

2020 Meeting of the Cosmic Ray Division of the Mexican Physical Society

MATHUSLA

Simulaciones para conocer el potencial de MATHUSLA como detector de rayos cósmicos

Oscar Morales, Juan Carlos Arteaga Velázquez, Karen Salomé Caballero Mora,
Arturo Fernández Téllez, Mario Rodríguez Cahuantzi, Martín Alfonso Subieta
Vásquez, Guillermo Tejeda Muñoz y Mario Iván Martínez Hernández

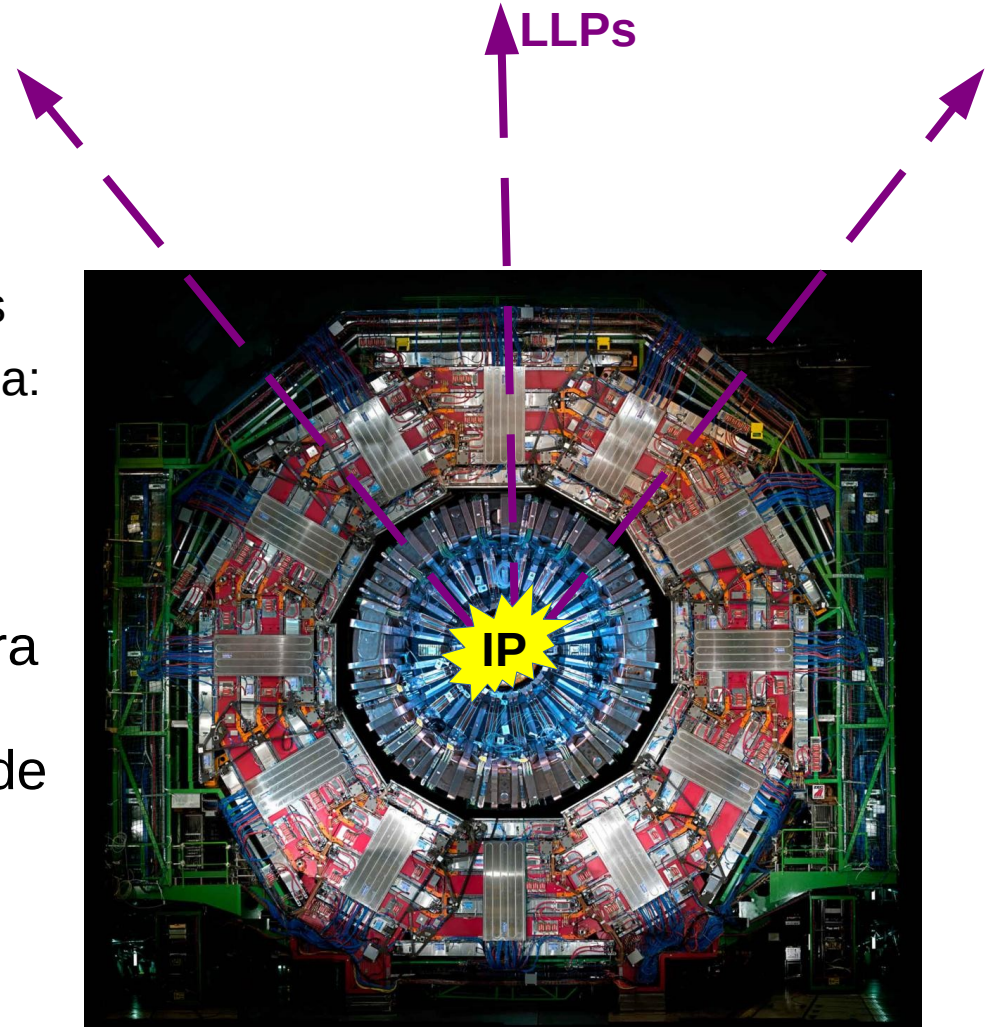


Instituciones participantes en el programa para el estudio de Rayos Cósmicos en la propuesta experimental MATHUSLA-CERN

J.C. Arteaga-Velázquez, K.S. Caballero Mora, M. Daimond, A. Fernández Téllez, M. Rodríguez Cahuantzi, M.A. Subieta Vásquez, D. Curtin, G. Di Sciocio

Motivación

- El modelo estándar (**SM**):
 - Concuerda con los datos experimentales
 - Pero necesita extenderse pues no explica:
 - La materia oscura
 - La asimetría materia-antimateria
 - La masa del neutrino
- Se necesita física mas allá del SM para resolver estos problemas. Esto usualmente requiere de la existencia de nuevas partículas, por ejemplo, partículas con largos tiempos de vida (**LLPs**):
 - Gluinos, neutralinos, hiden hadrons, etc.



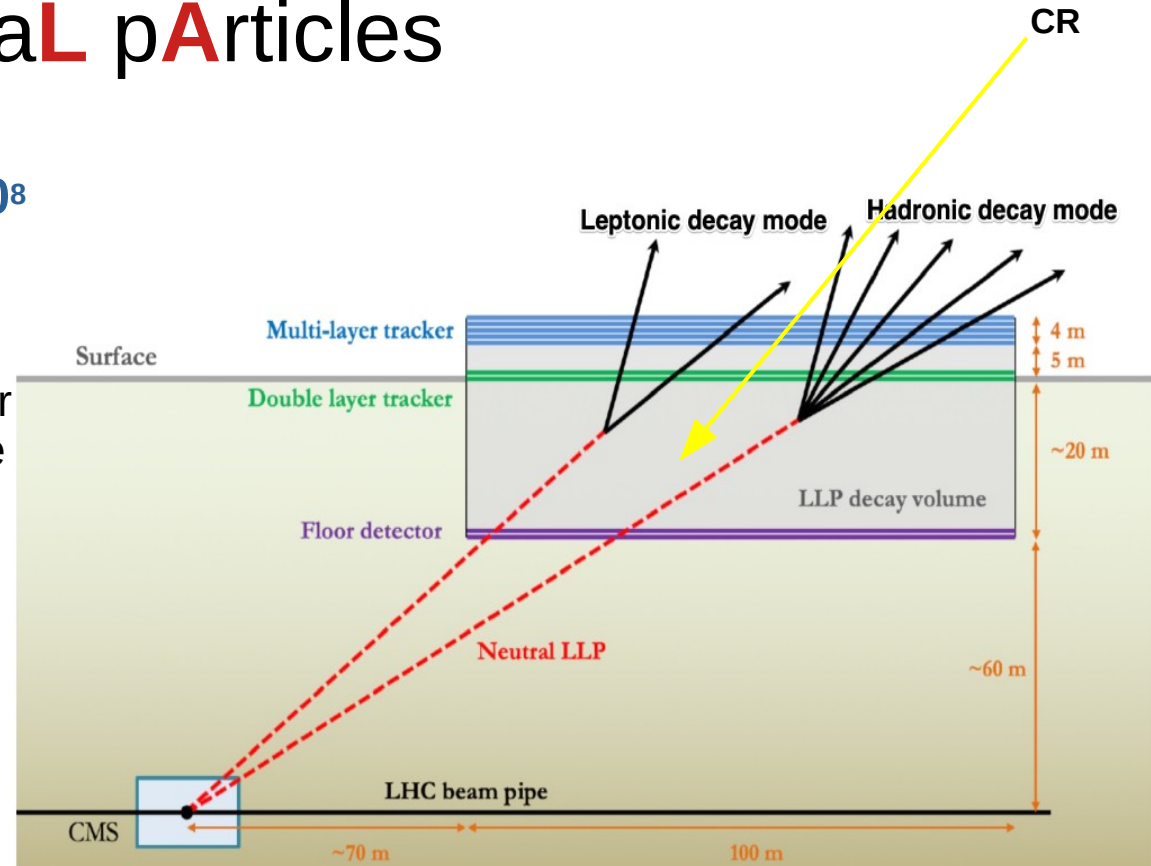
MAssive Timing Hodoscope for UltraStable neutral pArticles

