

La Física del Plasma de Quarks y Gluones y El Experimento ALICE en el LHC

Andreas Morsch, CERN

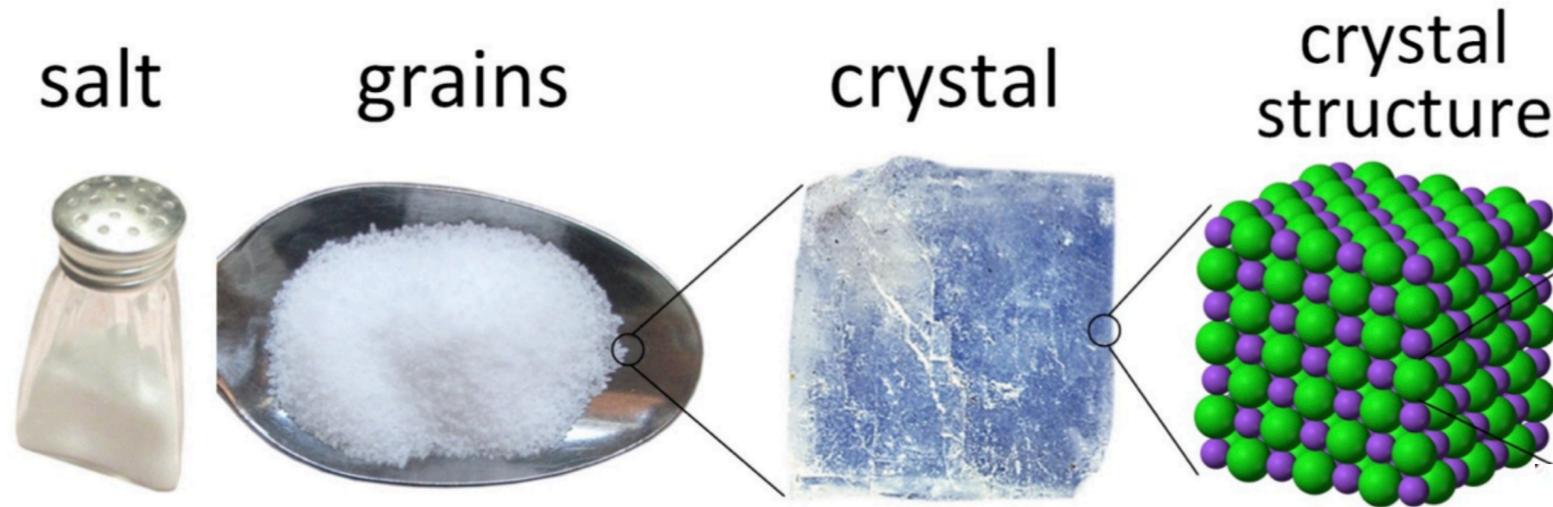
Clase Maestra en ALICE, 14 de febrero de 2024

La Física del Plasma de Quarks y Gluones

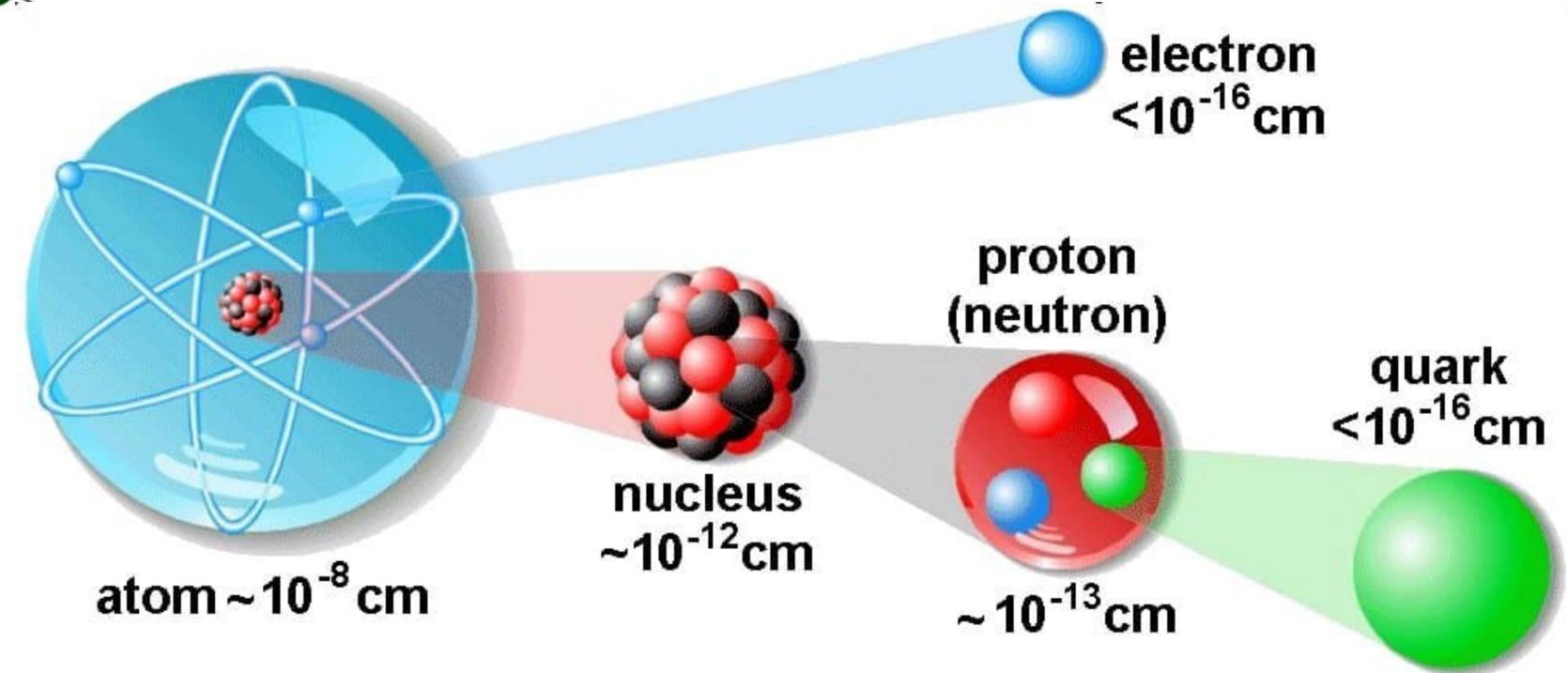
Todo lo que vemos y tocamos está hecho de materia ...

¿Qué es la materia y cuál es su estructura?

¿De dónde viene y cómo se transforma?



A escalas muy pequeñas descubrimos que materia esta hecha de **átomos**.

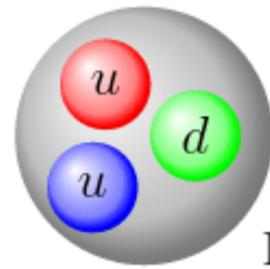


Una fuerza muy poderosa mediada por los llamados "**gluones**", mantiene a los quarks unidos
= **fuerza nuclear fuerte**

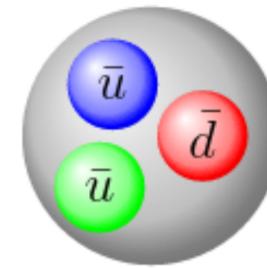
En la materia ordinaria no hay quarks libres

Hadrones

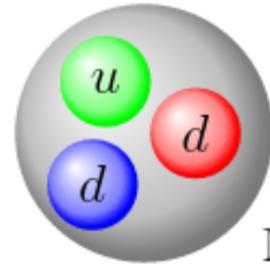
bariones: 3 quarks



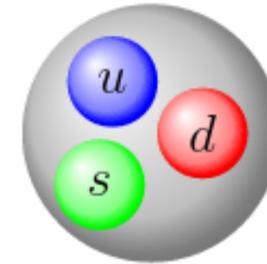
Proton



Anti-proton

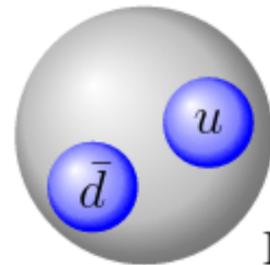


Neutron

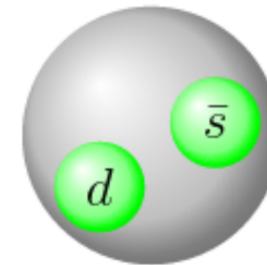


Lambda

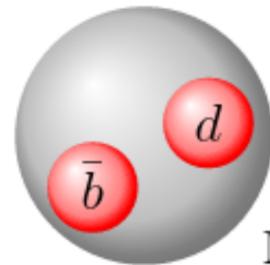
mesones: 2 quarks



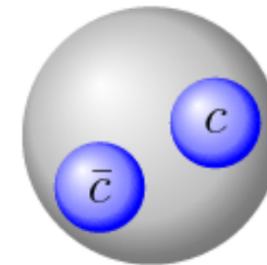
Pion chargé π^+



Kaon neutre K^0



Méson B^0



J/ψ

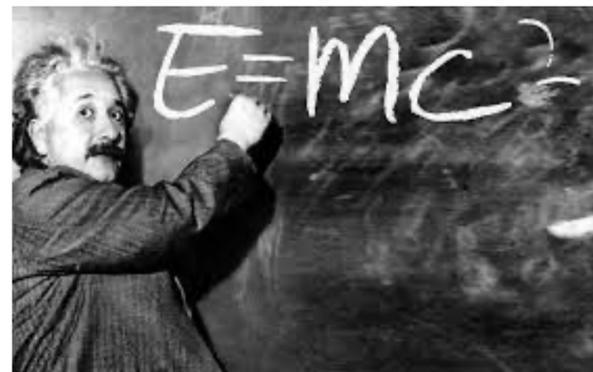
En la materia ordinaria los quarks siempre se encuentran en un **estado cautivo**: dentro de los hadrones.

Estado cautivo = Confinamiento

Si tratamos de separar dos quarks, la fuerza entre ellos es similar a una banda elástica.



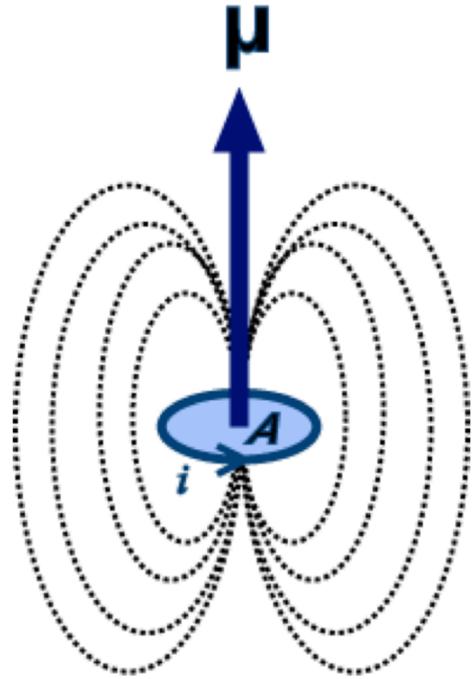
La energía de la “banda” aumenta hasta que es suficiente para producir nuevas partículas.



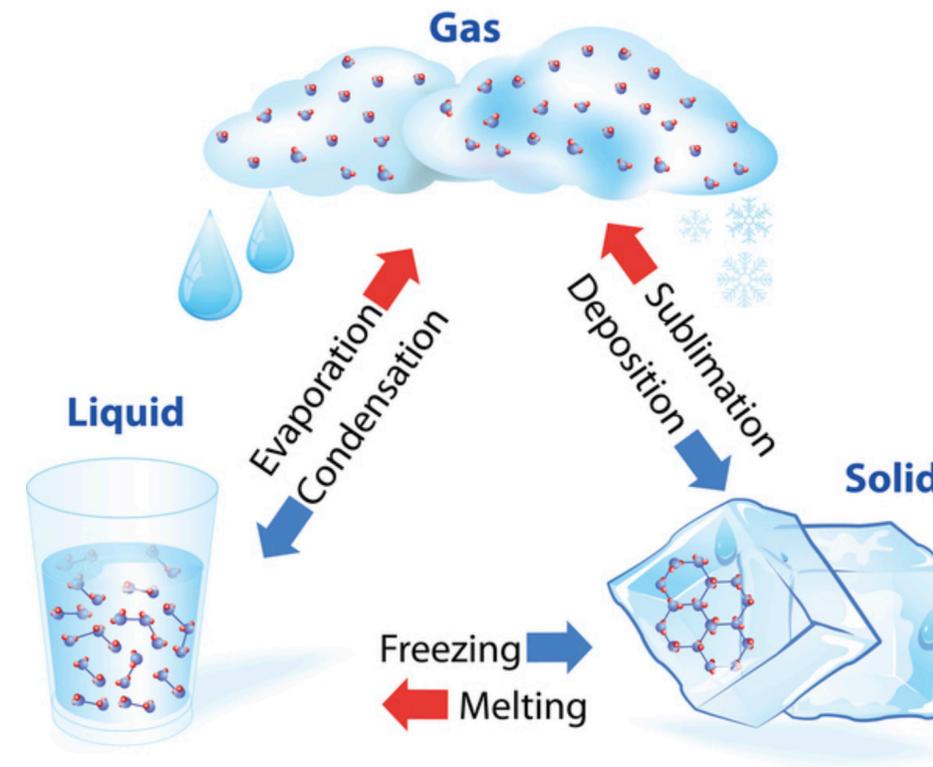
Fases de la materia

El modelo estándar describe con gran precisión la dinámica de las partículas elementales.

Sin embargo, hay dificultades para entender las propiedades de materia formada por muchas partículas y sus cambios de fase.



