

# **La atmósfera como laboratorio de Física de Altas Energías**



**Hermes León Vargas  
IF-UNAM**

**Seminario conjunto de Altas Energías  
ICN-UNAM & IF-UNAM  
ICN, 20 de marzo de 2024**

# Explosión del Krakatoa en 1883



Parker & Coward. Litografía de 1888. Wikimedia Commons.

Localizado en el estrecho marino que separa las islas de Java y Sumatra.

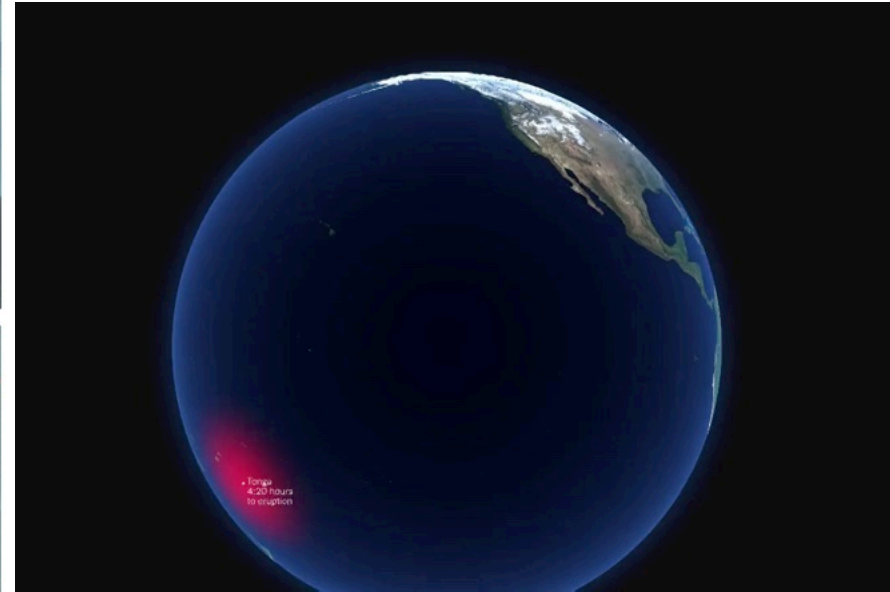
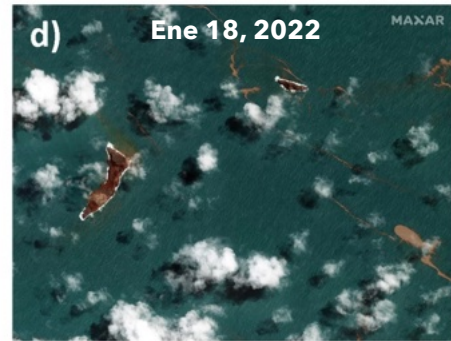
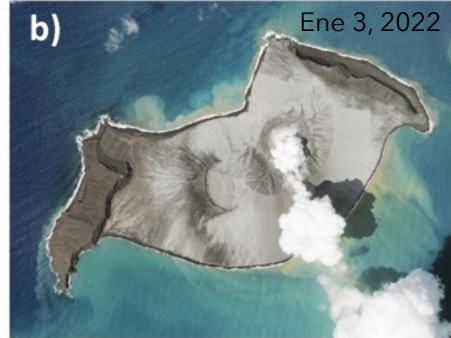
La explosión en Agosto de 1883 es uno de los eventos volcánicos más violentos de la historia.

Se calcula como equivalente a 200 megatoneladas de TNT (4 veces más que la bomba Tsar).

Se registraron 7 vueltas de la onda de choque alrededor de la Tierra.

En 1890 Lord Rayleigh estudió la propagación de ondas en una atmósfera isoterma. En 1911 H. Lamb extendió la teoría para incluir variaciones en la temperatura.

# Explosión en Hunga Tonga-Hunga Ha'pai

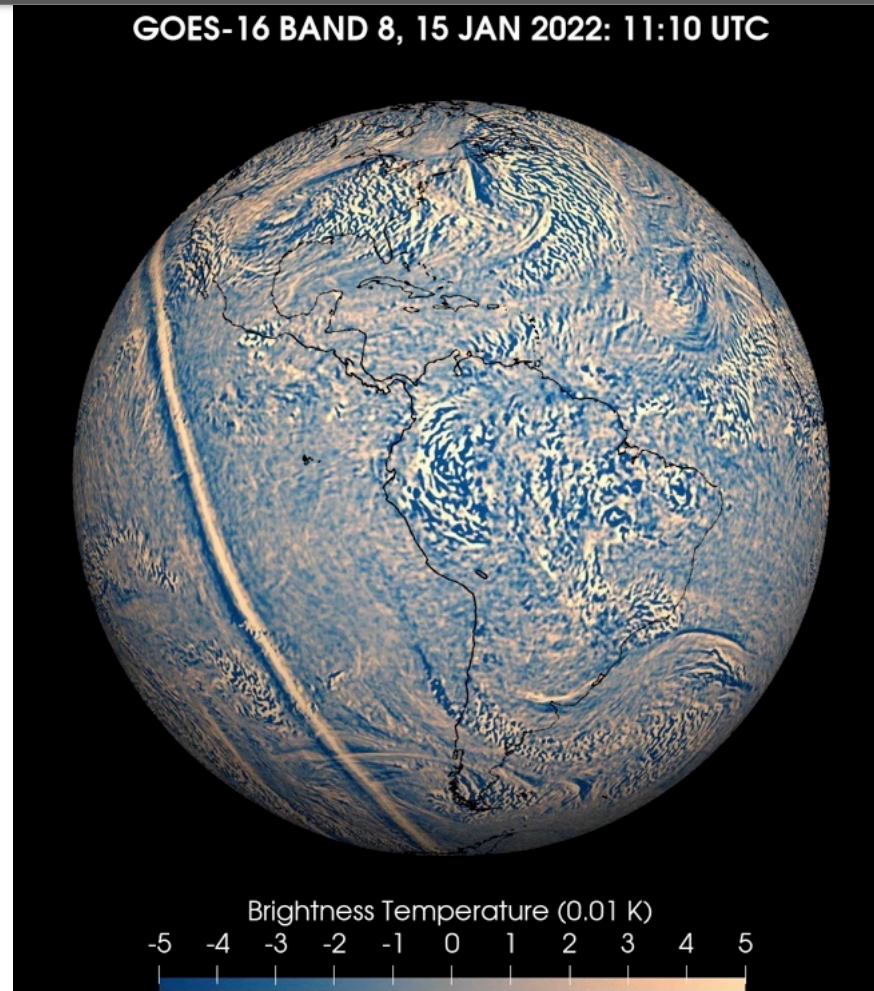


Planet Labs PBC, Maxar Technologies, Brumfiel (NPR)

New York Times, 2022  
A. Amores et al. Geophysical Research Letters 49 (2022) 6

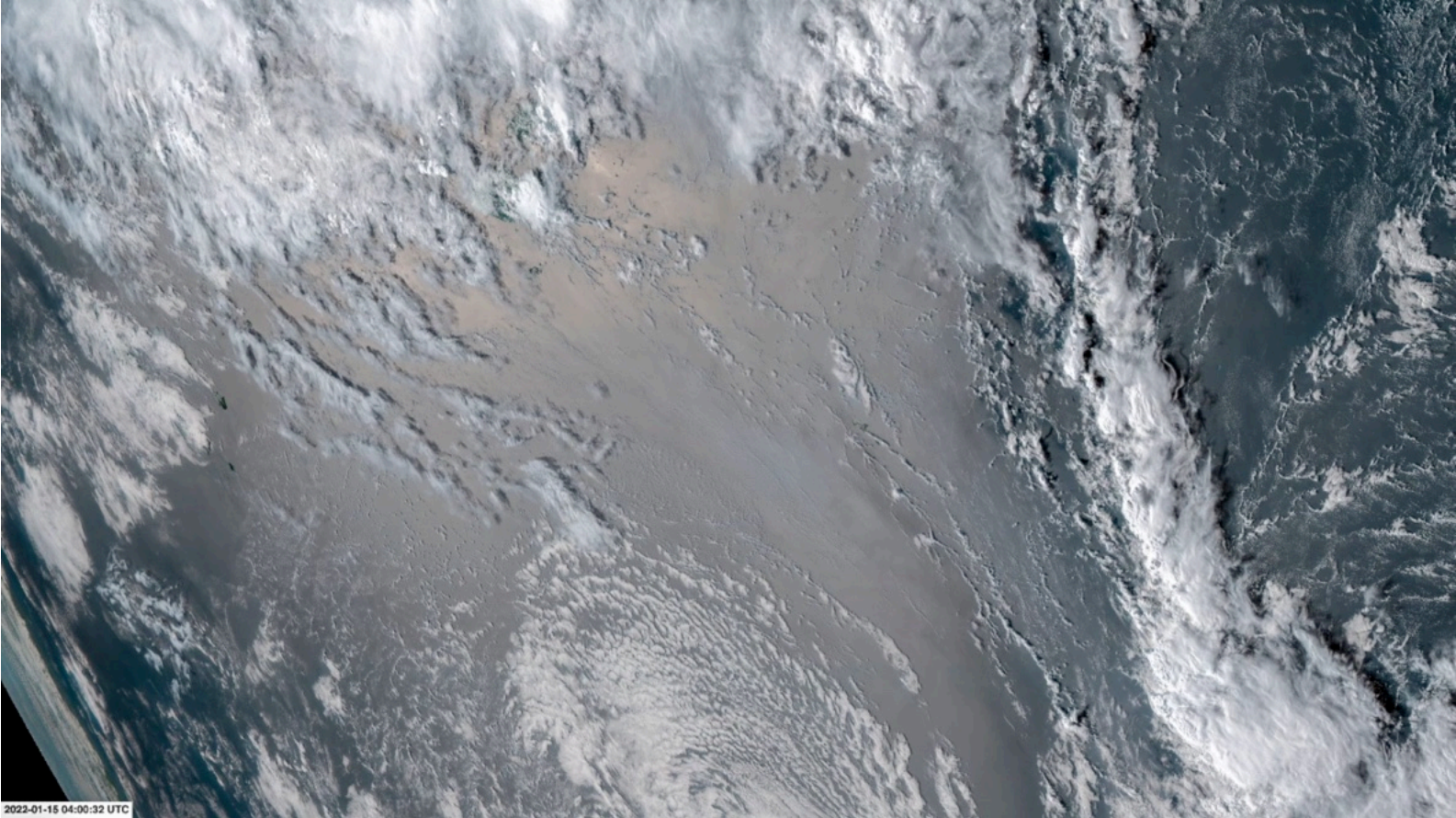
En el caso de Hunga se estima que la energía liberada es  $\sim 10$  veces menor que Krakatoa, pero aún así cientos de veces mayor que en Hiroshima.

# Explosión en Hunga Tonga-Hunga Ha'pai



Infrarrojo

# Explosión en Hunga Tonga-Hunga Ha'pai



Adiv González

# No sólo una onda de choque



30 de diciembre, 2021  
Tonga Geological Services

# No sólo una onda de choque

Ocurre algo distinto en explosiones mayores ¿lo pueden ver?

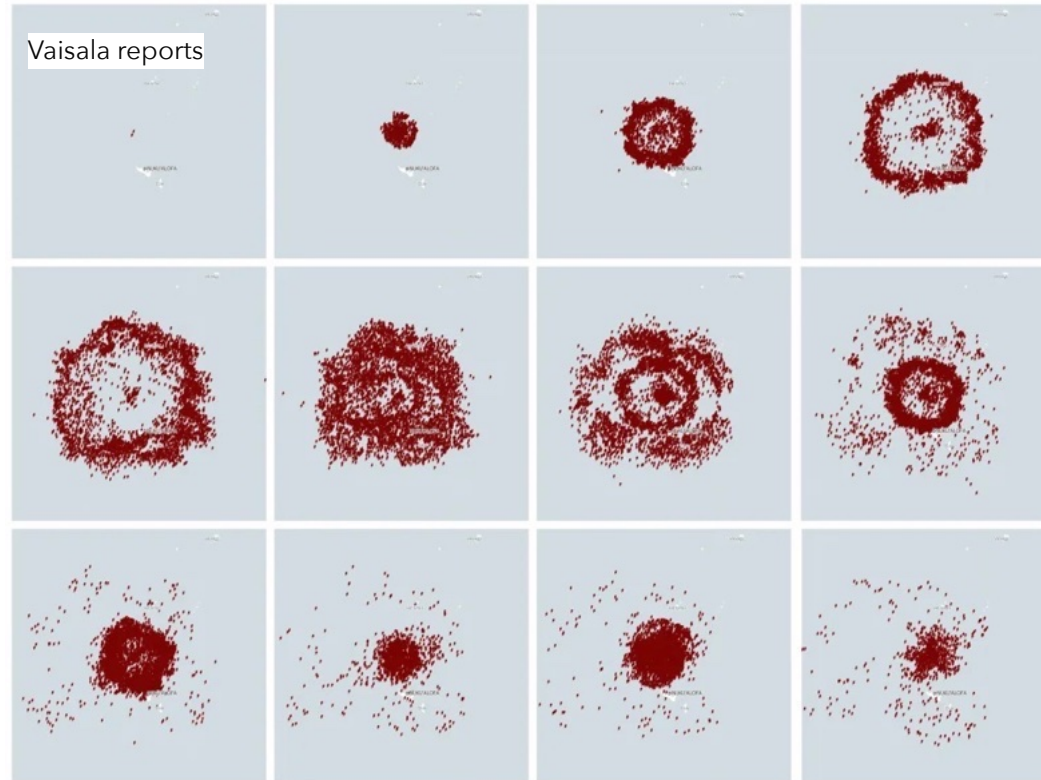
- Fricción entre la materia que está siendo expulsada
- En el momento de mayor intensidad de la explosión principal el volcán expulsaba tanta materia como la de 15 edificios Empire State ¡cada segundo!



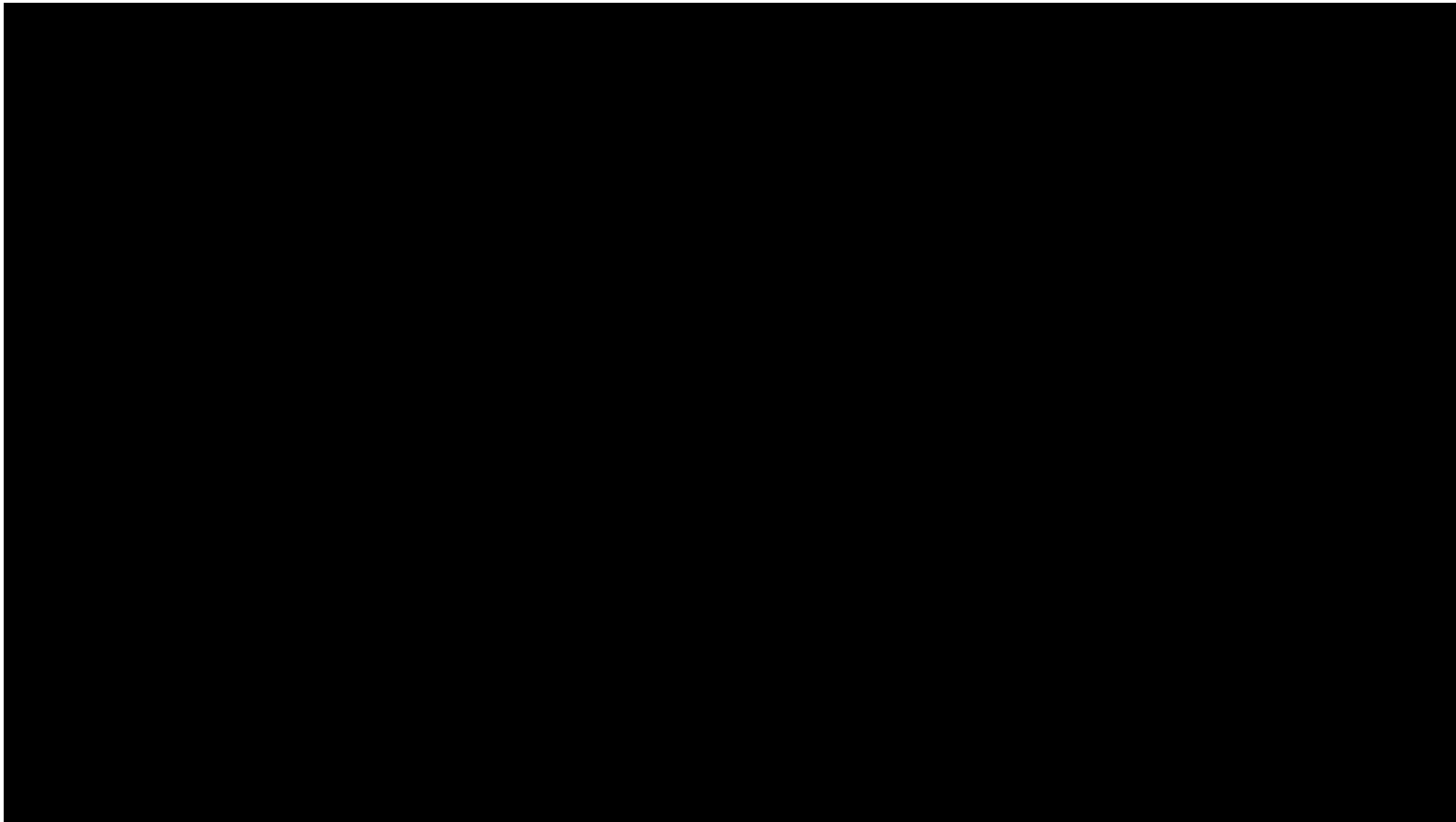
Explosión intermedia  
14 de enero, 2022  
Tonga Geological Services

# No sólo una onda de choque

- En 5 minutos: ~ 25 500 rayos
- 6 horas: ~ 400 000 rayos
- ➔ ¡~1/2 de los rayos en todo el mundo!