- Propuesta:

Se buscan LLPs con $10^7 \text{ m} < c\tau < 10^8 \text{ m}$.

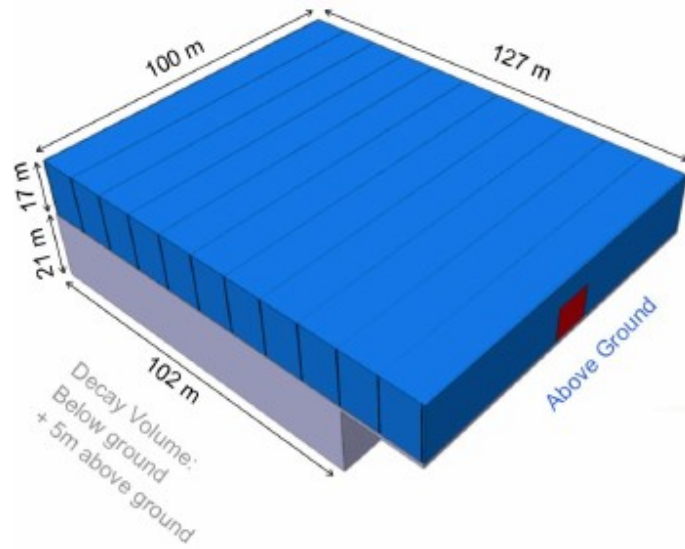
- Descripción:

- Hodoscopio con área grande para buscar decaimientos de LLP's en un volumen de **100 m x 100 m x 25 m** de aire.
- Sobre la superficie del LHC, a 70 m del punto de interacción de CMS.
- Ambiente con poco ruido de fondo.
- Planeado para la siguiente puesta en marcha del LHC High Luminosity (LHC Run 4: 2027-2030).



J.C. Arteaga-Velázquez, Cosmic rays at MATHUSLA
Reunión Anual de la DpyC, 2020.

Diseño preliminar



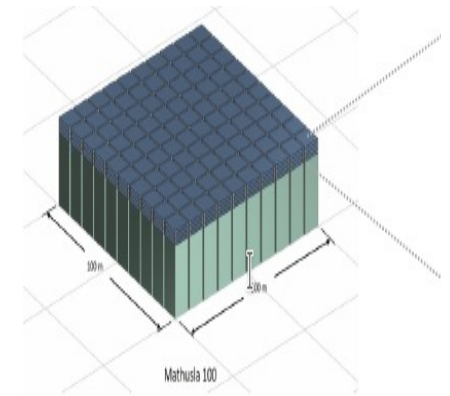
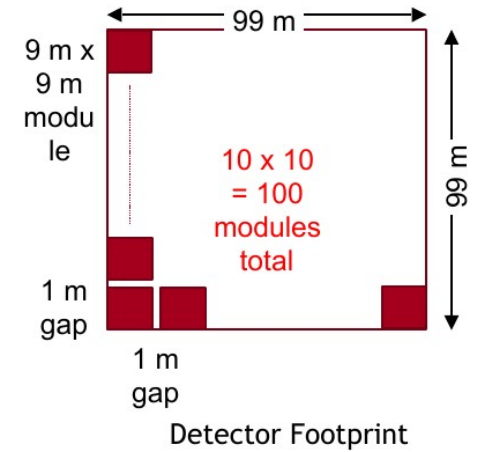
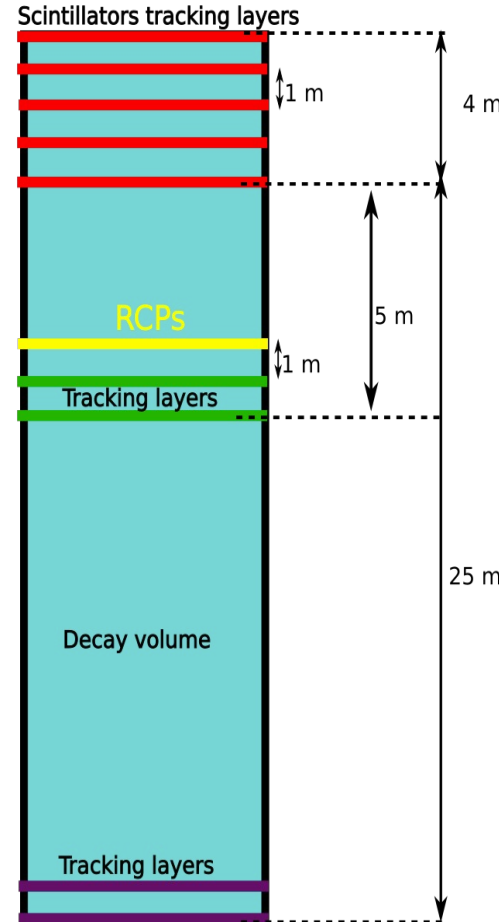
Miriam Diamond,
Toronto University, 2020



