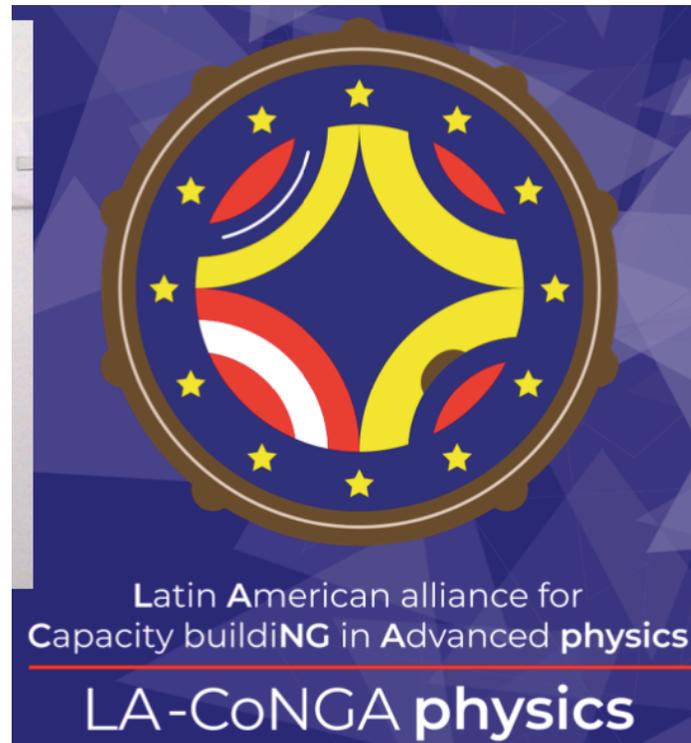




# como detector de rayos cósmicos

Cristiano Alpigiani, Juan Carlos Arteaga Velázquez, Daniela Blanco-Lira, Davide Boscherini,  
**Karen Salomé Caballero Mora**, Paolo Camarri, Roberto Cardarelli, Dennis Cazar Ramírez,  
Giuseppe Di Sciascio, Arturo Fernández Téllez, Henry Lubatii, Mario Iván Martínez Hernández,  
Oscar Gustavo Morales Olivares, Piter Amador Paye Mamani, Mario Rodríguez Cahuantzi,  
Rinaldo Santonico, Martin Alfonso Subieta Vázquez y Guillermo Tejeda Muñoz



## Seminarios LA-CoNGA physics

8 de Marzo de 2021, 14.00 (Col, Ec, Pe), 15.00 Ve, 19.00 UTC



- a. University of Washington, Seattle EE.UU
- b. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México
- c. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
- d. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna, Italia
- e. Universidad Autónoma de Chiapas, México
- f. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Por Vergata, Italia
- g. Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Roma, Italia
- h. Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito, Ecuador
- i. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

Cristiano Alpigiani <sup>a</sup>, Juan Carlos Arteaga Velázquez<sup>b</sup>, Daniela Blanco-Lira<sup>c</sup>, Davide Boscherini<sup>d</sup>, **Karen Salomé Caballero Mora<sup>e</sup>**, Paolo Camarri<sup>f,g</sup>, Roberto Cardarelli<sup>f</sup>, Dennis Cazar Ramírez<sup>h</sup>, Giuseppe Di Sciascio<sup>g</sup>, Arturo Fernández Téllez<sup>c</sup>, Henry Lubatii<sup>a</sup>, Mario Iván Martínez Hernández<sup>c</sup>, Oscar Gustavo Morales Olivares<sup>e</sup>, Piter Amador Paye Mamani<sup>i</sup>, Mario Rodríguez Cahuantzi<sup>c</sup>, Rinaldo Santonico<sup>f,g</sup>, Martin Alfonso Subieta Vázquez<sup>i</sup> y Guillermo Tejeda Muñoz<sup>c</sup>



Università degli Studi  
di Roma Tor Vergata

# Motivación



1. El Modelo Estándar de las partículas elementales (SM):
  - a) Está en concordancia con la mayoría de los datos experimentales.
  - b) Pero los datos deben extenderse más ya que no explican:
    - Materia Oscura.
    - Asimetría de materia-antimateria en el universo.
    - La magnitud de la masa del neutrino.
    - Proceso de Inflación del Universo.
    - Problema de la Jerarquía, etc.
  
2. Se requiere Física **BSM** para tratar de explicar estos problemas. Se puede requerir la existencia de partículas neutras de larga vida (neutral long-lived (**LLP's**) particles): **Gluginos, neutralinos, hidden hadrons, etc.**

D. Curtin and Raman Sundrum, Phys. Today 70, 6, 46 (2017)

J.C. Arteaga-Velázquez

# Motivación



## 3. LLP's Neutras:

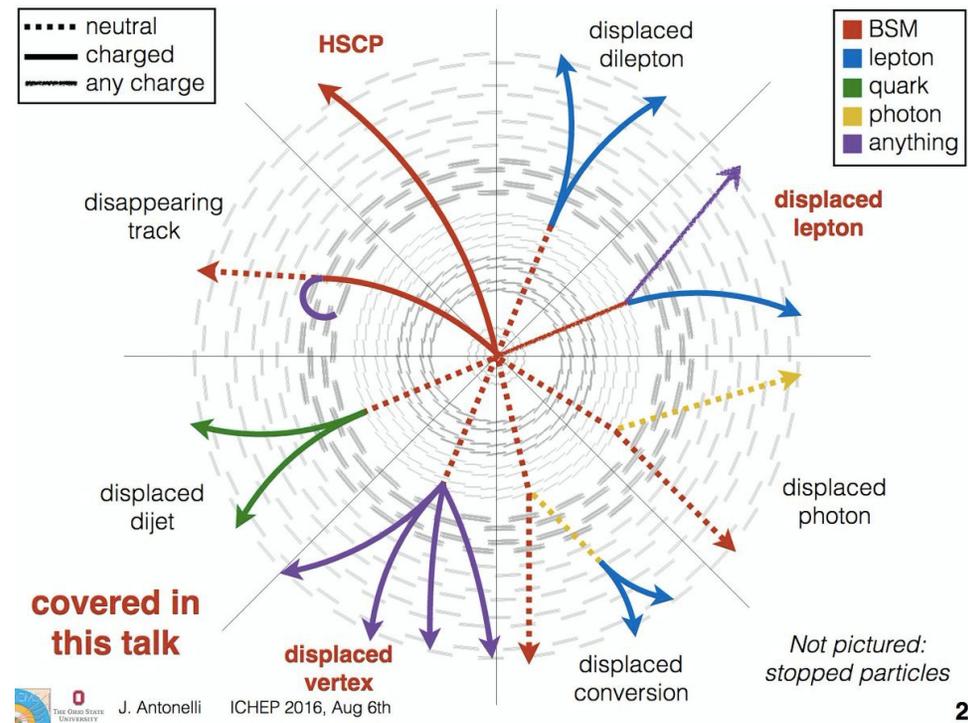
- a. No interactúan con la materia del SM.
- b. Son visibles solo cuando han decaído.

## 4. Las búsquedas por LLP's de ATLAS, CMS, LHCb están limitadas por:

- a. Disparos (Triggers)
- b. Fondo de las colisiones
- c. Fondo del haz
- d. Rayos Cósmicos
- e. Tamaño del detector
- f. LLPs pueden escapar del detector sin ser medidas

Un detector con un ambiente libre de fondos incrementarían la sensibilidad.

**MATHUSLA** está diseñado para ser ese tipo de detector



CMS Collab., PRD 94  
(2016)112004

# (MAssive Timing Hodoscope for Ultra Stable neutral pArticles)

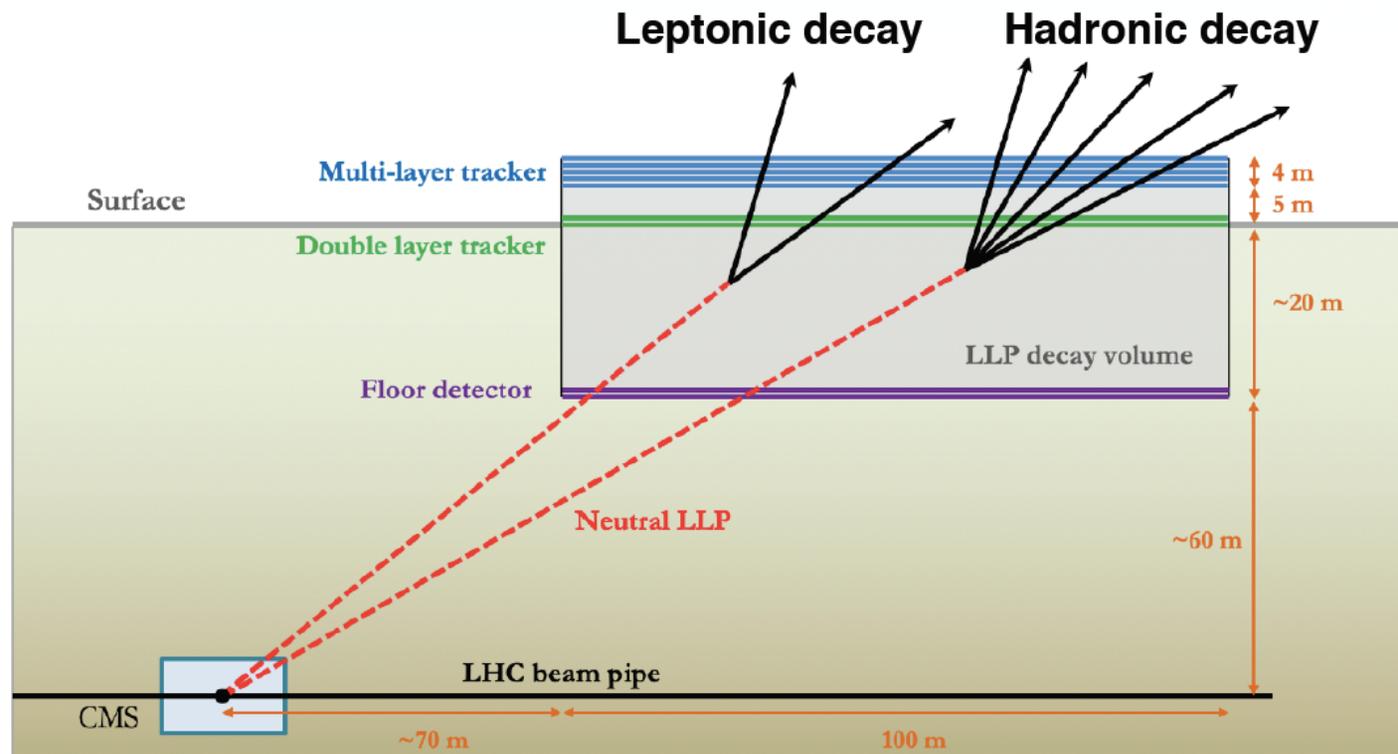


1. Propuesta:

- Se buscan LLP's con  $10^7\text{m} < c\tau < 10^8\text{ m}$ .

2. Descripción:

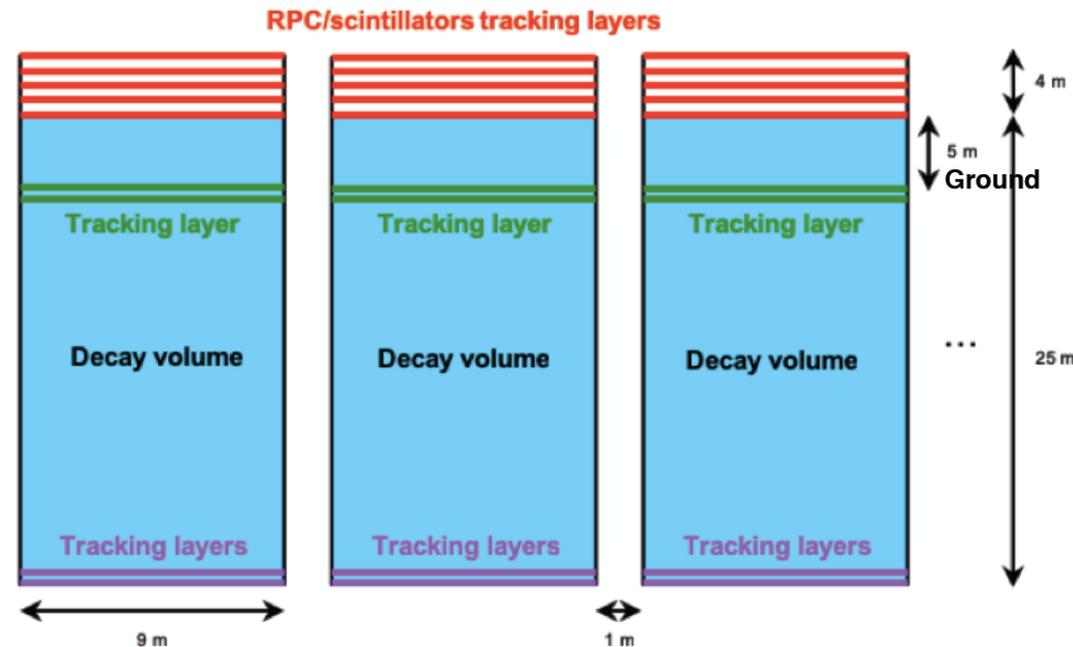
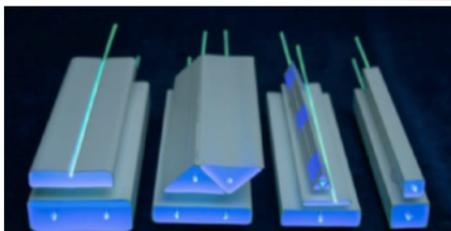
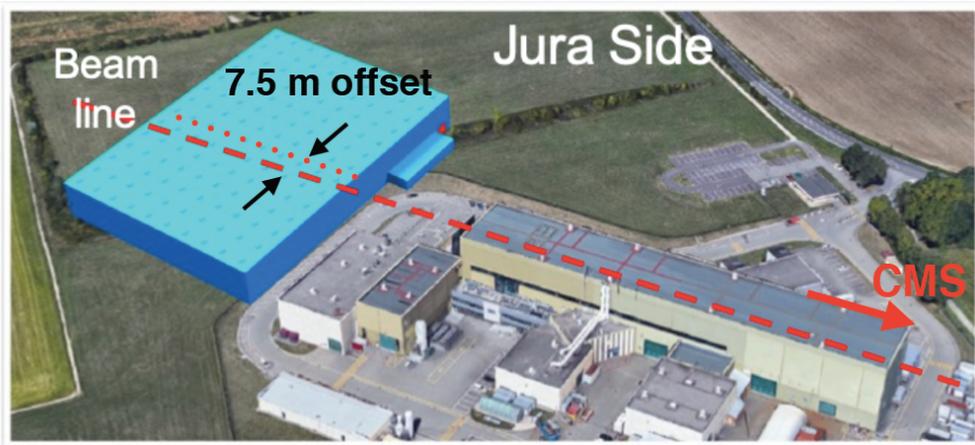
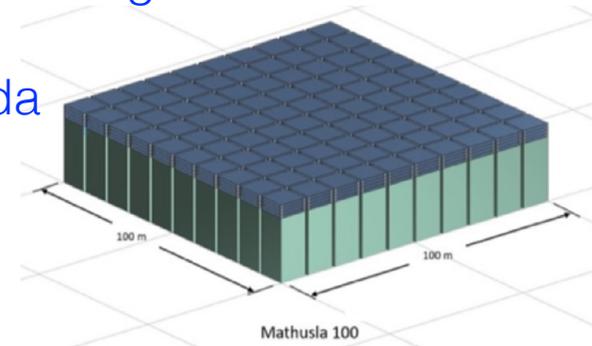
- Hodoscopio con área grande para buscar decaimientos de LLP's en un volumen de  $100\text{m} \times 100\text{m} \times 25\text{m}$  de aire
- Sobre la superficie del LHC, a 70m del punto de interacción de CMS.
- Ambiente con poco fondo.
- Planeado para la siguiente puesta en marcha del LHC High Luminosity-LHC run.