STATE OF MATTER



Ej. momento magnetico del electron:

calculo: $a = 0.001\ 159\ 652\ 181\ 643$

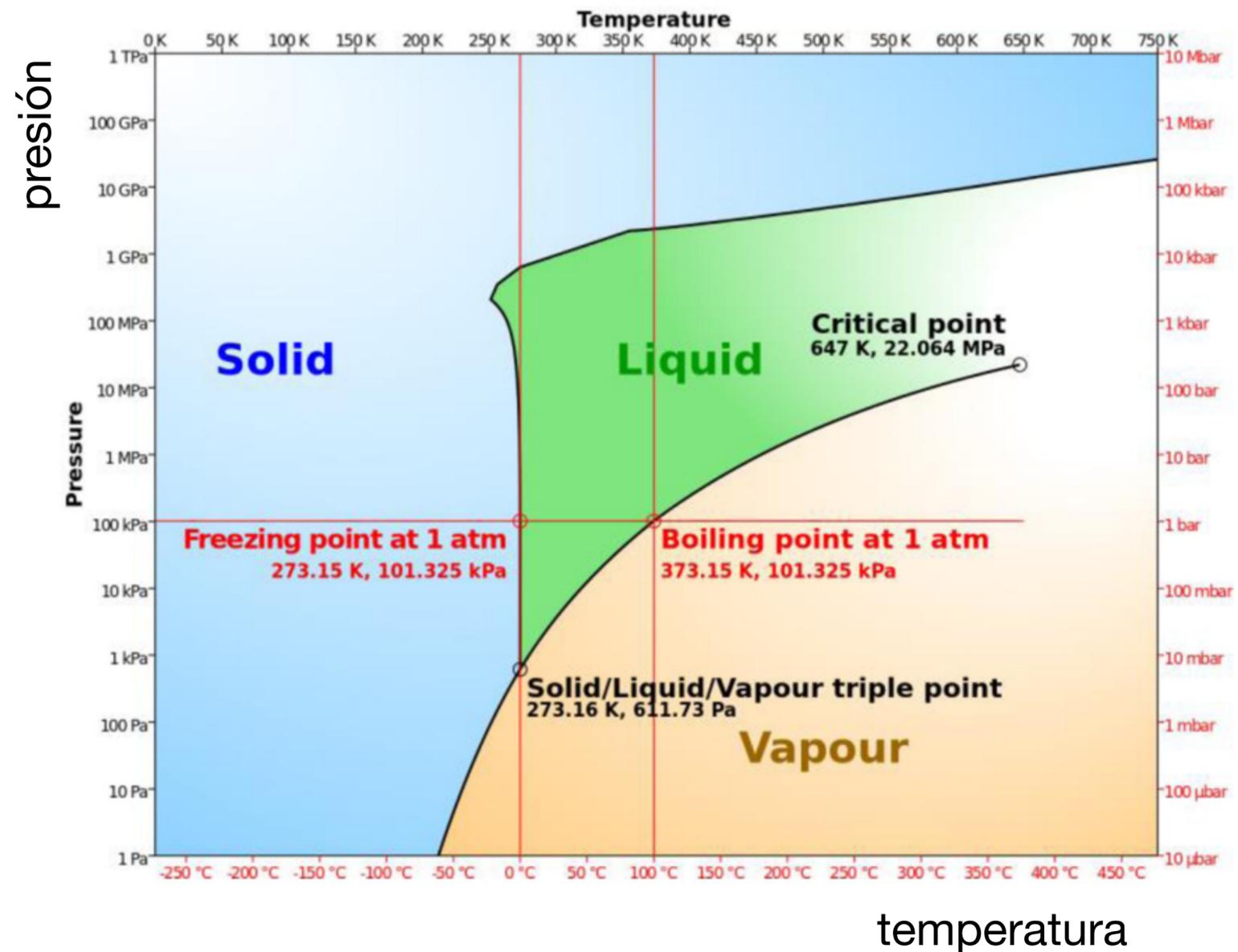
experimento: $a = 0.001\ 159\ 652\ 180\ 73$

La dinamica de muchas partículas.
Es un campo primariamente experimental.

¿Existen otras fases de la materia nuclear ?

Cambiando temperatura y densidad / presión ...

diagrama de fases del agua



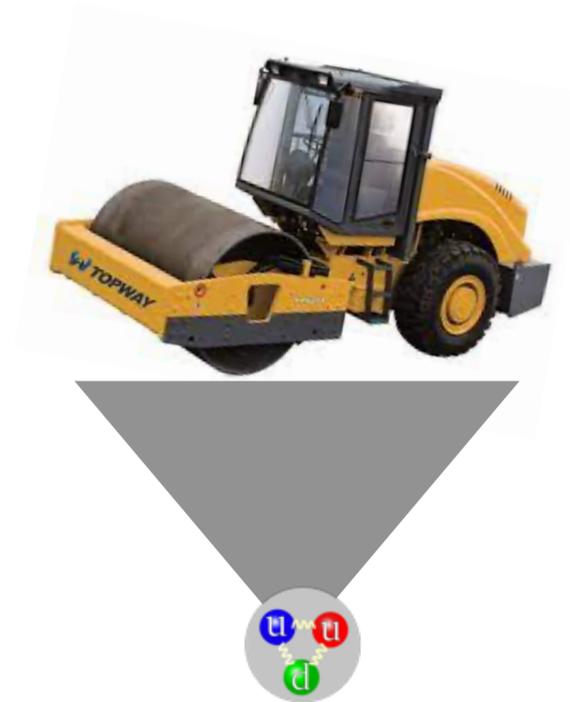
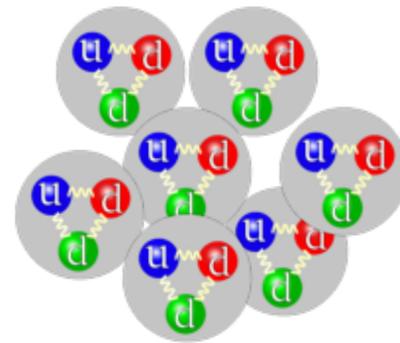
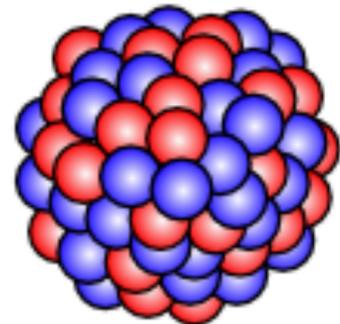
¿Cómo cambiar la fase de la materia hadronica ?

Materia Nuclear Ordinaria

=

nucleones (proton/neutron) ocupan 64-74% del espacio

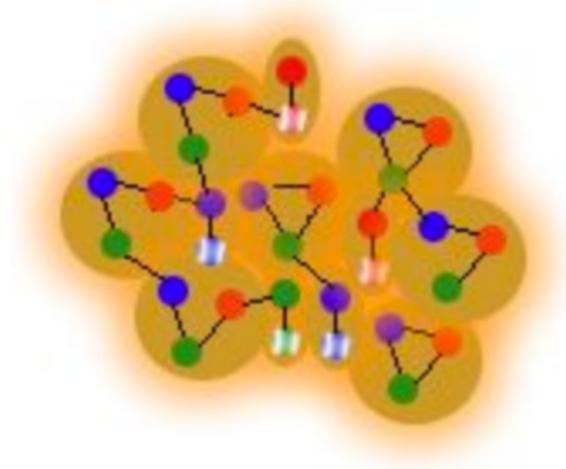
^{208}Pb



Materia de Quarks y Gluones

=

un quark siente la fuerza de otro quark en un nucleon vecino



Se necesita el peso de un rodillo de camino concentrado sobre la superficie de un proton ...

o un objeto de la masa del sol sobre su pie.

... imposible!

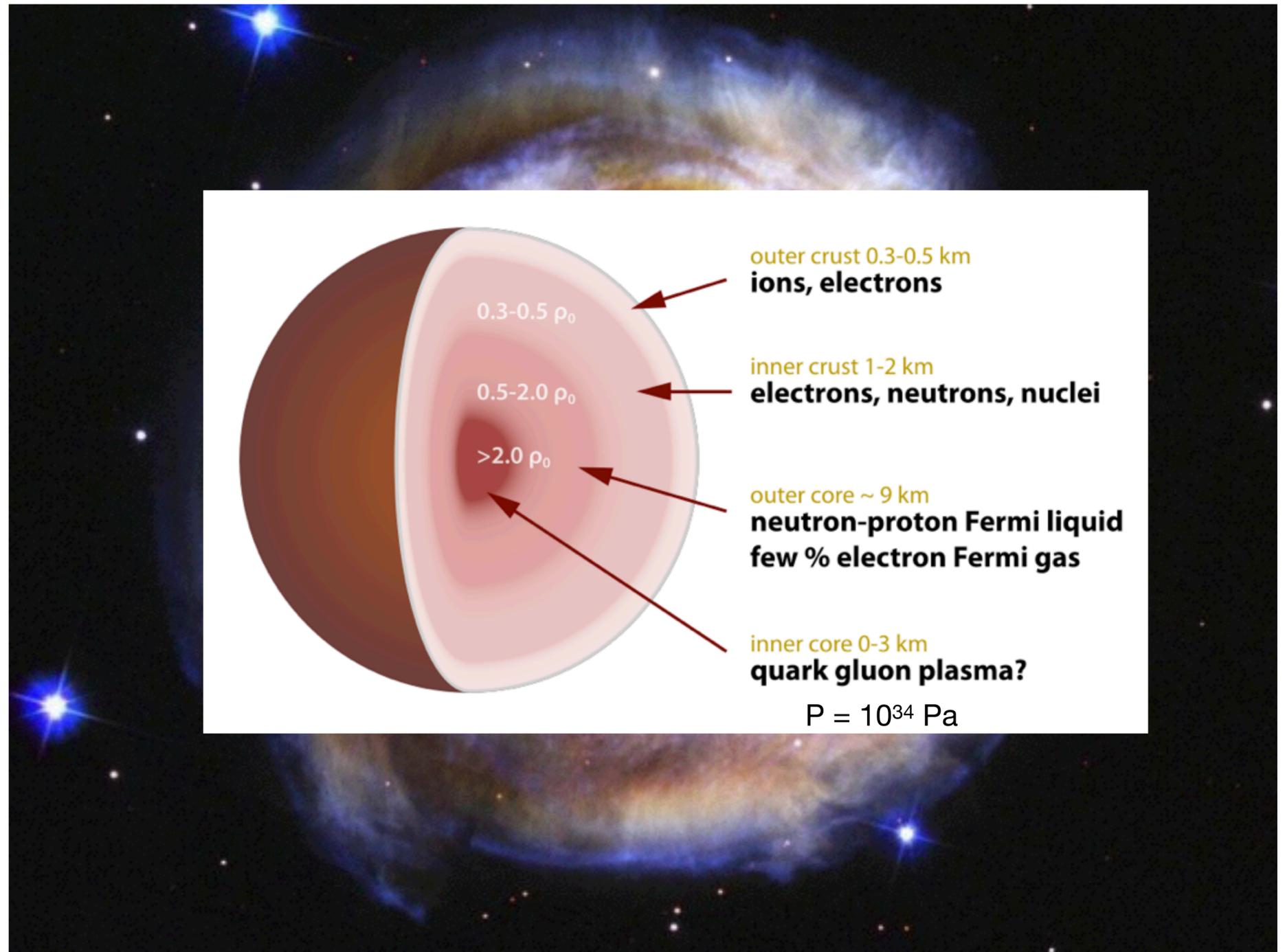
¿Dónde puede existir esta presión ?

Estrella de neutrones, un objeto astronómico de muy alta densidad ...



comprimir

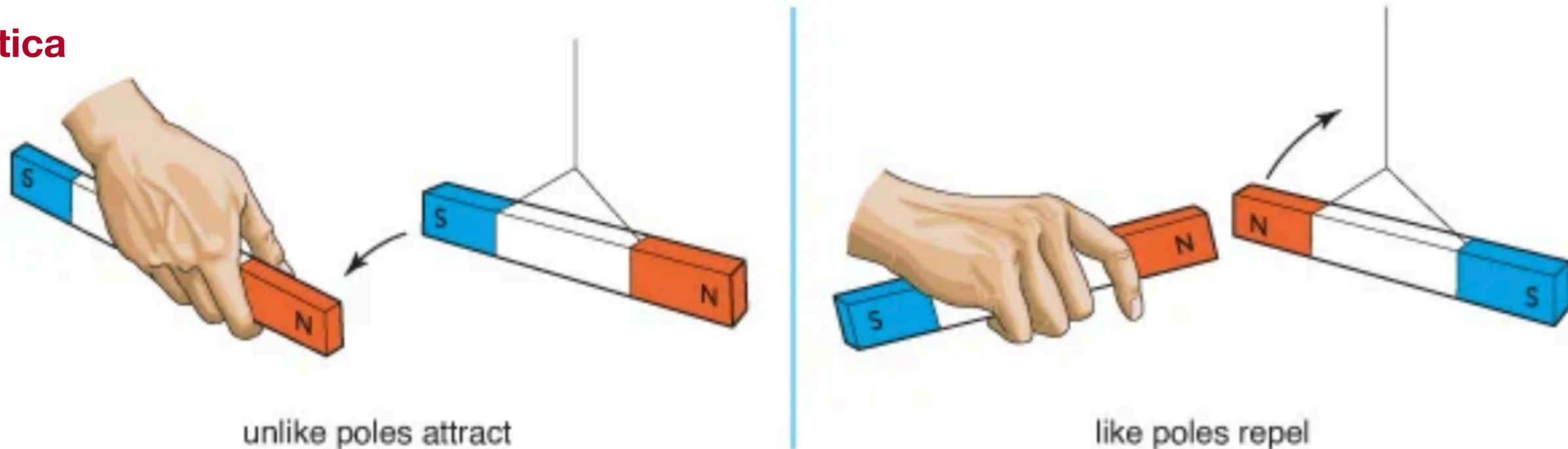
$$\rho = 5 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$



El limite de muy alta temperatura

Un comportamiento particular de la interacción fuerte

Fuerza magnetica



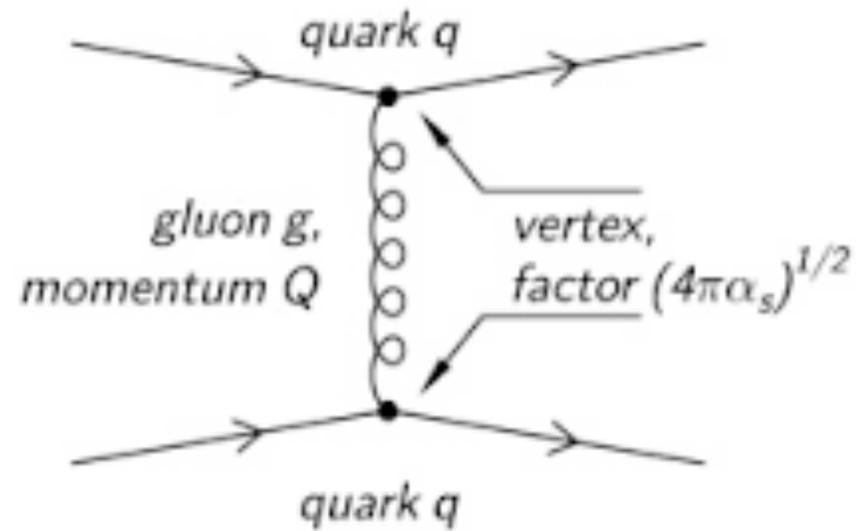
© Encyclopædia Britannica, Inc.

