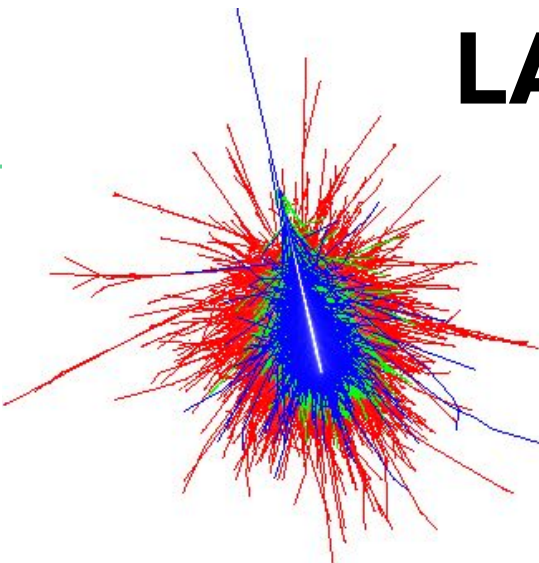




# SIMULACIÓN DEL FLUJO DE NEUTRONES SOLARES EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE



Fernando Monterde Andrade<sup>1</sup>, Luis Xavier González Méndez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias de la Tierra (Maestría), Instituto de Geofísica (IGEF), UNAM / fernandomonterde@ciencias.unam.mx

<sup>2</sup>IGEF / LANCE / SciESMEX / xavier@igeofisica.unam.mx

# Objetivo

Estudiar el paso de los neutrones producidos en eventos solares a través de la atmósfera terrestre, sobre la región de Sierra Negra, Puebla, donde se ubica el Telescopio de Neutrones Solares (TNS-SN).

# Contenido

- ★ Neutrones solares ( $n_s$ )
- ★ Cascada de partículas
- ★ Simulación de  $n_s$
- ★ Resultados preliminares

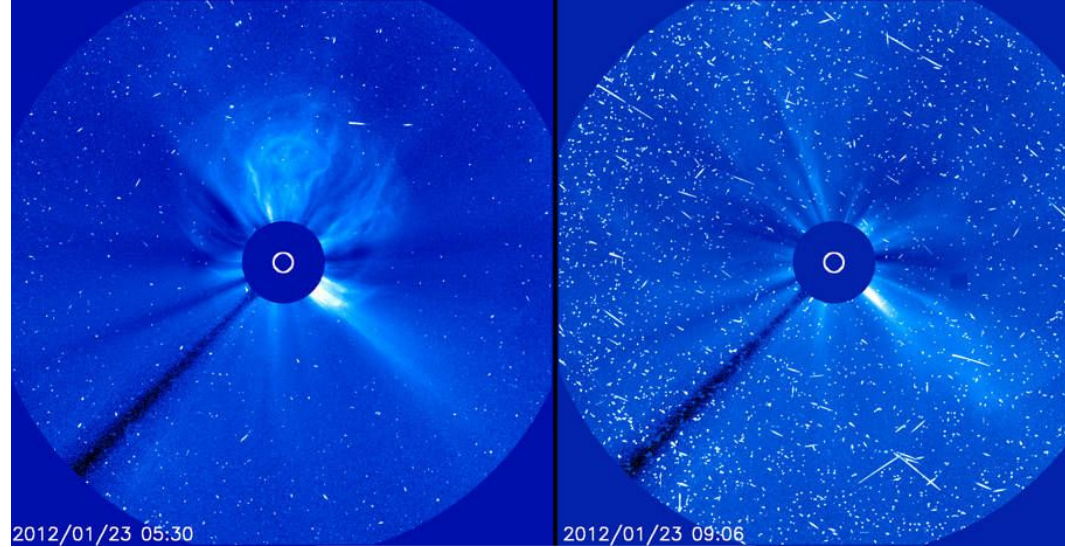
# Neutrones solares ( $n_s$ )

## → Producción:

- ◆ Reacciones nucleares (interior solar).
- ◆ Fulguraciones (*SEP's*).