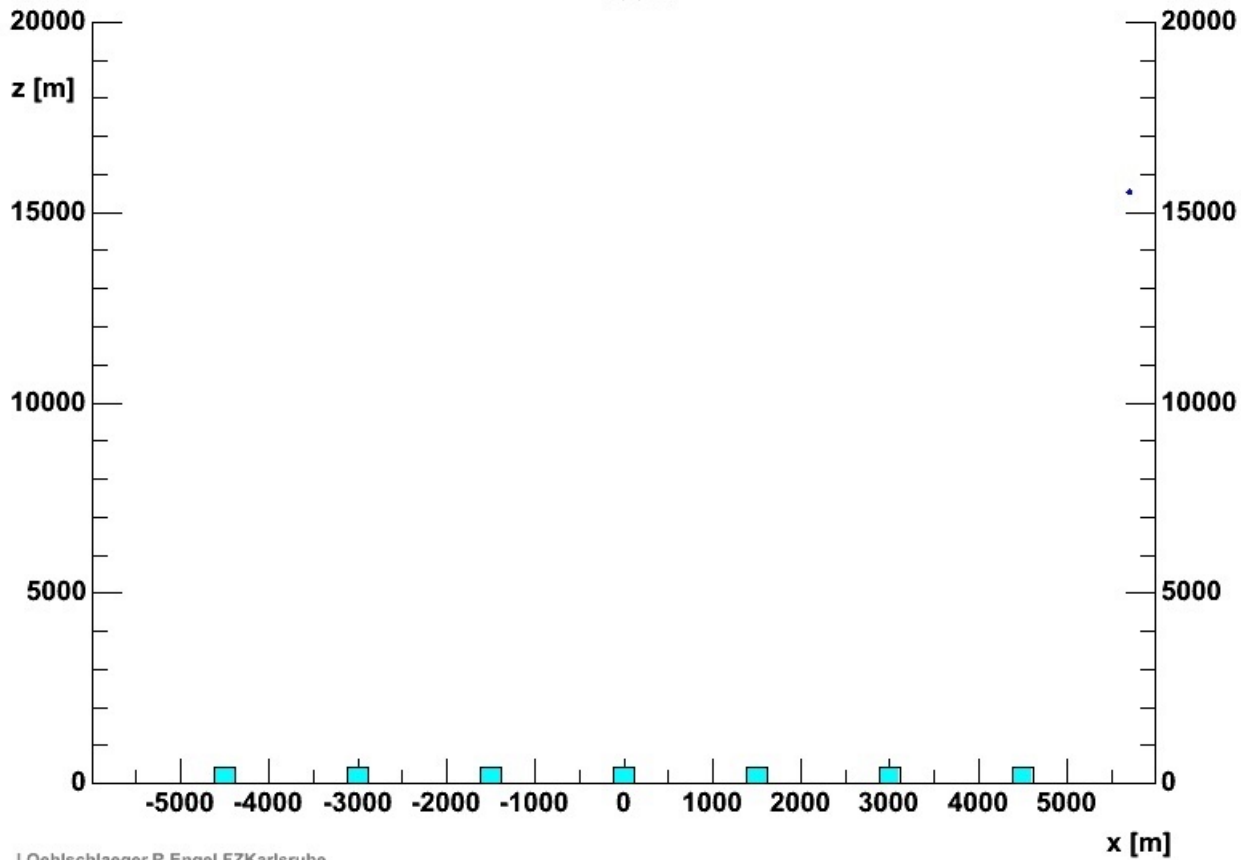
**H**igh **A**ltitude **W**ater **C**herenkov observatory  
Observatorio de Cherenkov en Agua a Gran Altura

# Cascadas atmosféricas

hadrons muons electrs neutrs

15514

Proton  $10^{15}$  eV

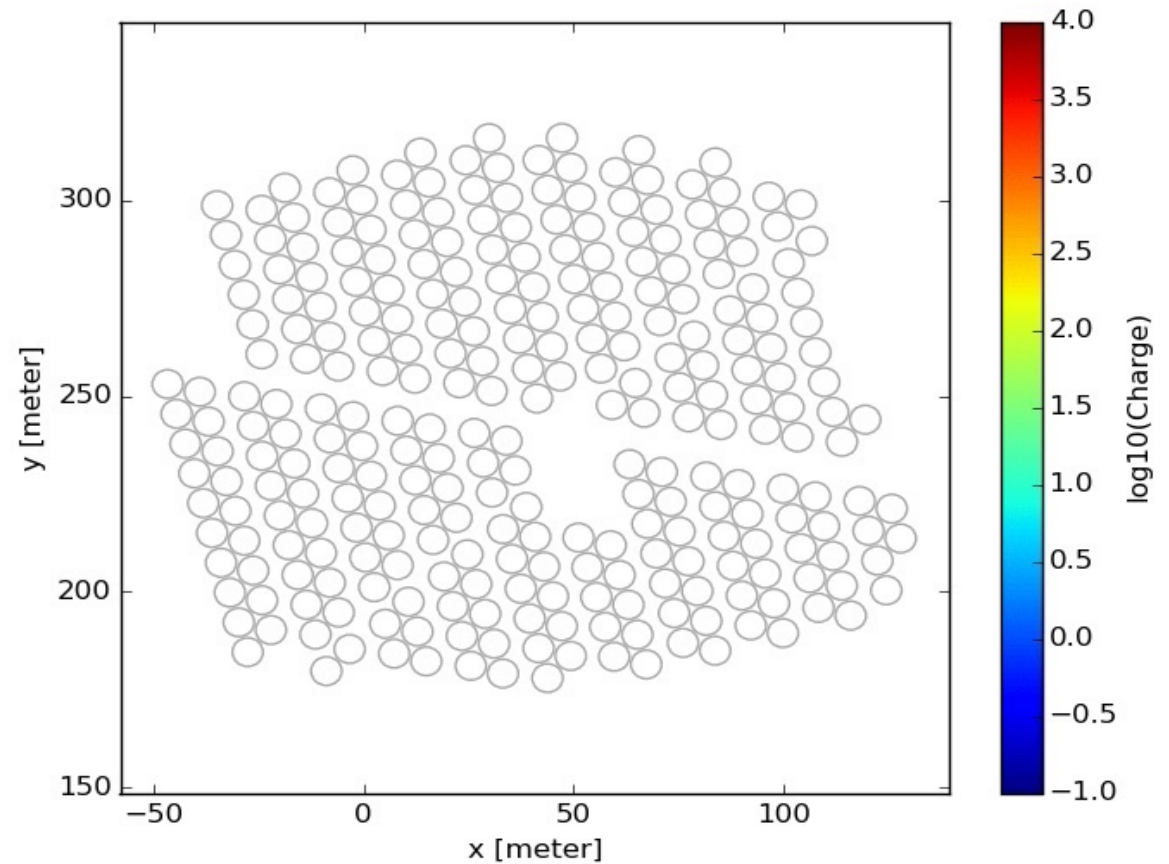


J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

Institute für Kernphysik  
Forschungszentrum Karlsruhe

# Cascada atmosférica real

Esta cascada tarda aproximadamente 100 nano segundos en propagarse a través de los detectores.



# Operación continua



HAWC funciona día y noche, sin importar las condiciones climatológicas, todo el año

# Física de partículas en la atmósfera

Muones y temperatura atmosférica

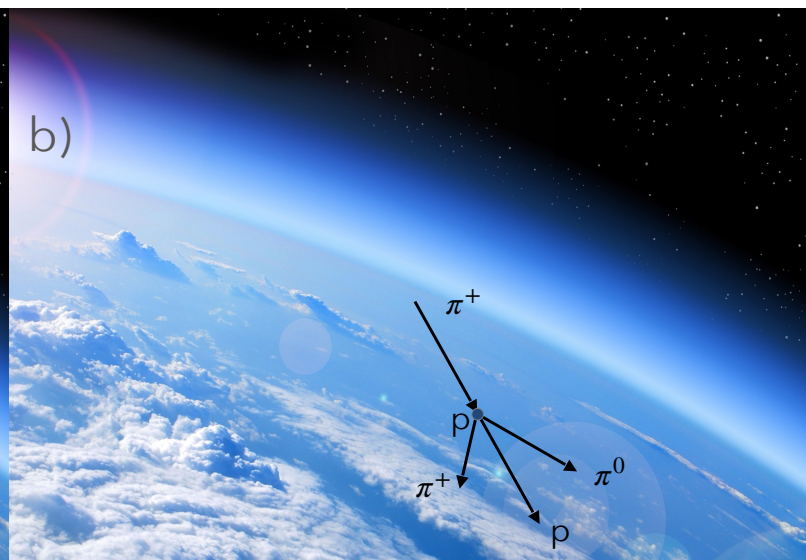
Copernicus Atmosphere Monitoring Service



# Física de partículas en la atmósfera

Muones y temperatura atmosférica

Copernicus Atmosphere Monitoring Service



El pion decae:

- Se produce un muón de alta energía

Más probable con una atmósfera menos densa (temperaturas **mayores** del promedio)

El pion tiene otra interacción:

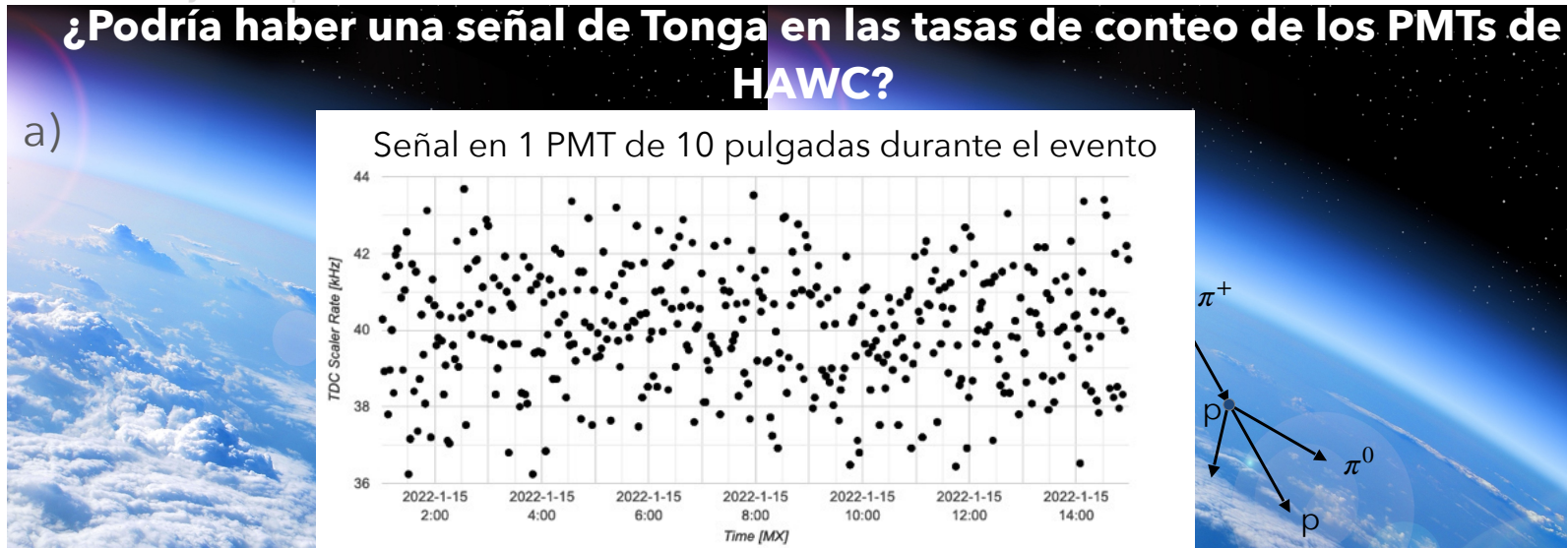
- Se produce mesones adicionales
- Los piones cargados decaerán posteriormente en muones con menos energía que en a)

Más probable en una atmósfera más densa (temperaturas **menores** del promedio)

# Física de partículas en la atmósfera

Muones y temperatura atmosférica

Copernicus Atmosphere Monitoring Service



El pion decae:

- Se produce un muón de alta energía

Más probable con una atmósfera menos densa (temperaturas **mayores** del promedio)

El pion tiene otra interacción:

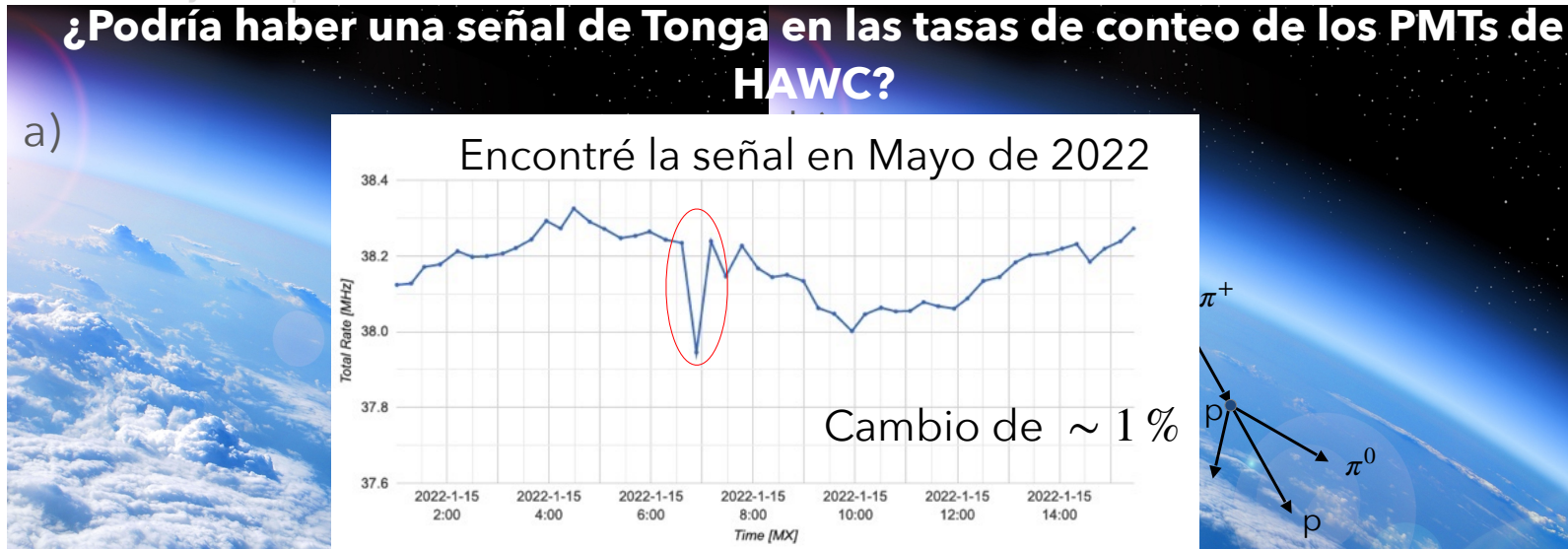
- Se produce mesones adicionales
- Los piones cargados decaerán posteriormente en muones con menos energía que en a)

Más probable en una atmósfera más densa (temperaturas **menores** del promedio)

# Física de partículas en la atmósfera

Muones y temperatura atmosférica

Copernicus Atmosphere Monitoring Service



El pion decae:

- Se produce un muón de alta energía

Más probable con una atmósfera menos densa (temperaturas **mayores** del promedio)

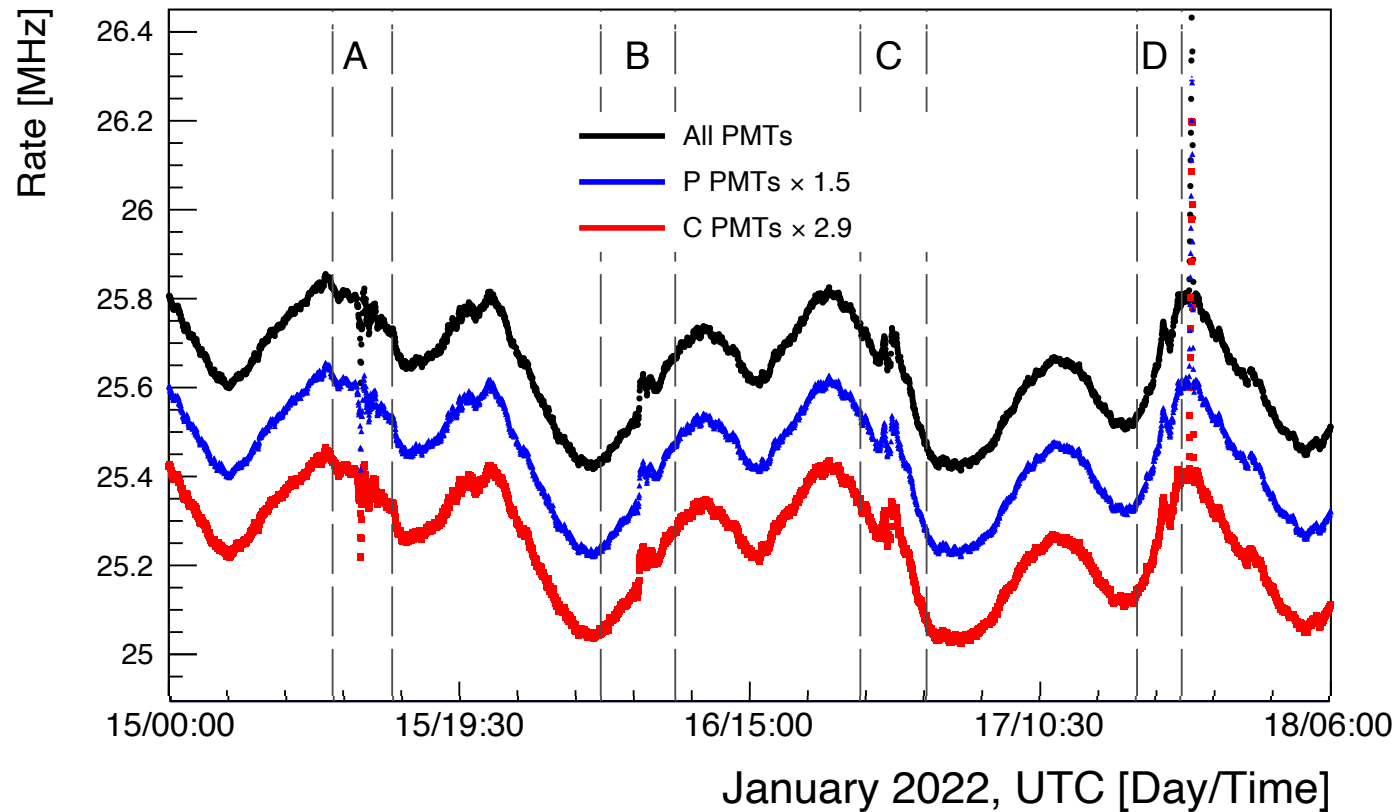
El pion tiene otra interacción:

- Se produce mesones adicionales
- Los piones cargados decaerán posteriormente en muones con menos energía que en a)

Más probable en una atmósfera más densa (temperaturas **menores** del promedio)