Mas acercamos los polos del dos imanes, mas fuerte es la attraction / repulsion magnética

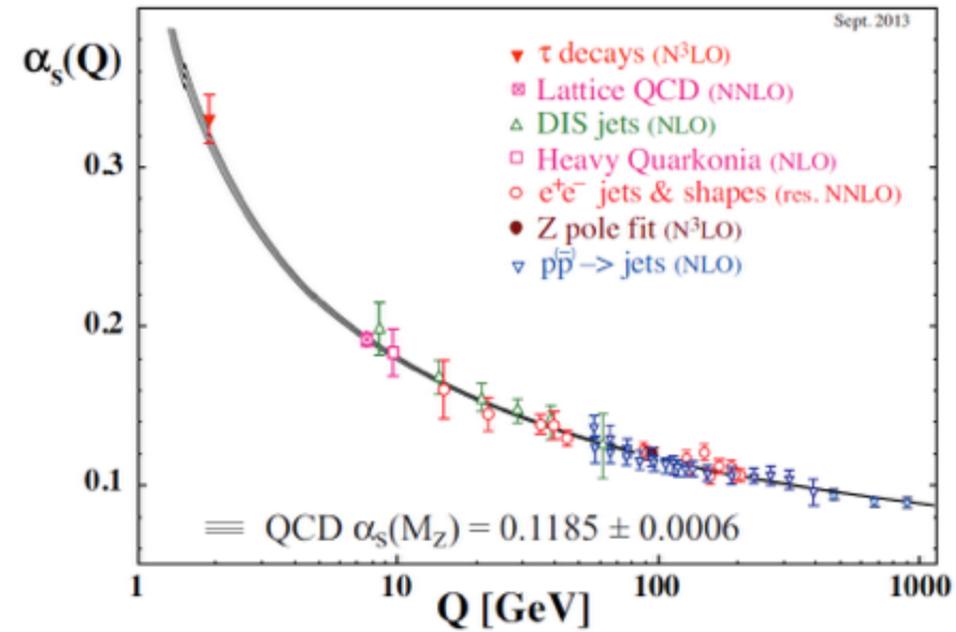
La **interacción fuerte**, al contrario, se debilita progresivamente a distancias menores (o equivalente a altas energías).

La Fuerza Fuerte a altas energías es ... débil

Libertad asintótica



medición con procesos elementales



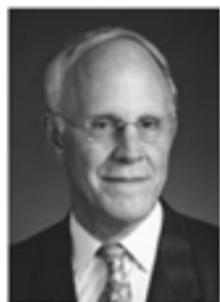
Energia cinetica ~ temperatura

quarks y gluones libres a muy altas temperaturas!

Premio Nobel 2004:



H. David Politzer

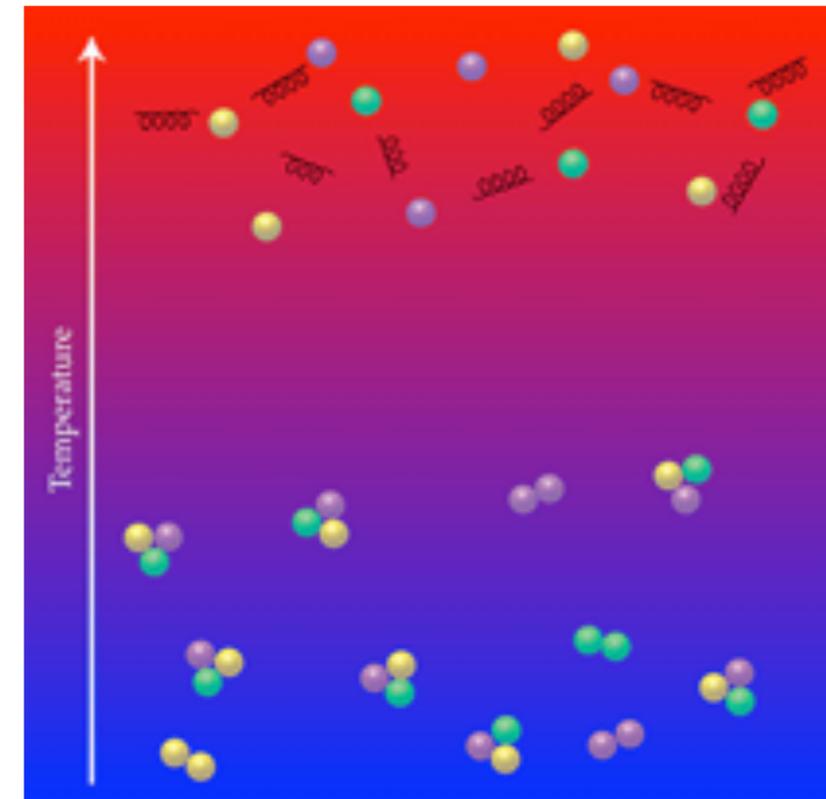


David J. Gross



Frank Wilczek

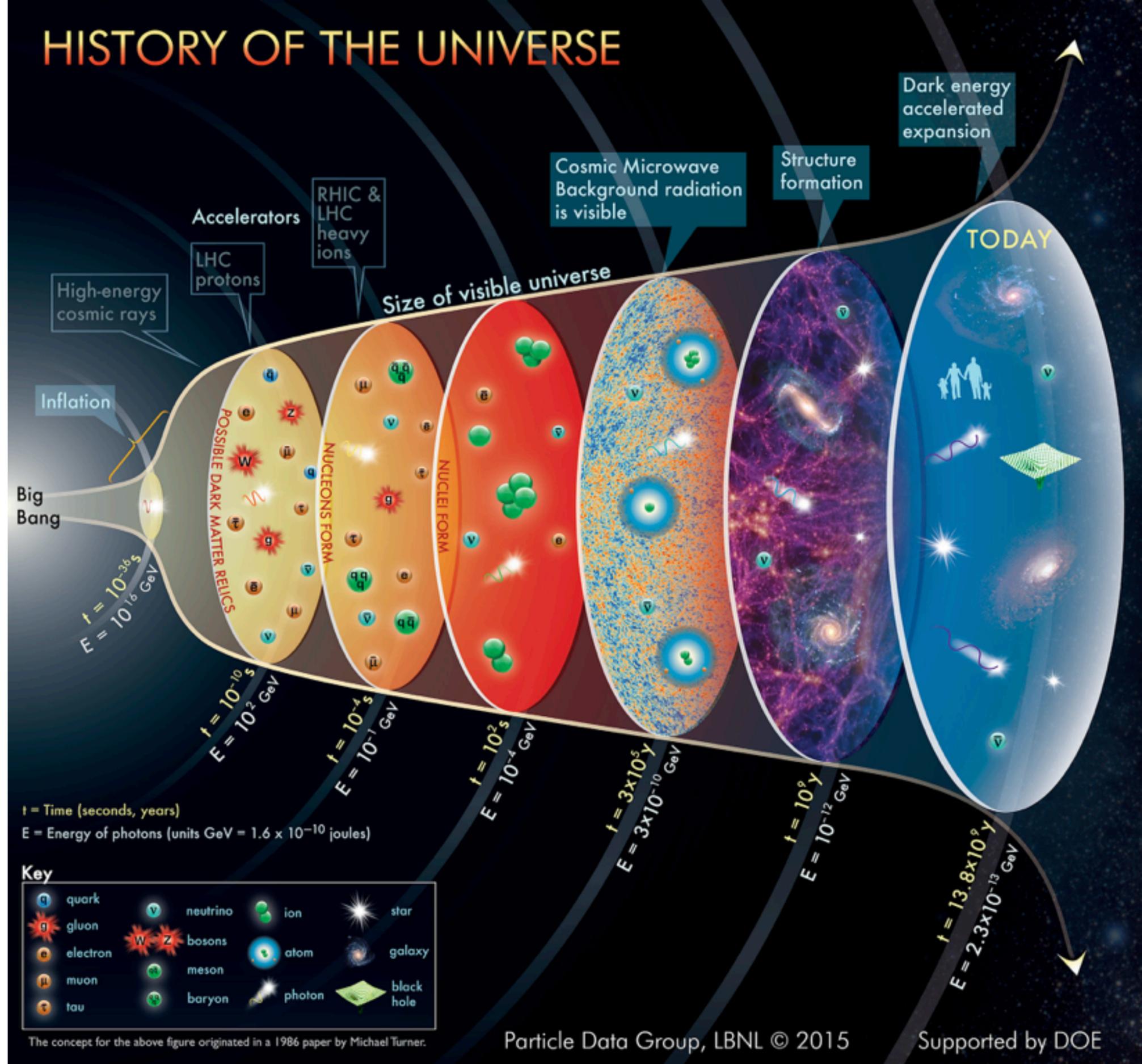
No se puede realizar en experimentos



HISTORY OF THE UNIVERSE

QGP en el universo joven

~10 μ s después del Big Bang



Materia ordinaria tiene un limite de temperatura más bajo

Un concepto difícil, trato de explicarlo con un ejemplo ... el cumpleaños de Rolf Hagedorn

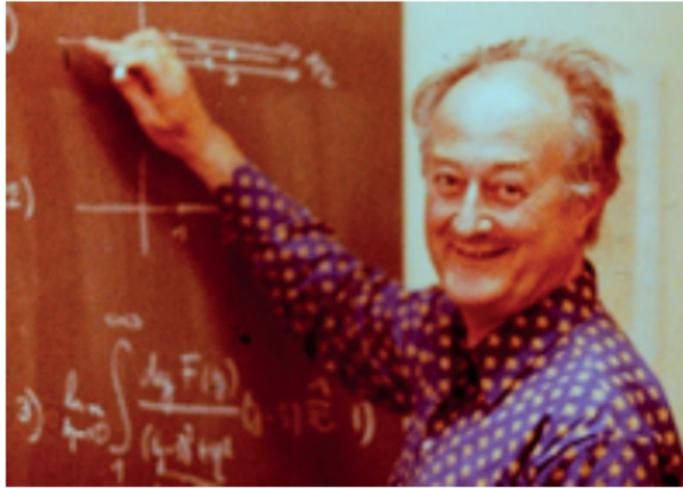
- Es el cumple de Rolf
 - Invita 3 amigos y compra un pastel (1/4 de pastel para cada uno)
 - Decide de comprar otro pastel y lo anuncia a sus amigos
 - Ellos lo publican en Instagram y se invitan 4 amigos más
 - Rolf compra un pastel más
 - vienen 4 amigos más
 - Rolf compra
 - vienen ...



Más pasteles, mas amigos, imposible para Rolf de obtener mas pedazos de pastel por persona

Se pregunta “Existe un limite? 1/4 pastel?”

