



MCTP Mesoamerican Centre
for Theoretical Physics
Centro Mesoamericano de Física Teórica



ASTROPARTÍCULAS

XII Escuela de Física Fundamental
7-11 de agosto de 2017, UAEH-Pachuca, Hidalgo

Karen Salomé Caballero Mora
FCFM+MCTP-UNACH

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

¿QUÉ SON LAS ASTROPARTÍCULAS?

PARTÍCULAS QUE VIENEN DESDE FUERA DE NUESTRO PLANETA:

Rayos
Cósmicos
(RC)

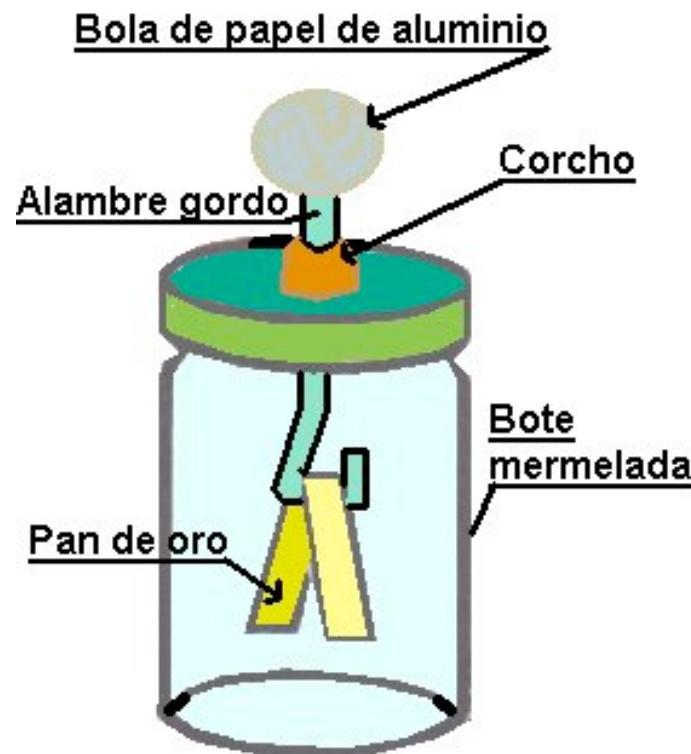
- Electrones
- Núcleos atómicos
- Muones
- Neutrones

- Rayos gamma
- Neutrinos

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

UN POCO DE HISTORIA

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



Víctor Hess en 1911

APLICACIÓN PARA ESCUCHAR EL FLUJO DE MUONES ATMOSFÉRICOS



<https://play.google.com/store/apps/details?id=it.android.muonflux&hl=en>

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 interaccionan 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?

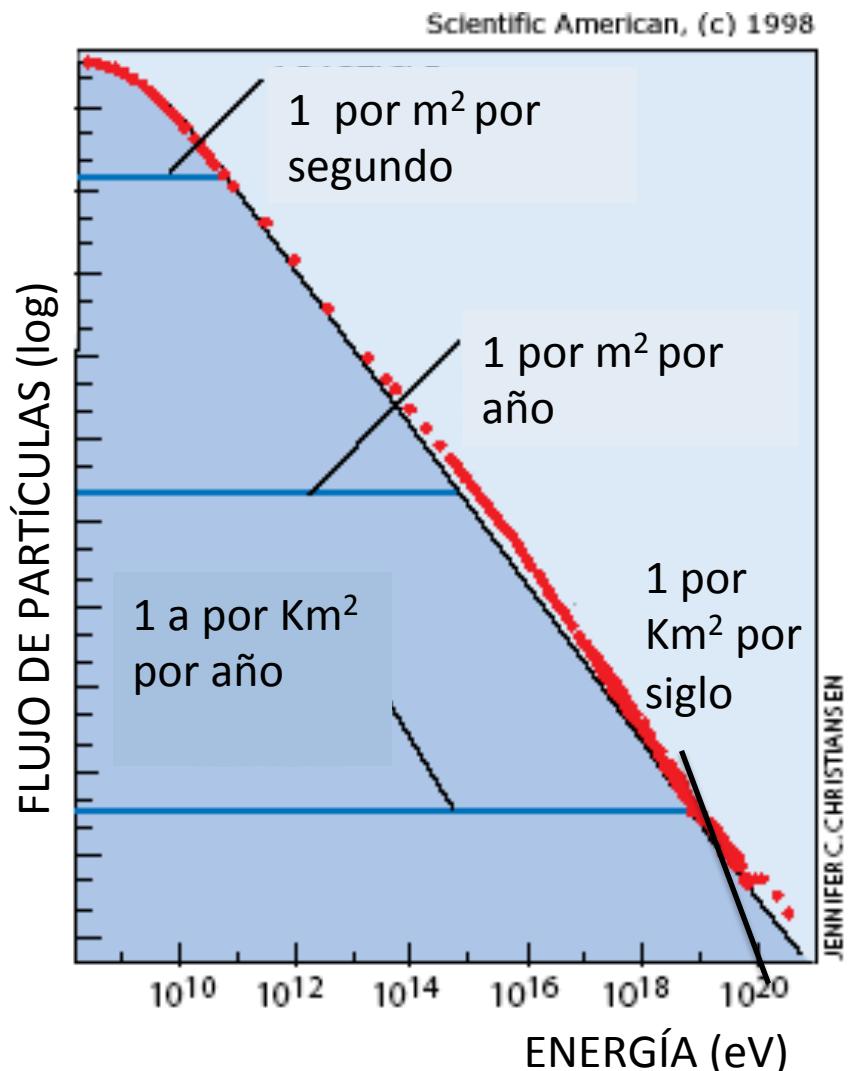
LHC 14×10^{12} eV



karen.scm@gmail.com

RC 10^{20} eV

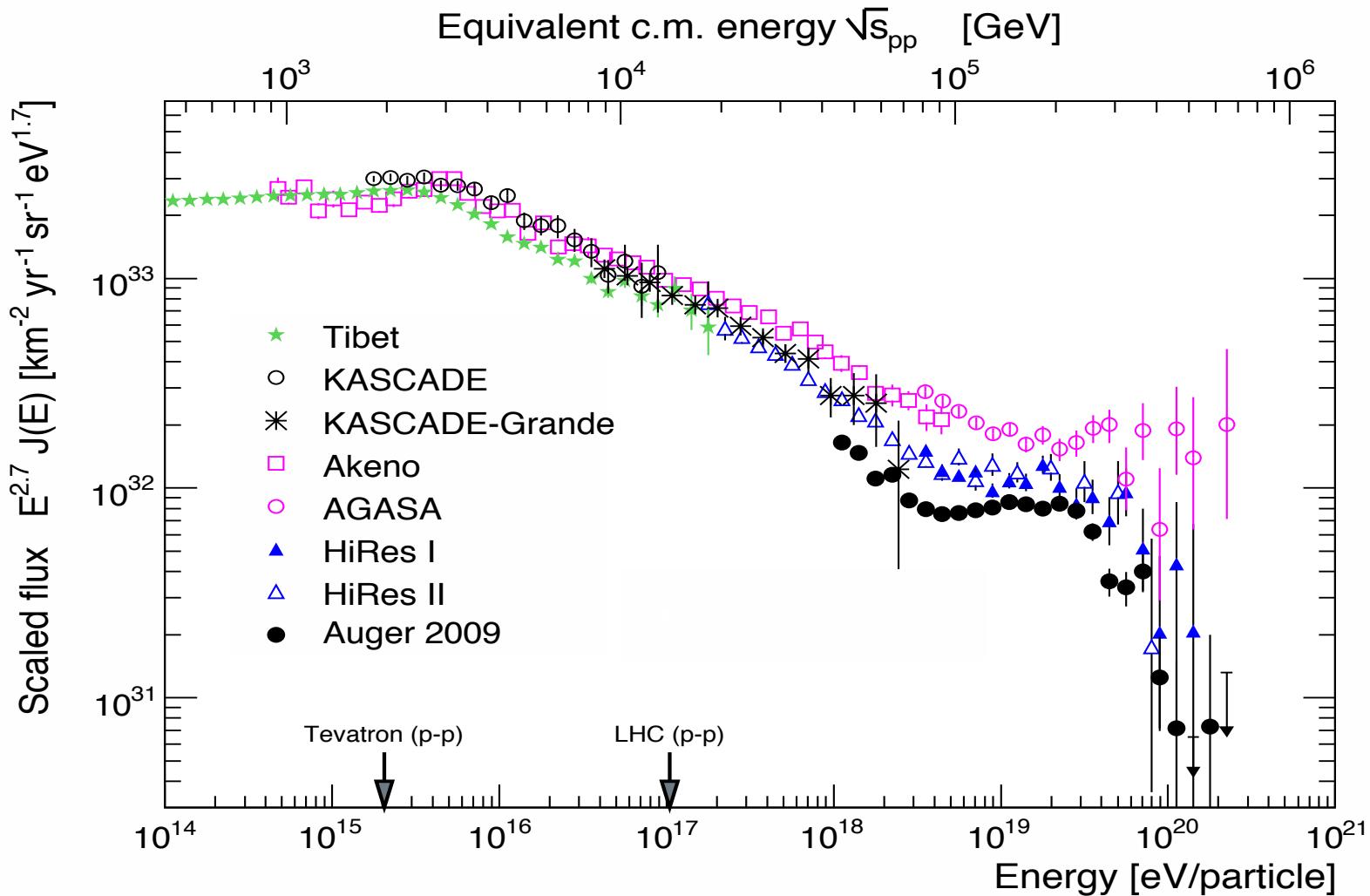
FLUJO DE RAYOS CÓSMICOS



- 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

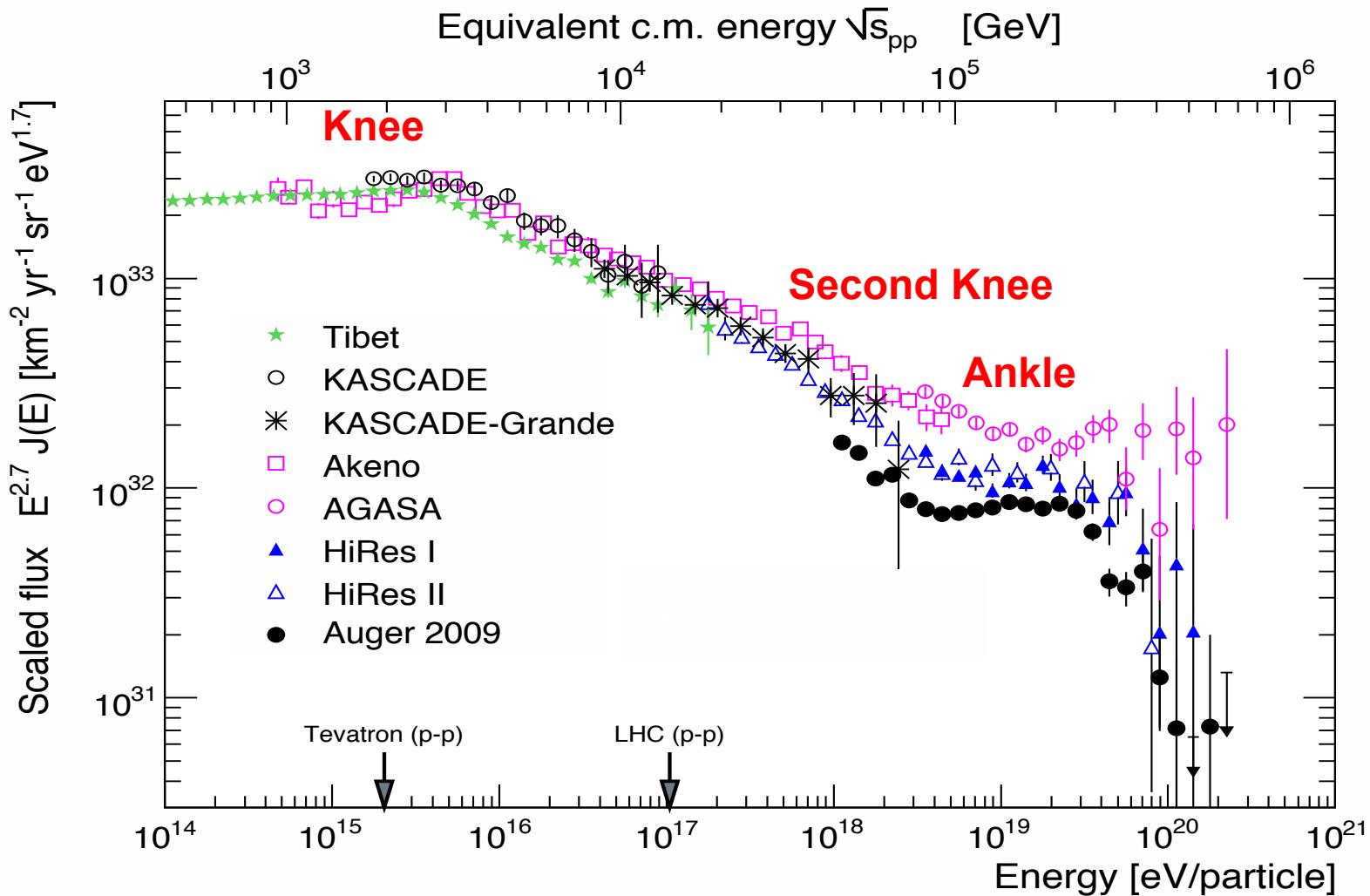
M μ on Flux: <http://en.wikipedia.org/wiki/Muon>

ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS



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

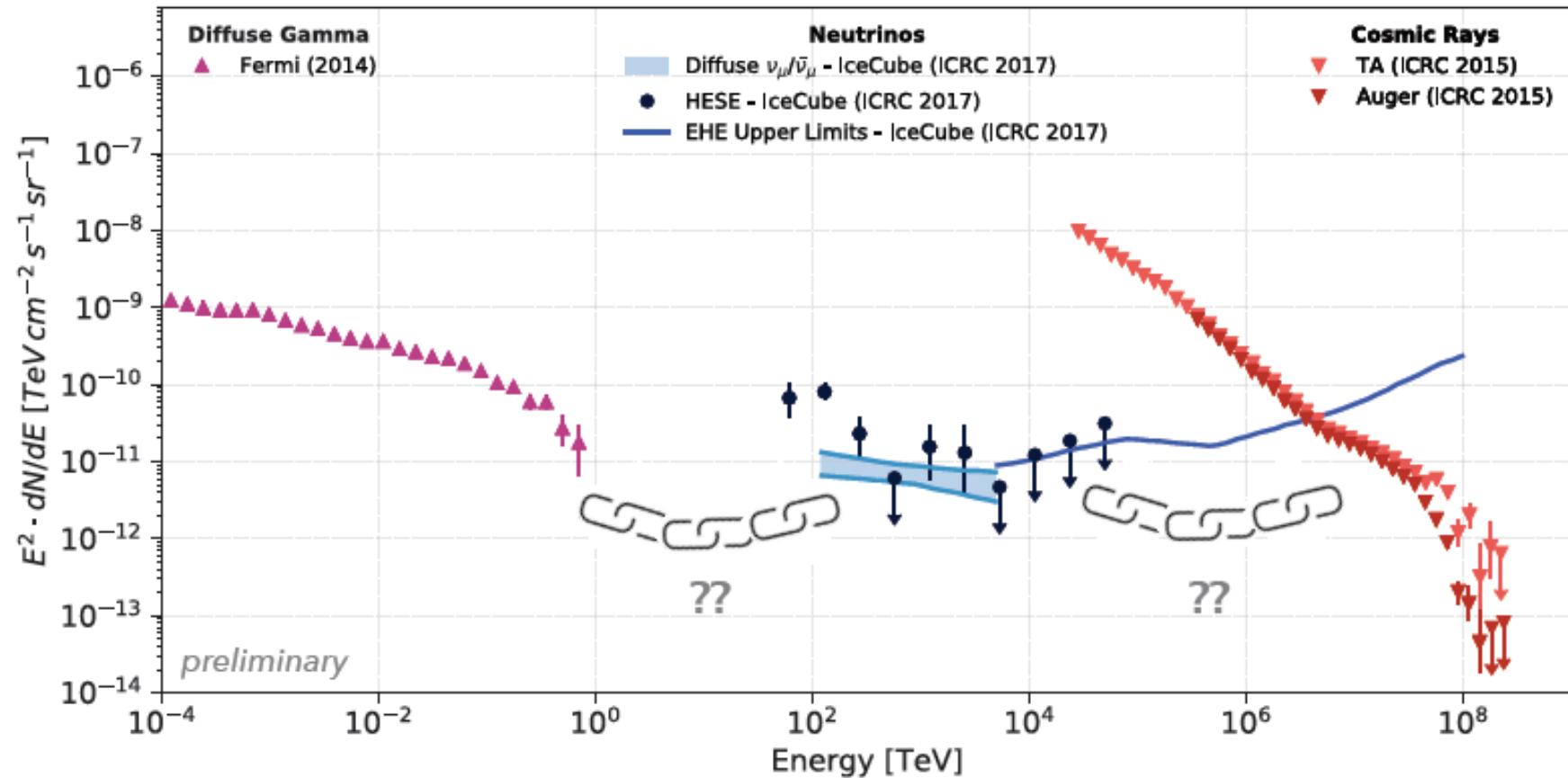
ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS