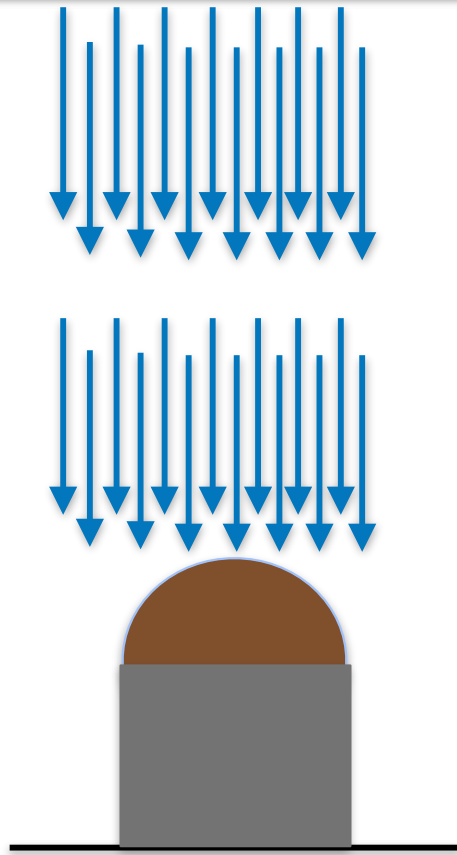


# Detección de la onda de presión usando rayos cósmicos

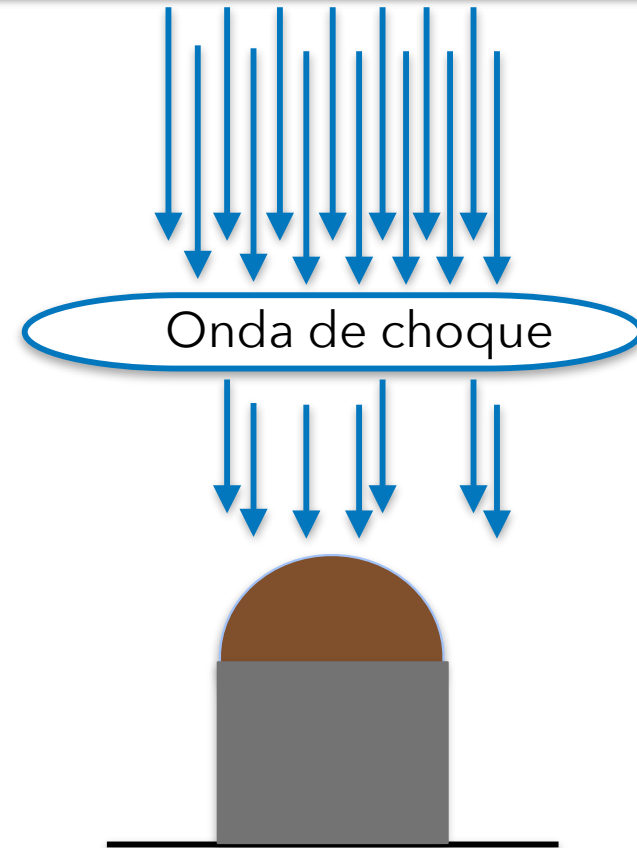


- Tasa de detección de partículas a lo largo de cuatro días
- Modulada por condiciones atmosféricas

# Detección de la onda de presión usando rayos cósmicos

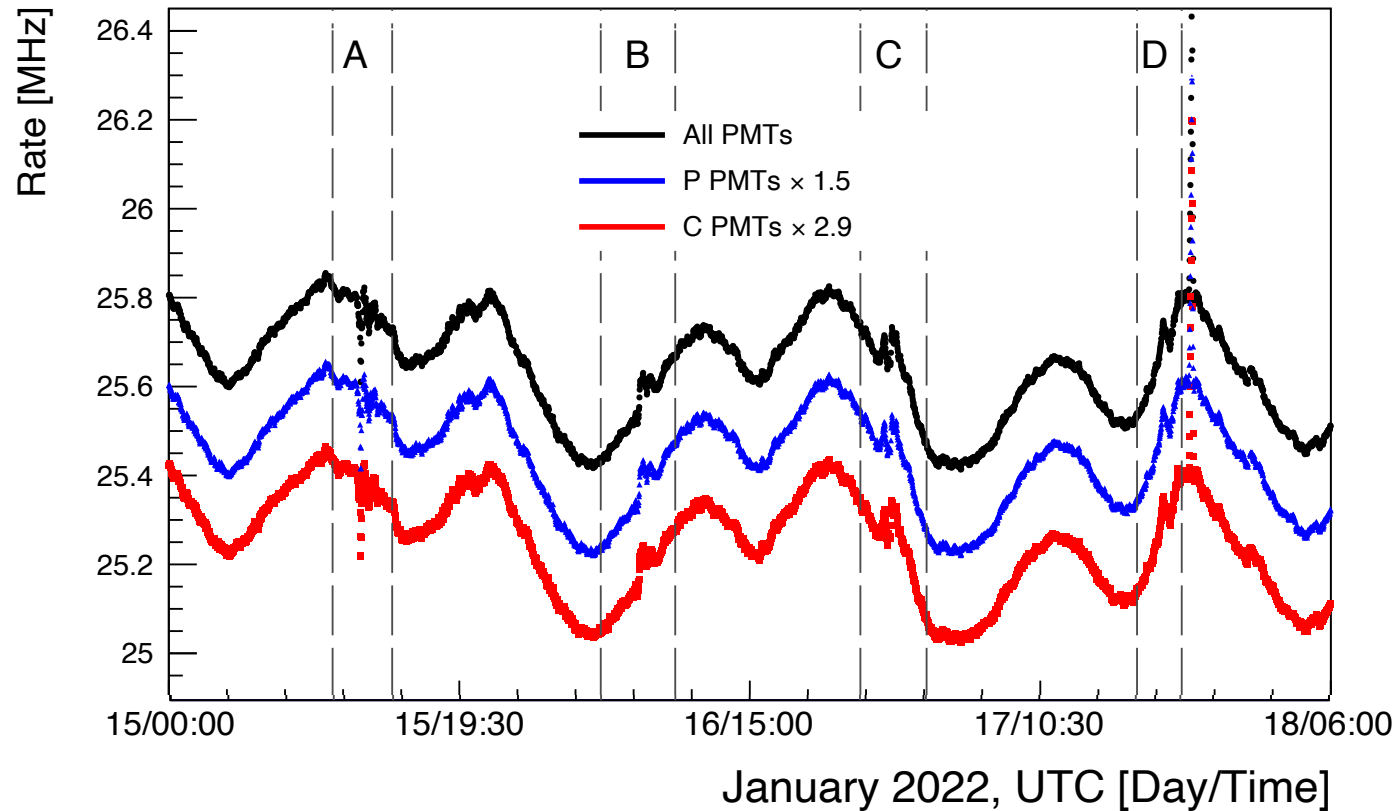


- Condiciones normales de la atmósfera



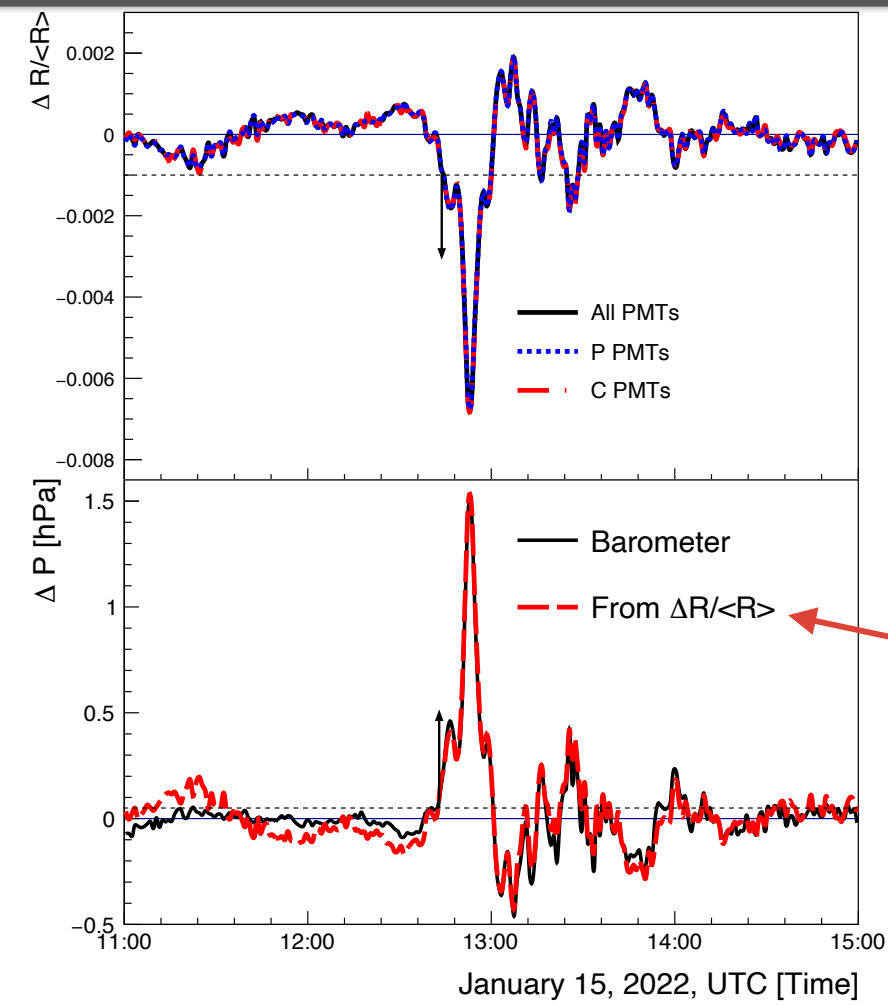
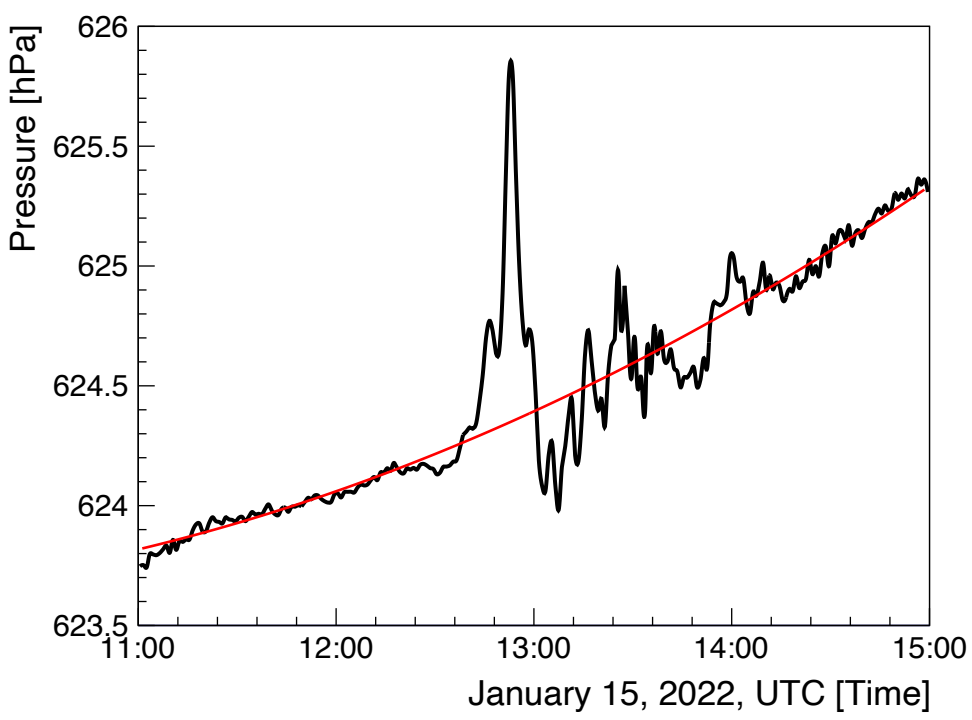
- Condiciones anómalas de la atmósfera
- Aumento de presión → absorción de partículas

# Detección de la onda de presión usando rayos cósmicos



- Tasa de detección de partículas a lo largo de 4 días
- Modulada por condiciones atmosféricas

# Detección de la onda de presión usando rayos cósmicos

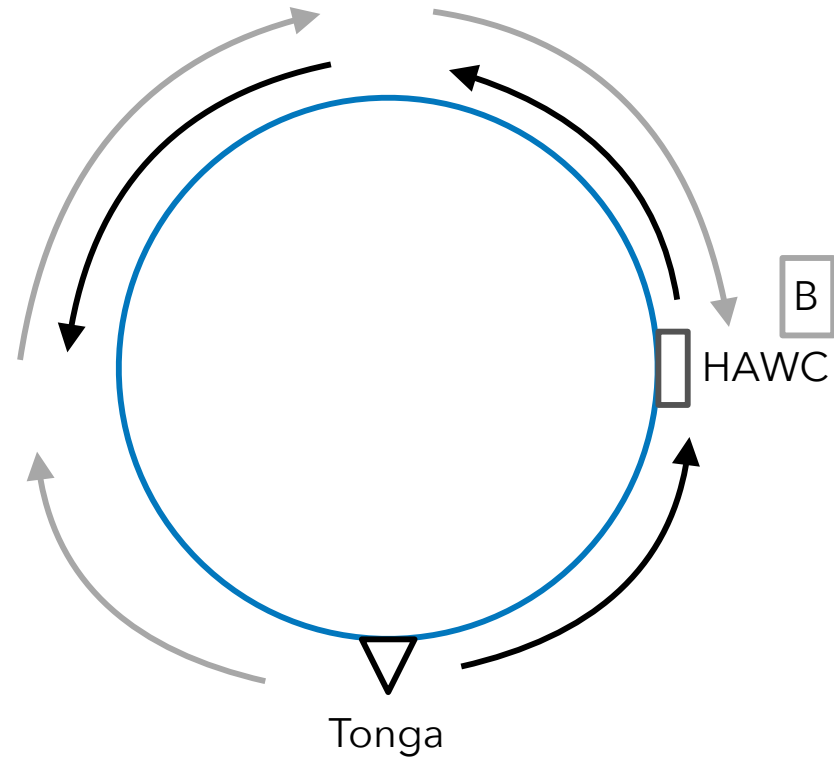
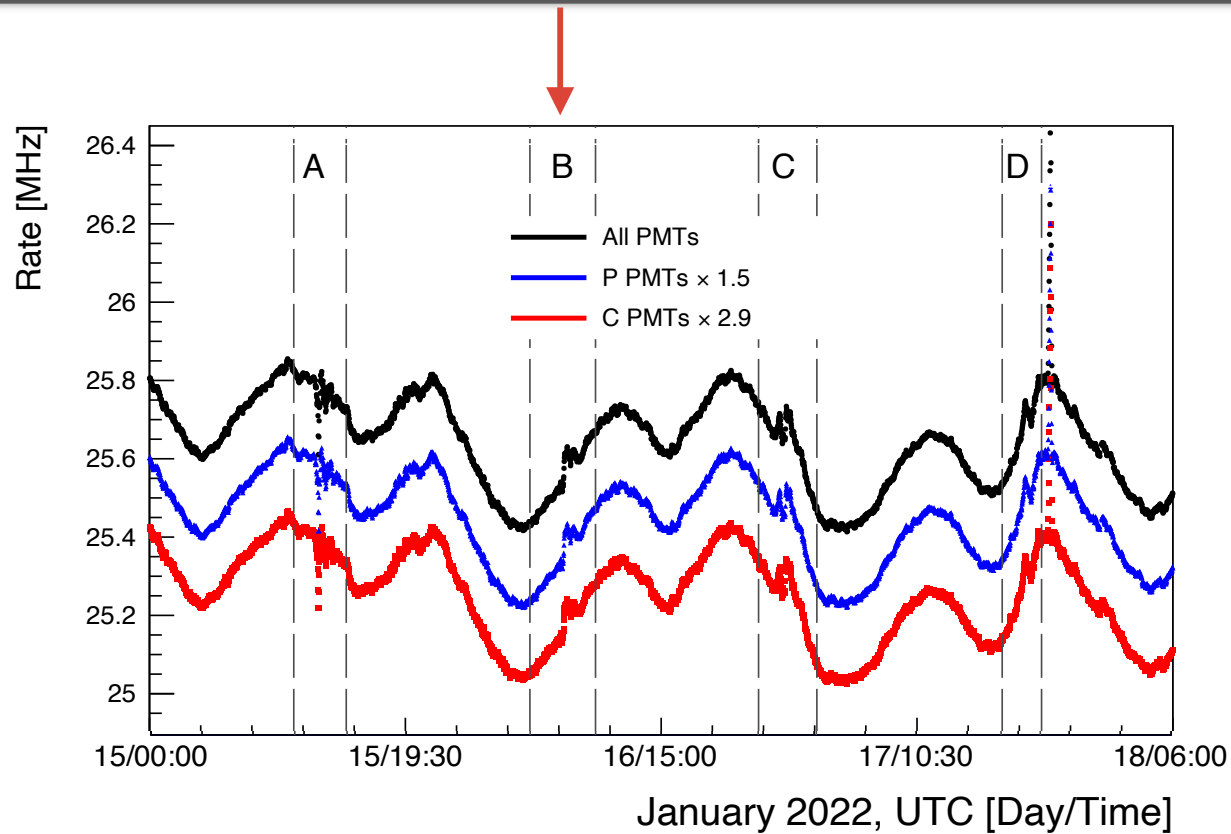


HAWC

Podemos correlacionar la detección de partículas con un sensor de presión y convertir a HAWC en un barómetro

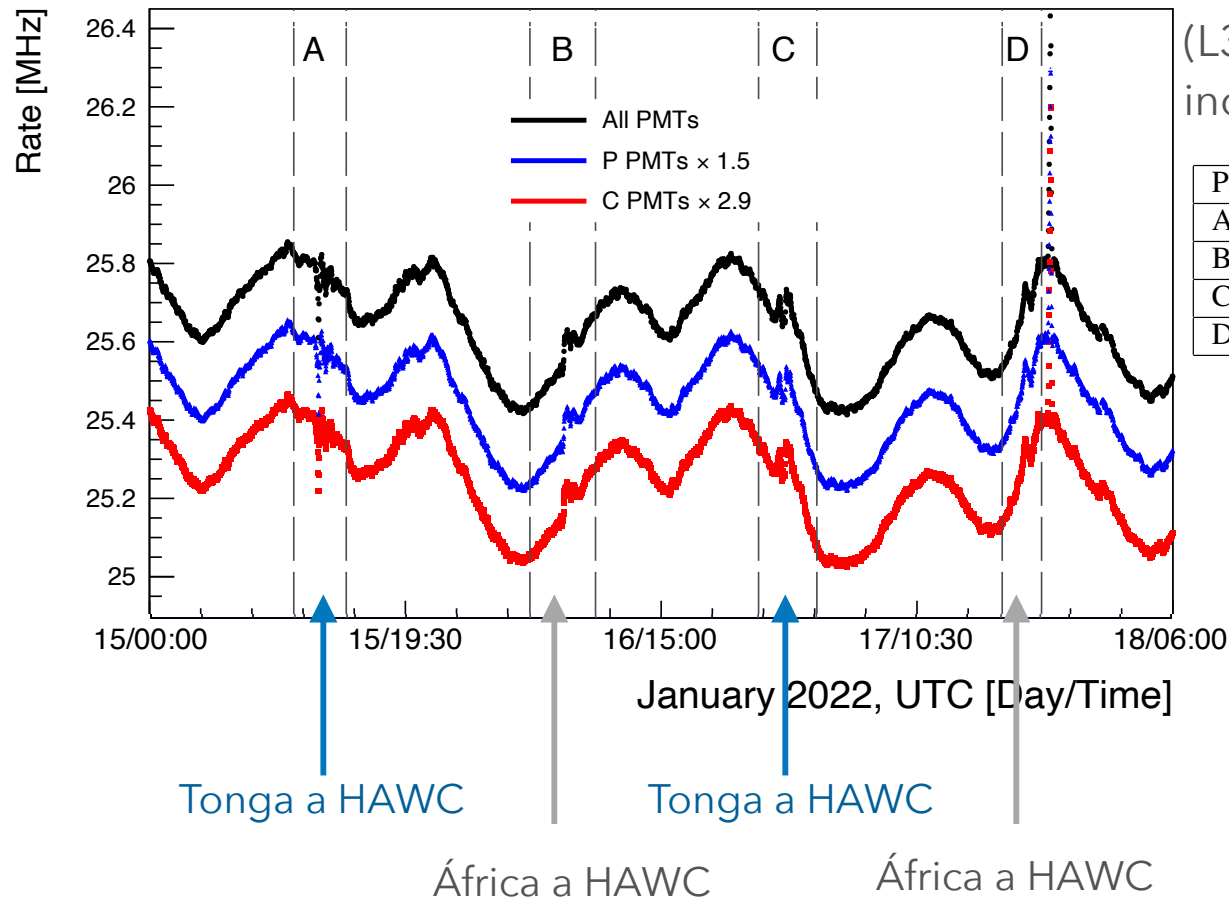
$$\frac{\Delta R}{\langle R \rangle} = \alpha \Delta P + b$$

