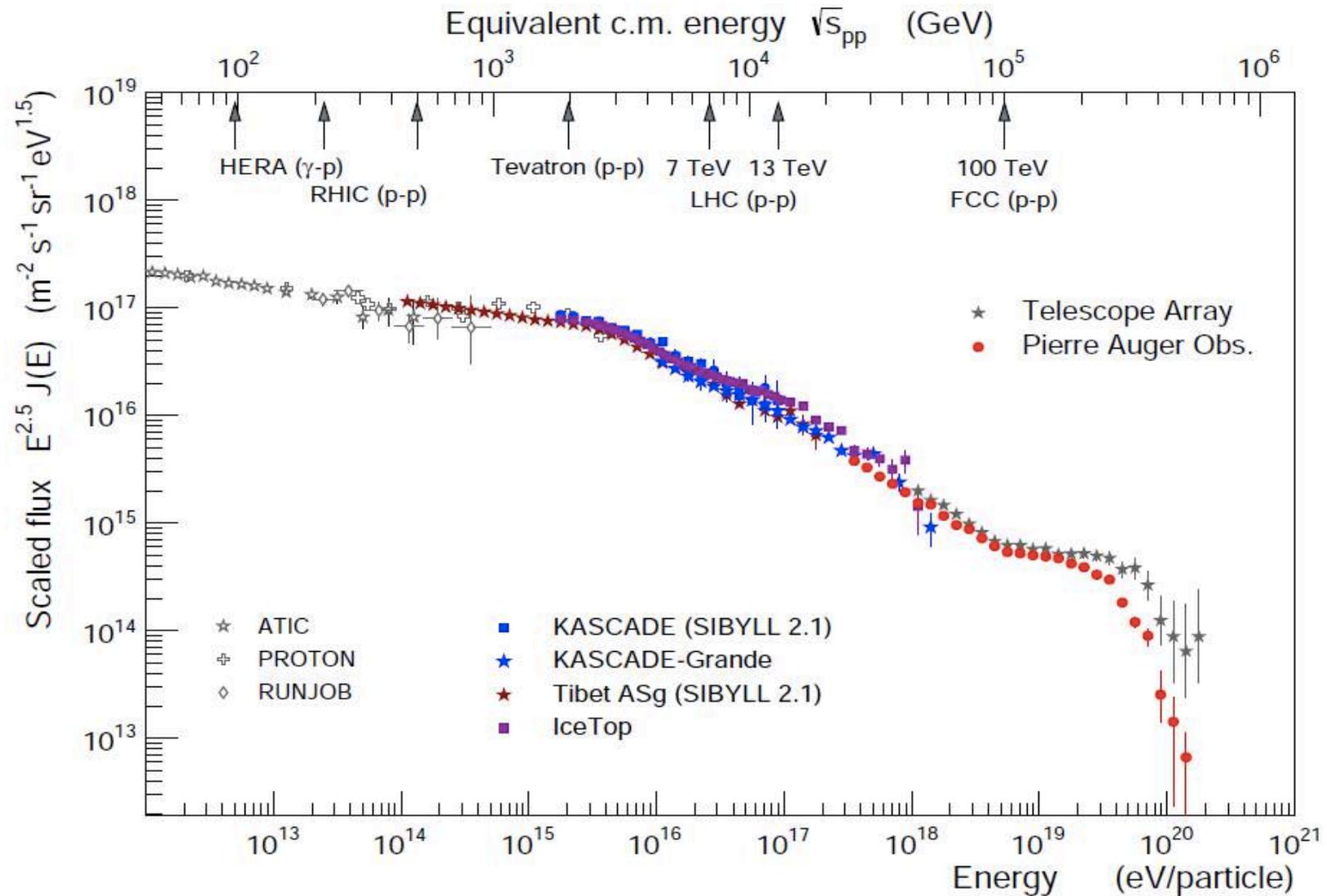
# MODELOS HADRÓNICOS

- Consideran interacciones hadrónicas y procesos Monte Carlo (MC) para análisis de RC
- Los datos del LHC redujeron las incertidumbres de los modelos y excluyen modelos viejos para la composición de la masa de los RC.
- Las incertidumbres que quedan están ligadas a limitaciones de los modelos y falta de blancos nucleares ligeros

## ¿QUÉ QUEREMOS QUE HAGAN?

1. Transferir parte de la energía de un proyectil rápido a partículas más lentas recientemente producidas cuando un blanco es golpeado
2. Excitar el vacío para producir nuevas partículas (considerando la conservación del número cuántico)
3. Conservar la energía total del sistema
4. Seguir el Modelo Estándar (QCD)
  1. Mayormente en el régimen no perturbativo (se necesita fenomenología)
5. Se pueden modificar considerando interacciones en el propio chubasco atmosférico (fenomenología)
6. Se extrapolan los resultados para altas energías

# MODELOS HADRÓNICOS: ESPECTRO DE RC



R. Engel (KIT)

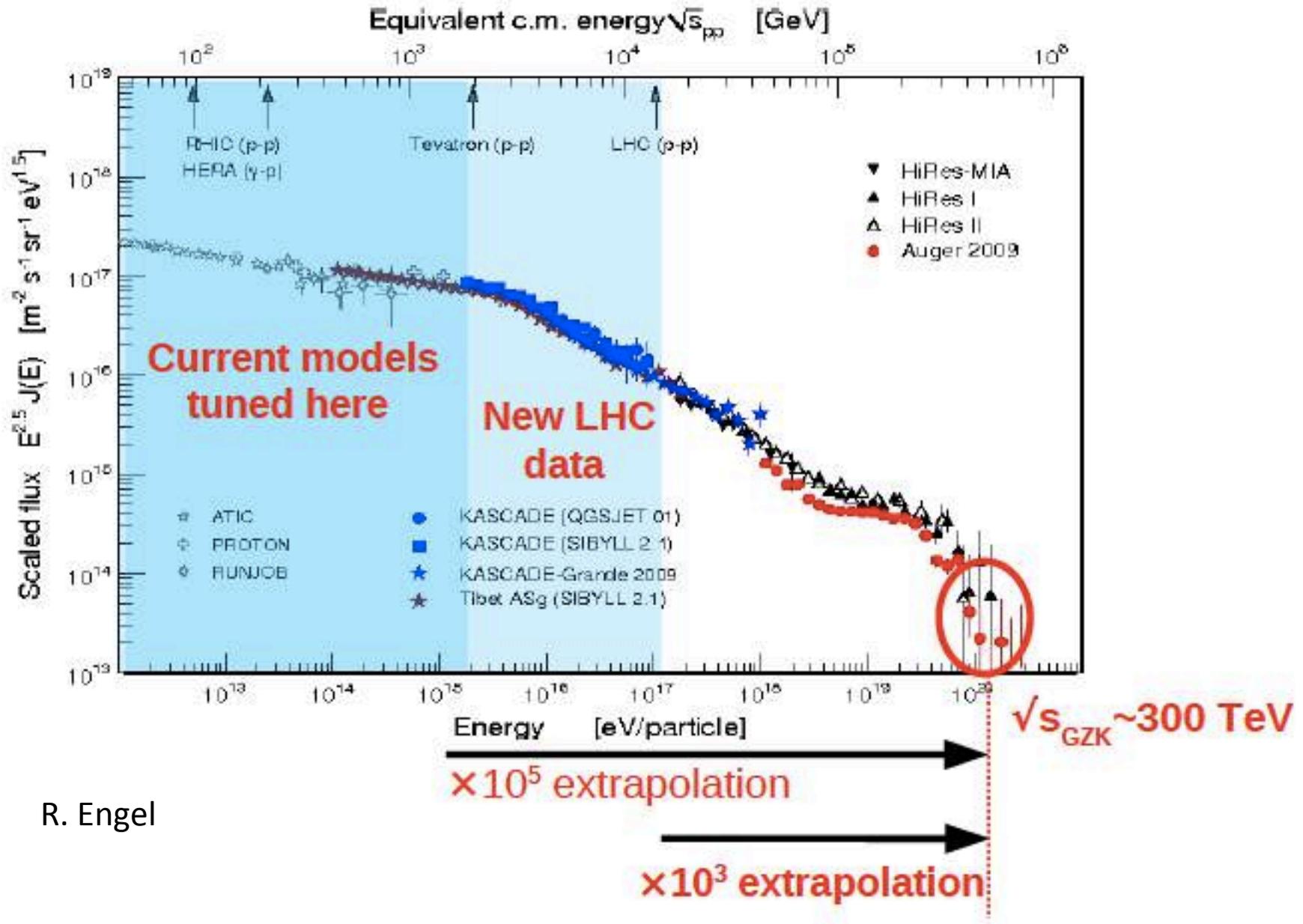
## MODELOS HADRÓNICOS MÁS ACTUALIZADOS:

- **DPMJET III.17-1** , S. Roesler, A. Fedynitch, R. Engel and J. Ranft
  - **EPOS (1.99/LHC)** (de VENUS/NEXUS ), H. J. Drescher, F. Liu, T. Pierog y K. Werner
  - **QGSJET (01/II-03, II-04)**, S. Ostapchenko (junto con N. Kalmykov)
  - **Sibyll (2.1/2.3c)**, E-J Ahn, R. Engel, R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari, F. Riehn, T. Stanev
  - Para más bajas energías PYTHIA
- 
- Al momento estos modelos consideran la misma evolución de la energía, lo que mejora la estimación de la masa del rayo cósmico primario
  - El espectro de fotones y la difracción medida en el LHC todavía no se toma en cuenta en los modelos usados para la simulación de EAS
  - La extrapolación de la interacción p-Aire puede introducir incertidumbre
    - ✧ Colisión p-O necesaria para checar que p-p se extrapola correctamente
    - ✧ P-Pb se podría usar en los modelos (solo EPOS la considera)

Para más información ver:

Air Shower Simulation with a New (first) Generation of post-LHC Hadronic Interaction Models in CORSIKA, (ICRC2017)

# EL LHC Y LOS RC

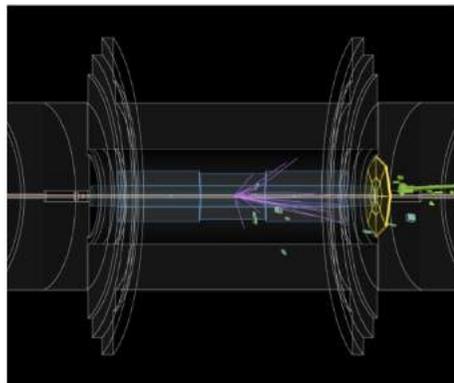


R. Engel

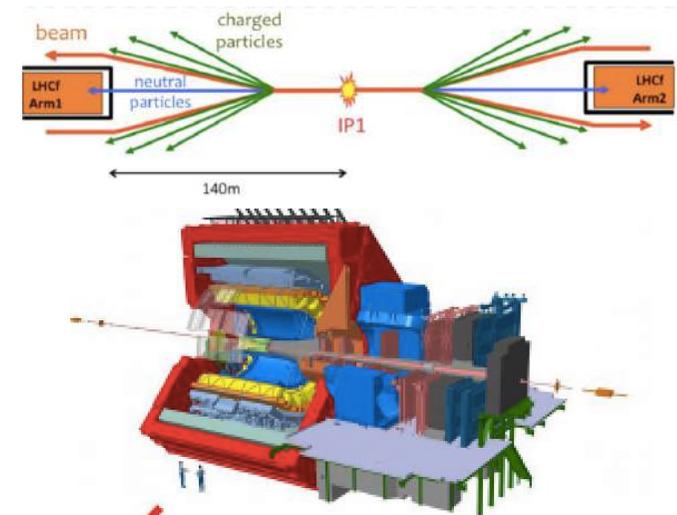
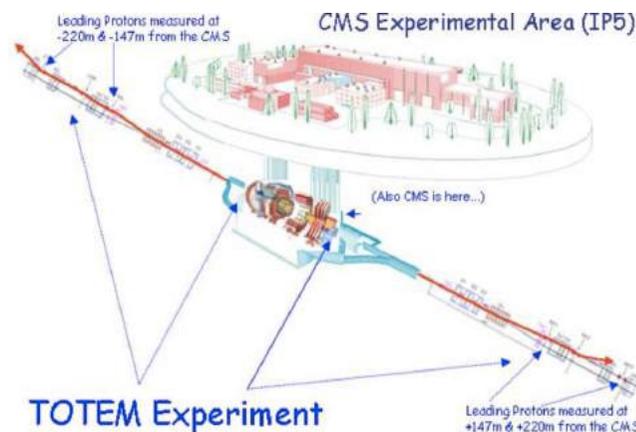
# EL LHC Y LOS RC

Mediciones útiles para los RC:

- Secciones transversales inelásticas a 13 TeV con el trigger ALFA protón en ATLAS
- Secciones transversales totales e inelásticas con TOTEM en CMS, a 2.7 TeV, mediciones a 13 TeV están en progreso
- Espectros de partículas cargadas y flujos de energía en la región central para colisiones pp
- LHCf: detector con dos brazos con calorímetros a cero grados con respecto al haz en ATLAS, dedicado a mediciones relevantes para RC
- ACORDE en ALICE: dedicado a estudiar muones
- Colisiones pPb y PbPb disponibles en ALICE, CMS, ATLAS y LHCb



ALFA- ATLAS



ALICE

\*Albert De Roek, Particle and Astroparticle Physics at the Large Hadron Collider ICRC2017

**FIN PARTE 1**

**¡Gracias!**



**XVIII Mexican School of Particles and Fields and  
2018 University of Sonora School of High Energy Physics**

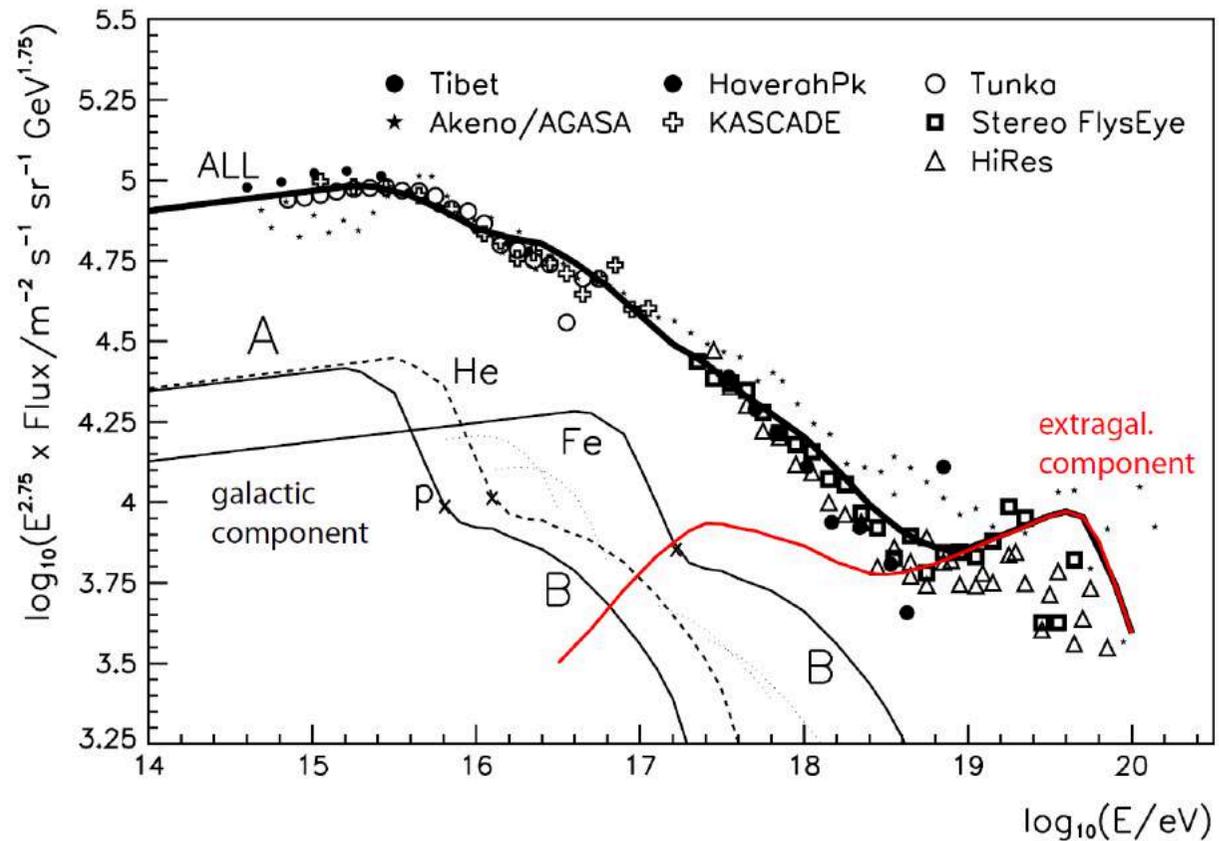
21-27 October 2018  
Hermosillo, Sonora

# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

La composición puede dar una pista sobre qué modelos reproducen los mecanismos de producción y propagación correctamente

Teoría:  
Mezcla o ligera

Experimento:  
Mezcla o Pesada



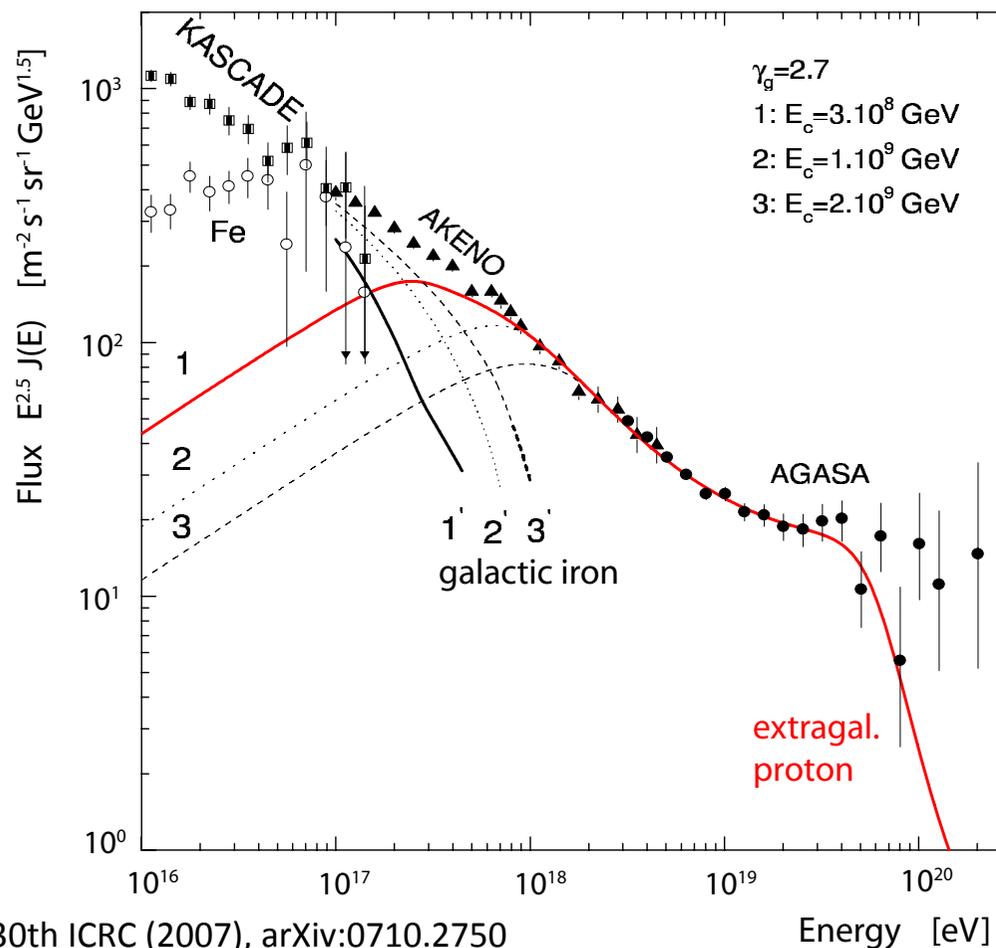
Extragalactic mix composition scenario. A. Hillas astro-ph/0607109 (2006)

# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

La composición puede dar una pista sobre qué modelos reproducen los mecanismos de producción y propagación correctamente

Teoría:  
Mezcla o ligera

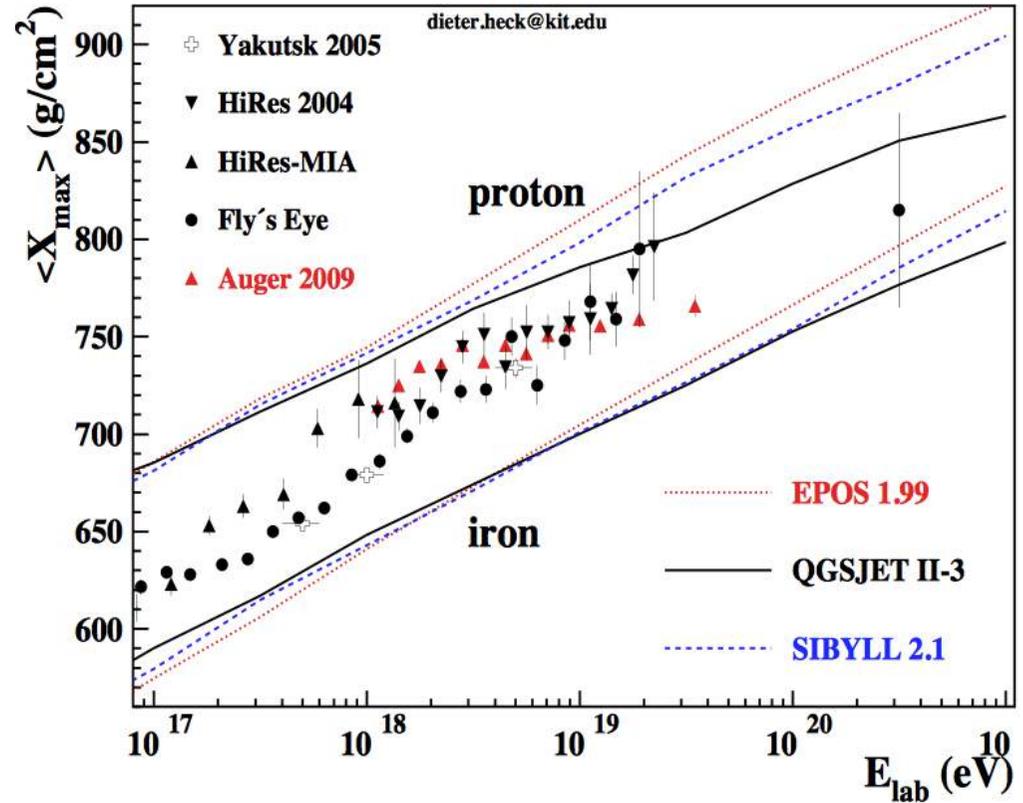
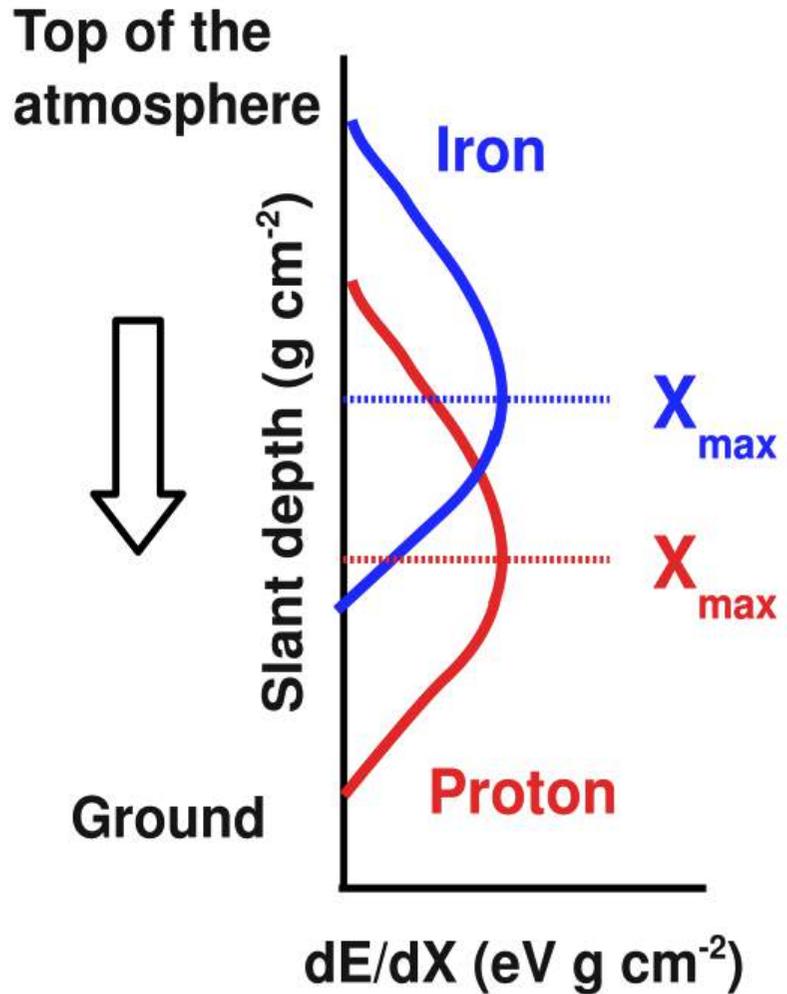
Experimento:  
Mezcla o Pesada