Temperatura de materia ordinaria tiene un limite



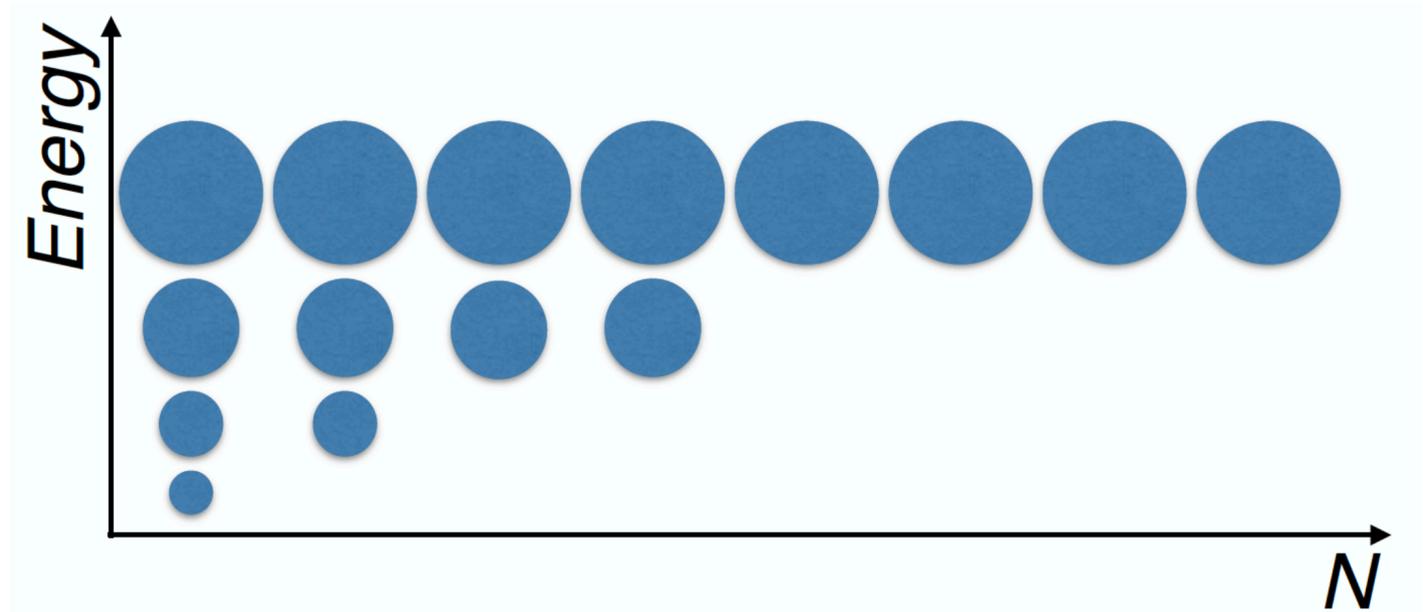
Rolf Hagedorn

Definition intuitiva: $Temperatura = \frac{Energia\ total}{Numero\ de\ particulas}$
(grados de libertad)

los pasteles

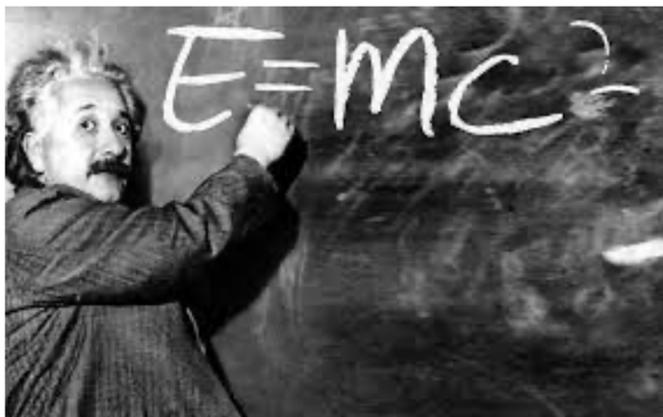
los amigos

Número de hadrones con cierta masa crece rápidamente



Existe una temperatura límite para hadrones ($2 \cdot 10^{12}$ K)
Algo dramático tiene que ocurrir para temperaturas más altas.

¿Cambio de fase: Hadrones / QGP ?



Quantum Chromo Dynamics (QCD) y el QGP

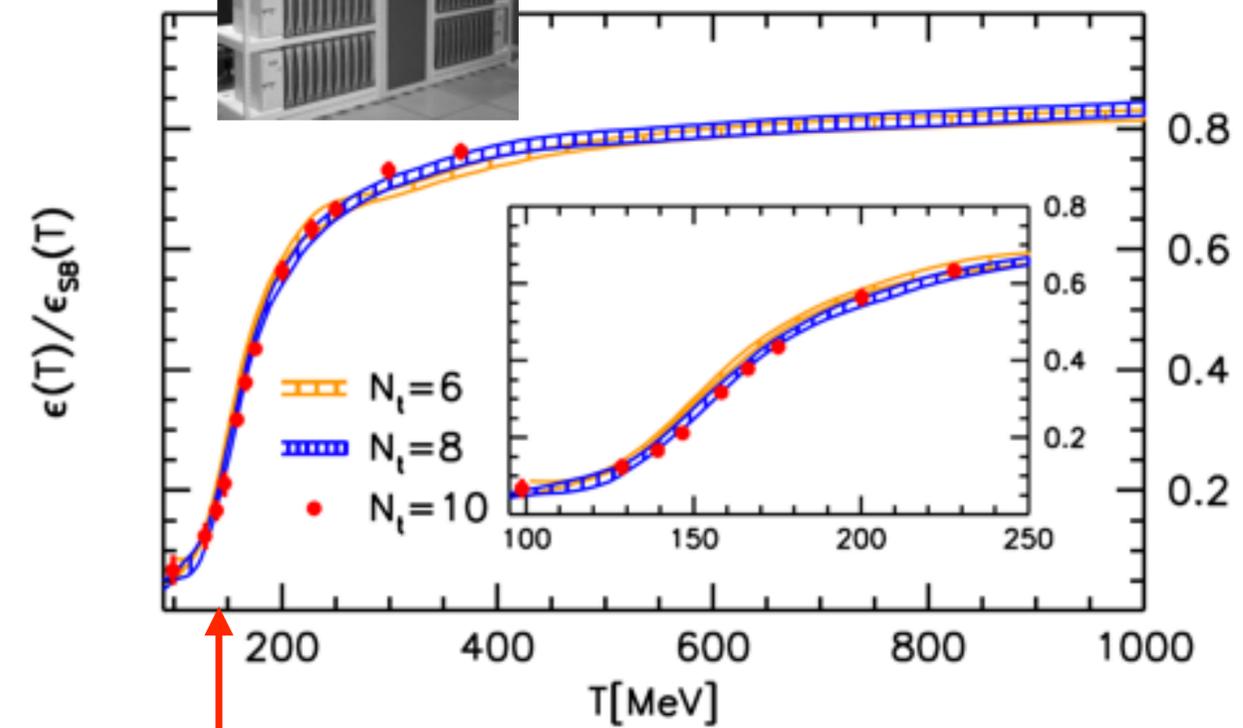
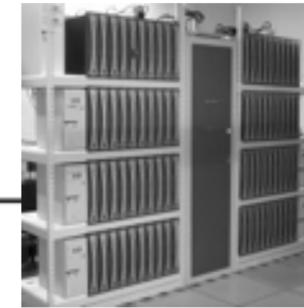
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{q}_j (i\gamma^\mu D_\mu + m_j) q_j$$

where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$

and $D_\mu \equiv \partial_\mu + it^a A_\mu^a$

That's it! ?

QCD predice una transición de materia ordinaria a un plasma de quarks y gluones



Experimentalmente se puede estudiar la materia QCD muy densa y caliente en colisiones de iones pesados

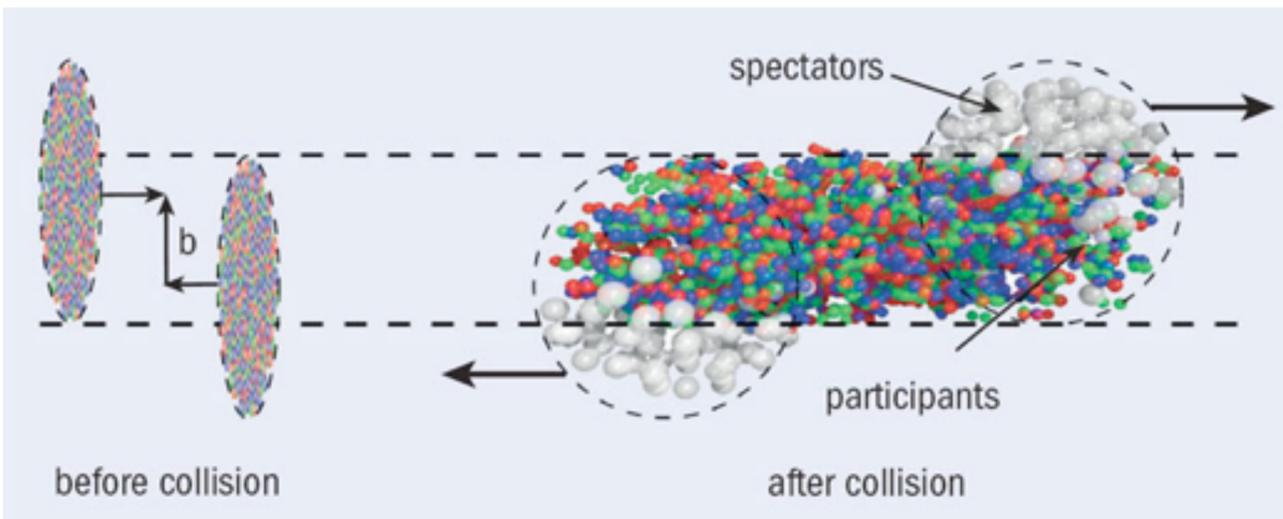
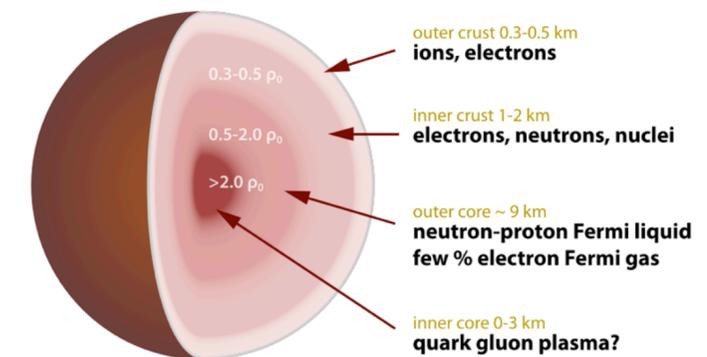
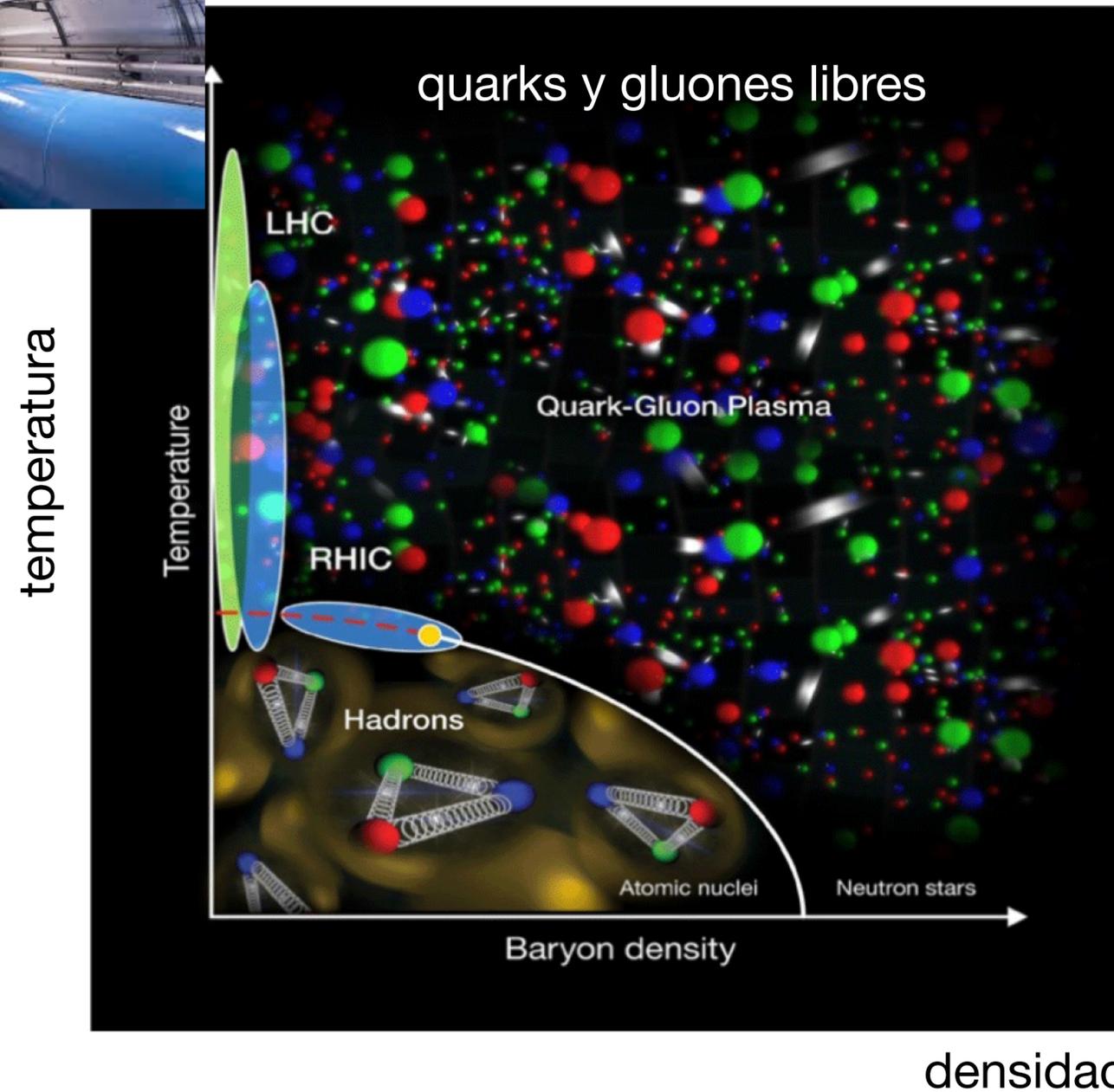
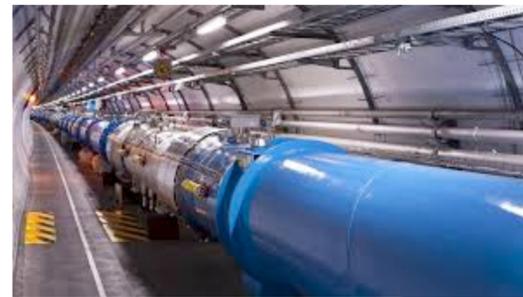
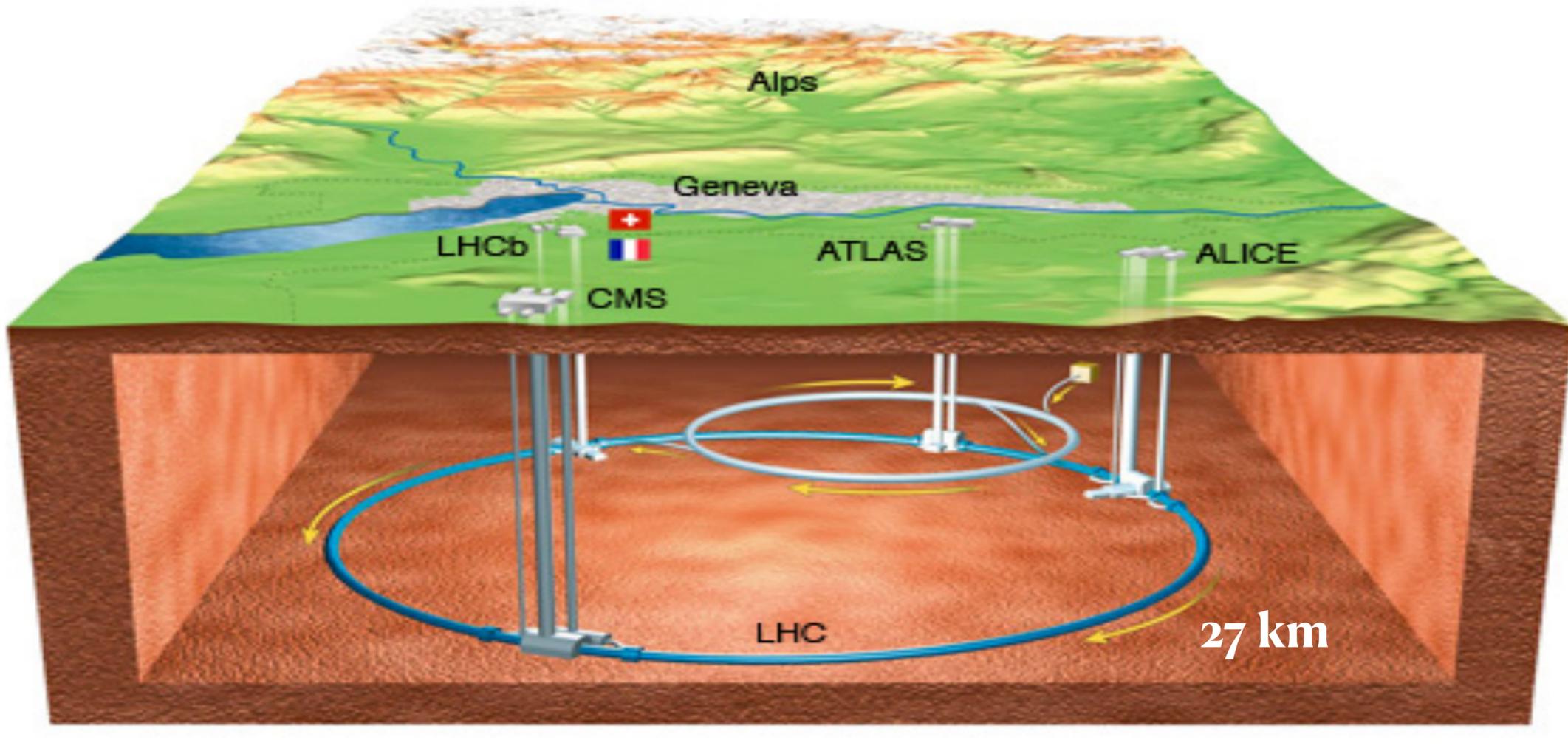


