

**Estudio de la Composición de
Rayos Cósmicos en el Rango de
Energía de 10^{17} - 10^{18} eV. con el
Observatorio Pierre Auger y
CHARM**

Presenta: Enrique Varela Carlos

Asesor: Dr. Humberto Salazar Ibargüen

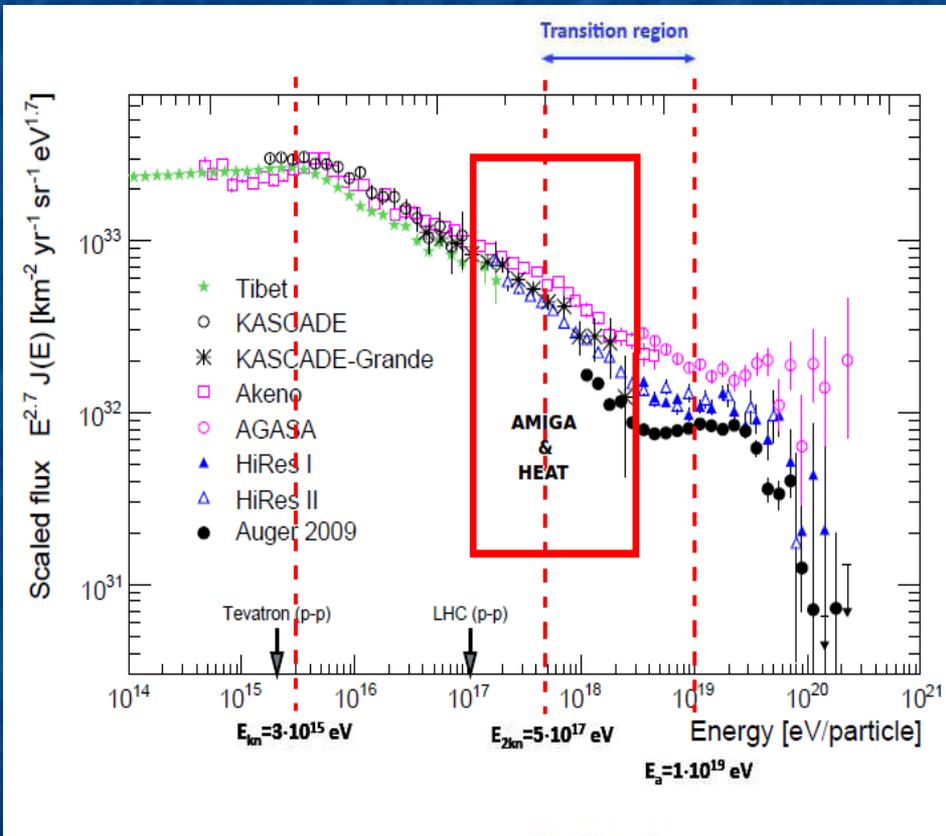
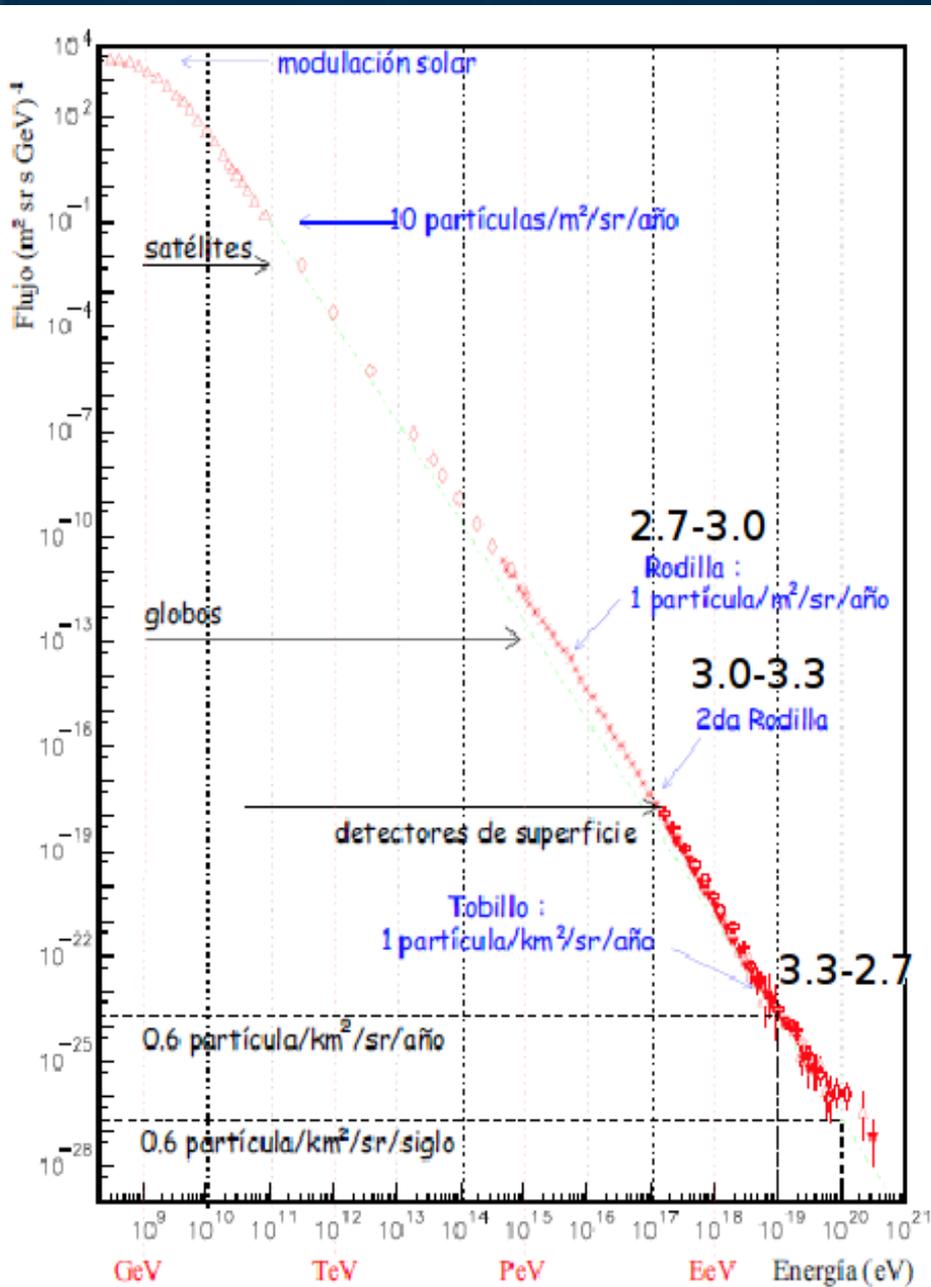
RESUMEN

El observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger (OPA) sitio sur en Malargüe Argentina fue diseñado para observar rayos cósmicos con energías arriba de $3 \times 10^{18.5}$ eV, en este trabajo se habla de las extensiones al OPA (INFILL, HEAT) agregadas para alcanzar energías de hasta 10^{17} eV. Incluir este rango de energía es crucial para la astrofísica de altas energías pues entre $10^{17.5}$ y 10^{19} eV podría estar ocurriendo la transición entre la componente galáctica y la extra galáctica del flujo de rayos cósmicos. Es por esto que este trabajo se centra en los datos obtenidos con estas extensiones y en el diseño del arreglo de montana en el Parque Nacional Pico de Orizaba llamado CHARM (Cosmic High Altitude Radiation Monitor).