### 3. Diseño experimental: (MASSive Timing Hodoscope for ULtra Stable neutral pARTICLES)



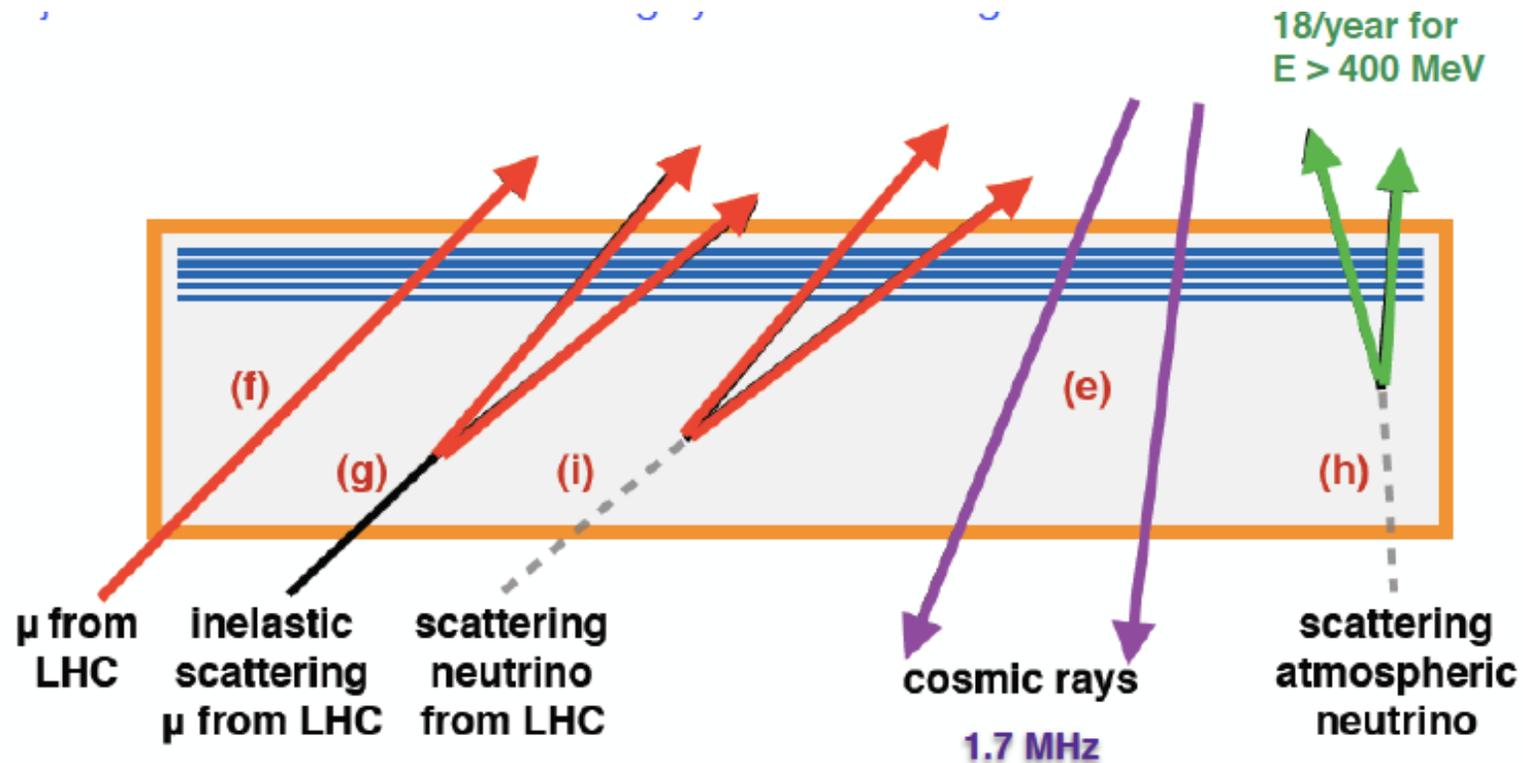
- Sistema de disparo:
  - 9 capas de centelladores con un diseño modular
    - 5 sobre la superficie: Disparo
    - 2 intermedias mejoran la precisión de la posición de la partícula
    - 2 en el fondo: Funcionan como veto para las partículas cargadas
- Barras de centellador:
  - Acopladas a SiPM's con desplazador de longitud de onda
  - 5mx4cmx2cm
  - De una capa a la otra, la barra rotada 90° a lo largo.
  - Resolución espacial: 1 cm
  - Resolución temporal: 1ns



# (MAssive Timing Hodoscope for Ultra Stable neutral pArticles)

## 4. Fondo:

- Neutrinos y muones del LHC, neutrinos atmosféricos y rayos cósmicos.
- Rechazados gracias a la información del sistema de seguimiento de la traza y la información del tiempo de llegada.



Letter of Intent for MATHUSLA, CERN-LHCC-2018-025, LHCC-I-031

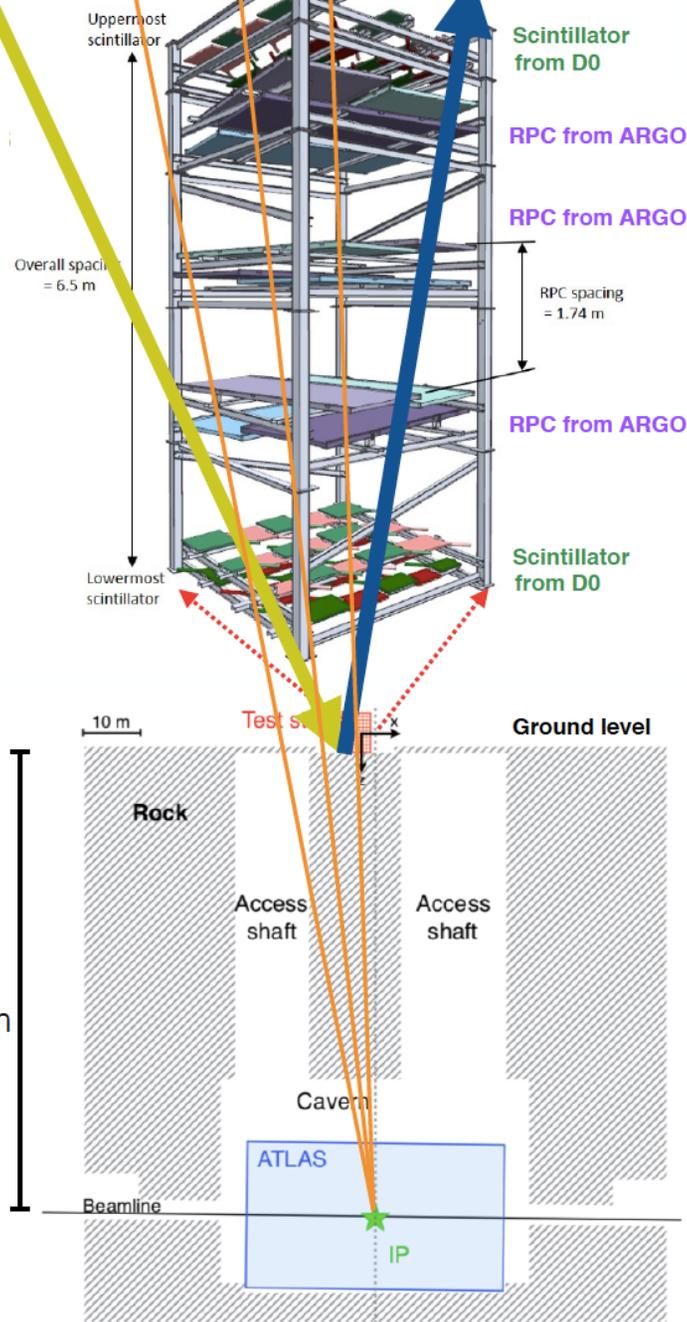
# Banco de pruebas sobre PI ATLAS

- Datos tomados en 2018
- Sobre ATLAS, punto de interacción  $(\Delta x, \Delta y) = (2.4\text{m}, 0\text{m})$
- Volumen de  $2.5\text{m} \times 2.5\text{m} \times 6.5\text{m}$
- 6RPC/2 capas de centelladores
- Reconstrucción de las trazas usando un fit  $\chi^2$
- Resolución temporal: 2.5 ns

RC

Muones

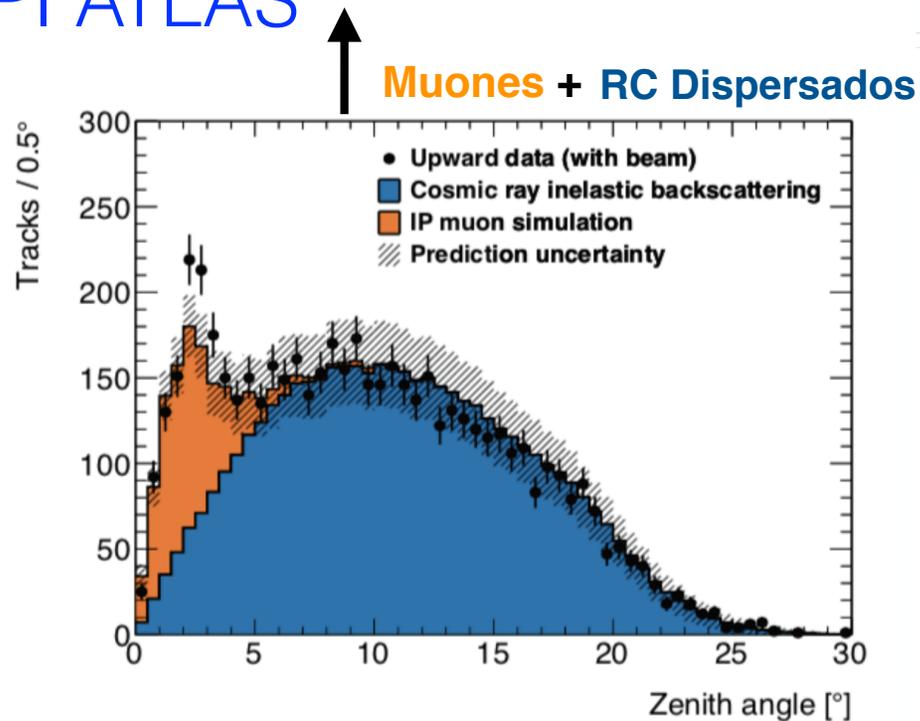
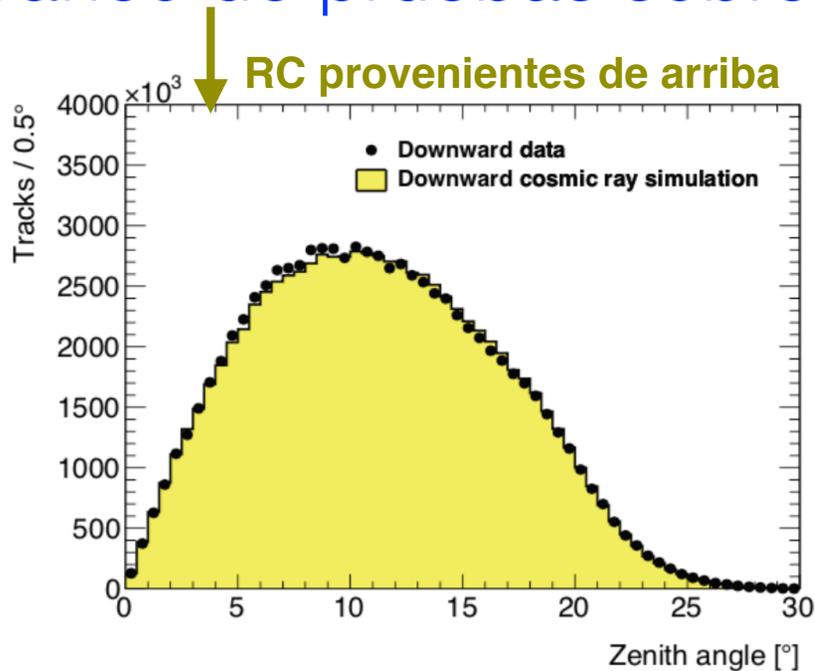
RC Dispersados