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

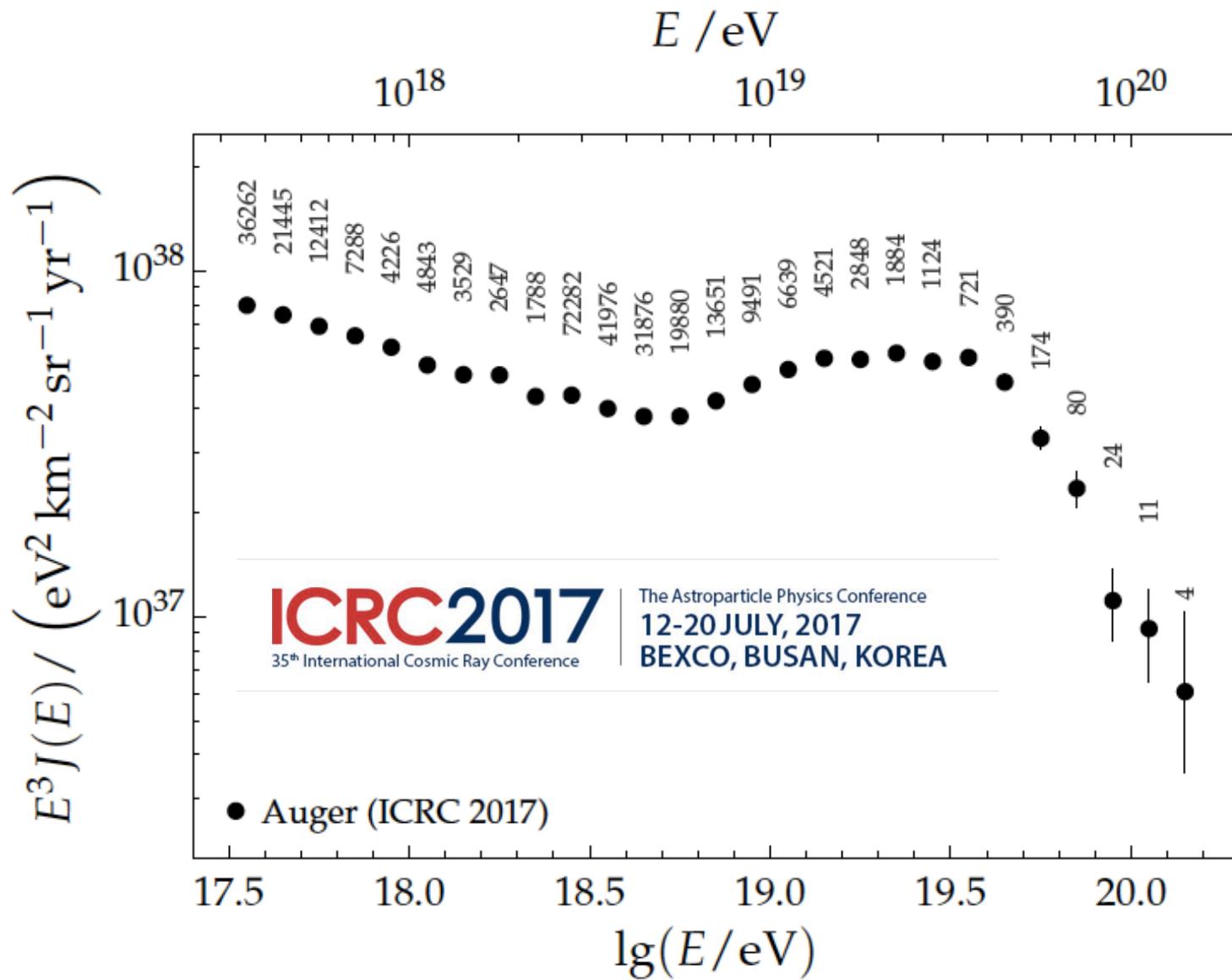
ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS RAYOS CÓSMICOS

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



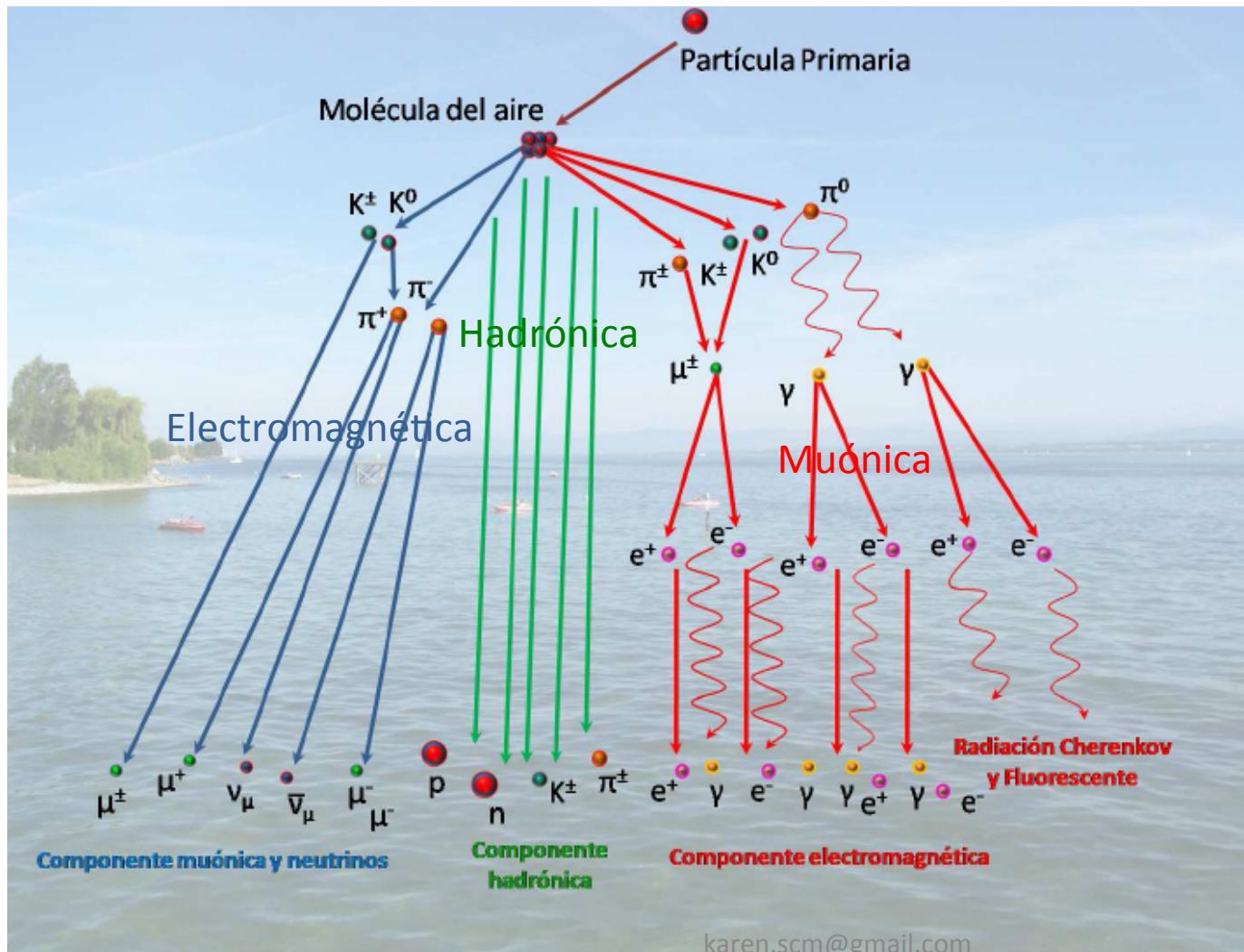
High Energy Multi-Messenger Astronomy, review talk, E. Resconi, ICRC2017

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 Km²

PROCESOS EN LOS CHUBASCOS ATMOSFÉRICOS

1.- **Radiación de frenado (Bremsstrahlung):** Las partículas cargadas interaccionan 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 σ_{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

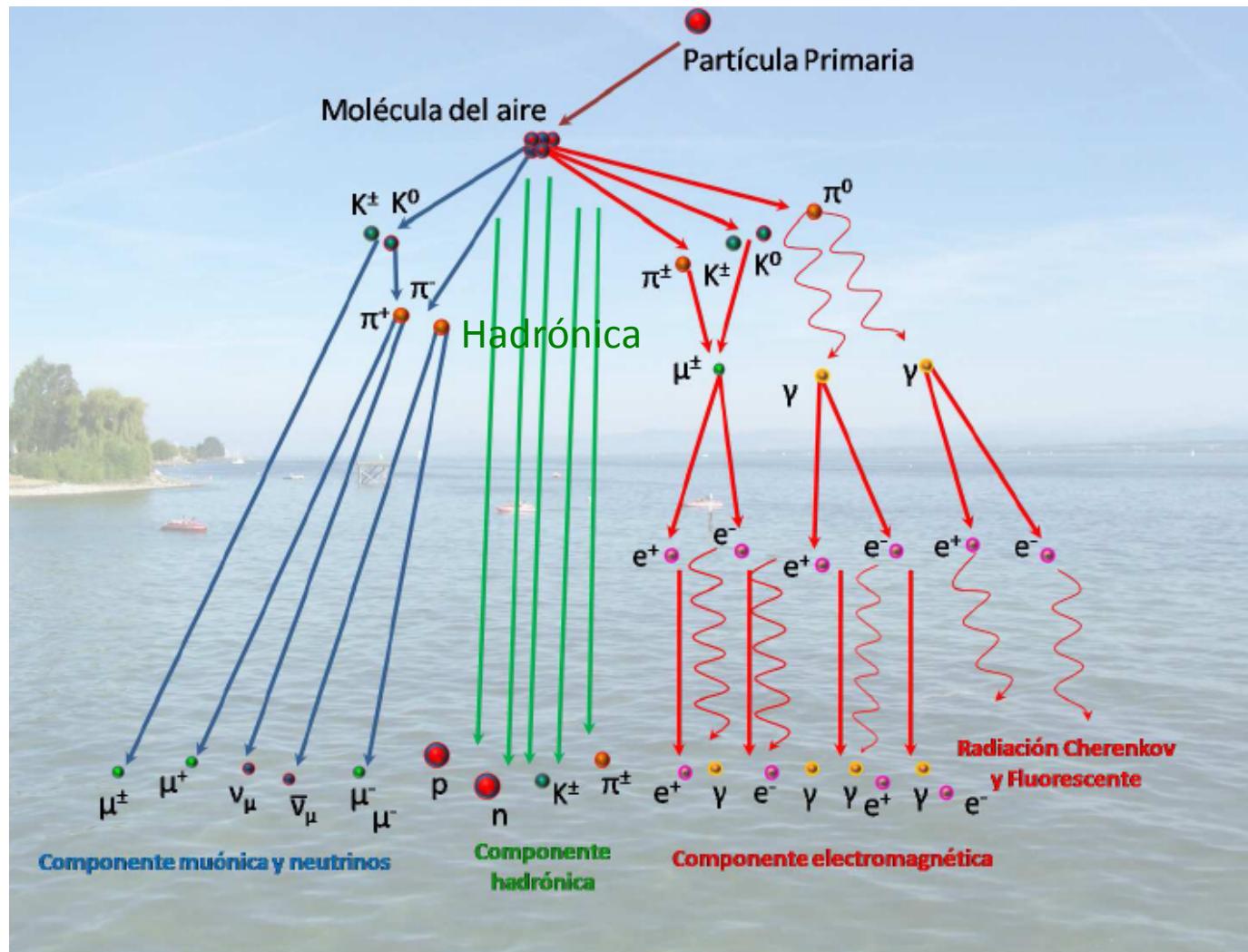
$$\frac{dE}{dx} = -\frac{N_A Z}{A} \frac{2\pi(ze^2)^2}{Mv^2} \left[\ln \frac{2Mv^2\gamma^2 W}{I^2} - 2\beta^2 \right]$$

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 γ y β 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

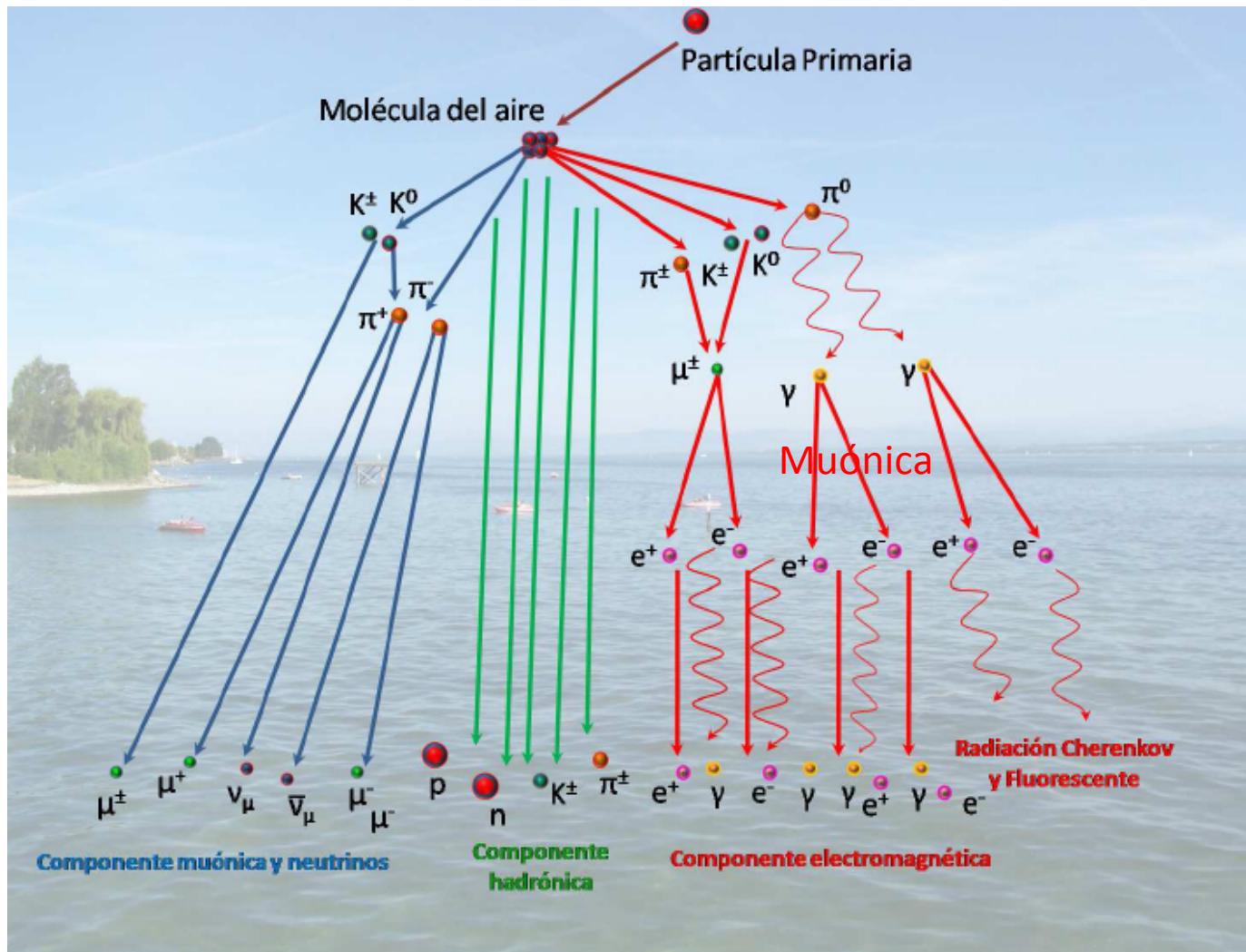
Cuando una astropartícula alcanza la Tierra, interacciona con las moléculas de la atmósfera y produce una cascada de partículas