# Propagación de la onda de presión

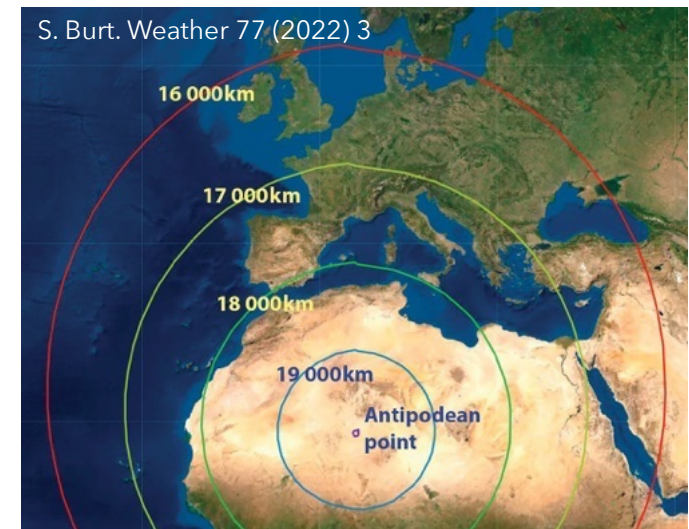


# Velocidad de la onda de presión

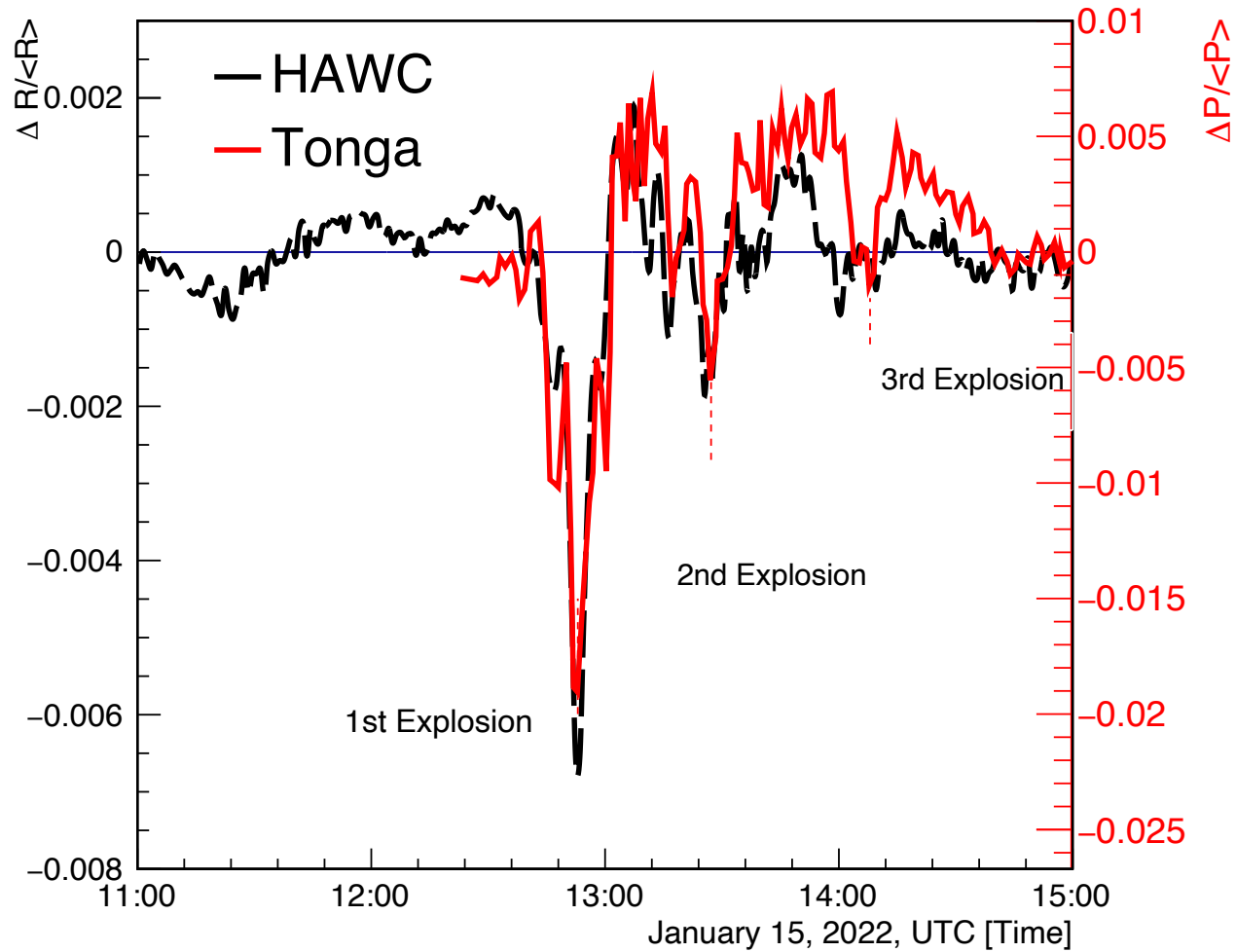
Distancias de propagación usando la fórmula de Haversine y un software usado en geofísica (L3). La diferencia se propagó como incertidumbre.



| Pass | Date [UTC] | Arrival time [UTC Time] | Speed [m/s] | Type  |
|------|------------|-------------------------|-------------|-------|
| A    | Jan. 15    | 12:43 ± 00:01           | 316.2 ± 1.3 | Short |
| B    | Jan. 16    | 07:25 ± 00:01           | 312.4 ± 0.2 | Long  |
| C    | Jan. 16    | 23:48 ± 00:03           | 316.9 ± 1.9 | Short |
| D    | Jan. 17    | 19:02 ± 00:05           | 312.4 ± 0.9 | Long  |



# Estructura de la onda de presión



# Intento de observación en Groenlandia

- Enviamos nuestro artículo el 29 de septiembre de 2022
- Diciembre de 2022: Revisiones mayores por no ser lo suficientemente interesante, no permitirían la lista de autores completa

**scientific** reports

20 de Noviembre de 2022

OPEN **Observation of Rayleigh-Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption with the POLA detectors at Ny-Ålesund**

 Check for updates

The average propagation velocity resulted to be  $(308 \pm 0.6)$  m/s. Possible effects of the atmospheric pressure variation associated with the shock-wave multiple passages on the cosmic-ray rate at ground level are also investigated. We did not find any significant evidence of this effect.

experimental measurements, performed at various locations in the world. Novelty is represented by the idea to investigate possible effects of the passage of the shock-wave on the cosmic particle rate measured at the ground level, which we could not be able to assess due to the low POLA detector acceptance, but whose existence was experimentally verified by another group exploiting essentially the same methodology presented here.



# La publicación



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Advances in Space Research 73 (2024) 1083–1091

ADVANCES IN  
SPACE  
RESEARCH  
(a COSPAR publication)  
[www.elsevier.com/locate/asr](http://www.elsevier.com/locate/asr)

## High-altitude characterization of the Hunga pressure wave with cosmic rays by the HAWC observatory

Ruben Alfaro<sup>a</sup>, César Alvarez<sup>b</sup>, Juan Carlos Arteaga-Velázquez<sup>c</sup>, Arun Babu Kollamparambil Paul<sup>ac</sup>, Daniel Avila Rojas<sup>a</sup>, Hugo Alberto Ayala Solares<sup>c</sup>, Rishi Babu<sup>f</sup>, Ernesto Belmont-Moreno<sup>d</sup>, Chad Brisbois<sup>n</sup>, Karen S. Caballero-Mora<sup>b</sup>, Tomás Capistrán<sup>e</sup>, Alberto Carramiñana<sup>h</sup>, Sabrina Casanova<sup>i</sup>, Oscar Chaparro-Amaro<sup>j</sup>, Umberto Cotti<sup>c</sup>, Jorge Cotzomi<sup>k</sup>, Eduardo De la Fuente<sup>l</sup>, Raquel Diaz Hernandez<sup>n</sup>, Michael A. DuVernois<sup>m</sup>, Mora Durocher<sup>s</sup>, Juan Carlos Díaz-Vélez<sup>l</sup>, Kristi Engel<sup>n</sup>, Catalina Espinoza<sup>a</sup>, Kwok Lung Fan<sup>n</sup>, Nissim Fraija<sup>g</sup>, José Andrés García-González<sup>o</sup>, Fernando Garfías<sup>g</sup>, María Magdalena González<sup>g</sup>, Jordan A. Goodman<sup>n</sup>, J. Patrick Harding<sup>s</sup>, Sergio Hernandez<sup>n</sup>, Dezhi Huang<sup>f</sup>, Filiberto Hueyotl-Zahuantla<sup>b</sup>, Thomas Brian Humensky<sup>n</sup>, Petra Hüntemeyer<sup>f</sup>, Arturo Iriarte<sup>g</sup>, Vikas Joshi<sup>p</sup>, Sarah Kaufmann<sup>q</sup>, David Kieda<sup>aa</sup>, Alejandro Lara<sup>d,e</sup>, Jason Lee<sup>x</sup>, Hermes León Vargas<sup>aa\*</sup>, James T. Linnemann<sup>f</sup>, Anna Lia Longinotti<sup>g</sup>, Gilgamesh Luis-Raya<sup>q</sup>, Kelly Malone<sup>ab</sup>, Oscar Martínez<sup>k</sup>, Jesús Martínez-Castro<sup>j</sup>, John A.J. Matthews<sup>l</sup>, Pedro Miranda-Romagnoli<sup>u</sup>, Jorge Antonio Morales-Soto<sup>c</sup>, Eduardo Moreno<sup>k</sup>, Amid Nayerhoda<sup>i</sup>, Lukas Nellen<sup>v</sup>, Roberto Noriega-Papaqui<sup>u</sup>, Nicola Omodei<sup>w</sup>, Yunior Pérez Araujo<sup>g</sup>, Eucario Gonzalo Pérez-Pérez<sup>q</sup>, Chang Dong Rho<sup>ad</sup>, Daniel Rosa-González<sup>h</sup>, Edna Ruiz-Velasco<sup>y</sup>, Humberto Salazar<sup>k</sup>, Daniel Salazar-Gallegos<sup>f</sup>, Andres Sandoval<sup>aa\*</sup>, Michael Schneider<sup>n</sup>, José Serna-Franco<sup>n</sup>, Andrew James Smith<sup>n</sup>, Youngwan Son<sup>x</sup>, Robert Wayne Springer<sup>aa</sup>, Omar Tibolla<sup>q</sup>, Kirsten Tollefson<sup>f</sup>, Ibrahim Torres<sup>h</sup>, Ramiro Torres-Escobedo<sup>z</sup>, Rhiannon Turner<sup>f</sup>, Fernando Ureña-Mena<sup>h</sup>, Enrique Varela<sup>k</sup>, Luis Villaseñor<sup>k</sup>, Xiaojie Wang<sup>f</sup>, Elijah Willox<sup>n</sup>, Hao Zhou<sup>z</sup>, Cederik de León<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Chiapas, Carretera Emiliano Zapata Km. 8, Rancho San Francisco, Tuxtla Gutiérrez 29050, México

<sup>c</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio C-3, Ciudad Universitaria, Morelia 58040, México

<sup>d</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México

<sup>e</sup> Department of Physics, Pennsylvania State University, 104 Davey Lab, University Park, PA 16802, USA

<sup>f</sup> Department of Physics, Michigan Technological University, 1400 Townsend Drive, Houghton, MI 49931-1295, USA

<sup>g</sup> Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México

<sup>h</sup> Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Luis Enrique Erro # 1, San Andrés Cholula 72840, México

<sup>i</sup> Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, ul. Radzikowskiego 152, Krakow PL-31342, Poland

<sup>j</sup> Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Bátiz s/n esq. Miguel Othon de Mendizábal, Ciudad de México 07738, México

<sup>k</sup> Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, Puebla 72570, México

<sup>l</sup> Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán No. 1431, Guadalajara 44430, México

<sup>m</sup> Department of Physics, University of Wisconsin-Madison, 222 West Washington Ave., Suite 500, Madison, WI 53707, USA

<sup>n</sup> Department of Physics, University of Maryland, College Park, MD 20742-4111, USA

- Publicado el 1 de enero de 2024
- Observamos un evento muy raro. La mayor explosión volcánica en 138 años.
- Primera vez que se detecta una onda de Lamb usando rayos cósmicos.
- Monitoreamos la onda de presión a gran altitud, muestreando un gran volumen de la atmósfera.
- Podemos hacer un estudio aún más detallado, con precisión de fracciones de segundos.

# Muones horizontales con HAWC

Desarrollé herramientas para identificar señales de muones horizontales, con el objetivo de buscar señales iniciadas por corrientes cargadas de neutrinos



## Characterization of the background for a neutrino search with the HAWC observatory

A. Albert<sup>1</sup>, R. Alfaro<sup>2</sup>, C. Alvarez<sup>3</sup>, J.R. Angeles Camacho<sup>2</sup>, J.C. Artega-Velázquez<sup>4</sup>, K.P. Arunabu<sup>5</sup>, E. Belmont-Moreno<sup>6</sup>, K.S. Caballero-Mora<sup>3</sup>, T. Capistrán<sup>7</sup>, A. Carramiñana<sup>8</sup>, S. Casanova<sup>9</sup>, U. Cotti<sup>10</sup>, J. Coto<sup>11</sup>, S. Couffo de León<sup>12</sup>, E. De la Fuente<sup>13,14</sup>, R. Diaz Hernandez<sup>15</sup>, M.A. DuVerney<sup>16</sup>, M. Durocher<sup>17</sup>, C. Espinoza<sup>18</sup>, K.L. Fan<sup>19</sup>, N. Fraija<sup>4</sup>, D. Garcia<sup>20</sup>, J.A. Garcia-González<sup>21</sup>, F. Garfias<sup>22</sup>, M.M. González<sup>23</sup>, J.A. Goodman<sup>24</sup>, D. Huang<sup>25</sup>, F. Hueyotl-Zahuantla<sup>3</sup>, P. Hüntemeyer<sup>15</sup>, A. Iriarte<sup>6</sup>, A. Jordin-Blicq<sup>16,17,18</sup>, D. Kieda<sup>19</sup>, A. Lara<sup>26</sup>, W.H. Lee<sup>6</sup>, H. León Vargas<sup>27</sup>, A.L. Longinotti<sup>6</sup>, G. Luis-Raya<sup>28</sup>, K. Malone<sup>29</sup>, J. Martínez-Castro<sup>31</sup>, J.A. Matthews<sup>32</sup>, P. Miranda-Romagnoli<sup>33</sup>, J.A. Morales-Soto<sup>4</sup>, E. Moreno<sup>34</sup>, A. Nayerhoda<sup>35</sup>, L. Nellen<sup>36</sup>, R. Noriega-Papaqui<sup>37</sup>, N. Omodei<sup>38</sup>, A. Peisker<sup>39</sup>, E.G. Pérez-Pérez<sup>40</sup>, C.D. Rho<sup>41</sup>, D. Rosa-González<sup>42</sup>, A. Sandoval<sup>43</sup>, J. Serma-Franco<sup>44</sup>, R.W. Springer<sup>45</sup>, K. Tollefson<sup>46</sup>, I. Torres<sup>47</sup>, R. Torres-Escobedo<sup>15,28</sup>, F. Ureña-Mena<sup>48</sup>, L. Villaseñor<sup>9</sup>, H. Zhou<sup>49</sup>, C. de León<sup>50</sup>

- <sup>1</sup>Physic Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA
- <sup>2</sup>Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
- <sup>4</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- <sup>5</sup>Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>6</sup>Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>7</sup>Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México
- <sup>8</sup>Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, PL-31342 Żywiec, Kraków, Poland
- <sup>9</sup>Instituto de Ciencias Exactas Matemáticas, Universidad Nacional Autónoma de México, Puebla, México
- <sup>10</sup>Department of Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México
- <sup>11</sup>Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, Japan
- <sup>12</sup>Department of Physics and Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA
- <sup>13</sup>Department of Physics, University of Maryland College Park, MD, USA
- <sup>14</sup>Technological University, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Espinoza García Sude 2501, Monterrey, N.L., 64849, México
- <sup>15</sup>Department of Physics, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA
- <sup>16</sup>Max-Planck Institute for Nuclear Physics, 69117 Heidelberg, Germany
- <sup>17</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand
- <sup>18</sup>National Astronomical Research Institute of Thailand (NARIT Organization), Don Ekkam, Muangthai, Chiang Mai 50180, Thailand
- <sup>19</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA
- <sup>20</sup>Universidad Politécnica de Puebla, Puebla, México
- <sup>21</sup>Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México City, México
- <sup>22</sup>Department of Physics and Astronomy, University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA
- <sup>23</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México
- <sup>24</sup>Instituto de Ciencias Exactas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>25</sup>Department of Physics, Stanford University, Stanford, CA 94305-5080, USA
- <sup>26</sup>Department of Physics and Astronomy, Michigan State University, East Lansing, MI, USA
- <sup>27</sup>University of Seoul, Seoul, Republic of Korea
- <sup>28</sup>Tung Dao Lee Institute & School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, People's Republic of China

### ARTICLE INFO

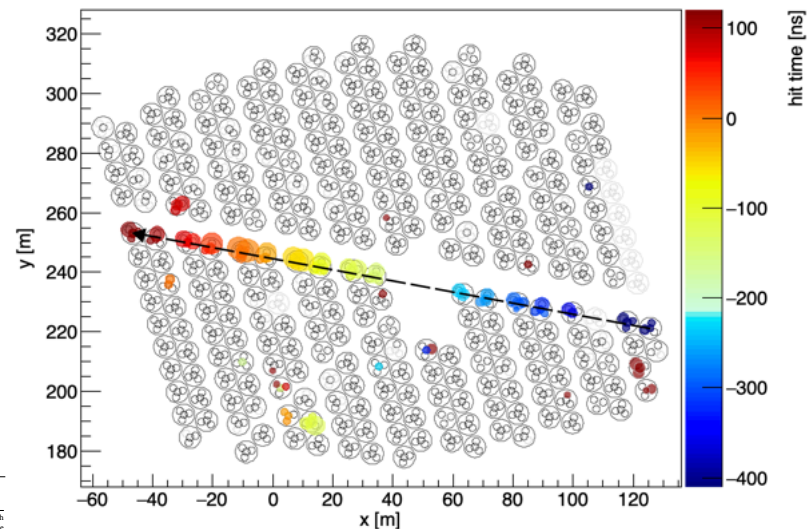
Keywords:  
Muons

### ABSTRACT

The close location of the HAWC observatory to the largest volcano in Mexico allows to perform a search for neutrino-induced horizontal muon and tau charged leptons. The section of the volcano located at the

<sup>\*</sup> Corresponding author.  
E-mail address: hicomvar@fisica.unam.mx (H. León Vargas).