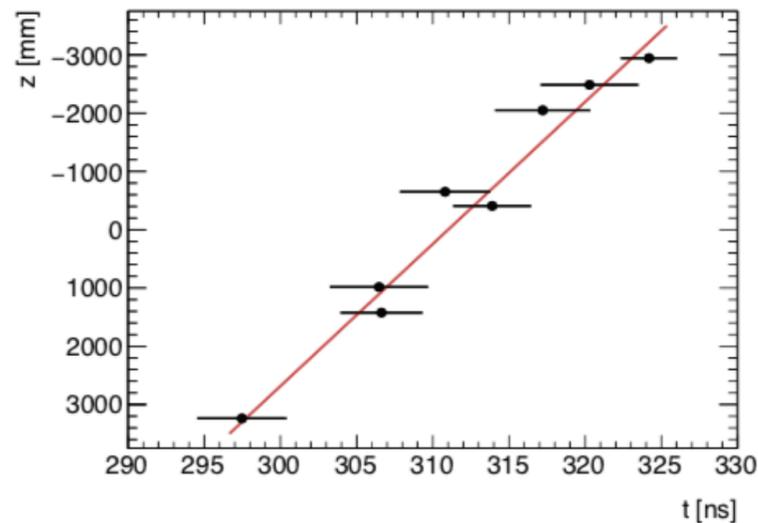
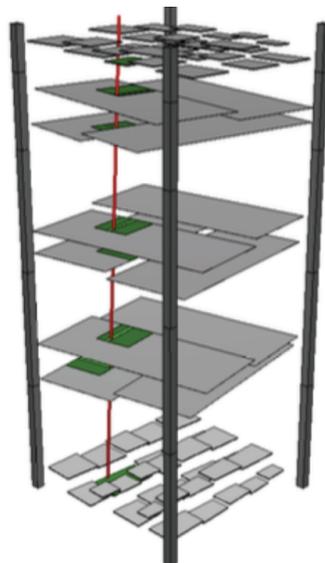
## Objetivo:

- Estudios de diseño
- Fuentes dominantes de fondo para mediciones
  - **RC's de arriba**
  - Partículas cargadas del SM hacia arriba
    - **Muones de colisiones pp en el LHC**
    - **Dispersión inelástica de RC's**

# Banco de pruebas sobre PI ATLAS



- Los datos concuerdan con las simulaciones MC
- El fondo está bajo control



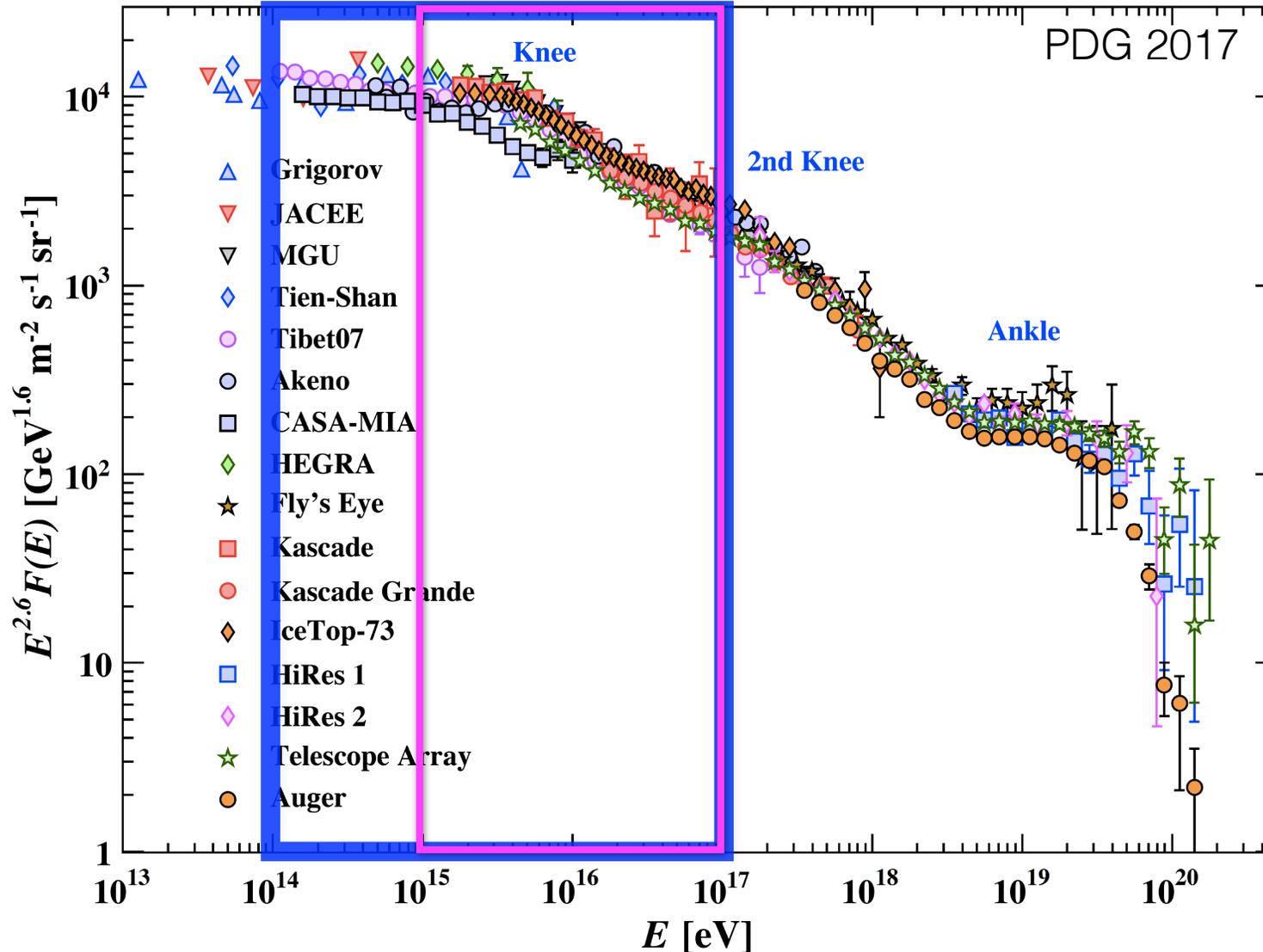
Ejemplo de una traza que va hacia arriba

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



Considerando el tamaño y altitud del aparato:

Rango de energía esperado:  $10^{14}$ - $10^{17}$  eV Eficiencia total  $>10^{15}$  eV



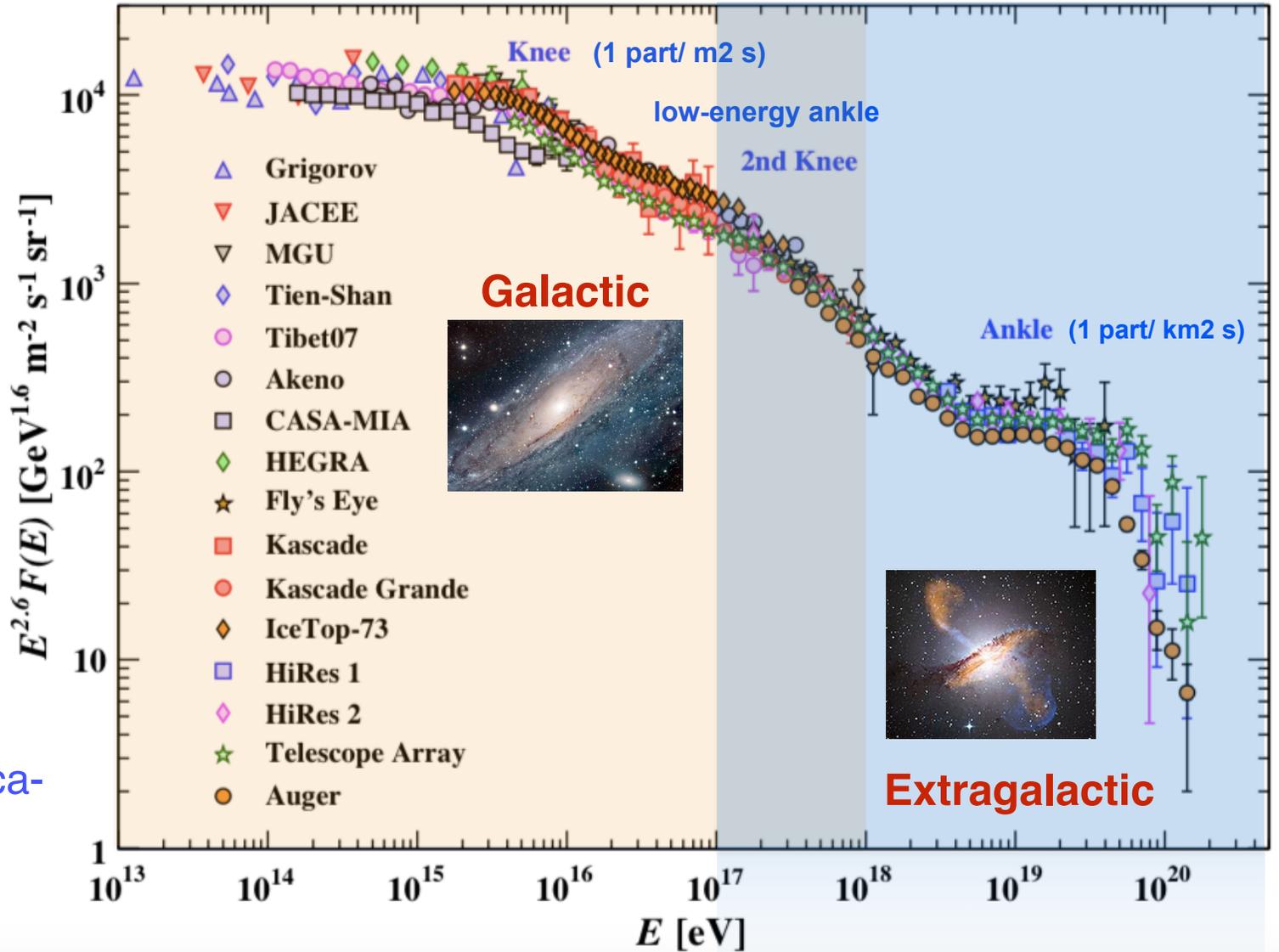
# Rayos C3smicos

El espectro de energa se extiende desde  $\approx(100)$  MeV hasta ZeV



> Preguntas:

- 1) Origen de las estructuras en el espectro.
- 2) Composici3n.
- 3) Fuentes.
- 4) Propagaci3n.
- 5) Mecanismos de aceleraci3n.
- 6) Transici3n Gal3ctica-extragal3ctica.

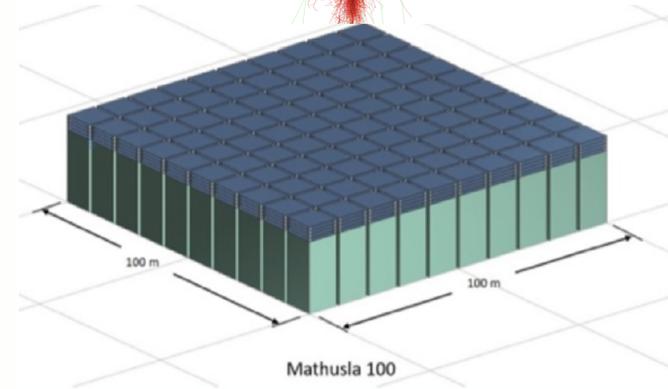
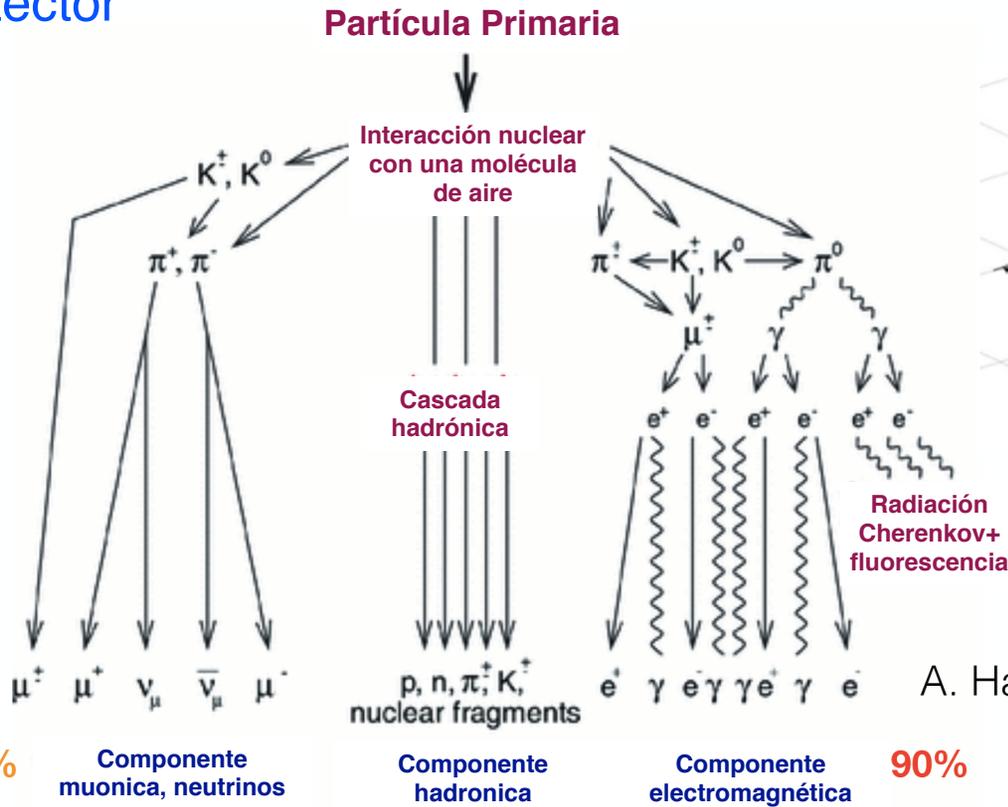
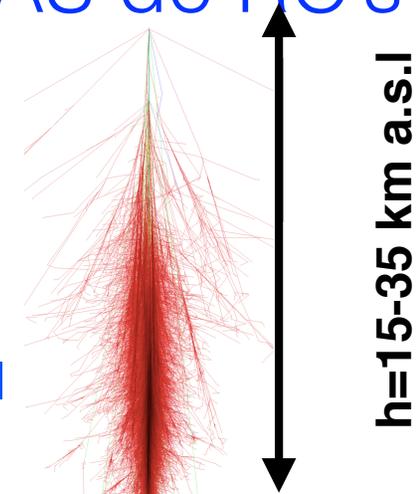


# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



$h \sim 436 \text{ m a.s.l.} (\sim 975 \text{ g/m}^2)$

- Medición de EAS de RC's
- Se pueden medir las componentes cargadas de los EAS
- Existe saturación de la señal en las barras centelladoras para más de 1 partícula que alcanza el detector

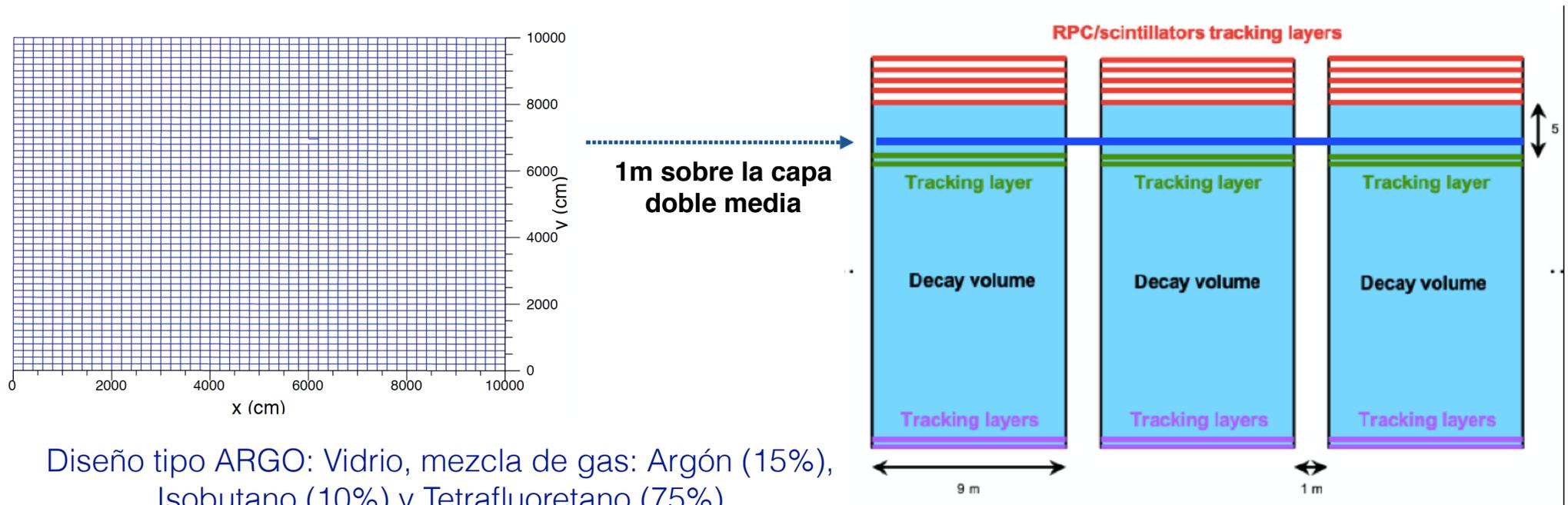


A. Haungs

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

Se planea agregar una capa extra de RPC para mejorar la detección de EAS

- Medición de partículas cargadas en los EAS de RC's ( $e+\mu$ )
  - Densidades (hasta  $10^4$  partículas cargadas/m<sup>2</sup>)
  - Tiempo de llegada de la primera partícula por barra (resolución temporal=1ns)
- 2500 blocs grandes (Big Pads) de tamaño 2mx2m
- Los Big Pads podrían otorgar estructuras de espacio tiempo finas para los EAS

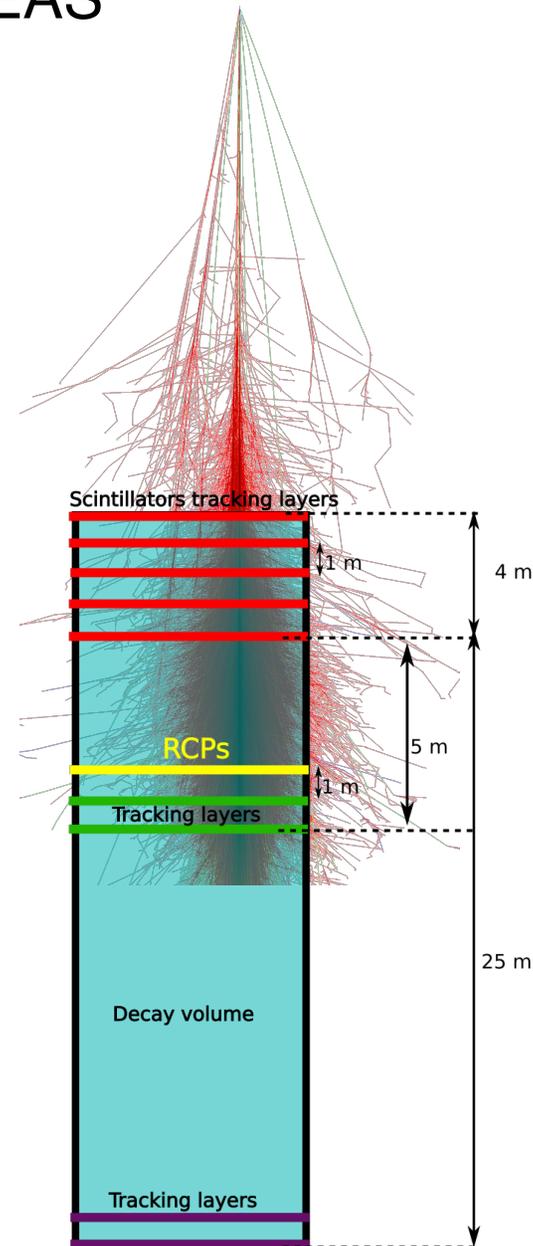
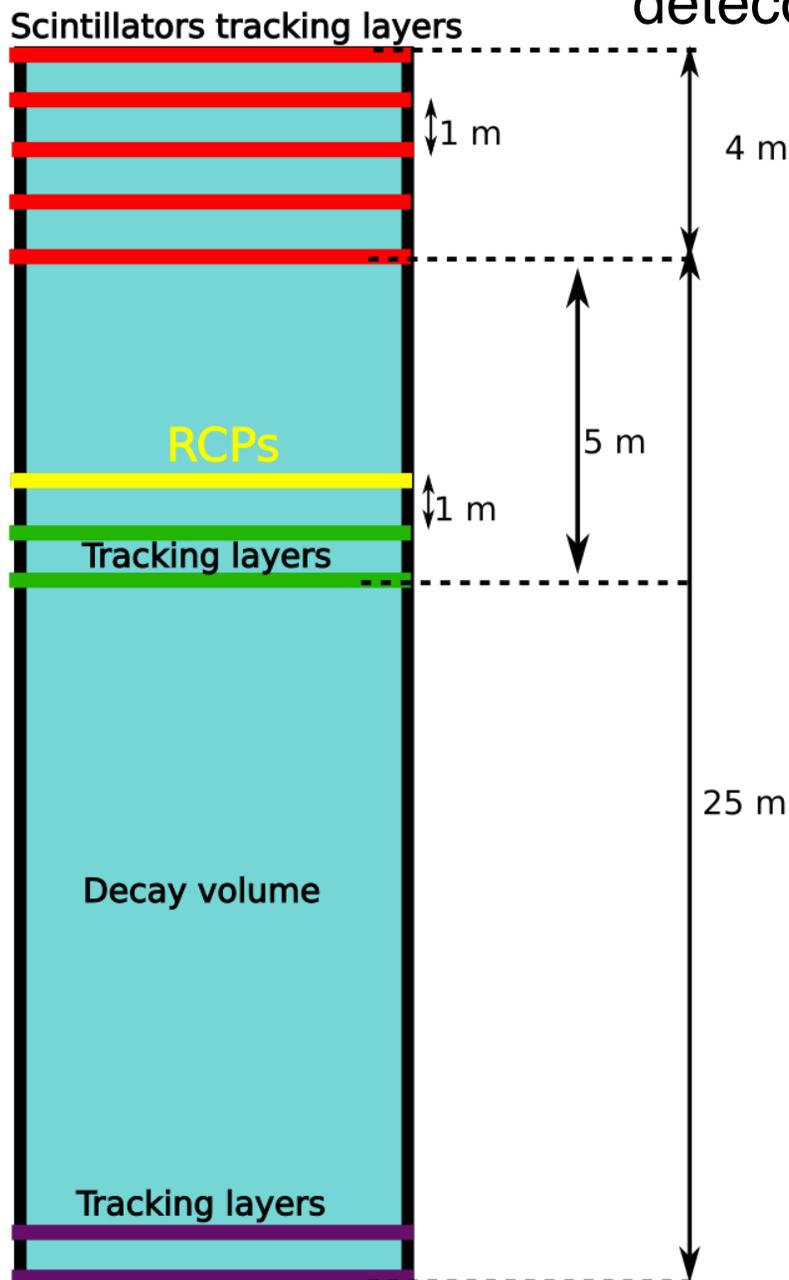


Diseño tipo ARGO: Vidrio, mezcla de gas: Argón (15%), Isobutano (10%) y Tetrafluoretano (75%)

B. Bartoli et. al. Astroparticle Physics 67 (2015)47-61

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

Se planea agregar una capa extra de RPC para mejorar la detección de EAS



# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

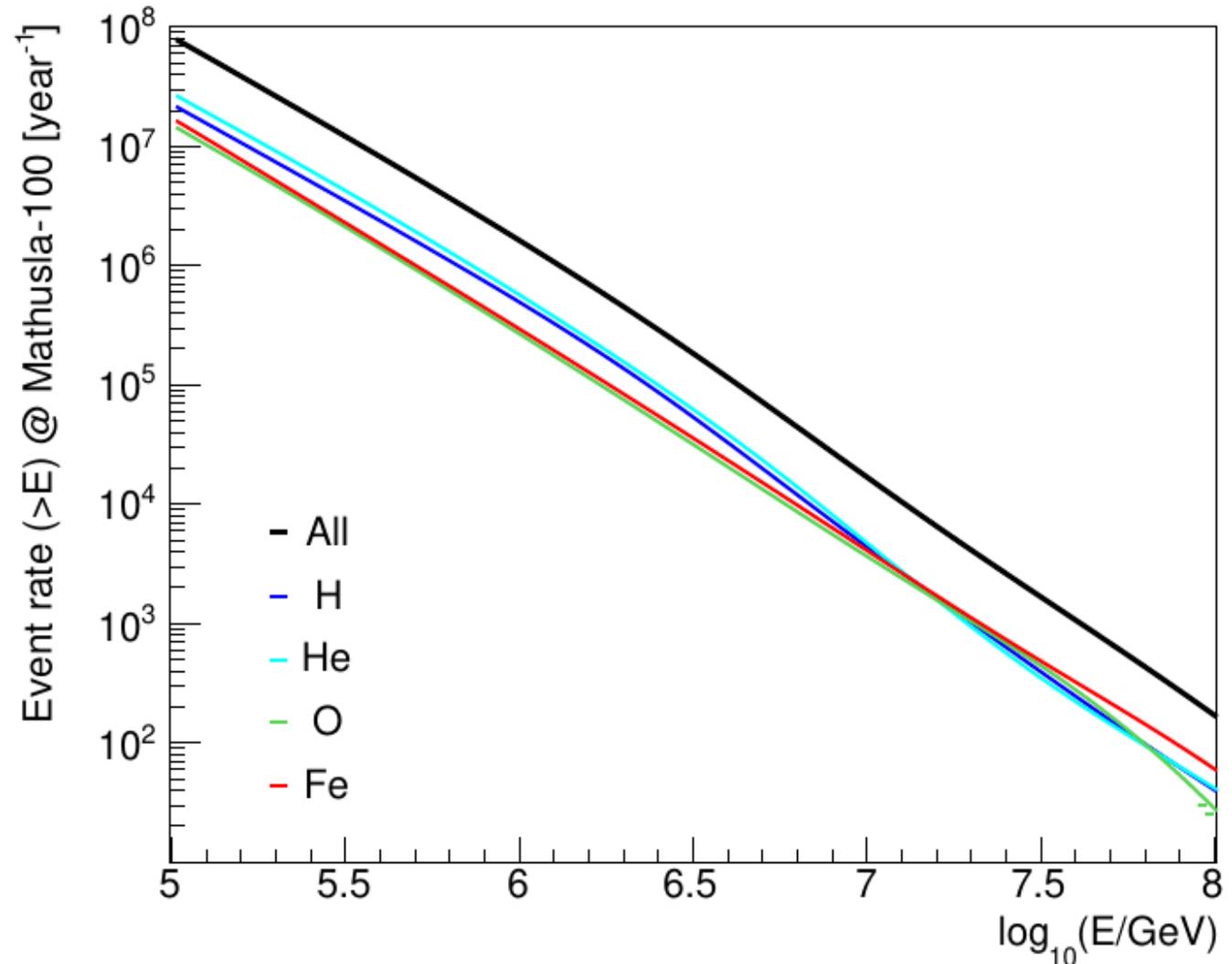


## Razón de detección de eventos

Número de eventos que se espera sean detectados por MATHUSLA, para primarios con energía mayor a E, considerando:

- Ángulo cenital  $0^\circ$ - $90^\circ$
- Campo de visión instantáneo de  $\pi$  sr
- Detector plano