- 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

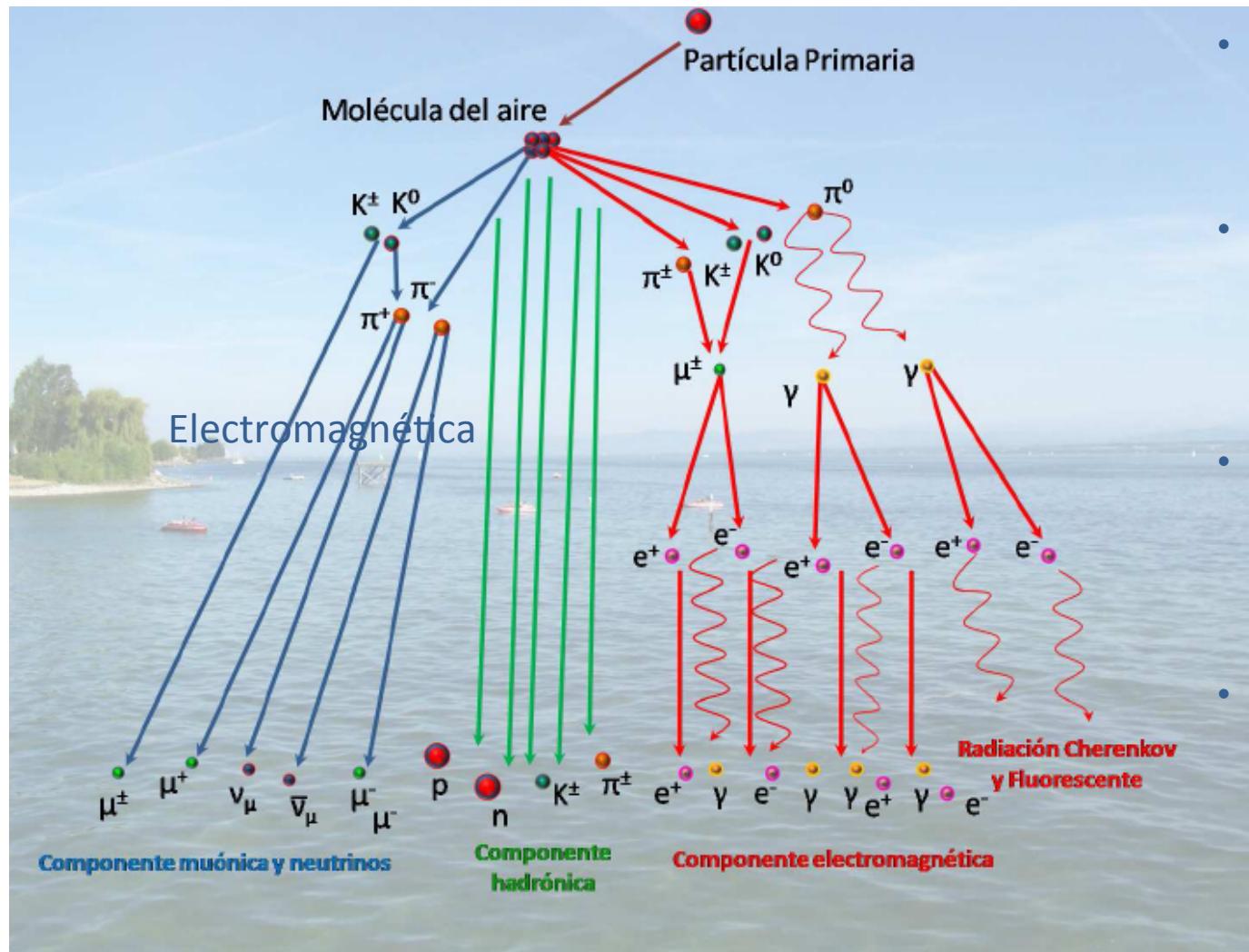
Cuando una astropartícula alcanza la Tierra, interacciona con las moléculas de la atmósfera y produce una cascada de partículas



- Se genera por el decaimiento de π 's de baja energía y K 's
- ~10% de las partículas cargadas del chubasco son μ 's
- Casi no interaccionan, penetran muy profundamente
- Sólo algunos μ '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 γ 's del decaimiento de π 's neutros y partículas η
- 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
- Despues de la E_{crit} empieza la pérdida por ionización y el chubasco se absorbe en la atmósfera

PROTÓN DE 1×10^{18} eV



Referencias:

Pryecto COSMUS:

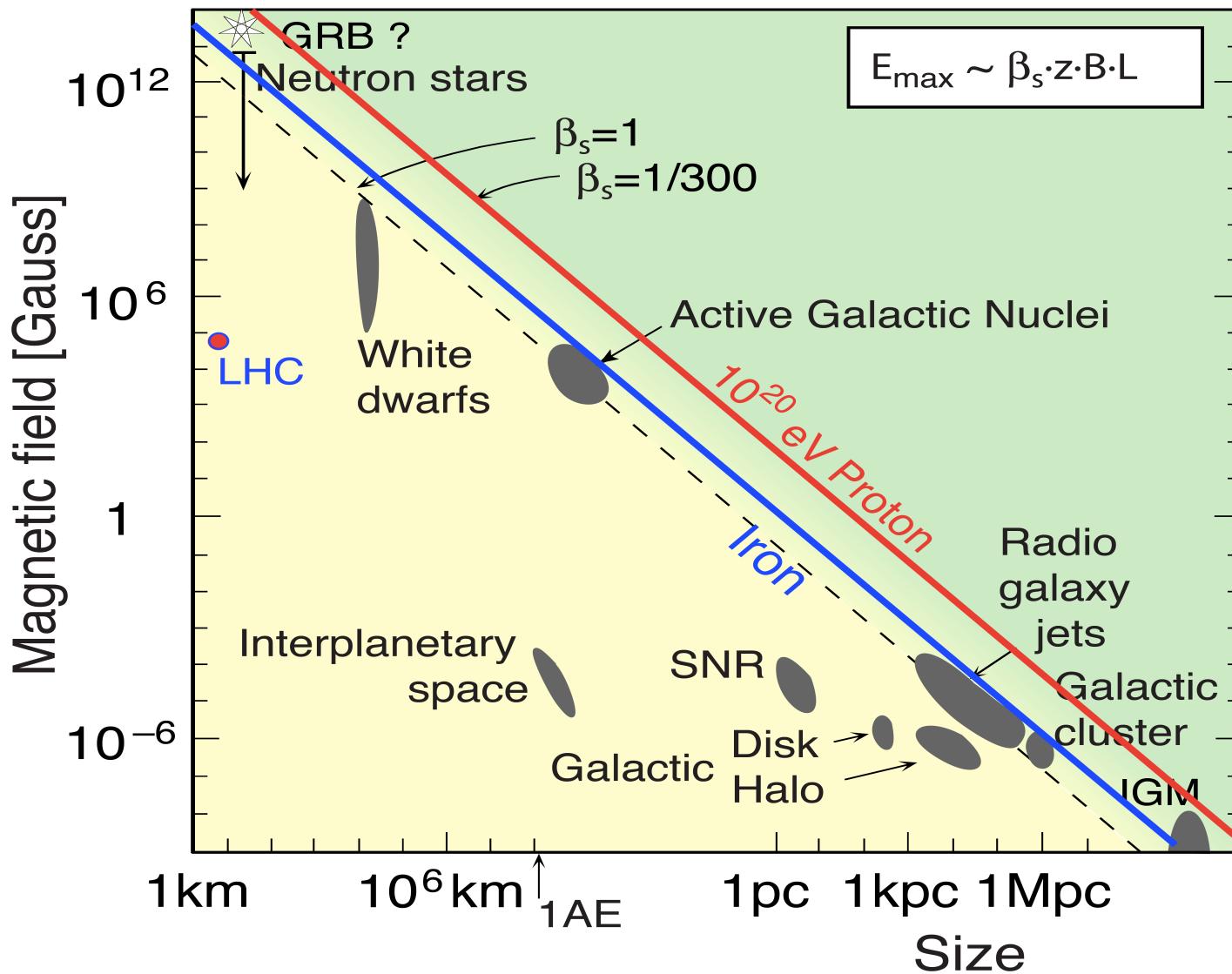
[http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/
aires/](http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/aires/)

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: POSIBLES FUENTES

$E > 10^{19}$ eV



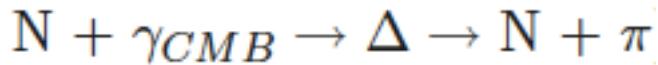
MODELOS DE ACCELERACIÓN Y PROPAGACIÓN:

- **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, β_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 5×10^{19} eV (Auger midió una supresión a esa energía)



Con N nucleón y Δ 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 ACCELERACIÓN 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.

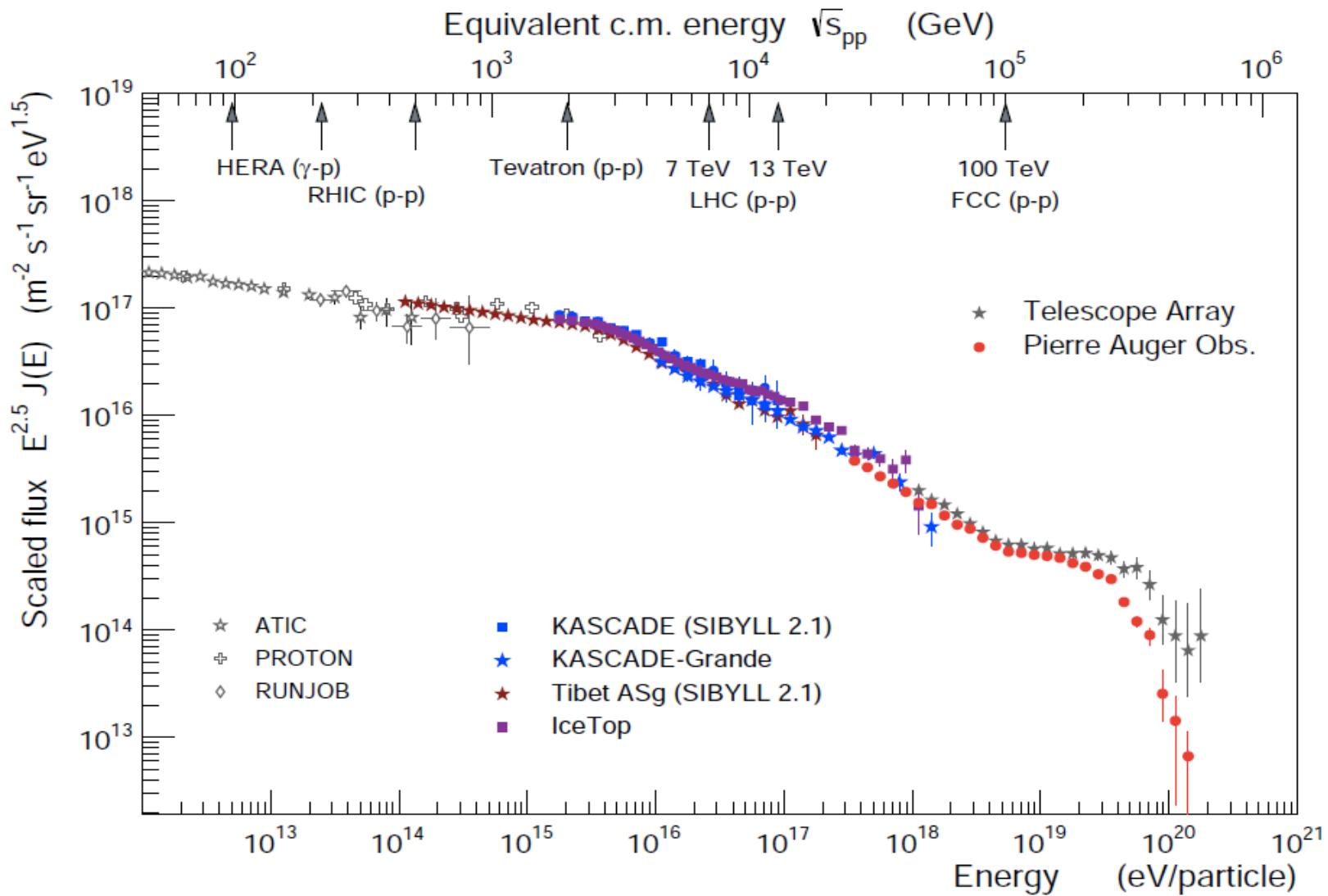
MODELOS HADRÓNICOS

- 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?

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

MODELOS HADRÓNICOS: ESPECTRO DE RC



R. Engel (KIT)

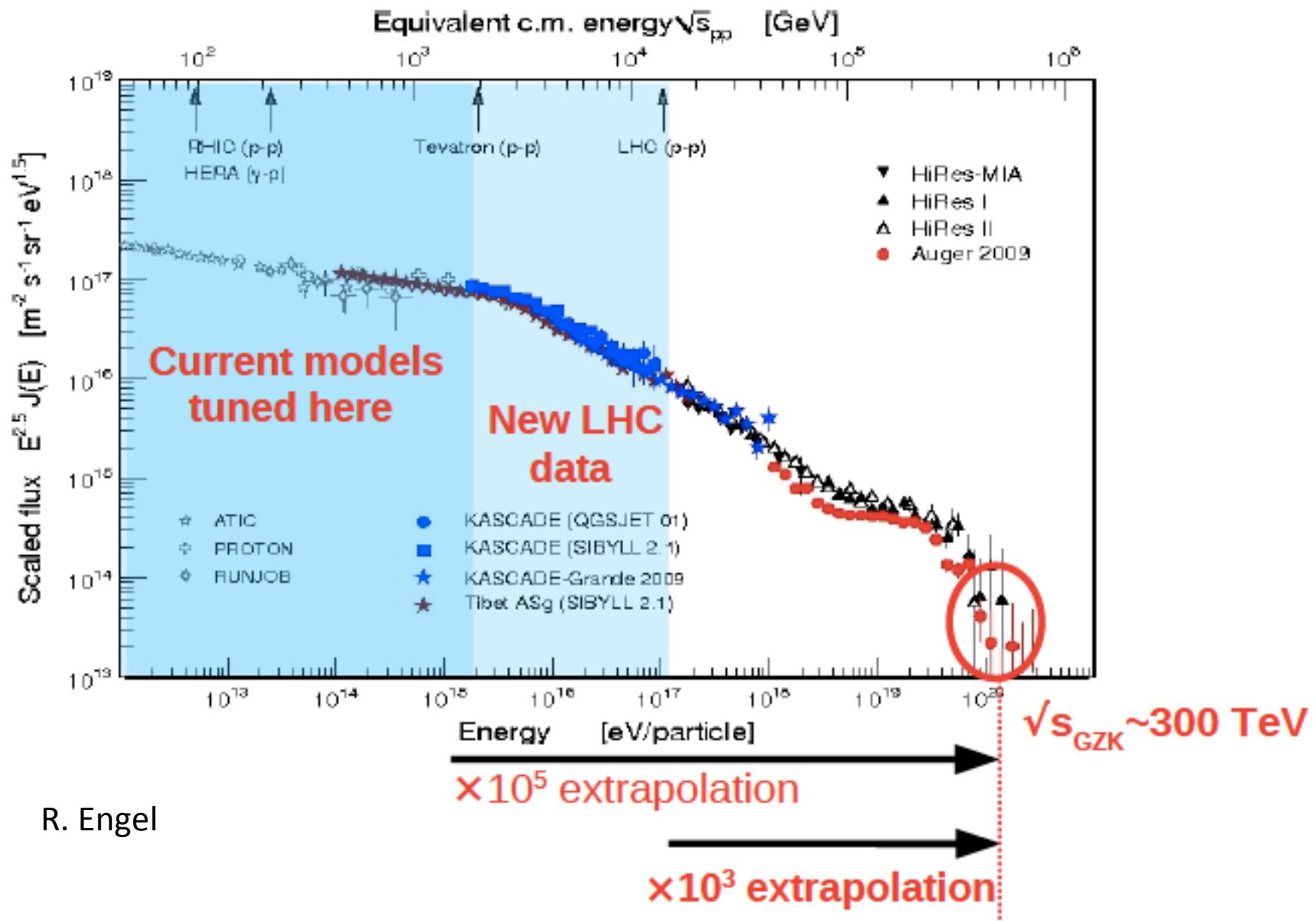
MODELOS HADRÓNICOS MÁS ACTUALIZADOS:

- **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 (sólo EPOS la considera)

Para más información ver:

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

EL LHC Y LOS RC

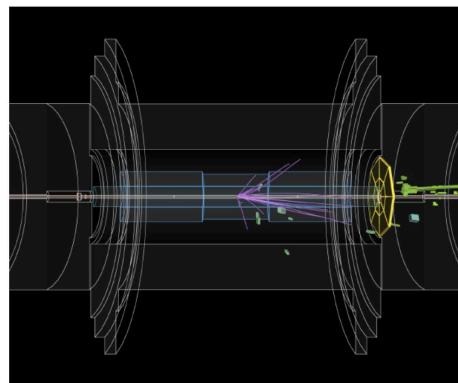


karen.scm@gmail.com

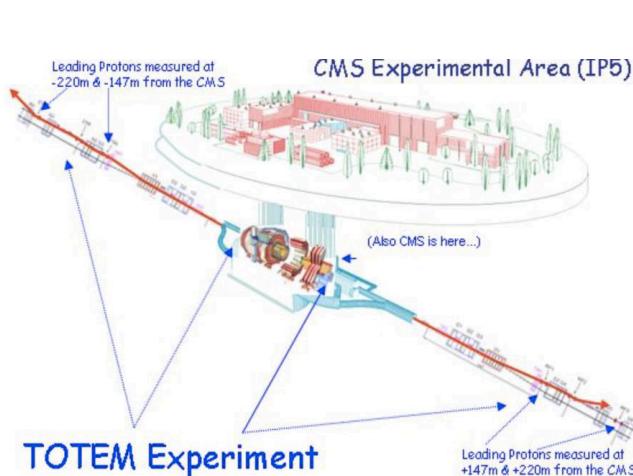
EL LHC Y LOS RC

Mediciones útiles para los RC:

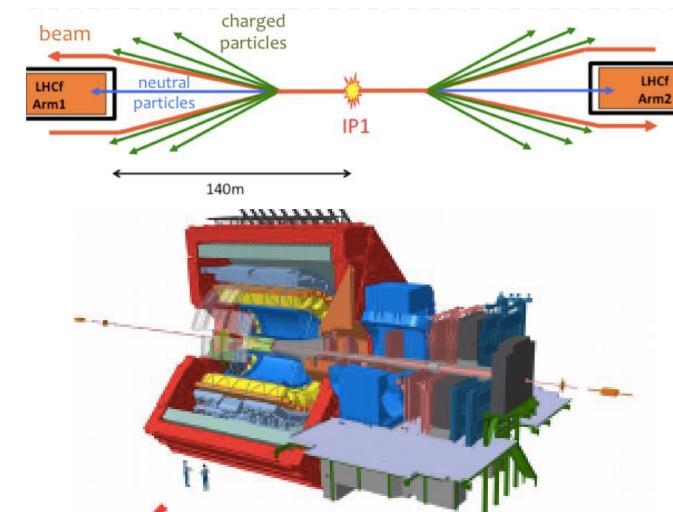
- Secciones transversales inelásticas a 13 TeV con el trigger ALFA protón en ATLAS
- Secciones transversales totales e inelásticas con TOTEM en CMS, a 2.7 TeV, mediciones a 13 TeV están en progreso
- Espectros de partículas cargadas y flujos de energía en la región central para colisiones pp
- LHCf: 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



TOTEM Experiment



ALICE

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

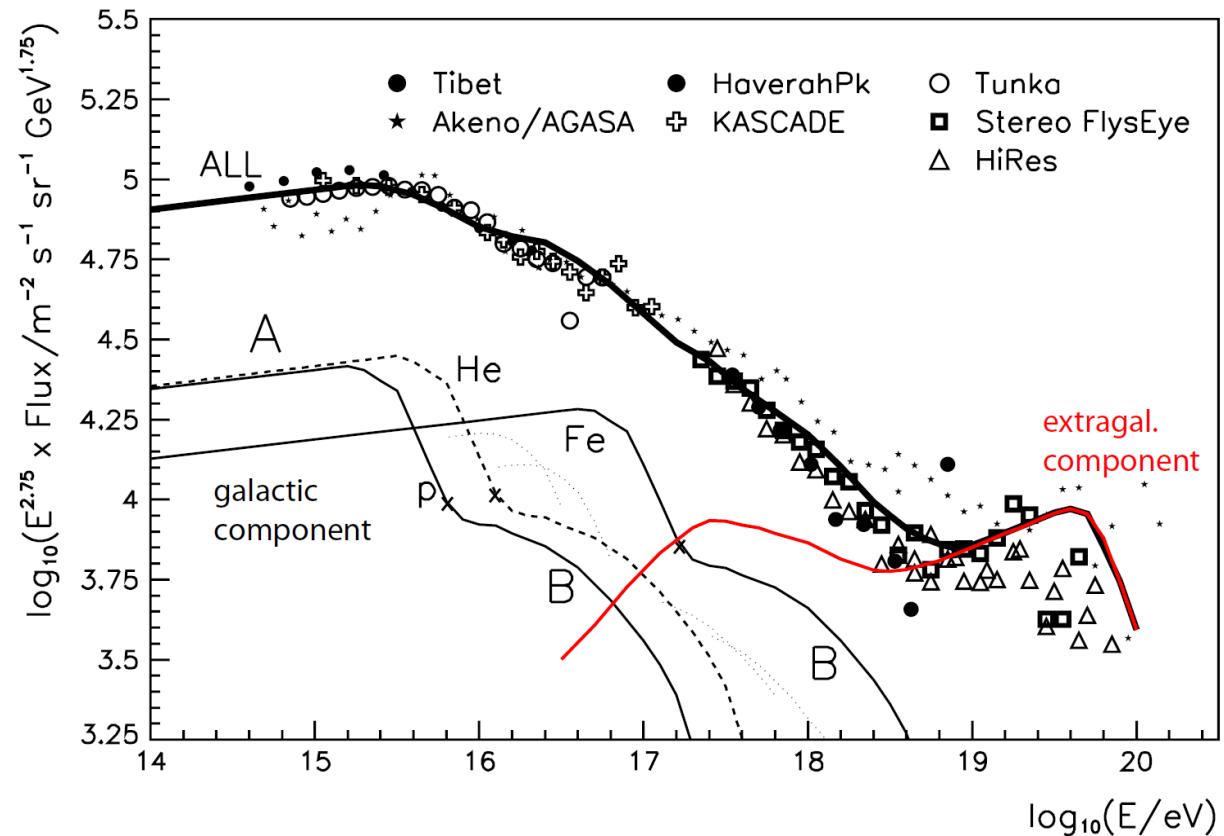
karen.scm@gmail.com

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



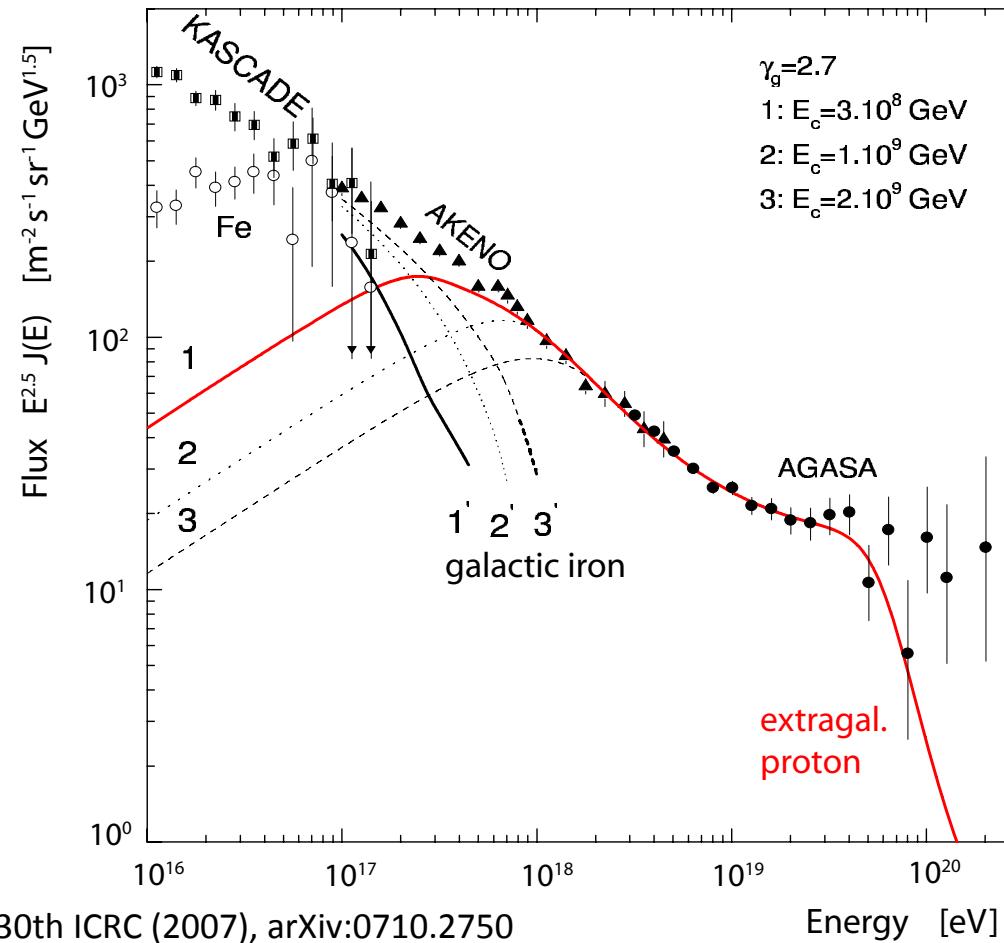
Extragalactic mix composition scenario. A. Hillas astro-ph/0607109 (2006)

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

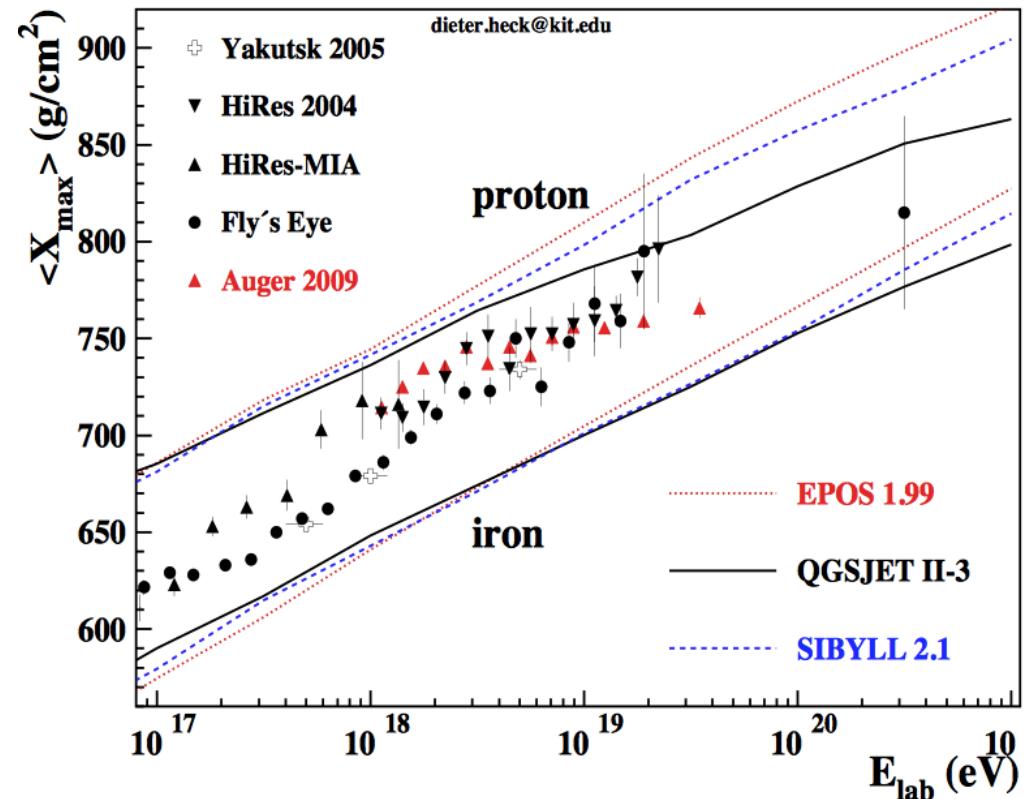
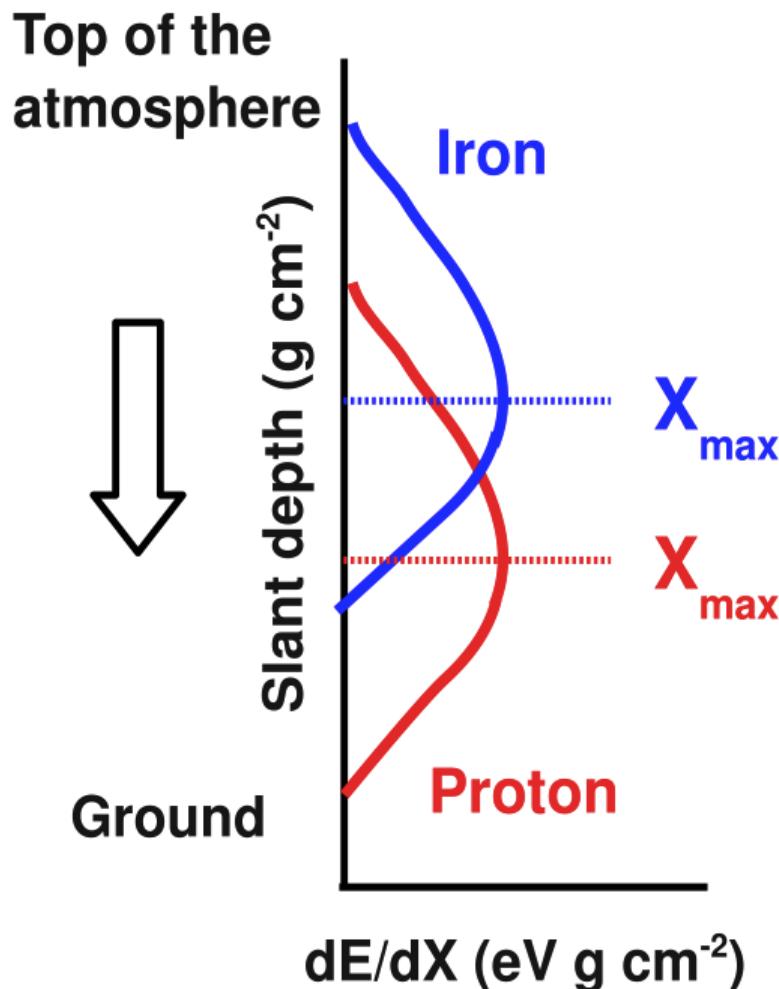
Experimento:
Mezcla o Pesada



