

# NEUTRONES EN RÁFAGAS SOLARES: CLAVES PARA ENTENDER LA ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS EN EL SOL Y EN EL UNIVERSO

**J.F. Valdés-Galicia<sup>1</sup>,**

**L. X. González<sup>1</sup>, E. Ortiz<sup>1</sup>,**

**A. Hurtado<sup>1</sup>, O. Musalem<sup>1</sup>, R. Garcia-Ginez<sup>1</sup>, M. Anzorena<sup>1</sup>,**

**Y. Nagai<sup>2</sup>, Y. Itow<sup>2</sup>, Y. Matsubara<sup>2</sup>, D. López<sup>2</sup>, Y. Muraki<sup>2</sup>, T. Sako<sup>2</sup>,**

**Y. Sasai<sup>2</sup>, K. Watanabe<sup>4</sup>, S. Shibata<sup>3</sup>**

1. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México, D.F., Mexico

2. Institute for the Earth Environment, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.

3. College of Engineering, Chubu University, Kasugai 48-8501, Japan

4. Japan Space Agency, ISAS/JAXA, Kanagawa 229-8510, Japan



# La dinámica de los lazos magnéticos da lugar a las **Ráfagas Solares**, donde se produce la aceleración de partículas

## Micro procesos

Tensión

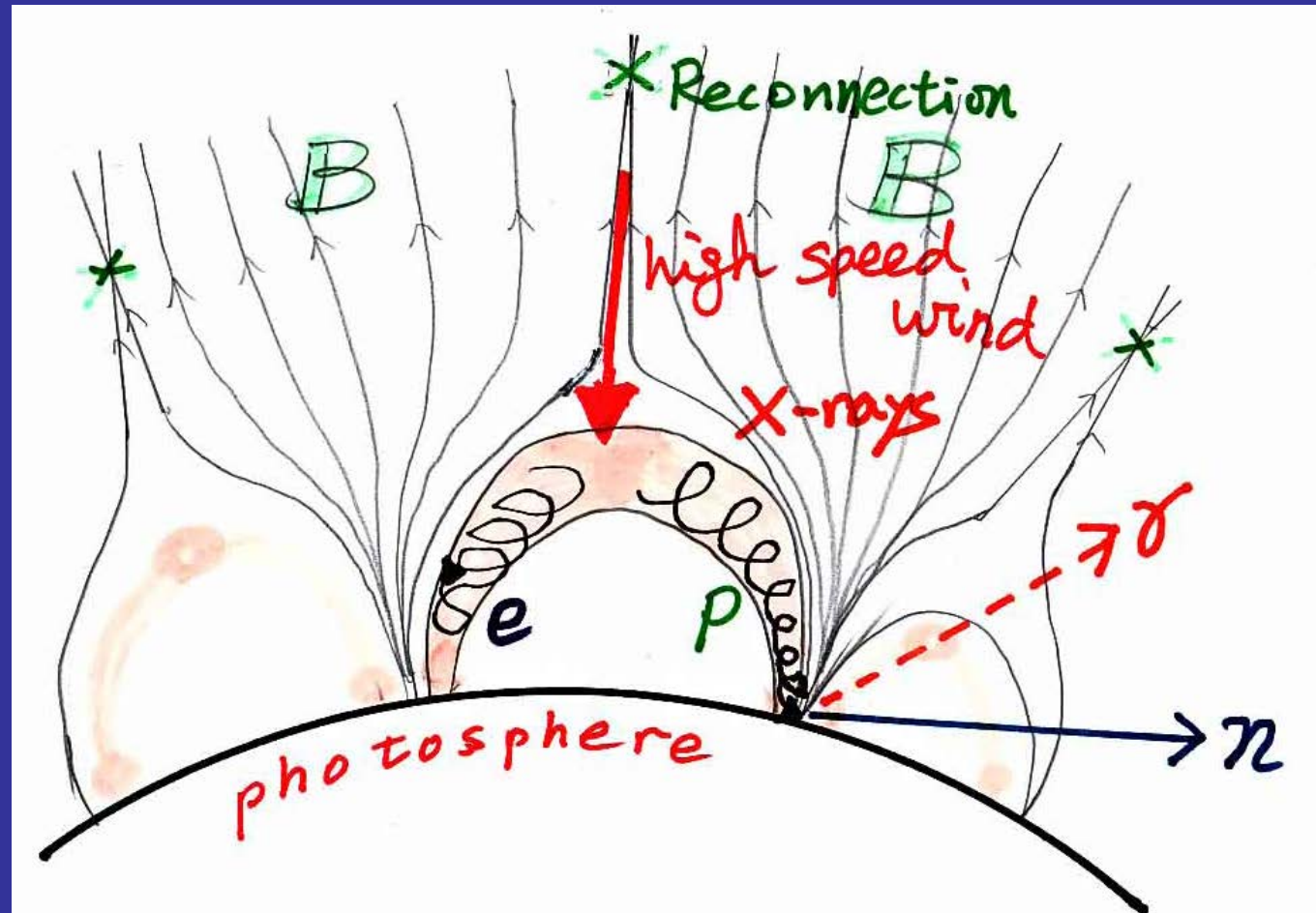
Calentamiento del Plasma

$\sim 3000 \text{ km/s}$

$\sim 70 \text{ sec acc de}$   
 $20 \text{ MeV a } 10 \text{ GeV}$

Colisiones nucleares

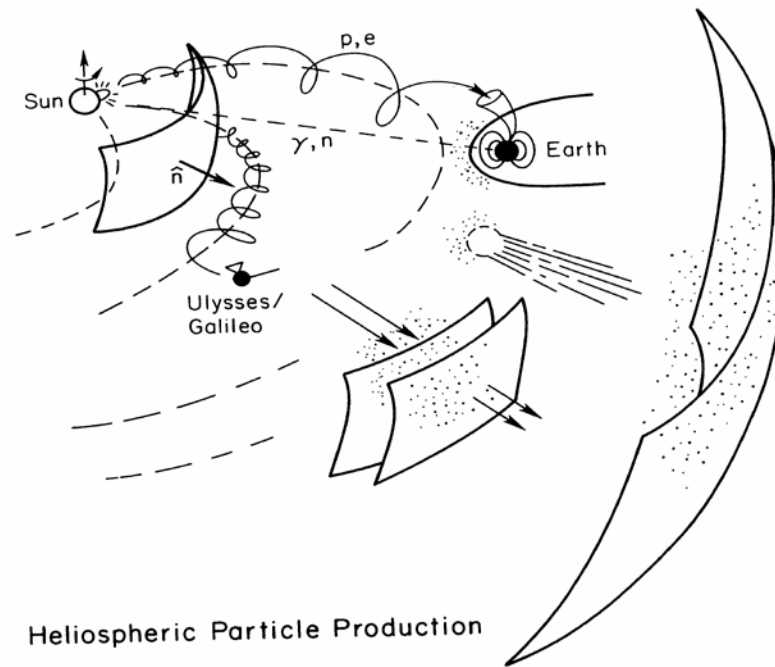
Intercambio de carga



**Protons and electrons are affected by the electromagnetic fields in the Sun and the Earth-Sun region**

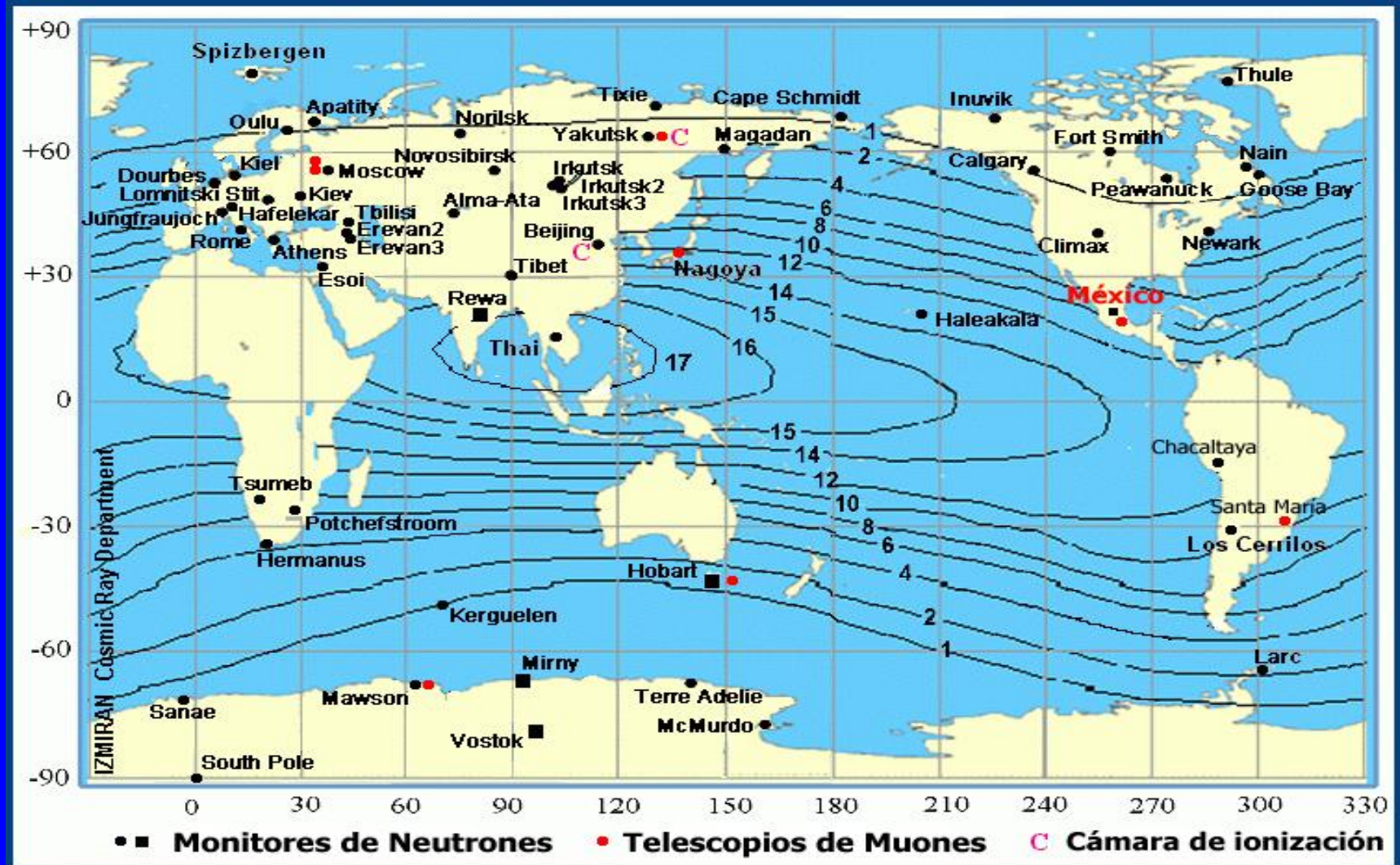
**Neutrons are NOT**

**They preserve information of the acceleration site**

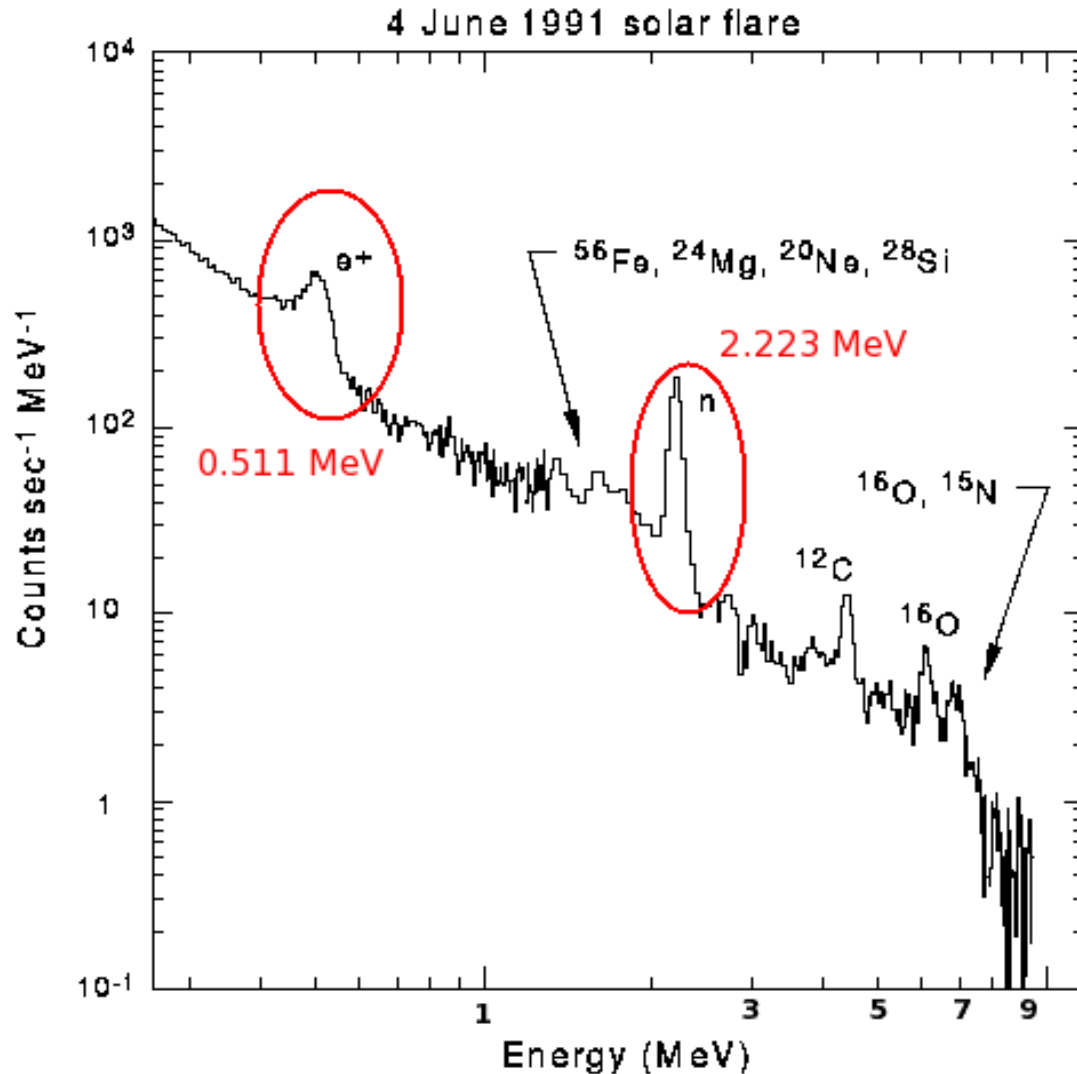


- The first measurement of solar neutrons was done by the *Solar Maximum Mission* from the solar flare of 1980 June 21, (Chupp, et. al., 1982).
- For the solar flare of 1982 June 3, high energy solar neutrons were for the first time detected at Earth by ground level neutron monitors, (Chupp, et. al., 1987).
- The event on 24 May 1990 was the first where neutrons and protons were detected separately at Earth by NMs (Debrunner, 1993, Dorman&Valdés-Galicia, 1999).
- On June 4, 1991 the Solar Neutron Telescope at Mt. Norikura was the first SNT to register solar neutrons, (Muraki et. al., 1992).
- On September 7, 2005 the SNT at Sierra Negra detected a very strong solar neutron emission, (Watanabe, et. al., 2008, Sako, et. al., 2008, González et al, 2010, 2015).

# RIGIDEZ (ENERGIA) UMBRAL



**LA PRODUCCIÓN DE NEUTRONES ESTA (CASI)SIEMPRE ACOMPAÑADA DE LA EMISION DE RAYOS GAMMA**



- Los neutrones pueden ser emitidos hacia el interior solar donde producen líneas de Rayos gamma, i.e.,  $2.223 \text{ MeV}$  línea de captura de neutrones