Diagrama de fase de materia nuclear



Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

Colisiones pp $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ y Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.36 \text{ TeV}$



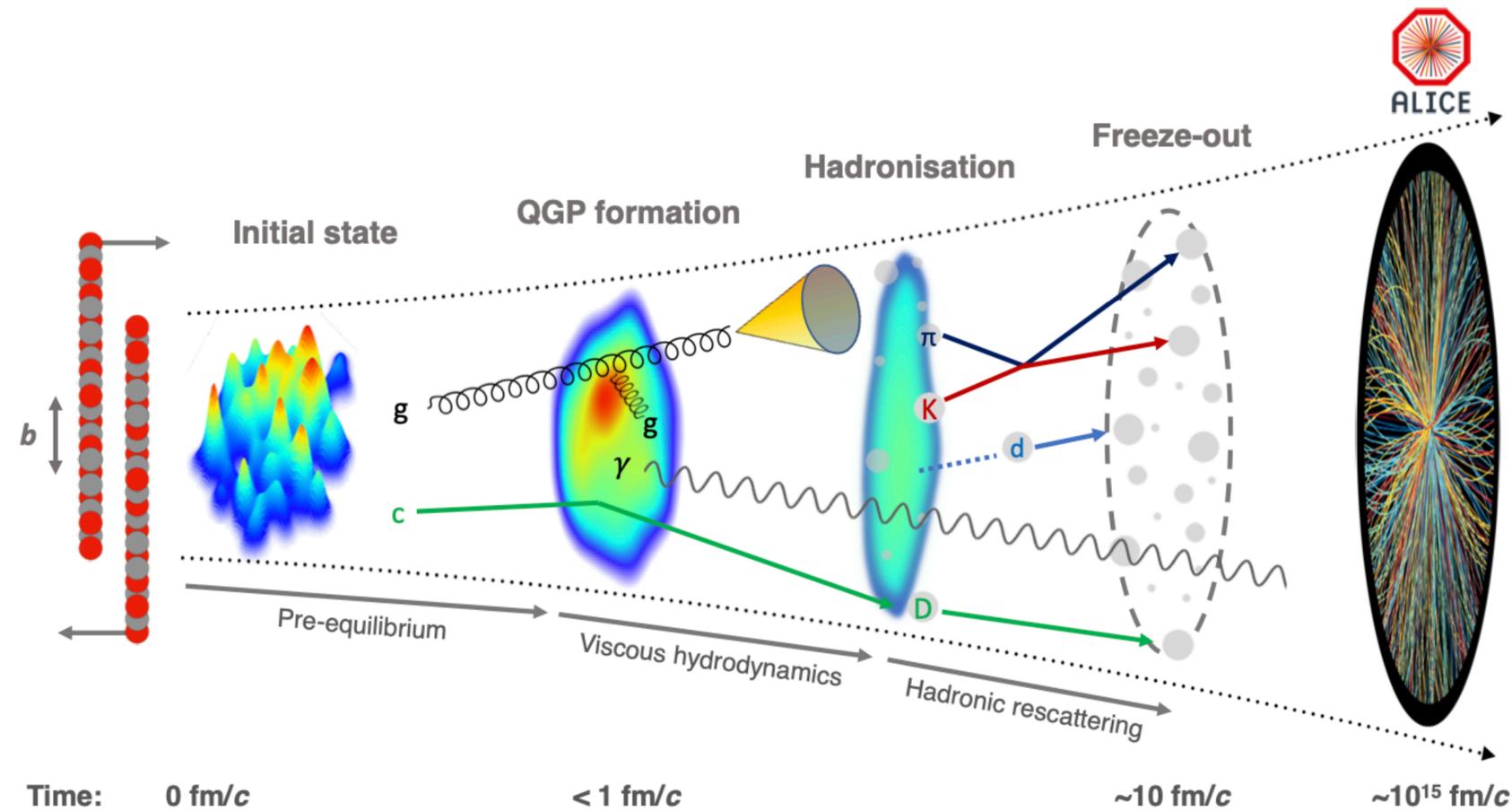
$\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ corresponde a la colisión de dos protones de 6.8 TeV de energía

7 TeV = energía de un mosquito volando



Parece poco, pero hay que considerar que el mosquito contiene 10^{20} átomos

Un QGP efímero



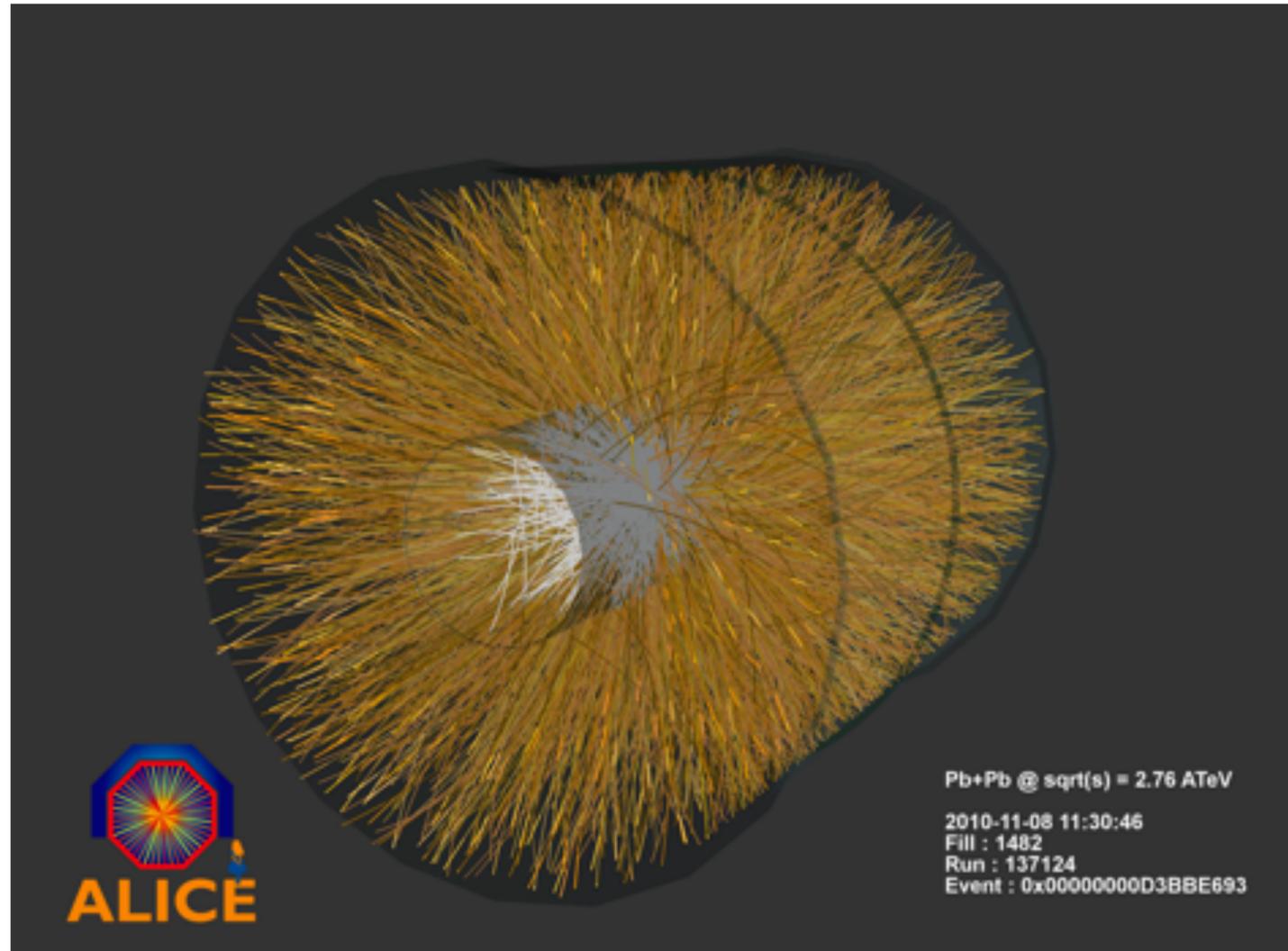
El QGP producido en colisiones es efímero, dura 10^{-23} segundos. Lo que se observa son:

- Partículas producidos después que el QGP se ha enfriado



Richard Feynman

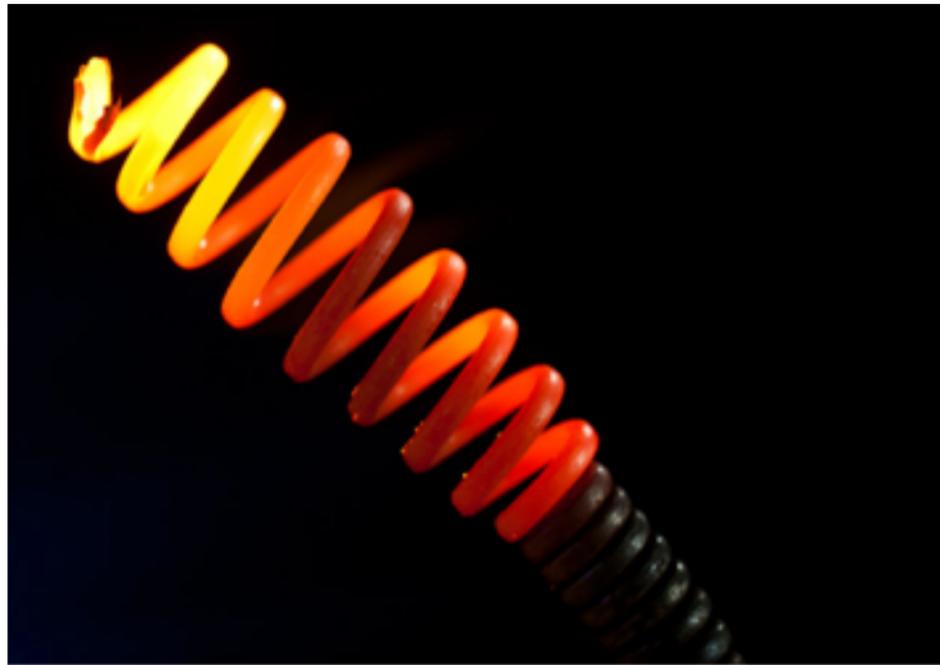
“Si tiro mi reloj contra una pared, resulta un reloj roto y no un nuevo estado de materia!”