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

COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

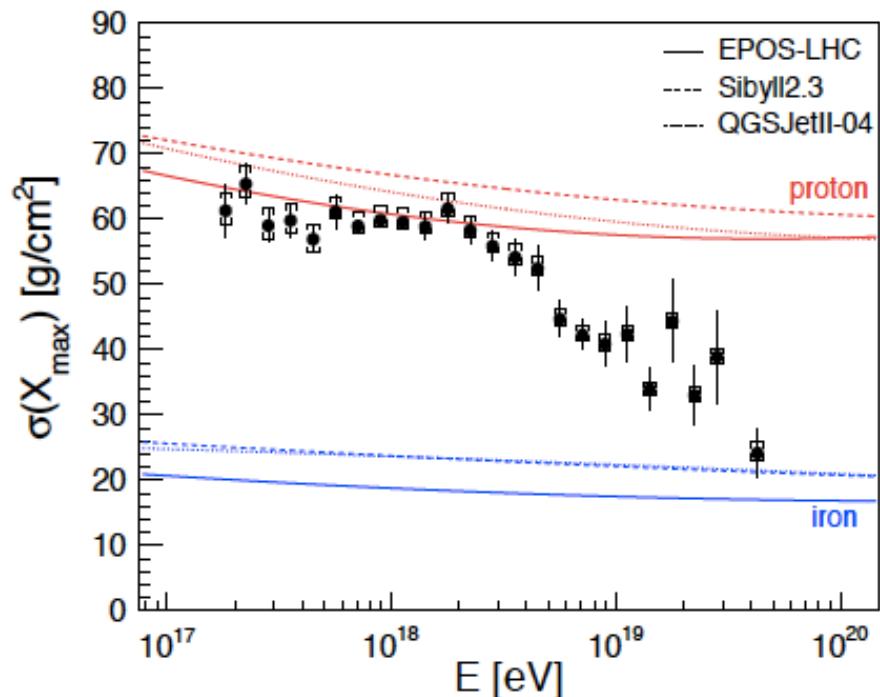
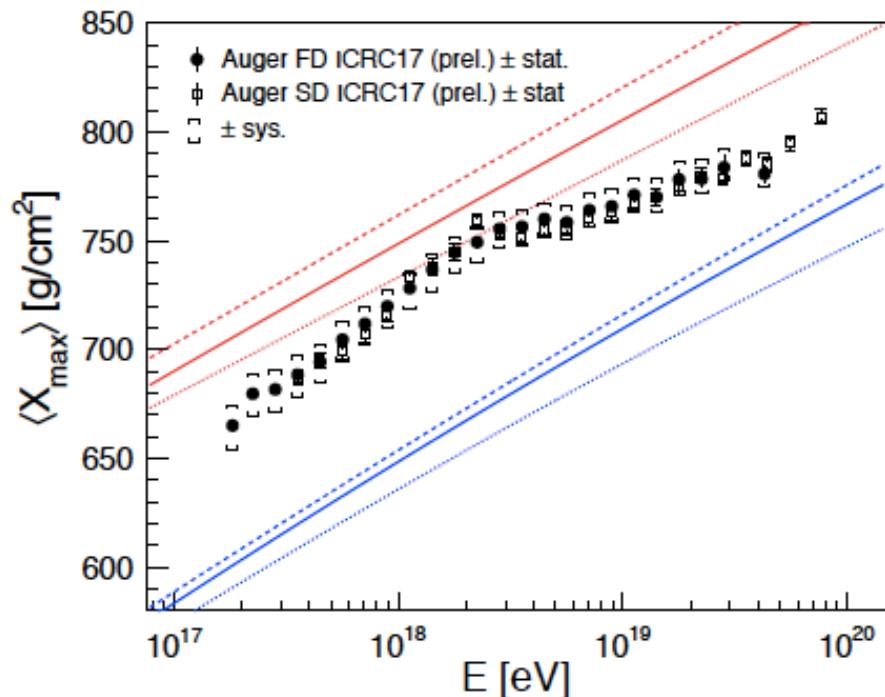
Las variables más sensibles a la composición son el número de muones y la X_{\max}



Razón de elongación

COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

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

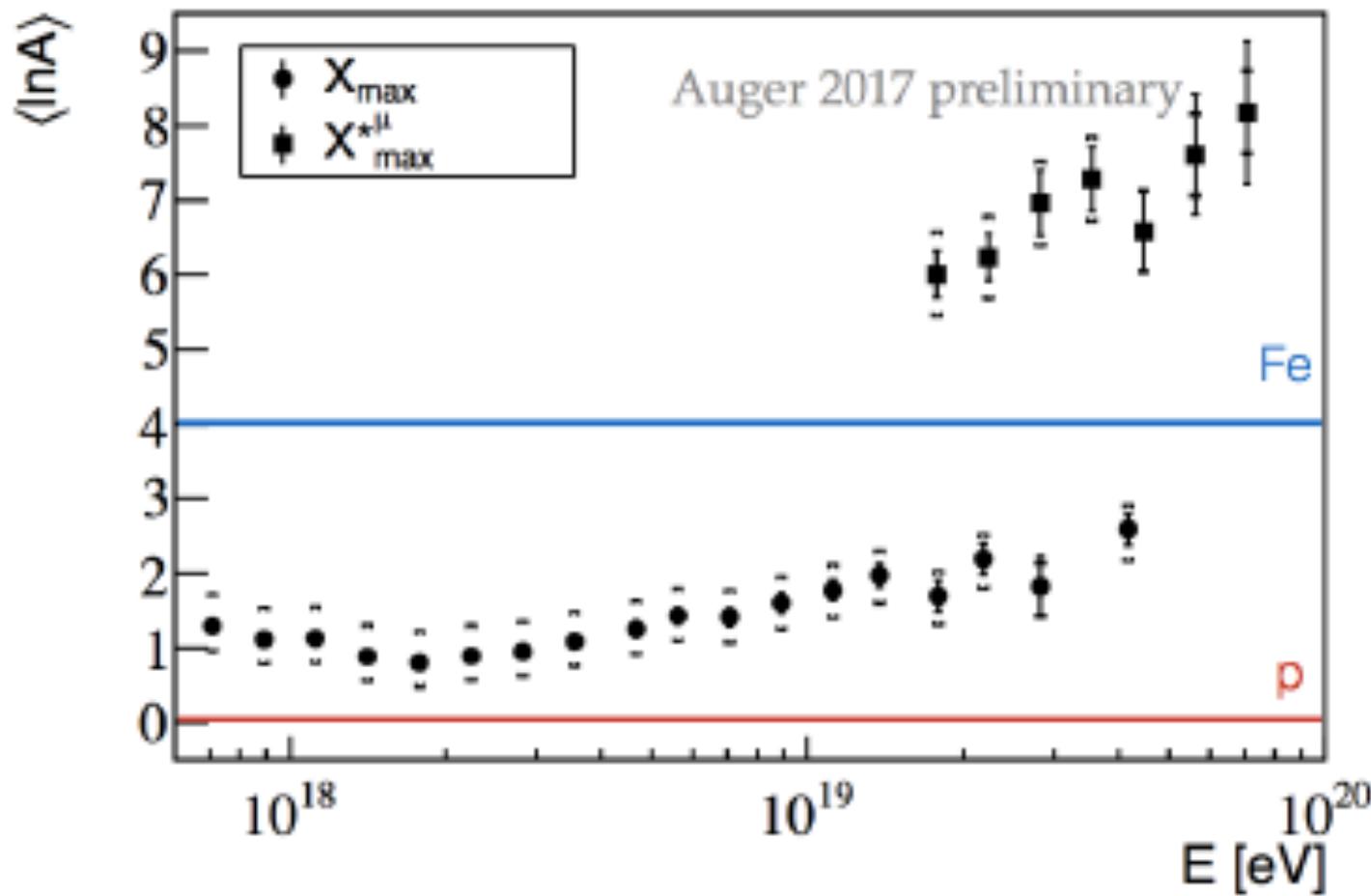


Teoría:
Mezcla o ligera

Experimento:
Mezcla o Pesada

COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

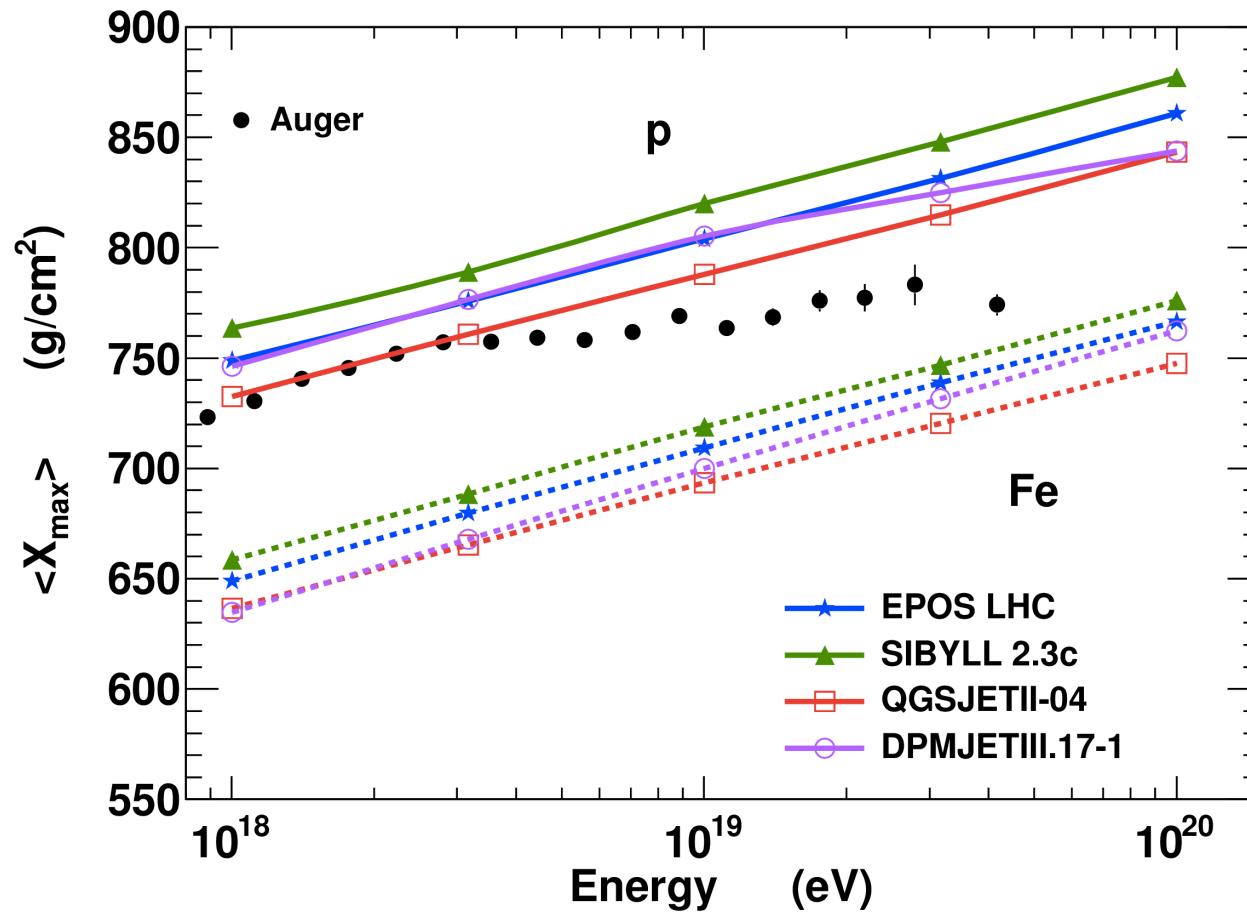
La composición puede dar una pista sobre qué modelos reproducen los mecanismos de producción y propagación correctamente



Experimento:
Mezcla o Pesada

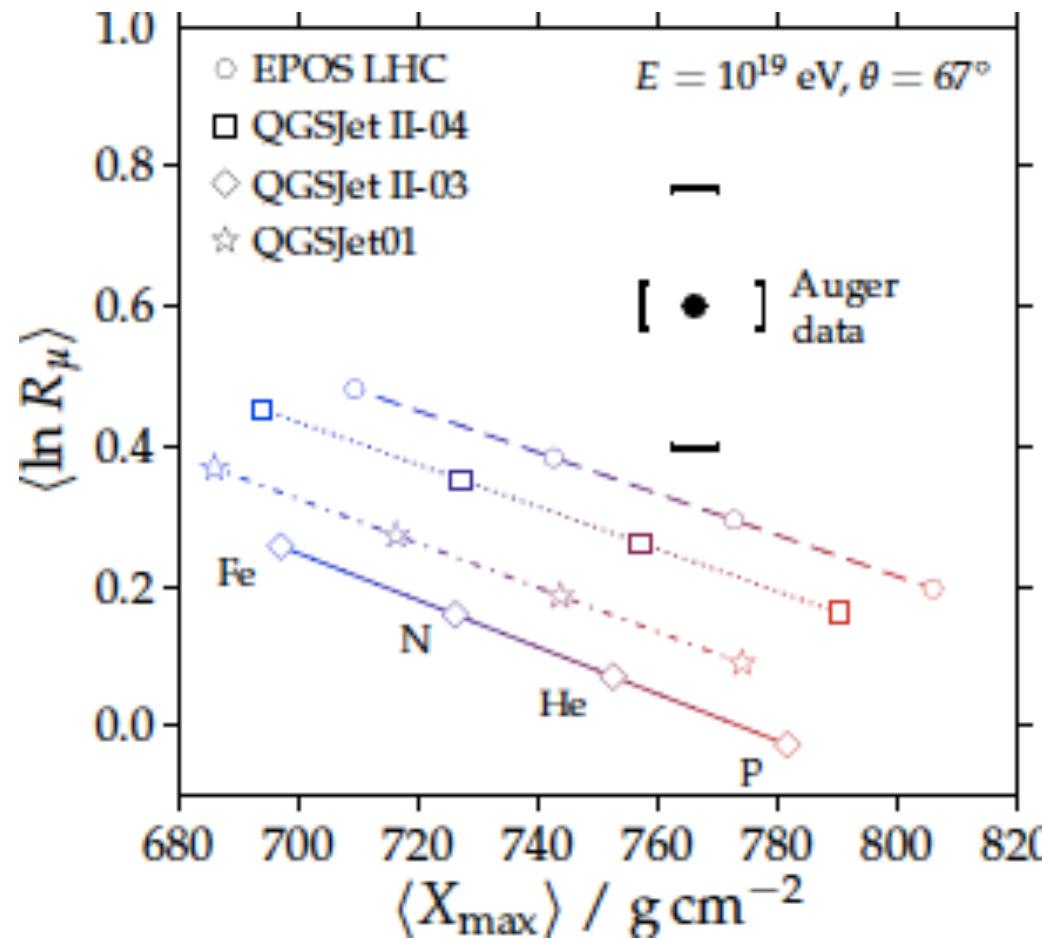
COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

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



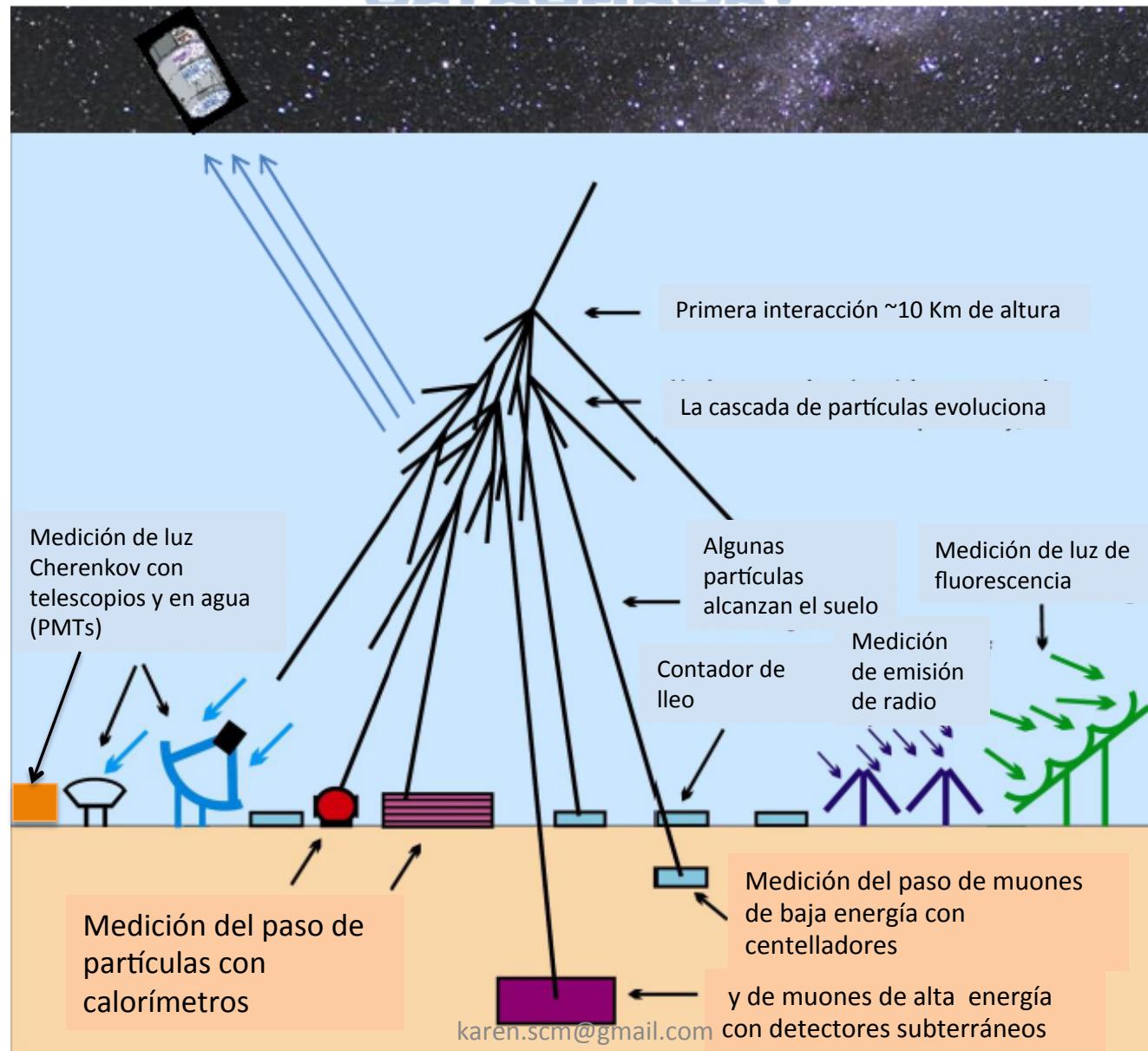
COMPOSICIÓN DE LOS UHECR

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

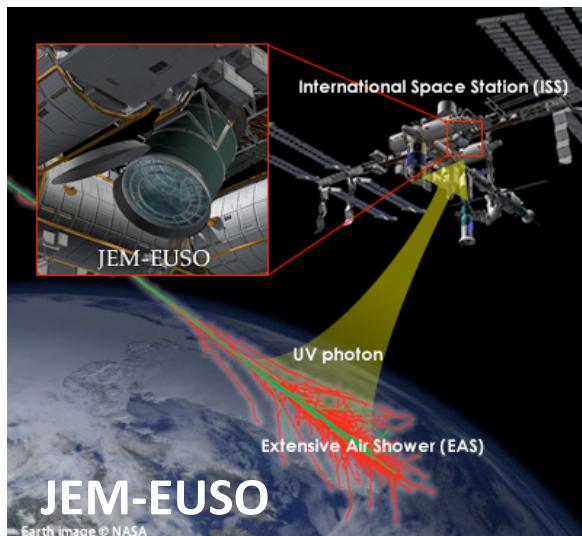
Globos con varios instrumentos

(Detectores de carga, centelladores, etc)