Diseño experimental

Sketch provided by Charlie Young

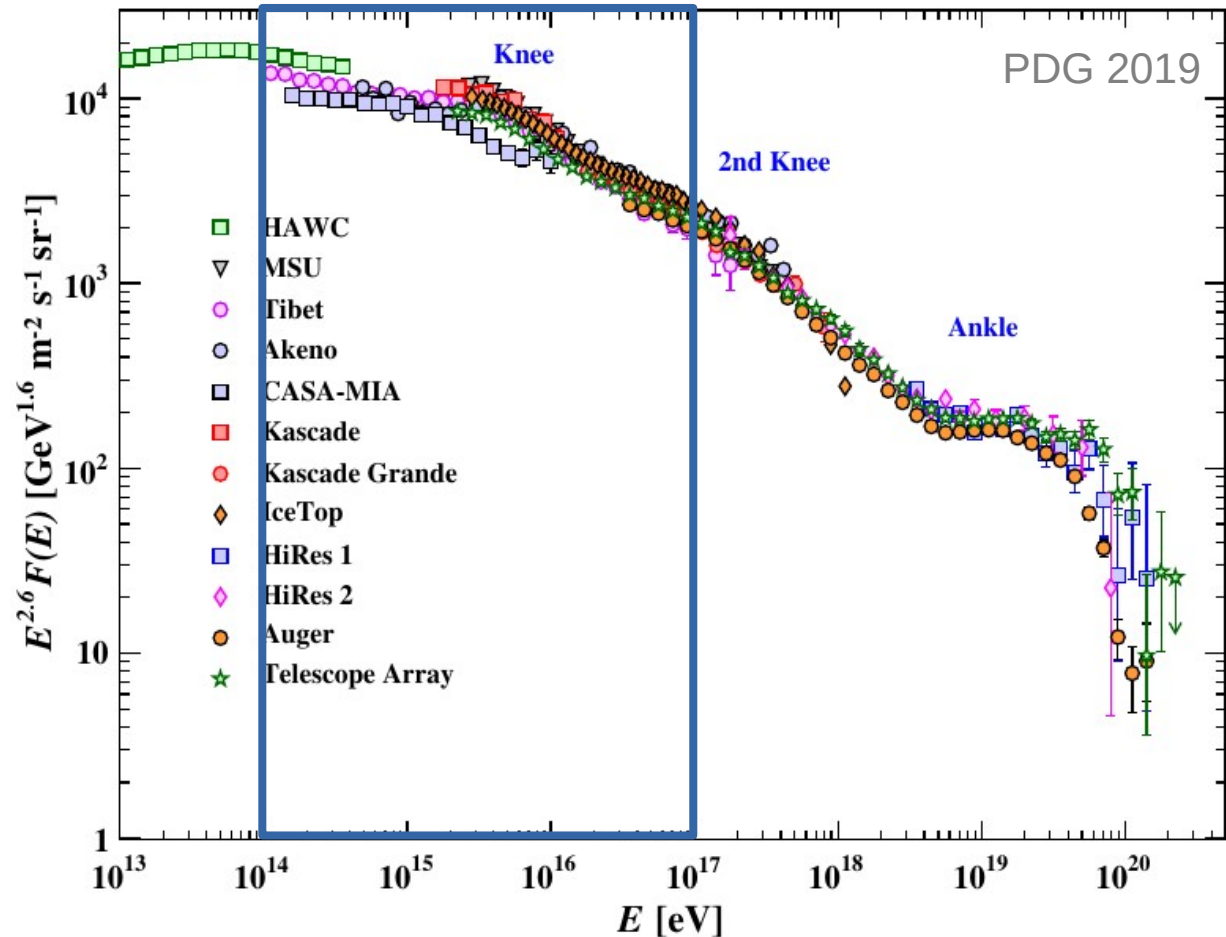
- **Sistema de disparo:**
 - **9 capas de centelladores con un diseño modular:**
 - 5 sobre superficie: disparo
 - 2 intermedias incrementan el desempeño
 - 2 en el fondo: funcionan como veto para las partículas cargadas provenientes del punto de interacción en el LHC.
 - **Se esta considerando agregar una capa de RCPs**
- **Barras de centellador:**
 - **Acoplados a SiPM's con desplazadores de longitud de onda. Las barras están intercaladas de plano a plano.**
 - **5 m x 4 cm x 2 cm**
 - **Resolución espacial: 1 cm**
 - **Resolución temporal: 1 ns**



MATHUSLA como detector de EAS de RC's

Rango de operación de MATHUSLA considerando su tamaño y altitud:

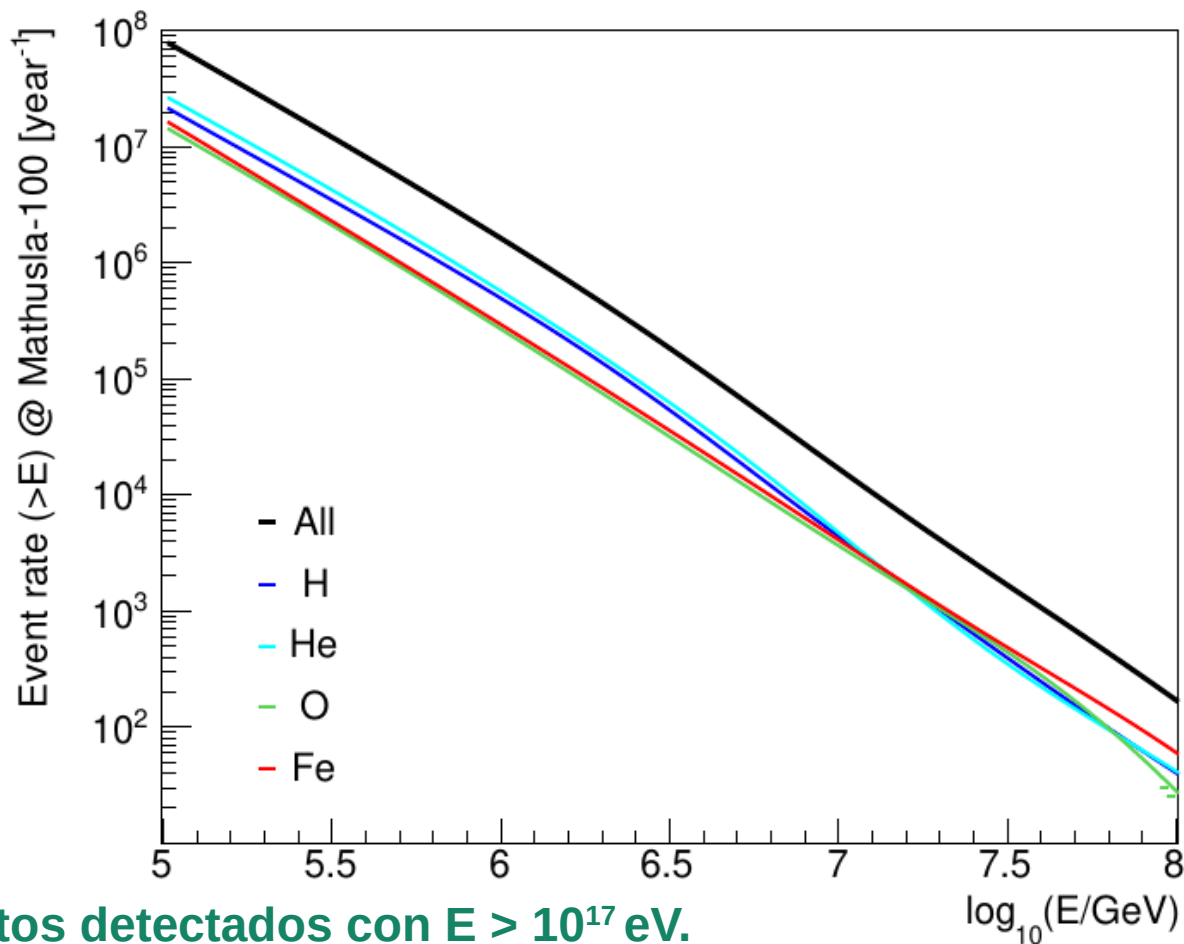
- ✓ **Máxima eficiencia:**
 $E = 10^{14} - 10^{17}$ eV