Dip model. V. Berezhinsky 30th ICRC (2007), arXiv:0710.2750

# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

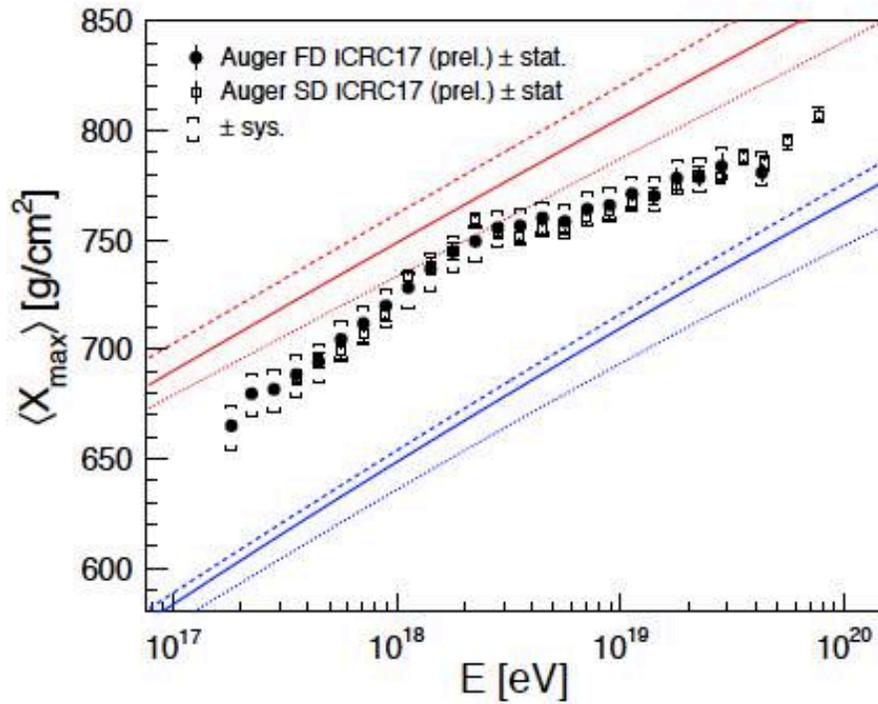
Las variables más sensibles a la composición son el número de muones y la  $X_{max}$



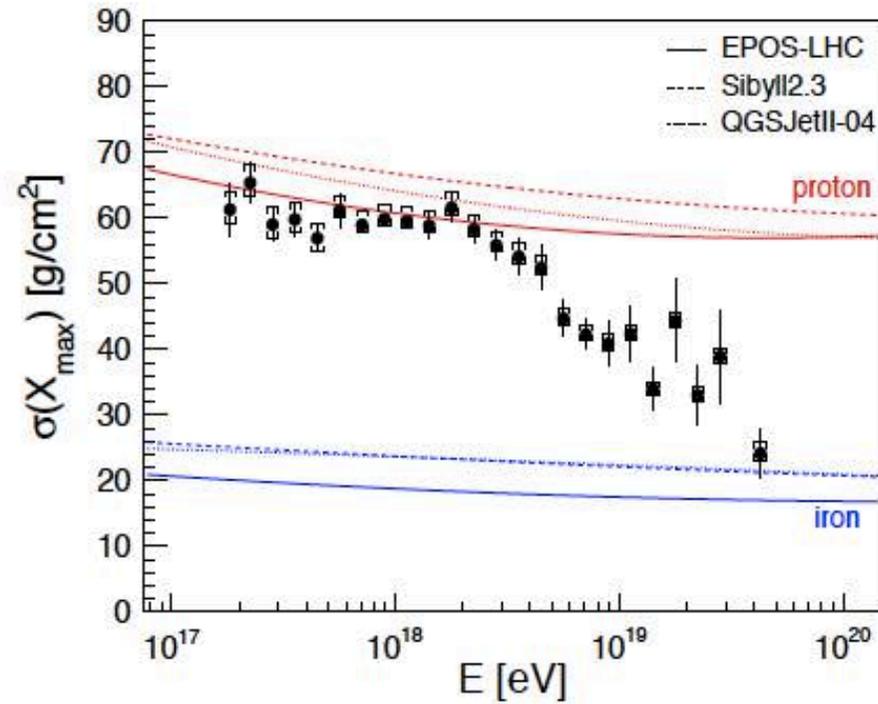
Razón de elongación

# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

La composición puede dar una pista sobre qué modelos reproducen los mecanismos de producción y propagación correctamente



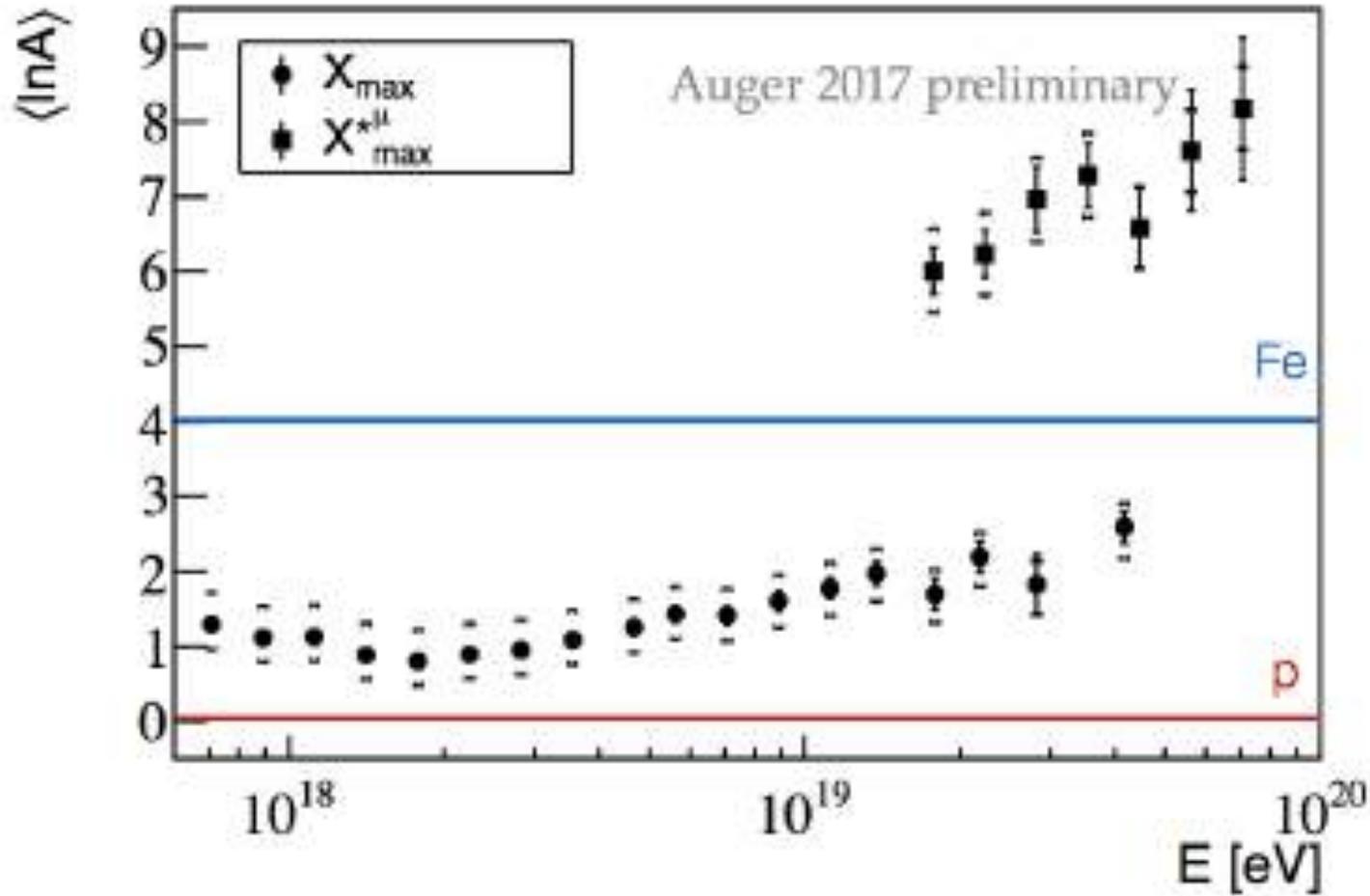
Teoría:  
Mezcla o ligera



Experimento:  
Mezcla o Pesada

# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

La composición puede dar una pista sobre qué modelos reproducen los mecanismos de producción y propagación correctamente

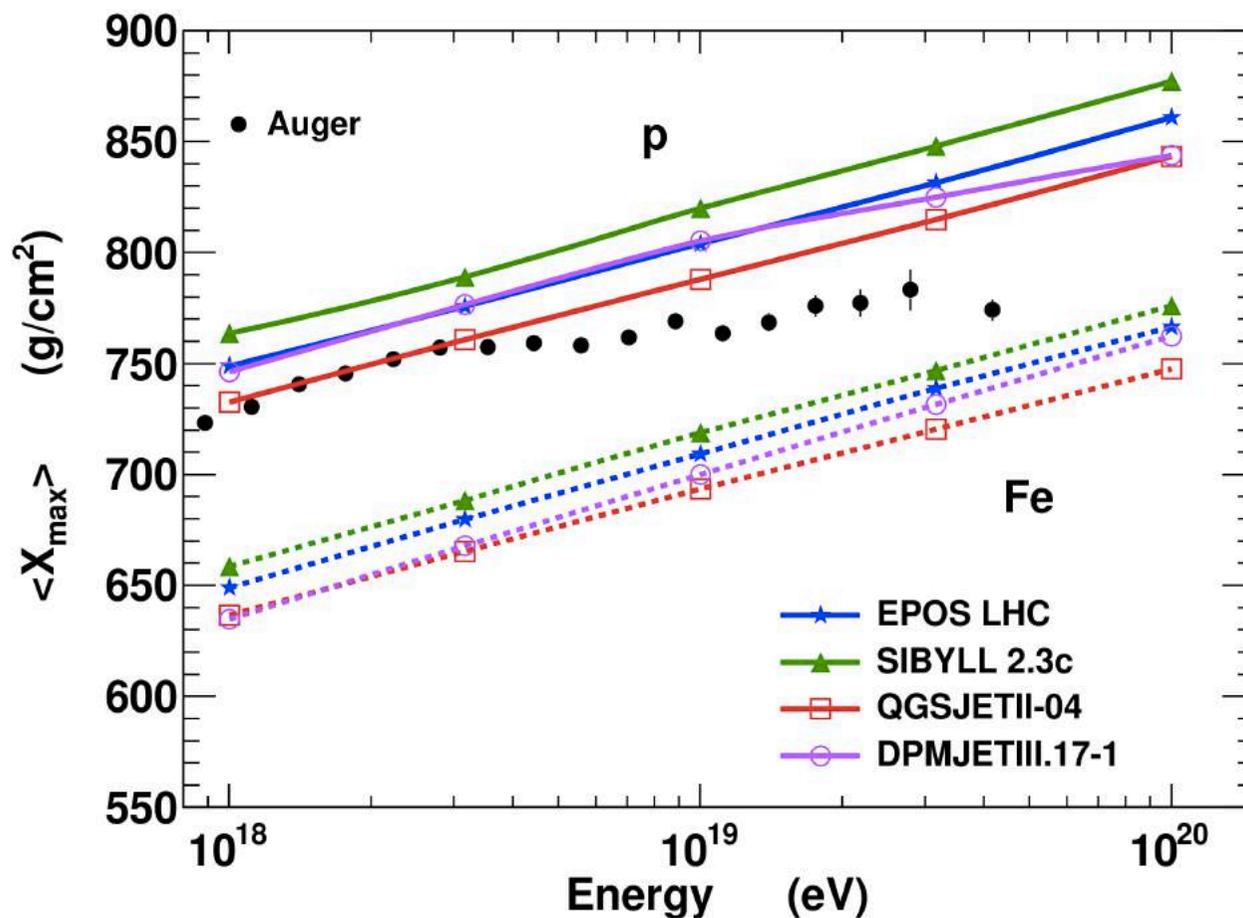


Experimento:

Mezcla o Pesada

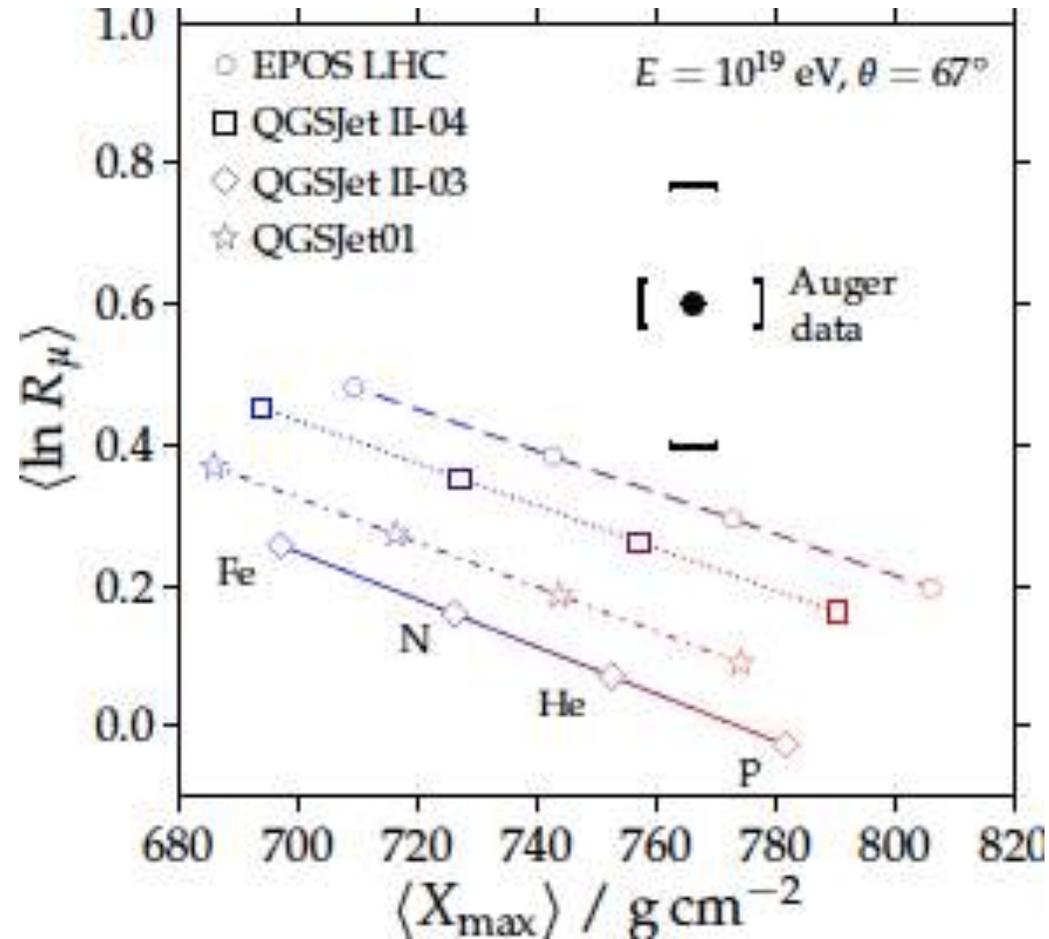
# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

La composición puede dar una pista sobre qué modelos reproducen los mecanismos de producción y propagación correctamente



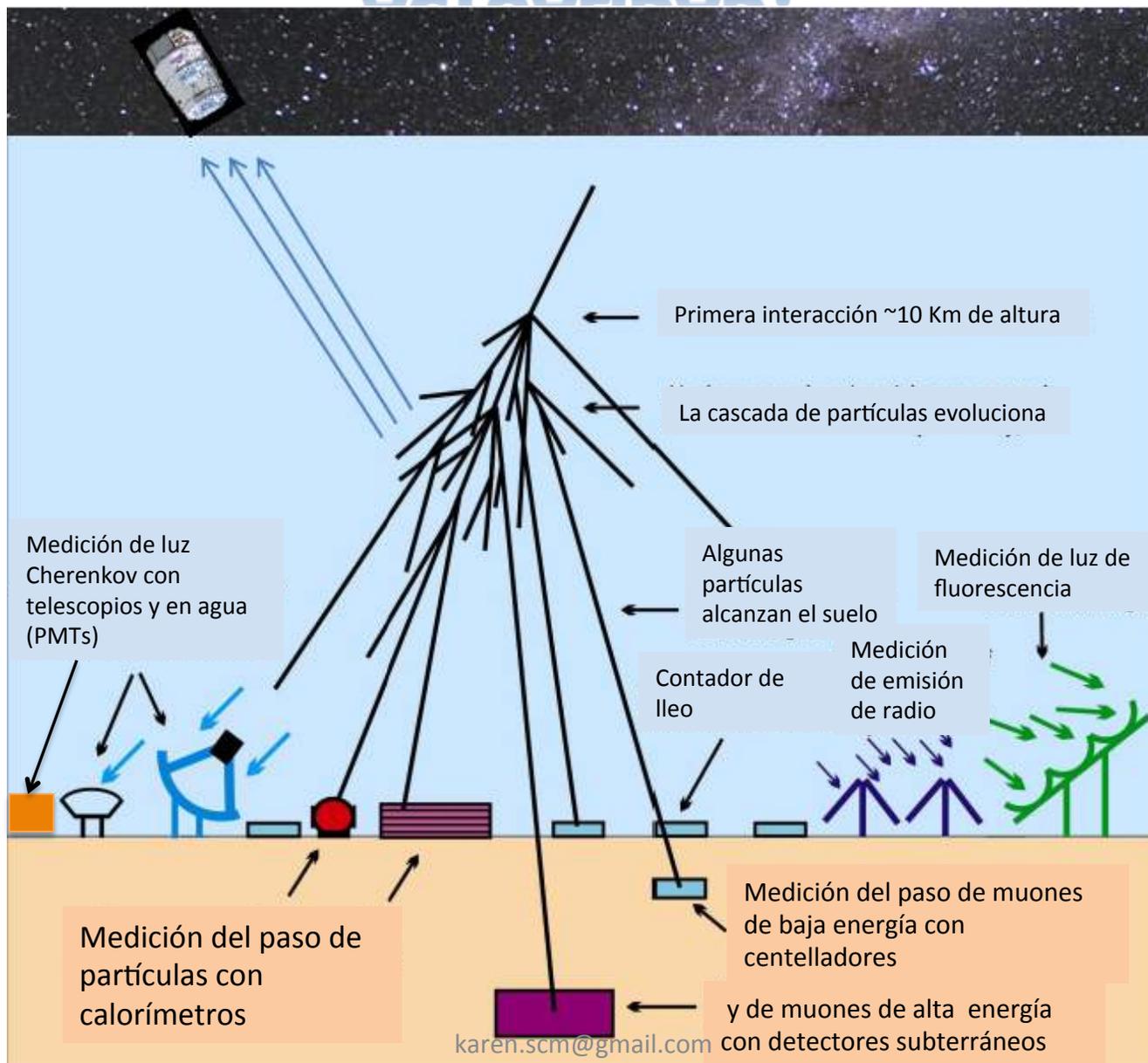
# COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

Número de muones obtenidos en chubascos inclinados en Auger:



Número de muones subestimado en los modelos actuales para altas energías

# ¿CÓMO SE DETECTAN LAS ASTROPARTÍCULAS ACTUALIDAD?



# EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

## Rayos C3smicos

Globos con varios instrumentos

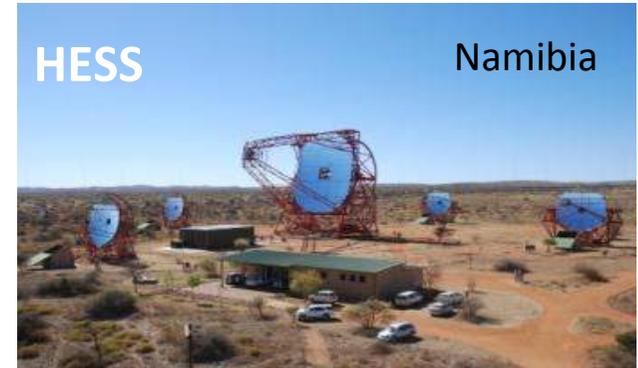
(Detectores de carga, centelladores, etc)

Telescopios de luz Cherenkov

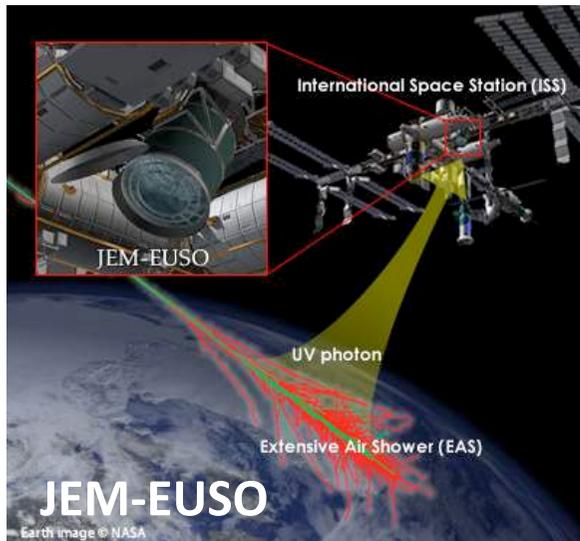


$E=10^{10}$  eV a  $E=10^{14}$  eV

La luz Cherenkov se produce cuando una partícula va más rápido que la luz en el medio en el que se mueve (agua, aire)

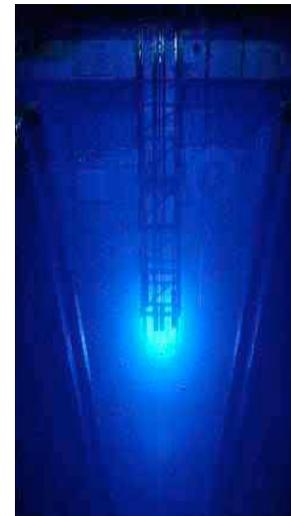


Sat3lites



Luz de fluorescencia de la atm3sfera

$E > 10^{19}$  eV



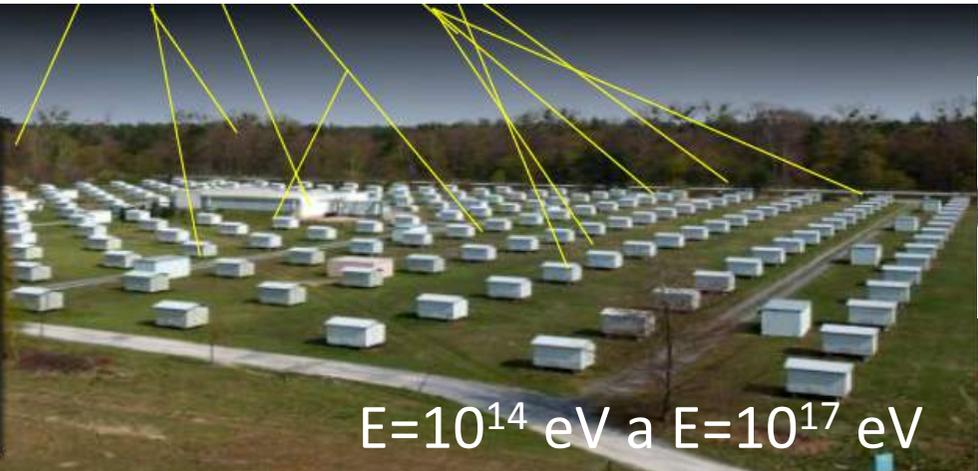
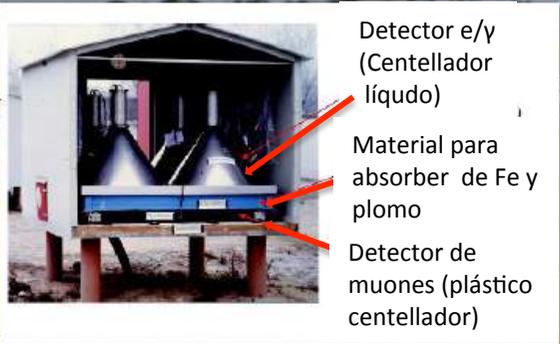
$E=10^{10}$  eV a  $E=10^{14}$  eV

# EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

## Rayos Cósmicos

Experimento de superficie (Detectores de centelleo + Calorímetro)

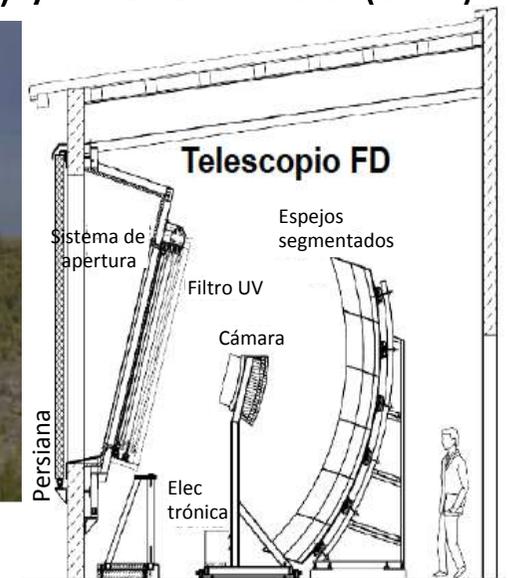
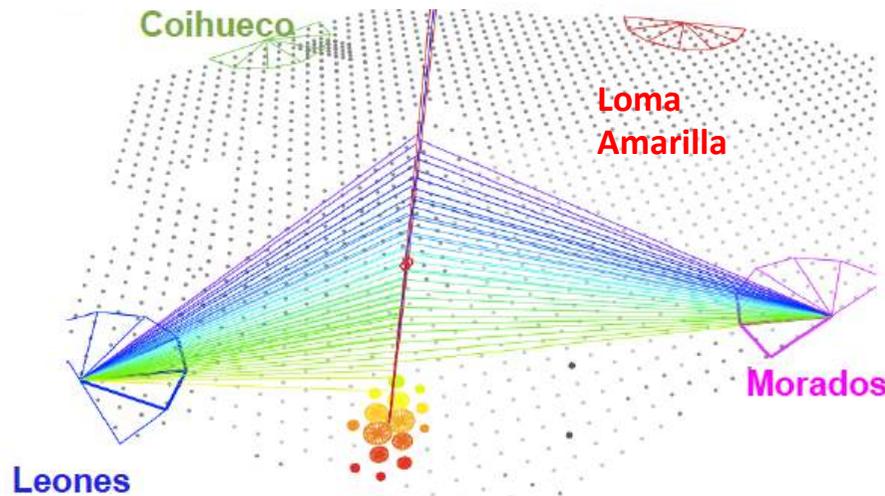
**KASCADE**