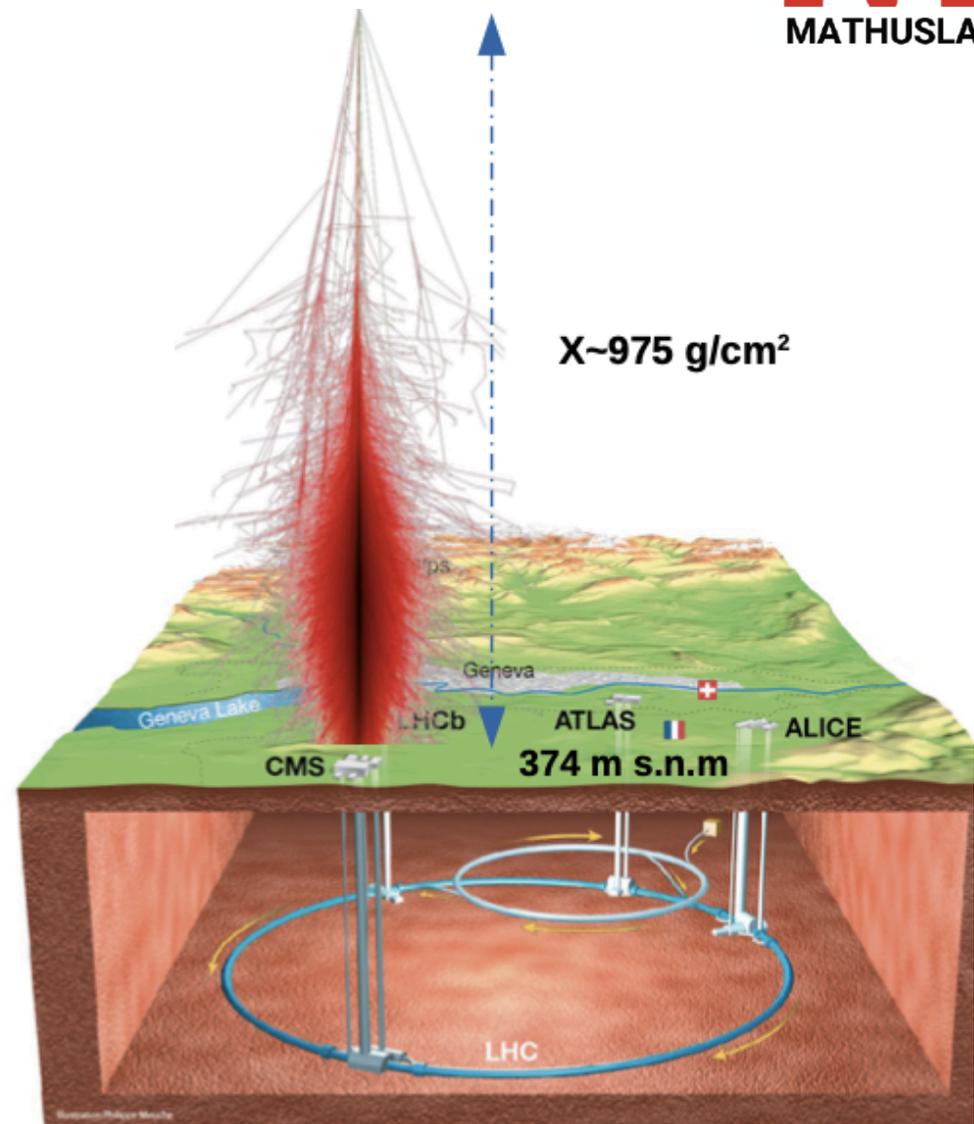
Las intensidades de los RC se tomaron del modelo Global Spline Fin, que se modificó usando las últimas mediciones de los RC en el rango 3GeV a  $10^{11}$  GeV



PoS(ICRC2017) 533 (2017)

## Simulaciones

<b>CORSIKA 77100</b>	
Modelos hadrónicos para altas energías	EPOS-LHC SIBYLL2.3c QGSJET-II-04
Modelo hadrónico a bajas energías (<200 GeV)	FLUKA GEISHA
Grupos de masa	H, Fe
Rango de energía para los primarios	$10^{12} - 10^{18}$ eV
Espectro primario	$E^{-2}$
Rango azimutal	Verticales: $0^\circ - 20^\circ$ Inclinados: $70^\circ - 80^\circ$
Energías de corte	Hadrones (100 MeV) $\mu$ (100 MeV) $e^\pm$ (3 MeV) $\nu$ (3 MeV)
Modelo atmosférico	Standar US model curved
Campo magnético	$B_x = 22.1 \mu\text{T}$ , $B_z = 41.6 \mu\text{T}$
Geometría	Detector plano

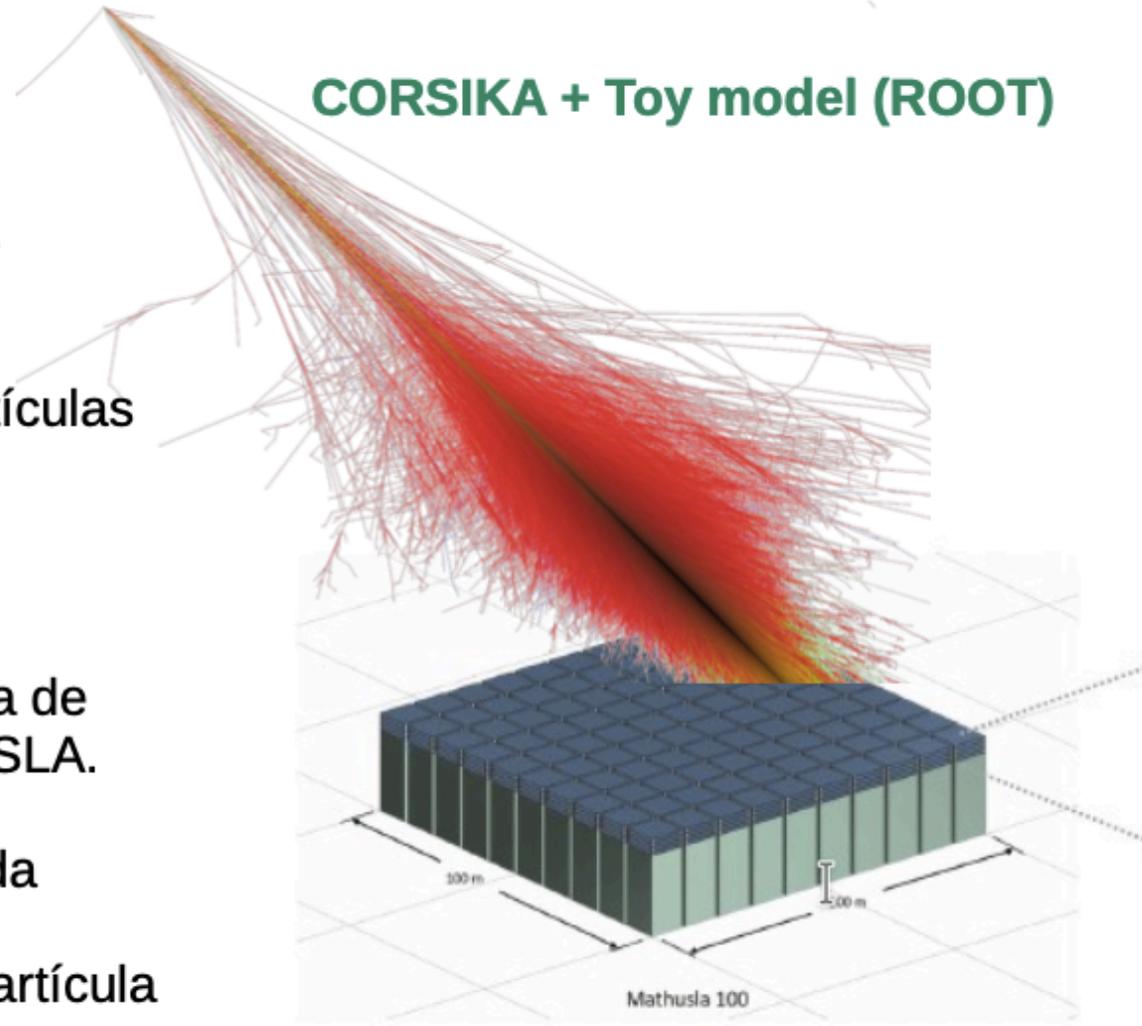


MATHUSLA physics, white paper 2018

## Metodología

- Solo se registran partículas cargadas  $e^\pm, \mu^\pm, \pi^\pm, K^\pm, p^\pm$
- Se permite el decaimiento de las partículas inestables, pero los productos de la desintegración son eliminadas de la simulación.
- Los núcleos de las cascadas están dispersado aleatoriamente en un area de 140 m x 140 m alrededor de MATHUSLA.
- Para cada evento se registra:
  - Las coordenadas de los hits en cada barra/BigPad.
  - El tiempo de arribo de la primera partícula en cada barra/BigPad.

CORSIKA + Toy model (ROOT)

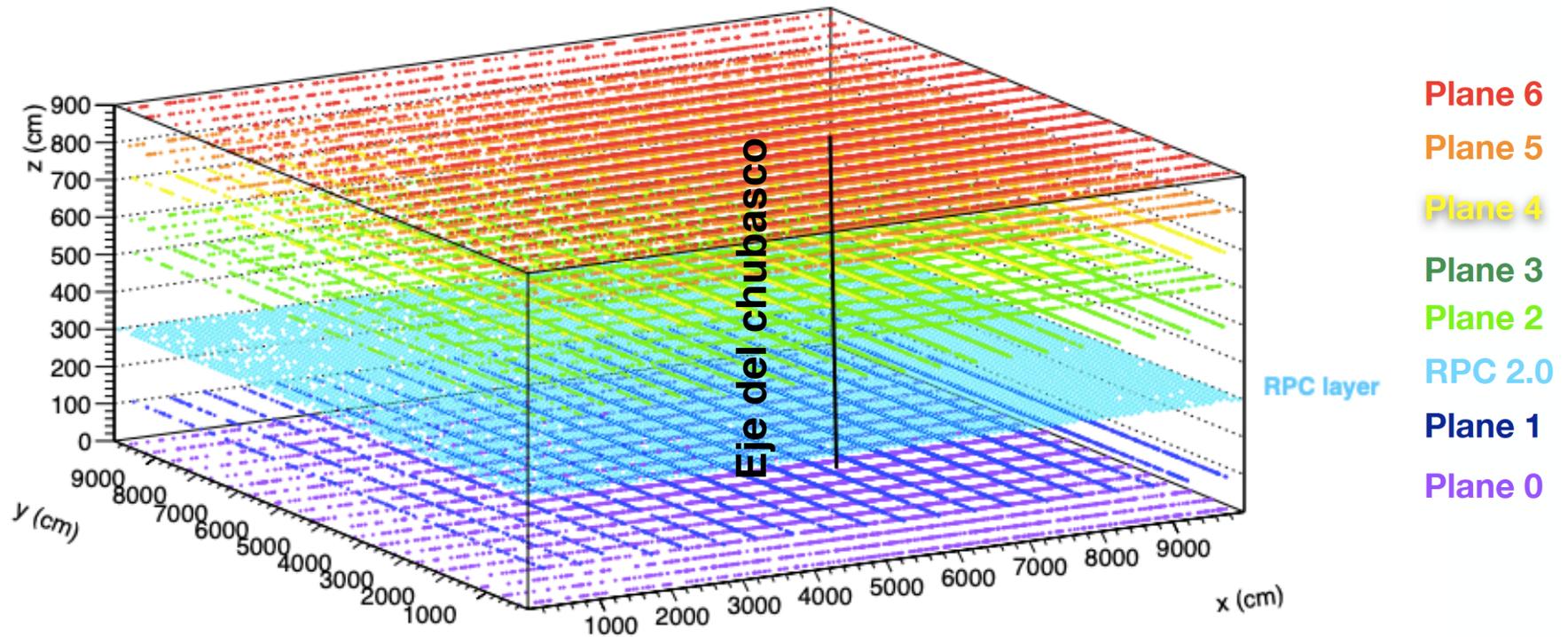


# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



## Ejemplo de un chubasco vertical MC

Proton,  $\log_{10}(E/\text{GeV}) = 5.42$ ,  $\theta = 11.37^\circ$ ,  $\phi = 34.65^\circ$



Coordenadas del centro de cada barra/BigPad con señal producida debido al chubasco en cada plano de MATHUSLA