OBJETIVOS

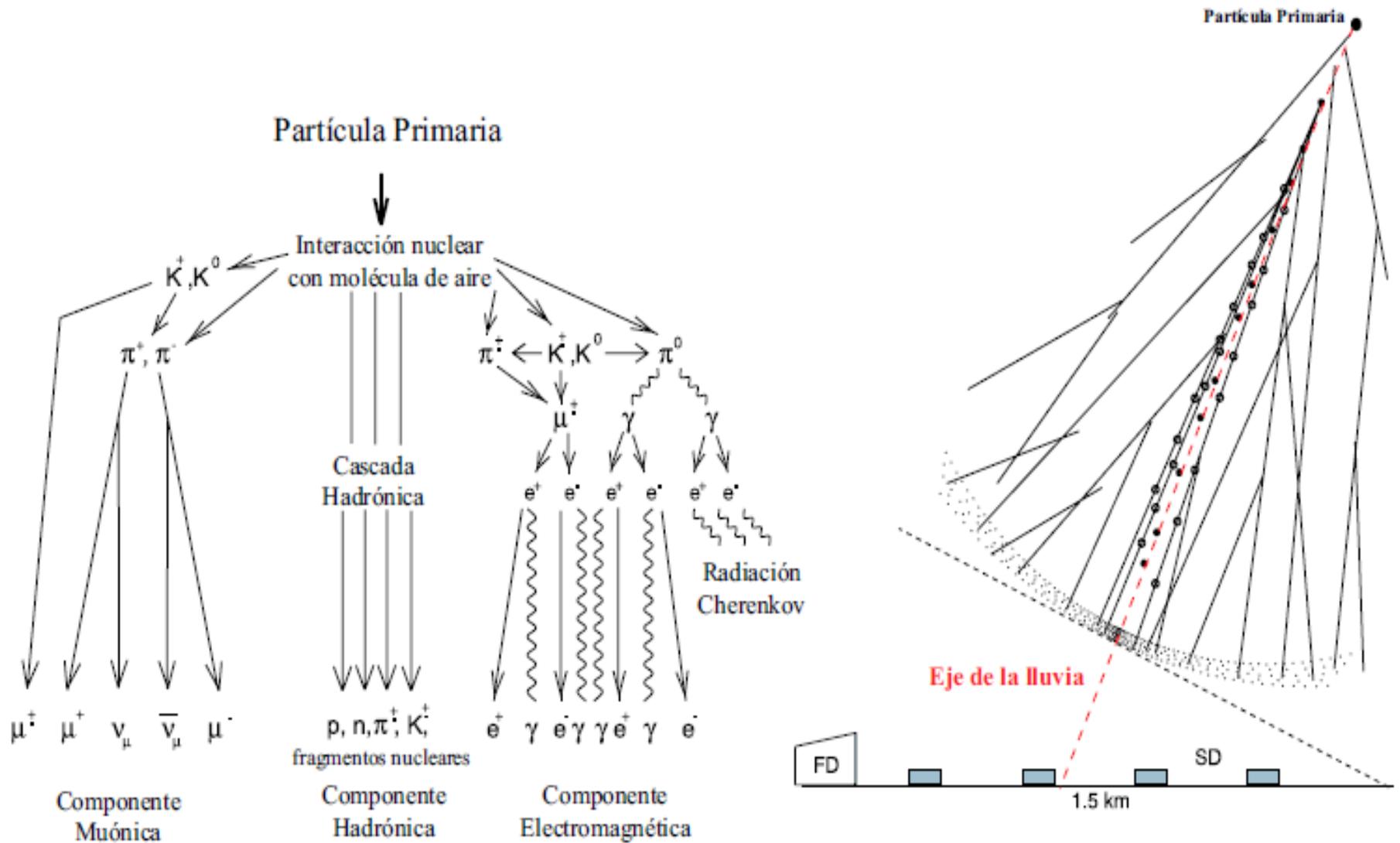
- Análisis de datos de eventos detectados por INFILL y HEAT, para obtener las observables sensibles a la composición.
- Arreglo de ingeniería y Simulación del arreglo CHARM.

Espectro de Energía

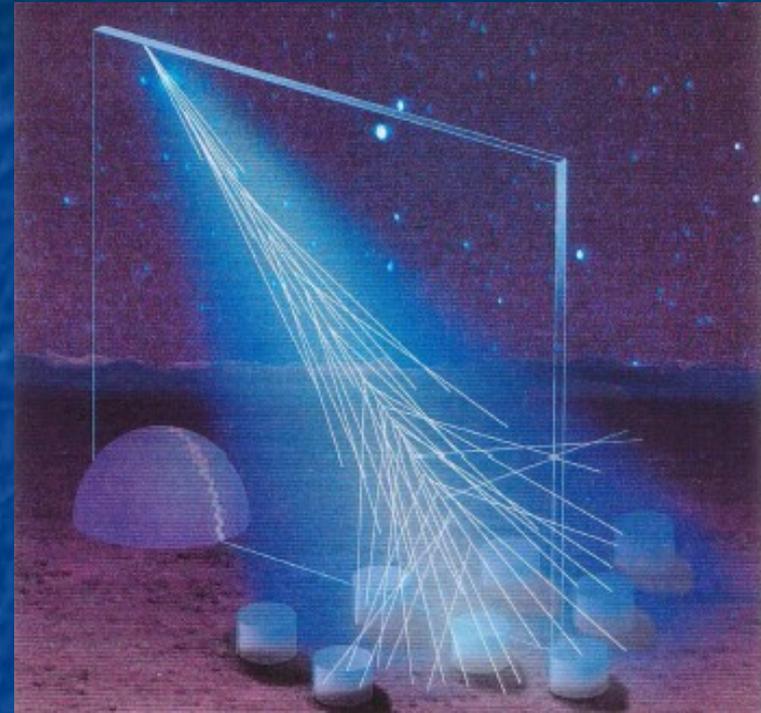
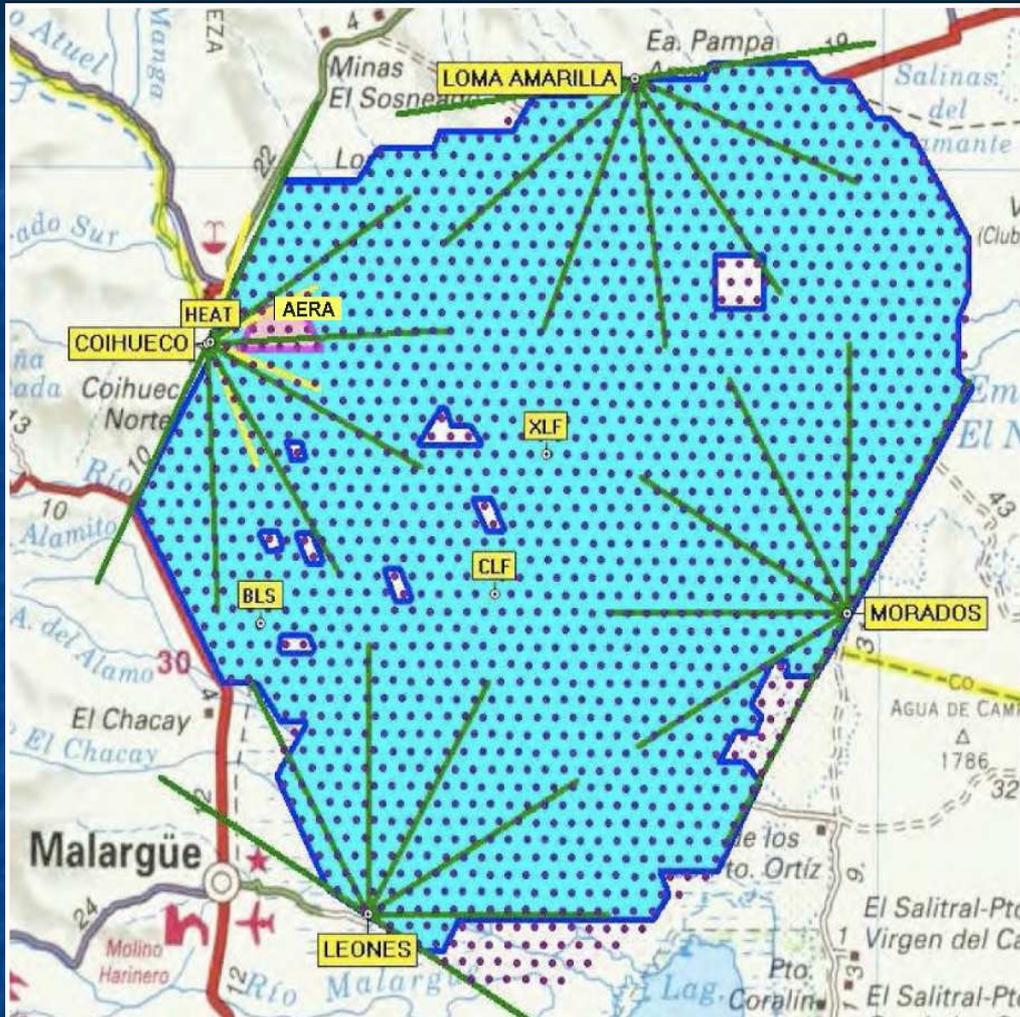


- Rodilla: Hasta la rodilla, el flujo de rayos cósmicos puede ser producido por partículas cargadas aceleradas en los frentes de choque formados en remanentes de supernovas (SNR) galácticos.
- 2a Rodilla: La interpretación física es aun muy incierta, podría deberse a que se llega a la máxima energía suministrable a los rayos cósmicos en nuestra galaxia (primarios de los núcleos estables más pesados) debido a que al llegar a este límite, el flujo tiene que disminuir aumentando el índice espectral, mas aun se dice se dice que es donde ocurre la transición entre fuentes galácticas y extra galácticas, por lo que tendríamos a parte de una componente galáctica una componente extra galáctica dominante.
- Tobillo: Si la transición ocurre en la 2a rodilla este quiebre aparece por la producción de pares $p+\gamma \rightarrow p+e+e-$ por la interacción de protones con la radiación del fondo de microondas, sino es la suma espectral de ambas componentes.