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

Satélites



JEM-EUSO

Earth image © NASA

Rayos Cósmicos

Telescopios de luz Cherenkov

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



HESS

Namibia



MAGIC

La Palma
(Canarias)



Luz de fluorescencia de la atmósfera

$E>10^{19}$ eV



VERITAS

USA

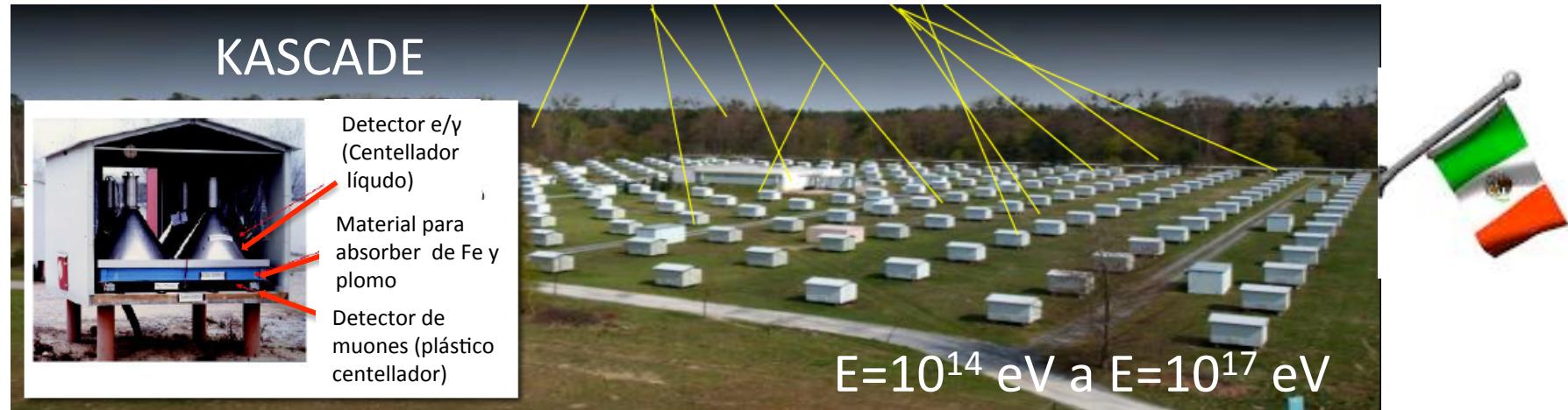
karen.scm@gmail.com

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

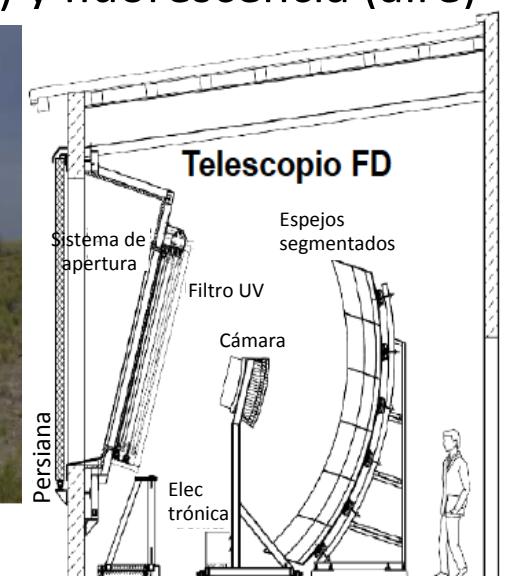
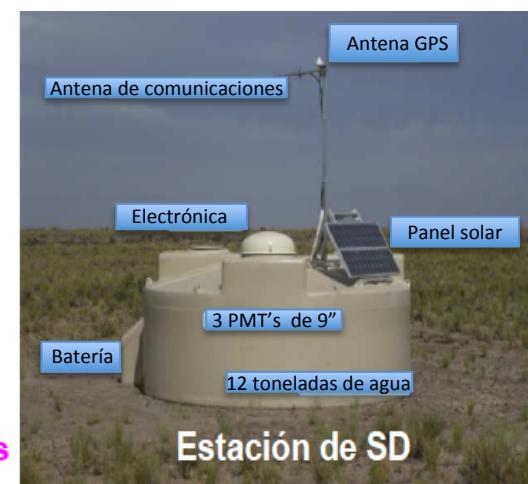
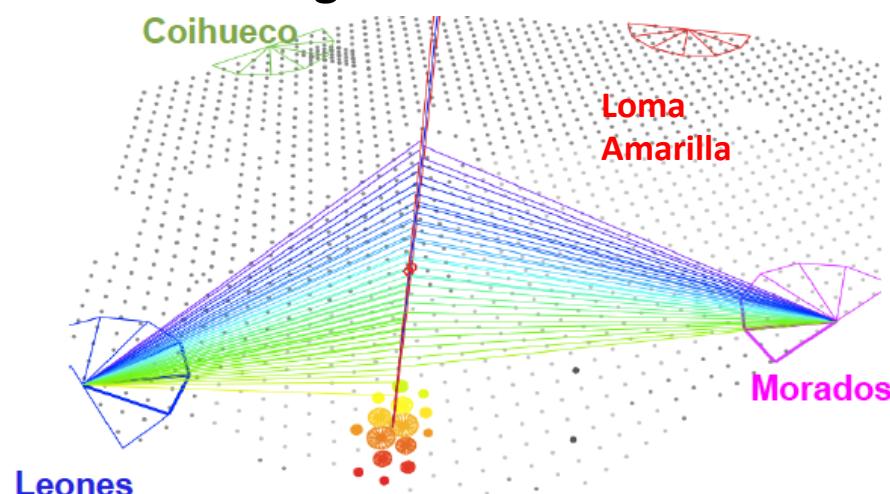
EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

Rayos Cósmicos

Experimento de superficie (Detectores de centelleo + Calorímetro)



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

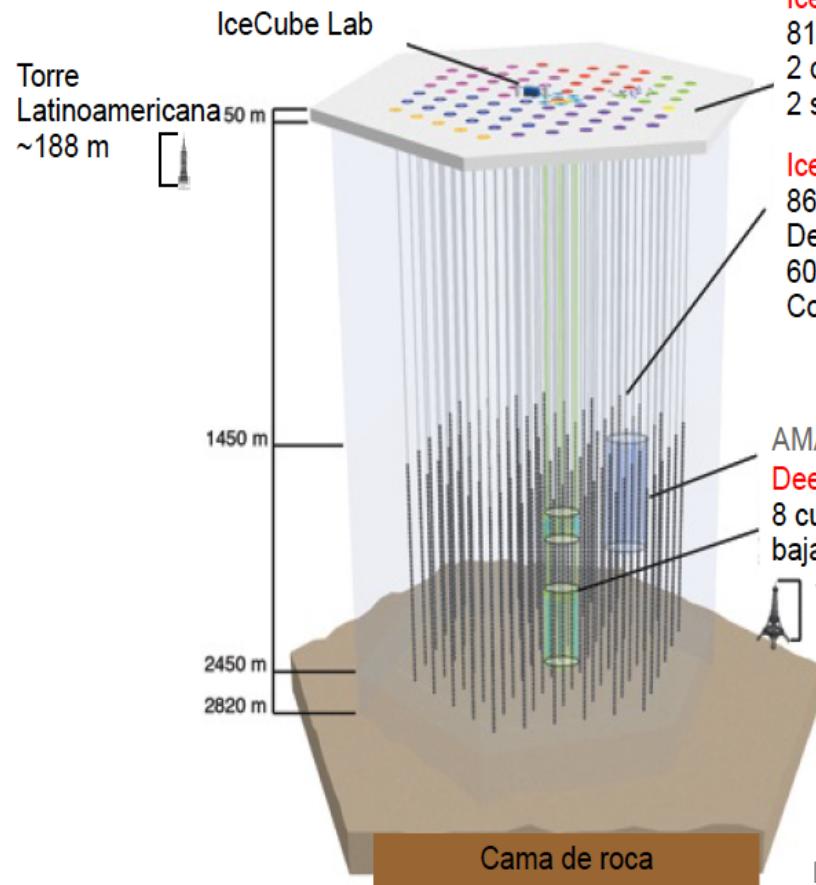


ALGUNOS EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

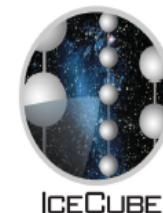
Neutrinos

IceCube

Detector de neutrinos en el Polo Sur



karen.scm@gmail.com



Rayos gamma

Satélites (telescopios espaciales)



Fermi-LAT

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



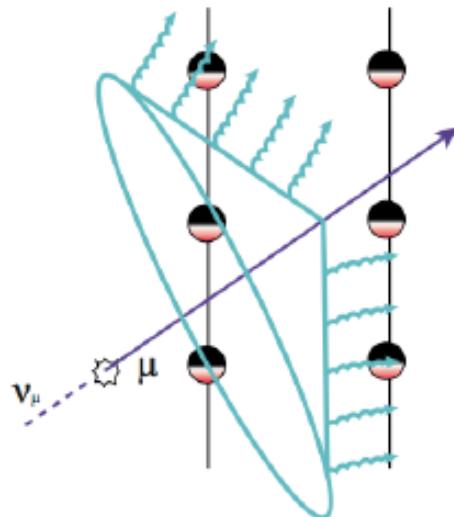
HAWC

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

ALGUNOS EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

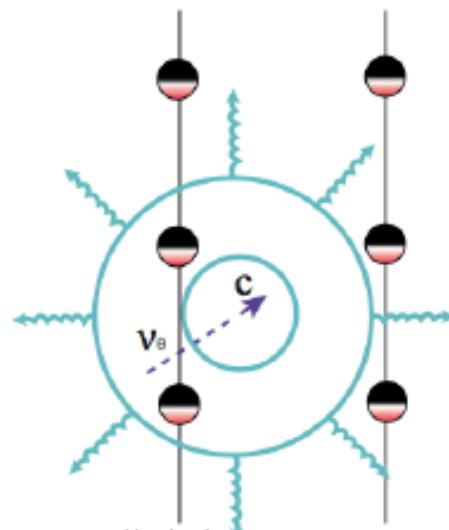
Señales del experimento IceCube
Estudios con simulaciones para predecir sus formas

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



Señal de una trayectoria (track)

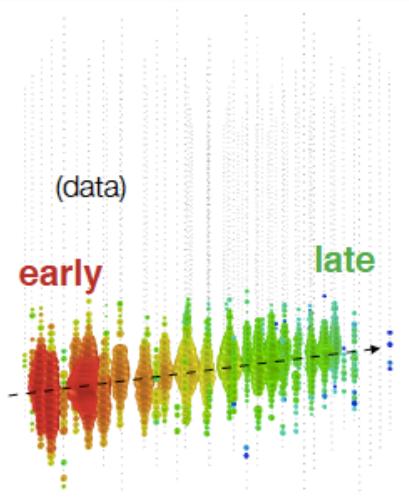
C.H. Ha, Tesis de doctorado, 2011



Señal de una cascada

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

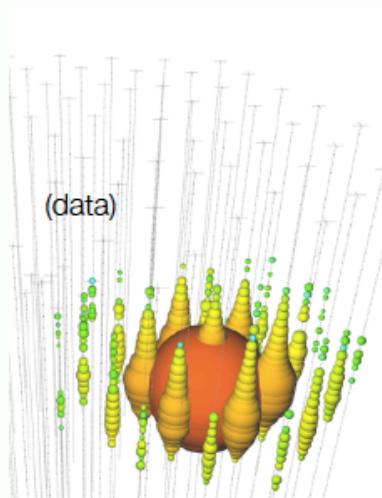
Charged-current ν_μ



Up-going track

Factor of ~ 2 energy resolution
< 1 degree angular resolution

Neutral-current / ν_e

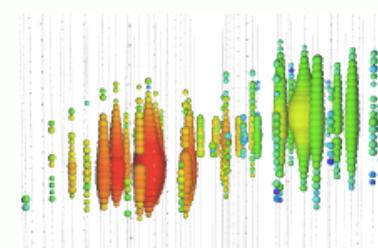


Isolated energy deposition (cascade)
with no track

15% deposited energy resolution
10 degree angular resolution (above
100 TeV)

Charged-current ν_τ

(simulation)



Double cascade

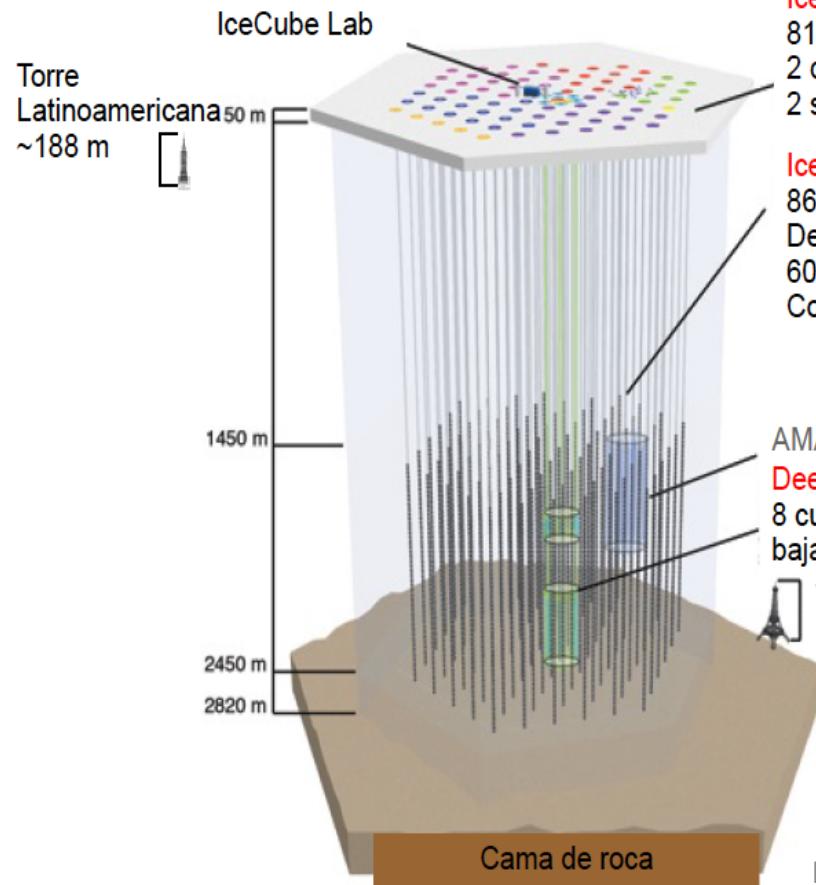
(resolvable above O(100)
TeV deposited energy, 20 m
 τ decay length)

ALGUNOS EJEMPLOS DE EXPERIMENTOS DE MEDICIÓN DE ASTROPARTÍCULAS

Neutrinos

IceCube

Detector de neutrinos en el Polo Sur



IceTop
81 estaciones, cada una con:
2 detectores Cherenkov
2 sensores ópticos (pmt's) por tanque

IceCube($E \geq 1\text{ TeV}$)
86 cuerdas, incluyendo 8 cuerdas de DeepCore:
60 sensores ópticos por cuerda
Completado en Diciembre de 2010