- Además pueden observarse líneas de desexcitación nuclear

Murphy, et. al. 1991

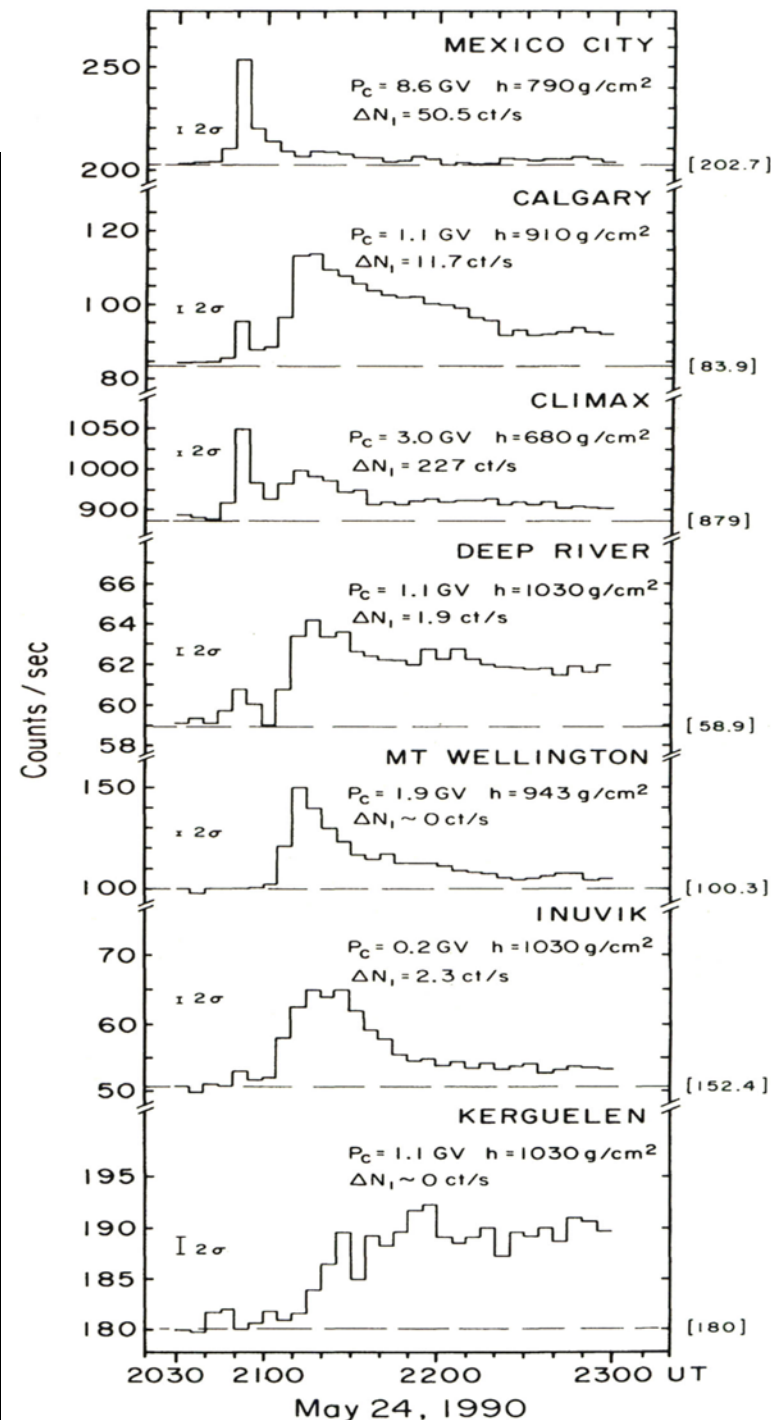
**24 mayo, 1990**

**El incremento causado por los neutrones solares se observa solo en NMs del sector americano.**

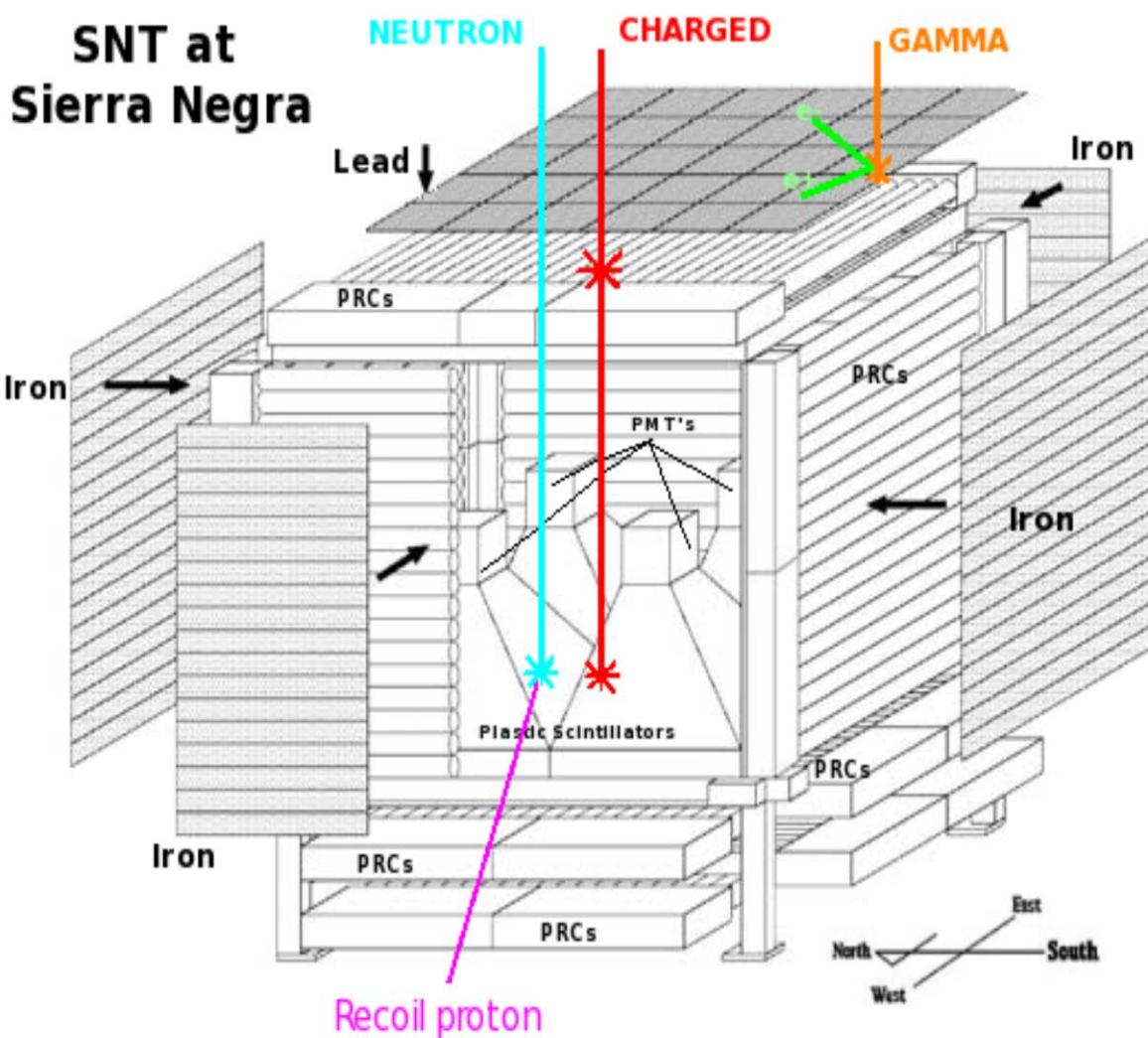
**La intensidad del evento de neutrones es proporcional a la profundidad atmosférica NO a la rigidez umbral**

- 1. Climax (680 g/cm<sup>2</sup>)**
- 2. México (790 g/cm<sup>2</sup>)**
- 3. Calgary (910 g/cm<sup>2</sup>)**

**Los sitios en  
Altitudes de montaña y  
Bajas latitudes  
son convenientes para  
Neutrones Solares**



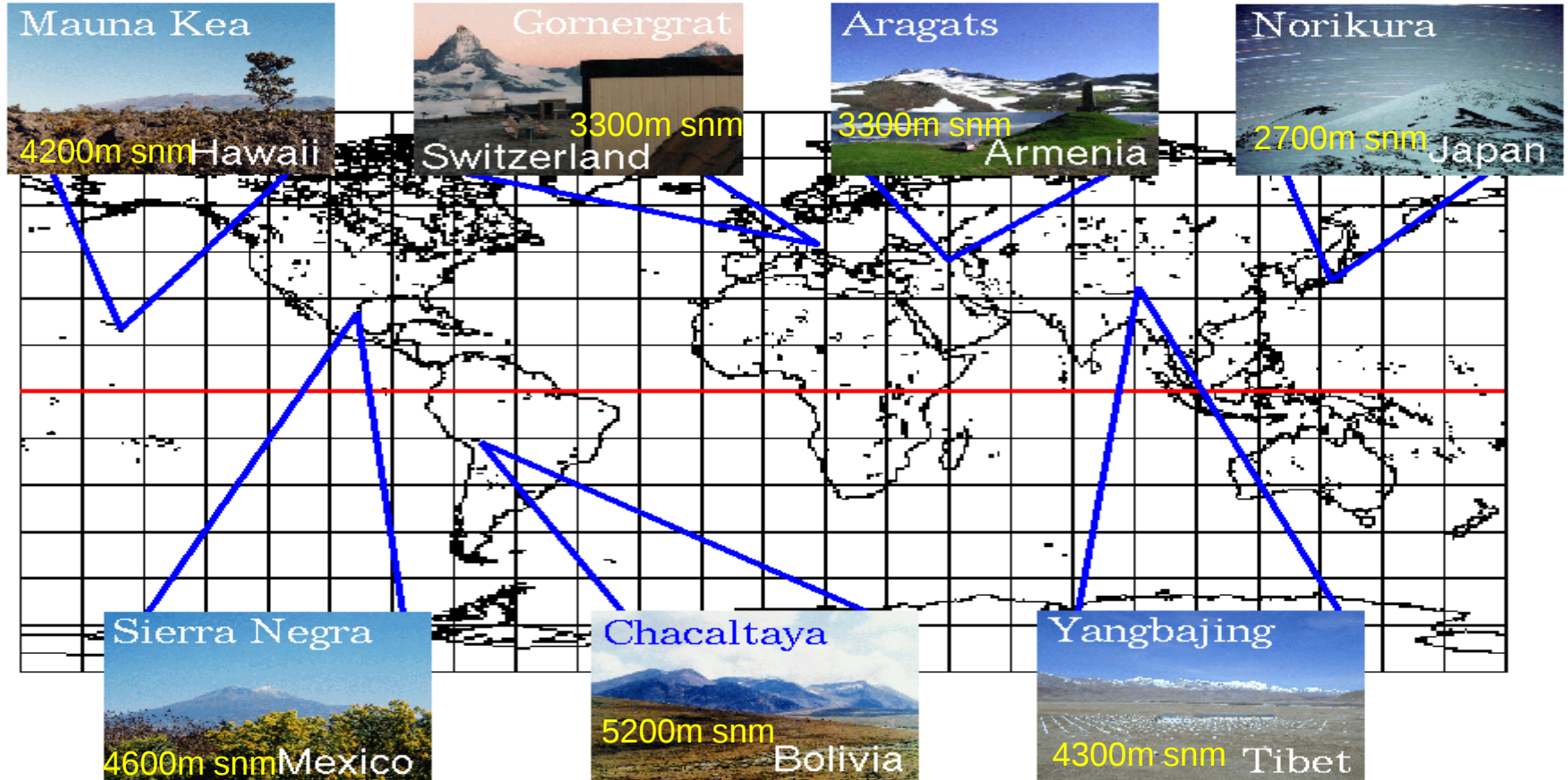
# SNT at Sierra Negra



- 4 centelladores de 30cm c/u
- Rodeados de CPs
- PMTs encima de c/centellador
- “Blindados” encima por una capa de 5mm de plomo
- Los lados con placas de Fe (10mm)
- Las partículas incidentes Colisionan con C del centellador, liberan p+ que puede ser Detectado por los CPs bajo el centellador.

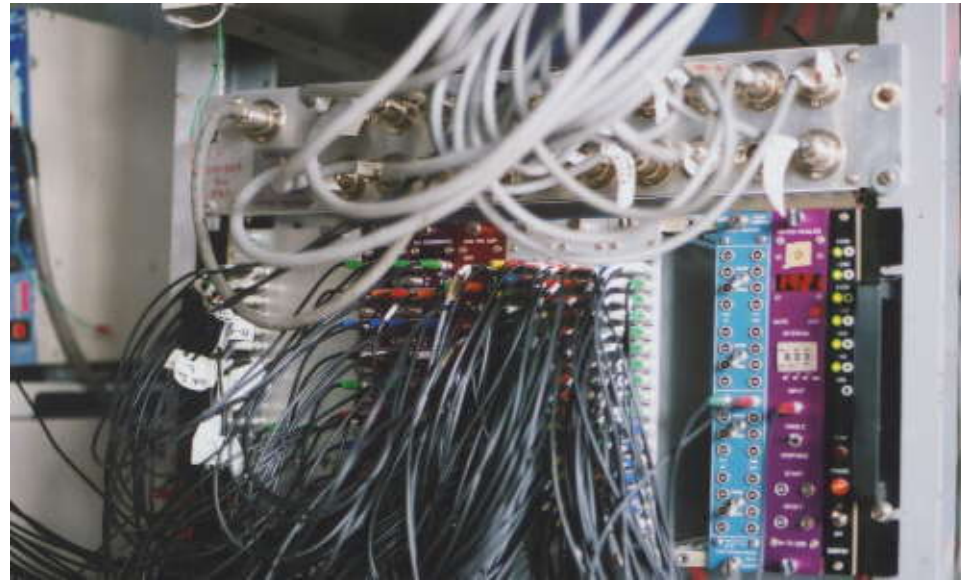
- $E_{dep}$  del  $n$  se mide por discriminadores de pulsos conectados a los PMTs.
- La altura de pulsos es discriminada en 4 umbrales  $E_{dep}$  diferentes. Canales:  $E > 30$  MeV,  $E > 60$  MeV,  $E > 90$  MeV,  $E > 120$  MeV
- Las direcciones de arribo de las part. Incidentes se clasifican en **25 patrones de disparo diferentes**.

# La Red Mundial de Telescopios de Neutrones



Map is from <http://pubweb.parc.xerox.com/map/> (not available now)  
Armenian photo is from <http://crdlx5.yerphi.am/>  
Tibet photo is from <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/>

- Deben localizarse en altitudes de montaña para minimizar la atmósfera atravesada por los neutrones
- Cerca del ecuador para tener altas energías umbral y declinación solar alta



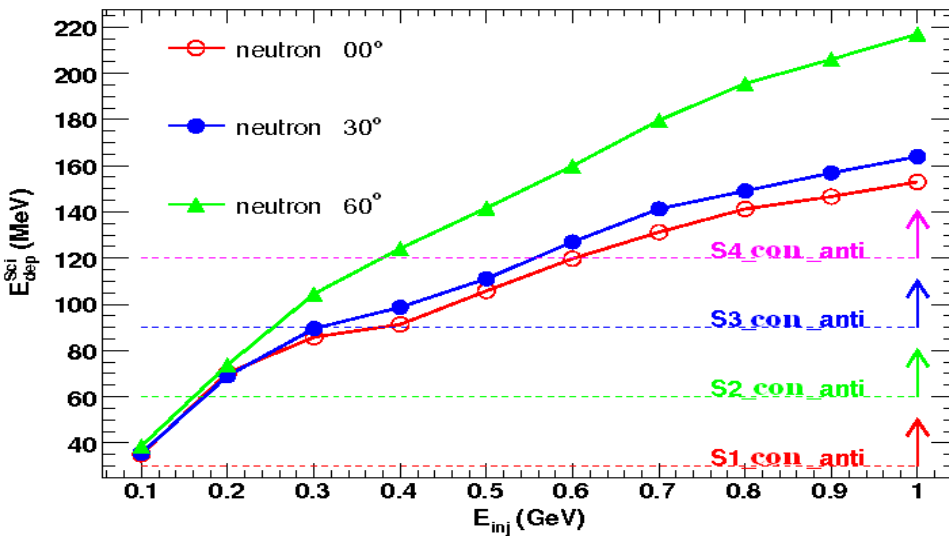
# Simulaciones Numéricas de TNS

- Verificar *contaminación* por otro tipo de partículas que pudieran producir una *señal tipo neutrón*. Simulamos todos los componentes activos del detector incluyendo todos los procesos físicos involucrados; *GEANT4 (Version 4.9.1)*.
- Se inyectaron  $5 \times 10^4$  : *neutrones, gammas, protones y electrones* en la parte superior del detector, con energías entre 100 MeV y 1 GeV.
- *Ángulos* cenitales de arribo:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ .
- Se considera como *n* solo aquellos eventos de anti-coincidencia que disparan los cuatro niveles de CPs bajo el centellador  Reconstrucción angular del evento.
- La señal electrónica en los PMTs es proporcional a la  $E_{dep}^{sci}$ . De ésta manera podemos simular la respuesta de cada canal del TNS.

(González et al., 2010)

# Simulaciones GEANT 4

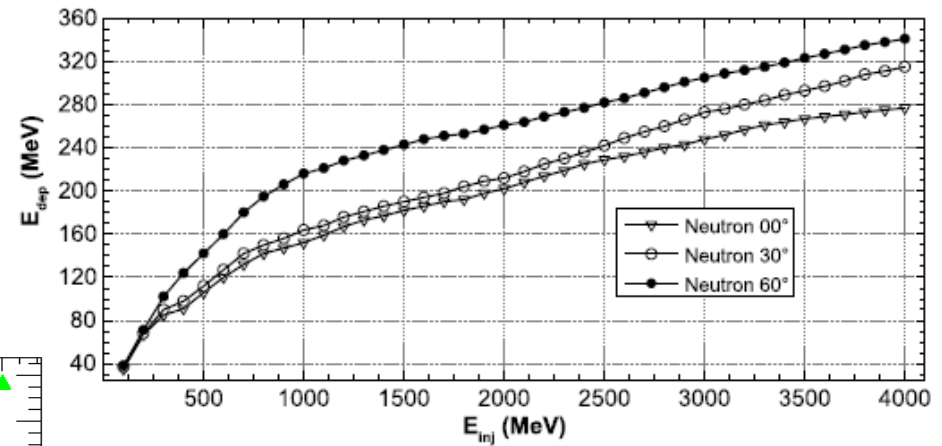
## Sierra Negra



■  $n's$  ( todos los ángulos de incidencia) deben tener al menos 100 MeV ( $E_{inj}$ ) para ser detectados por el canal S1 ( $E_{dep} \geq 30$  MeV).

■  $E_{inj} > 600$  MeV para ser detectados por el canal S4 ( $E_{dep} > 120$  MeV).

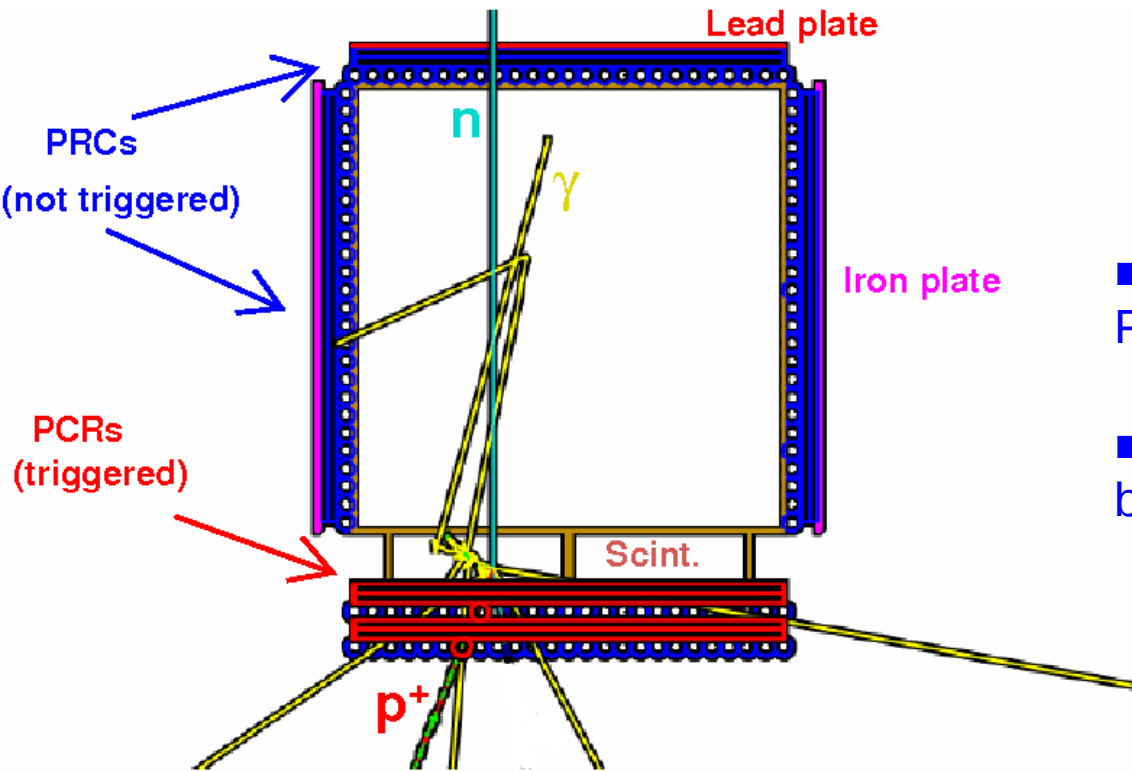
## Chacaltaya



$n's$  ( todos los ángulos de incidencia) deben tener al menos 100 MeV ( $E_{inj}$ ) para ser detectados por el canal S1 ( $E_{dep} \geq 40$  MeV).

■  $E_{inj} > 2500$  MeV para ser detectados por el canal S4 ( $E_{dep} > 240$  MeV).