De cierta manera Feynman tenía razón, pero no contaba con la astucia de los físicos experimentales para encontrar las señales del QGP en los restos de las colisiones.

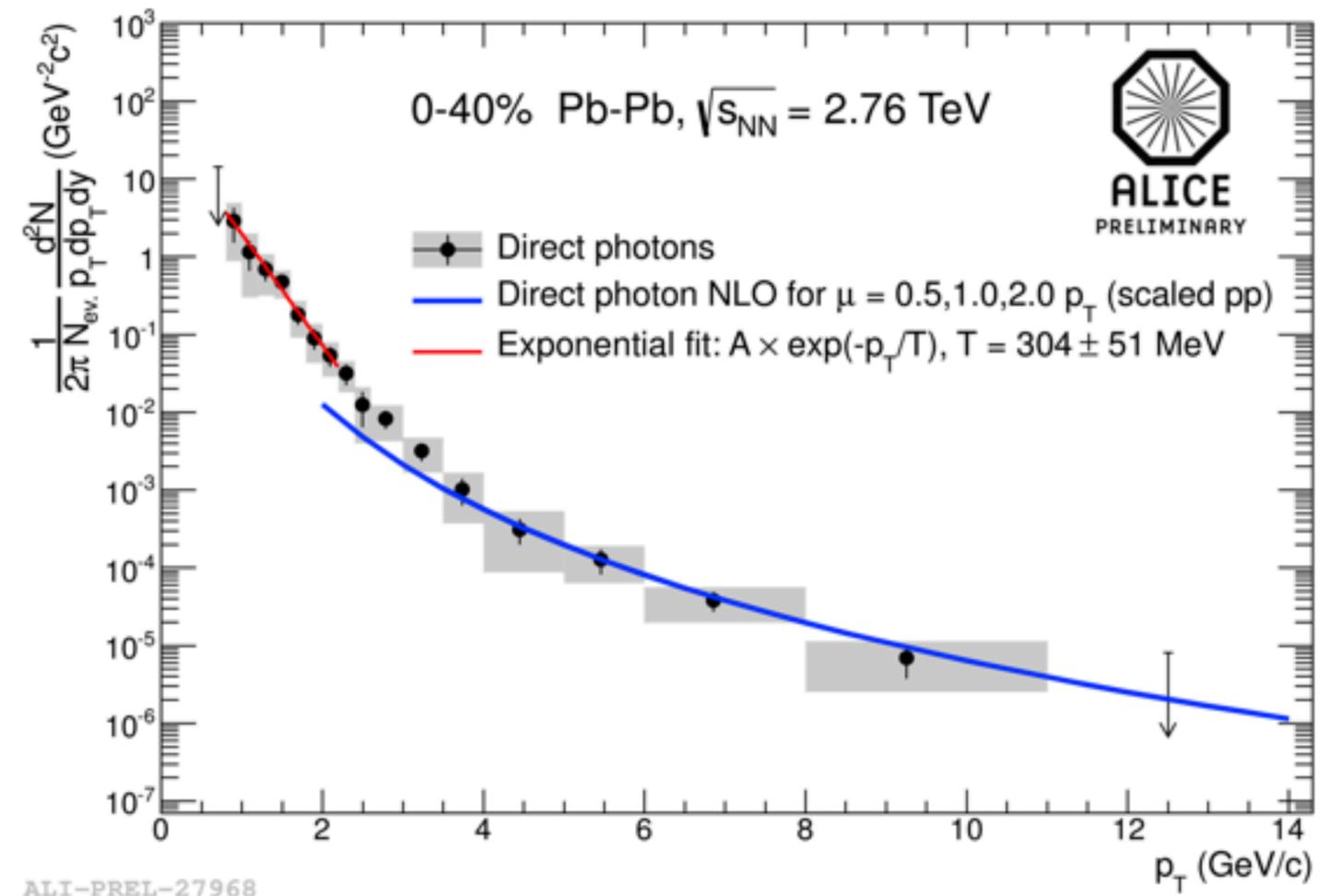
Temperatura del Plasma

Luz emitida por un objeto nos informa sobre su temperatura



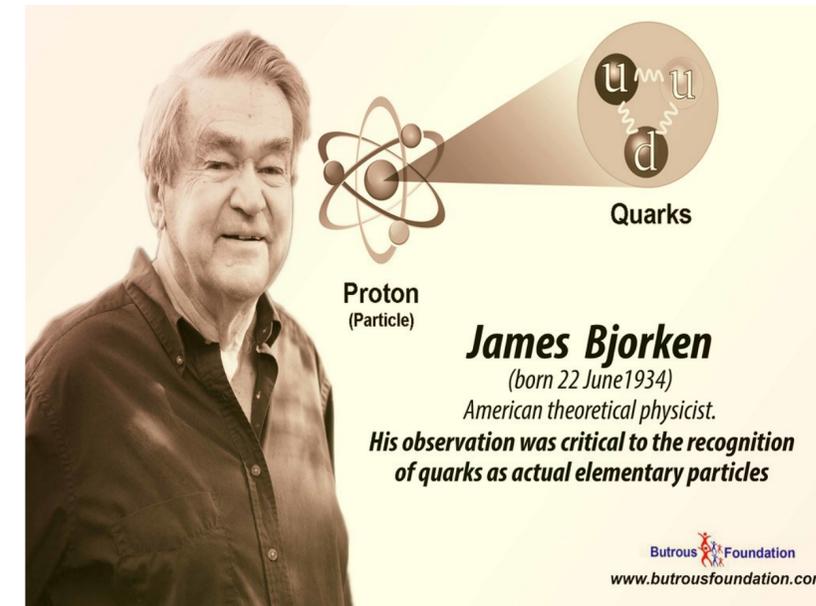
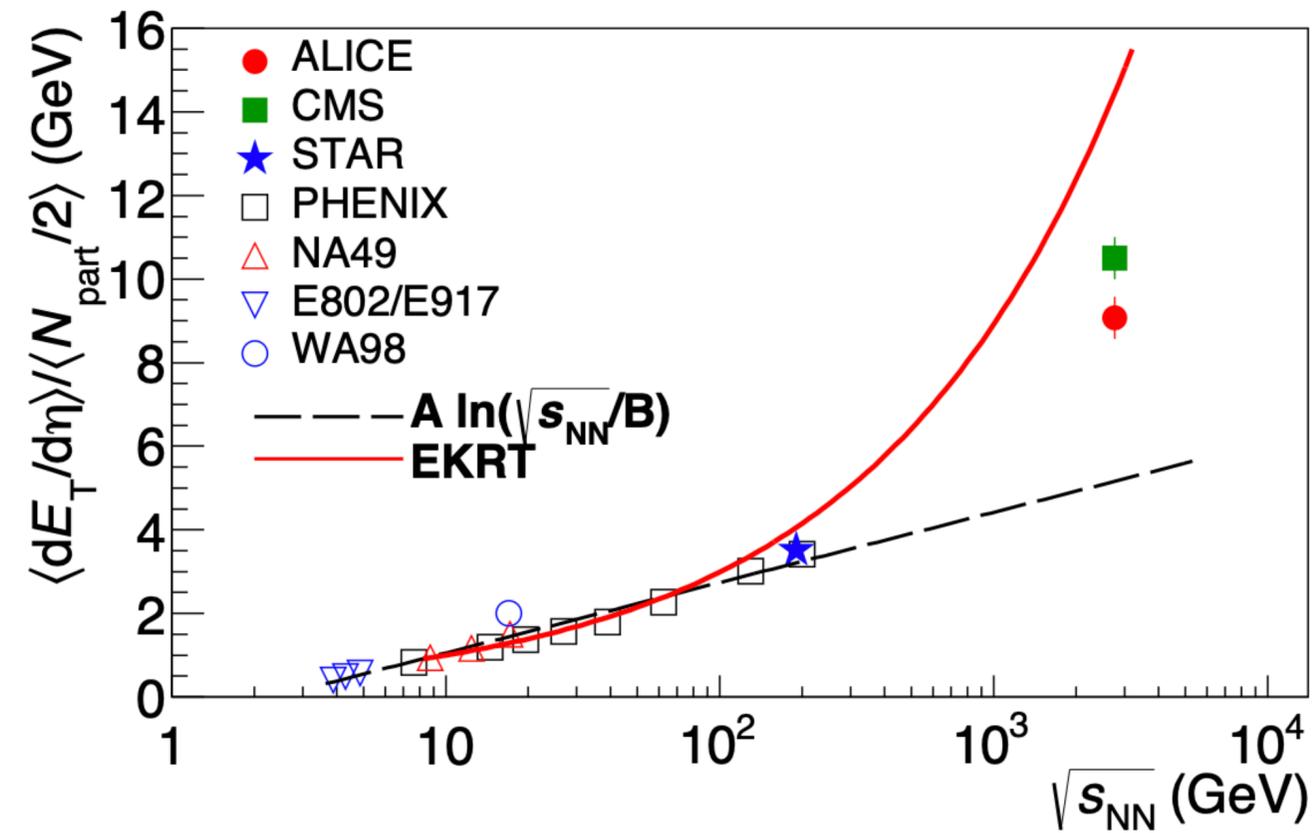
Temperatura del QGP $T = 4 \cdot 10^{12}$ K
100000 x T en interior del sol ($2.7 \cdot 10^7$ K)

Espectro de fotones
(partículas de la luz muy energéticas)



Densidad de Energía

Suma de la energía de las partículas emitidas a $\approx 90^\circ$ nos permite de calcular la densidad de energía



100 x densidad de energía de materia ordinaria

Rendimiento de partículas

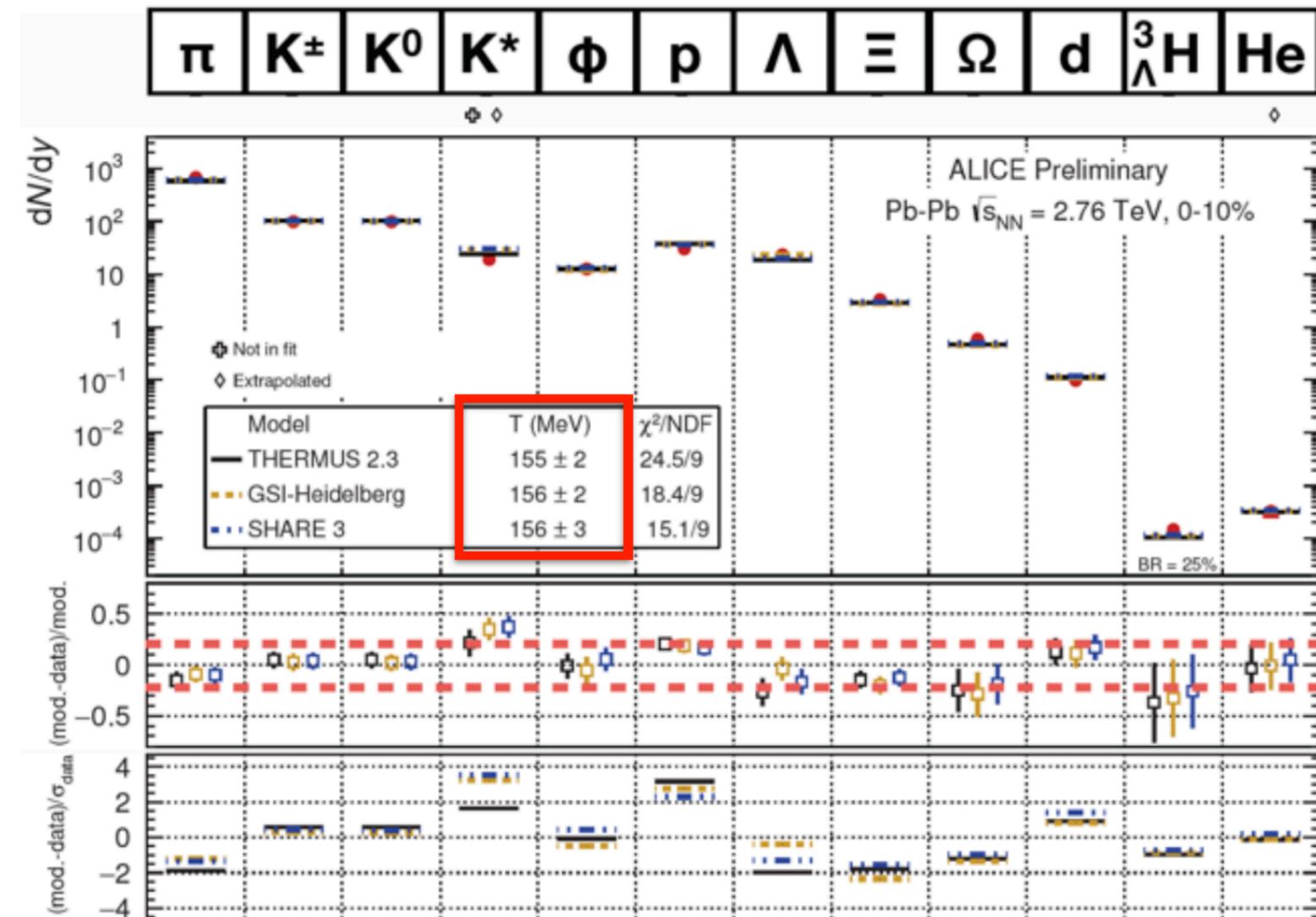
El rendimiento de partículas nos permite de obtener la temperatura de la transición de fase.