## → Transporte en medio interplanetario:

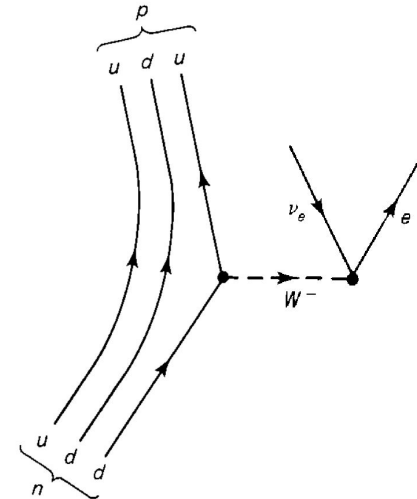
- ◆ Sin afectación por campos magnéticos (**B**).
- ◆ Logran alcanzar 1 UA .
- ◆ Relativistas.



2012/01/23 05:30

2012/01/23 09:06

ESA/NASA SOHO M8.7

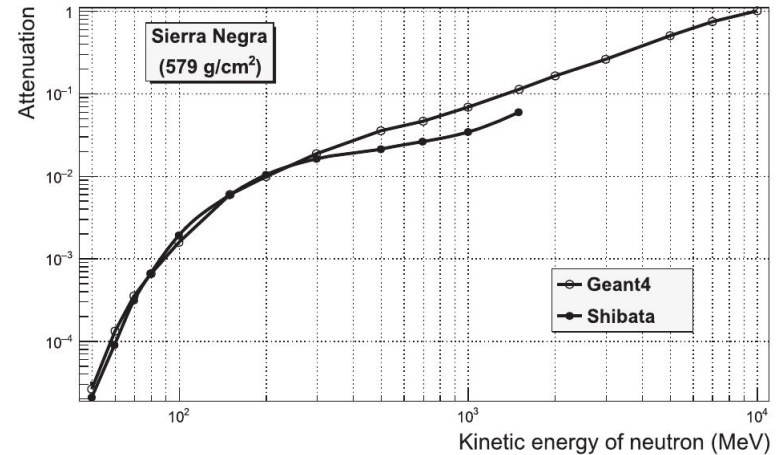
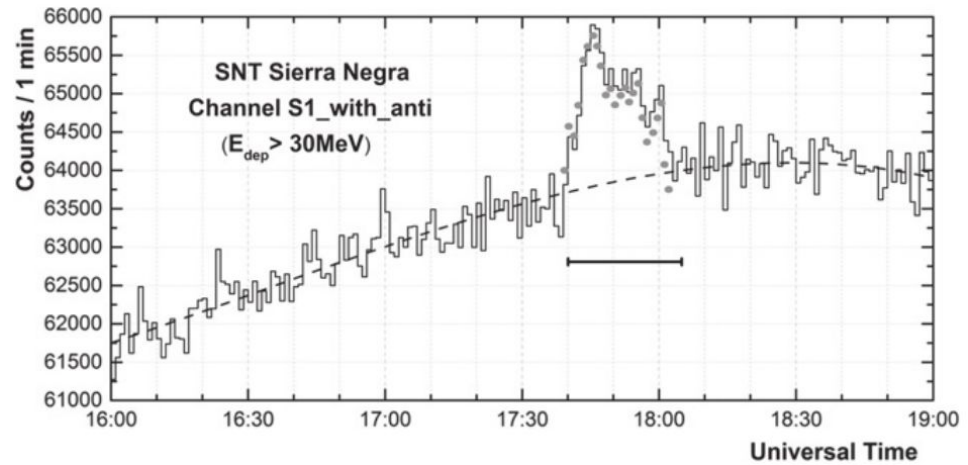


# Neutrones solares ( $n_s$ )

→ Detección a nivel de tierra:

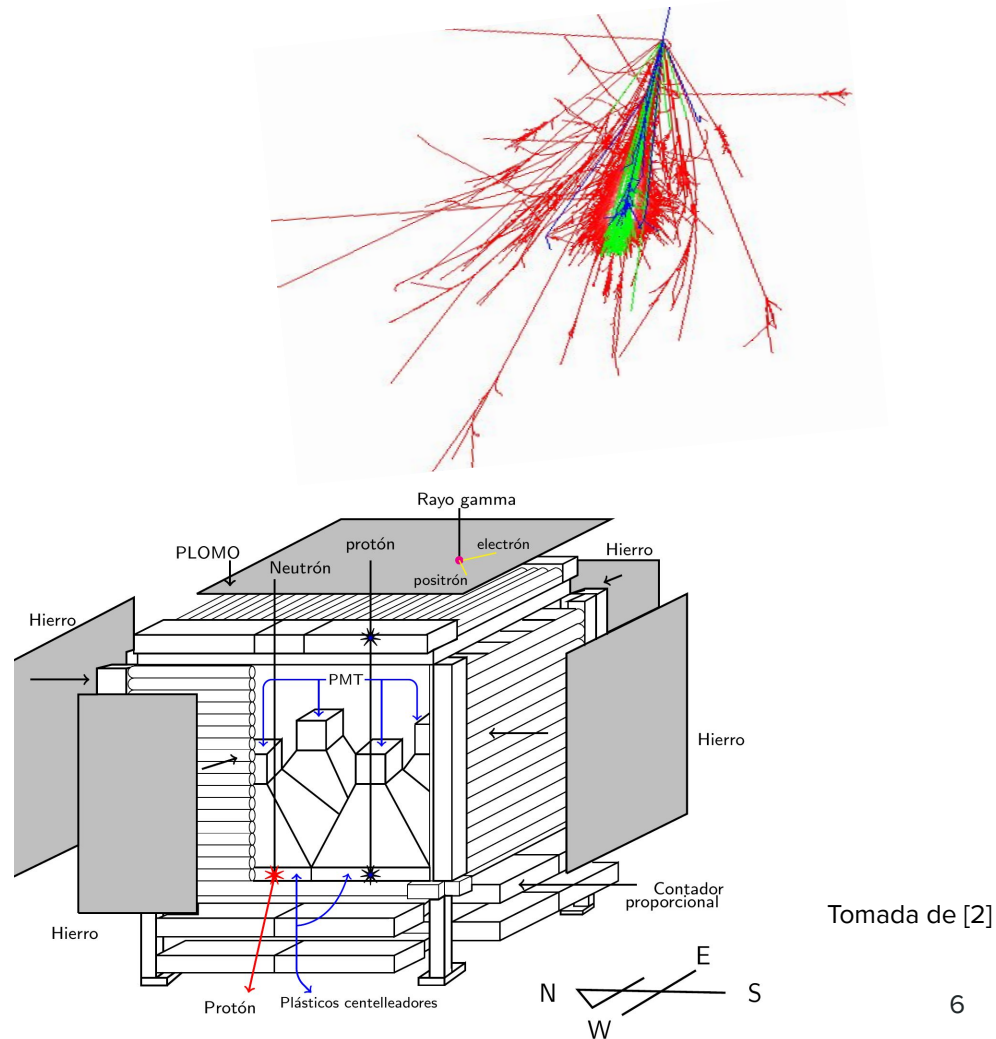
- ◆ Atenuación atmosférica (57.5%)
- ◆ Cascada de partículas.

Tomadas de [1]