## Graphical output of the simulation of a vertical impinging neutron of 500 MeV.



■  $n + {}^{12}\text{CSci} \rightarrow p+$  Triggers four PRCs underneath the Sci (in red).

■ Production of low energy  $\gamma$  by nuclear reaction inside the Sci

- The angular reconstruction is provided by the simulation of the PRCs below the scintillators.
- The four layers of PRCs allow classifying the direction of the recoil  $p+$  (correlated to the incoming  $n$  direction) in a 5x5 angular matrix of  $15^\circ$  resolution.
- The SNT carries out this process on line by means of specific logic circuits.
- The simulation code we produced estimates correlation of reconstructed angular directions with the true incoming direction.

# Evento 7 Septiembre 2005

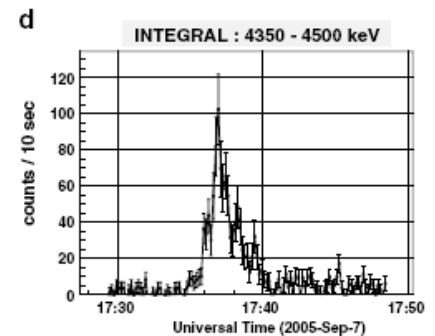
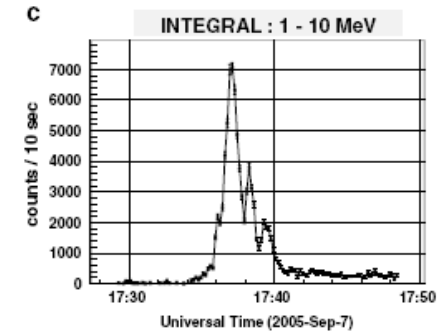
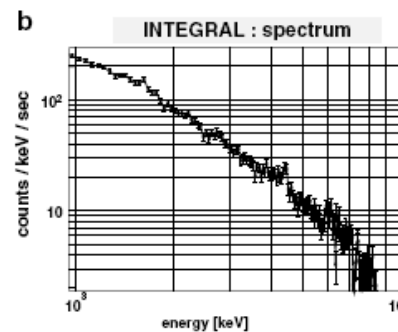
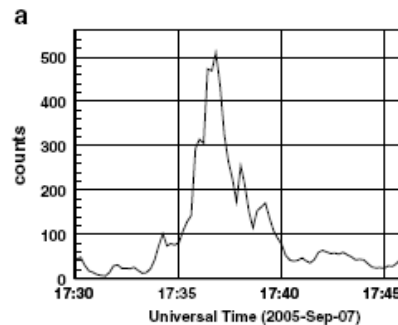
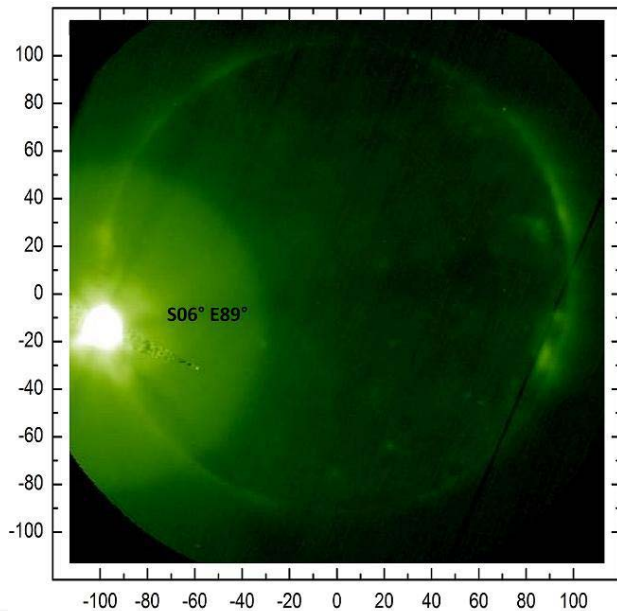
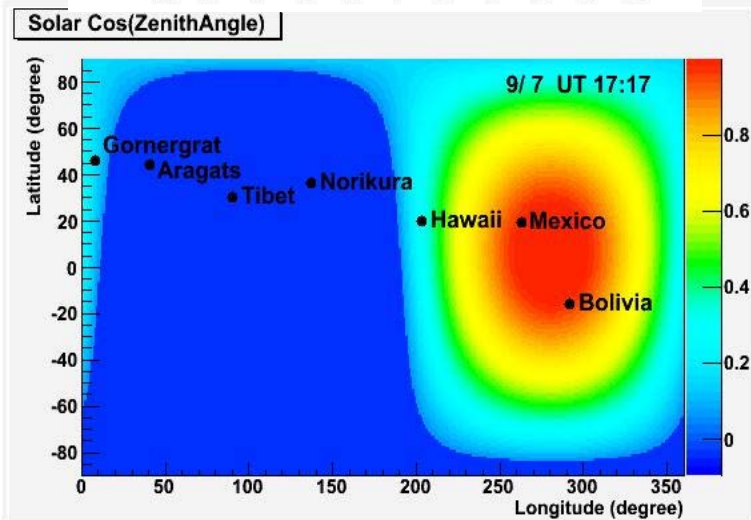


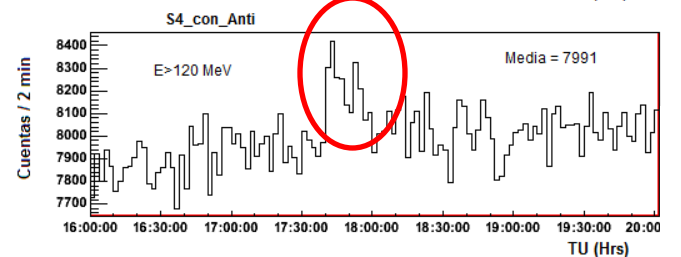
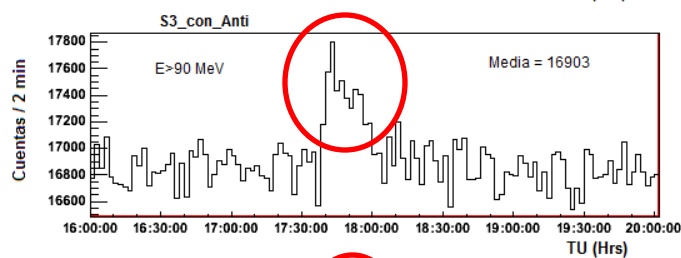
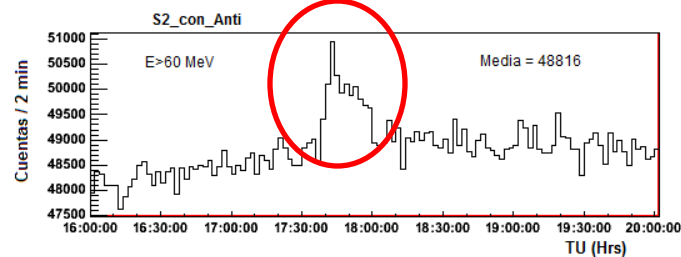
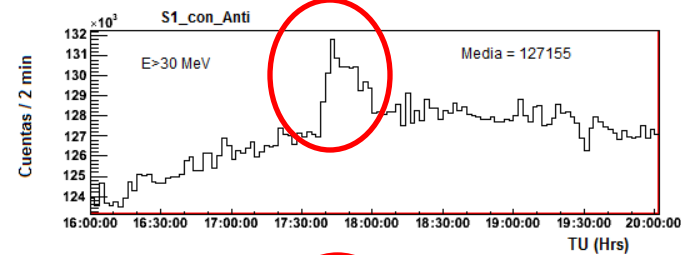
Fig. 1. (a) The time profile of hard X-rays (>50 keV) observed by the *GEOTAIL* satellite. (b) The energy spectrum of  $\gamma$ -rays observed by the *INTEGRAL* satellite. The  $\gamma$ -ray time profiles for the energy range between 1 and 10 MeV (c), and around 4.4 MeV (d) observed by the *INTEGRAL* satellite on 2005 September 7.

■ **Ráfaga solar Sept 7 2005**  
( X17.0,  $E= 17 \times 10^{-1} \text{ erg cm}^2 \text{ seg}^{-1}$ ).

■ **Maximo a 17:40 UT (GOES),**  
**17:36:40 (Integral).**

■ **Sierra Negra & Chacaltaya, estaban bien**  
**Localizados para observar los neutrones.**  
**Solares (angulo cenital  $\sim 15^\circ$ ).**





■ Clear excesses were recorded by solar neutron channels, after the hard X-ray peak time.

■ The statistical significance of the excesses:

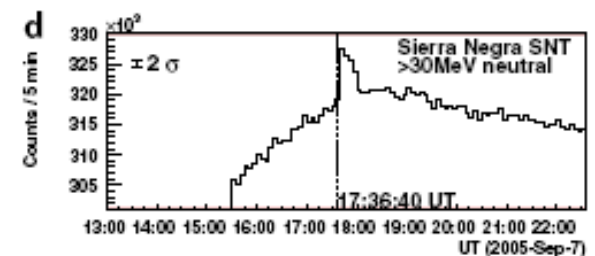
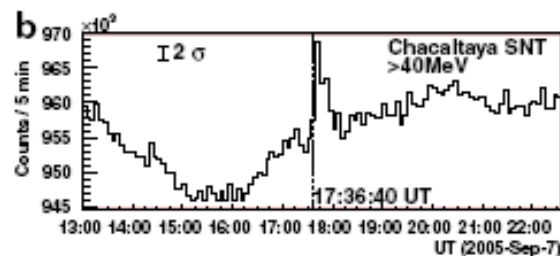
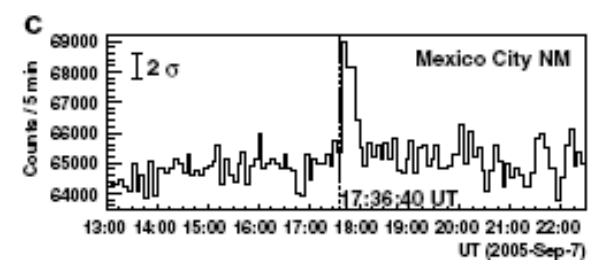
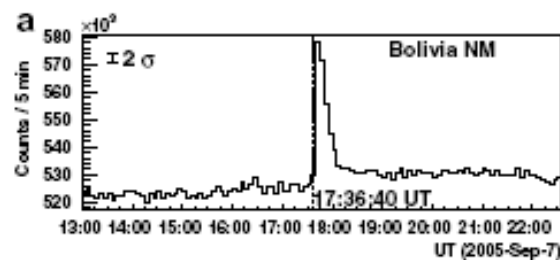
S1\_with\_anti **16 $\sigma$** ,

S2\_with\_anti **12 $\sigma$** ,

S3\_with\_anti **9.9 $\sigma$** ,

S4\_with\_anti **6.2 $\sigma$** .

•Mexico City & Chacaltaya NM see the event



- a) Flujo de neutrones solares simulado, llegando a 10° del zenith (flujo cercano al medio día).
- b) Proporción real de cuentas en el TNS durante el evento de Sept 7, 2005 a 17:36:40 TU (11:36:40 TL ~15° ángulo cenital).

(González et al., NIM, 2010, Ap. J., 2015)

**a) Simulation**

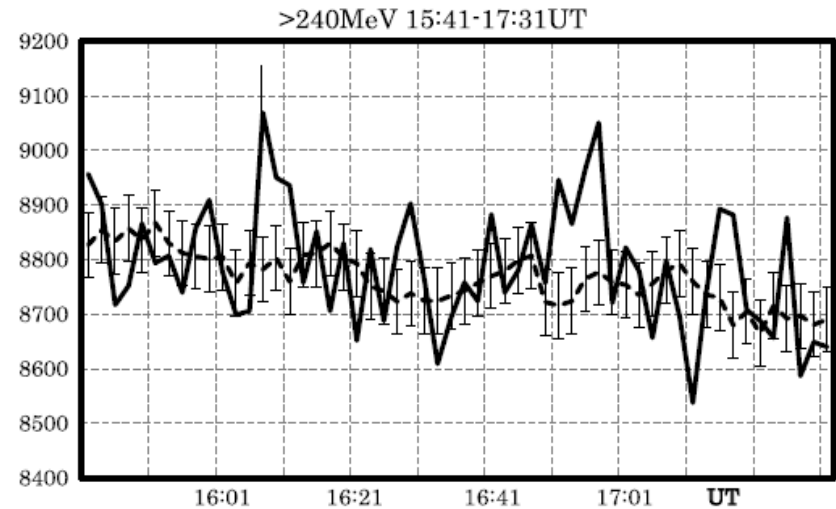
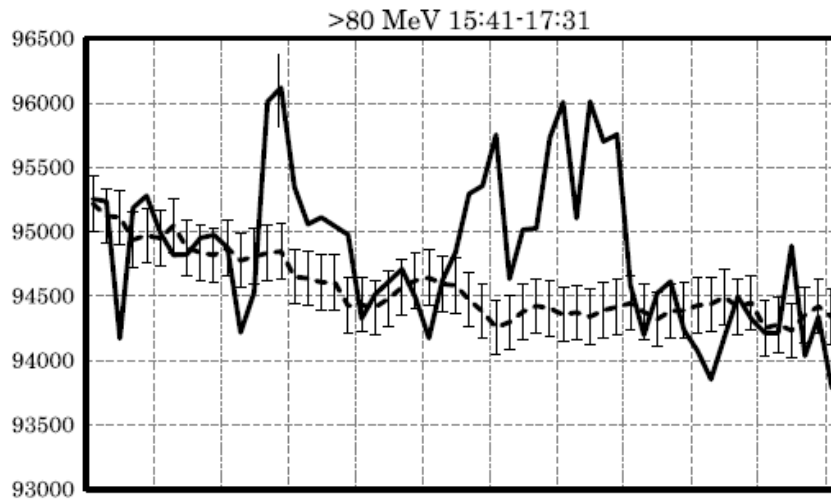
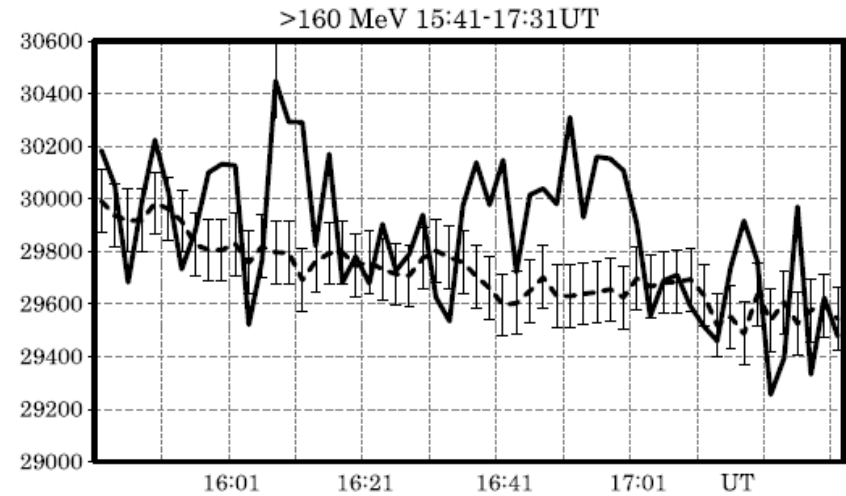
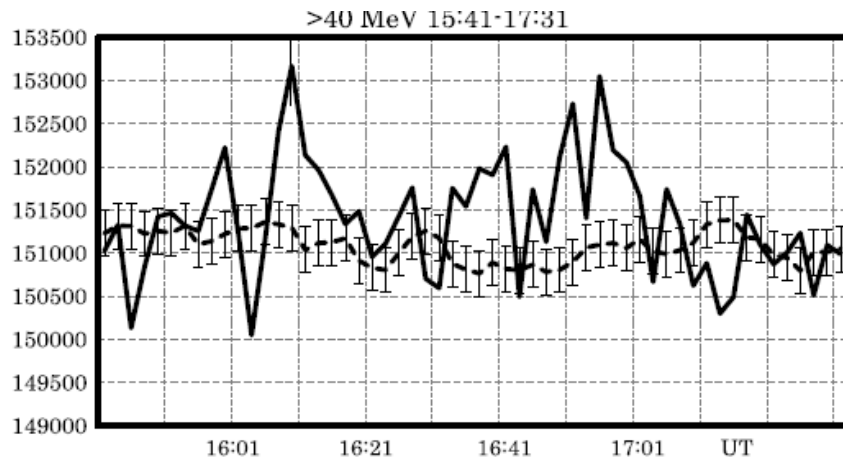
|             |            |            |      |         |      |            |
|-------------|------------|------------|------|---------|------|------------|
| South-North | N (+33.7°) | 2.1%       | 2.8% | 3.4%    | 2.8% | 2.2%       |
|             | ZN         | 2.8%       | 4.5% | 6.4%    | 4.5% | 2.8%       |
|             | NS (0°)    | 3.4%       | 6.4% | 11.9%   | 6.4% | 3.4%       |
|             | ZS         | 2.9%       | 4.5% | 6.4%    | 4.5% | 2.9%       |
|             | S (-33.7°) | 2.1%       | 2.8% | 3.3%    | 2.8% | 2.1%       |
|             |            | W (-33.7°) | ZW   | EW (0°) | ZE   | E (+33.7°) |
|             |            | East-West  |      |         |      |            |

**b) Real counts**

|             |            |            |      |         |      |            |
|-------------|------------|------------|------|---------|------|------------|
| South-North | N (+33.7°) | 1.4%       | 2.4% | 3.2%    | 2.6% | 1.6%       |
|             | ZN         | 2.3%       | 4.6% | 7.2%    | 5.4% | 2.7%       |
|             | NS (0°)    | 3.0%       | 6.7% | 11.3%   | 7.9% | 3.4%       |
|             | ZS         | 2.4%       | 4.8% | 7.3%    | 5.6% | 2.9%       |
|             | S (-33.7°) | 1.8%       | 2.4% | 3.4%    | 2.7% | 1.6%       |
|             |            | W (-33.7°) | ZW   | EW (0°) | ZE   | E (+33.7°) |
|             |            | East-West  |      |         |      |            |