Detector e/y (Centellador líquido)  
Material para absorber de Fe y plomo  
Detector de muones (plástico centellador)

$E=10^{14}$  eV a  $E=10^{17}$  eV

**Observatorio Pierre Auger** Experimento híbrido (luz Cherenkov en agua) y fluorescencia (aire)



29/07/17

$E=10^{18}$  eV a  $E=10^{20}$  eV

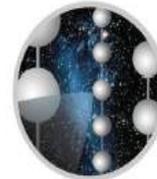
41/21

# ALGUNOS EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

Neutrinos

IceCube

Detector de neutrinos en el Polo Sur



ICECUBE

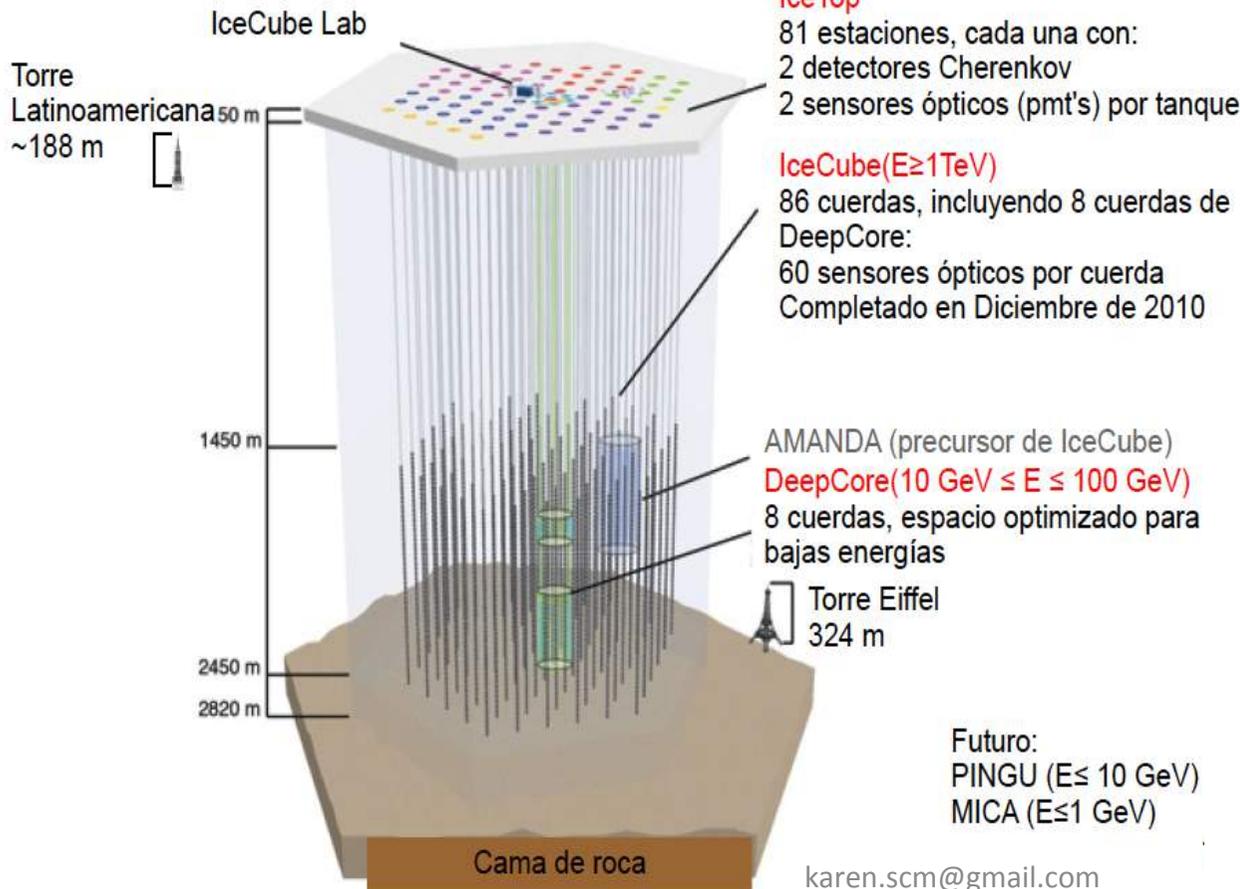
Rayos gamma

Satélites (telescopios espaciales)



Fermi-LAT

$E=10^6$  eV a  $E=10^{11}$  eV



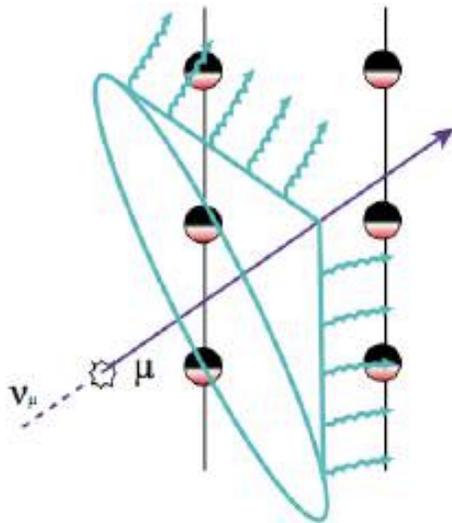
HAWC

$E=10^{11}$  eV a  $E=10^{14}$  eV

# ALGUNOS EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

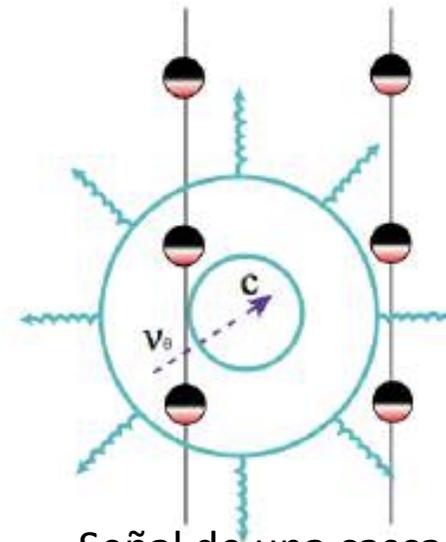
Señales del experimento IceCube  
Estudios con simulaciones para predecir sus formas

| symbols             | process   | signature | note   |
|---------------------|---|-----------|--|
| $\nu_{\mu}^{CC}$    | $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$             | track     | track + cascade if contained   |
| $\nu_e^{CC}$        | $\nu_e + N \rightarrow e + X$                   | cascade   | Elongated if $E > 100$ PeV<br>E.M shower + hadronic shower                   |
| $\nu_{\tau}^{CC}$   | $\nu_{\tau} + N \rightarrow \tau + X$           | cascade   | $\tau$ length $\sim 50$ m at $E =$ PeV and<br>$\tau$ decays producing shower |
| $\nu_{\alpha}^{NC}$ | $\nu_{\alpha} + N \rightarrow \nu_{\alpha} + X$ | cascade   | $\alpha = \mu, e, \tau$  |



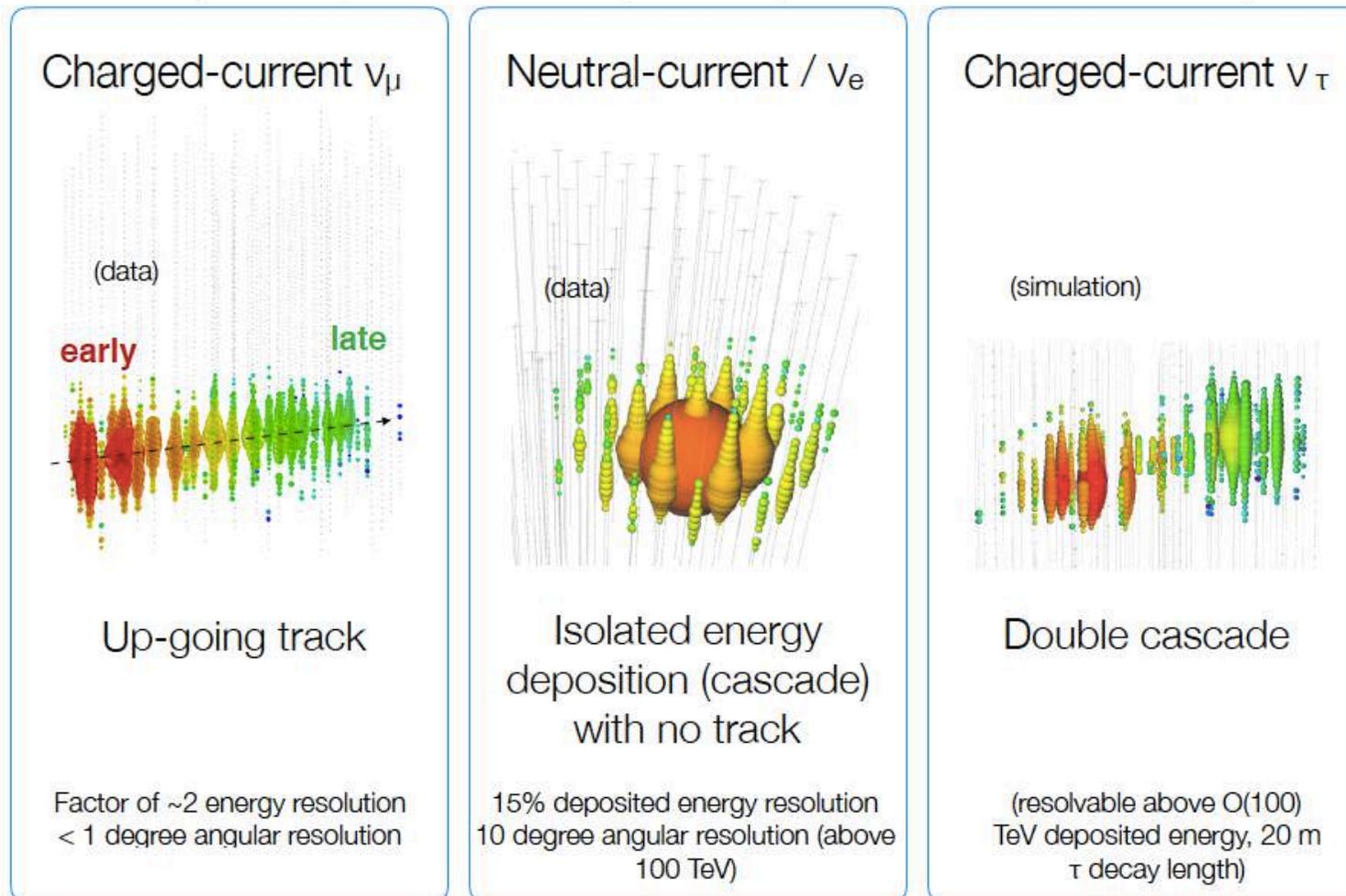
Señal de una trayectoria (track)

C.H. Ha, Tesis de doctorado, 2011



Señal de una cascada

| symbols             | process   | signature | note  |
|---------------------|---|-----------|---|
| $\nu_{\mu}^{CC}$    | $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$             | track     | track + cascade if contained  |
| $\nu_e^{CC}$        | $\nu_e + N \rightarrow e + X$                   | cascade   | Elongated if $E > 100$ PeV<br>E.M shower + hadronic shower                          |
| $\nu_{\tau}^{CC}$   | $\nu_{\tau} + N \rightarrow \tau + X$           | cascade   | $\tau$ length $\sim 50$ m at $E = \text{PeV}$ and<br>$\tau$ decays producing shower |
| $\nu_{\alpha}^{NC}$ | $\nu_{\alpha} + N \rightarrow \nu_{\alpha} + X$ | cascade   | $\alpha = \mu, e, \tau$   |