<https://doi.org/10.1016/j.astropphys.2021.102670>  
Received 19 August 2021; Received in revised form 29 October 2021; Accepted 24 November 2021  
Available online 18 December 2021  
0927-6505/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.



Seminario, Departamento Gravitación y Teoría de Campos  
ICN, Nov. 2020

Characterization of the background for a neutrino search with the HAWC observatory

Astroparticle Physics 137 (2022) 102670

# Muones horizontales con HAWC

Desarrollé herramientas para identificar señales de muones horizontales, con el objetivo de buscar señales iniciadas por corrientes cargadas de neutrinos



## Characterization of the background for a neutrino search with the HAWC observatory

Astroparticle Physics 137 (2022) 102670



### Characterization of the background for a neutrino search with the HAWC observatory

A. Albert<sup>1</sup>, R. Alfaro<sup>2</sup>, C. Alvarez<sup>3</sup>, J.R. Angeles Camacho<sup>4</sup>, J.C. Arteaga-Velázquez<sup>5</sup>, K.P. Arunbabu<sup>6</sup>, E. Belmont-Moreno<sup>7</sup>, K.S. Caballero-Mora<sup>8</sup>, T. Capistrán<sup>9</sup>, A. Carramiñana<sup>2</sup>, S. Casanova<sup>10</sup>, U. Cotti<sup>11</sup>, J. Cuzco<sup>12</sup>, S. Couffio de León<sup>13</sup>, E. De la Fuente<sup>14,15</sup>, R. Diaz Hernandez<sup>16</sup>, M.A. DuVerney<sup>17</sup>, M. Durocher<sup>18</sup>, C. Espinoza<sup>19</sup>, K.L. Fan<sup>20</sup>, N. Fraija<sup>6</sup>, D. Garcia<sup>21</sup>, J.A. García-González<sup>22</sup>, F. Garfias<sup>6</sup>, M.M. González<sup>23</sup>, J.A. Goodman<sup>24</sup>, D. Huang<sup>25</sup>, F. Hueyotl-Zahuantitla<sup>3</sup>, P. Hüntemeyer<sup>15</sup>, A. Iriarte<sup>6</sup>, A. Jordin-Blicq<sup>16,17,18</sup>, D. Kieda<sup>19</sup>, A. Lara<sup>26</sup>, W.H. Lee<sup>6</sup>, H. León Vargas<sup>27</sup>, A.L. Longinotti<sup>6</sup>, G. Luis-Raya<sup>28</sup>, K. Malone<sup>1</sup>, J. Martínez-Castro<sup>21</sup>, J.A. Matthews<sup>22</sup>, P. Miranda-Romagnoli<sup>23</sup>, J.A. Morales-Soto<sup>6</sup>, E. Moreno<sup>29</sup>, A. Nayerhoda<sup>30</sup>, L. Nellen<sup>31</sup>, R. Noriega-Papaqui<sup>32</sup>, N. Omodei<sup>33</sup>, A. Peisker<sup>26</sup>, E.G. Pérez-Pérez<sup>34</sup>, C.D. Rho<sup>35</sup>, D. Rosa-González<sup>36</sup>, A. Sandoval<sup>37</sup>, J. Serma-Franco<sup>38</sup>, R.W. Springer<sup>39</sup>, K. Tollefson<sup>40</sup>, I. Torres<sup>7</sup>, R. Torres-Escobedo<sup>15,28</sup>, F. Ureña-Mena<sup>7</sup>, I. Villaseñor<sup>6</sup>, H. Zhou<sup>41</sup>, C. de León<sup>4</sup>

- <sup>1</sup>Physics Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA
- <sup>2</sup>Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
- <sup>4</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
- <sup>5</sup>Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>6</sup>Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>7</sup>Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México
- <sup>8</sup>Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, PL-31342 B-Jagi, Kraków, Poland
- <sup>9</sup>Instituto de Ciencias Exactas Matemáticas, Universidad Nacional Autónoma de Puebla, Puebla, México
- <sup>10</sup>Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México
- <sup>11</sup>Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Kashiwanoha, Japan
- <sup>12</sup>Department of Physics and Wisconsin IceCube Particle Astrophysics Center, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA
- <sup>13</sup>Department of Physics, University of Maryland College Park, MD, USA
- <sup>14</sup>Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501, Monterrey, N.L., 64849, México
- <sup>15</sup>Department of Physics, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA
- <sup>16</sup>Max-Planck Institute for Nuclear Physics, 69117 Heidelberg, Germany
- <sup>17</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand
- <sup>18</sup>National Astronomical Research Institute of Physics (NARI), Organization, Sun Yat-Sen, Maubang, Chung Mei 50180, Thailand
- <sup>19</sup>Department of Physics and Astronomy, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA
- <sup>20</sup>Universidad Politécnica de Puebla, Puebla, Hgo, México
- <sup>21</sup>Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México City, México
- <sup>22</sup>Department of Physics and Astronomy, University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA
- <sup>23</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México
- <sup>24</sup>Instituto de Ciencias Exactas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- <sup>25</sup>Department of Physics, Stanford University, Stanford, CA 94305-5080, USA
- <sup>26</sup>Department of Physics and Astronomy, Michigan State University, East Lansing, MI, USA
- <sup>27</sup>University of Seoul, Seoul, Republic of Korea
- <sup>28</sup>Tung Dao Lee Institute & School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, People's Republic of China

#### ARTICLE INFO

Keywords:  
Muon

#### ABSTRACT

The close location of the HAWC observatory to the largest volcano in Mexico allows to perform a search for neutrino-induced horizontal muon and tau charged leptons. The section of the volcano located at the

<sup>\*</sup> Corresponding author.  
E-mail address: hicoarva@fisica.unam.mx (H. León Vargas).

<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2021.102670>  
Received 19 August 2021; Received in revised form 29 October 2021; Accepted 24 November 2021  
Available online 18 December 2021  
0927-6505/© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.



Seminario, Departamento Gravitación y Teoría de Campos  
ICN, Nov. 2020

# Computo en ICN

```
hawclava.umd.edu
-----
aspen22 C68 HC Intel Xeon 48 2500 125.8 73% 39.12 42.08 0.88 0 0.01
aspen02 C68 HC AMD Opteron 48 2600 252.0 74% 92.03 48.60 1.01 0 0.00

Total Available Cycles: 4399.6 GHz on 1790 cpus, Fraction Utilized: 42.8 %
Shared Disk Space: 4964340 GB. Disk output: 602.7 MB/s input: 154.0 MB/s
Aggregate Network Usage: 1.4 MB/s. Net output: 0.5 MB/s input: 0.8 MB/s
```

```
Top 20 users in the last month:
-----
Top 20 Users 2018-04-27T00:00:00 - 2018-05-27T12:59:59 (2638800 secs)
Use reported in TRES Hours
-----
Cluster Login Proper Name Account Used Energy
-----
blackbox hermes Hermes Leon Va+ users 160928 0
blackbox hawc High Energy Wa+ users 67556 0
blackbox hayalaso Hugo Alberto A+ users 59204 0
```

- En promedio 120 k horas-CPU mensualmente en UMD (Slurm)
- 1.5 veces mayor uso en ICN (Torque)
- ~300k horas-CPU por mes

- En total:
- ◆  $\sim 7 \times 10^6$  horas-CPU
  - ◆ 260 TB de datos
  - ◆  $\sim 3 \times 10^{11}$  eventos



# Efecto de la temperatura

La producción y propagación de muones depende de las propiedades atmosféricas

La correlación entre la intensidad de muones con la temperatura se caracterizan a través del coeficiente  $\alpha_T$

$$\frac{\Delta R_\mu}{\langle R_\mu \rangle} = \alpha_T \frac{\Delta T_{eff}}{\langle T_{eff} \rangle}$$

$R_\mu$ : tasa de detección de muones,  $T_{eff}$ : temperatura efectiva de la atmósfera

A través de caracterizar esta dependencia, es posible estimar el cociente  $k/\pi$  a energías no accesibles en aceleradores

# Temperatura efectiva

$$T_{eff} = \frac{\int_0^\infty dX T(X) W(X)}{\int_0^\infty dX W(X)}$$

Un solo valor para la temperatura en la cuál se origina el muón. Se obtiene al pesar el perfil de temperatura en la posición del detector.

Los pesos dependen de las propiedades de los mesones a partir de los cuales se producen los muones:

$$W^{\pi(K)}(X) \approx \frac{(1 - X/\Lambda'_{\pi(K)})^2 e^{-X/\Lambda_{\pi(K)}} A_{\pi(K)}^1}{\gamma + (\gamma + 1) B_{\pi(K)}^1 K(X) \left( \frac{\langle E_{th} \cos \theta \rangle}{\epsilon_{\pi(K)}} \right)^2}$$

$$K(X) = \frac{(1 - X/\Lambda'_{\pi(K)})^2}{(1 - e^{-X/\Lambda'_{\pi(K)}}) \Lambda'_{\pi(K)} / X}$$

$\Lambda$ : longitud de atenuación de hadrones

A: relacionado a la producción de mesones en la región frontal de fragmentación.

$A[r(K/\pi), m_{\mu, K}, \gamma]$

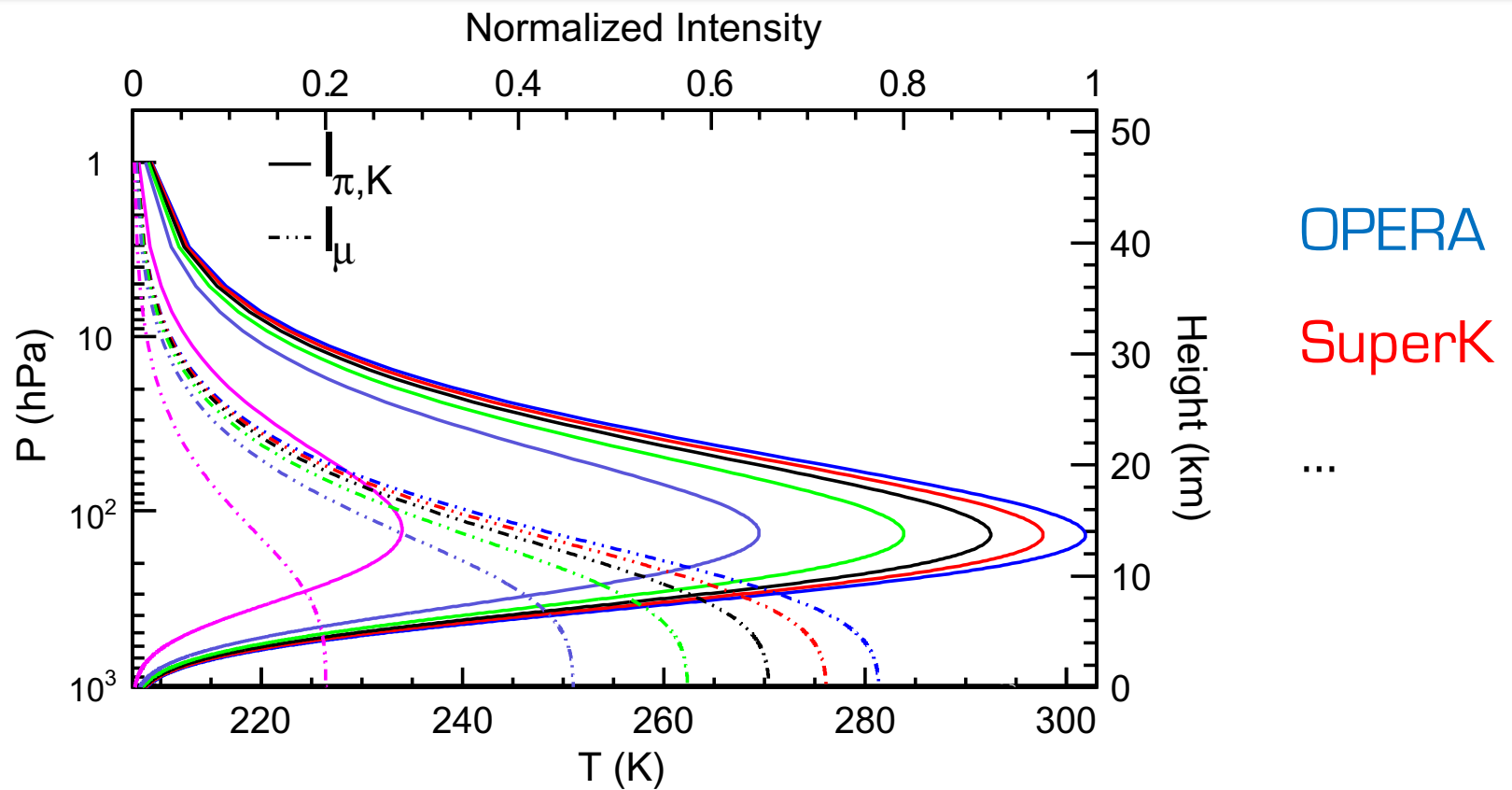
B: atenuación de mesones

$\gamma$ : índice espectral de los muones

$\epsilon$ : energía crítica de los mesones (decaimiento o interacción)

$E_{Th}$ : umbral del detector

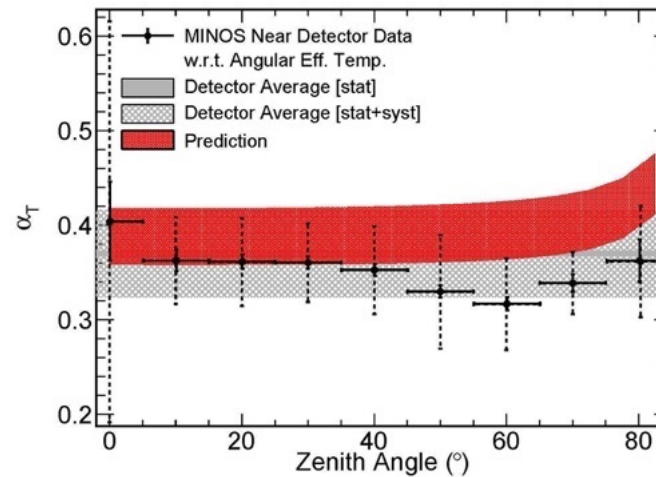
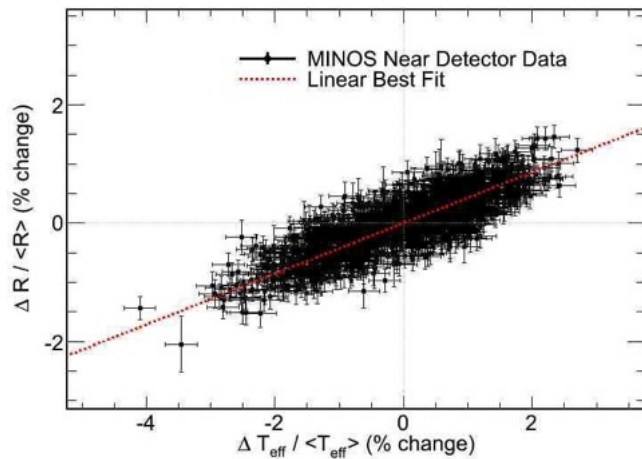
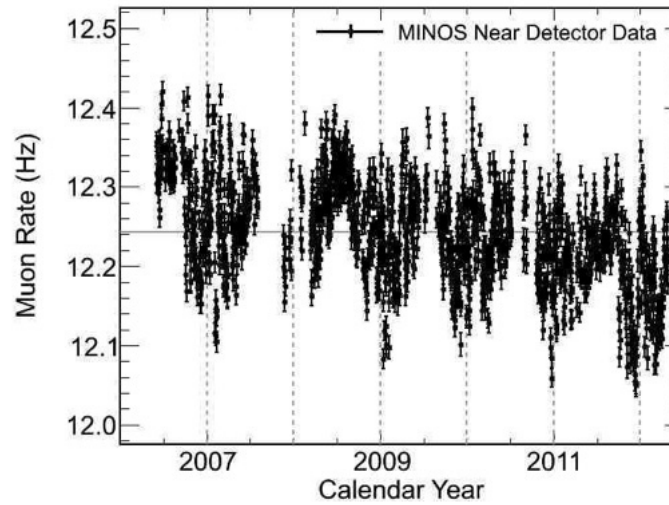
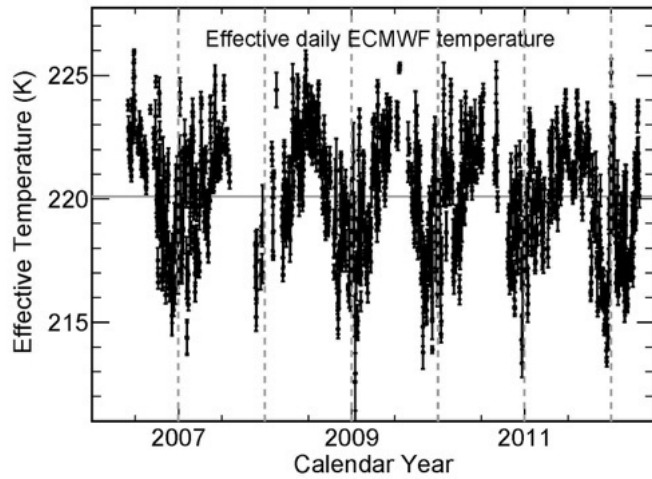
# Intensidad vertical de muones