# Evento 8 julio 2014

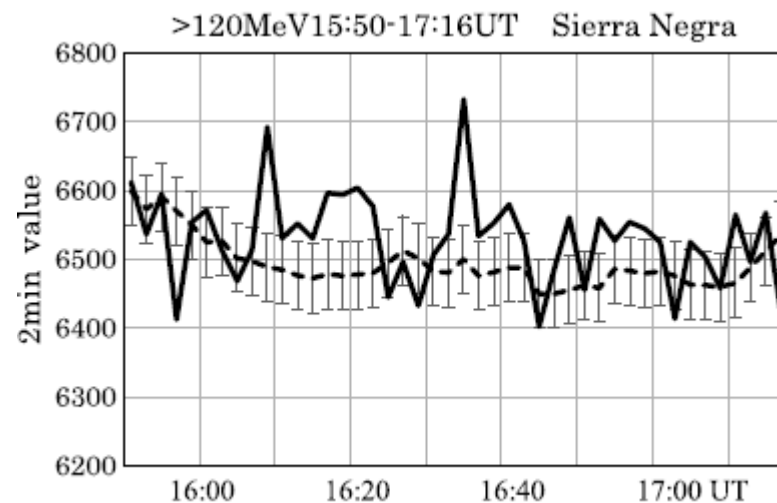
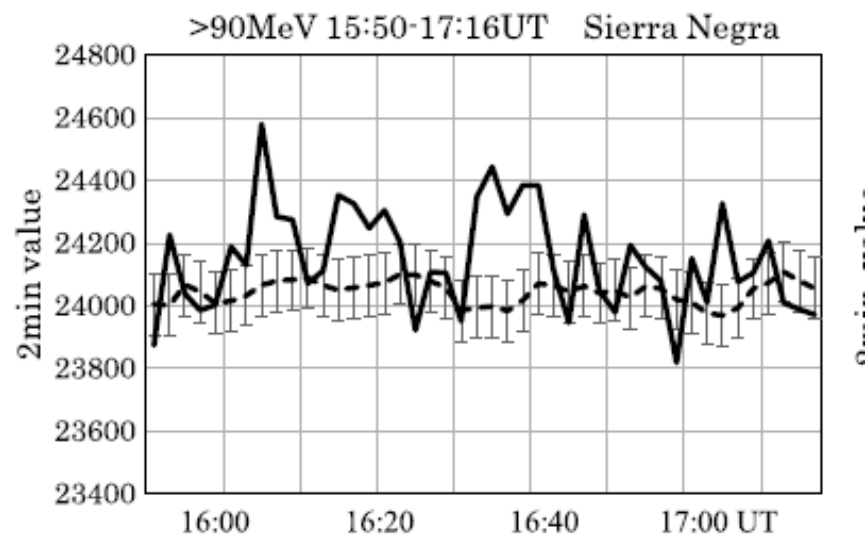
## CAHACALTAYA



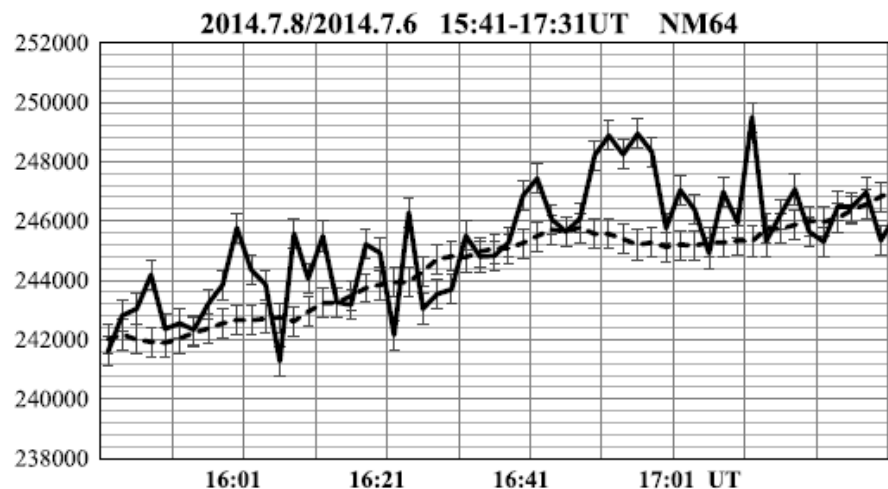
RAFAGA M6.5 N12 E56 ; 16:06 -16:20 (Peak)UT

**Evento 8 julio 2014**

## SIERRA NEGRA



## CHACALTAYA 12NM64



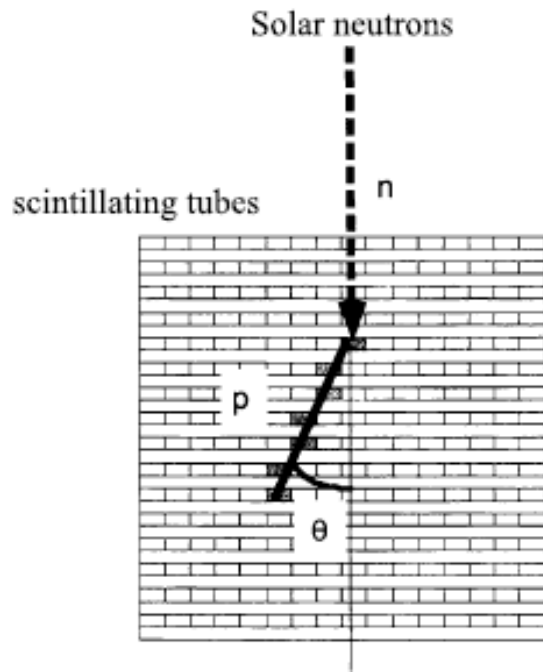
| Duración      | >40 MeV | >80 MeV<br>VALORES | >160 MeV<br>en $\sigma$ | >240 MeV |
|---------------|---------|--------------------|-------------------------|----------|
| 2014.7.8 (UT) |         |                    |                         |          |
| 16:07-16:13   | 6.2     | 7.2                | 6.0                     | 4.9      |
| 16:37-16:43   | 2.4     | 4.9                | 3.8                     | 1.6      |
| 16:45-16:57   | 4.9     | 8.1                | 5.8                     | 5.5      |
| 2005.9.7 (UT) |         |                    |                         |          |
| 17:34-17-48   | 12      | 8.8                | 5.5                     | 3.2      |

CHACALTAYA

| SIERRA NEGRA | DURACION      | >90 MeV<br>VALORES | >120 MeV<br>en $\sigma$ |
|--------------|---------------|--------------------|-------------------------|
|              | 2014.7.8 (UT) |                    |                         |
|              | 16:05-16:08   | 5.3                | 0                       |
|              | 16:09-16:11   | 2.0                | 4.1                     |
|              | 16:12-16:22   | 3.2                | 2.8                     |
|              | 16:32-16:34   | 4.5                | 4.7                     |
|              | 16:32-16:40   | 4.6                | 2.8                     |

# Detector SEDA-NEM

## A bordo de EEI



Barras de plástico centellador (x-y)  
6mm x 3mm x 96mm

c/plano tiene 16 barras

Tamaño del detector 96 x 96 x 96 mm

Dos MAPMT de 256 canales c/u

Dos formas de estimar la energía:

- $E_n = E_p / \cos^2 \theta$  , donde  $E_p$  se mide por el **RANGO** de los protones  
 $\theta$  ángulo c.r. A dirección del Sol
- Altura de las señales en los **DINODOS** del MAPMT

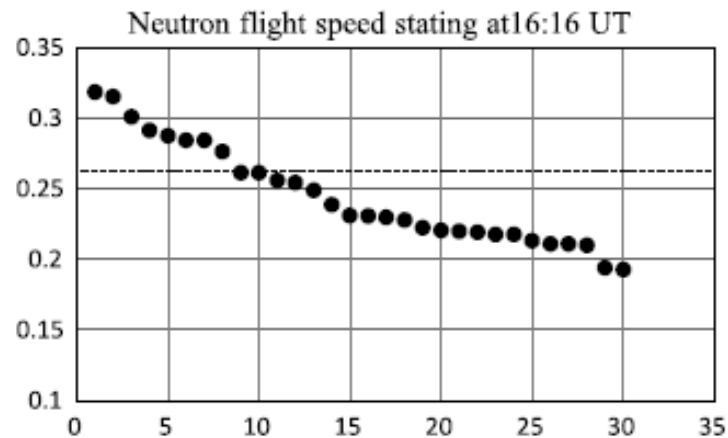
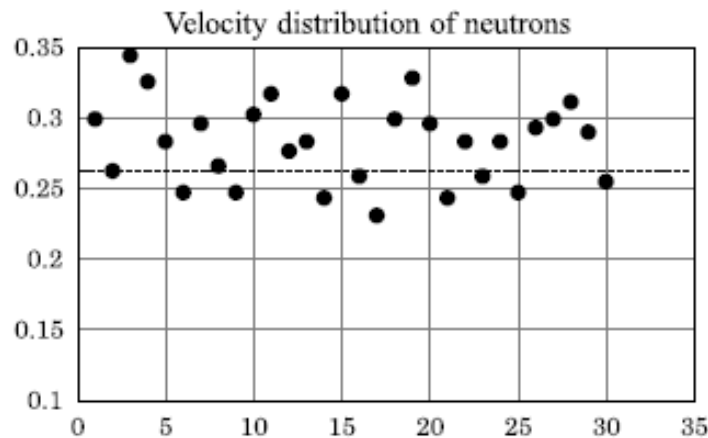
Entre 16:06-16:20 TU la EEI estaba del lado noche de la Tierra

Se perdió la oportunidad de observar Neutrones Solares de **Alta Energía** emitidos ~16:07TU; detectados en SN y Chacaltaya

n's con energía < 70MeV llegan a la tierra 14min después de la luz

Por tanto SEDA-NEM pudo observar n's  $35\text{MeV} > E_n > 70\text{MeV}$

Se encontraron 30 eventos entre 16:34- 16:51 TU

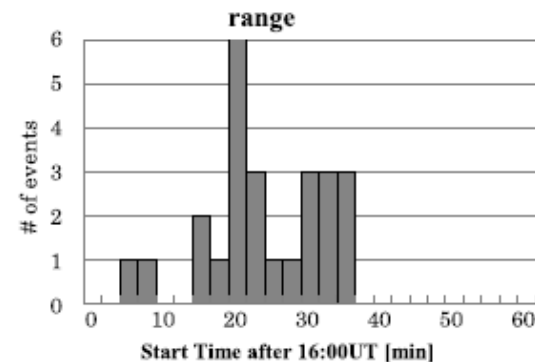
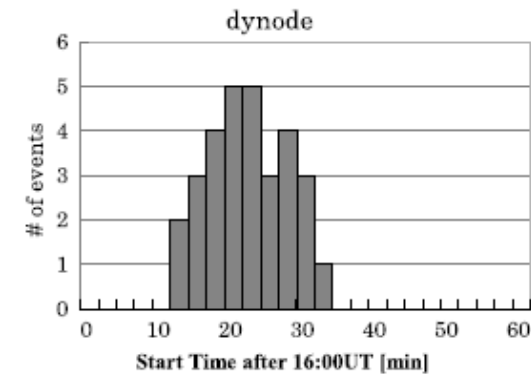
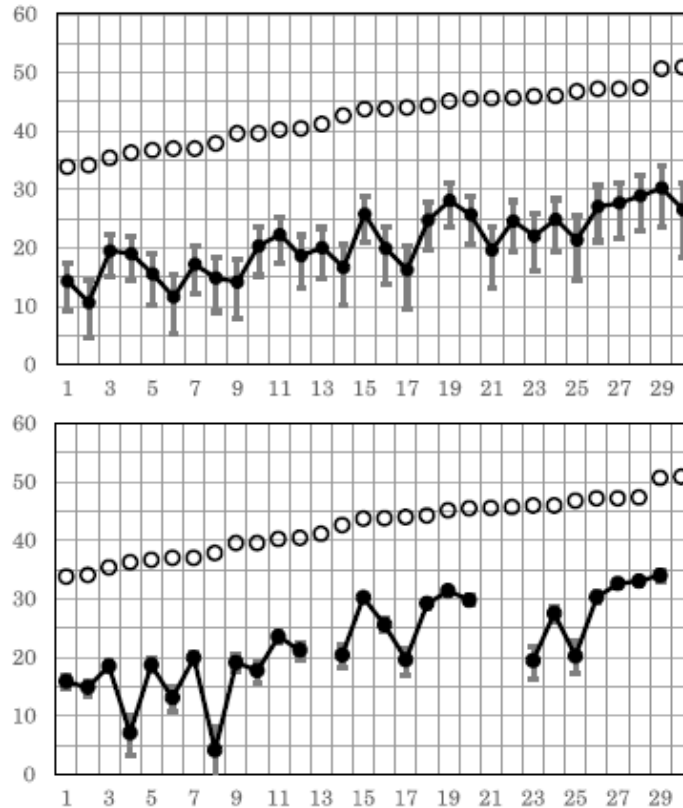


Eje vertical:  $v/c$  ; horizontal: No. Evento

Línea punteada  $v/c=0.266$  (35MeV, energía mínima de detección)

Panel derecho supone n's salieron del Sol a las 16:16 TU !!!

# Distribución temporal de arribo de los n's

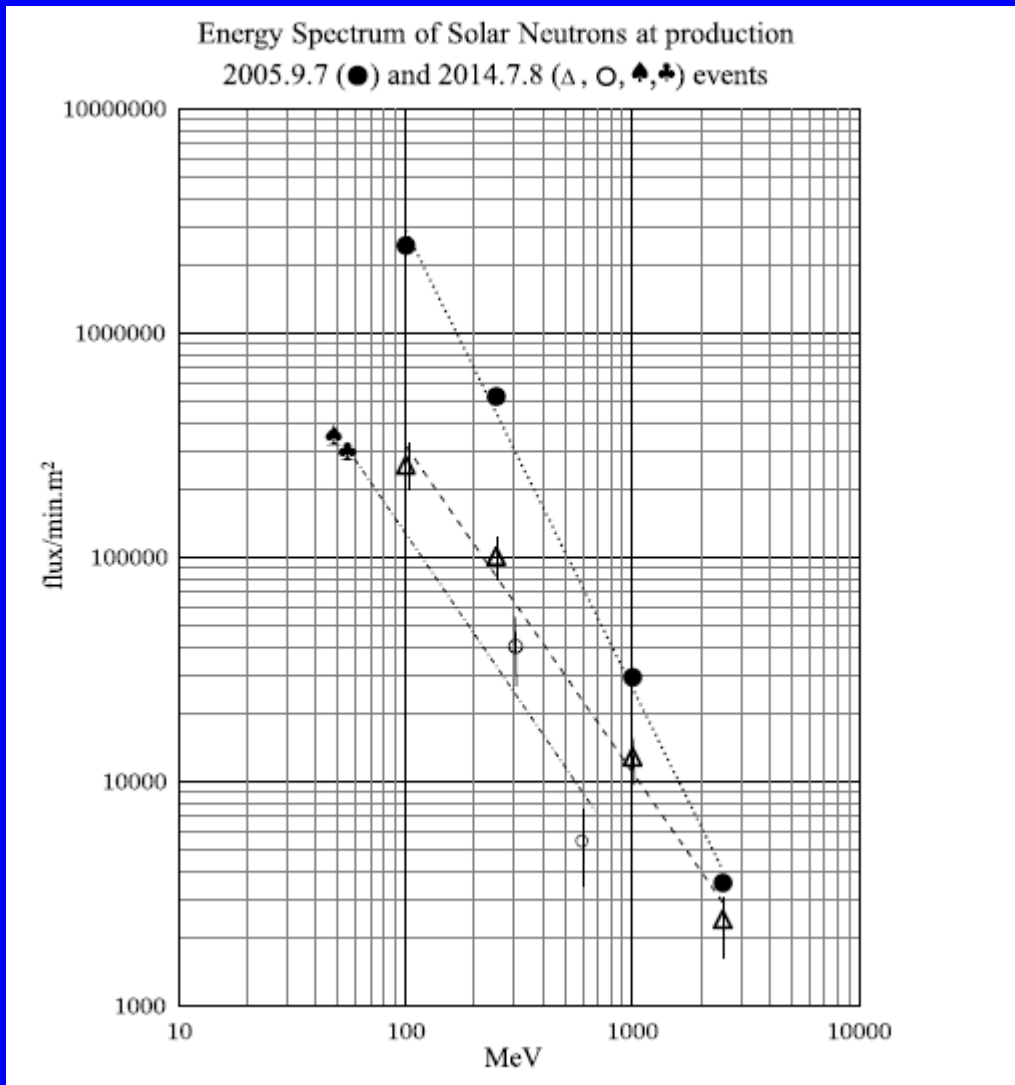


Panel izq:  
Circulos abiertos= tiempo de observación  
Circulos rellenos= tiempo corregido con En

Panel der:  
Distribución de velocidades

La distribución temporal derivada del método RANGO implica dos tiempos de emisión de partículas en el Sol (~ 16:16 TU y ~16:30 TU)

# ESPECTRO DE LOS NEUTRONES EN EL SOL



Para calcular el espectro:

- Se determina la atenuación Atmosférica mediante MC (González et al, 2015)
- Se toma en cuenta el decaimiento de n's.
- Se toma en cuenta el “tiempo de vuelo” de acuerdo con la energía .
- Se calcula la energía de los n's de acuerdo con la energía “mas probable” para cada canal (González et al, 2010)

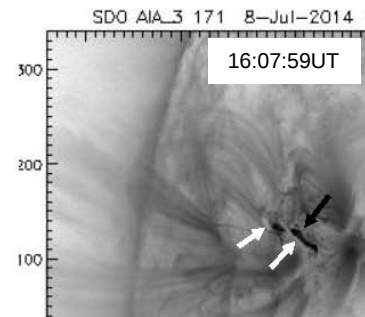
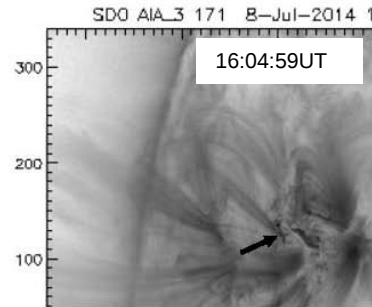
El índice espectral a las 16:07 TU resulta ser  $\gamma = -(1.5 \pm 0.2)$

Comparado con el evento 7/sep/2005  $\gamma = -(2.1 \pm 0.2)$

# SOLAR DYNAMICAL OBSERVATORY

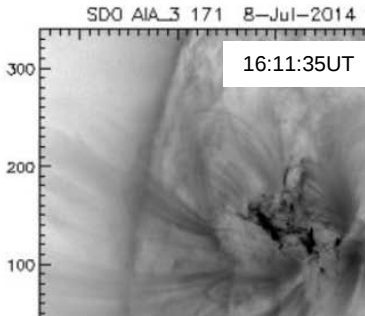
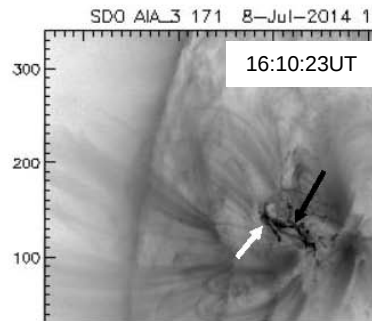
## 17.1 nm (EUV)

Dos pequeños  
Arcos magnéticos  
“colisionan”

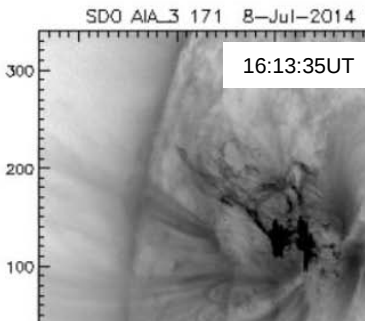
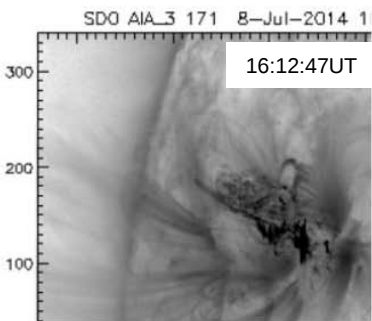