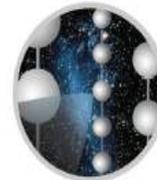


# ALGUNOS EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

Neutrinos

IceCube

Detector de neutrinos en el Polo Sur



ICECUBE

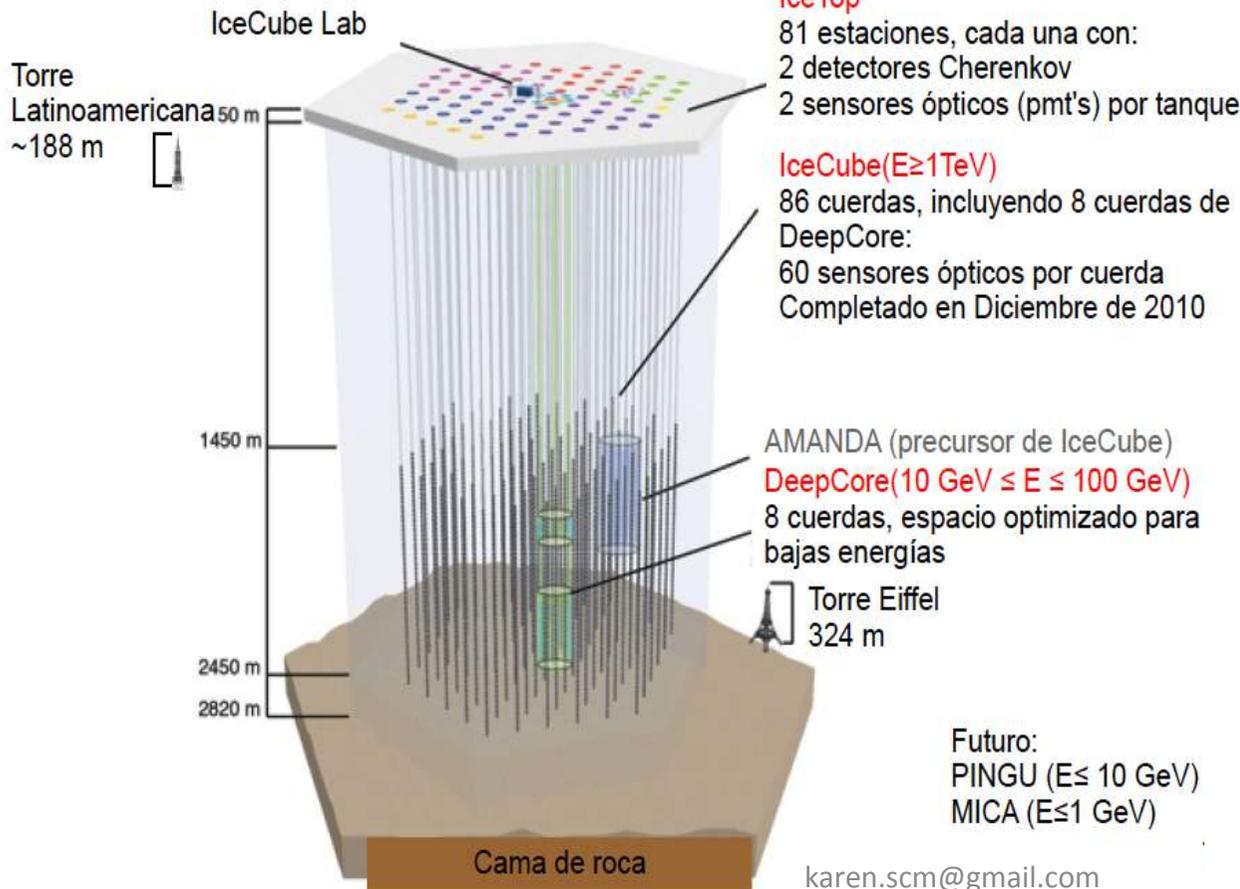
Rayos gamma

Satélites (telescopios espaciales)



Fermi-LAT

$E=10^6$  eV a  $E=10^{11}$  eV



HAWC

$E=10^{11}$  eV a  $E=10^{14}$  eV



Cherenkov  
telescope  
array

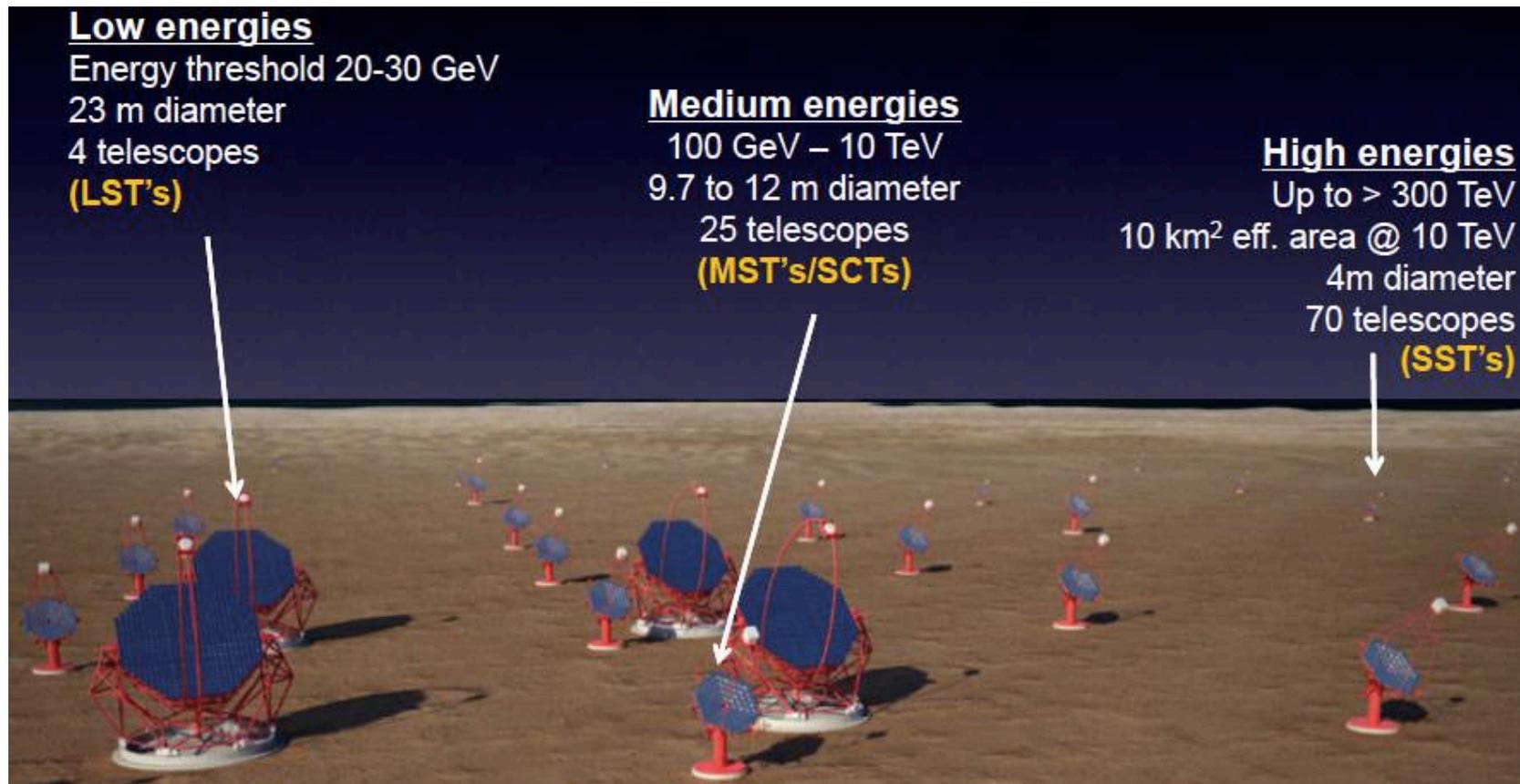


Rayos gamma

Norte: La Palma, España  
Sur: ESO/Paranal, Chile

The CTA Consortium, Rene A. Ong, ICRC2017

- Aceleración de CR
- Pruebas de ambientes extremos (estrellas de neutrones, agujeros negros, jets relativistas, vientos y explosiones)
- Fronteras de la Física (materia oscura, fotones de alta energía)

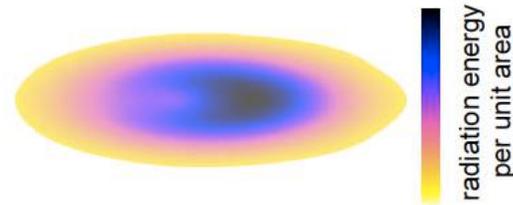


Investigar:

Electrodinámica Clásica  
Energía del chubasco  
electromagnético

## Radio

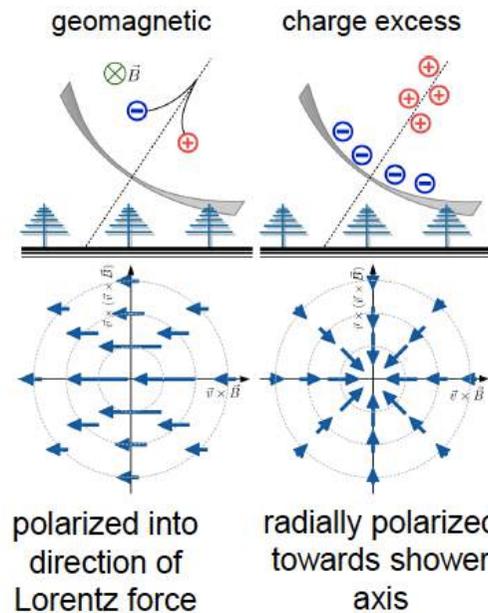
Voltaje->Campo Eléctrico->Afluencia de la energía de radiación->Energía de radiación del chubasco->Estimador de la energía del RC



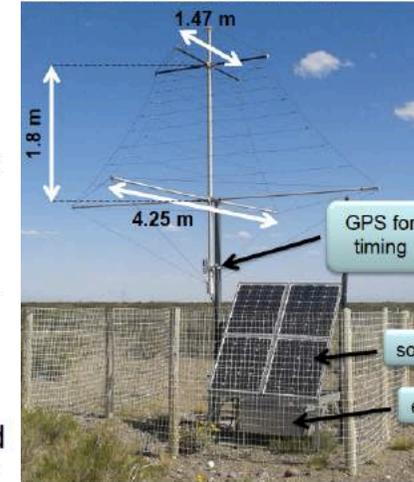
- Location: KIT, Campus North
- Operation: 2003 - 2013
- Frequency band: 40 - 80 MHz
- Diameter of array: 200 m
- Antennas: up to 30 (dipole-like)
- Trigger: KASCADE-Grande
- Threshold:  $\sim 10^{17}$  eV



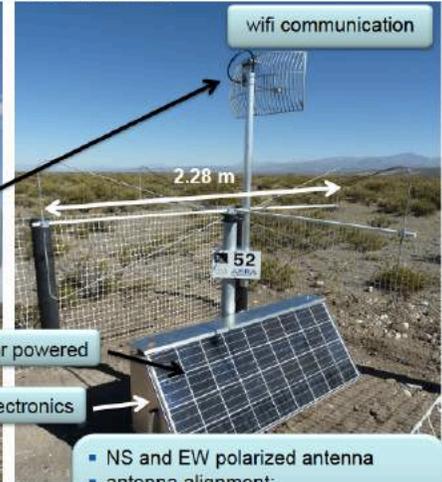
Prototipo de LOFAR



Log-Periodic Dipole Antenna (LPDA)



Butterfly Antenna



- NS and EW polarized antenna
- antenna alignment: to magnetic north with precision  $< 1^\circ$
- bandwidth: 30 - 80 MHz
- autonomous radio station