# Cascada de partículas

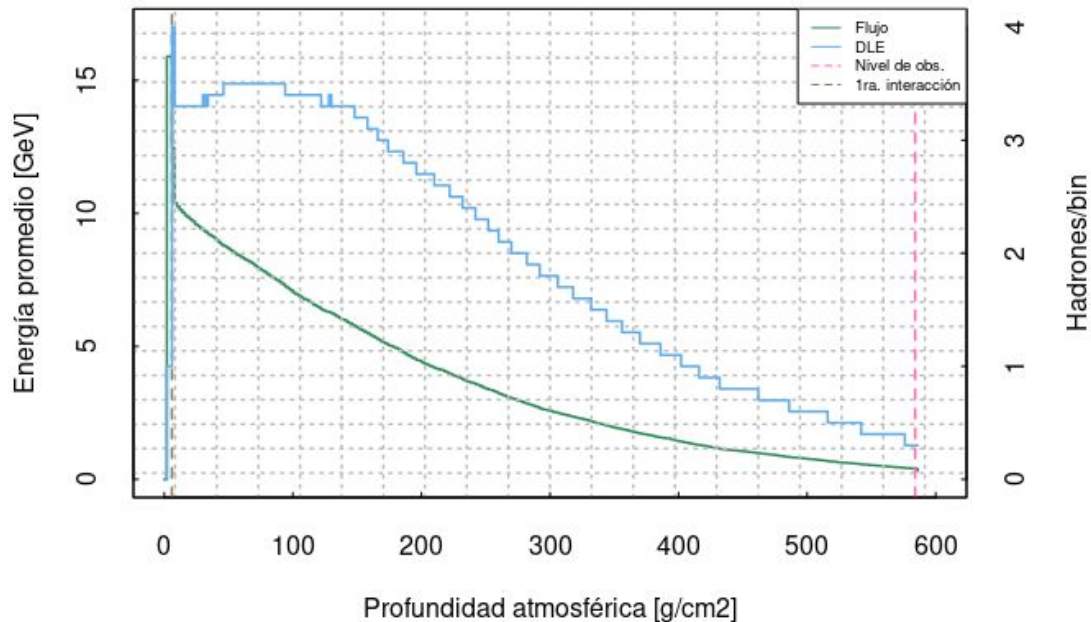
- Cadena de colisiones inelásticas de RC con atmósfera.
- Tres componentes:
  - ◆ Electromagnética
  - ◆ Muónica
  - ◆ Hadrónica
- Pérdida de  $E_n$  únicamente por colisiones.
- Detectores:
  - ◆ Observatorio de Rayos Cósmicos de la CDMX
  - ◆ TNS-SN
- Simulación:
  - ◆ CORSIKA, QGSJET, FLUKA.



# Resultados

AVERAGE NUMBER OF PARTICLES PER EVENT :		
FROM LEVEL NUMBER 1		
HEIGHT IN CM	4.580E+05	
HEIGHT IN G/CM**2	5.847E+02	
NO OF PROTONS =	0.1 +-	0.3
NO OF ANTIPROTONS =	0.0 +-	0.0
<b>NO OF NEUTRONS =</b>	<b>0.3 +-</b>	<b>0.6</b>
NO OF ANTINEUTRONS =	0.0 +-	0.0
NO OF GAMMAS =	1.168000E+00 +-	3.719087E+00
NO OF POSITRONS =	5.200000E-02 +-	2.671467E-01
NO OF ELECTRONS =	1.020000E-01 +-	4.835595E-01
NO OF MU + =	0.1 +-	0.2
NO OF MU - =	0.1 +-	0.3
NO OF PI 0 =	0.0 +-	0.0
NO OF PI + =	0.0 +-	0.0
NO OF PI - =	0.0 +-	0.0
NO OF K0L =	0.0 +-	0.0
NO OF K0S =	0.0 +-	0.0
NO OF K + =	0.0 +-	0.0
NO OF K - =	0.0 +-	0.0
NO OF STR. BARYONS =	0.0 +-	0.0
NO OF DEUTERONS =	0.0 +-	0.0
NO OF TRITONS =	0.0 +-	0.0
NO OF 3HELIUM =	0.0 +-	0.0
NO OF ALPHAS =	0.0 +-	0.0
NO OF OTHER PART. =	0.0 +-	0.0