Dos filamentos eruptivos

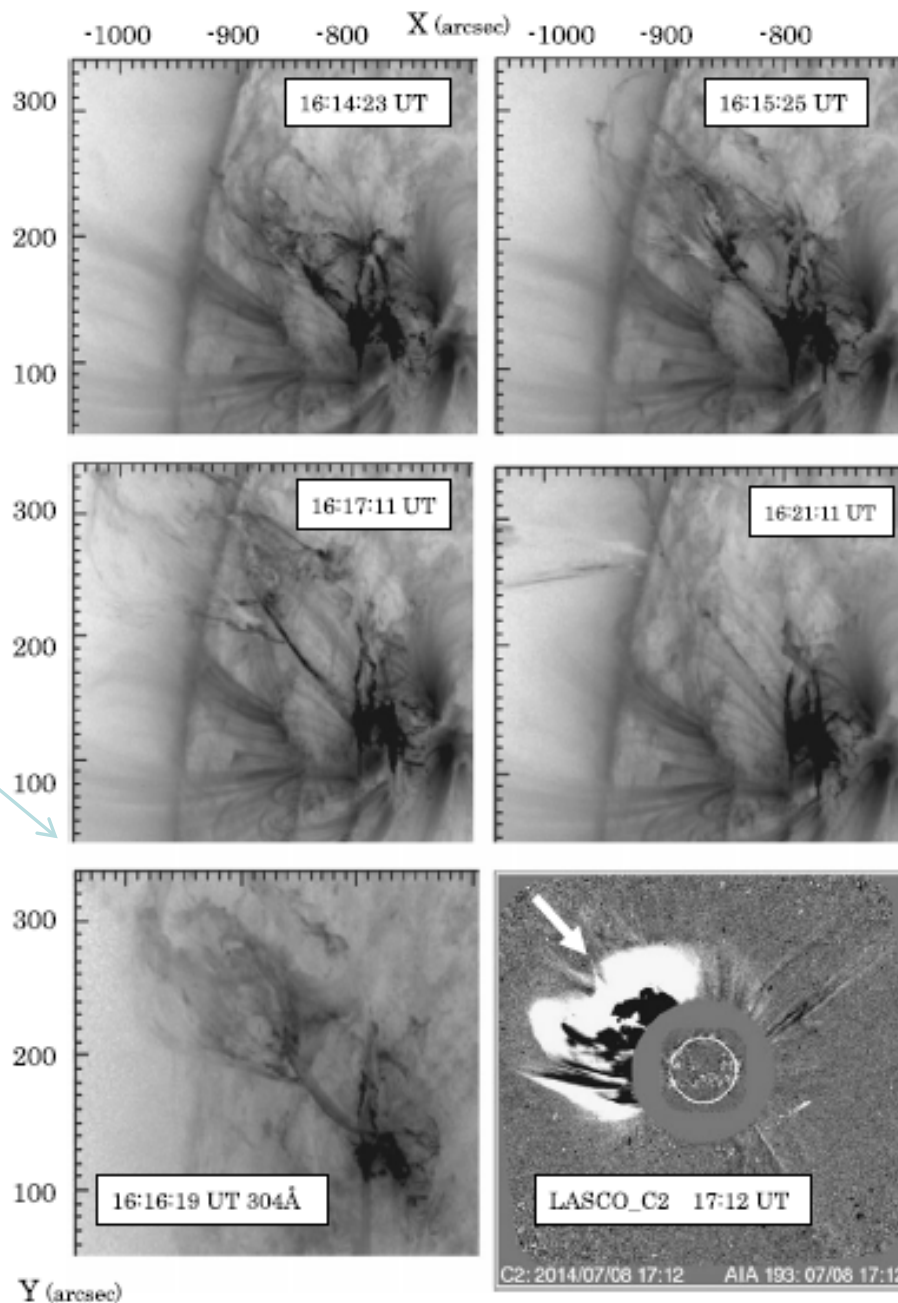
Reconexión magnética  
(Campo E  
p's ~10 GeV)



Algunos arcos  
magnéticos  
adicionales se  
“disparan”



Ráfaga activa



Origen de  
EMC?

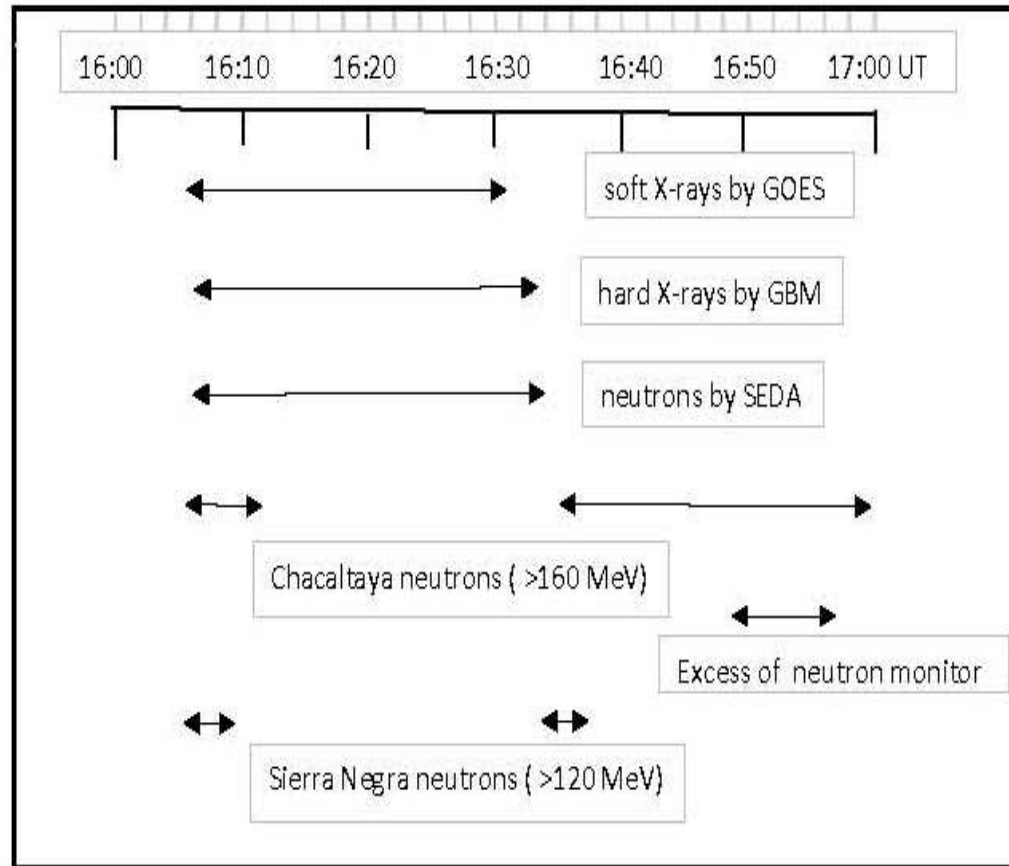
Perp. p's Shock acc  
to 10 GeV?



**n's to 1 GeV**

*Mandzhavidze, 1992;  
Cheng et al., 2013*

## Esquema temporal para el evento del 8 julio 2014



*Muraki et al, Sol Phys,.(2016)  
291: 1241-1265*

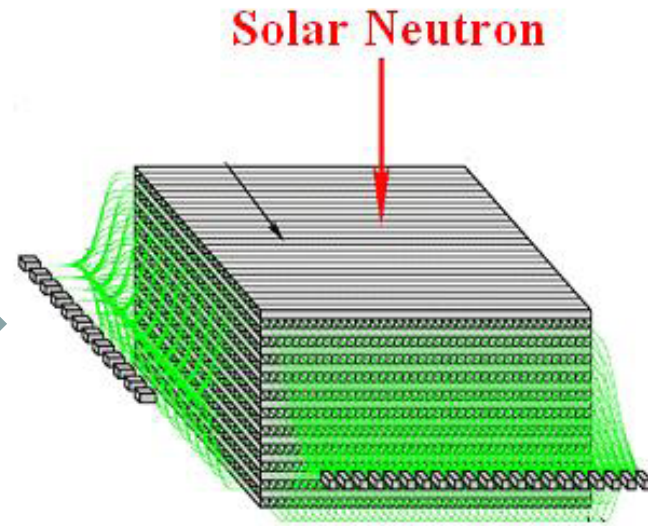
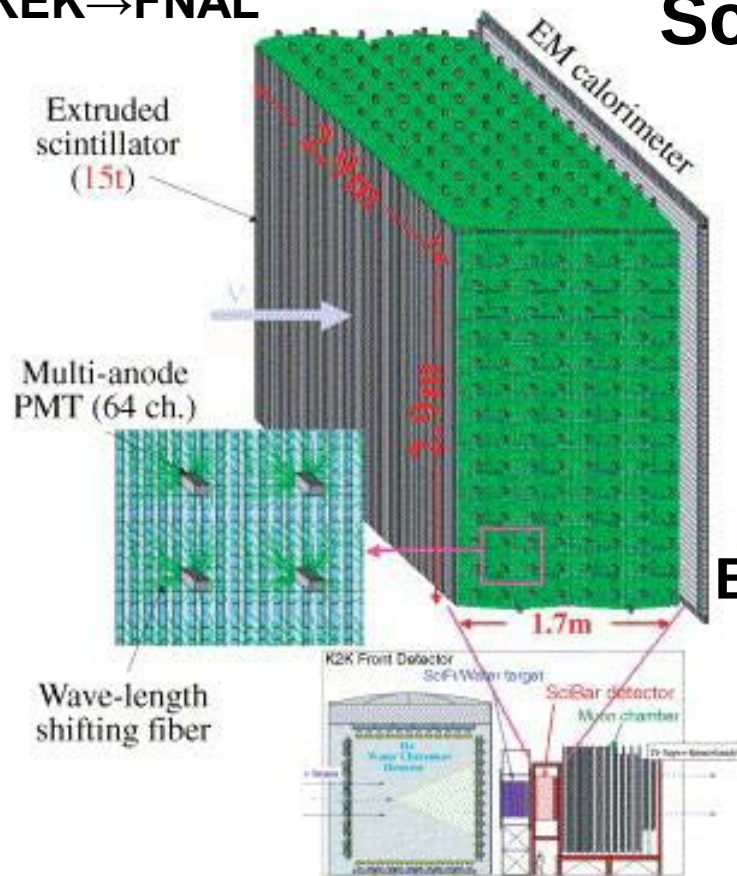
# Conclusiones

- Los TNS de Sierra Negra y Chacaltaya pueden detectar neutrones solares con energías de cientos de MeV hasta GeV, con eficiencias mayores al **10%**.
- La resolución angular de la simulación concuerda con los datos reales para **7 Septiembre, 2005**  validación de simulación.
- El evento del **8 julio, 2014**; observado en Chacaltaya, Sierra Negra y la Estación Espacial Internacional (SEDA-NEM) es debido a neutrones solares.
  - Combinando datos con resultados simulación  n's de  $\sim 1$  GeV; con lo cual p's de  $\sim 10$  GeV pueden haber sido producidos.
  - p's no observados en la Tierra puesto que las ráfagas fueron en el extremo este del Sol, donde las líneas del CMI llevan los p's lejos de la Tierra.
  - Existen evidencias tomadas de imágenes UV (AIA-SDO) y coronógrafos (LASCO-C2) del Sol de dos diferentes mecanismos de aceleración para el evento del **8 julio, 2014**; los cuales están claramente asociados a dos etapas distintas de aceleración ( $\sim 16:06$  TU,  $\sim 16:16$  TU).

**Hasta donde tenemos conocimiento, esta es la PRIMERA VEZ que se presenta éste tipo de evidencia de aceleración de partículas en el Sol.**

KEK→FNAL

# SciCRT



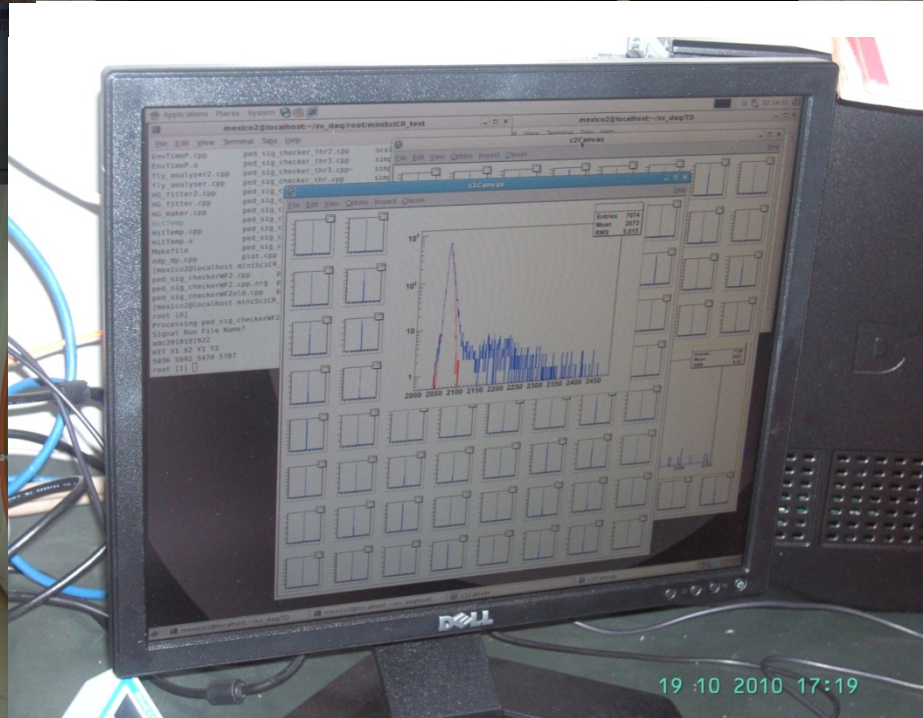
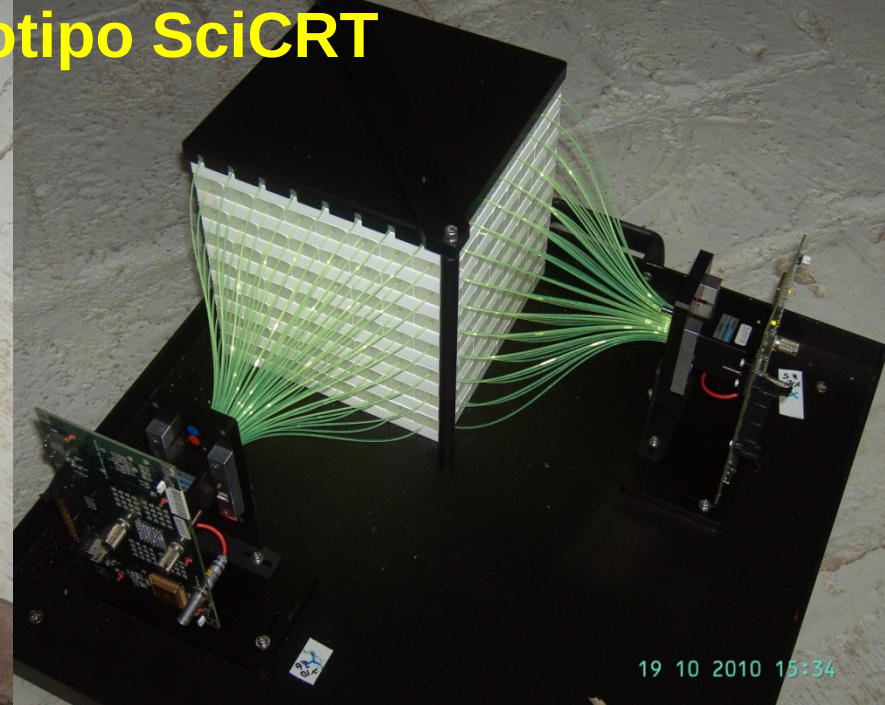
**Barras centelladoras 2.6cm x 1.3cm x 3m**  
 **$116 \times 64 \times 2 = 14848$  barras**

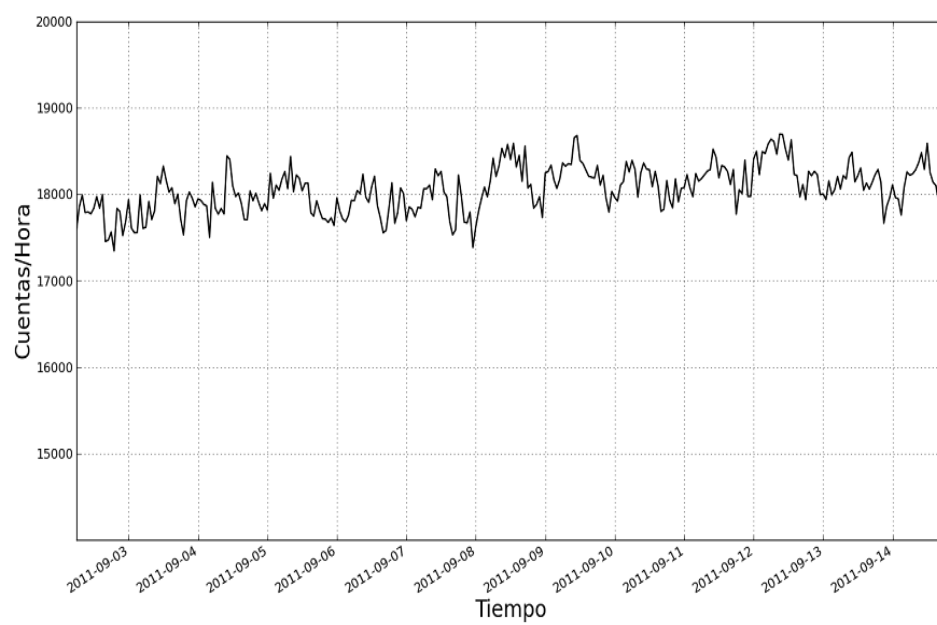
**El SciBar fue usado en experimentos de neutrinos en el acelerador.**  
**El SciBar (3m x 3m x 1.7m) puede ser usado como detector de rayos cósmicos en el volcán Sierra Negra , Mexico (4600m s.n.m.)**