Razón de detección de eventos

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

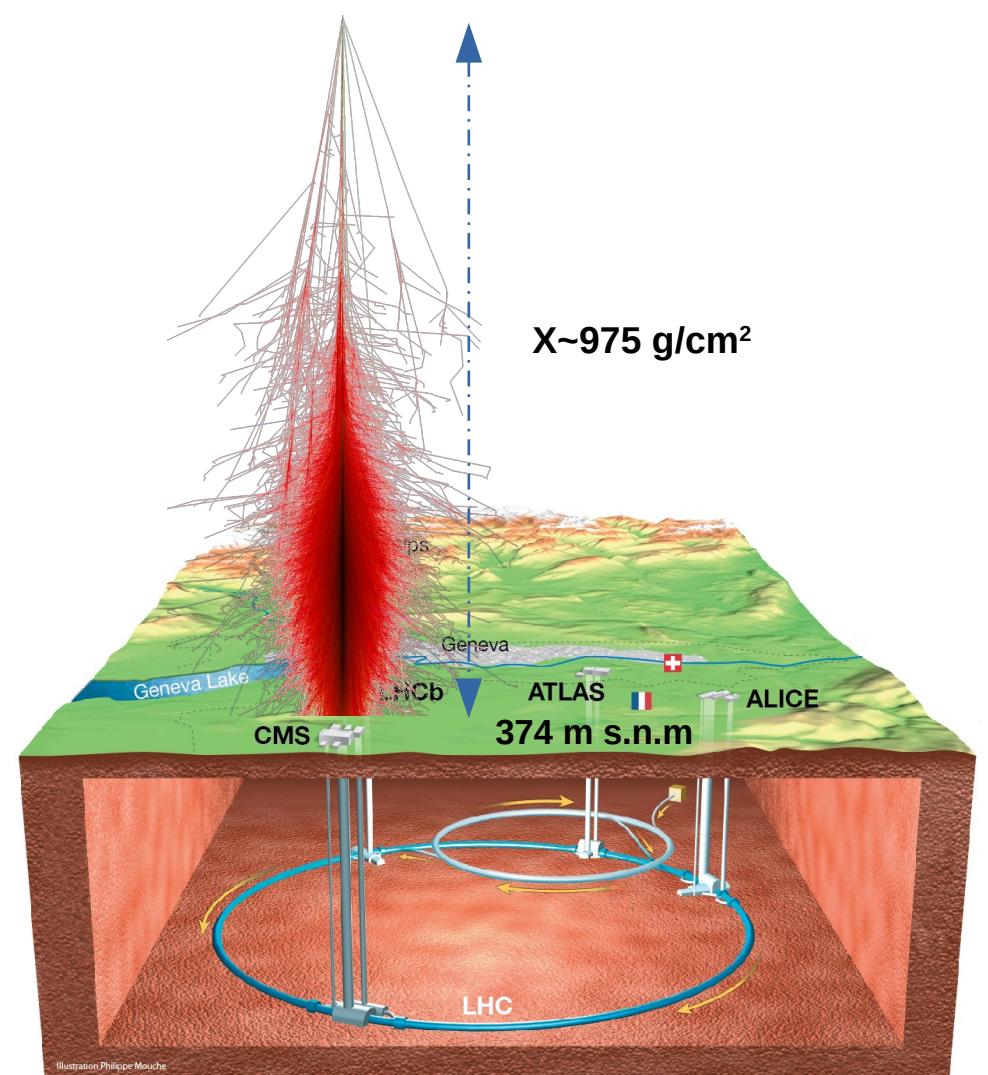
- Ángulo cenital: $0^\circ - 90^\circ$
- Campo de visión instantáneo de π sr.
- Detector plano.



En 3 años $\sim 2.5 \times 10^2$ eventos detectados con $E > 10^{17}$ eV.

Simulaciones

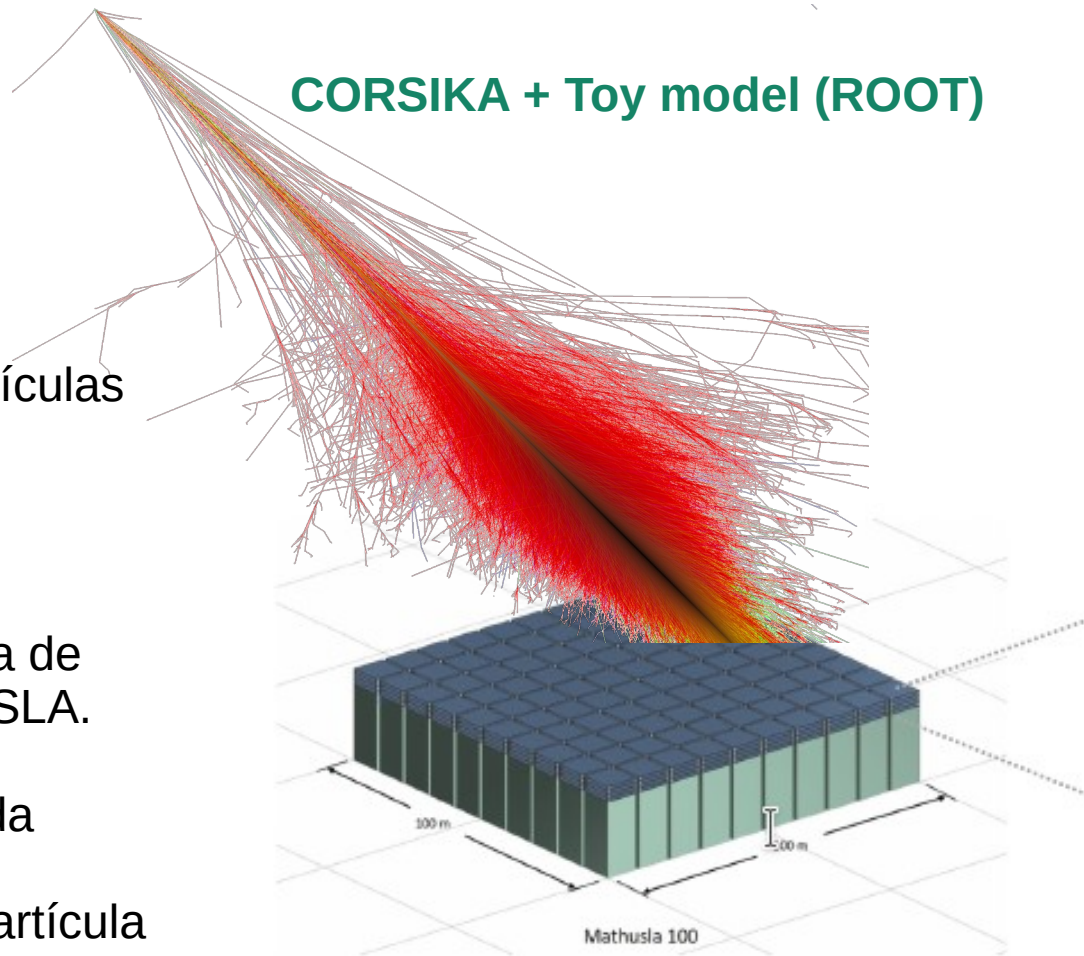
CORSIKA 77100	
Modelos hadrónicos para altas energías	EPOS-LHC SIBYLL2.3c QGSJET-II-04
Modelo hadrónico a bajas energías (<200 GeV)	FLUKA GEISHA
Grupos de masa	H, Fe
Rango de energía para los primarios	$10^{12} - 10^{18}$ eV
Espectro primario	E^{-2}
Rango azimutal	Verticales: $0^\circ - 20^\circ$ Inclinados: $70^\circ - 80^\circ$
Energías de corte	Hadrones (100 MeV) μ (100 MeV) e^\pm (3 MeV) γ (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