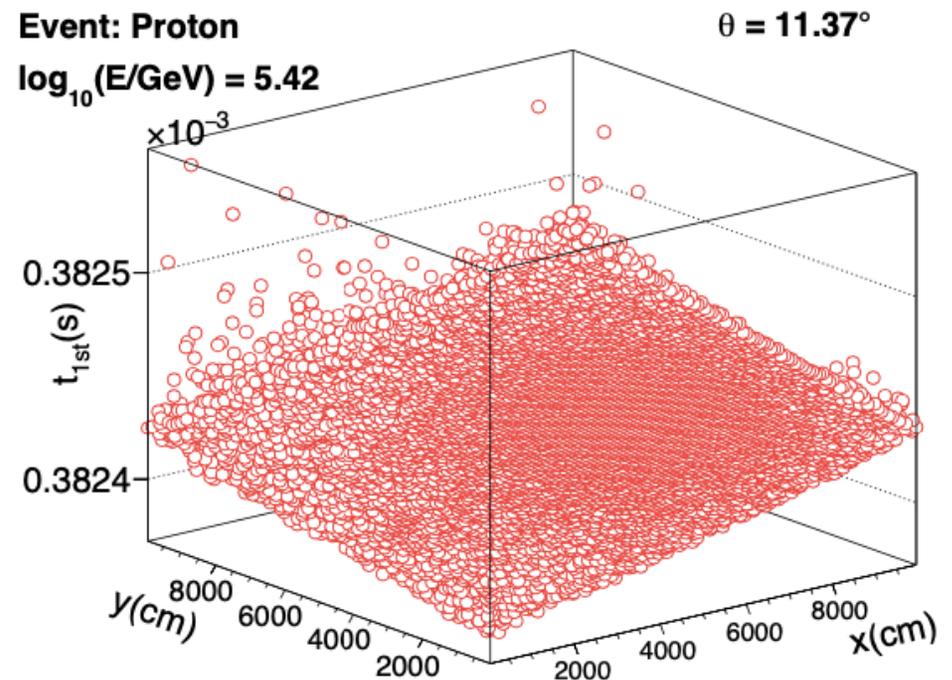
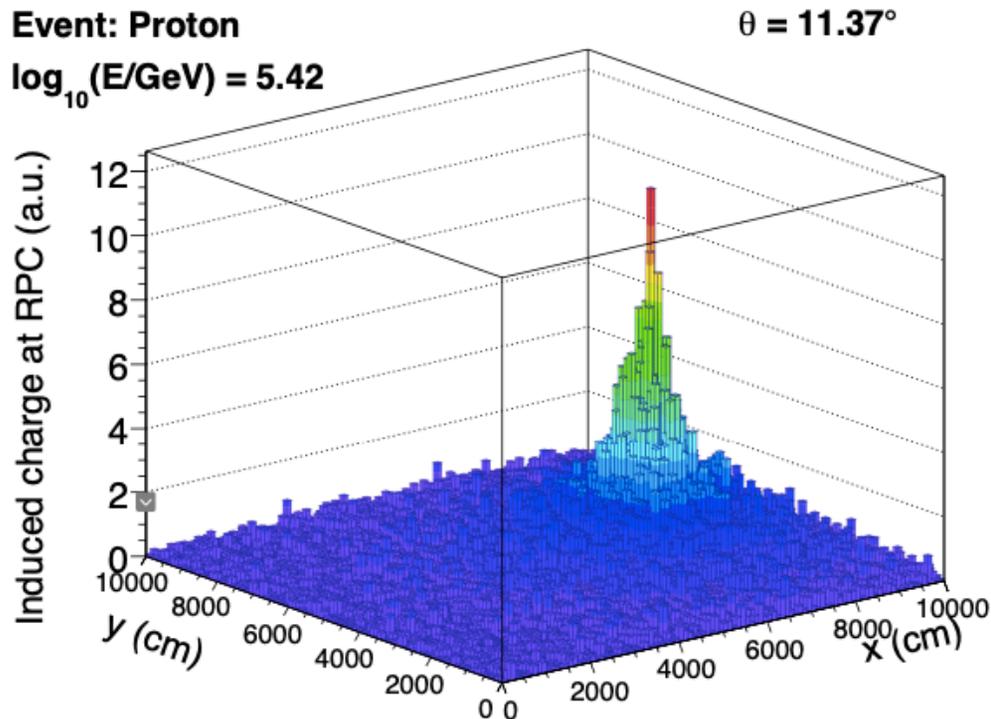
# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

## Ejemplo de un chubasco vertical MC



**Distribución bidimensional de la señal inducida en las Big Pads del RPC**

**Tiempo de arribo del frente del chubasco a las Big Pads del RPC**



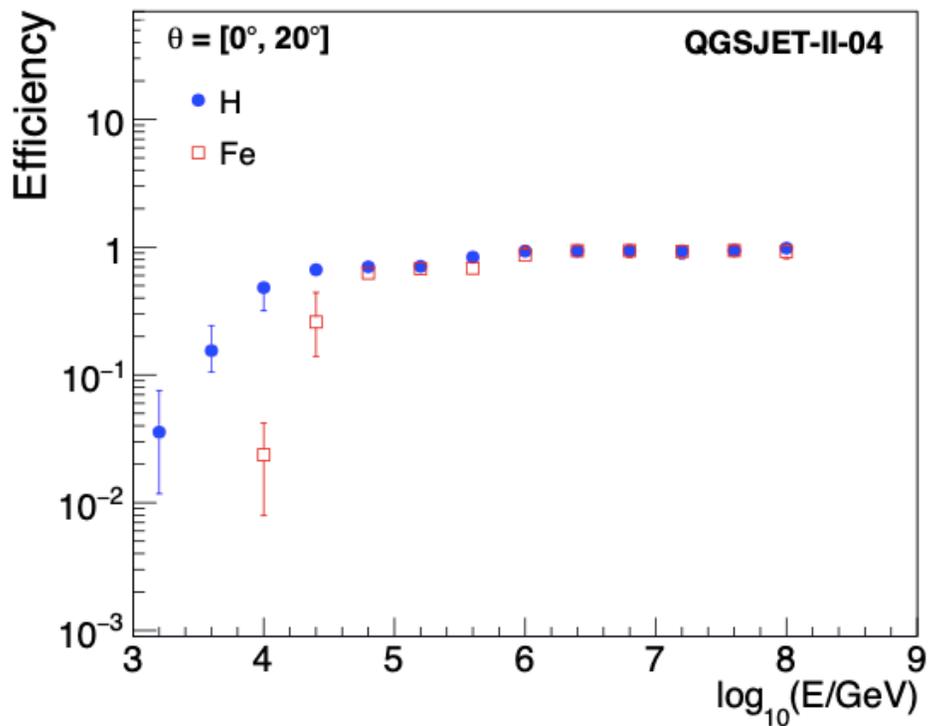
# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

## Eficiencia

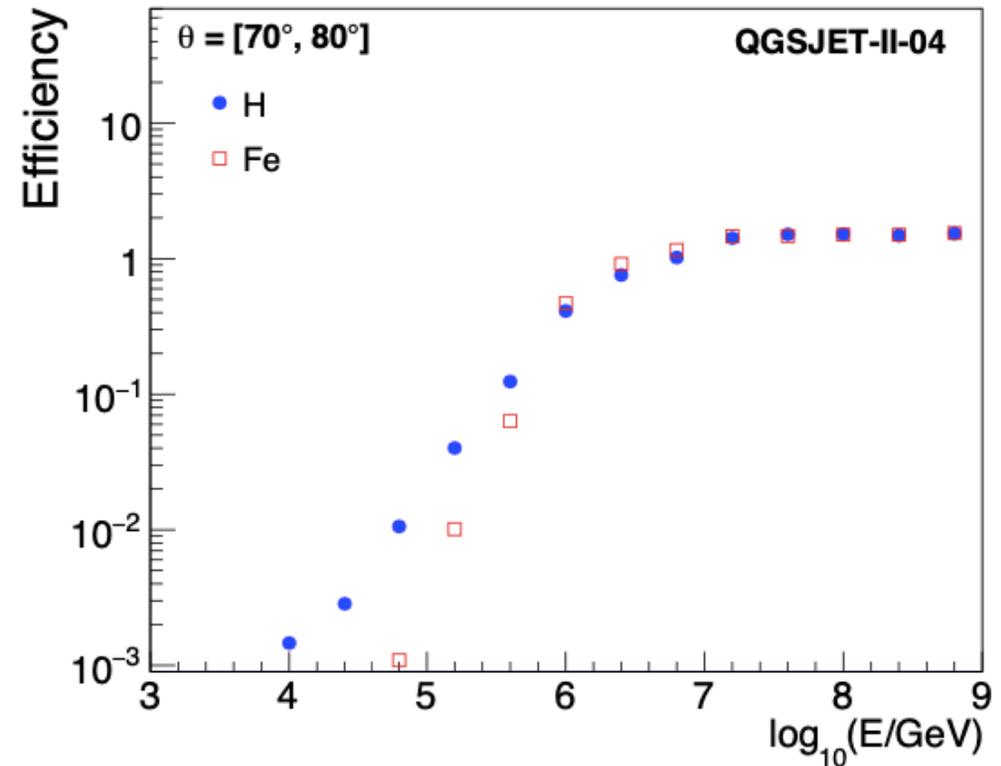


Chubascos verticales

Chubascos inclinados



**10<sup>14</sup> eV**



**10<sup>16</sup> eV**

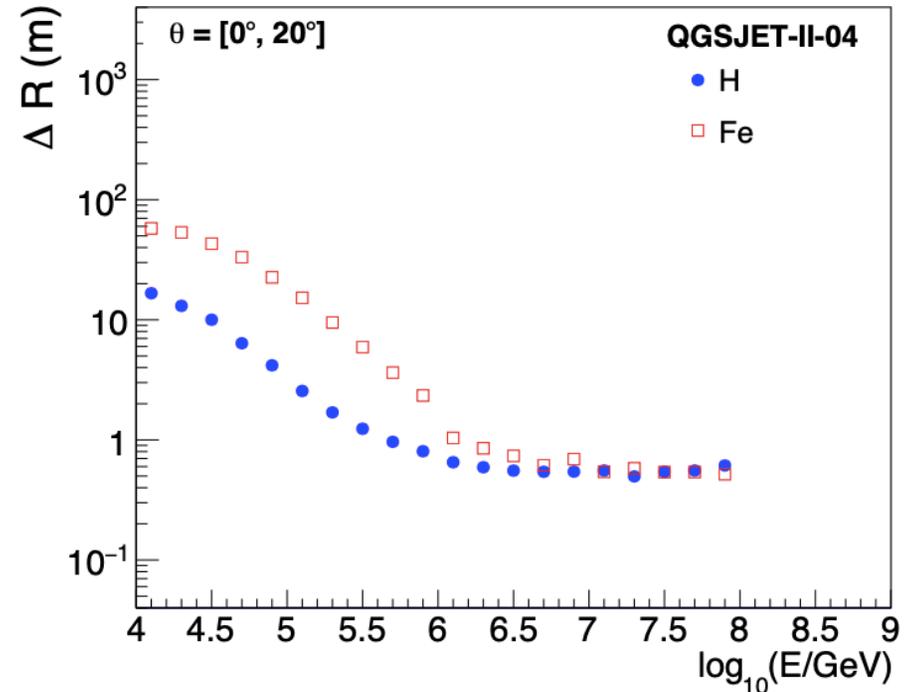
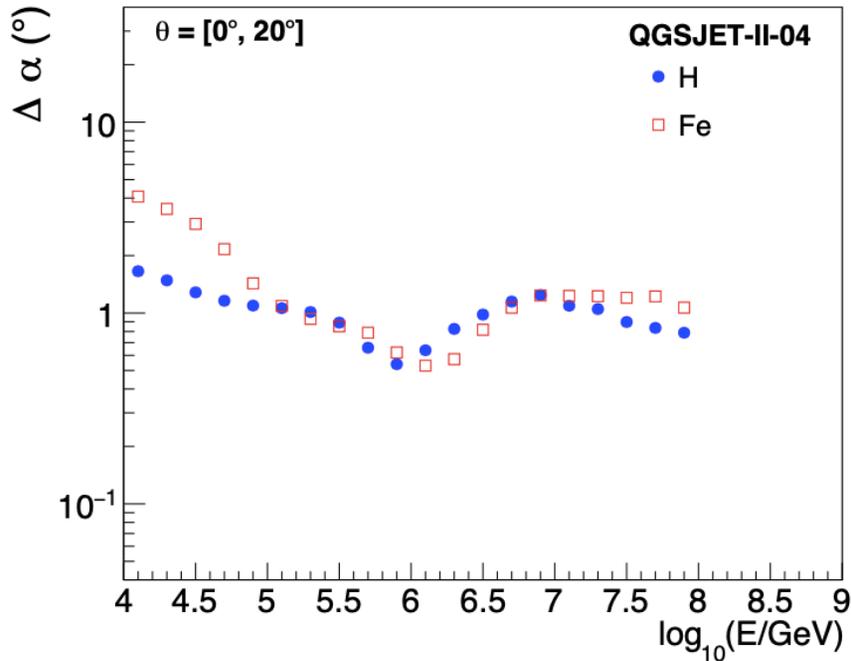
# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

## Ejemplo de un chubasco vertical MC



**Dirección de arribo con RPC  
(ajustando un plano al tiempo de arribo)**

**Posición del centro del chubasco  
con RPC (ajustando un cono a las distribuciones  
de densidad)**



$\theta < 20^\circ$   
Hits > 50

**Los valores son límites superiores ya que pueden mejorar con métodos de reconstrucción más elaborados**

KASCADE:  $\Delta \alpha < 0.3$  deg

NIMA Volume 513, Issue 3, 11 November 2003, Pages 490–510

ARGO:  $\Delta \alpha < [0.4, 1]$  deg

Astroparticle Physics 93 (2017) 46–55

ICETOP:  $\Delta \alpha = [0.2, 1]$  deg

J. Phys.: Conf. Ser. 718 052033

KASCADE:  $\Delta R < 1$  m

ARGO:  $\Delta R < 1$  m

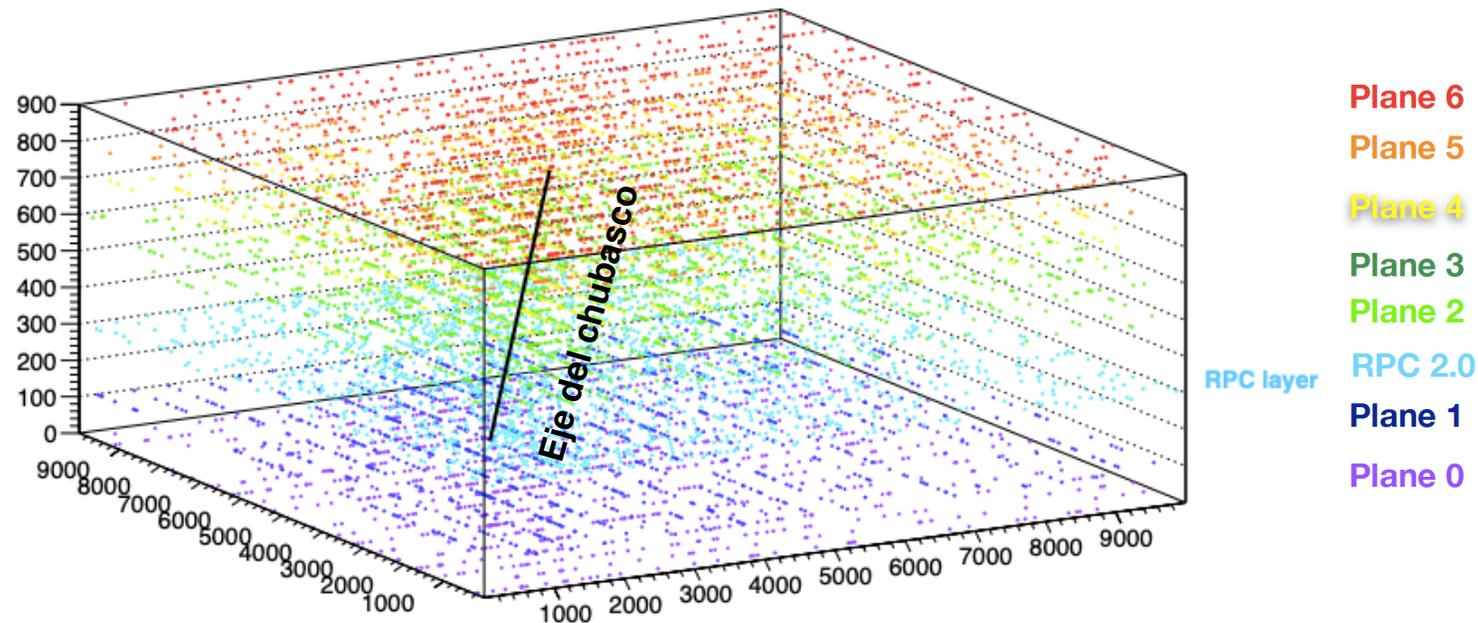
ICETOP:  $\Delta R < [4, 18]$  m

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



## Ejemplo de un chubasco inclinado MC

Proton,  $\log_{10}(E/\text{GeV}) = 7.90$ ,  $\theta = 74.11^\circ$ ,  $\phi = 73.44^\circ$