**El SciBar tiene una mucho mejor sensibilidad y razones de conteo que el TNS.**

**Podemos identificar mejor a las partículas, su dirección y su energía.**

# MiniSci Bar. Prototipo SciCRT





## Variación Diurna

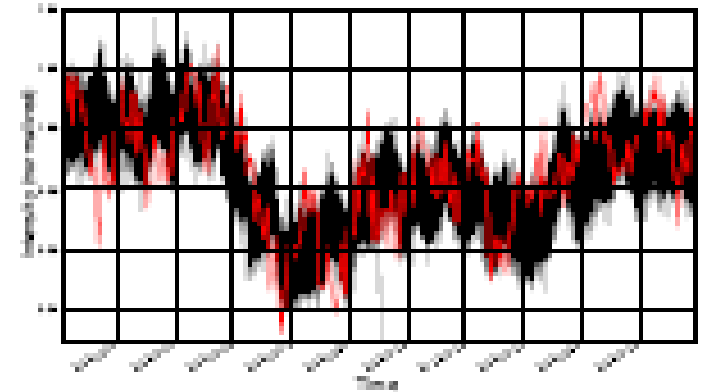
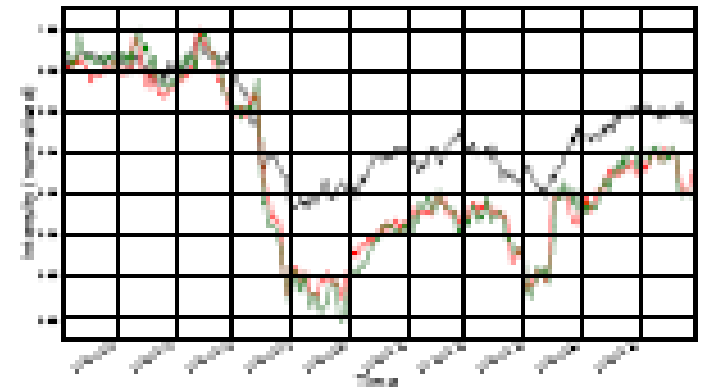
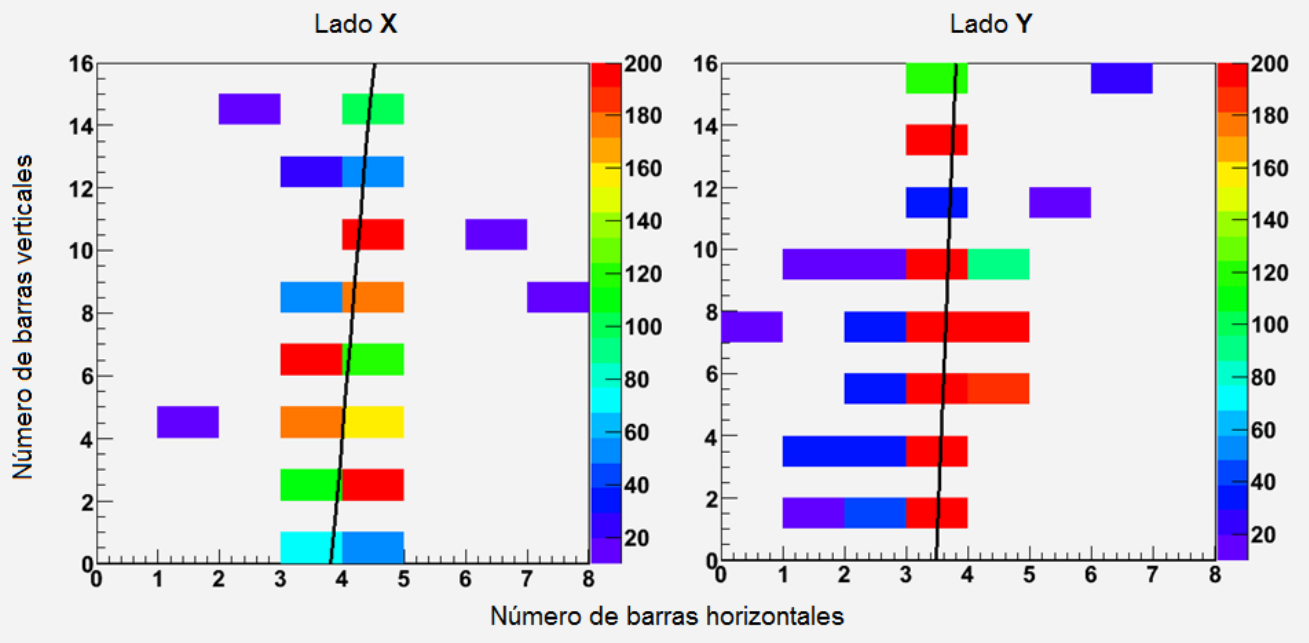


Figure 2: Forbush decrease recorded by mini-SciCR (red line) and Solar Neutron Telescope (black line) in Sierra Negra volcano on March 8, 2012.

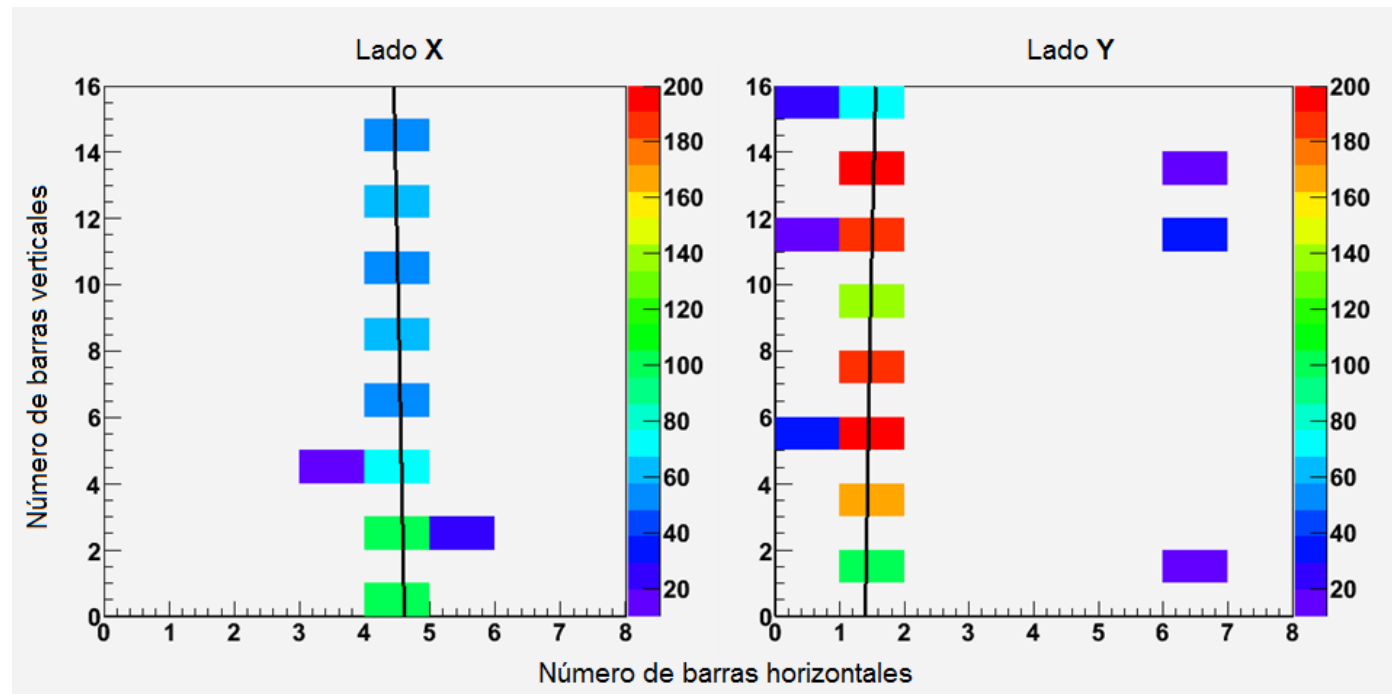
## Decrecimiento Forbush 8/03/12

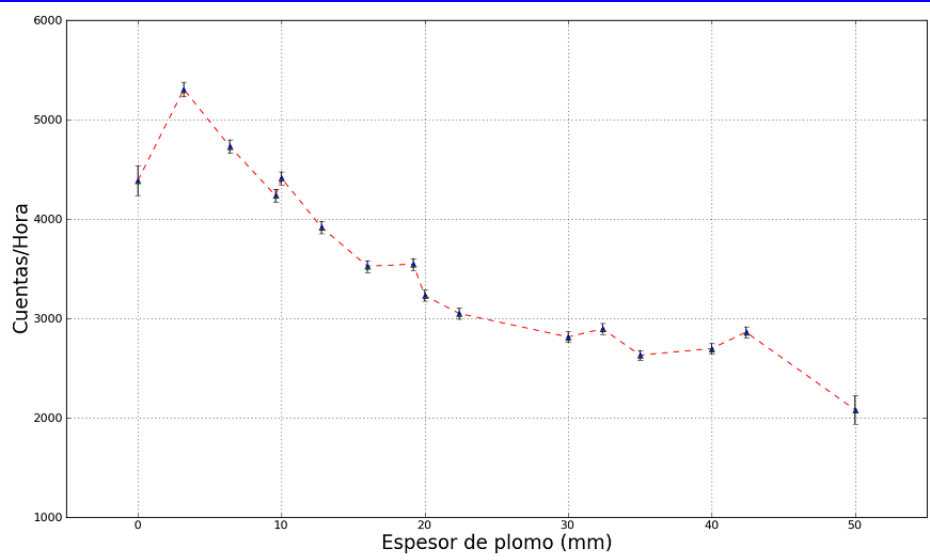




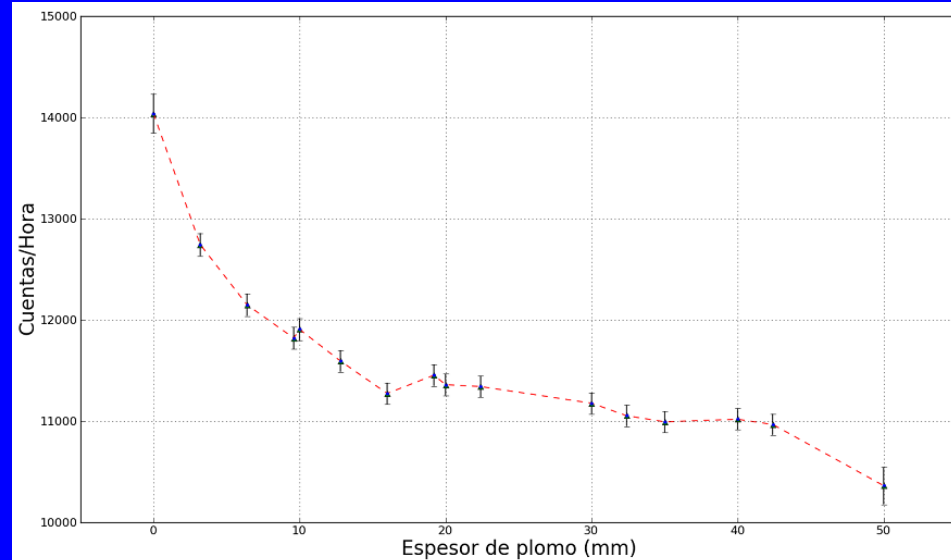
Traza Electronica

Traza Muonica

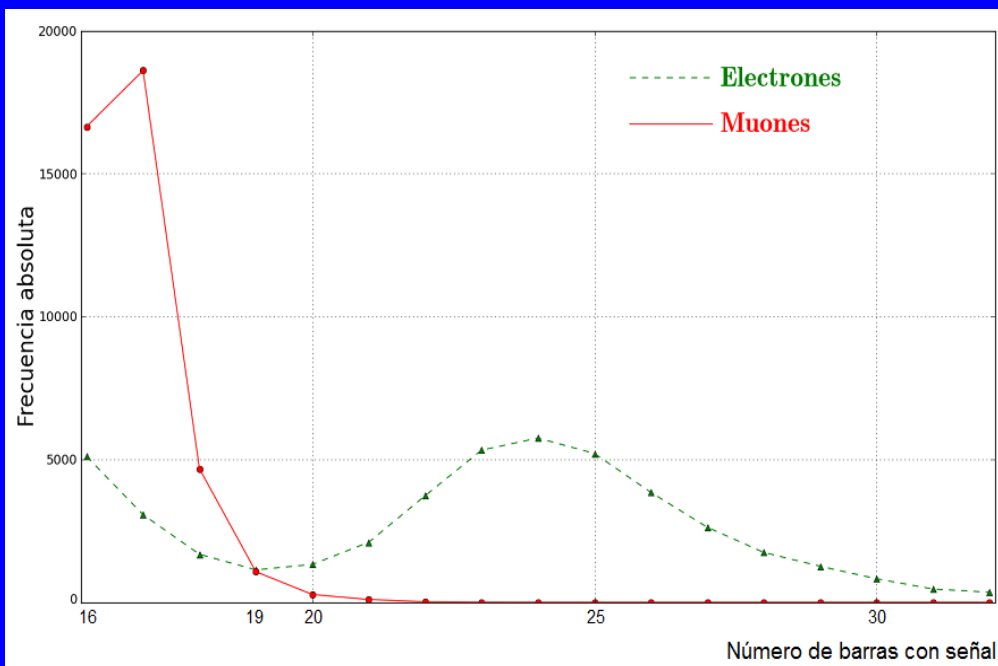




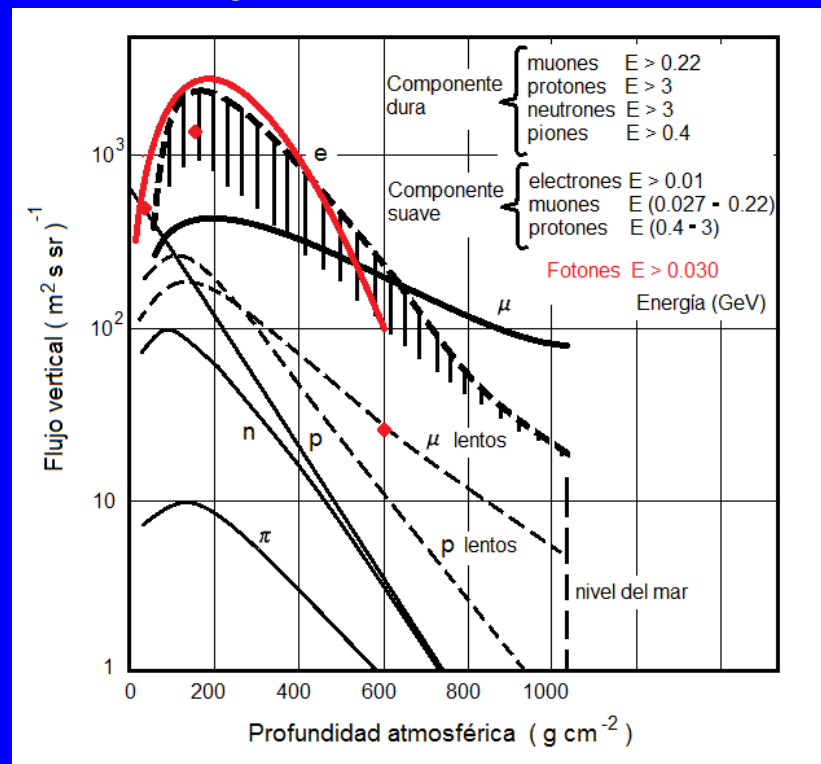
## Flujo Electrones



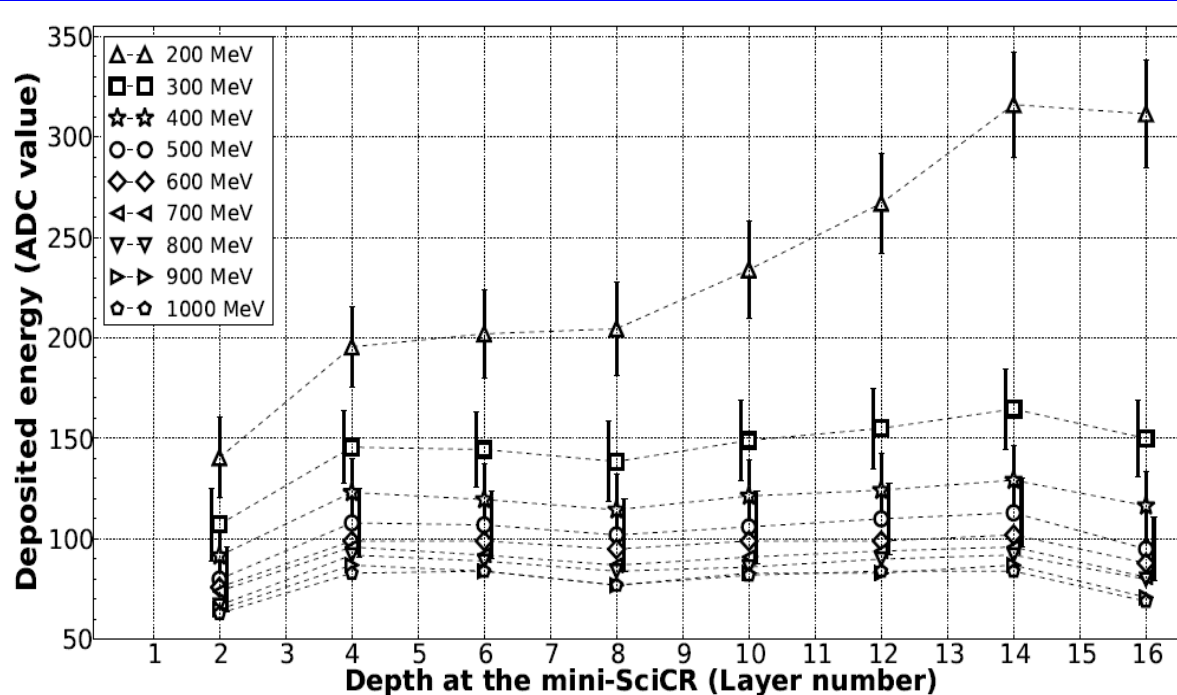
## Flujo Muones



(Ortiz et al, RMF, 2015)