Sim. 15°/100 ns/100 MeV-20 GeV



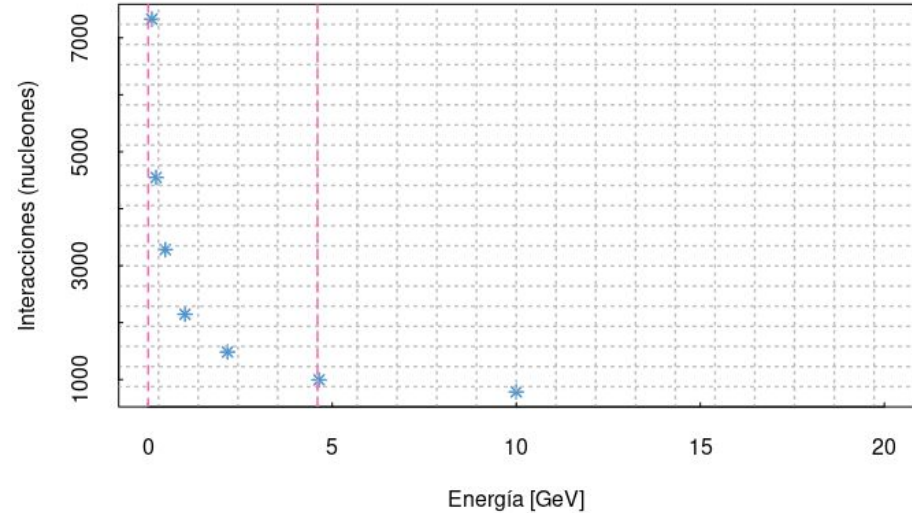
- En la cima de SN:  $\sim 0.45$  neutrones.
- ¿Origen solar o producto de la cascada?
- Sólo se producen nucleones en la componente hadrónica.

# Resultados

Sim. 15°/100 ns/100 MeV-20 GeV

INTERACTIONS PER KINETIC ENERGY INTERVAL FOR ALL SH

BIN	LOWER LIMIT IN GEV	UPPER LIMIT IN GEV	NUCLEON EVENTS
1	0.0000E+00	1.0000E-01	7327.
2	1.0000E-01	2.1544E-01	4548.
3	2.1544E-01	4.6416E-01	3282.
4	4.6416E-01	1.0000E+00	2147.
5	1.0000E+00	2.1544E+00	1484.
6	2.1544E+00	4.6416E+00	995.
7	4.6416E+00	1.0000E+01	784.
8	1.0000E+01	2.1544E+01	1095.
9	2.1544E+01	4.6416E+01	0.
10	4.6416E+01	1.0000E+02	0.
11	1.0000E+02	2.1544E+02	0.
12	2.1544E+02	4.6416E+02	0.
13	4.6416E+02	1.0000E+03	0.
14	1.0000E+03	2.1544E+03	0.
15	2.1544E+03	4.6416E+03	0.
16	4.6416E+03	1.0000E+04	0.
17	1.0000E+04	2.1544E+04	0.
18	2.1544E+04	4.6416E+04	0.
19	4.6416E+04	1.0000E+05	0.
20	1.0000E+05	2.1544E+05	0.
21	2.1544E+05	4.6416E+05	0.
22	4.6416E+05	1.0000E+06	0.
23	1.0000E+06	2.1544E+06	0.
24	2.1544E+06	4.6416E+06	0.
25	4.6416E+06	1.0000E+07	0.
26	1.0000E+07	2.1544E+07	0.
27	2.1544E+07	4.6416E+07	0.
28	4.6416E+07	1.0000E+08	0.
29	1.0000E+08	2.1544E+08	0.
30	2.1544E+08	4.6416E+08	0.
31	4.6416E+08	1.0000E+09	0.
32	1.0000E+09	2.1544E+09	0.
33	2.1544E+09	4.6416E+09	0.
34	4.6416E+09	1.0000E+10	0.
35	1.0000E+10	2.1544E+10	0.
36	2.1544E+10	4.6416E+10	0.
37	4.6416E+10	1.0000E+11	0.
38	1.0000E+11	2.1544E+11	0.
39	2.1544E+11	4.6416E+11	0.
40	4.6416E+11	1.0000E+12	0.