Coordenadas del centro de cada barra/BigPad con señal producida debido al chubasco en cada plano de MATHUSLA

- En los chubascos inclinados la atenuación de la componente  $e^+$  y es más importante
- Los muones son la componente dominante para EAS de alta energía a la altura de MATHUSLA y  $\theta > 50^\circ$
- Se han encontrado desviaciones importantes entre la componente muónica medida y las predicciones para chubascos inclinados

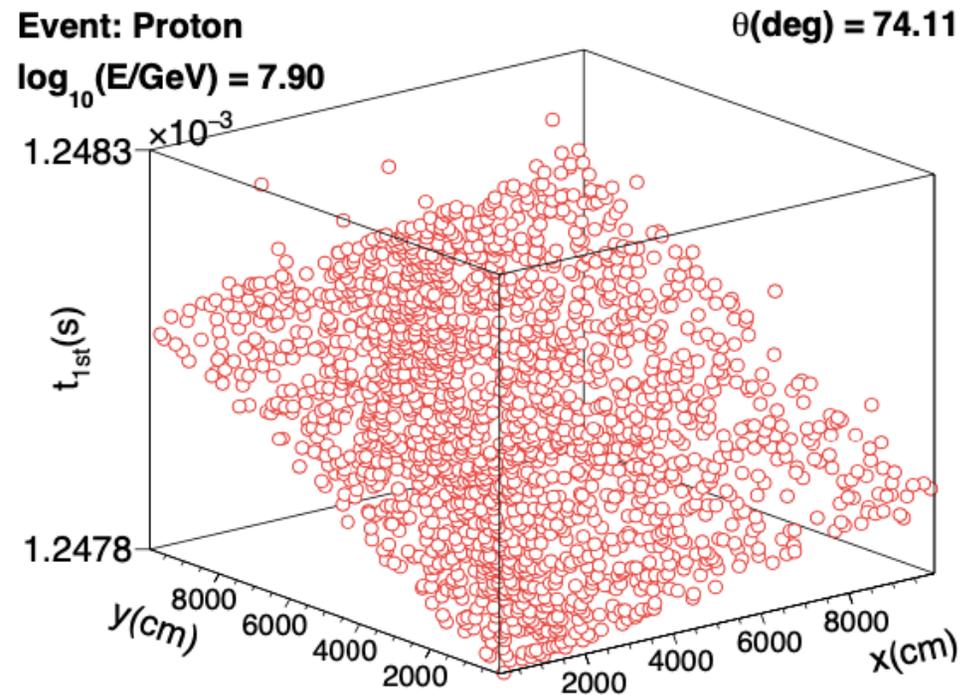
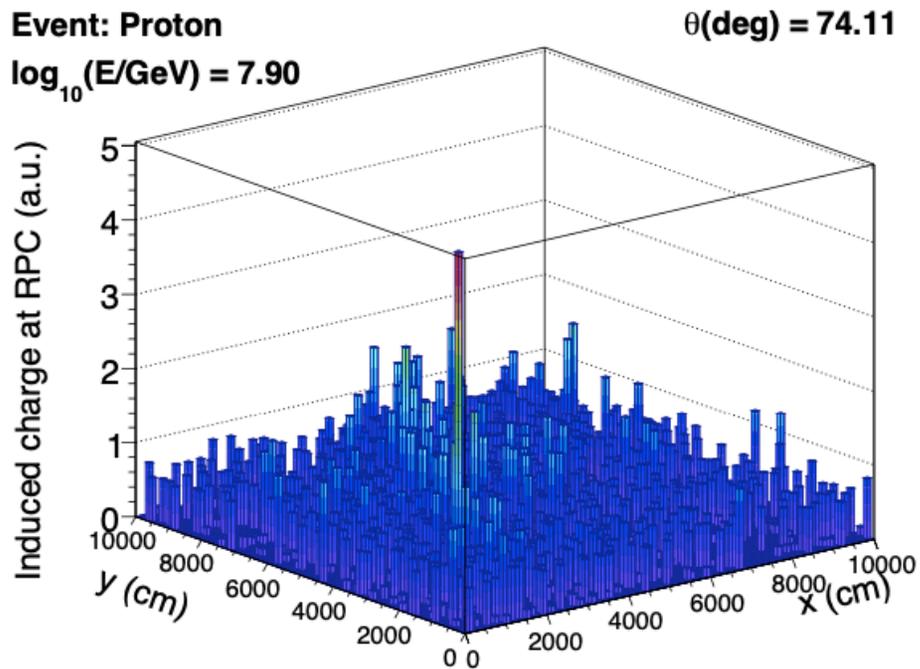
# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

## Ejemplo de un chubasco inclinado MC



**Distribución bidimensional de la señal inducida en las Big Pads del RPC**

**Tiempo de arribo del frente del chubasco a las Big Pads del RPC**



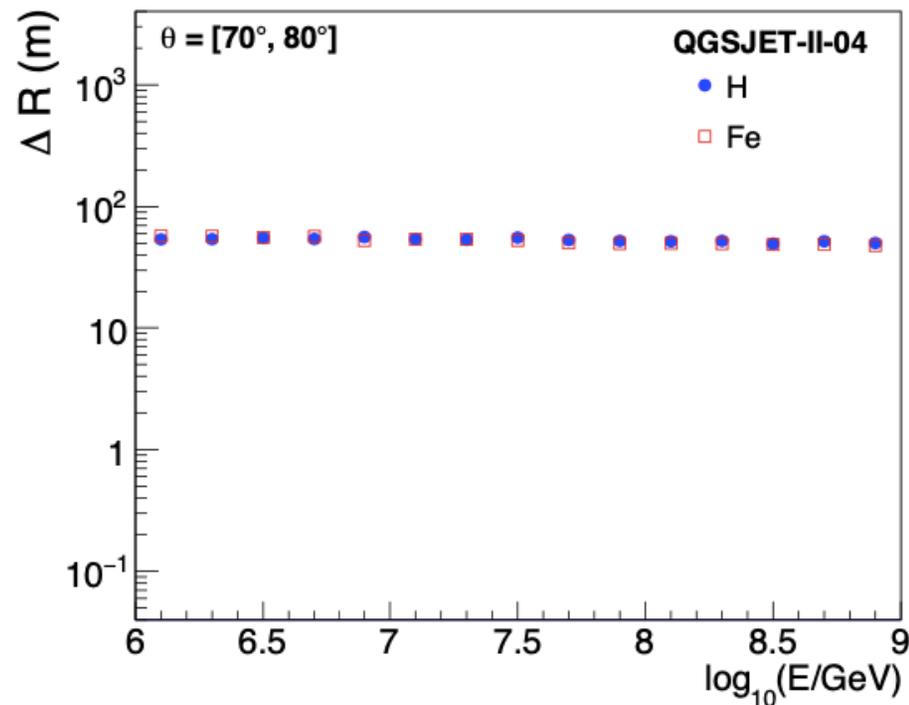
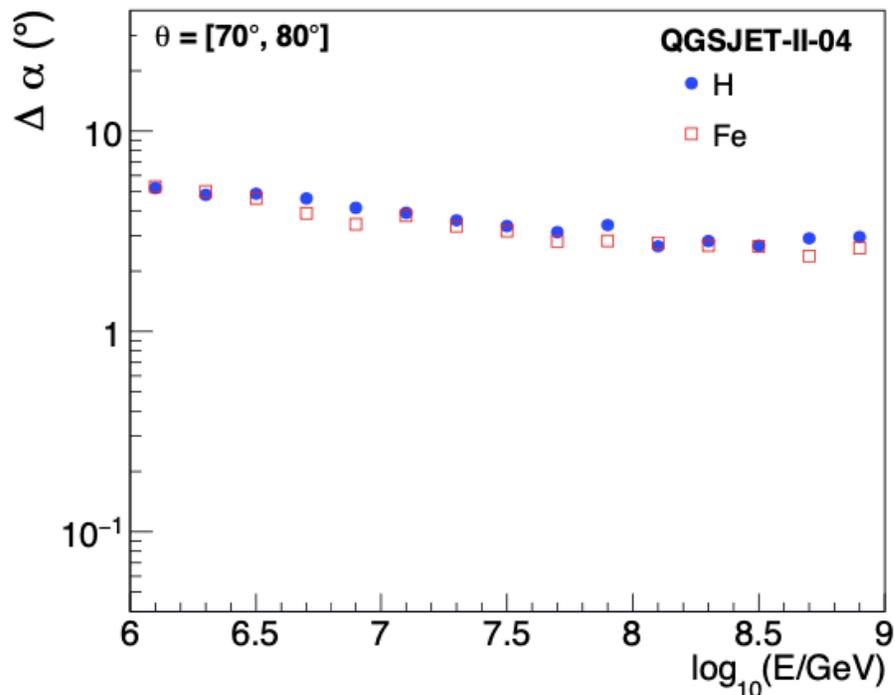
# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