**The atmospheric charged kaon/pion ratio using seasonal variation methods**

E. W. Grashorn et al. Astroparticle Physics 33 (2010) 140-145

# Ejemplo: resultados de MINOS



**Observation of muon intensity variations by season with the MINOS near detector**

Phys. Rev. D 90 (2014) 012010



# ¿Quién más ha realizado estos estudios?

DANSS (2021)

NOvA (2021)

Daya Bay (2018)

OPERA (2018)

Borexino (2012)

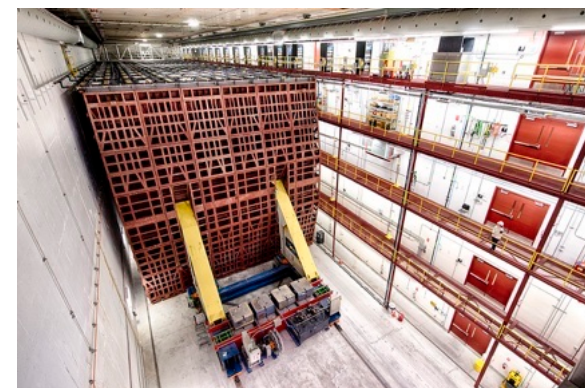
MINOS (2010 & 2014)

IceCube (2011)

AMANDA (1999)

MACRO (1997)

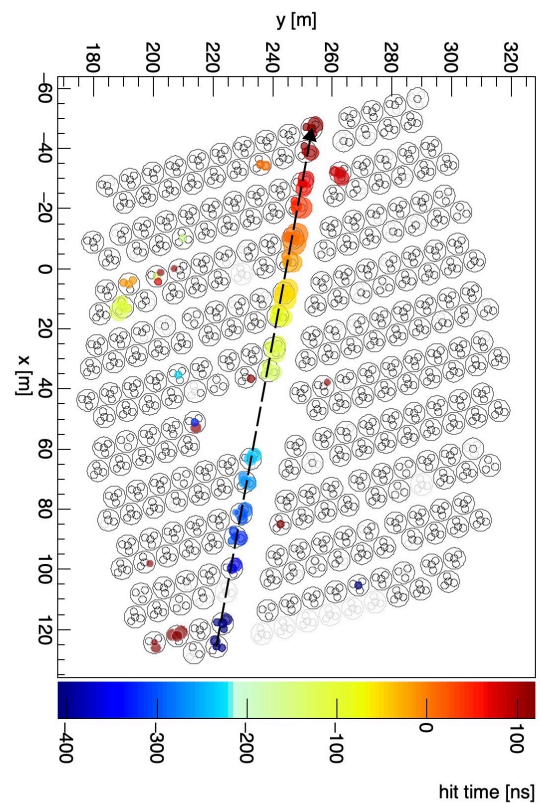
Baksan (1987)



Detectores subterrneos

# ¿Cómo hacerlo con HAWC?

HAWC cuenta con una región del campo de visión que “observa” solo atmósfera



# Datos meteorológicos

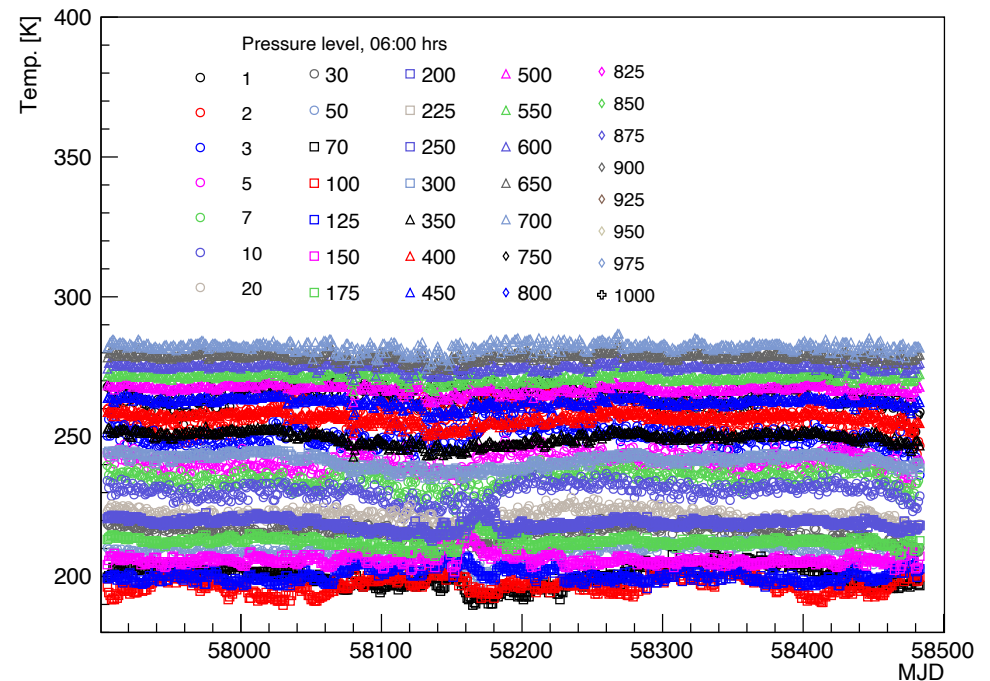
Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio



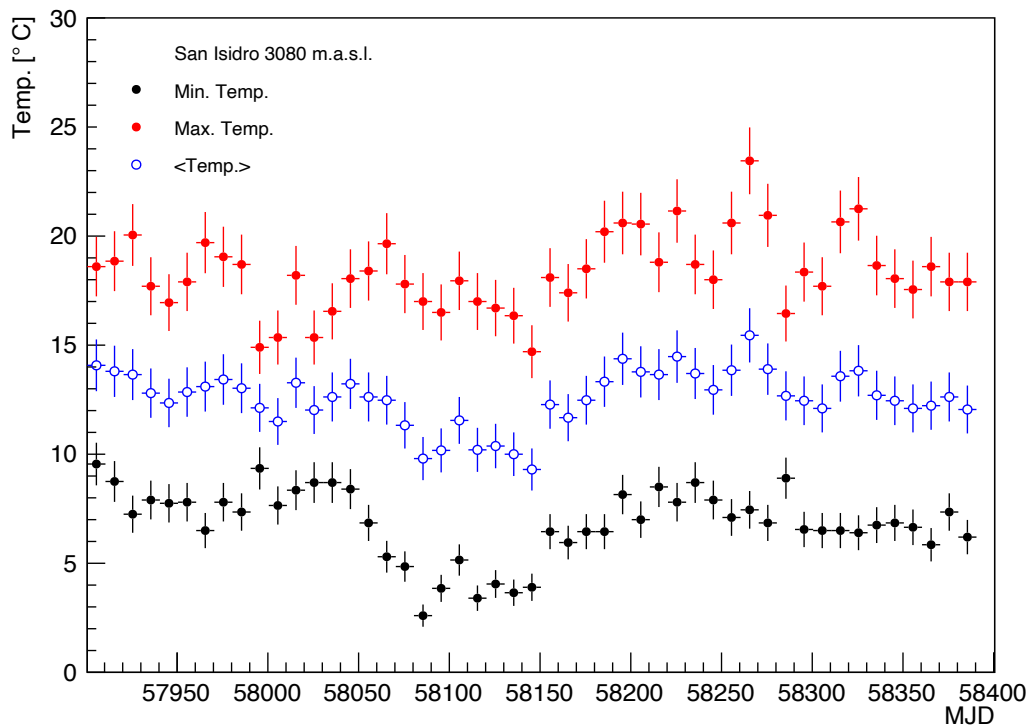
Base de datos de acceso libre.

El modelo provee temperaturas para 36 niveles atmosféricos, a 4 horas distintas del día (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00).

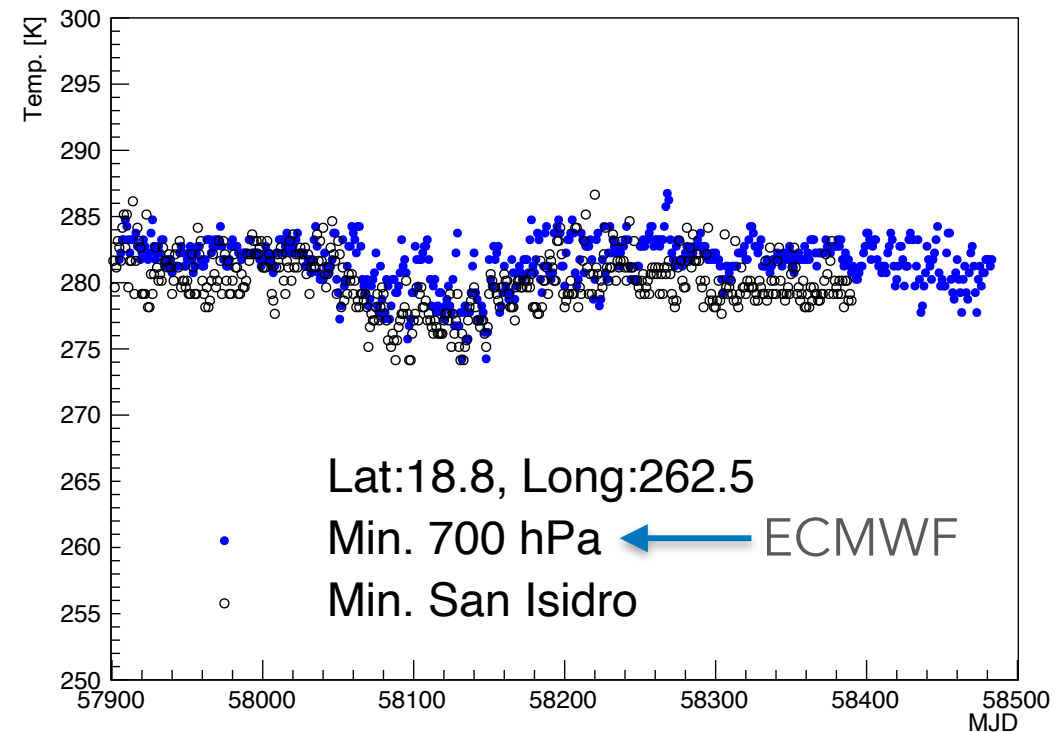
Perfiles verticales a las 06:00 hrs



# Verificación de los datos meteorológicos

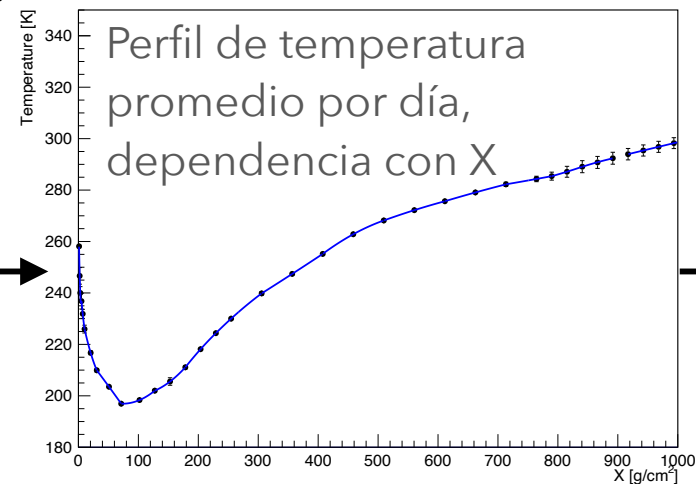
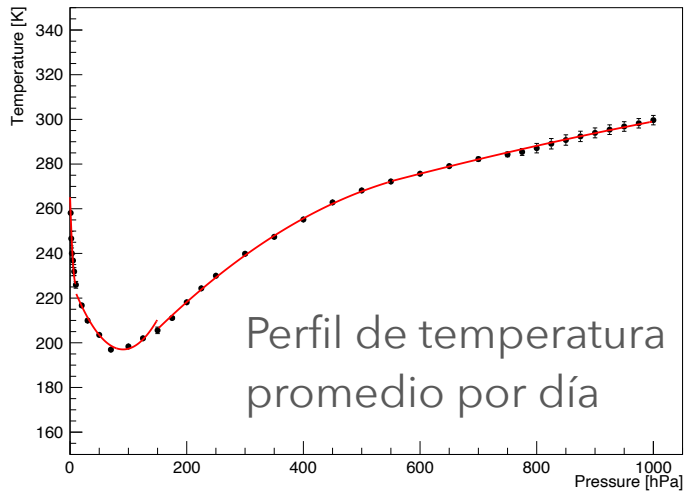
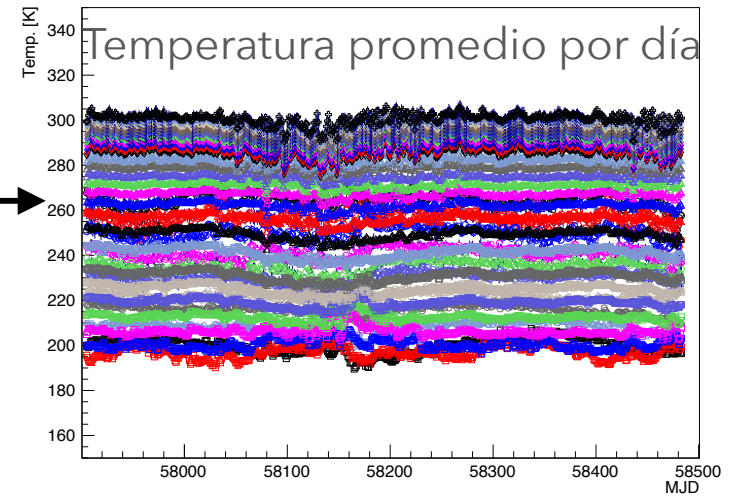
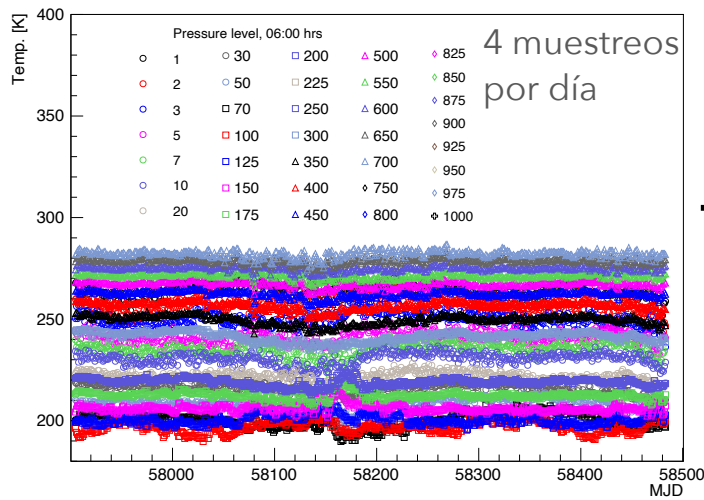


Datos de una estación de CONAGUA  
Almacena temperaturas máxima y  
mínima por día



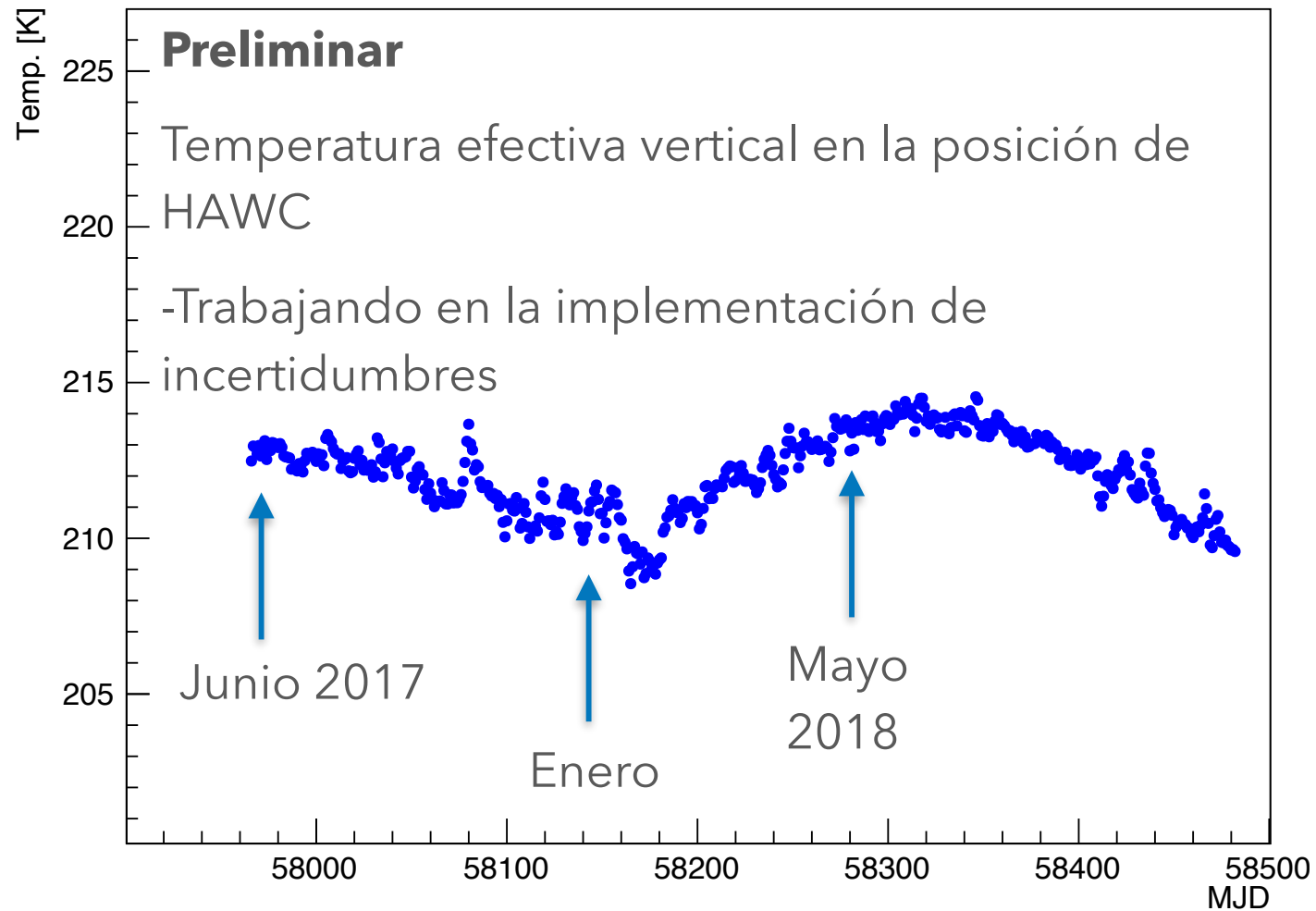
No es posible una comparación directa  
Temperatura diaria mínima del modelo,  
a la elevación mas cercana disponible