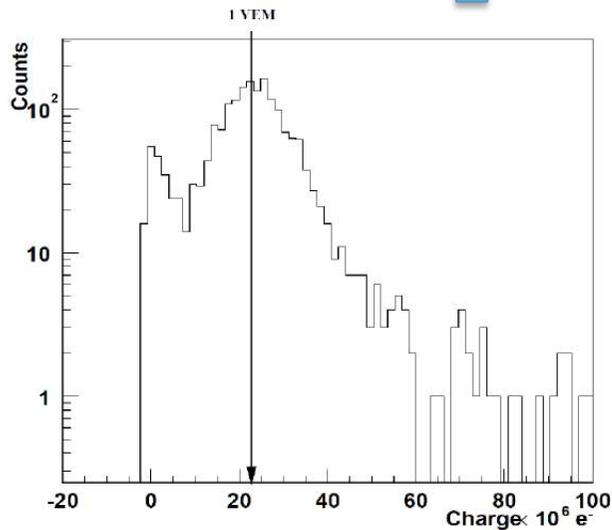
F. G. Schroeder ICRC2017

R. Krause ICRC2017

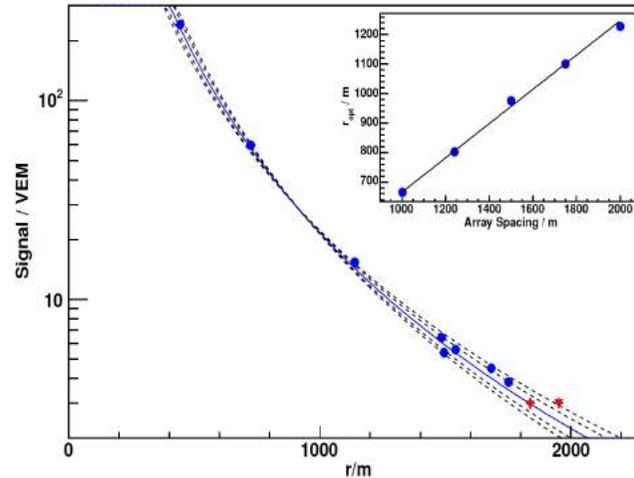
karen.scm@gmail.com

# DESPUÉS DE OBTENER LAS MEDICIONES SE NECESITA ANALIZAR LOS DATOS

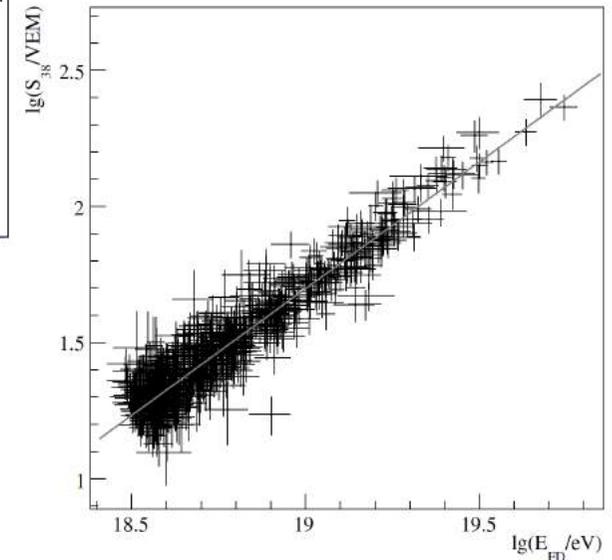
Ejemplo  
Pierre Auger



Cuentas de corriente medida directamente en un PMT de un tanque para estimar el VEM (Señal)



Señal como función de la distancia al centro del chubasco

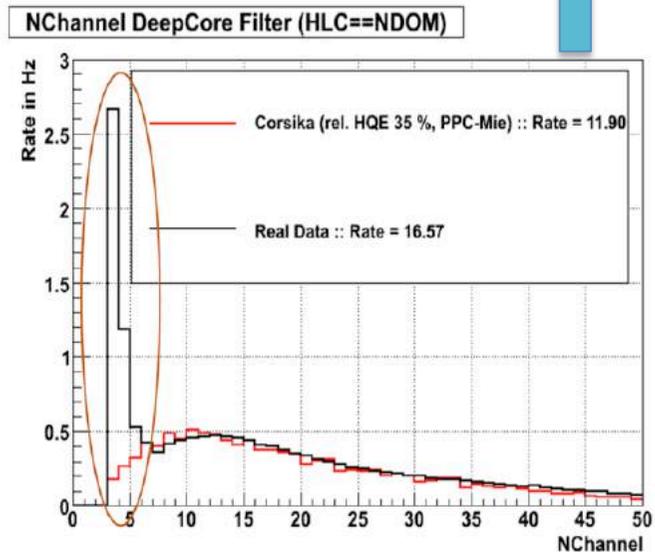


Señal SD como función de la energía FD para estimar energía SD

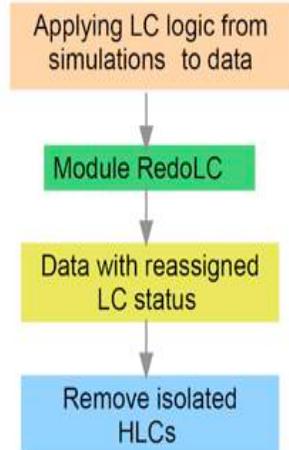
Se estudian para interpretarlos

# DESPUÉS DE OBTENER LAS MEDICIONES SE NECESITA ANALIZAR LOS DATOS

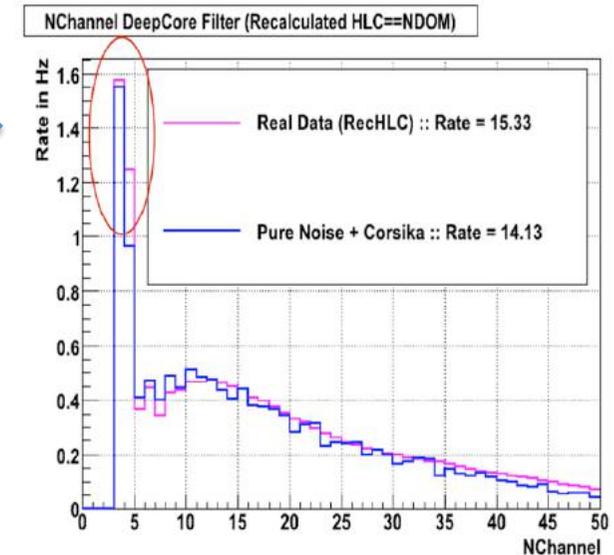
## Ejemplo IceCube



Hay una discrepancia entre los datos medidos y las simulaciones usadas



Se aplica programa de análisis usado en simulaciones (caso ideal) al programa de datos reales y se identifica el error en el programa para datos



El error identificado se agrega al programa de simulación para aproximar la realidad con mayor precisión

Se pueden usar simulaciones para comparar los resultados esperados con los medidos

# CONCLUSIONES

- Las astropartículas nos dan la oportunidad de acceder a energías que no están disponibles en la Tierra
- Esfuerzos para una retroalimentación entre los datos medidos en experimentos de astropartículas y los colisionadores son prometedores

utz

Bukux-awulú

Miac tlazocamatic

Diosí meyamu

Hocolawal

Tak'

Tioj-bätyix

iGRACIAS!

NIB ÓOLA

Ts'akatal

dyos bo'otik

**FIN PARTE 2**

**¡Gracias!**



**XVIII Mexican School of Particles and Fields and  
2018 University of Sonora School of High Energy Physics**

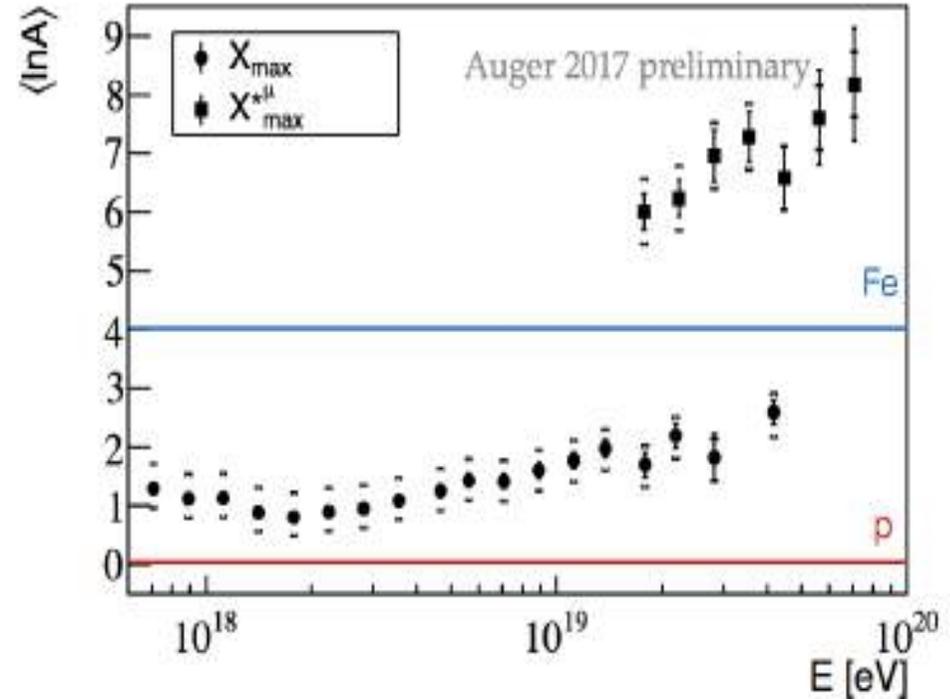
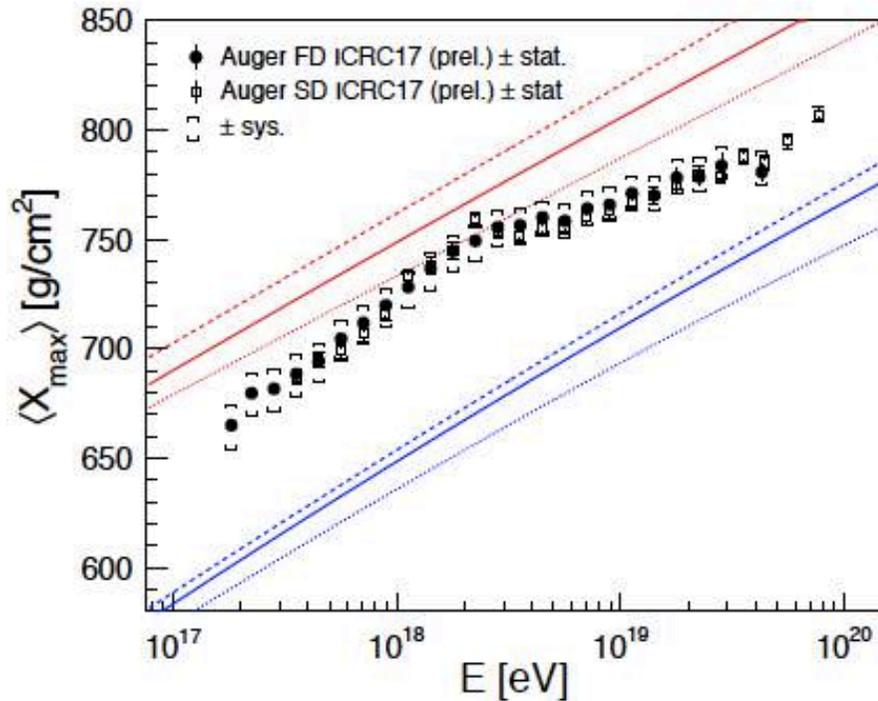
21-27 October 2018  
Hermosillo, Sonora

# EJERCICIO

- La vida media del muón es de aproximadamente  $2.19 \mu\text{s}$ , moviéndose a una velocidad de  $v = 0.9978 c$ , la distancia que recorre es de  $656.46 \text{ m}$ .

Sin embargo los muones que se producen en la atmósfera a más de  $10 \text{ km}$ , pueden ser medidos en la superficie terrestre, ¿por qué ocurre esto?, hacer el cálculo correcto de la distancia que recorrería considerando que viaja a una velocidad cercana a  $c$ .

# ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN

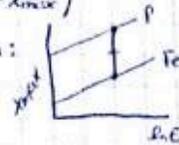


$$\langle \ln A \rangle = \ln A_{\text{Fe}} \cdot \frac{X_{\max}^{\text{meas}} - X_{\max}^{\text{p}}}{X_{\max}^{\text{Fe}} - X_{\max}^{\text{p}}}$$

# ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN

Deduction of  $\langle \ln A \rangle = \ln A^e \left( \frac{X_{max}^p - X_{max}^{Fe}}{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p} \right)$

interpolation between 2 points in the plot:



We know that  $\langle X_{max} \rangle_A = C_p + D_p \ln(\frac{E}{A}) \Rightarrow X_{max} = a + b \ln(\frac{E}{A})$  for a mixed comp taking  $X_{max}^p$  and  $X_{max}^{Fe}$ :

$$X_{max}^p = a + b \ln(\frac{E}{A^p}) = a + b \ln E \quad \dots (1)$$

$$X_{max}^{Fe} = a + b \ln(\frac{E}{A^{Fe}}) \quad \dots (2)$$

$$\Rightarrow X_{max}^p - X_{max}^{Fe} = b \left( \ln E - \ln(\frac{E}{A^{Fe}}) \right) = b \left( \cancel{\ln E} - \cancel{\ln E} + \ln A^{Fe} \right) = b \ln A^{Fe}$$