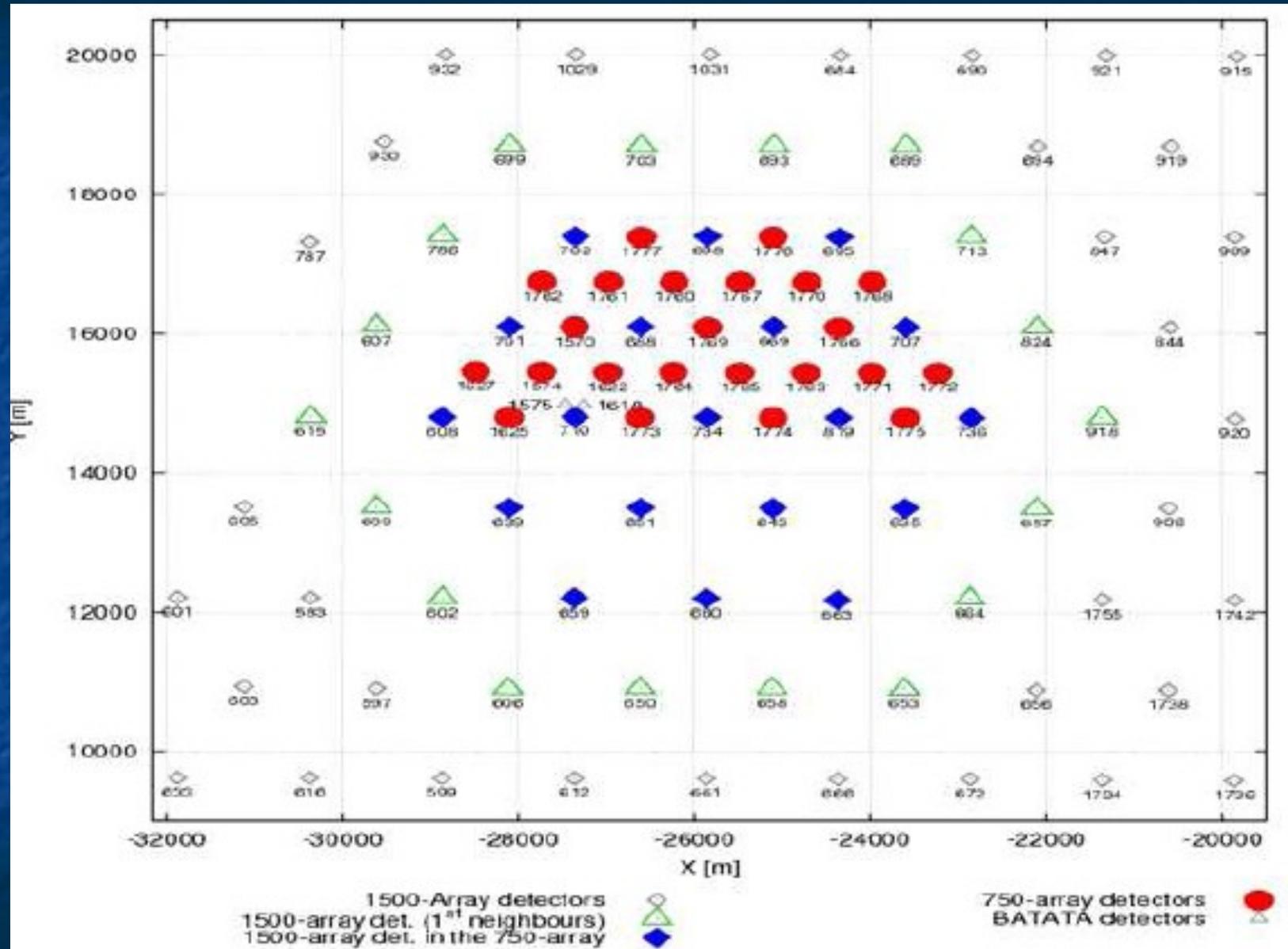
Cascada Atmosférica de Partículas (EAS)



El Observatorio Pierre Auger (OPA)



INFILL.



RECONSTRUCCIÓN DIRECCIÓN DE ARRIBO SD

Los parámetros que definen la geometría del EAS son:

- El baricentro.
- Si es la señal medida en la estación i.
- El vector \vec{x}_i la posición espacial de la estación i.
- \hat{a} es el vector unitario en dirección al eje.

$$\vec{b} = \frac{\sum_i \sqrt{S_i} \vec{x}_i}{\sum_i \sqrt{S_i}}$$

La evolución del EAS se describe como:

$$\vec{x}(t) = \vec{b} + c(t - t_0) \cdot \hat{a}$$

El tiempo esperado t_i cuando el plano del EAS pasa por una estación en el punto x_i es:

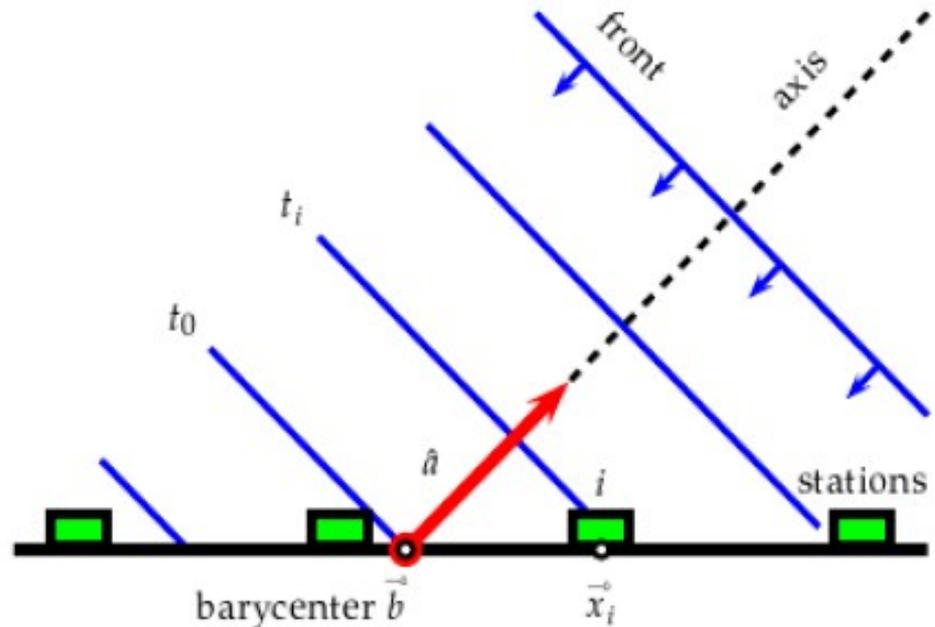
$$\hat{t}_i = \frac{1}{c} (ct_0 - (\vec{x}_i - \vec{x}_b) \cdot \vec{a})$$

Y la dirección de arribo se encuentra minimizando a una función CHI^2

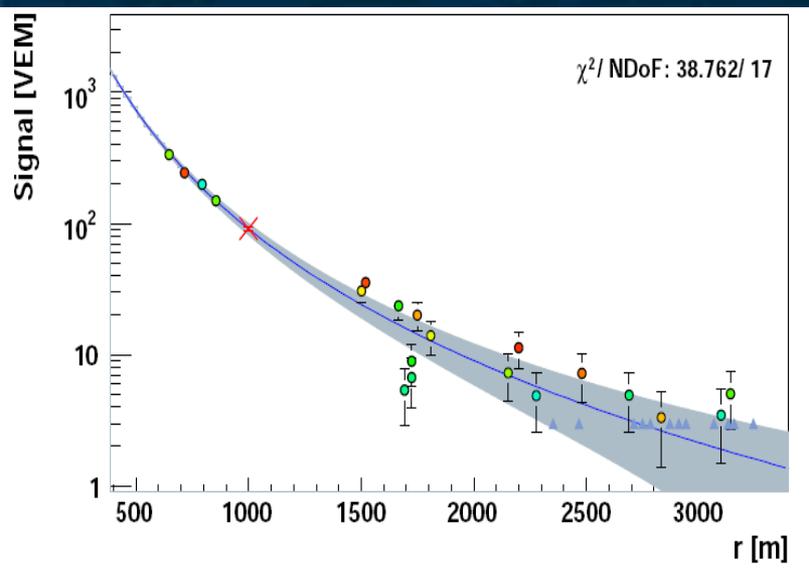
$$\sum_i \left[\frac{t_i - \hat{t}_i}{\sigma_{t_i}} \right]^2$$

Donde:

- t_i el valor medido la estación i.
 - el σ_{t_i} es la desviación estándar
- Del tiempo de disparo de la estación i-ésima.