# Datos meteorológicos

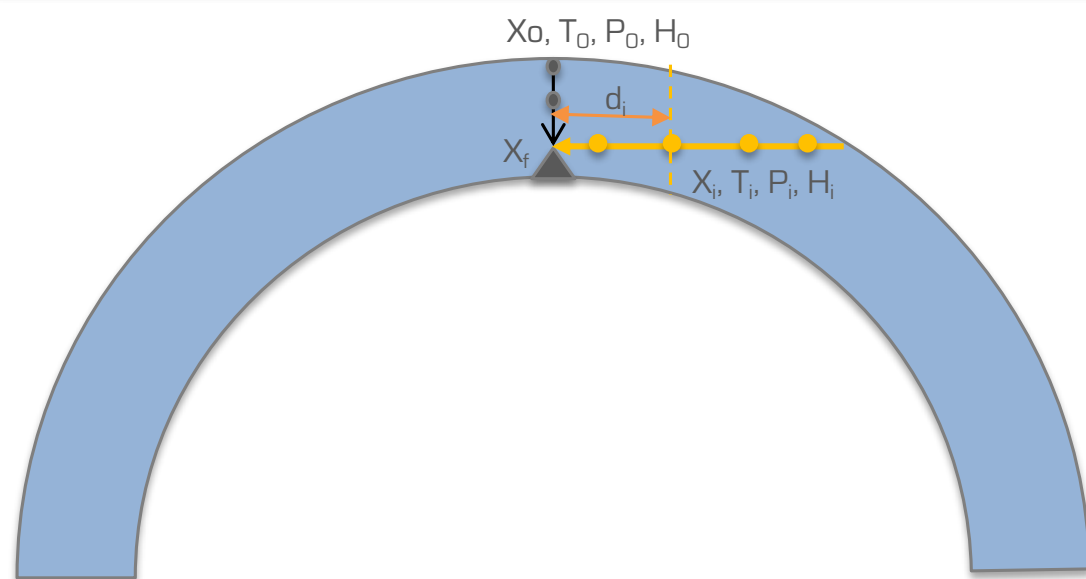


**Temperatura efectiva por día**

# Datos meteorológicos



# ¿Cómo hacerlo con HAWC?

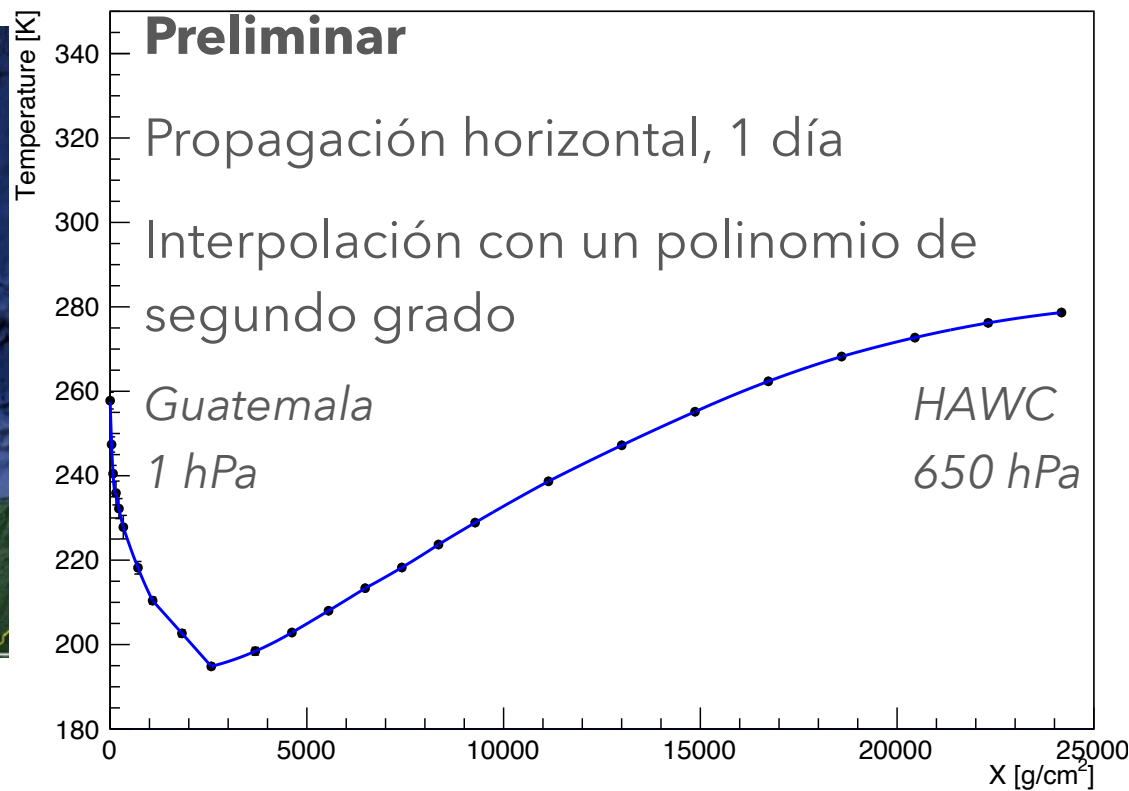


La propagación horizontal inicia aproximadamente sobre la frontera entre México y Guatemala, aproximadamente a 750 km de la posición de HAWC

Utilizar distintas posiciones geográficas para evaluar distintas capas de la atmósfera

La máxima resolución espacial de los datos es de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  sobre la superficie terrestre. Es posible obtener 12 puntos a lo largo de la trayectoria, con separaciones entre 40-80 km

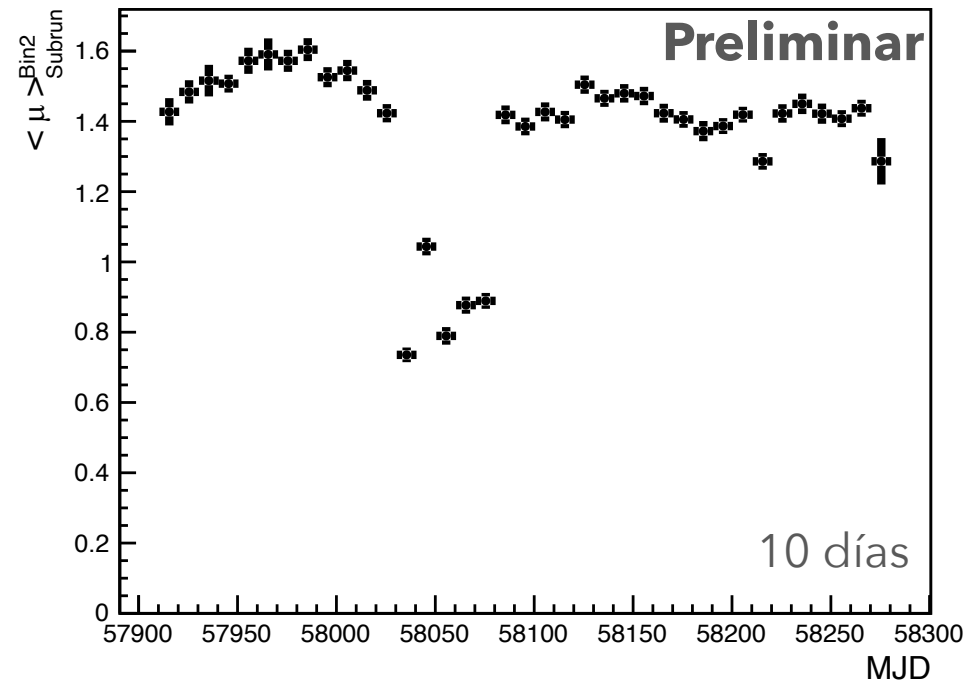
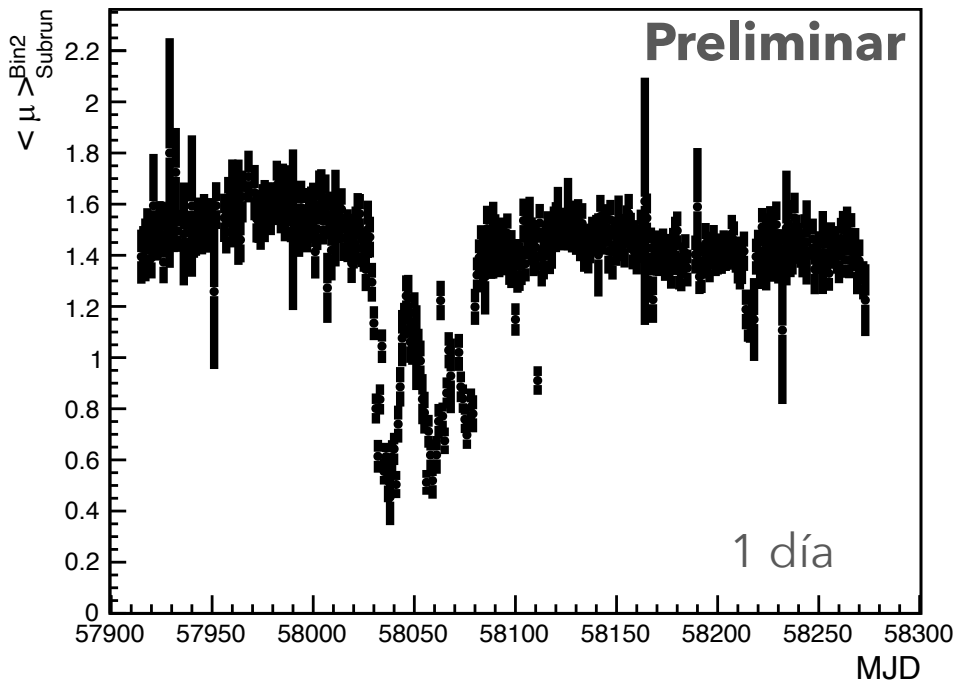
# ¿Cómo hacerlo con HAWC?



$\sim 25 \text{ k g/cm}^2$



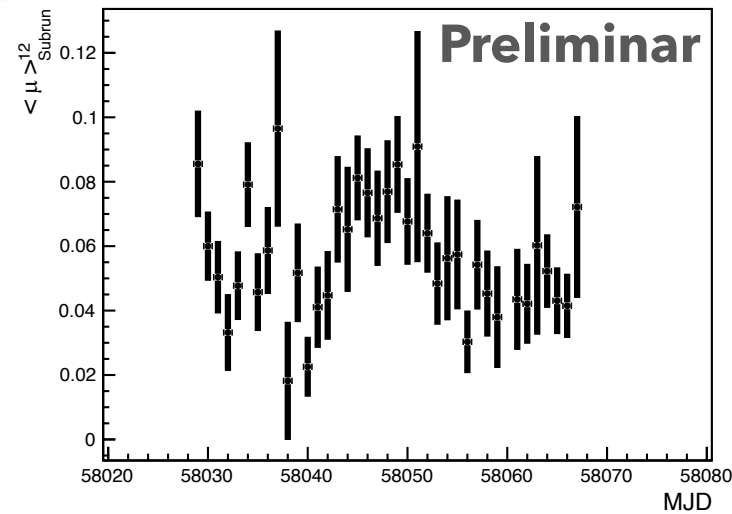
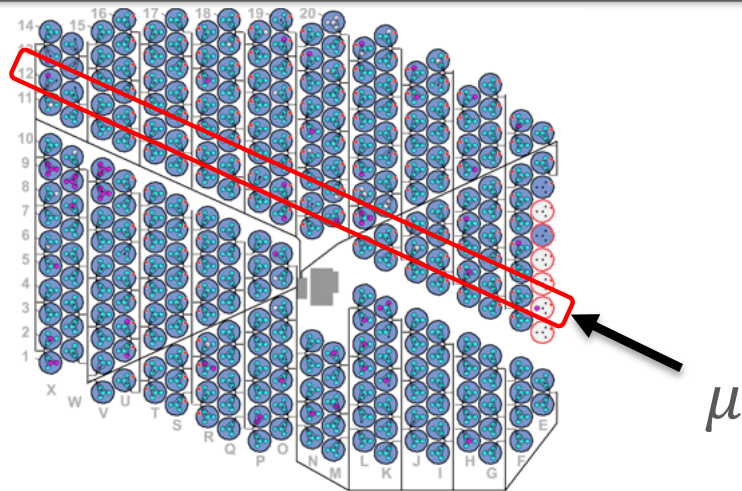
# Conteo de muones horizontales



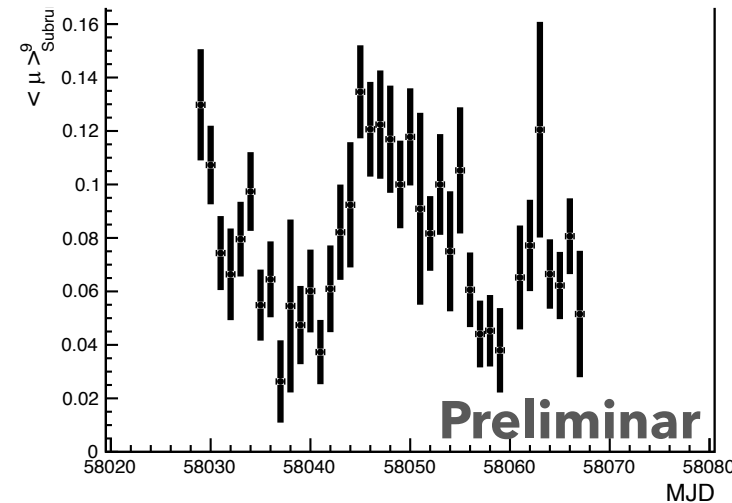
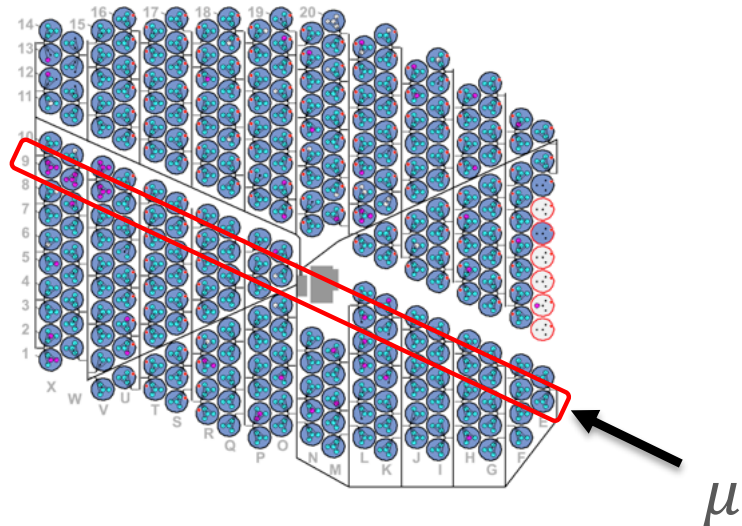
Primer vistazo en los datos de HAWC a principios del año pasado:

Aparente estructura, caída y recuperación del conteo

# Conteo de muones horizontales

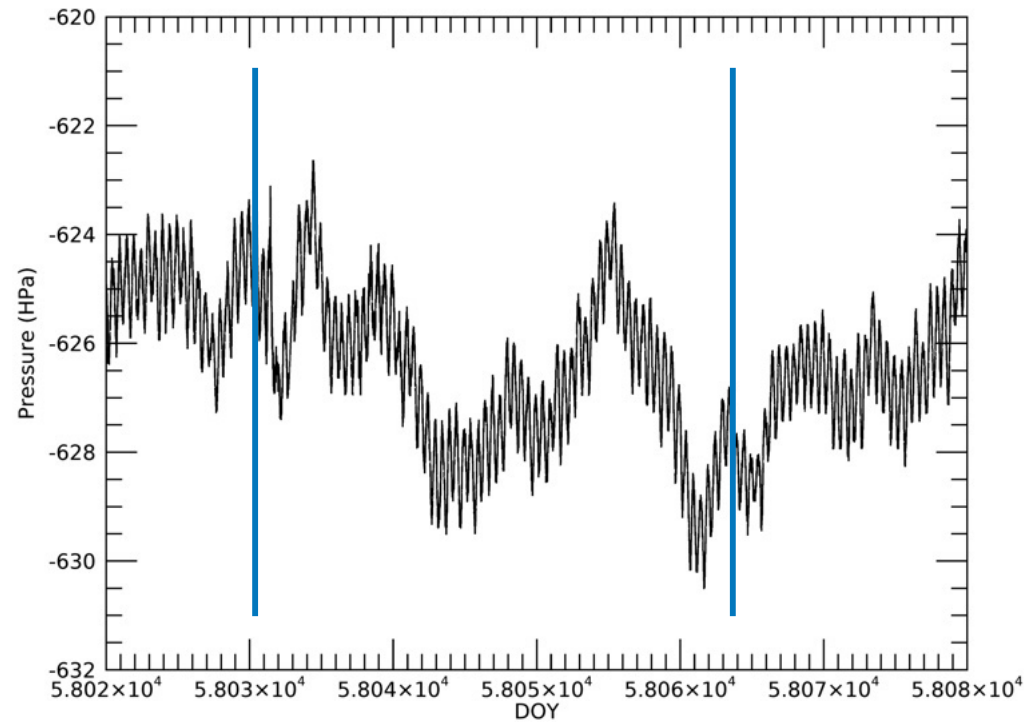
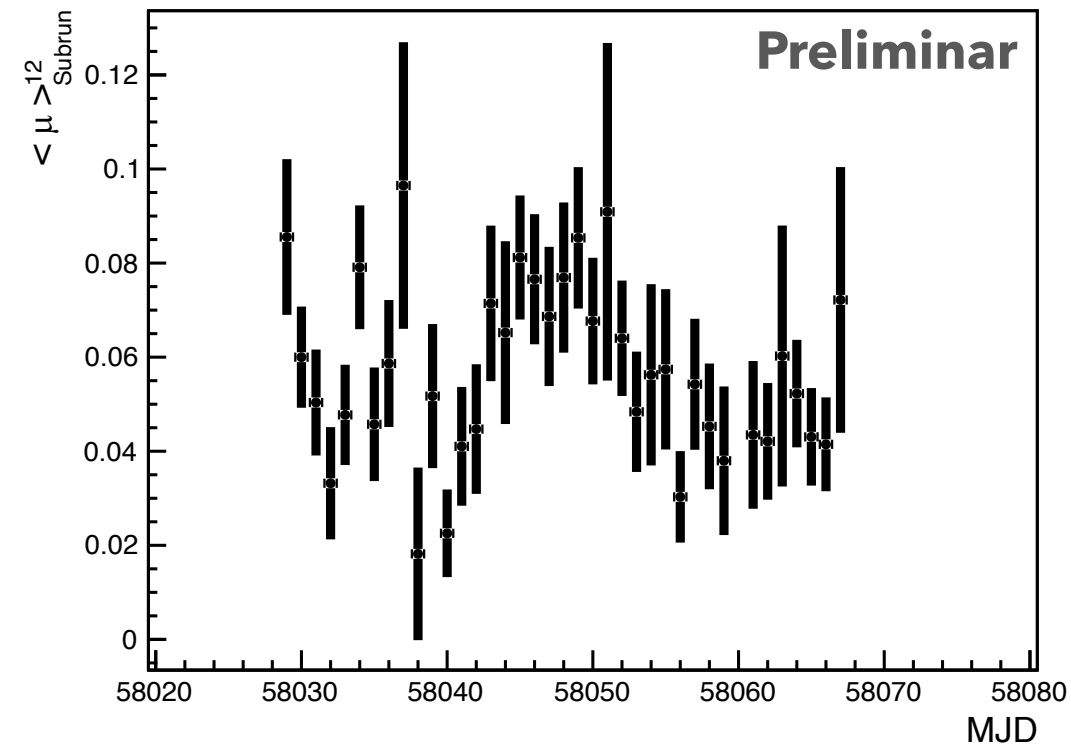