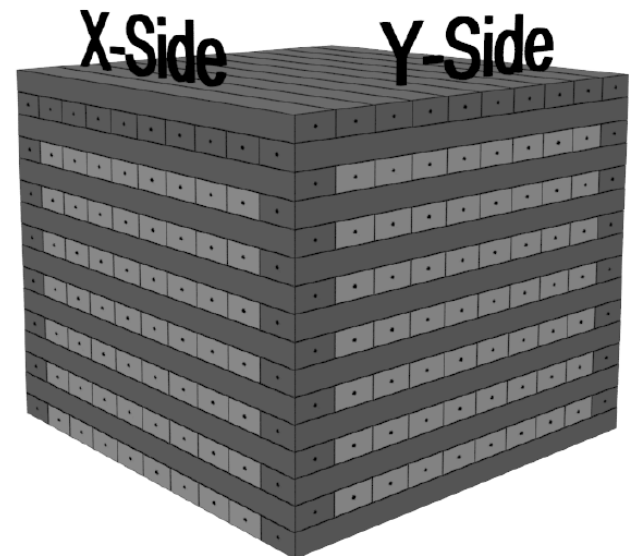
# PROTONES Y NEUTRONES



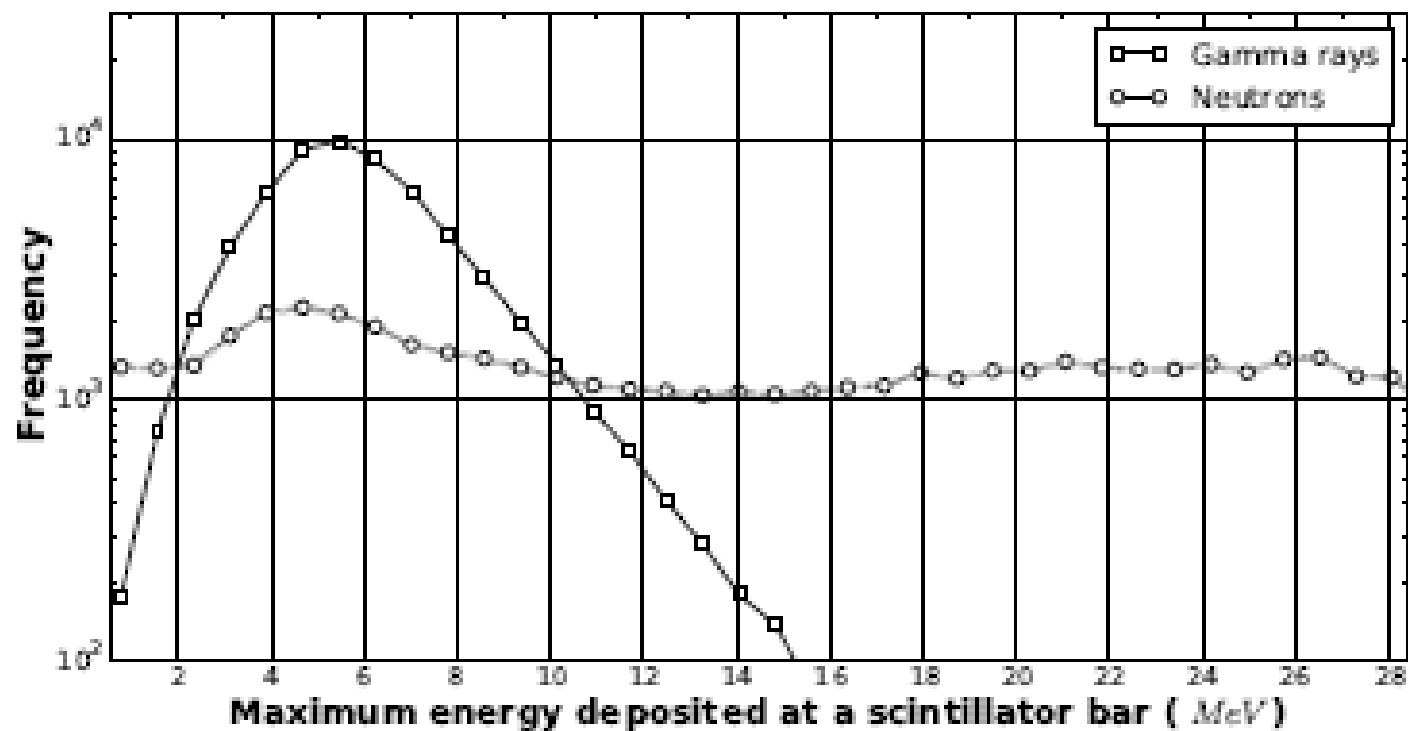
Protones identificables  
Por deposición de E

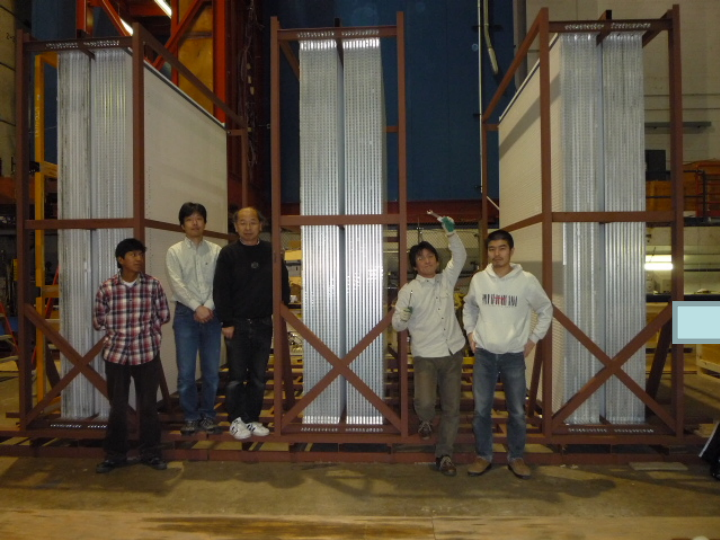
Neutrones Identificables por  
Anticoincidencia

Ortiz, et. al., ASR, 2016



# NEUTRONES Y GAMMAS

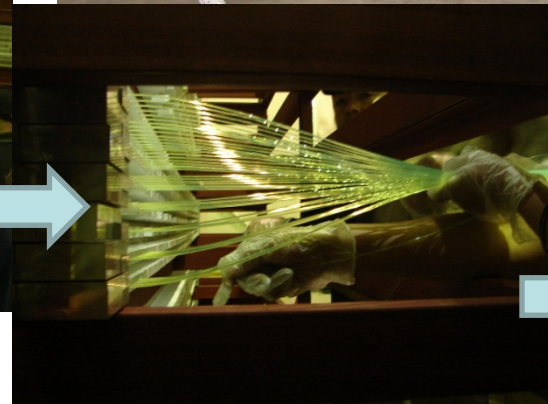




2011



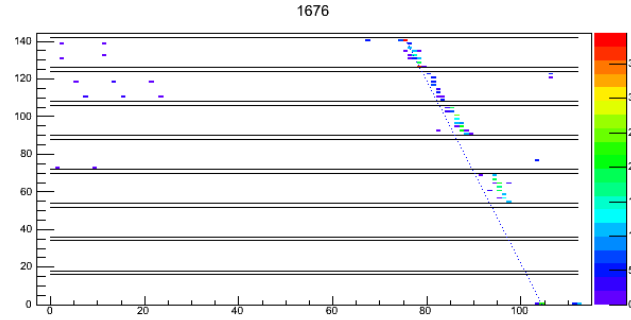
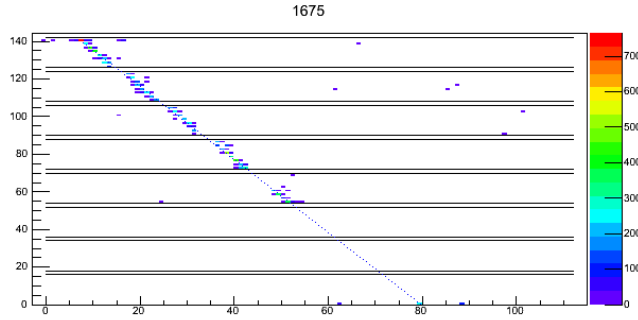
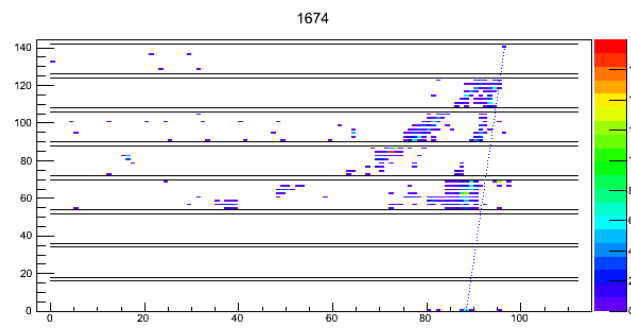
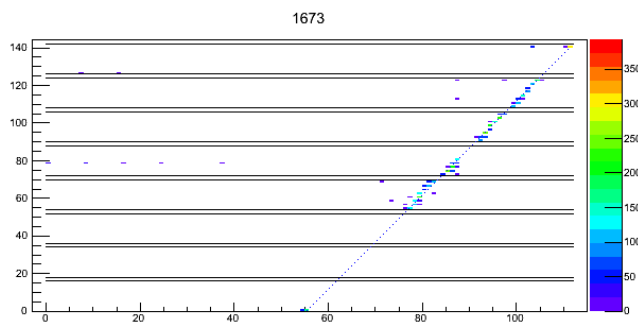
2012



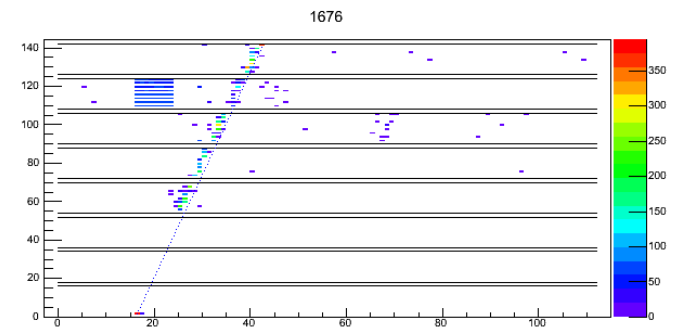
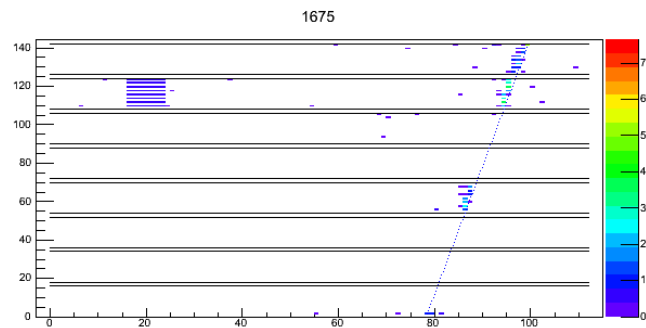
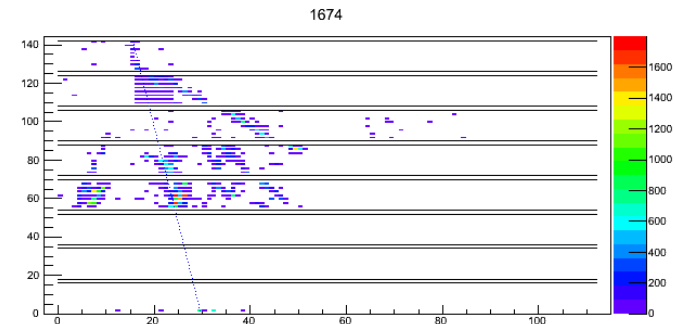
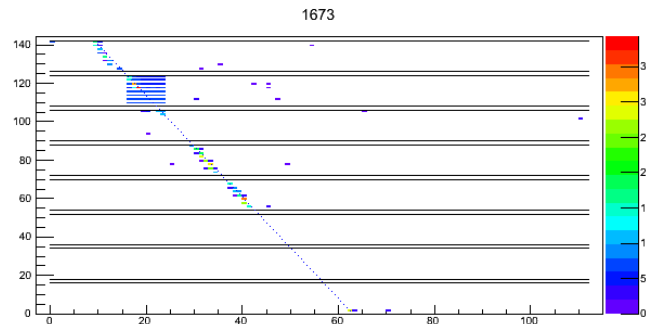


# RESULTADOS INAOE

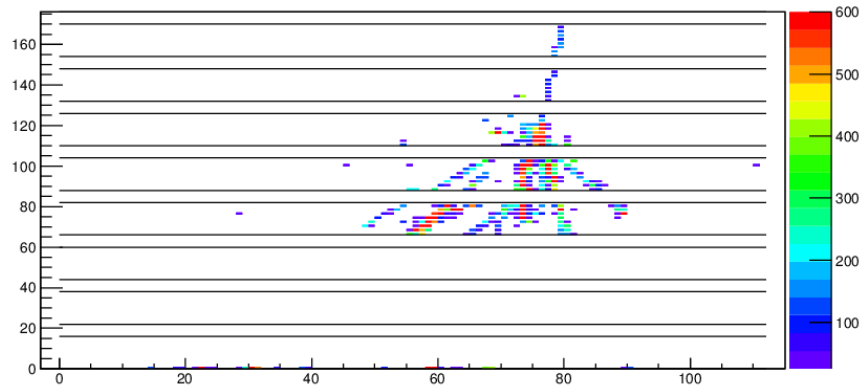
Lado X



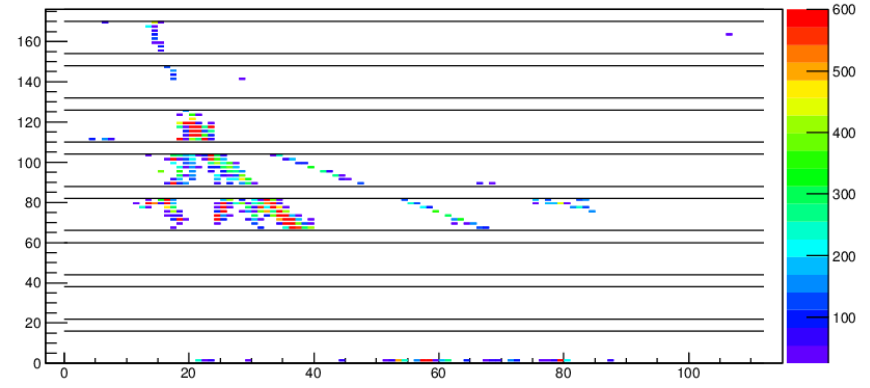
Lado Y



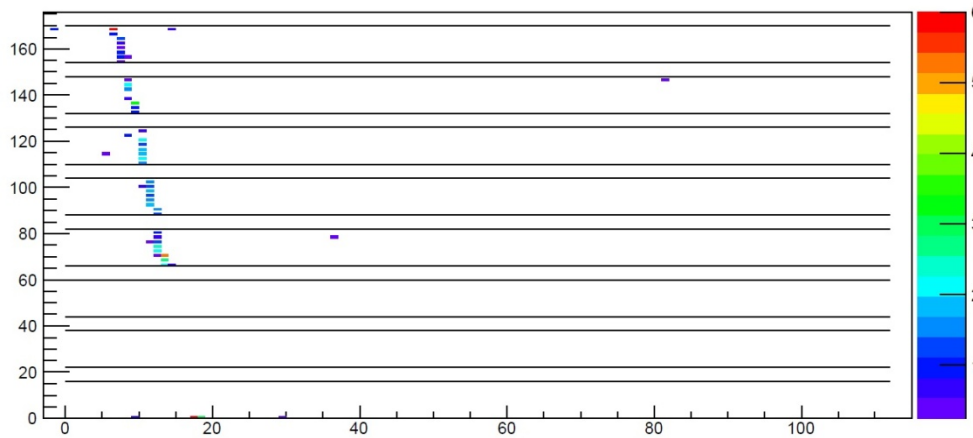
# Traza Chubasco X



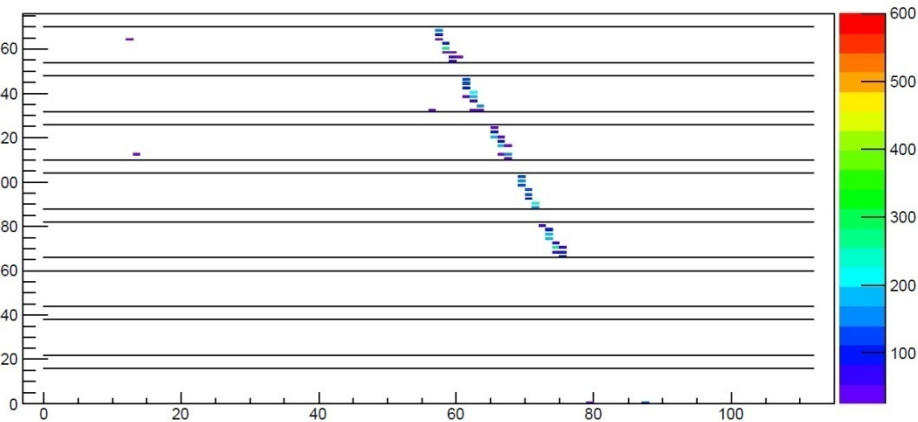
# Traza chubasco Y



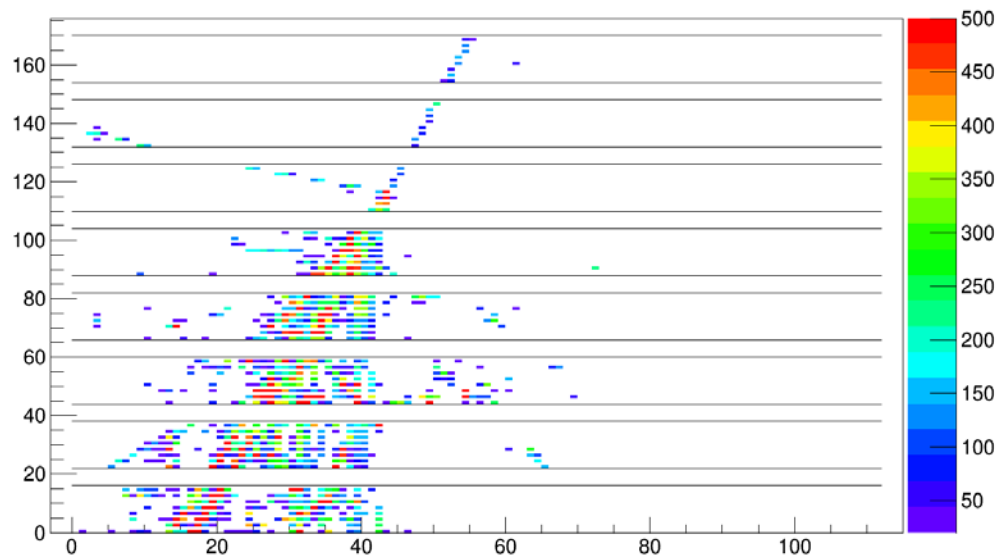
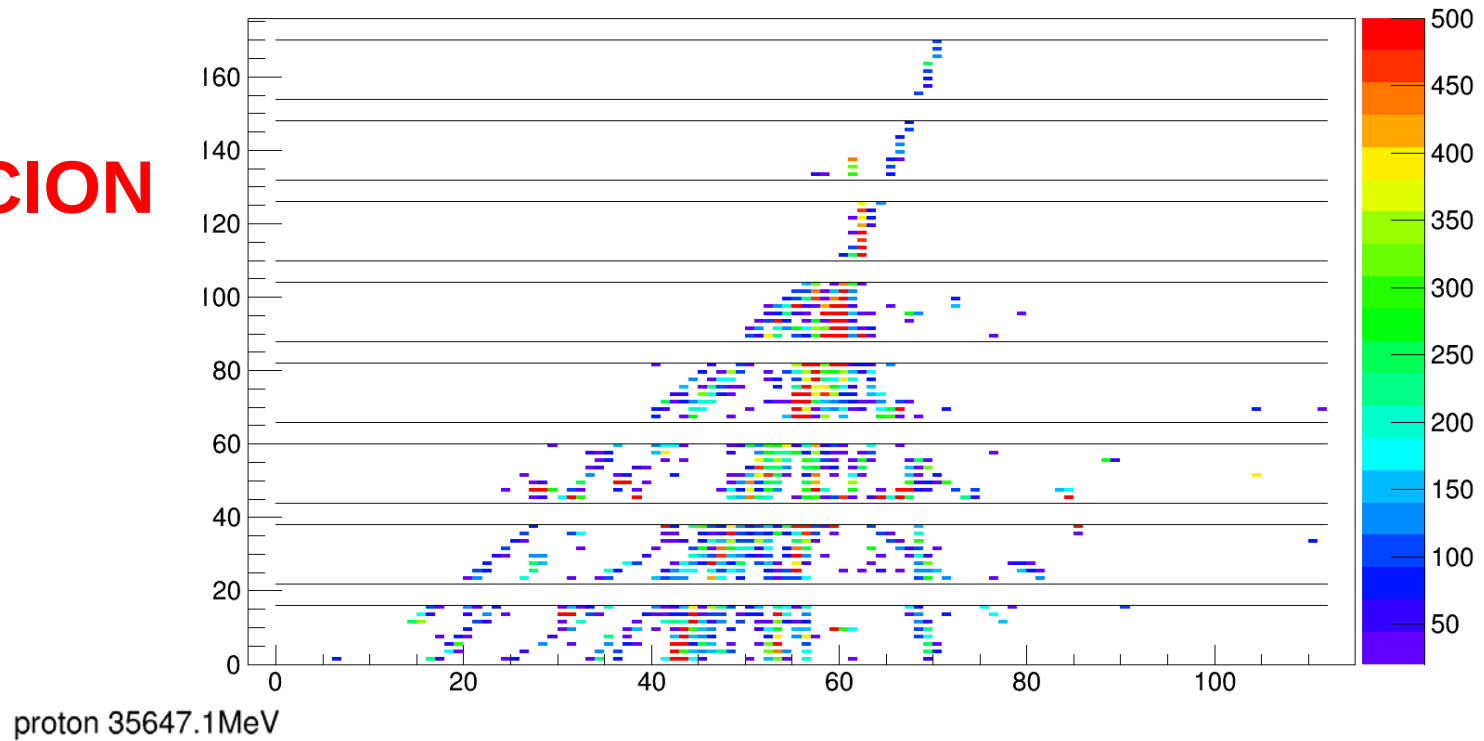
# Traza muon X