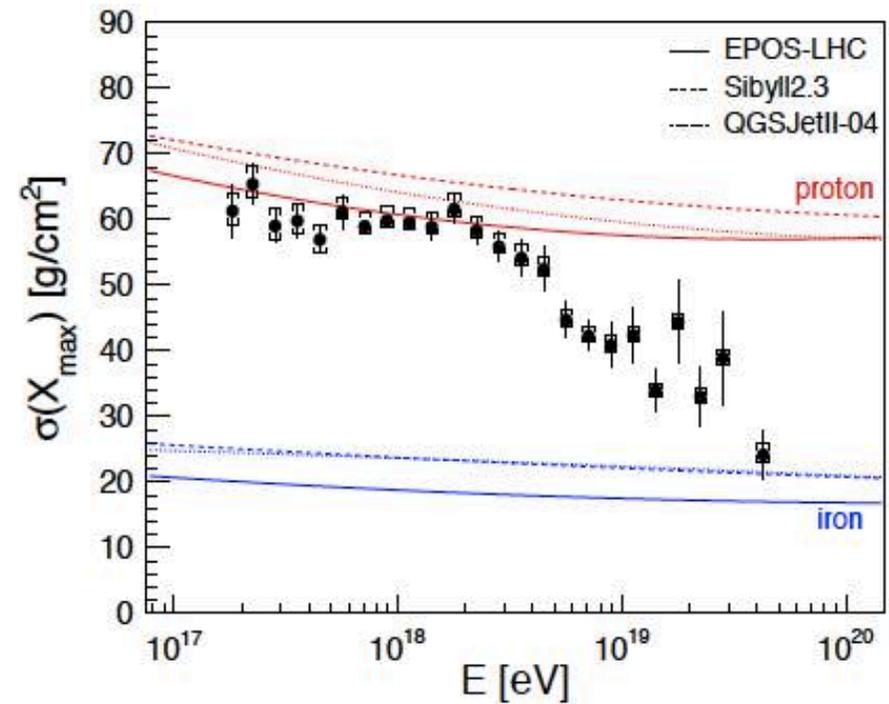
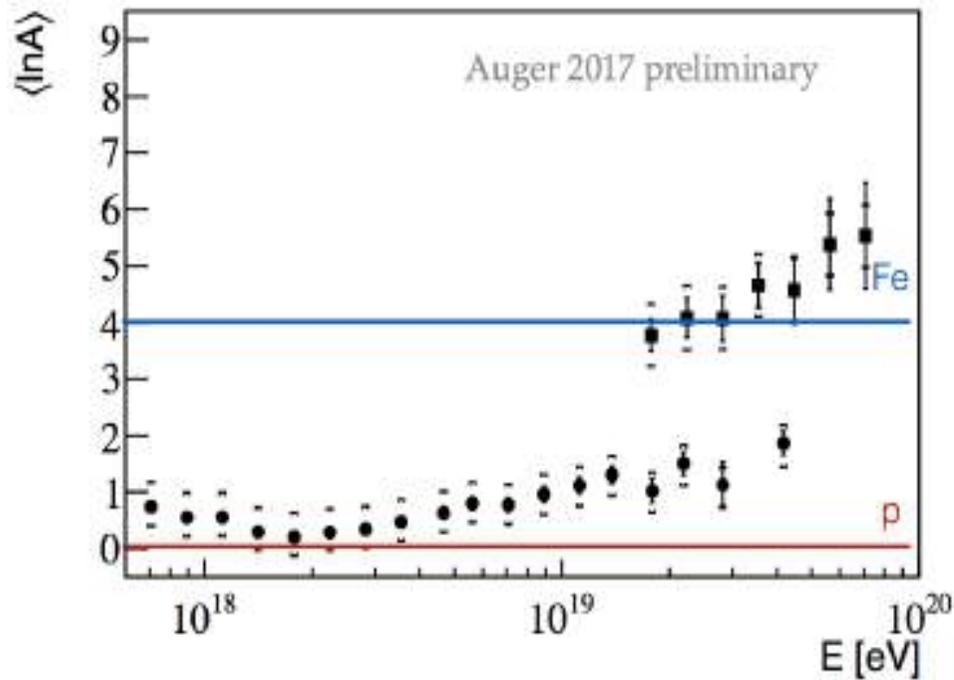
$$\Rightarrow b = \frac{X_{max}^p - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}}$$

$$\text{from (1)} \quad X_{max}^p = a + \left( \frac{X_{max}^p - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) \ln E \quad \Rightarrow \quad a = X_{max}^p - \left( \frac{X_{max}^p - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) \ln E$$

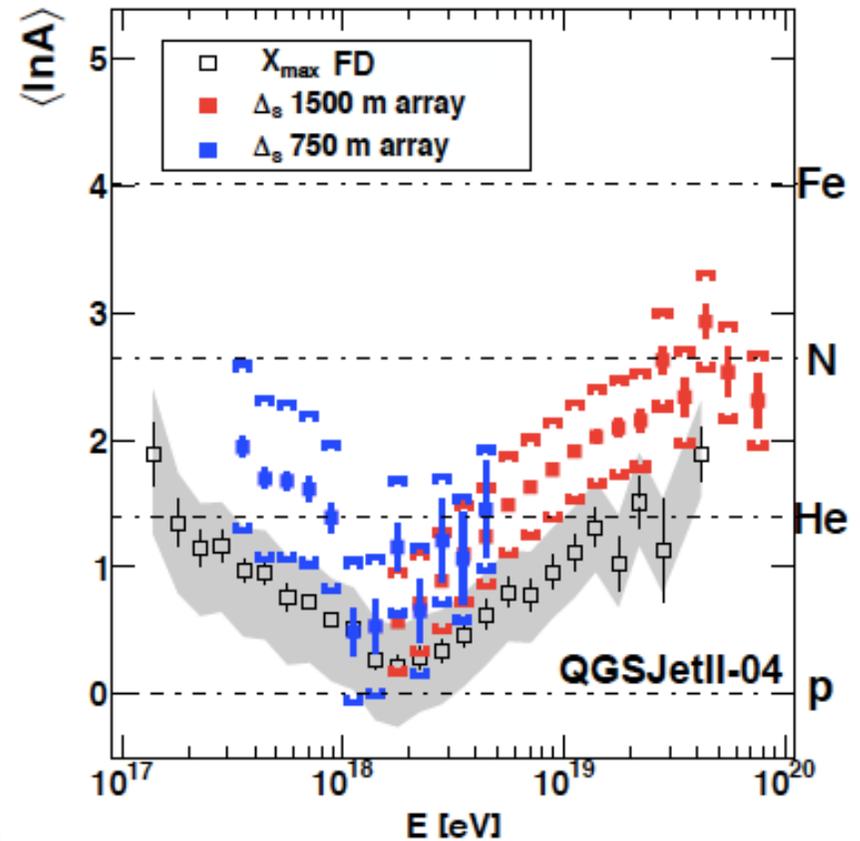
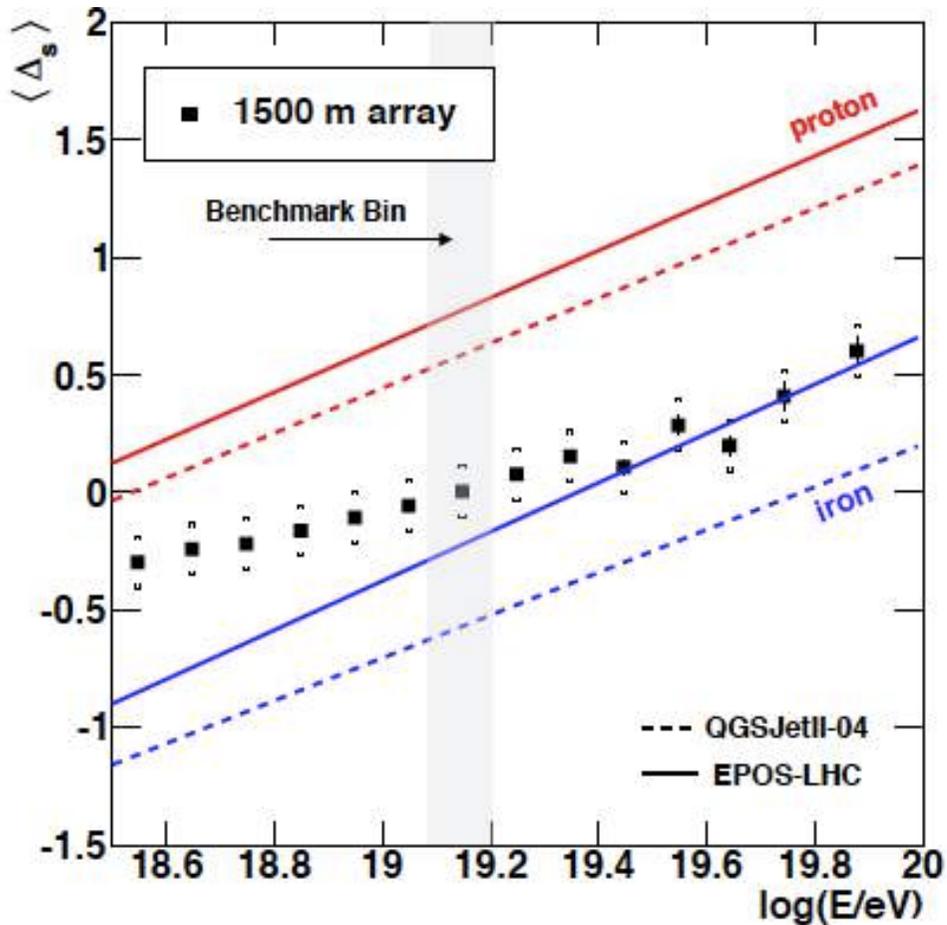
$$\begin{aligned} \Rightarrow X_{max} &= X_{max}^p - \left( \frac{X_{max}^p - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) \ln E + \left( \frac{X_{max}^p - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) \ln \left( \frac{E}{A} \right) \\ &= X_{max}^p + \left( \frac{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p}{\ln A^{Fe}} \right) \left( \cancel{\ln E} + \ln E \right) \\ &= X_{max}^p + \left( \frac{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p}{\ln A^{Fe}} \right) \left( -\cancel{\ln E} + \ln A + \cancel{\ln E} \right) \\ &= X_{max}^p + \left( \frac{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p}{\ln A^{Fe}} \right) \ln A \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{X_{max} - X_{max}^p}{X_{max}^{Fe} - X_{max}^p} \right) \cdot \ln A^{Fe} = \ln A$$

# ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN



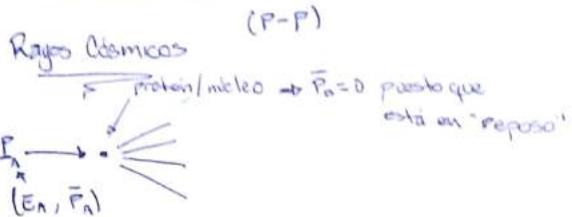
# ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN



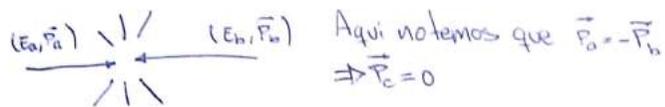
# TRANSFORMACIÓN MARCO AIRE-LAB

(EJE SUPERIOR DEL ESPECTRO DE LA PÁGINA 26 DE ESTA PRESENTACIÓN)

Relación entre experimentos de laboratorio y Rayos Cósmicos en CMS



En el laboratorio



CMS-Lab

$$\vec{P}_A + \vec{P}_B = \vec{P}_C = 0 \text{ y } E_A + E_B = E_C \quad E_C = E_A + E_B$$

También  $\vec{P}_C \cdot \vec{P}_C = \vec{P}_C^2 = E_C^2 - P_C^2 = M^2 \Rightarrow E_C^2 = M^2$

$$\Rightarrow S = (E_A + E_B)^2 = M^2 \Rightarrow \sqrt{S} = E_A + E_B$$

CMS-Aire

Considerando el sistema en el centro de masa de la colisión

$M^2 = P_C^2 \rightarrow$  es porque la partícula incidente es la que aporta al sistema de la colisión

$$M^2 = (\vec{P}_A + \vec{P}_B)^2 = P_A^2 + 2\vec{P}_A \cdot \vec{P}_B + P_B^2 = P_A^2 + 2(E_A E_B - \vec{P}_A \vec{P}_B) + P_B^2$$

pero  $\vec{P}_B = 0 \Rightarrow E_B^2 - P_B^2 = m_B^2 \Rightarrow E_B^2 = m_B^2 \Rightarrow M^2 = m_A^2 + 2(E_A m_B) + m_B^2$

Usando ambas relaciones

$$S = (E_A + E_B)^2 = M^2 = m_A^2 + 2(E_A m_B) + m_B^2$$

pero  $m_A = m_B = 0.938 \text{ GeV} \Rightarrow S = 2(E_A m_B) + 2m_B^2$

$$\Rightarrow \sqrt{S} = \sqrt{2(E_A m_B) + 2m_B^2} = \sqrt{2m_B(E_A + m_B)}$$

En la práctica  $m_B$  es despreciable

nos queda  $\sqrt{S} = \sqrt{2E_A m_B}$

Ejemplo:

$$E_A = 1 \times 10^{20} \text{ eV} = 1 \times 10^{11} \text{ GeV} \Rightarrow$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{2(1 \times 10^{11}) \cdot 0.938} \text{ GeV} = \underline{\underline{4.33 \times 10^5 \text{ GeV}}}$$