RECONSTRUCCIÓN DEL PERFIL LATERAL Y ENERGÍA DEL EAS SD



Las señales laterales del EAS que llegan al SD son ajustadas con una LDF. La LDF usada por Auger para describir la señal esperada en VEMs para una estación a una distancia r del core es:

FUNCIÓN MODIFICADA DE NISHIMURA, KAMATA Y GREISEN

$$S_{(r)} = A \left[\frac{r}{r_c} \left(1 + \frac{r}{r_c} \right) \right]^{-\beta}$$

$$A = S_{1000} 3.47^{-\beta}$$

$$r_c = 700 \text{ m}$$

$$\beta = 2.4 - 0.9 (\sec(\theta) - 1)$$

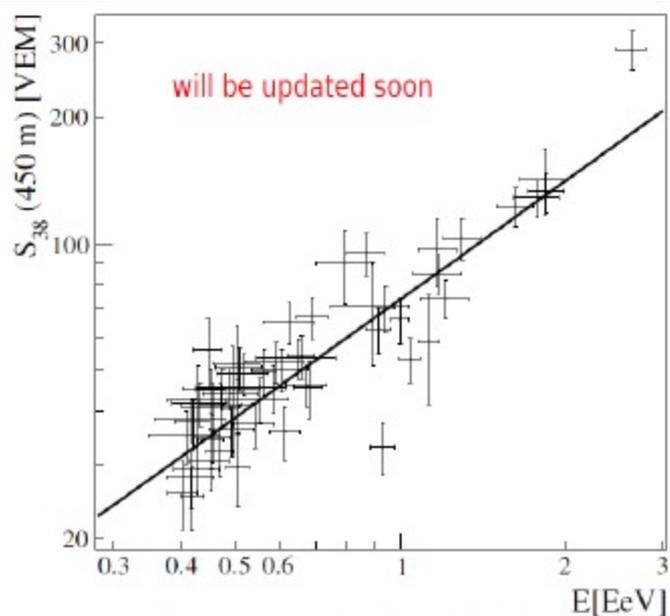
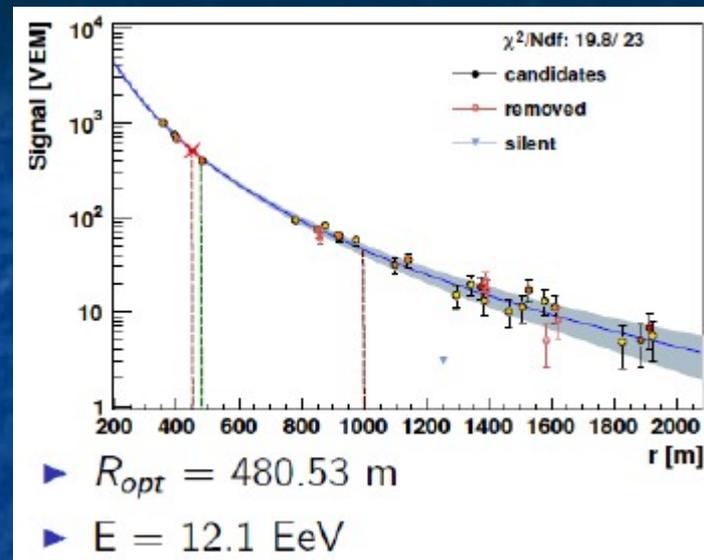
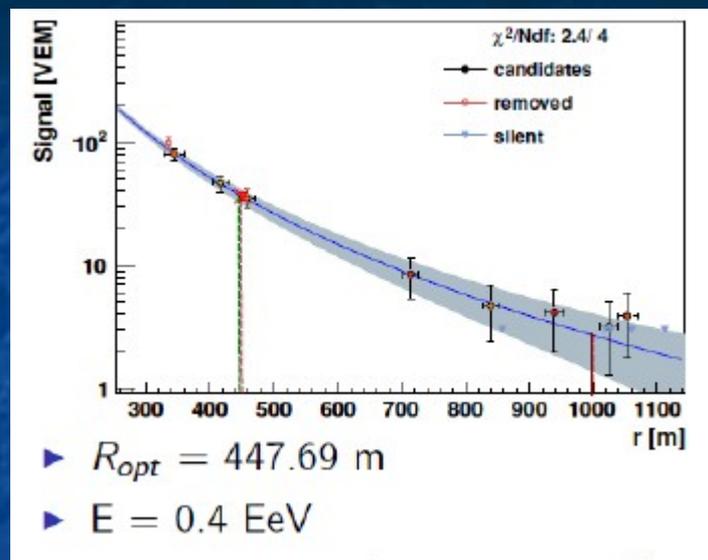
Con el parámetro S_{1000} calculado se determina el parámetro S_{38} en base al método de intensidad constante CIC

$$S_{38} = \frac{S_{1000}}{CIC(\theta)}$$

Como el S_{38} se encuentra bien correlacionado con la energía que ha sido determinada por el FD en aquellos eventos híbridos que han sido reconstruidos en forma independiente por ambos detectores, es posible establecer la relación entre este parámetro y la energía del rayo cósmico primario

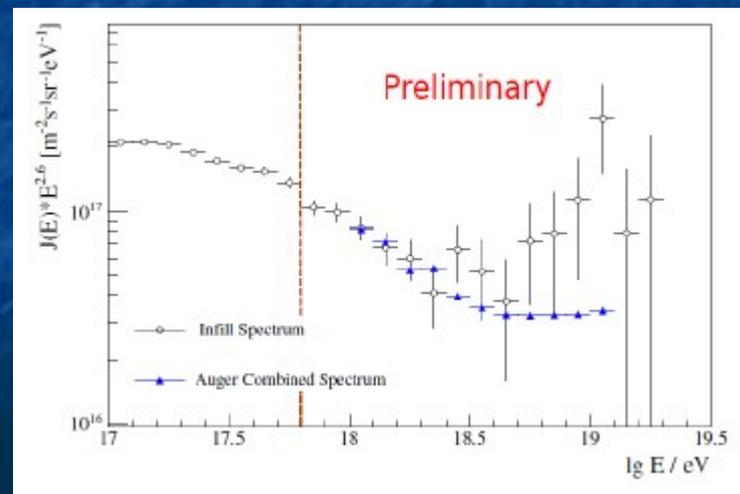
$$E = 0.16 S_{38}^{1.06}$$

ESTADO INFILL



- ▶ $E = A * S_{38}^\gamma$
- ▶ FD energy bias not corrected
- ▶ FD energy $\geq 0.4 \text{ EeV}$
- ▶ Max Likelihood Fit

Parameter	Value
A [EeV]	0.010 ± 0.002
γ	1.07 ± 0.05



weighted Spectrum: $J(E) * E^{2.6}$

HEAT.



- La lluvia emite luz de fluorescencia producida por la excitación de las moléculas de Nitrógeno en el aire. El número de fotones de fluorescencia producida por partículas cargadas propagándose a una distancia dl es

$$\frac{dN_{\gamma}}{dl} = Y_f N_e$$

N_e es el número de partículas cargadas y Y_f es la cantidad de fotones de fluorescencia producidos por una única partícula cargada por unidad de longitud (Fluorescence Yield).

Los fotones de fluorescencia son medidos a varias profundidades atmosféricas X , obteniendo con esto un perfil longitudinal $N(X)$ al integrar este último obtenemos la Energía total de la lluvia electromagnética.

RECONSTRUCCIÓN DIRECCIÓN DE ARRIBO FD

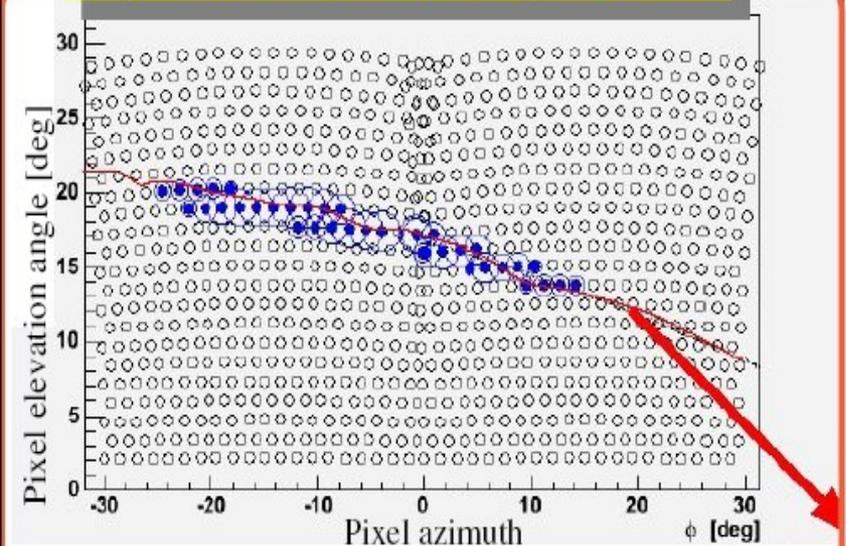
Step 1: Reconstructing the SDP

Los parámetros que definen la geometría del EAS son:

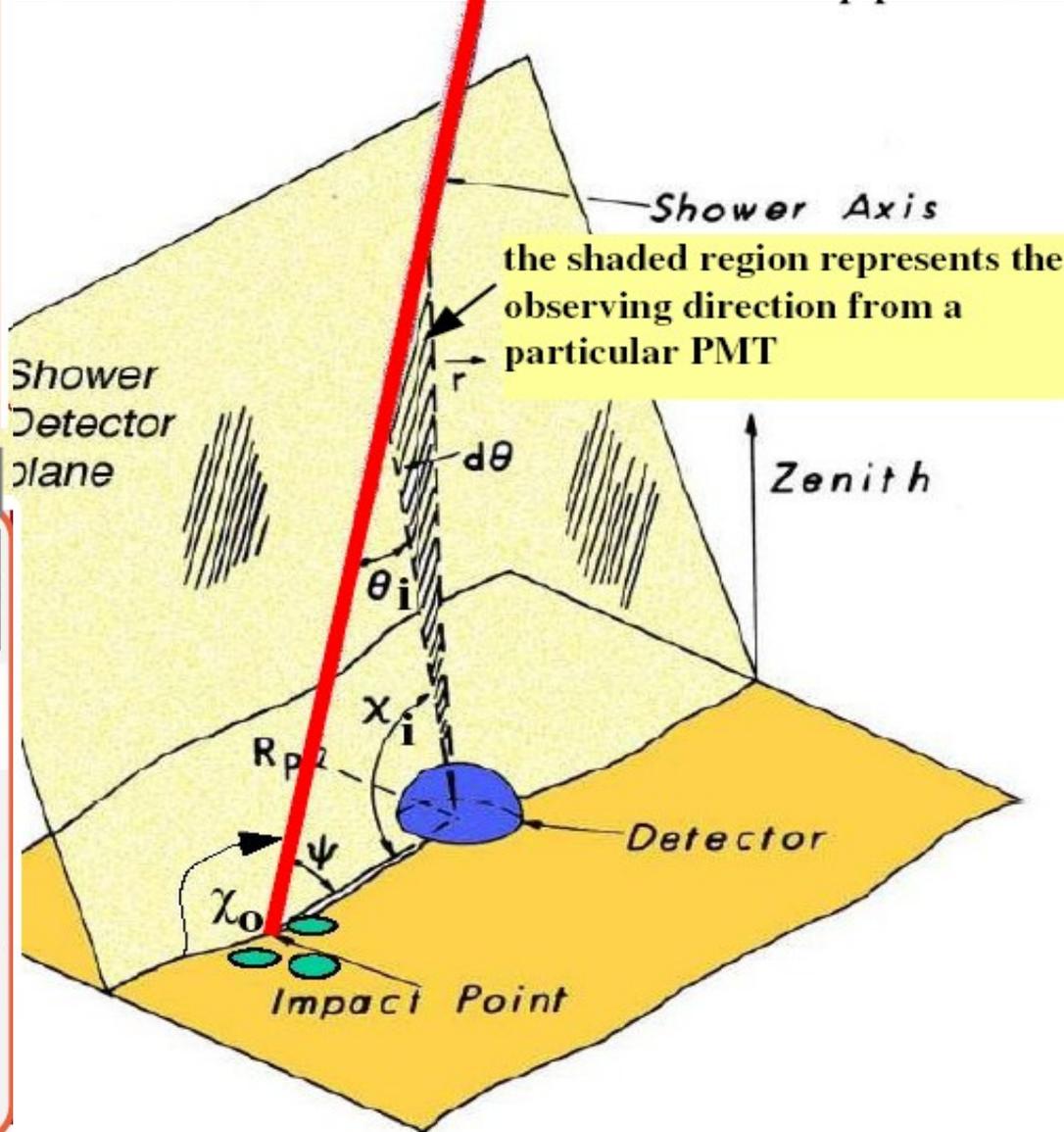
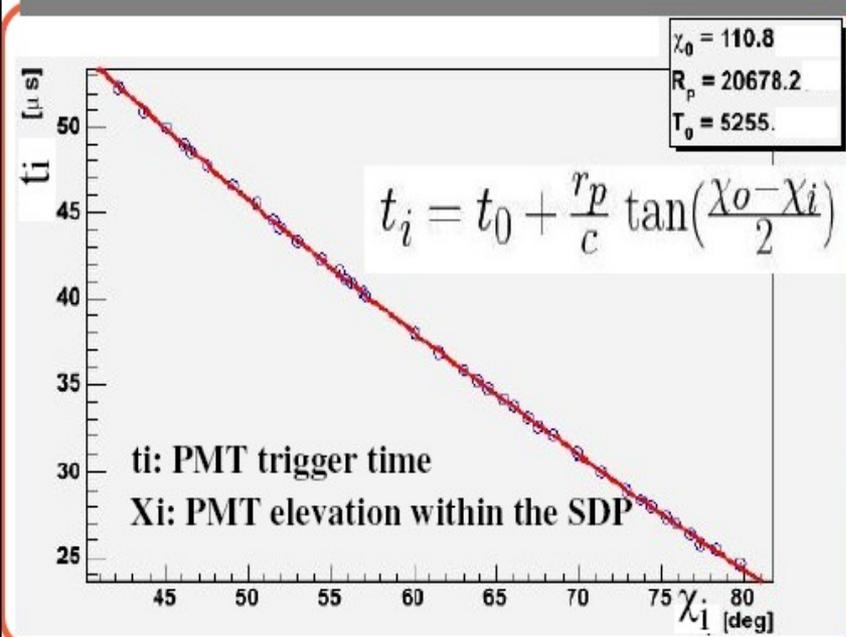
R_p :

χ_0 : ángulo entre el eje y el plano horizontal

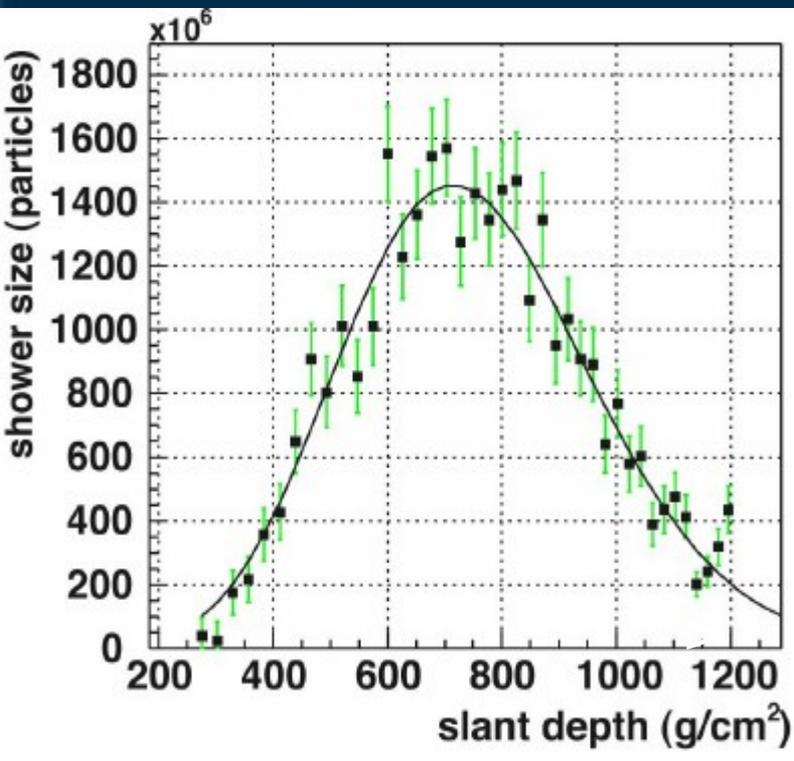
t_0 : tiempo cuando el shower frontal cruza el punto R_p



Step 2: Reconstructing the Shower axis



RECONSTRUCCIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL Y DE LA ENERGIA DEL EAS FD



El perfil longitudinal del shower tiene una forma que puede ser parametrizada por

The Gaisser-Hillas Function

$$N_e(X) = N_{max} \left(\frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{\frac{(X_{max} - X_0)}{\lambda}} e^{-\frac{X_{max} - X}{\lambda}}$$

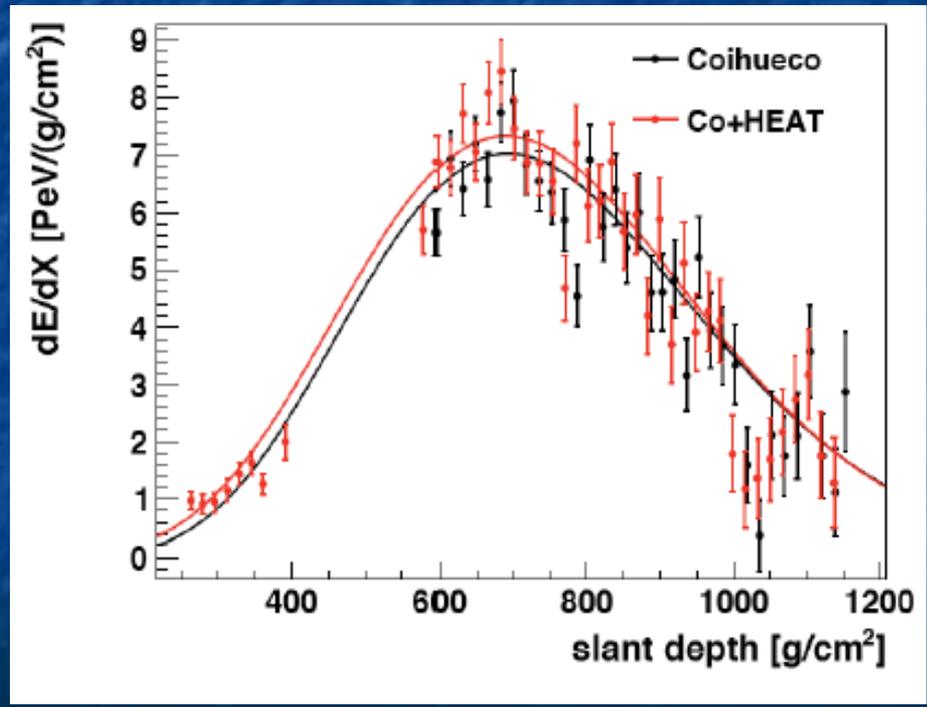
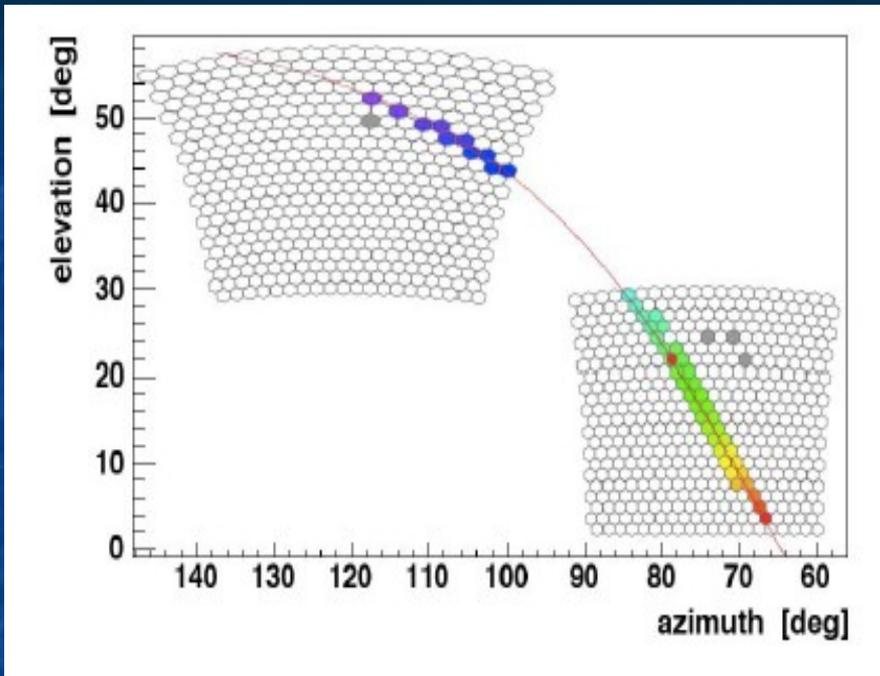
Donde:

- N_e : Número de electrones (tamaño del shower).
- X_{max} : Máximo de profundidad.
- N_{max} : tamaño máximo del shower en X_{max}
- X_0 y λ relacionadas con la profundidad de la primera interacción y su longitud de interacción en el aire.

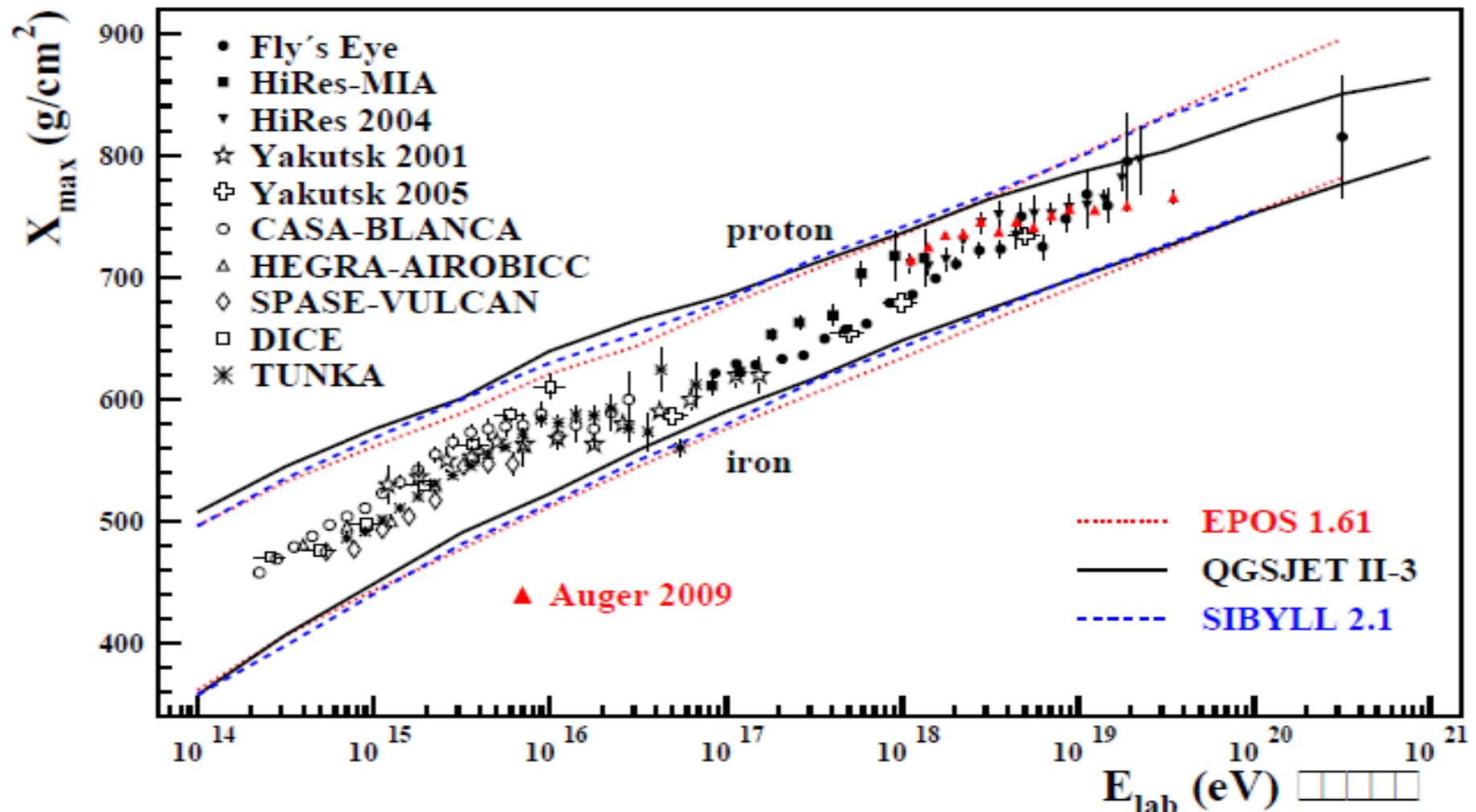
Una vez que el perfil longitudinal de la lluvia ha sido reconstruido, la energía electromagnética de la cascada E_{em} es evaluada integrando el perfil longitudinal a lo largo de toda la extensión de la lluvia

$$E_{em} = \frac{E_c}{\lambda_r} \int_0^{\infty} N_e dX$$

ESTADO ACTUAL HEAT



Resultados de la composición con Xmax

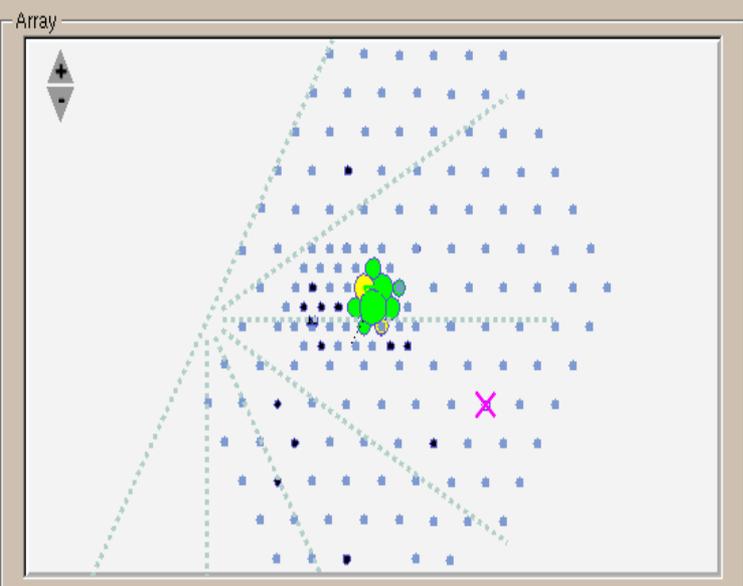


Promedio de X_{\max} como función de la energía, por diferentes experimentos comparados con lluvias de protón y Fe simuladas con corsika.

Resultados.