7 ordenes de magnitud

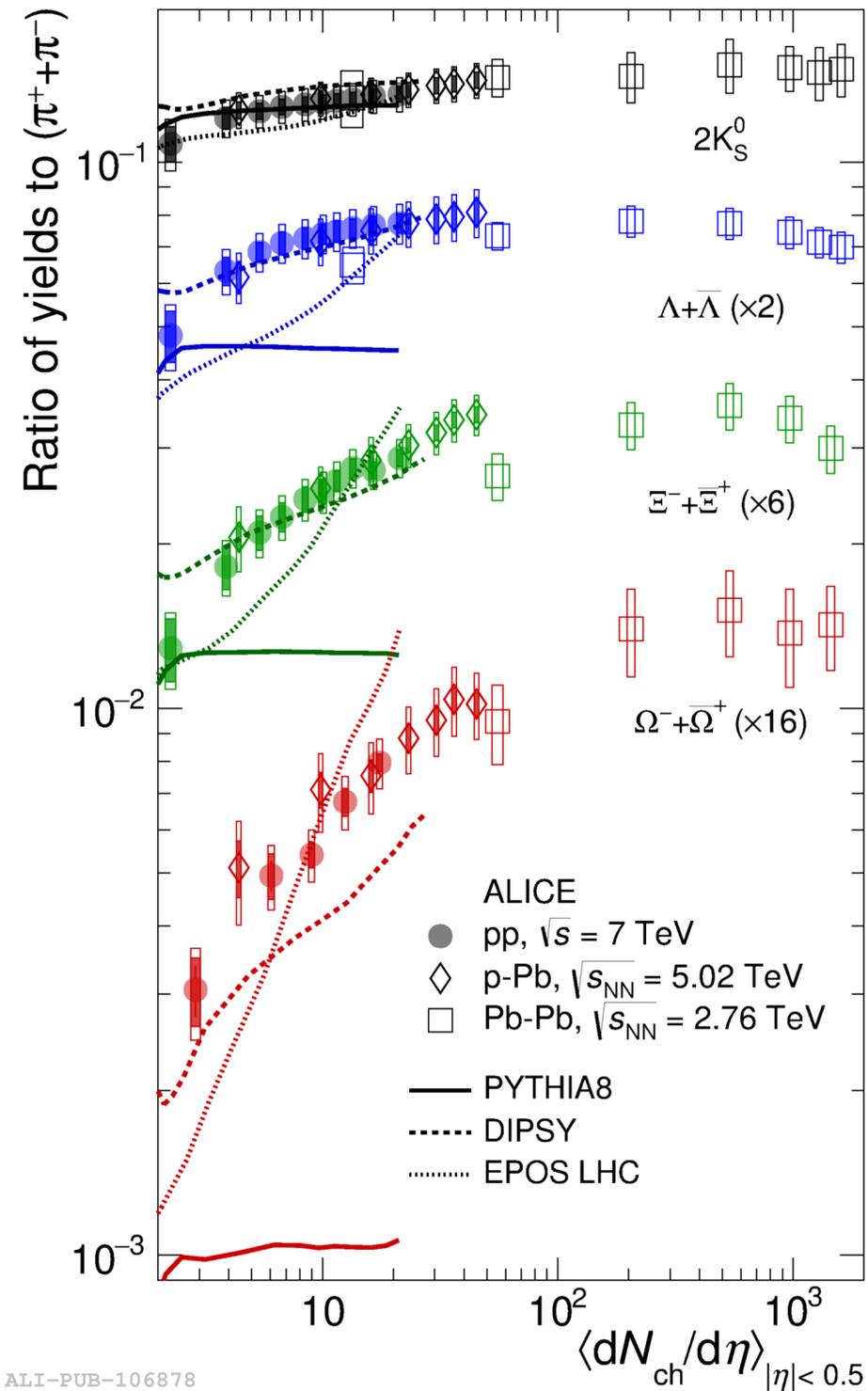
Temperatura en le momento de cambio de fase QGP/hadron
 Rendimiento proporcional al factor de Boltzmann $e^{-m/T}$

$$T_{fo} = 156 \text{ MeV}$$

Cerca del valor teórico



Incremento de Extrañeza

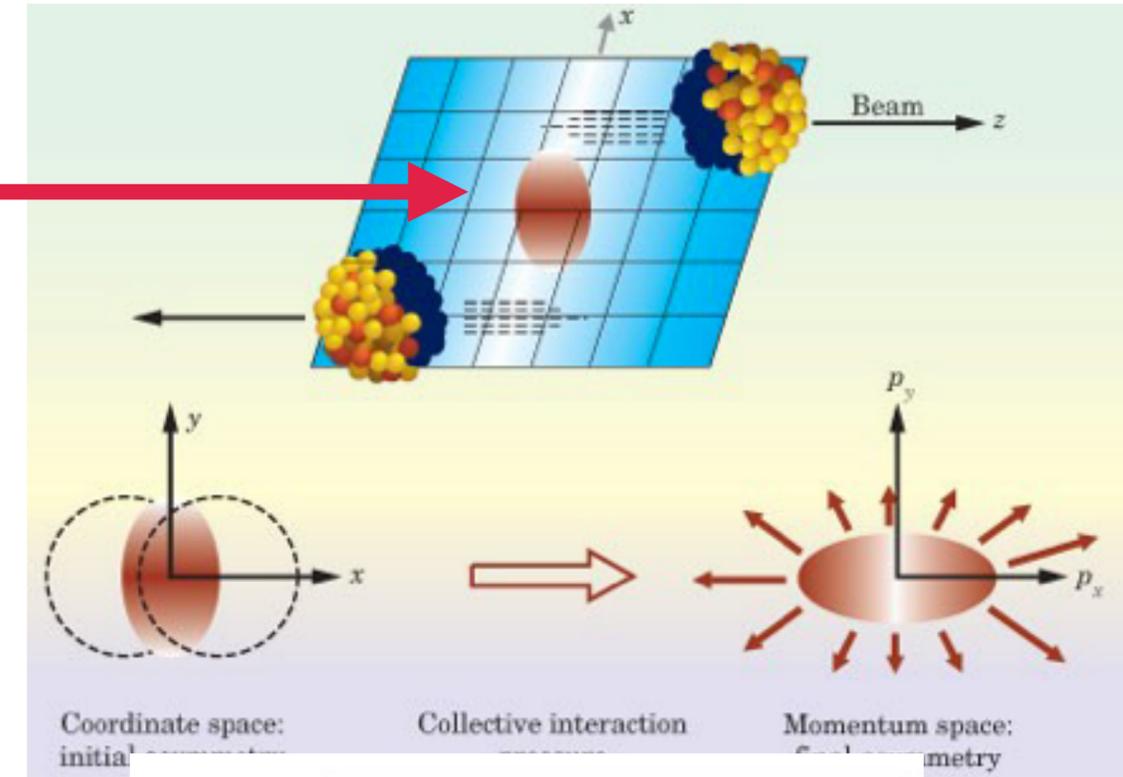


Medición durante clases "Hands-On" en la tarde!

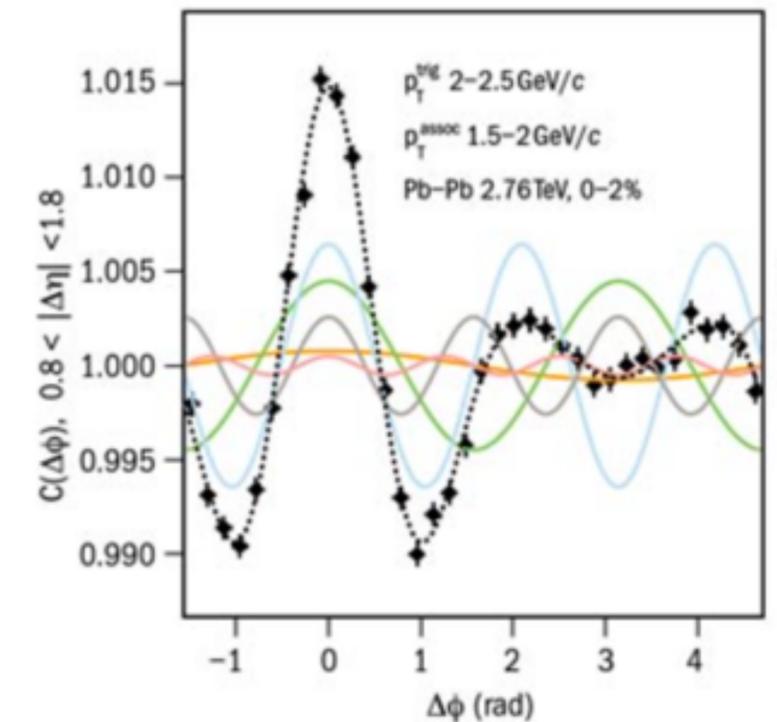
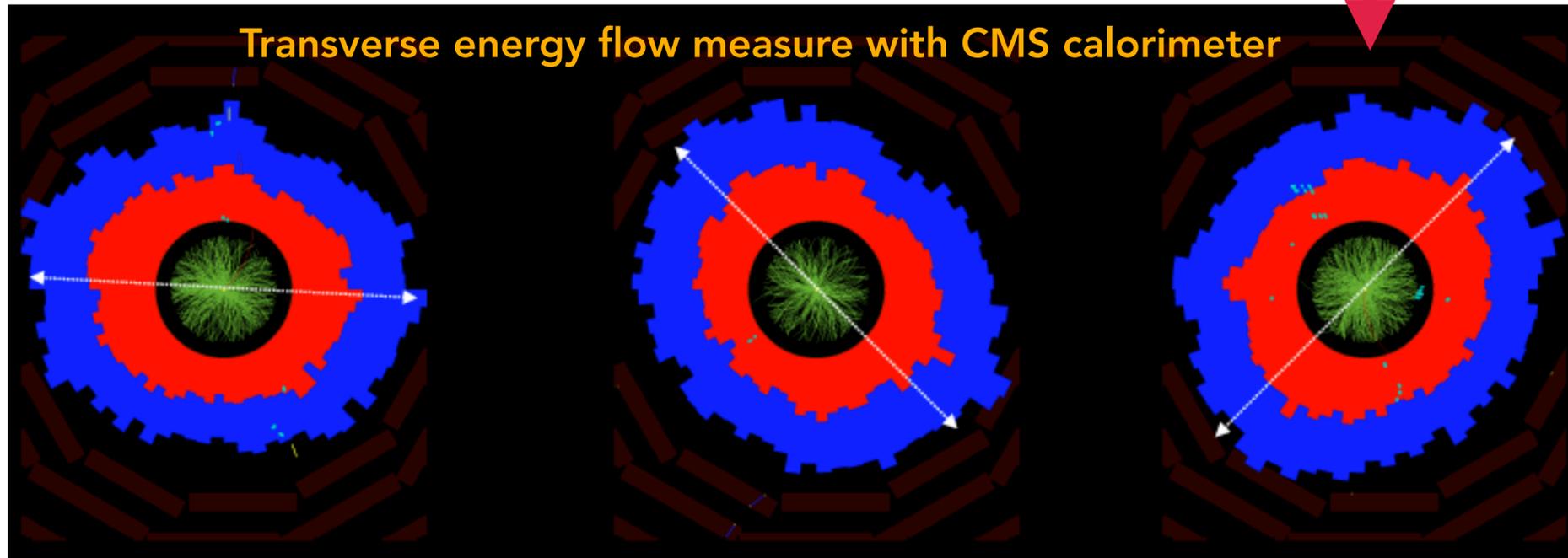
El flujo de partículas

En colisiones no centrales la region de la collision tiene la forma de una almendra

El QGP transforma esta geometría inicial en un flujo de energía anisótropo.
Da información sobre la viscosidad del QGP.