AMANDA (precursor de IceCube)
DeepCore ($10\text{ GeV} \leq E \leq 100\text{ GeV}$)
8 cuerdas, espacio optimizado para bajas energías

Torre Eiffel
324 m

Futuro:
PINGU ($E \leq 10\text{ GeV}$)
MICA ($E \leq 1\text{ GeV}$)

karen.scm@gmail.com

Rayos gamma

Satélites (telescopios espaciales)



Fermi-LAT

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



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



cherenkov
telescope
array

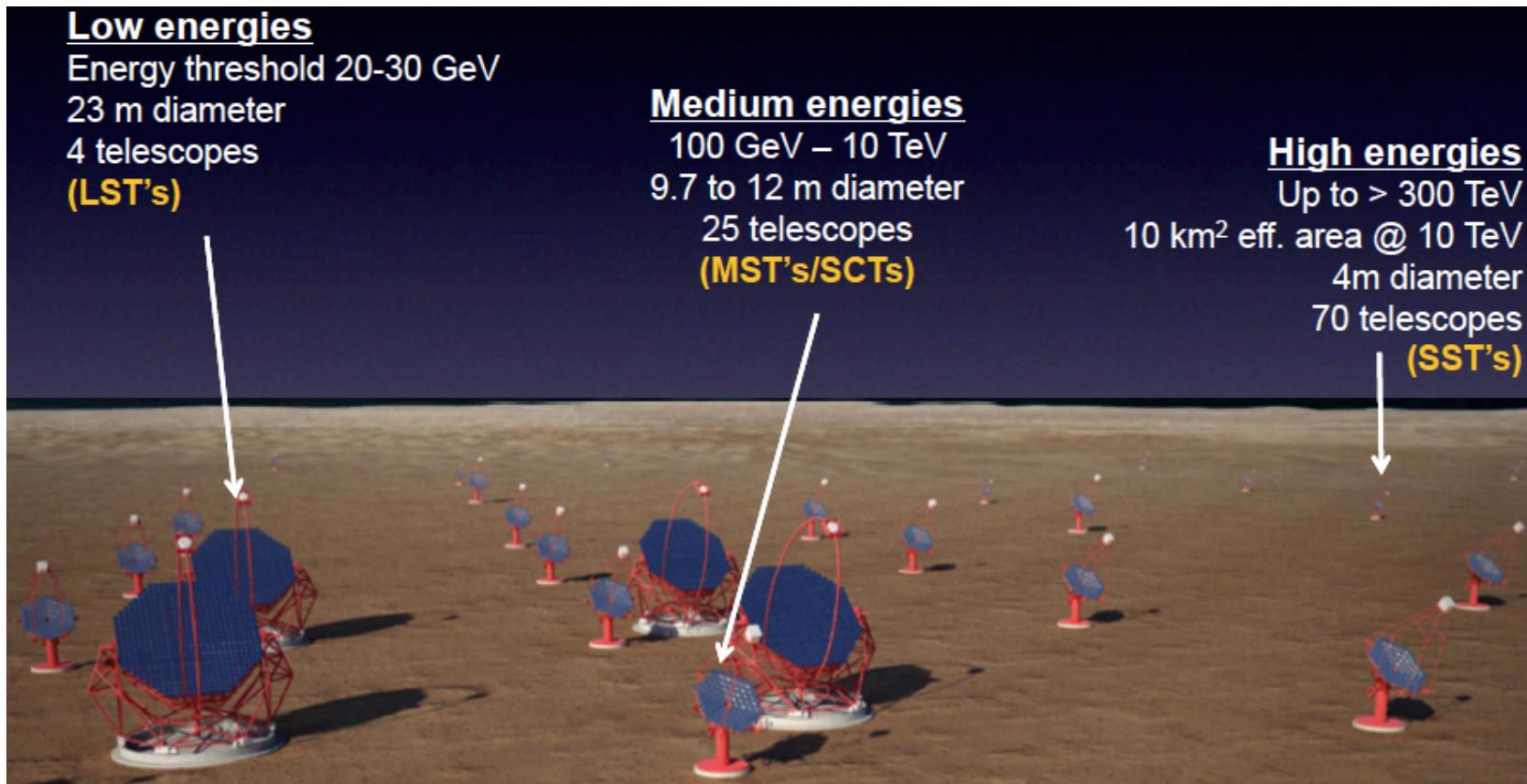


Rayos gamma

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

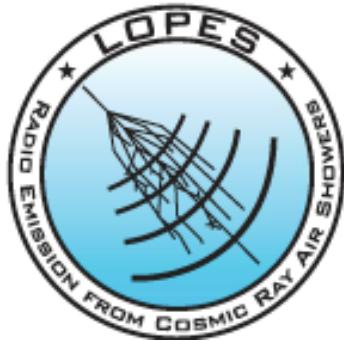
The CTA Consortium, Rene A. Ong, ICRC2017

- 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)



karen.scm@gmail.com

Investigar:
Electrodinámica Clásica
Energía del chubasco
electromagnético



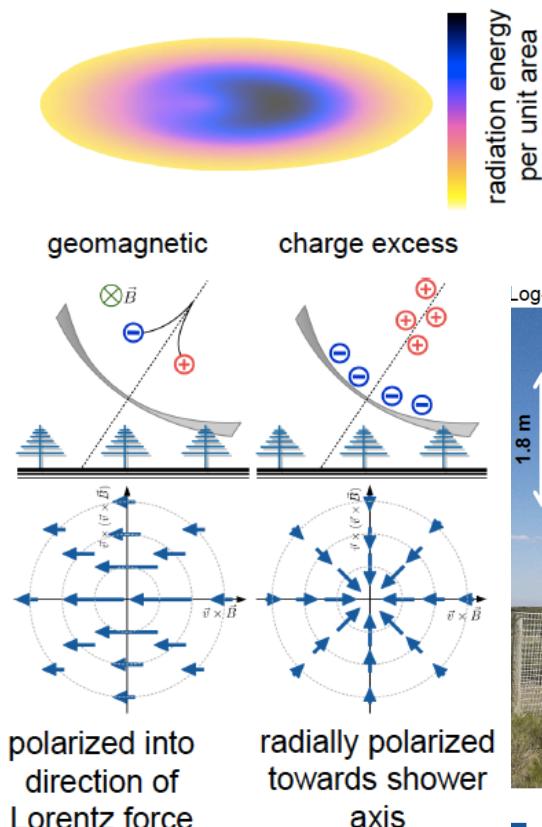
- Location: KIT, Campus North
- Operation: 2003 - 2013
- Frequency band: 40 - 80 MHz
- Diameter of array: 200 m
- Antennas: up to 30 (dipole-like)
- Trigger: KASCADE-Grande
- Threshold: $\sim 10^{17}$ eV