Metodología

- Solo se registran partículas cargadas e^\pm , μ^\pm , π^\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)

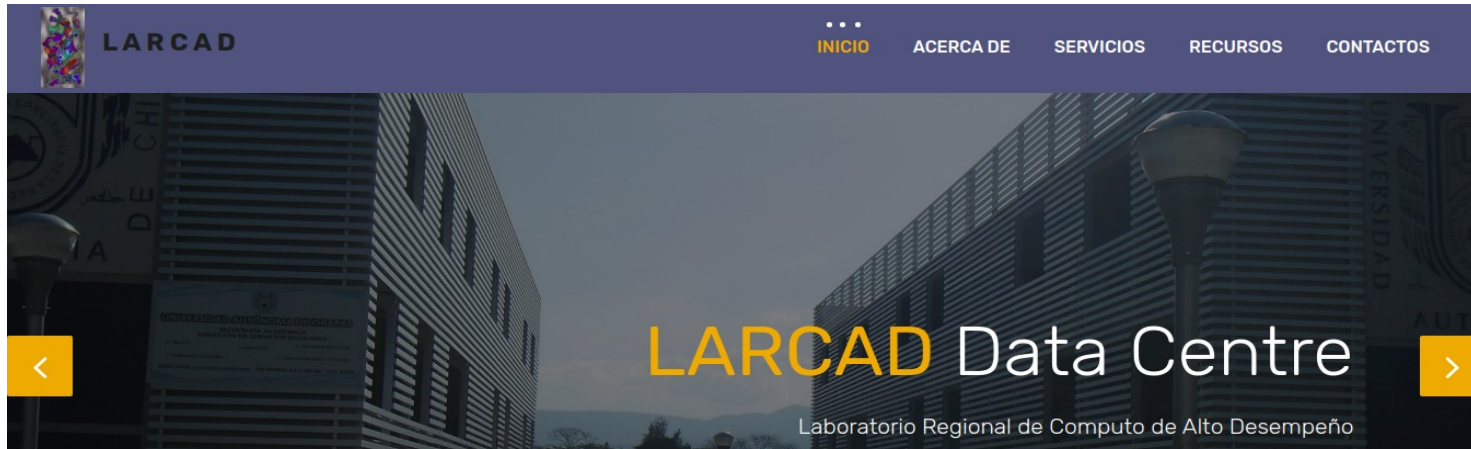


Supercómputo

compute | calcul
canada | canada



Laboratorio Nacional de Supercómputo
del Sureste de México



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

Producción

$$E = 10^{16} - 10^{17} \text{ eV}$$

```
PRESENT TIME : 04.09.2020 10:45:16 UTC
AND RANDOM NUMBER GENERATOR AT END OF EVENT : 10
SEQUENCE = 1 SEED = 10000 CALLS = 308820350 BILLIONS = 16
SEQUENCE = 2 SEED = 10001 CALLS = 178509340 BILLIONS = 514
SEQUENCE = 3 SEED = 10002 CALLS = 0 BILLIONS = 0
```

===== ===== RUN SUMMARY =====

```
NUMBER OF GENERATED EVENTS = 10
TOTAL TIME USED = 152136. SEC
TIME PER EVENT = 15213.60 SEC
TOTAL SPACE ON MPATAP USED = 0. WORDS
SPACE PER EVENT ON MPATAP = 0. WORDS
AVERAGE HEIGHT OF 1ST INT. = 54.756 +- 50.514 G/CM**2
```

showers

43 hrs

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

6 GB, ROOT format

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	ENERGY RANGE [GEV]
1	3045906	1327440	218350	2886	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00E-01 2.15E-01
2	3128019	914764	266214	6962	11	0	0	0	0	0	0	0	0	2.15E-01 4.64E-01
3	2914210	555450	349203	18221	43	0	0	0	0	0	0	0	0	4.64E-01 1.00E+00
4	2424696	304137	345423	50288	200	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00E+00 2.15E+00
5	1828994	131689	253237	81875	558	0	0	0	0	0	0	0	0	2.15E+00 4.64E+00
6	1192114	53915	189466	108875	1903	0	0	0	0	0	0	0	0	4.64E+00 1.00E+01
7	668631	16829	110429	145987	8981	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00E+01 2.15E+01
8	350455	7915	54596	128239	22790	23	0	0	0	0	0	0	0	2.15E+01 4.64E+01

```
[oscar@cedar5 100-1000PeV]$ pwd
/home/oscar@cedar5/scratch/mathusla/SIBYLL2.3c/vertical/corsika-77100/run/100-1000PeV
[oscar@cedar5 100-1000PeV]$ ls -hl
total 13G
-rw-r----- 1 oscar oscar 27M oct 10 19:56 H_100-1000PeV_1.out
-rw-r----- 1 oscar oscar 497 oct 13 15:00 SBATCH_csk2root.sh
-rw-r----- 1 oscar oscar 13G oct 10 19:56 'Z=1_A=1_NSHOW=1_DAT000001'
[oscar@cedar5 100-1000PeV]$
```