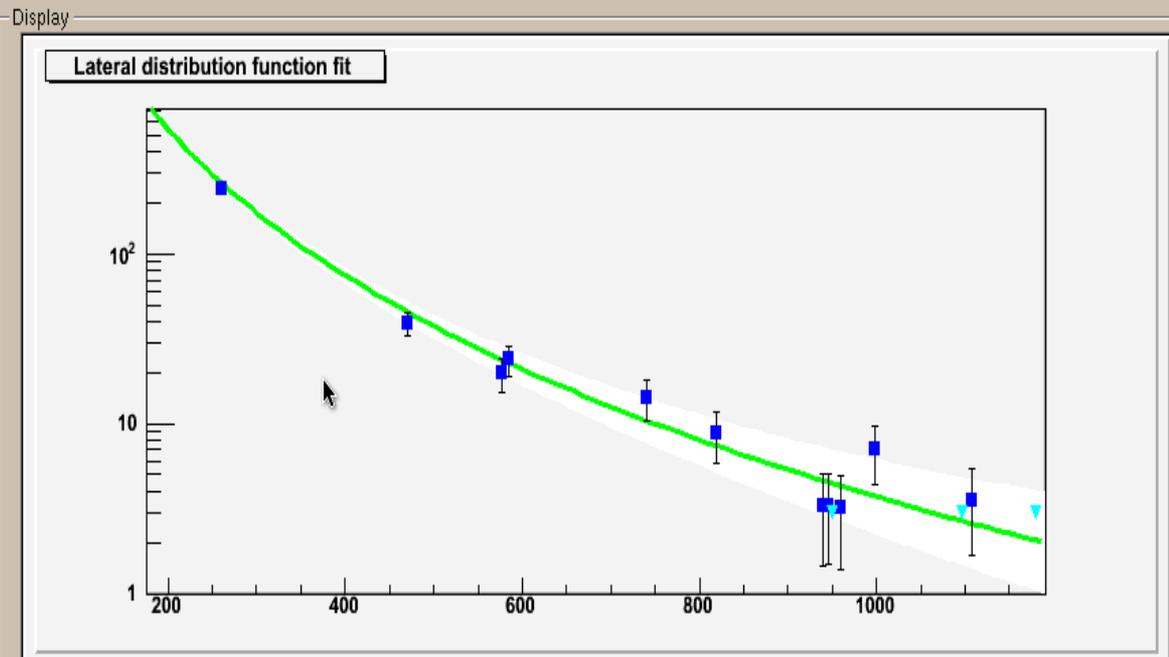
- A) INFILL : No fue fácil tener acceso a la base de datos, fue necesario de un script para lograrlo. Se tienen datos de
 - ENERO-MARZO-2009, NOV-DIC-2009
 - ENERO-1-MAYO-2010
- B) CDAS: Central Data Acquisition System (CDAS) es sistema central de adquisición de datos, y el mismo que distribuye el software con el mismo nombre para la reconstrucción de eventos CDAS-Herald. El CDAS combina la información de disparo de ambos detectores (SD y FD), estableciendo cuando el detector posee un trigger de tercer nivel. Este trigger establece los eventos híbridos seleccionados como buenos candidatos a lluvias de partículas
- Se tiene que implementar un código c++ para filtrar eventos que sean únicamente del Infill.

Events list	Stations list
001) 201012100043, 12 stations, TOT2C1&3C2	01) 1774 (0 ns, 3.4 VEM)
002) 201012100160, 12 stations, TOT2C1&3C2	02) 1765 (255 ns, 9.2 VEM)
003) 201012100167, 8 stations, TOT2C1&3C2	03) 0081 (486 ns, 3.4 VEM)
004) 201012100187, 22 stations, TOT2C1&3C2	04) 1763 (498 ns, 246.6 VEM)
005) 201012100205, 11 stations, TOT2C1&3C2	05) 0079 (581 ns, 3.4 VEM)
006) 201012100228, 9 stations, TOT2C1&3C2	06) 0669 (922 ns, 19.7 VEM)
007) 201012100289, 8 stations, TOT2C1&3C2	07) 0080 (922 ns, 23.7 VEM)
008) 201012100290, 8 stations, 2C1&3C2&4C4	08) 1771 (1079 ns, 13.9 VEM)
009) 201012100330, 8 stations, TOT2C1&3C2	09) 1766 (1389 ns, 37.0 VEM)
010) 201012100439, 16 stations, TOT2C1&3C2	10) 1770 (2042 ns, 6.7 VEM)
011) 201012100576, 8 stations, 2C1&3C2&4C4	11) 0707 (2224 ns, 3.3 VEM)
012) 201012100582, 8 stations, TOT2C1&3C2	12) 1742, station deleted
013) 201012100610, 8 stations, TOT2C1&3C2	
014) 201012100788, 8 stations, TOT2C1&3C2	
015) 201012100789, 11 stations, 2C1&3C2&4C4	
016) 201012100842, 9 stations, TOT2C1&3C2	



Status

selected file:
 /home/charm/Datos_Infill/2010/05/InFill_ad_2010_05_01_12h00.root
 Minimum number of triggered stations: 8
 Trigger selected: all of them, 94 events.
 Date of this event: Sat May 1 12:14:12 2010 (GPS 956751252)



Sat May 1 12:14:12 2010
 $X = -24677 \pm 25m$
 $Y = 15707 \pm 10m$
 $\Delta t = 58.0ns$

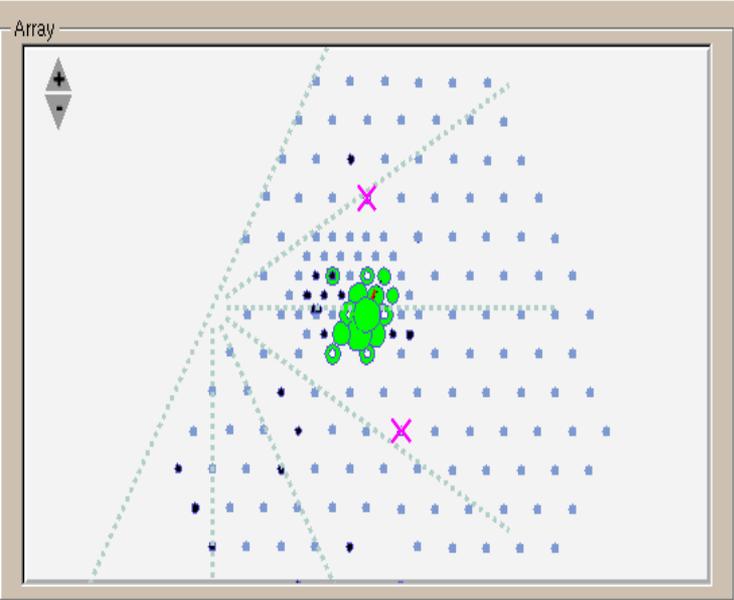
$\theta = 18.8 \pm 0.5 \text{ deg}$
 $\varphi = -124.8 \pm 0.4/\sin(\theta) \text{ deg}$

$R = 4.8 \pm 0.5 \text{ km}$

Ra 317.0 deg -- Dec -49.7 deg

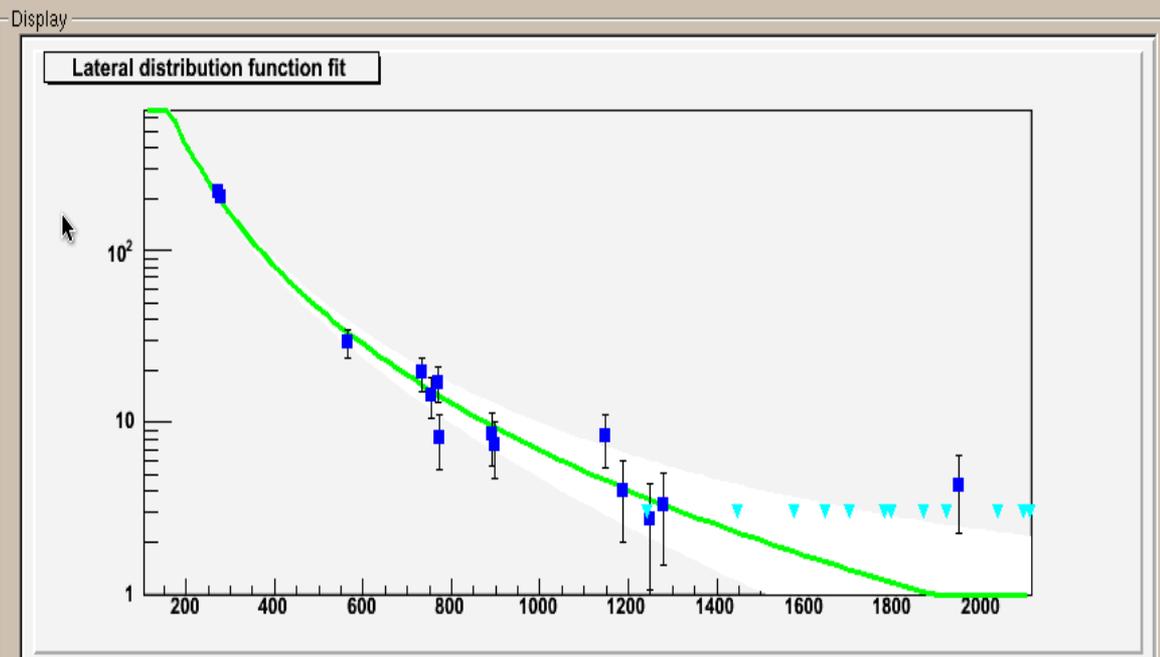
LA SEÑAL EXTRAPOLADA S(1000) = 3.71 ± 0.25 VEM
 $E = 0.68 \text{ EeV} \pm 7\% \text{ (statistical)}$