Prototipo de LOFAR

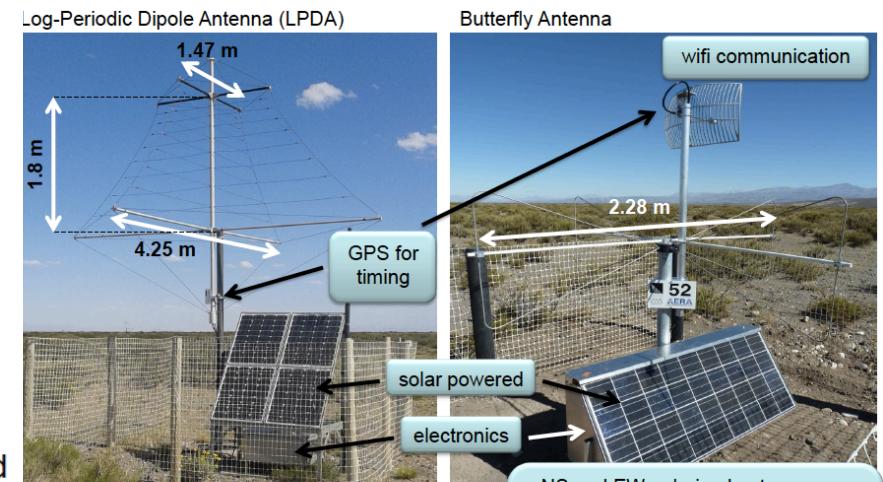
Radio

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



3

Raphael Krause | RWTH Aachen University



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

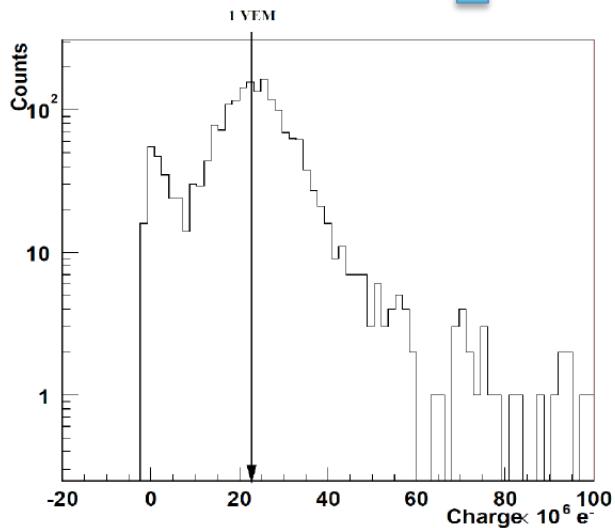
F. G. Schroeder ICRC2017

R. Krause ICRC2017

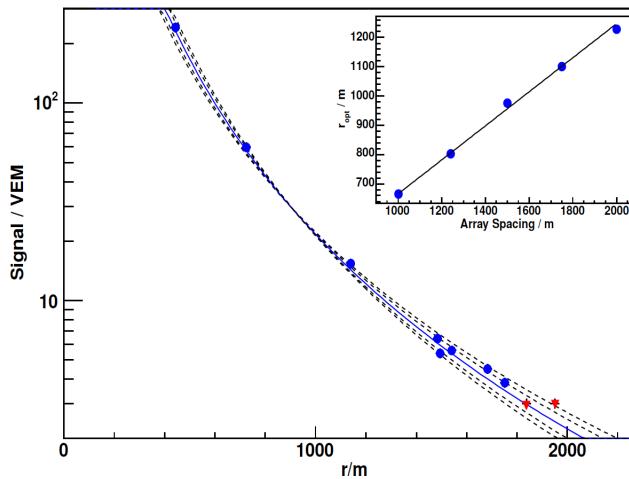
karen.scm@gmail.com

DESPUÉS DE OBTENER LAS MEDICIONES SE NECESITA ANALIZAR LOS DATOS

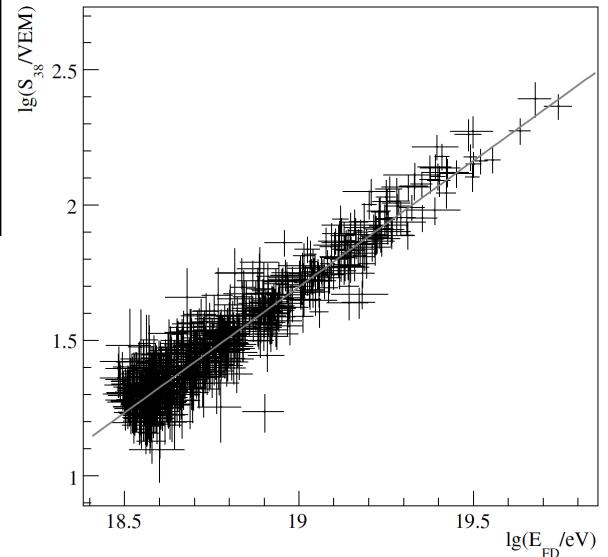
Ejemplo
Pierre Auger



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

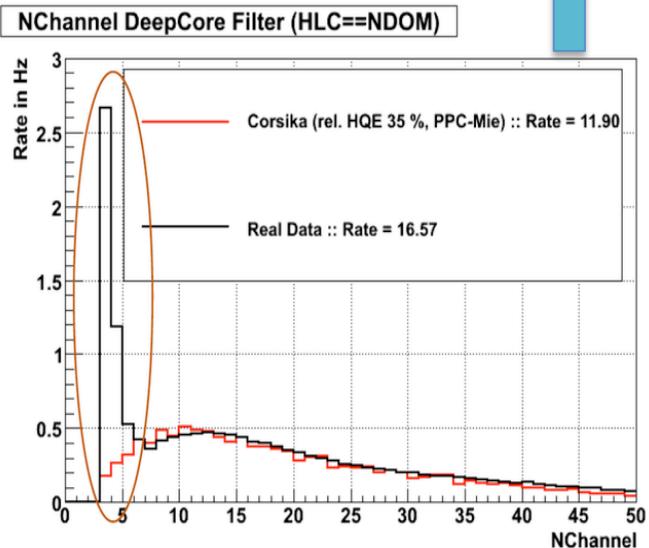


Señal SD como función de la energía FD para estimar energía SD

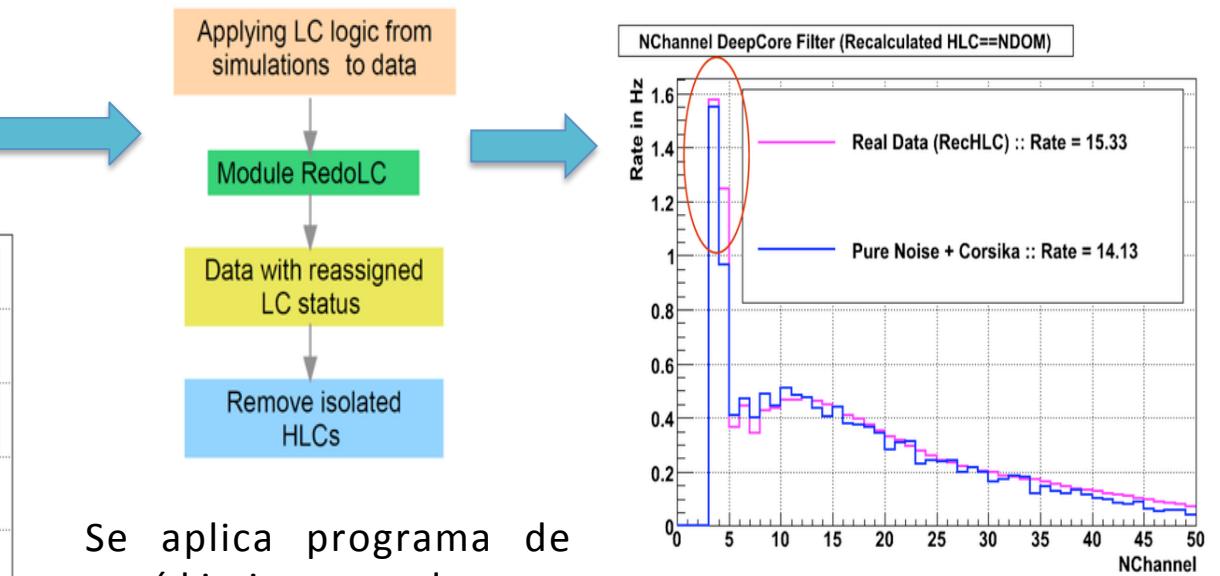
Se estudian para interpretarlos

DESPUÉS DE OBTENER LAS MEDICIONES SE NECESITA ANALIZAR LOS DATOS

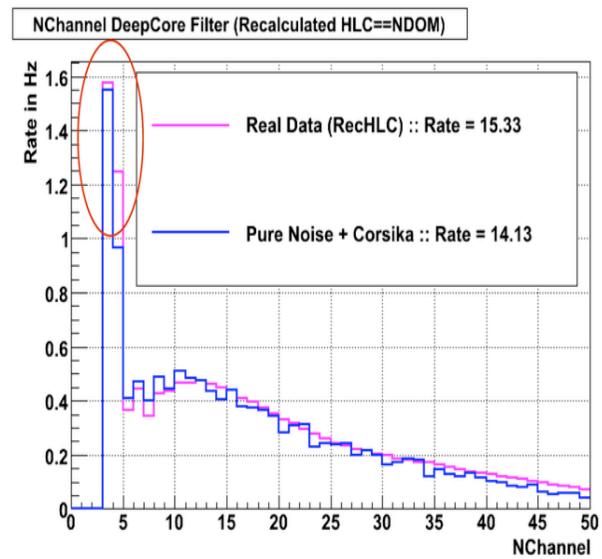
Ejemplo IceCube



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 medidas

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

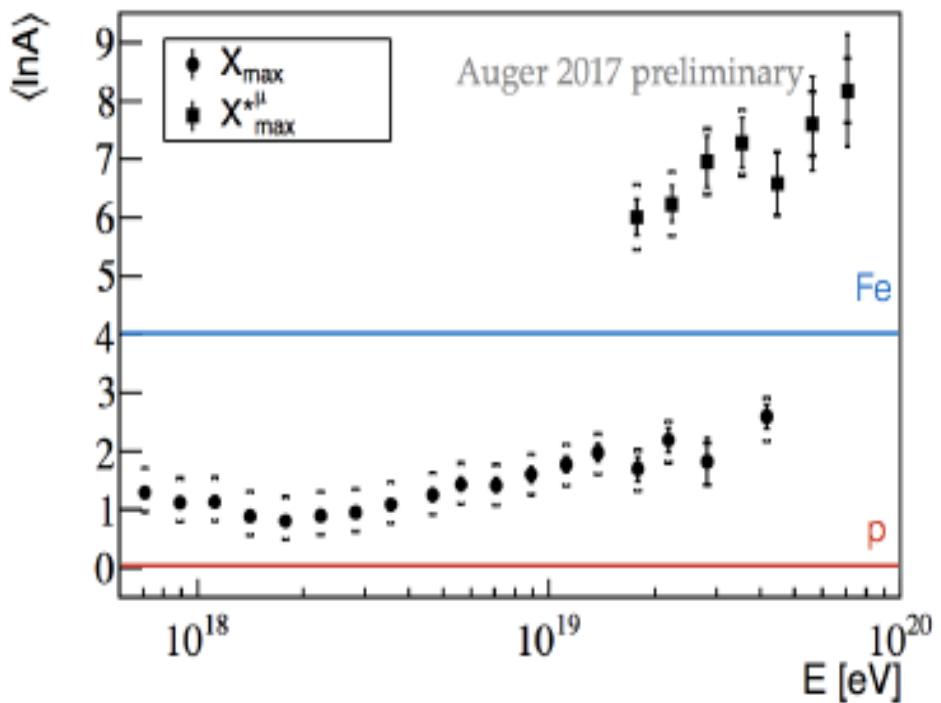
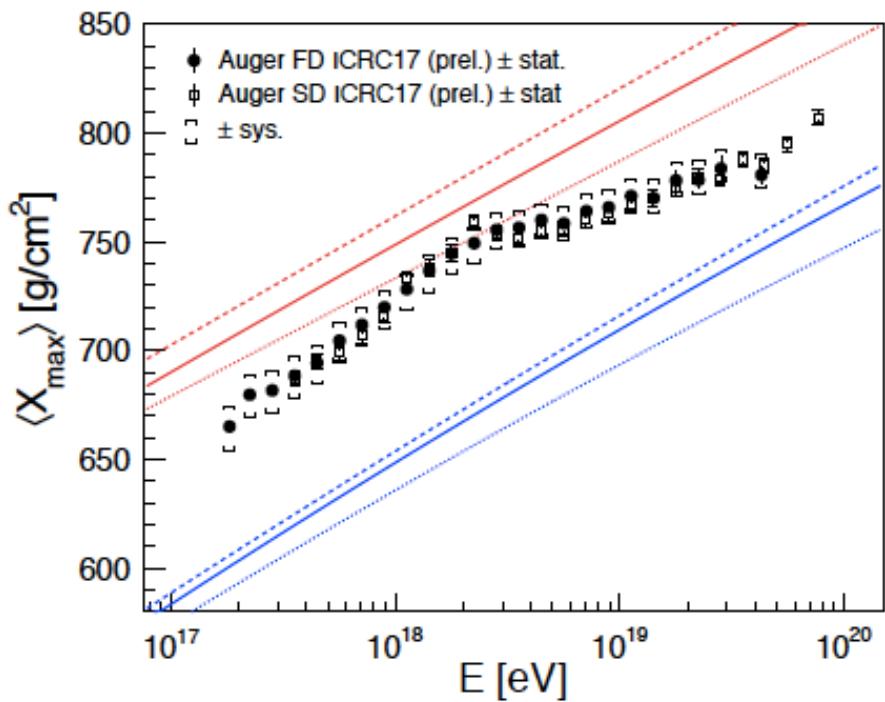
Bukux-awulú *Tioj-bätyix*
Miac tlazocamatic *iGRACIAS!*
Diosí meyamu *NIB ÓOLA*
Hocolawal *Ts'akatal*
Tak' *dyos bo'otik*

EJERCICIO

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

Sin embargo los muones que se producen en la atmósfera a más de 10 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



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

ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN



Deduction of $\ln A = \ln A_{Fe} \left(\frac{X_{max} - X_{max}^P}{X_{max}^Fe - X_{max}} \right)$

Interpolation between 2 points in the plot:

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

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

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

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

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

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

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

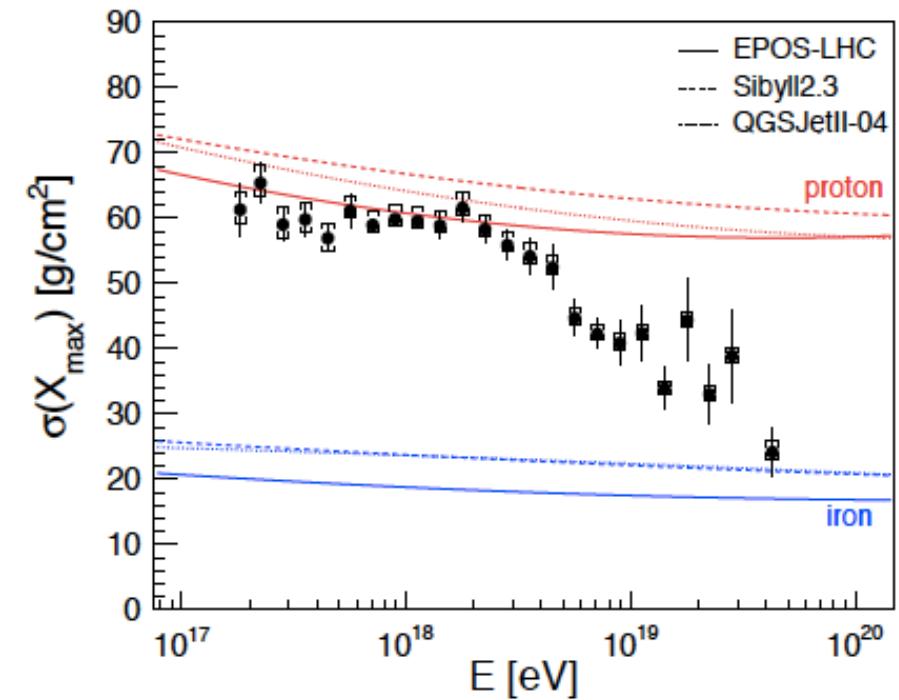
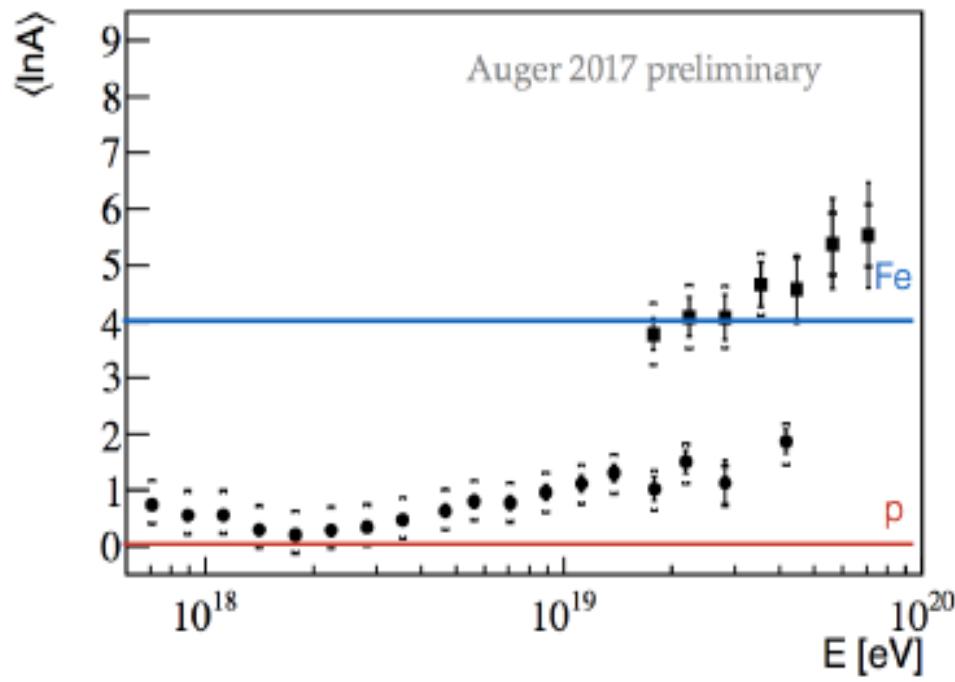
$$= X_{max}^P + \left(\frac{X_{max}^P - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) \left(\ln\left(\frac{E}{A}\right) + \ln E \right)$$

$$= X_{max}^P + \left(\frac{X_{max}^P - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) (-\ln E + \ln A + \ln E)$$

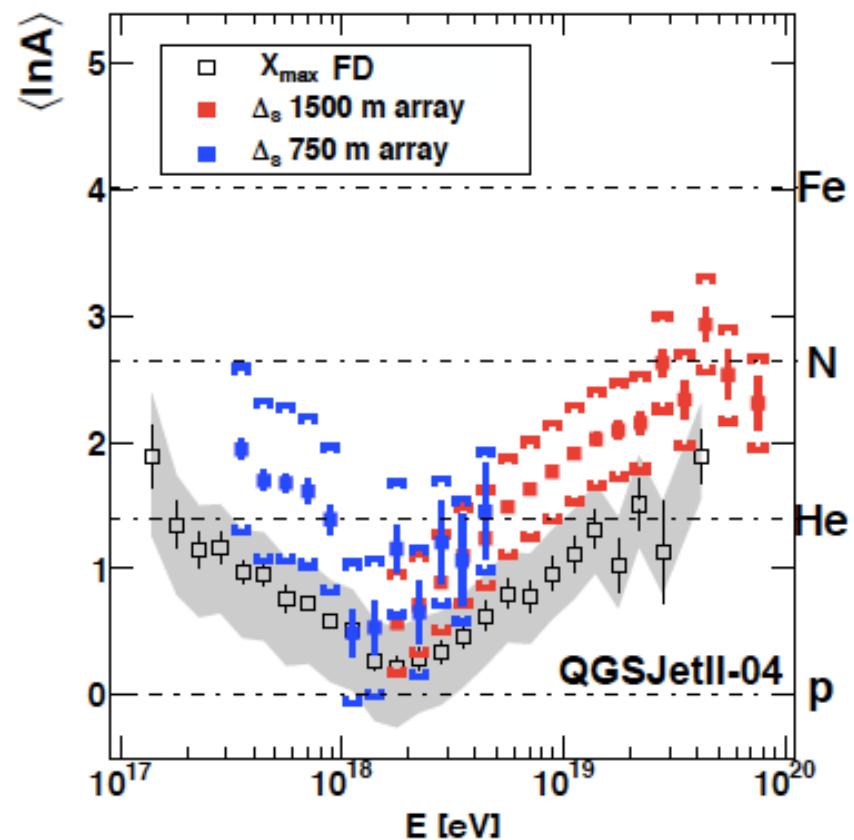
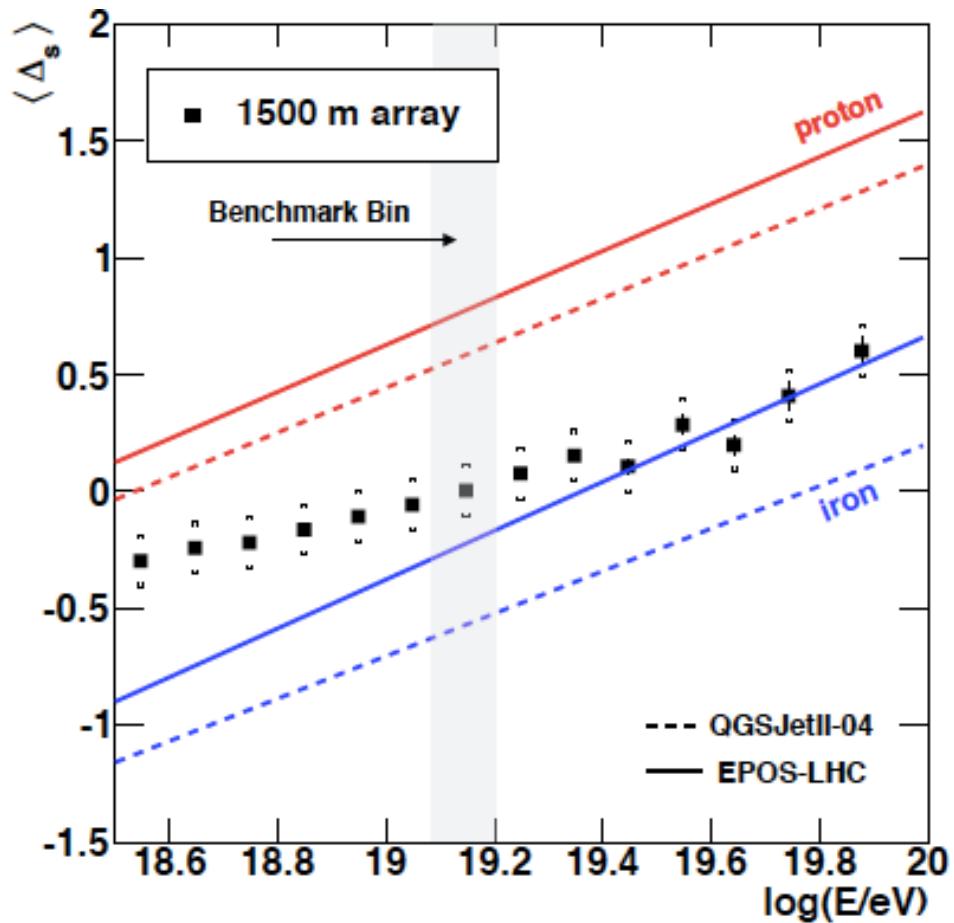
$$= X_{max}^P + \left(\frac{X_{max}^P - X_{max}^{Fe}}{\ln A^{Fe}} \right) \ln A$$

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

ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN



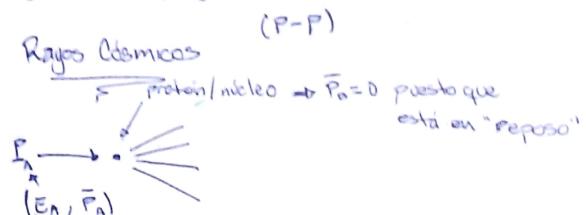
ESTIMACIÓN DE LA MASA A PARTIR DE LA RAZÓN DE ELONGACIÓN



TRANSFORMACIÓN MARCO AIRE-LAB

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

Relación entre experimentos de laboratorio y Rayos Cómicos en CMS



En el laboratorio

$$(E_a, \vec{p}_a) \quad \text{---} \quad (E_b, \vec{p}_b) \quad \text{Aqui notemos que } \vec{p}_a = -\vec{p}_b \\ \Rightarrow \vec{p}_c = 0$$

CMS-Lab

$$\vec{p}_a + \vec{p}_b = \vec{p}_c = 0 \quad \text{y} \quad E_a + E_b = E_c \quad E_c = E_a + E_b$$

$$\text{También} \quad \vec{p}_c \cdot \vec{p}_c = \vec{p}_c^2 = E_c^2 - \vec{p}_c^2 = M^2 \quad \Rightarrow \quad E_c^2 = M^2$$

$$\Rightarrow S = (E_a + E_b)^2 = M^2 \Rightarrow \sqrt{S} = E_a + E_b$$

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 la energía de la colisión
 $M^2 = (P_A + P_B)^2 = P_A^2 + 2P_A \cdot P_B + P_B^2 = P_A^2 + 2(E_A E_B - P_A P_B) + P_B^2$
pero $P_B = 0 \Rightarrow E_B^2 - P_B^2 = M_B^2 \Rightarrow E_B^2 = M_B^2 \Rightarrow M^2 = m_A^2 + 2(E_A + m_B) + m_B^2$

Usando ambas relaciones

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

$$\text{Pero } m_A = m_B = 0.933 \text{ GeV} \Rightarrow S = 2(E_A m_B) + 2m_B^2$$

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

En la práctica m_B es despreciable

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

Ejemplo:

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

$$\sqrt{S} = \sqrt{2(1 \times 10^{11})^2 0.933} \text{ GeV} = \underbrace{4.33 \times 10^5}_{\text{GeV}}$$