Un evento vertical H
($10^{17} - 10^{18}$ eV)
13 G

Procesamiento

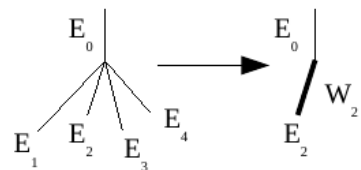
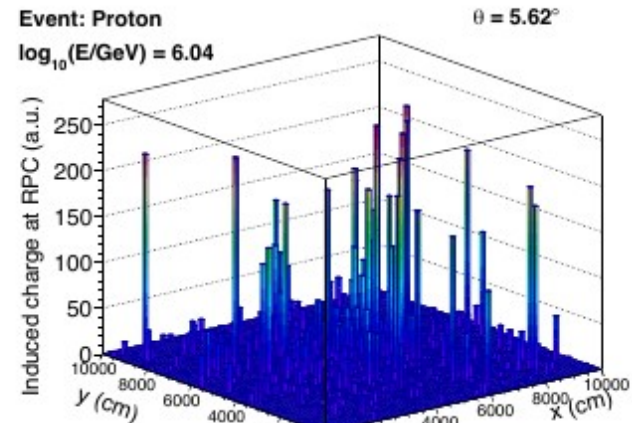
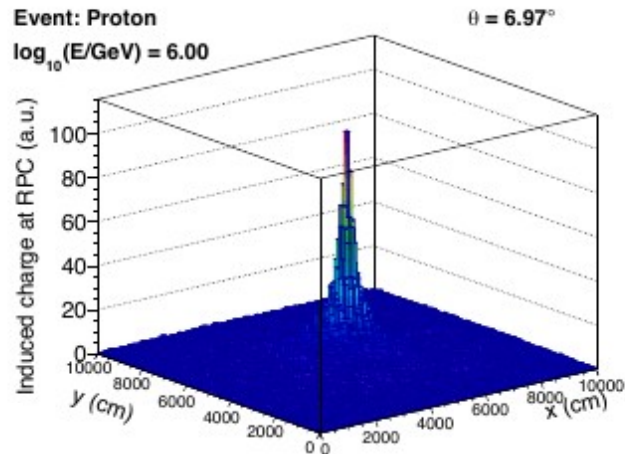
- CEDAR, Canadá
- LARCAD, México

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

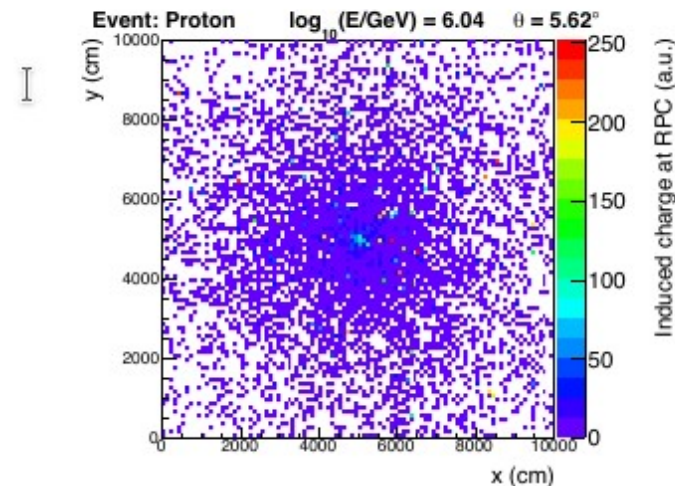
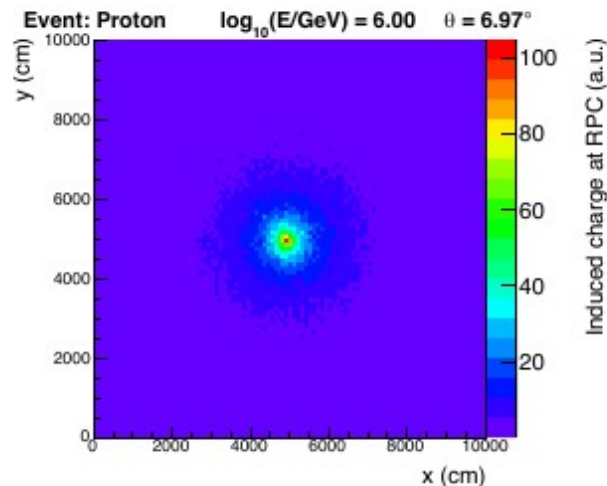
Thinning effects

No thinning

Thinning



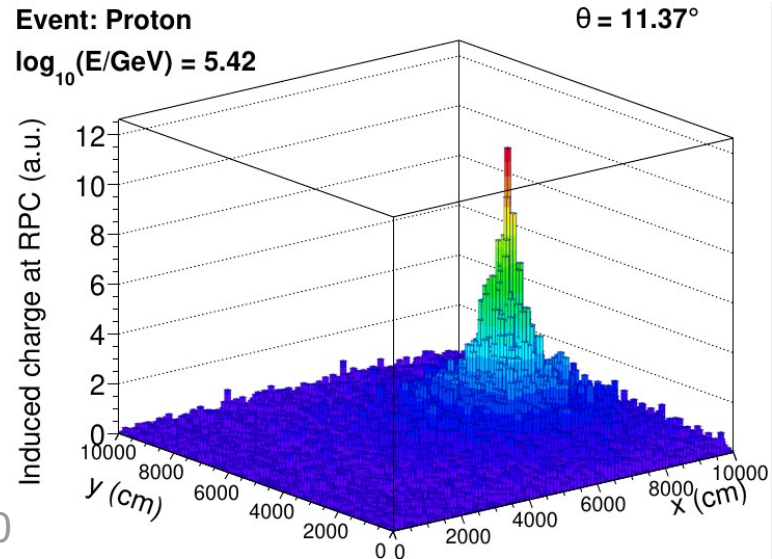
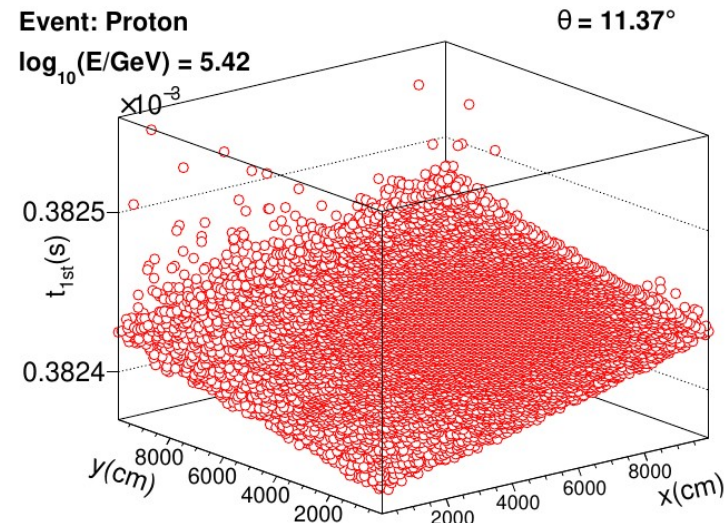
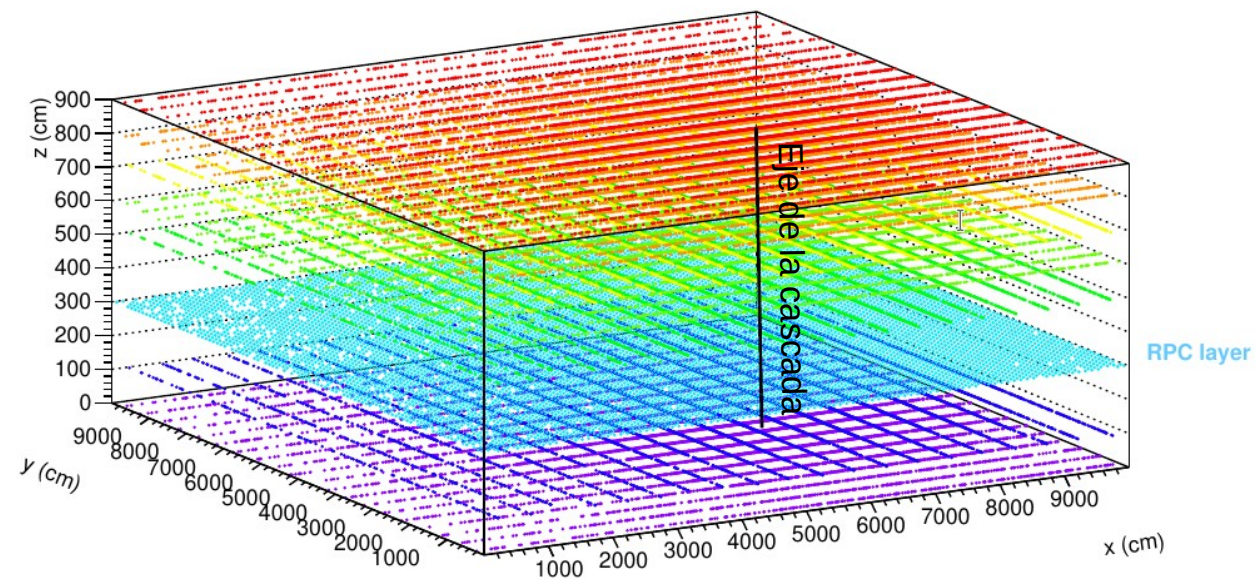
$$W_2 = \frac{E_0}{E_2}$$