Events list	Stations list
001) 201012100043, 12 stations, TOT2C1&3C2	01) 1766 (0 ns, 4.1 VEM)
002) 201012100160, 12 stations, TOT2C1&3C2	02) 0689 (713 ns, 4.9 VEM)
003) 201012100167, 8 stations, TOT2C1&3C2	03) 1771 (786 ns, 3.3 VEM)
004) 201012100187, 22 stations, TOT2C1&3C2	04) 1763 (1723 ns, 10.1 VEM)
005) 201012100205, 11 stations, TOT2C1&3C2	05) 0819 (2483 ns, 9.7 VEM)
006) 201012100228, 9 stations, TOT2C1&3C2	06) 1765 (2547 ns, 19.8 VEM)
007) 201012100289, 8 stations, TOT2C1&3C2	07) 0688 (3026 ns, 4.6 VEM)
008) 201012100290, 8 stations, 2C1&3C2&4C4	08) 1774 (3371 ns, 257.7 VEM)
009) 201012100330, 8 stations, TOT2C1&3C2	09) 1810 (4325 ns, 19.7 VEM)
010) 201012100439, 16 stations, TOT2C1&3C2	10) 0734 (4363 ns, 29.1 VEM)
011) 201012100576, 8 stations, 2C1&3C2&4C4	11) 1816 (5268 ns, 172.4 VEM)
012) 201012100582, 8 stations, TOT2C1&3C2	12) 0643 (6192 ns, 6.5 VEM)
013) 201012100610, 8 stations, TOT2C1&3C2	13) 1813 (6269 ns, 12.1 VEM)
014) 201012100788, 8 stations, TOT2C1&3C2	14) 0651 (8182 ns, 6.5 VEM)
015) 201012100789, 11 stations, 2C1&3C2&4C4	15) 0693, station deleted
016) 201012100842, 9 stations, TOT2C1&3C2	16) 0653, station deleted



Status

selected file:
 /home/charm/Datos_Infill/2010/05/InFill_ad_2010_05_01_12h00.root
 Minimum number of triggered stations: 8
 Trigger selected: all of them, 94 events.
 Date of this event: Sat May 1 13:06:02 2010 (GPS 956754362)



Sat May 1 13:06:02 2010
 $X = -25374 \pm 24m$
 $Y = 14505 \pm 17m$
 $\Delta t = 66.1ns$

$\theta = 47.2 \pm 0.3 \text{ deg}$
 $\phi = 58.3 \pm 0.3/\sin(\theta) \text{ deg}$

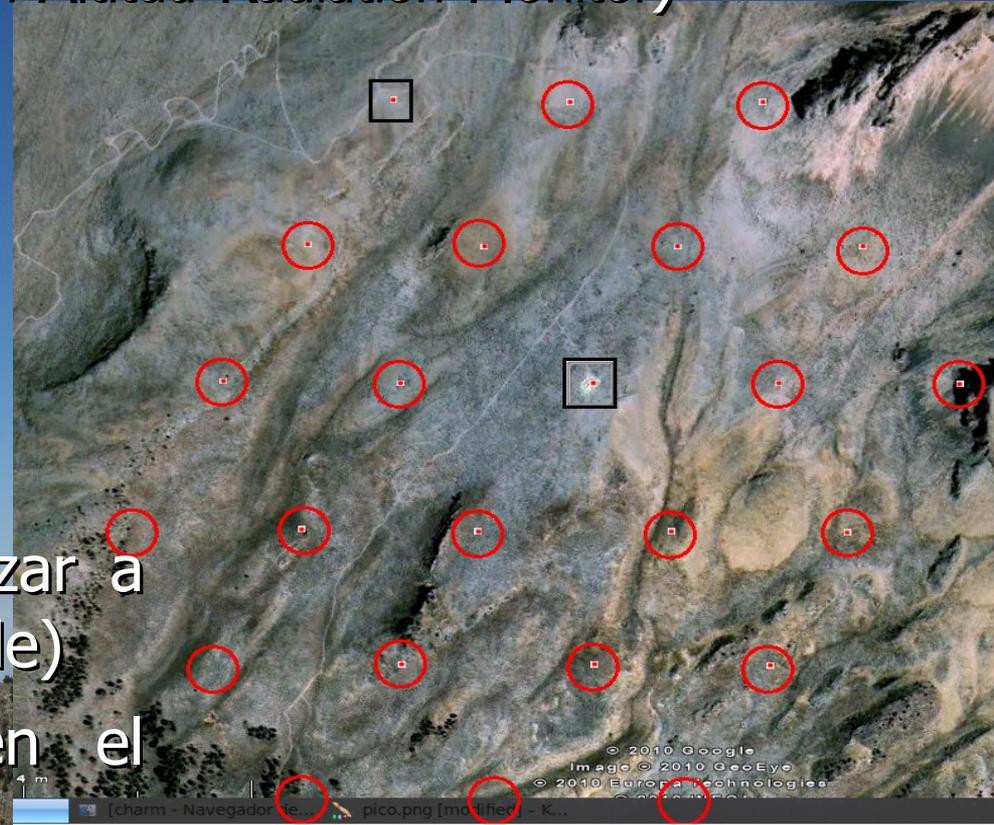
$R = 12.4 \pm 1.3 \text{ km}$

Ra 9.4 deg -- Dec 6.7 deg

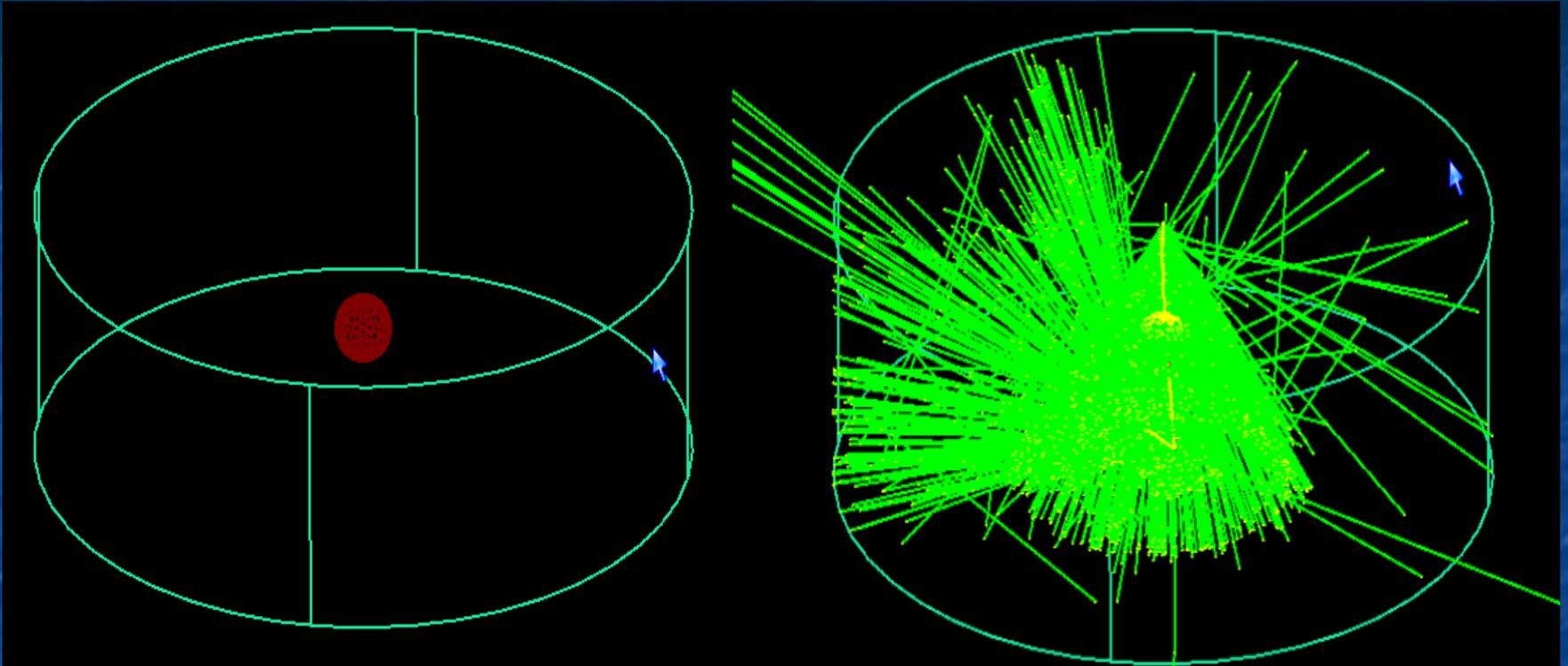
LA SEÑAL EXTRAPOLADA S(1000) = 6.90 ± 0.43 VEM
 $E = 2.03 \text{ EeV} \pm 6\% \text{ (statistical)}$

CHARM (Cosmic High Altitud Radiation Monitor)

- Situado a 4323 m.s.n.m.
- SD (24 WCD).
- Detectores Cerenkov de aire.
- Electrónica lista para comenzar a calibrar PMTs (Por Ruben Conde)
- Estudios de composición en el rango de energía de 10^{17} - 10^{18}



GEANT4



Modificación del exampleN06 de Geant4, se tubo que cambiar la geometría e implementar el detector sensible PMT

CONCLUSIONES

- Falta mucho trabajo por hacer para obtener las observables sensibles a la composición, más sin embargo se está trabajando por el lado de Offline para la reconstrucción de eventos del infill con información de S(600).
- En el caso de HEAT estamos en espera de que estén disponibles los datos, para analizarlos con Offline.
- En el caso de geant4 falta implementar el arreglo hexagonal, así como la lectura de eventos simulados con corsika y salida de datos.