Restringiendo las trayectorias la estructura se mantenía



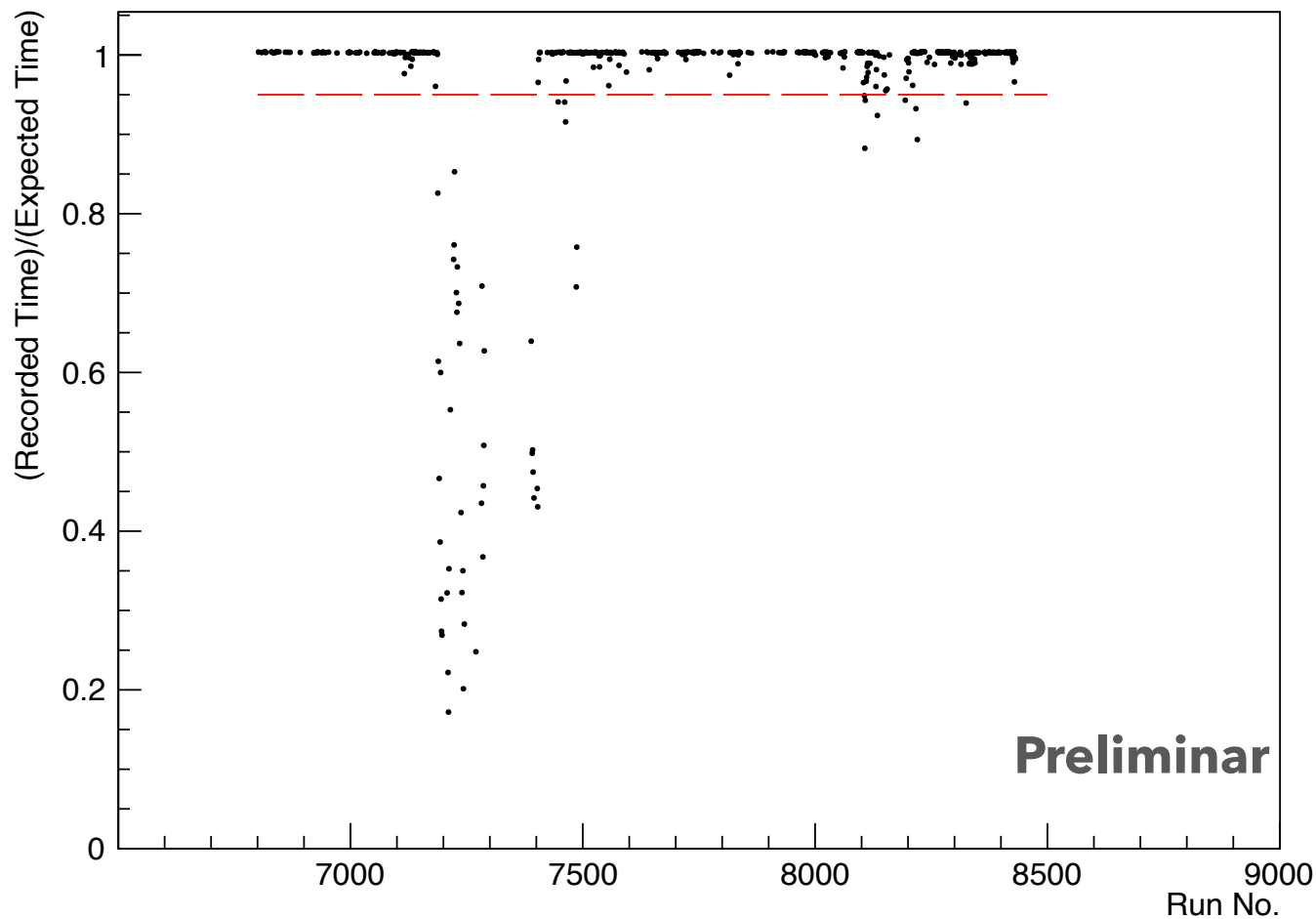
# Conteo de muones horizontales

Barómetro en Sierra Negra  
2017



¿Correlación con la presión?

# Primer problema: normalización temporal



Recorded: registrado de manera interna por el análisis.

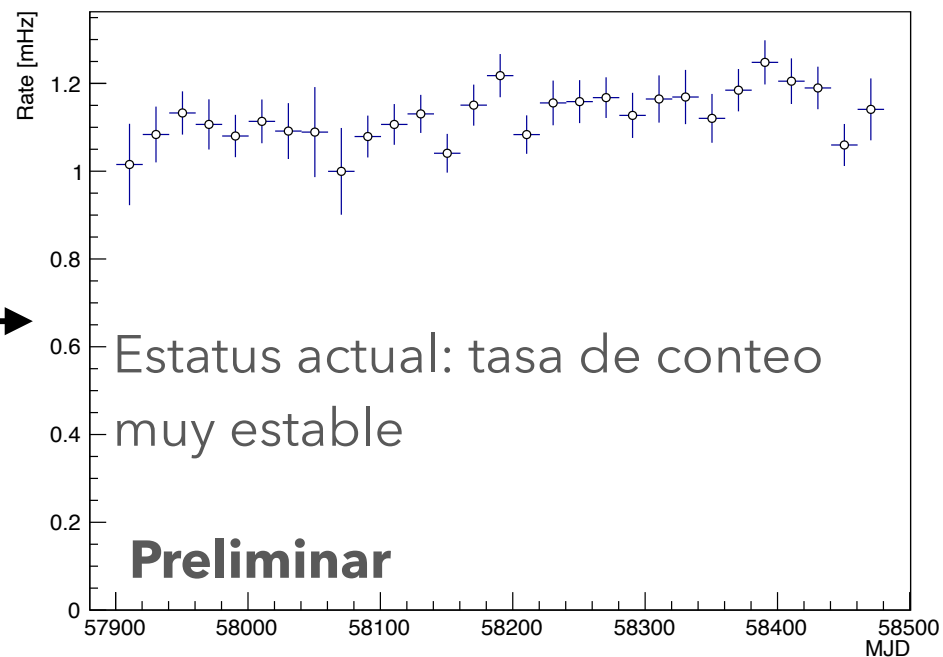
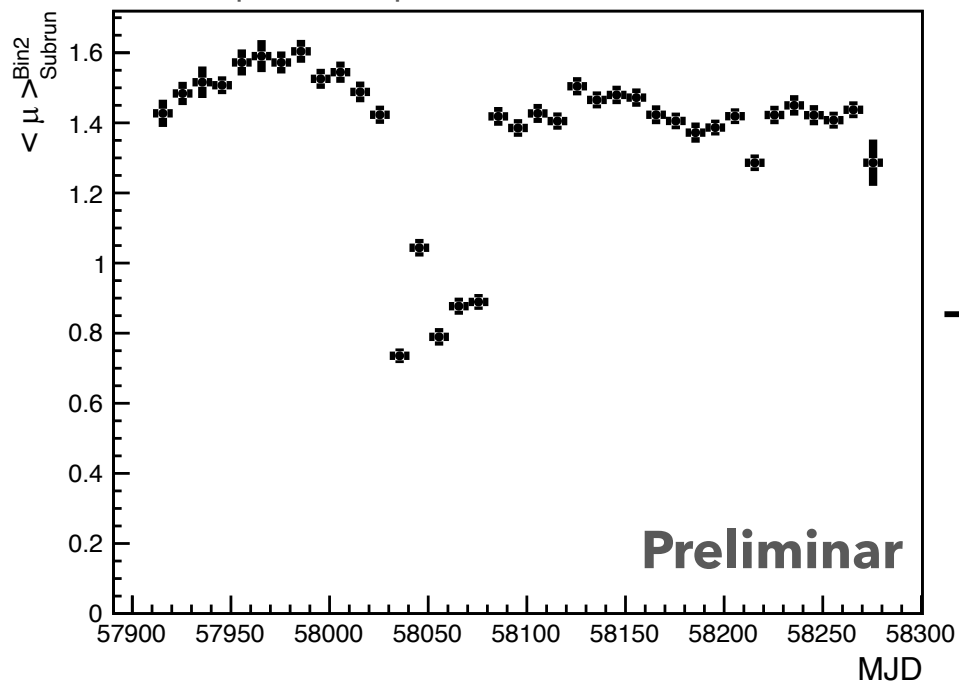
Expected: basado en la duración promedio de los subruns.

Problema: jobs ejecutados sólo de manera parcial y luego recuperados por ROOT al terminar el job.

# Segundo problema: estabilidad de los PMTs

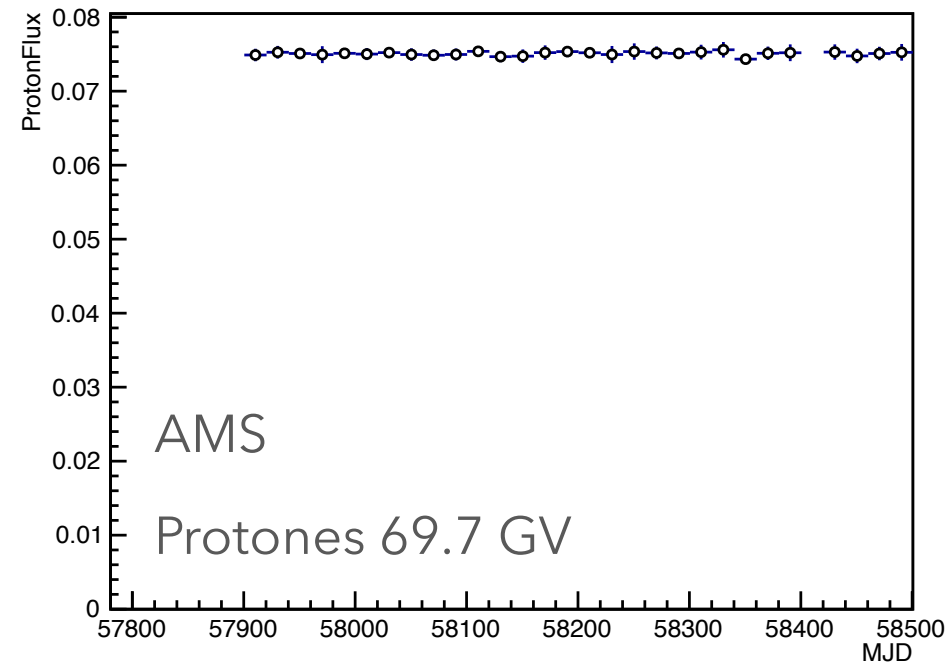
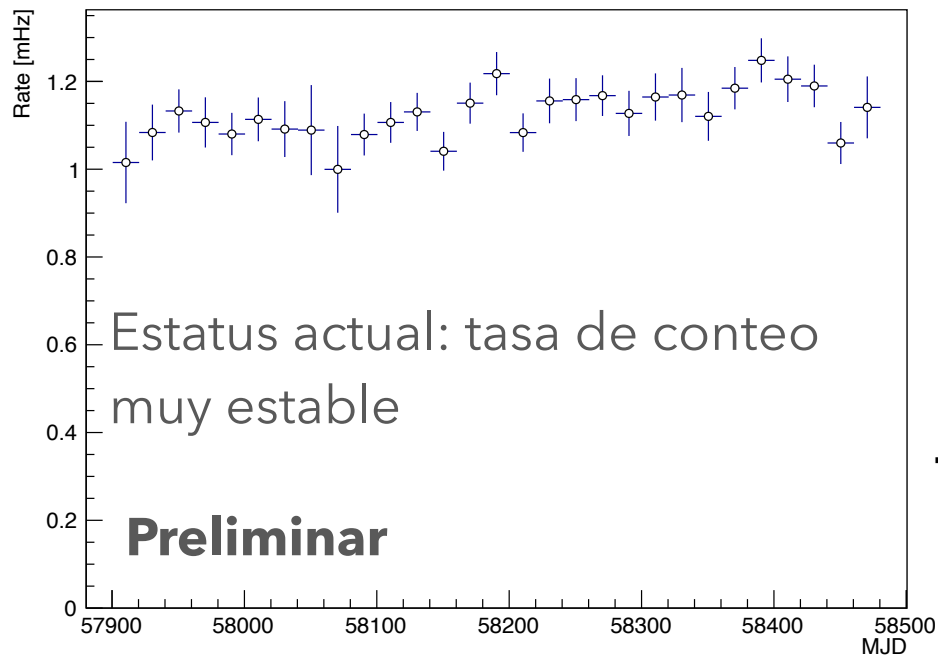
La tasa de conteo de trazas es también muy sensible al cambio del número de PMTs disponibles en cada WCD (3 vs 4).

Solución: limitar el análisis sólo a aquellas trazas que se propagan a través de WCDs que se mantuvieron sin cambios en el número de PMTs en toda la ventana de análisis. Análisis por subrun para remover aquellos que fallaron en el cluster.



# ¿Es lo que esperamos?

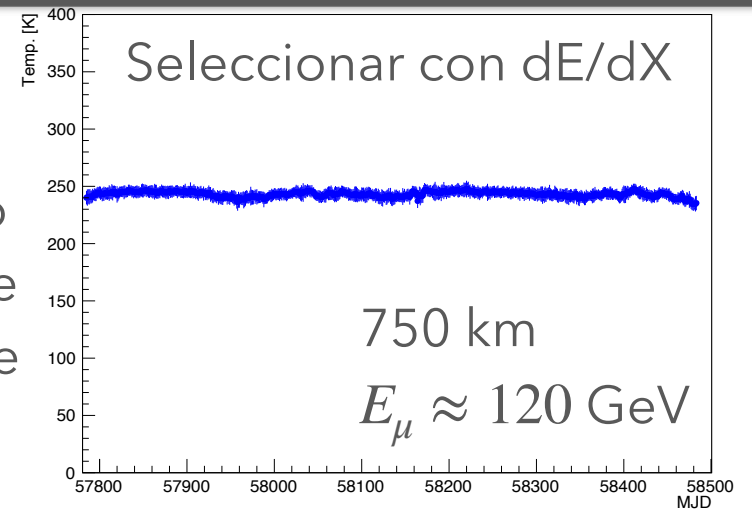
El flujo primario es también casi plano (comportamiento similar con He)



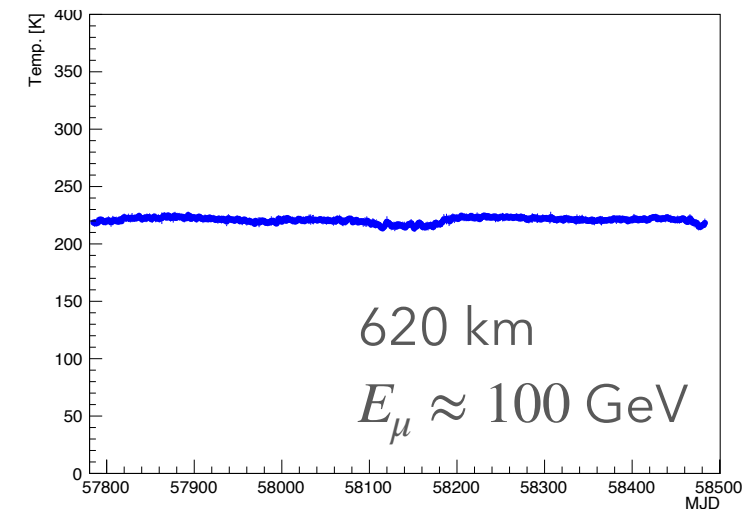
# Temperatura efectiva vs propagación



La trayectoria completa desde la entrada del primario a la atmósfera ocurre sólo para muones de muy alta energía



Al restringir a propagaciones que inician más cerca de HAWC, se puede disminuir el umbral de  $E_{\mu}$



# La atmósfera como laboratorio de altas energías



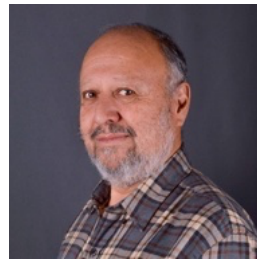
Estudiar el efecto de campos eléctricos intensos en el desarrollo y propagación de partículas secundarias en cascadas atmosféricas.



Financiamiento (2023-2025): ~ 1 Millón de pesos



Investigador responsable  
IF-UNAM



Prof. Andrés Sandoval  
IF-UNAM



Dr. Adiv Gonzalez  
Tec-NM Oaxaca



Dr. Antonio Galvan  
Posdoc DGAPA, IF-UNAM



Fis. Cindy Castellón  
PCF, IF-UNAM



Dr. Ernesto Belmont  
IF-UNAM



# La atmósfera como laboratorio de altas energías

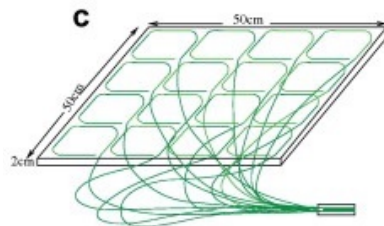


Estudiar el efecto de campos eléctricos intensos en el desarrollo y propagación de partículas secundarias en cascadas atmosféricas.



Dirección General de Asuntos del Personal Académico

Financiamiento (2023-2025): ~ 1 Millón de pesos



GRAPES-3  
Astroparticle Physics 31 (2009)

# Conclusiones

- Hicimos la primera detección de una onda de Lamb usando rayos cósmicos
- Tenemos datos únicos de muones horizontales a gran altitud, que requirieron enormes recursos de computo, procesados mayormente en ICN.
- Trabajando en el primer estudio de la correlación de la detección de muones horizontales con propiedades atmosféricas
  - Seleccionar altas energías con  $dE/dx$  en los detectores, o con trayectorias que atraviesan roca
- Trabajando en el desarrollo de un experimento pequeño en el IF-UNAM dedicado a estudiar la correlación entre tasas de conteo y distintas propiedades atmosféricas