Reconstrucción

Ejemplo de un chubasco vertical MC

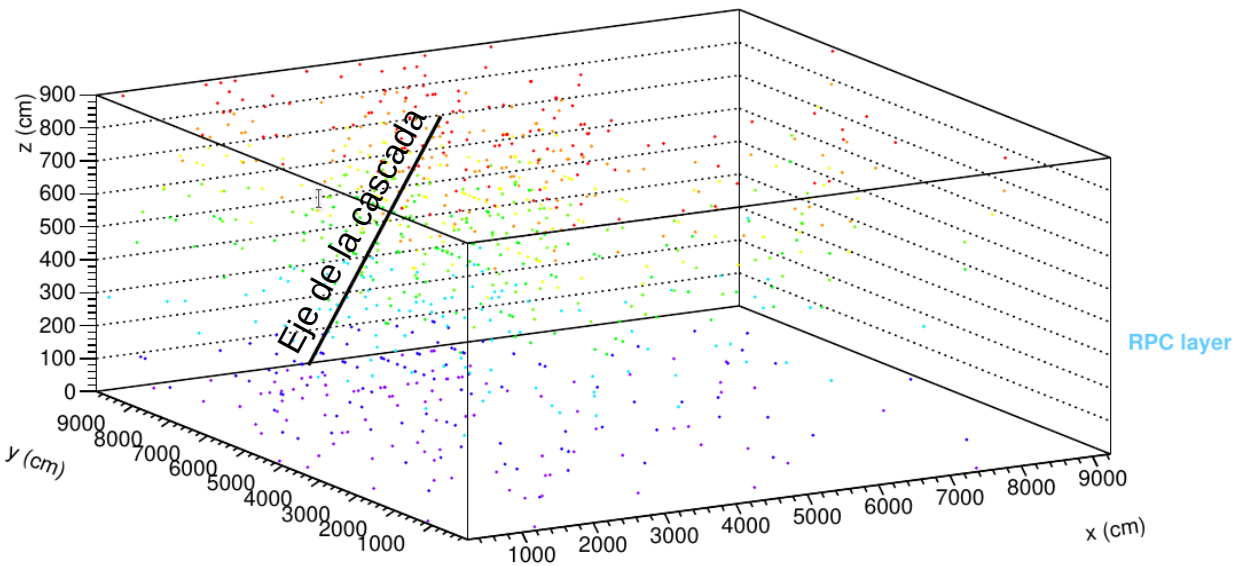
Proton, $\log_{10}(E/\text{GeV}) = 5.42$, $\theta = 11.37^\circ$, $\phi = 34.65^\circ$



Reconstrucción

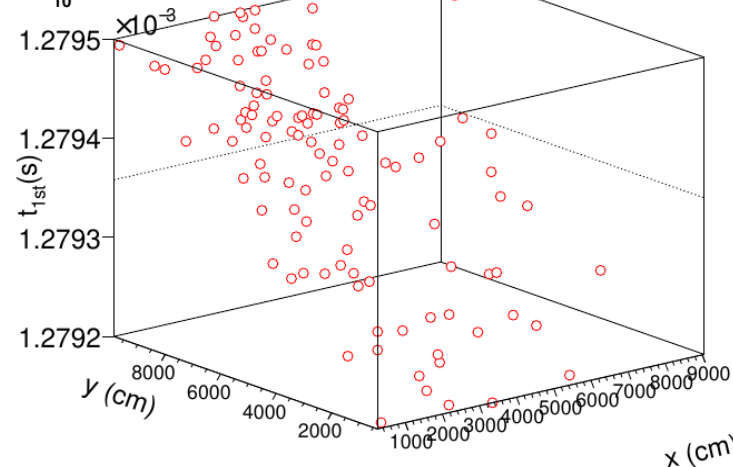
Ejemplo de un chubasco inclinado MC

Proton, $\log_{10}(E/\text{GeV}) = 7.62$, $\theta = 74.60^\circ$, $\phi = 92.45^\circ$