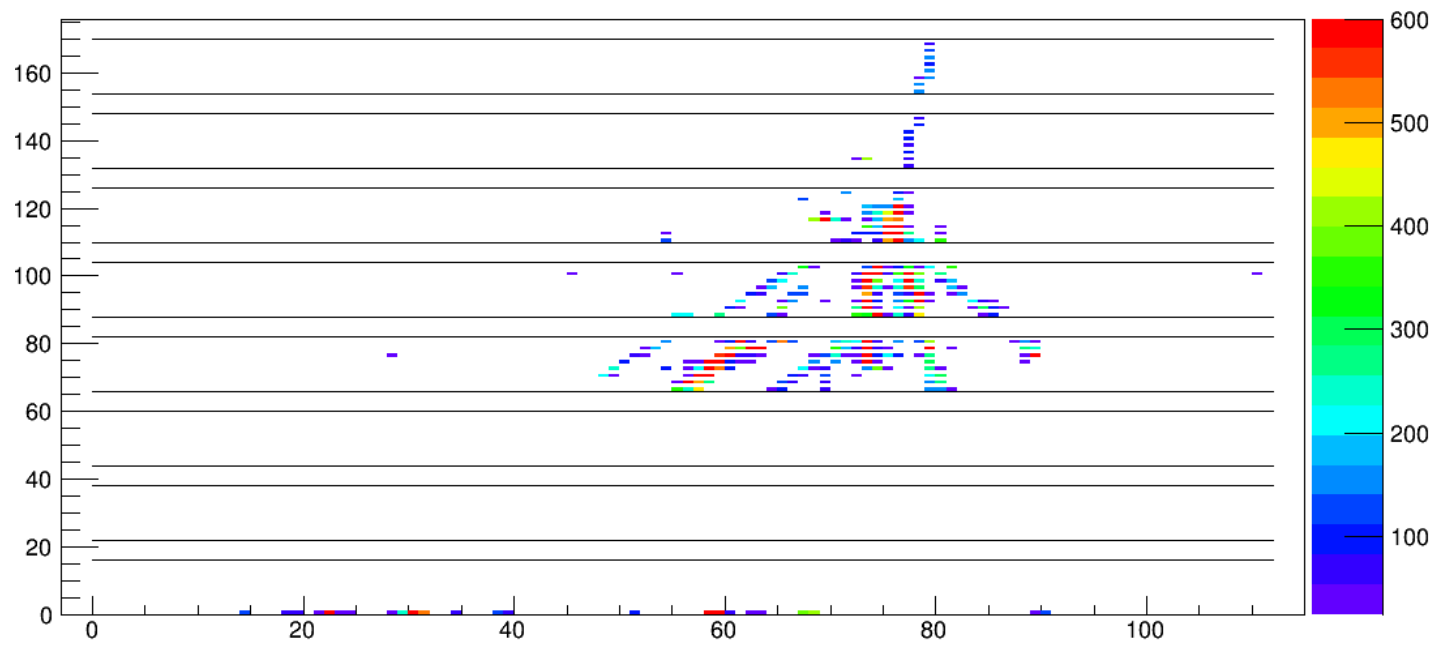
# Traza muon Y



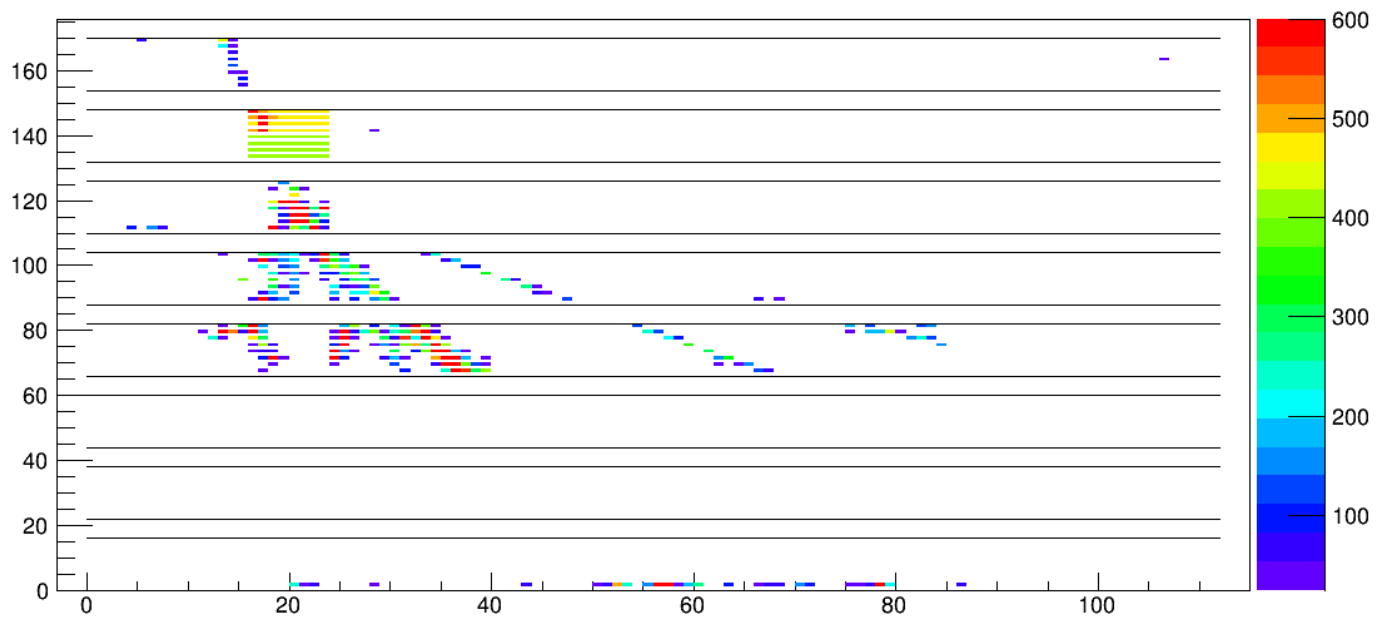
# PROTON SIMULACION MC



HADRON  
DATOS  
SIERRA NEGRA

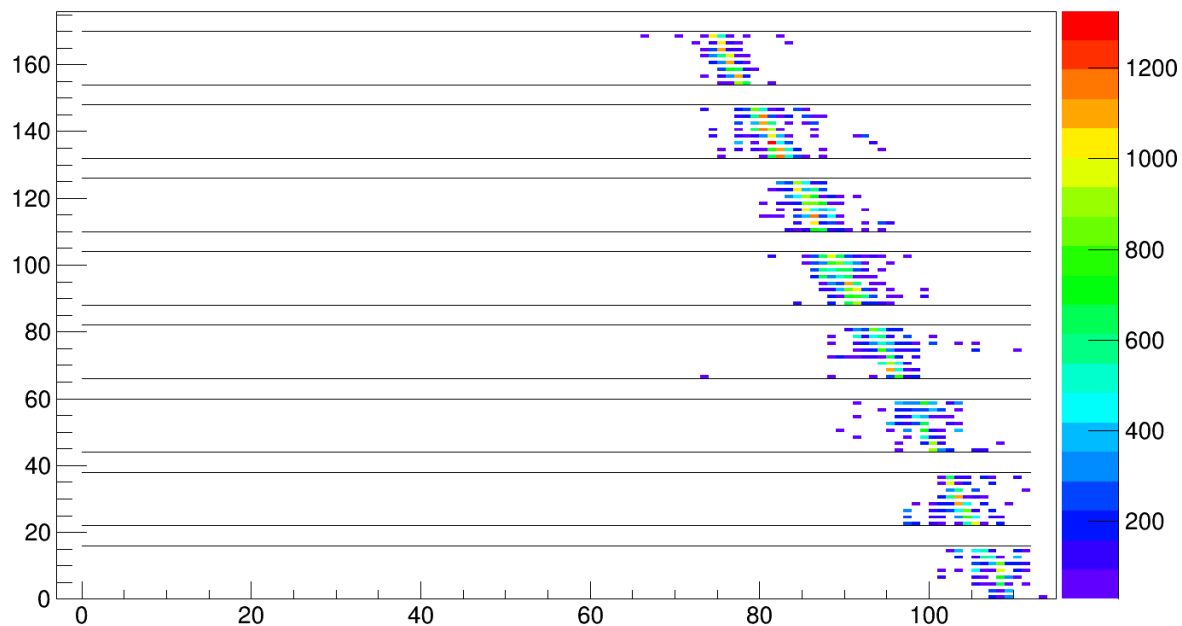


7173

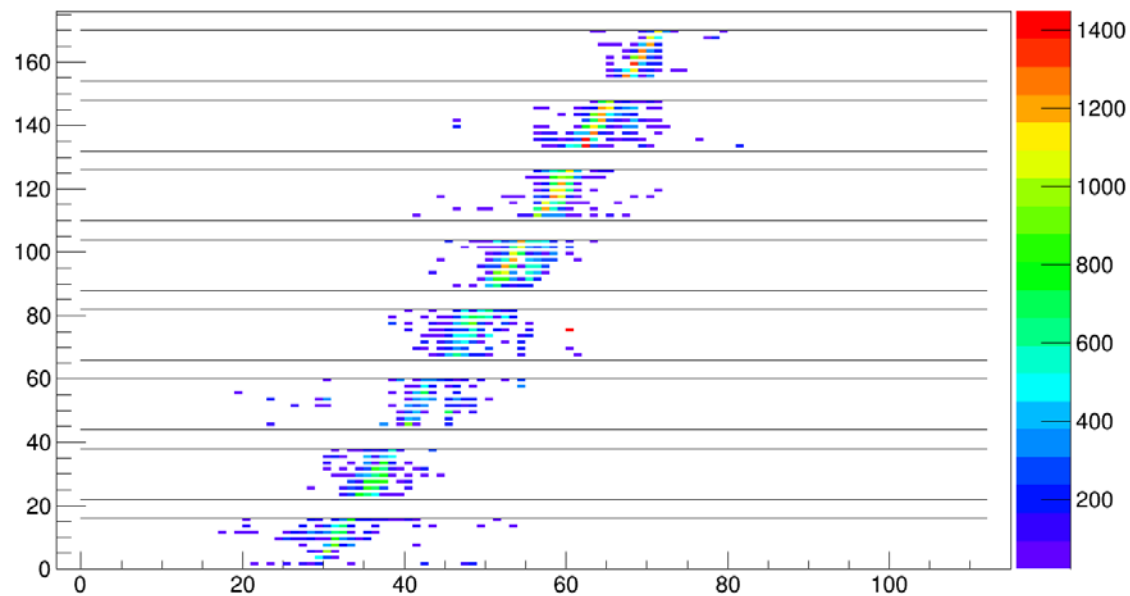


# GAMMAS

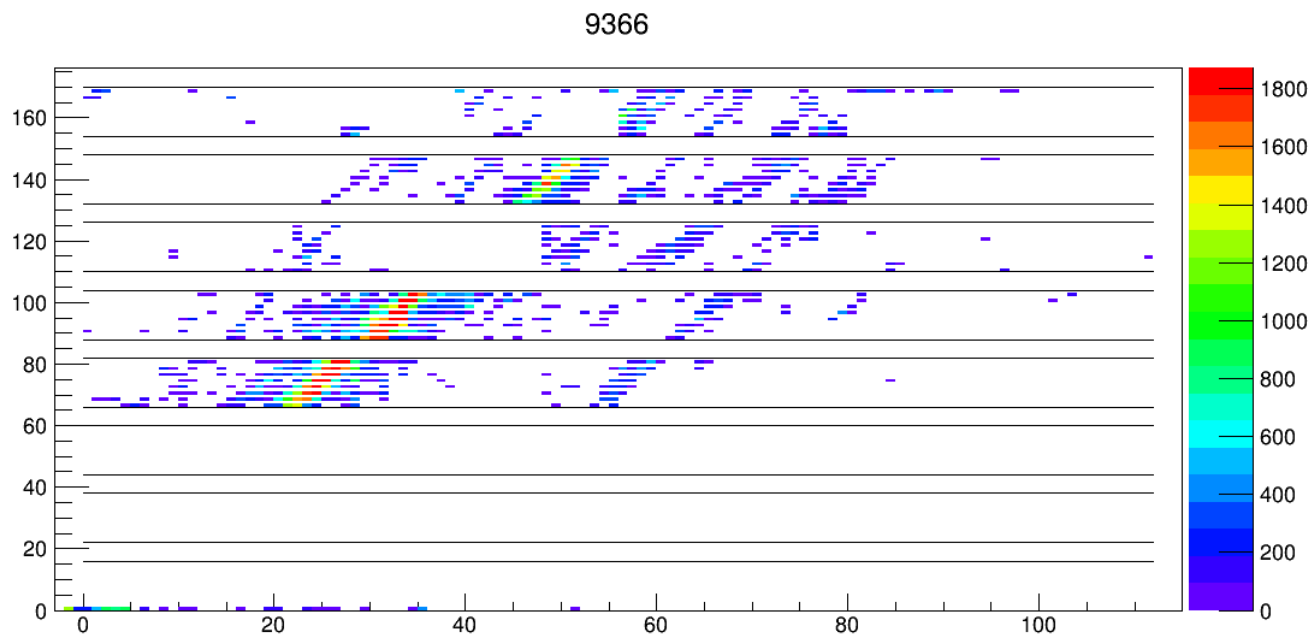
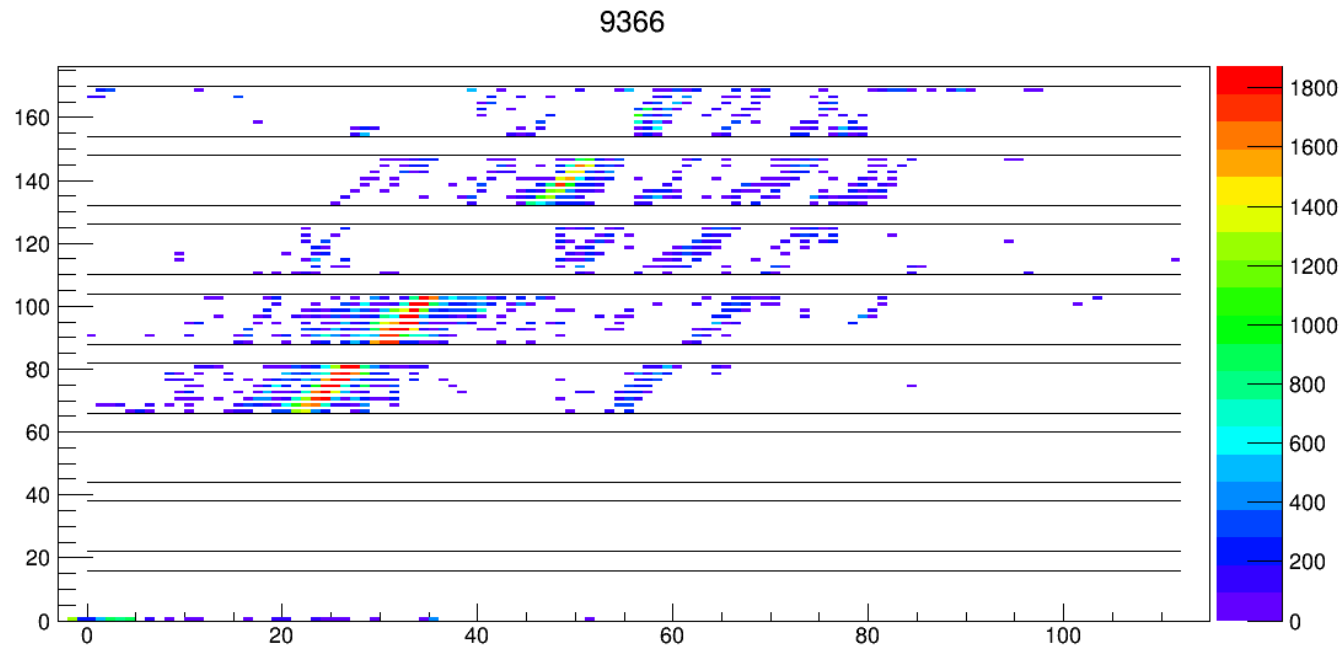
gamma 9737.8MeV



gamma 9737.8MeV



**EVENTO  
MULTIPLE**



**El SciCRT tiene actualmente dos modos de operación:**

- Neutrones (solares)**
- Telescopio de muones**

- Actualmente se desarrollan métodos de análisis para diferenciación de señales de partículas  $\mu/e$ , Neutras/p, n/ $\gamma$ .
- Diferenciar rayos  $\gamma$  de cascadas de hadrones producidas dentro del detector.

**MUCHAS GRACIAS  
POR SU  
ATENCIÓN!!!**