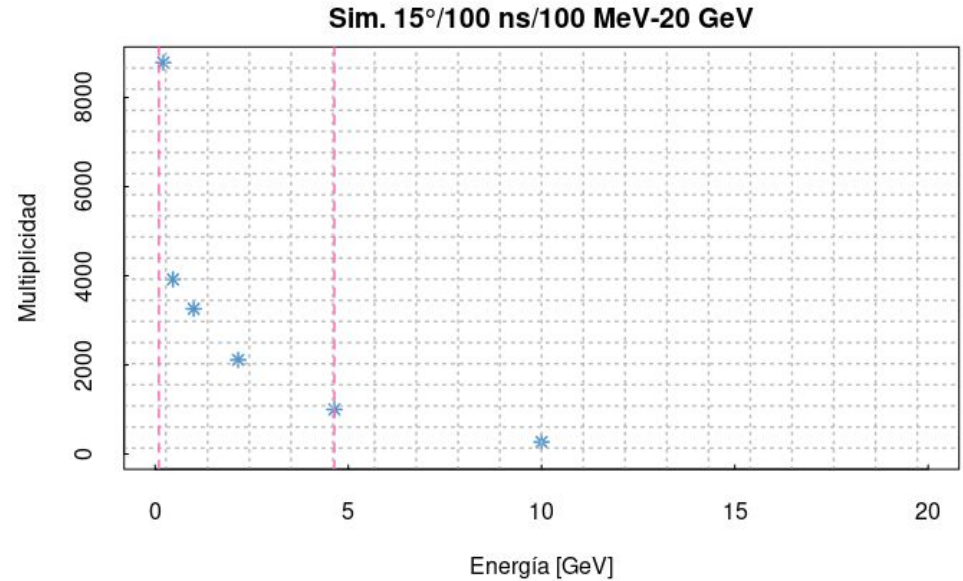
- Para toda la cascada  $\sim 91.32\%$  de los eventos de nucleones ocurren dentro de un intervalo de energía menor a 460 MeV.
- Neutrones de baja energía.
- Partículas secundarias.



# Resultados

ENERGY - MULTIPLICITY MATRIX FOR ALL SHOWERS  
ENERGY RUNS VERTICALLY, MULTIPLICITY HORIZONTALLY

	1	2	3	4	5
1	8782	5109	578	2	0
2	3919	1710	434	12	0
3	3259	1007	628	17	0
4	2115	588	625	62	0
5	1003	294	464	141	1
6	273	126	421	201	0
7	12	78	390	586	41



- ~ 93.64 % de los eventos ocurren en un intervalo de 0.1 - 4.64 GeV.
- Contiene al intervalo de energía en el que ocurre el 91.32 % de los eventos de nucleones.

# Resultados

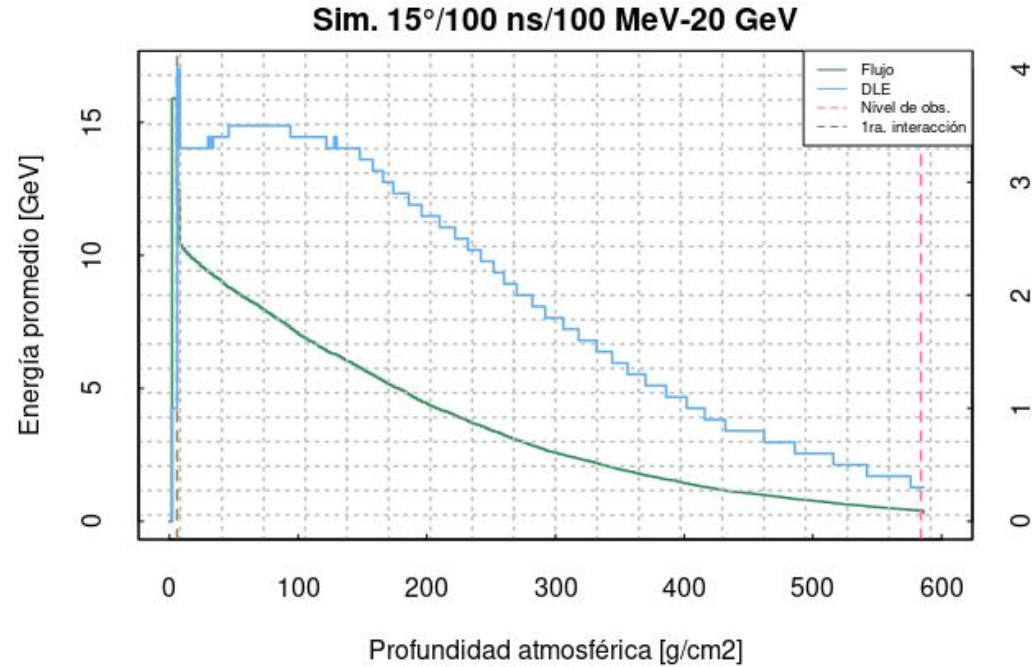
En la cima de SN:

→  $E_{\text{had}} \sim 1 \text{ GeV} > E_{\text{nuc}}$

Además:

- $1 \text{ n} \sim 0.5 \text{ GeV}$   
→ ¡Posible  $n_s$ !

Consistencia entre porcentaje de atenuación (57.5 %) y flujo de neutrones en nivel de observación (45%)



# Conclusiones

- Las simulaciones presentadas son acordes con las observaciones realizadas por detectores a nivel de tierra.
- El flujo de  $n_s$  obtenido para las coordenadas geográficas y magnéticas del TNS-SN es consistente con el valor de atenuación esperado para los intervalos de energía considerados.
- Un  $n_s$  con  $E_n \sim 100 \text{ MeV} - 20 \text{ GeV}$  que ingresa a la Tierra puede alcanzar la altura del TNS-SN.
- Es posible obtener un espectro preliminar de los  $n_s$  a partir de los datos y de las simulaciones presentadas.

# Espectro preliminar

$$C \times (E_n/100 \text{ [MeV]})^\alpha$$

(Watanabe, 2003)



$$5.99 \times 10^9 \text{ [GeV}^{-1}\text{sr}^{-1}] (E_n/10^3 \text{ [GeV]})^3$$

**¡GRACIAS!**

# Referencias

- [1] Dorman, L. (2010). *Solar Neutrons and Related Phenomena* (Vol. 365). Springer Science & Business Media.
- [2] González, L. X., Valdés-Galicia, J. F., Sánchez, F., Muraki, Y., Sako, T., Watanabe, K., ... & Musalem, O. (2015). Re-evaluation of the Neutron Emission from the Solar Flare of 2005 September 7, Detected by the Solar Neutron Telescope at Sierra Negra. *The Astrophysical Journal*, 814(2), 136.
- [3] González Méndez, Luis Xavier. El telescopio de neutrones solares en Sierra Negra y aceleración de iones en la atmósfera solar (Tesis Doctoral) / 2010.
- [4] López, D., & Matsubara, Y. (2015). Search for solar neutrons at Mount Chacaltaya associated with M-and X-class flares during the rising period of solar cycle 24. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 54.
- [5] Muraki, Y., Lopez, D., Koga, K., Kakimoto, F., Goka, T., González, L. X., ... & Okudaira, O. (2016). Simultaneous Observation of Solar Neutrons from the International Space Station and High Mountain Observatories in Association with a Flare on July 8, 2014. *Solar Physics*, 291(4), 1241-1265.
- [6] Shibata, S. (1994). Propagation of solar neutrons through the atmosphere of the Earth. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4), 6651-6665.
- [7] Valdés-Galicia, J. F., Muraki, Y., Tsujihara, H., Sako, T., Musalem, O., Hurtado, A., ... & Tateiwa, N. (2004). An improved solar neutron telescope installed at a very high altitude in Mexico. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 535(3), 656-664.
- [8] Yu, X. X., Lu, H., Chen, G. T., Li, X. Q., Shi, J. K., & Tan, C. M. (2015). Detection of solar neutron events and their theoretical approach. *New Astronomy*, 39, 25-35.