Event: Proton $\theta(\text{deg}) = 74.60$

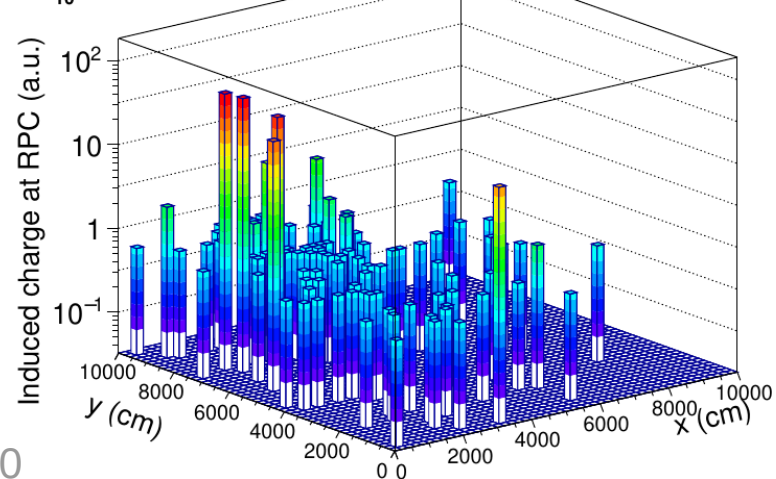
$\log_{10}(E/\text{GeV}) = 7.62$



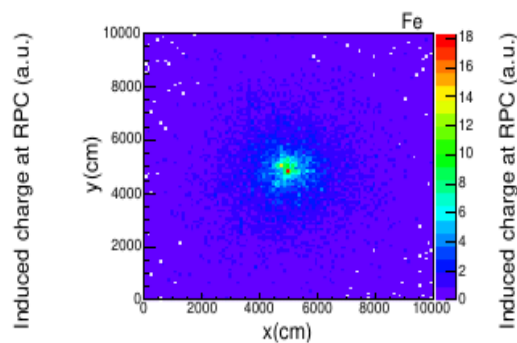
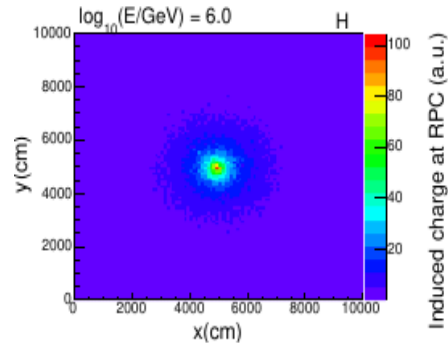
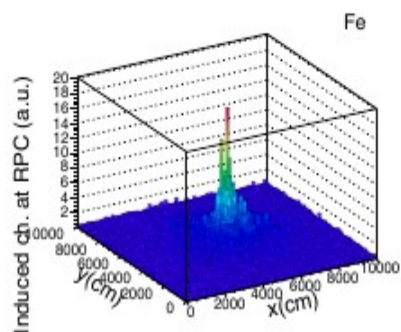
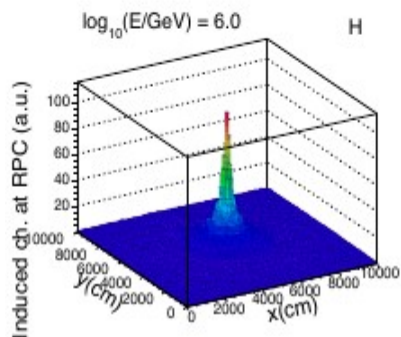
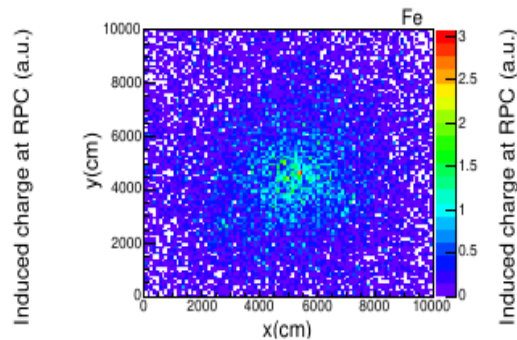
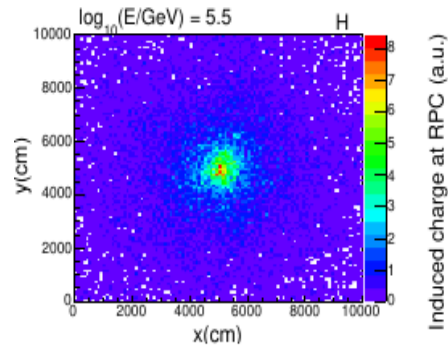
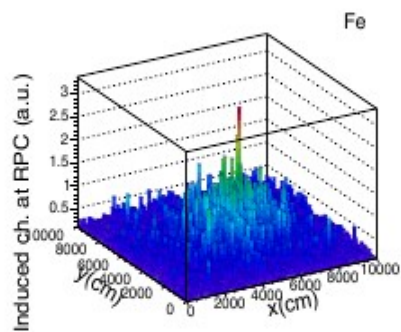
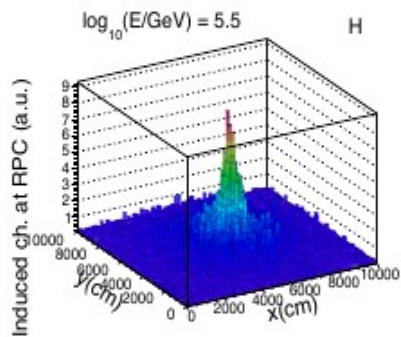
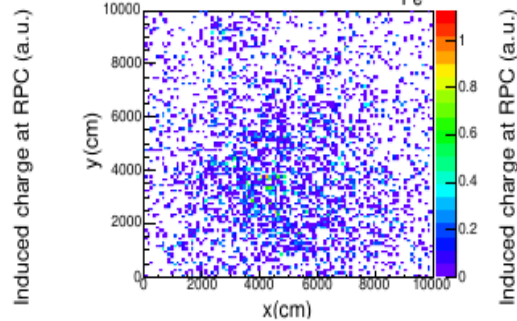
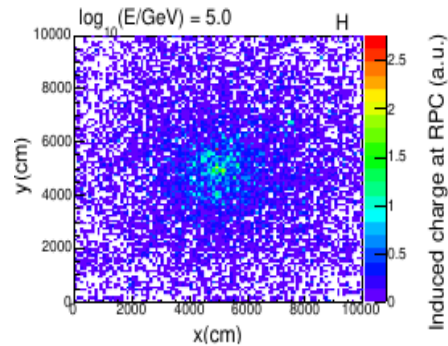
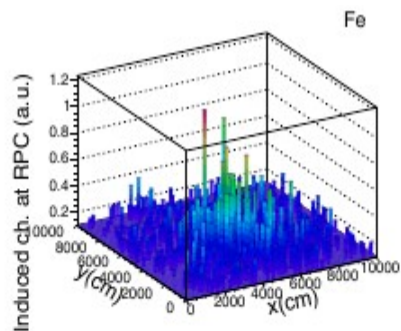
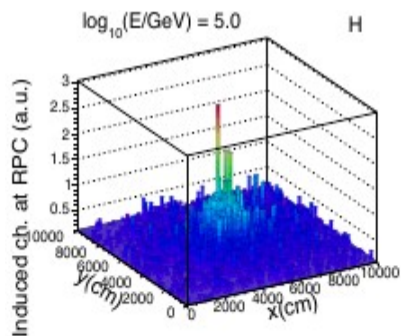
Event: Proton

$\theta(\text{deg}) = 74.60$

$\log_{10}(E/\text{GeV}) = 7.62$



Reconstrucción de tres eventos verticales (sin THINNING)



Resumen

- MATHUSLA podría complementar la búsqueda LLP's en el LHC durante la siguiente toma de datos del HL-LHC, pero también podría trabajar como un observatorio de EAS independiente.
- Podría componerse de una red de rastreo de la señal (tracking), de 9 planos de centelladores, cada uno con un diseño modular.
- Se puede lograr una mejora en las capacidades de detección usando una RPC extra.
- 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 hadrónica, y los muon bundles.
 - Realizar investigación sobre algunos problemas abiertos de la Física de los RC's del orden de PeV'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/>

¡MUCHAS GRACIAS!

2020 Meeting of the Cosmic Ray Division of the
Mexican Physical Society



Online, November 23rd to 26th, 2020