## Ejemplo de un chubasco inclinado MC



**Dirección de arribo con RPC**  
(ajustando un plano al tiempo de arribo)

**Posición del centro del chubasco con RPC**  
(ajustando un cono a las distribuciones de densidad)



$70^\circ < \theta < 80^\circ$   
Hits > 50

**Los valores son límites superiores ya que pueden mejorar con métodos de reconstrucción más elaborados**

KASCADE:  $\Delta \alpha < 0.6 \text{ deg}$

ICRC 2007, ID 491, Vol. 4 (HE part 1), pages 203–206

KASCADE:  $\Delta R < 40 \text{ m}$

Auger:  $\Delta \alpha < 0.5 \text{ deg}$

JCAP, Volume 2014, August 2014

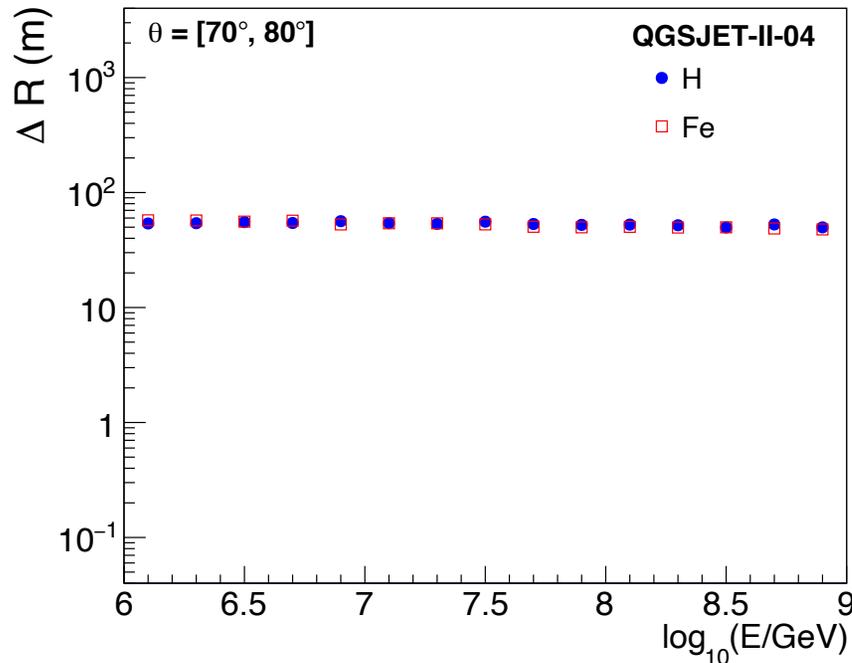
Auger:  $\Delta R < 108 \text{ m}$

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

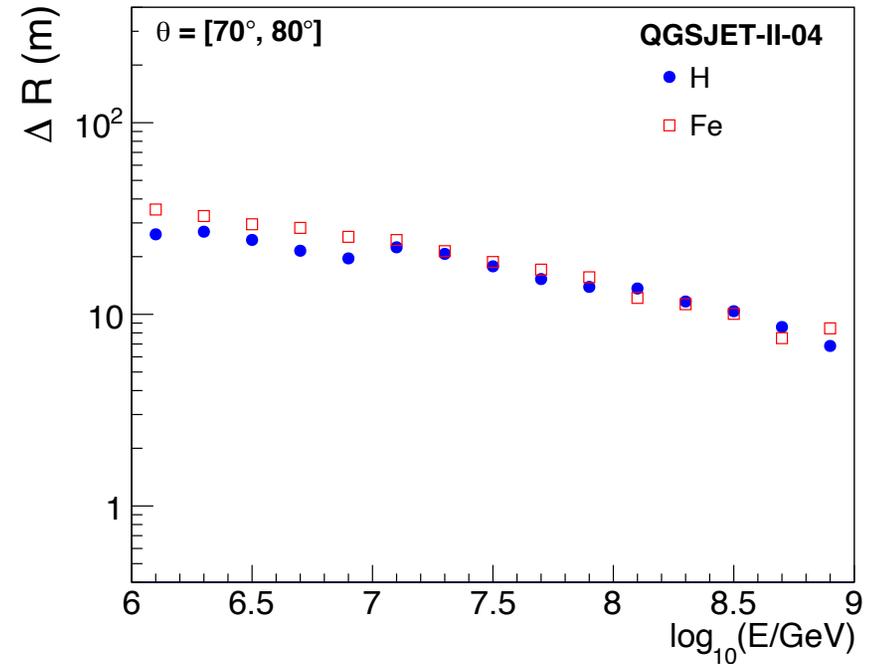
## Ejemplo de un chubasco inclinado MC



**Posición del centro del chubasco con el RPC**



**Posición del centro del chubasco con las placas centelladoras**  
No se saturan



**70° < θ < 80°**  
**Hits > 50**

**Los valores son límites superiores ya que pueden mejorar con métodos de reconstrucción más elaborados**

KASCADE:  $\Delta\alpha < 0.6$  deg

ICRC 2007, ID 491, Vol. 4 (HE part 1), pages 203–206

KASCADE:  $\Delta R < 40$  m

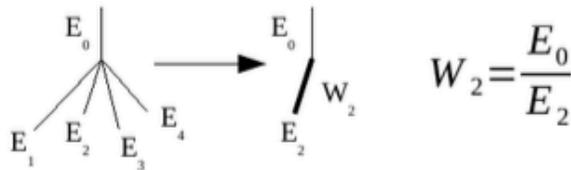
Auger:  $\Delta\alpha < 0.5$  deg

JCAP, Volume 2014, August 2014

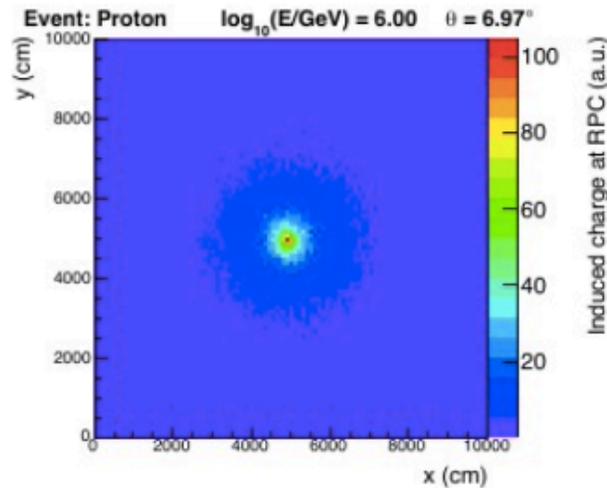
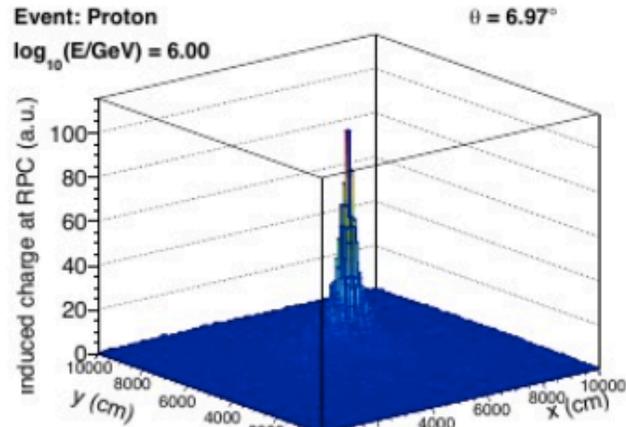
Auger:  $\Delta R < 108$  m

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's

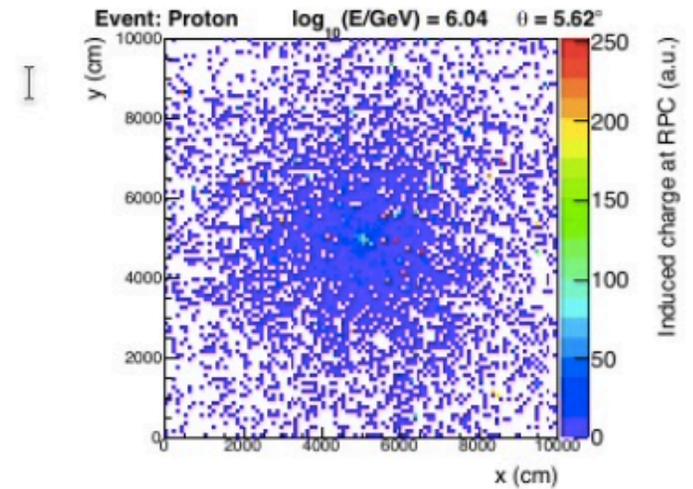
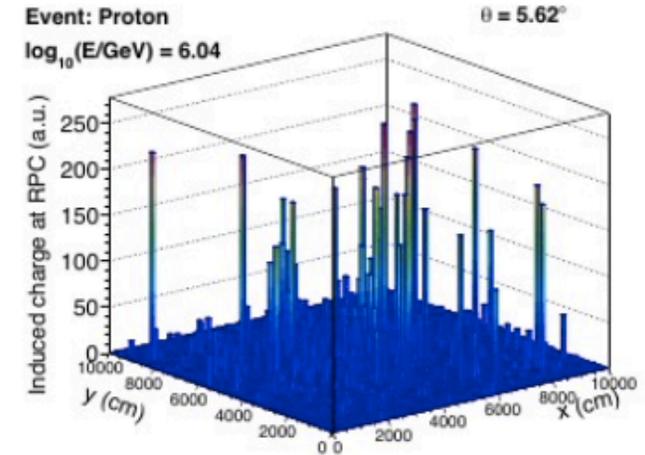
## Thinning effects



No thinning



Thinning



J.C. Arteaga-Velazquez

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



compute | calcul  
canada | canada

## Supercómputo



Laboratorio Nacional de Supercómputo  
del Sureste de México



- ✓ **Procesamiento**
- ✓ **Almacenamiento**



## Procesamiento

- CEDAR, Canadá
- LARCAD, México

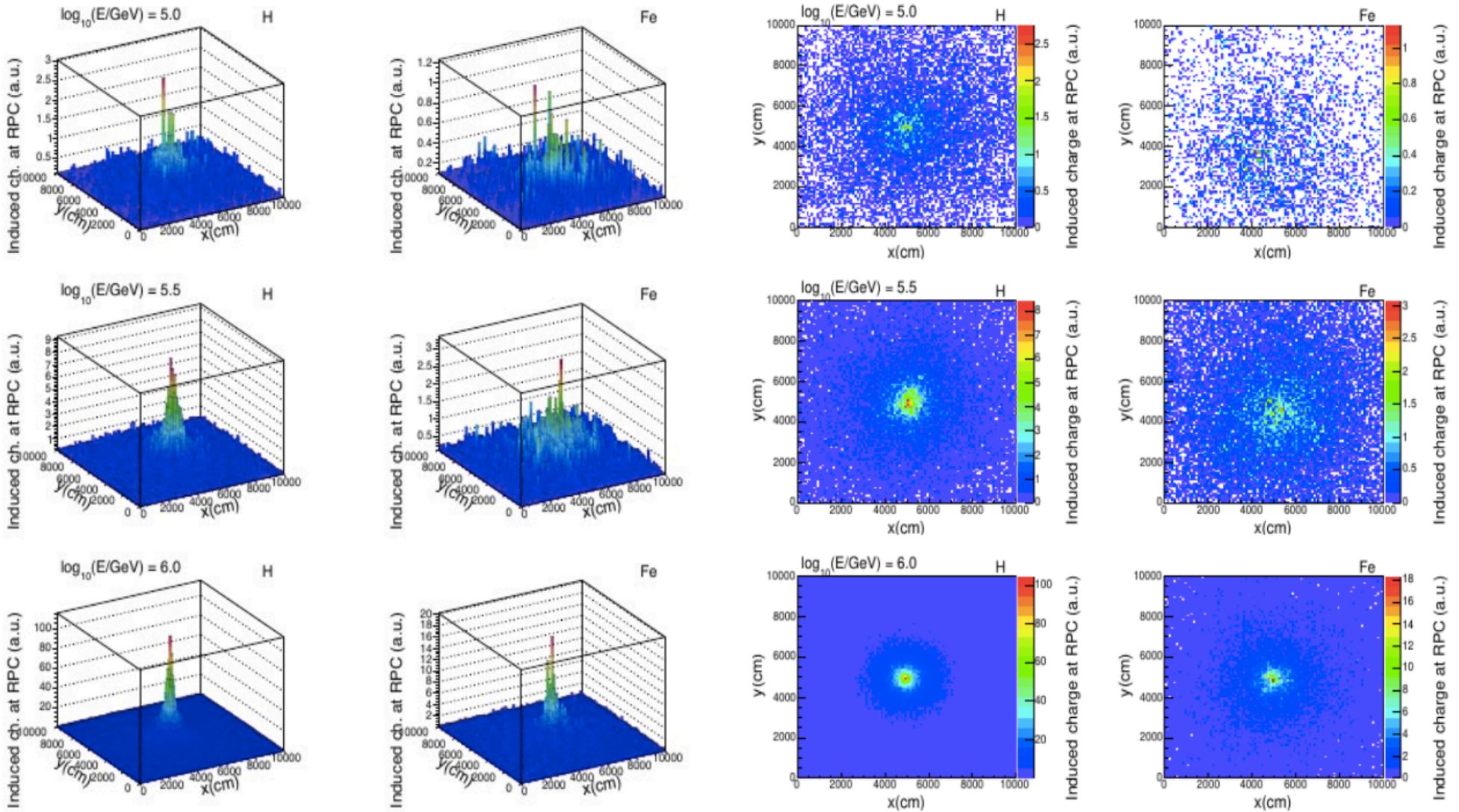
Rango de energía	Eventos verticales	Eventos inclinados
1 – 10 TeV	1000 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: ~ 3 hrs</li><li>· Fe: ~ 3 hrs</li></ul>	1000 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: ~30 min</li><li>· Fe: ~15 min</li></ul>
10 – 100 TeV	1000 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: 6 días</li><li>· Fe: 3 días</li></ul>	1000 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: ~3 hrs</li><li>· Fe: ~2 hrs</li></ul>
100 – 1000 TeV	500 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: ~ 7 días</li><li>· Fe: ~ 5 días</li></ul>	1000 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: 1 día</li><li>· Fe: 12 hrs</li></ul>
1 – 10 PeV	10 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: ~ 14 días</li><li>· Fe: ~ 14 días</li></ul>	10 cascadas: <ul style="list-style-type: none"><li>· H: ~ 6 hrs</li><li>· Fe: ~ 6 hrs</li></ul>

Oscar Morales Olivares RDRC 2020

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



## Reconstrucción de tres eventos verticales (sin THINNING)



J.C. Arteaga-Velázquez, MATHUSLA CR meeting, 2020

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



Experiment	Energy range (PeV)	Altitude (m a. s. l)	Size ( $10^4 \text{ m}^2$ )	Technique
MATHUSLA-100	$(0.1, 10^2)$	380-436	1	RPC, TD
HAWC-Outrigger	$(10^{-4}, O(1))$	4100	12	WCD
Taiga	$> 0.1$	675	25	IACtS
IceTop [9]	$(1, 10^3)$	2835	100	ICD
LHAASO	$(10^{-4}, 10^2)$	4410	100	WCD,AC,Sci.
TALE (TA)	$(30, 10^5)$	1550	$10^3$	FD, Sci.

RPC: Resistive plate chamber  
TD: Tracking detector  
WCD: Water Cherenkov detector  
IACtS: Imaging air Cherenkov telescope  
ICD: Ice Cherenkov detector  
Sci: Scintillator detector  
AC: Air Cherenkov  
FD: Atmospheric fluorescence detector

## MATHUSLA+RPC tendría muchas ventajas:

- Cobertura completa (80%). No hay otro detector de RC con esta capacidad.
- Mediciones detalladas de la estructura temporal y espacial de los EAS
- Nuevos datos de muñones para EAS muy inclinados a energías de PeV

## Potencial en la Física:

- Espectro y Composición de los RC's
- Anisotropías en la dirección de arribo de los RC's
- Estudio de la estructura del frente del EAS
- Pruebas de modelos de interacción hadrónica

# MATHUSLA como detector de EAS de RC's



## Información sobre MATHUSLA:

- 1.- John Paul Chou, David Curtin, H. J. Lubatti, [New Detectors to Explore the Lifetime Frontier](#), Phys. Lett. B 767 (2017) 29.
- 2.- D. Curtin, M. E. Peskin, [Analysis of long-lived particle decays with the MATHUSLA detector](#), PRD 97 (2018) 015006.
- 3.- Mathusla Collaboration, [Long-Lived Particles at the Energy Frontier: The MATHUSLA Physics Case](#), Rep.Phys.Prog. 82 (2019), Number 11.
- 4.- Mathusla Collaboration, [MATHUSLA: A Detector Proposal to Explore the Lifetime Frontier at the HL-LHC](#), input for the European Strategy for Particle Physics, arXiv:1901.04040 [hep-ex].
- 5.- M. Alidra et al, [The MATHUSLA Test Stand](#), arXiv:2005.02018 [physics].
- 6.- TDR in progress.
- 7.- Liga del experimento  
<https://mathusla-experiment.web.cern.ch/>

# Resumen



1. MATHUSLA contribuirá en la búsqueda de LLP's en el LHC durante la siguiente toma de datos de alta luminosidad.
2. Se planea instalar el detector en la superficie, cerca del PI de CMS.
3. MATHUSLA podría componerse de una red de rastreo de la señal (tracking), de 9 planos de centelladores, cada uno con un diseño modular.
4. Con base en los estudios hechos con simulaciones, el detector puede ser propuesto como un observatorio de EAS en el rango de energía  $10^{14}$ - $10^{17}$  eV.
5. Se puede lograr una mejora en las capacidades de detección usando una RPC extra.
6. Los estudios con simulaciones han mostrado que con esta capa extra, MATHUSLA se podría convertir en un nuevo tipo de instrumento para:
  - Estudiar la estructura espacial y temporal de los EAS.
  - Probar las predicciones de los modelos de interacción hidrónica, y los paquetes de muones (muon bundles).
  - Realizar investigación sobre algunos problemas abiertos de la Física de los RC's del orden de PeV's.
7. Actualmente hay proyectos en los que se pueden involucrar estudiantes para trabajar en el desarrollo de detectores, simulaciones y análisis de datos para estudiar la Física de los RC's.

# ¡Gracias!