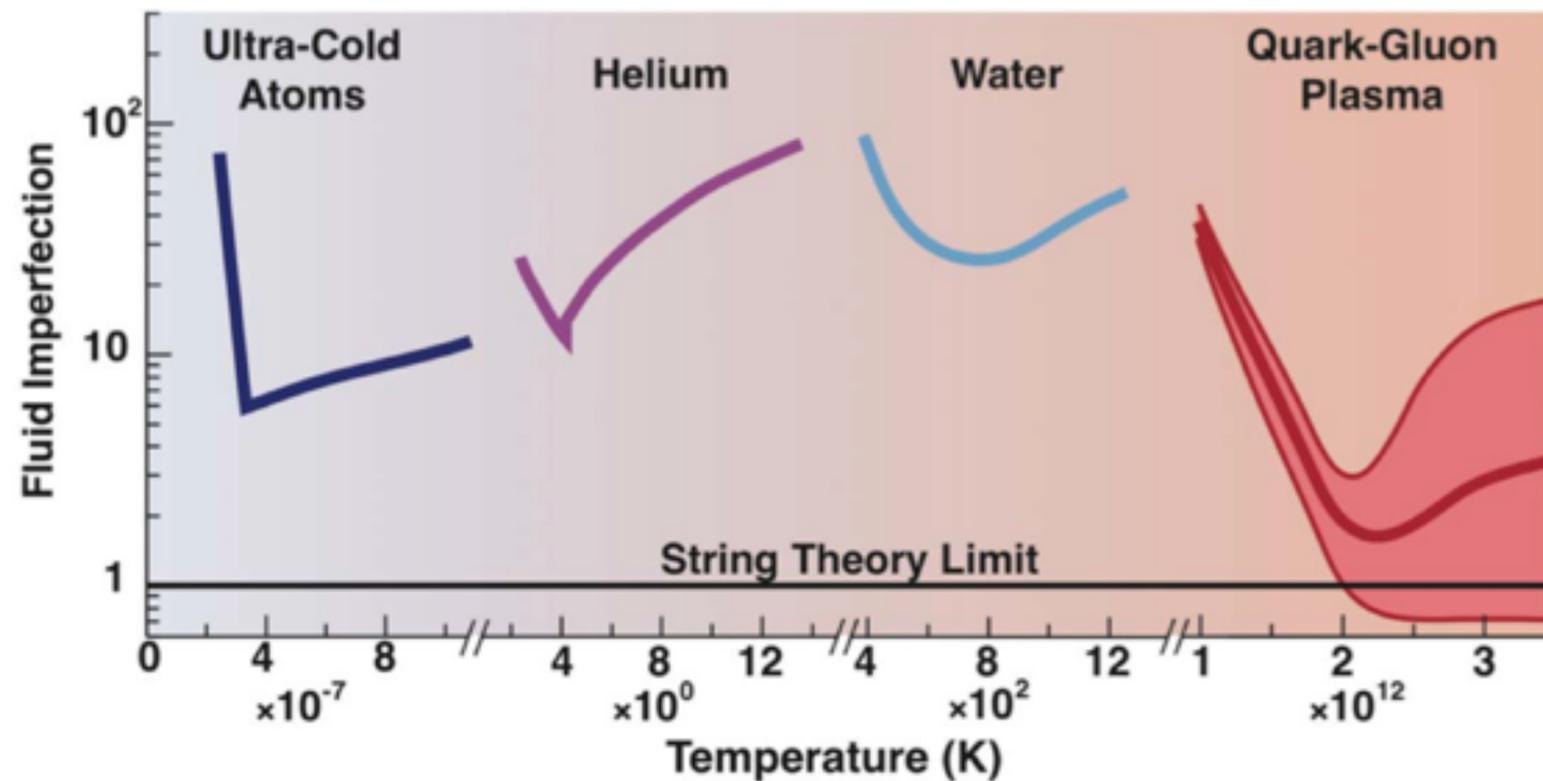


Transverse energy flow measure with CMS calorimeter



QGP: Un Líquido casi perfecto

La perfección de un líquido se mide con **viscosidad / densidad de entropía** (medida del desorden)



La viscosidad es alta (5×10^{11} Pa.s)
... mas alto que la viscosidad de brea (2.3×10^8 Pa.s).

The pitch drop experiment, University of Queensland



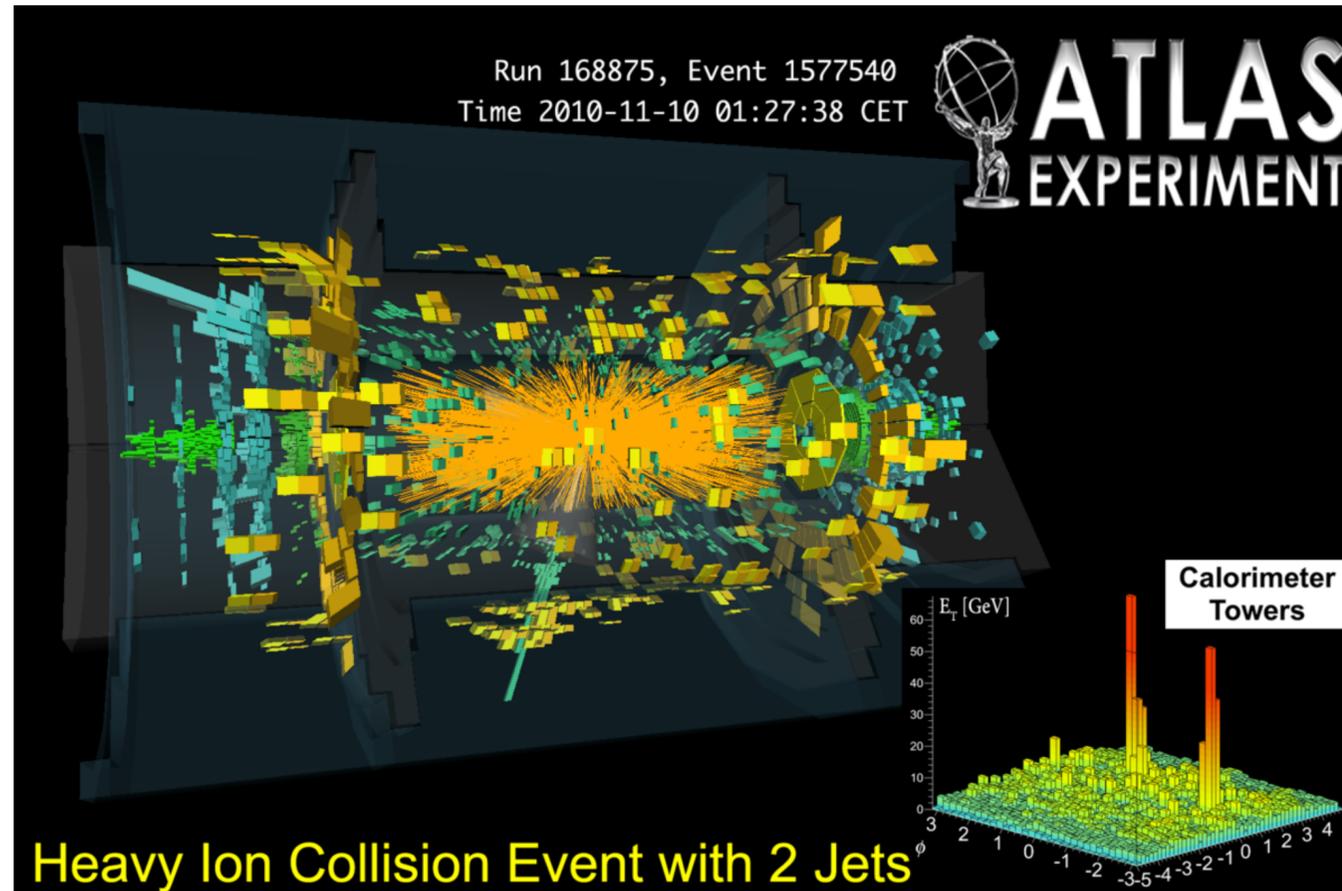
<http://thetenthwatch.com/feed/>

9 gotas han caído desde 1927, la última en 2014
próxima gota pronto ? ...

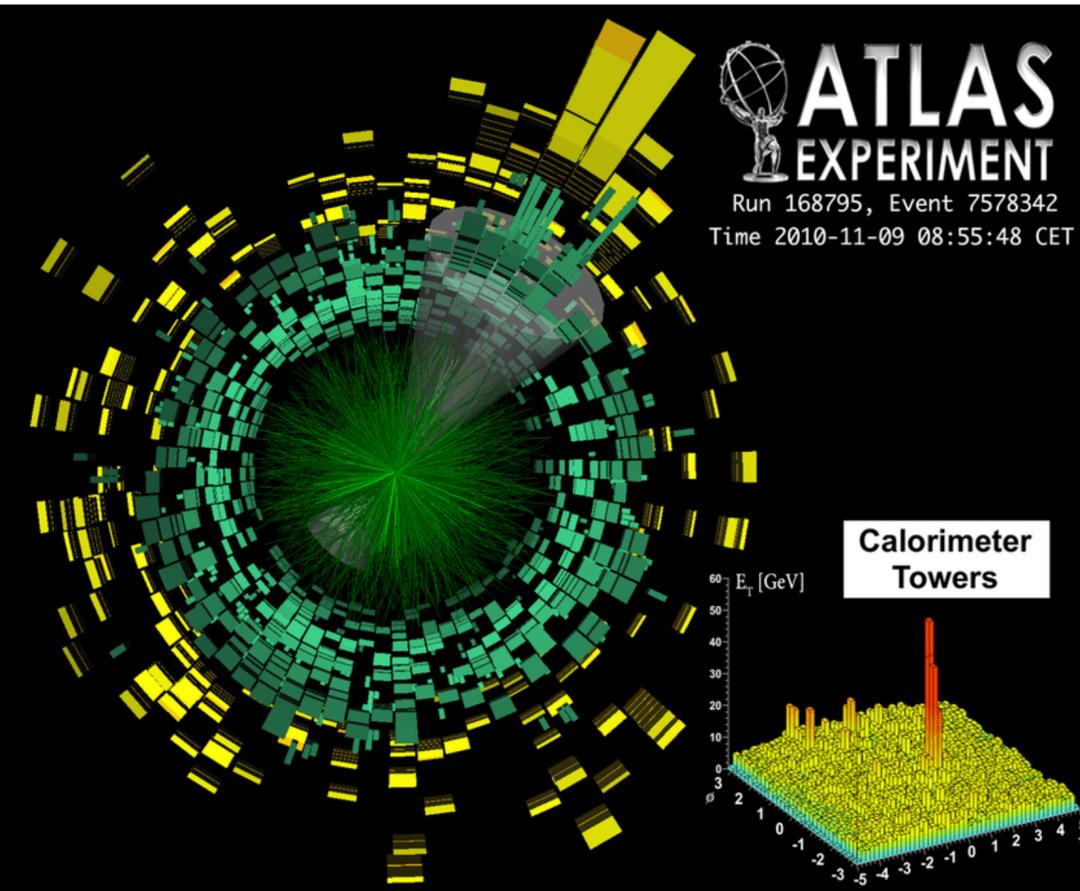
pf no hagan su tesis en este experimento!

Interacción fuerte entre quarks/gluones y el QGP

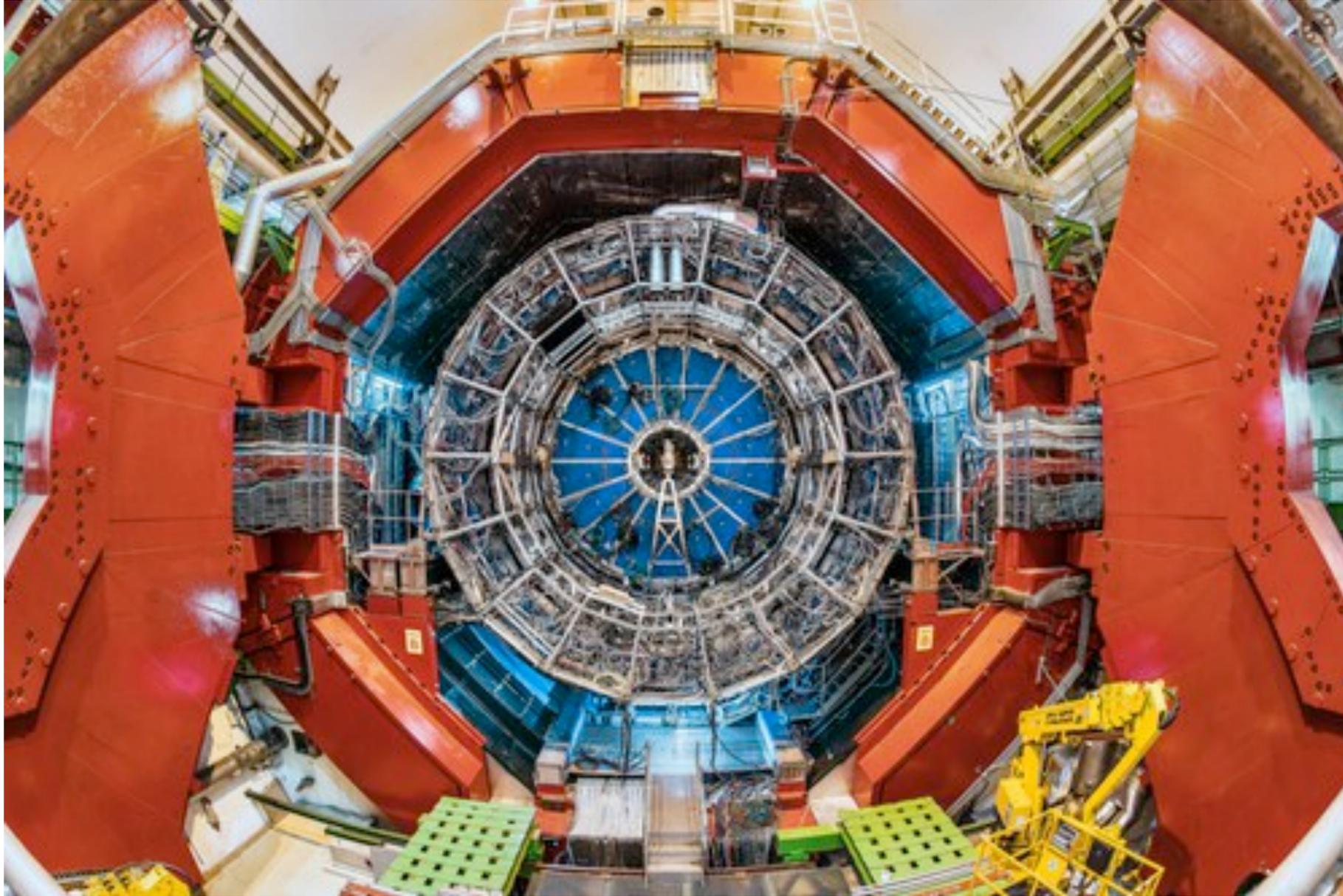
“Di-Jet”



“Mono-Jet”



El QGP absorbe quarks y gluones de alta energía ...
... pero deja pasar fotones



El Experimento ALICE



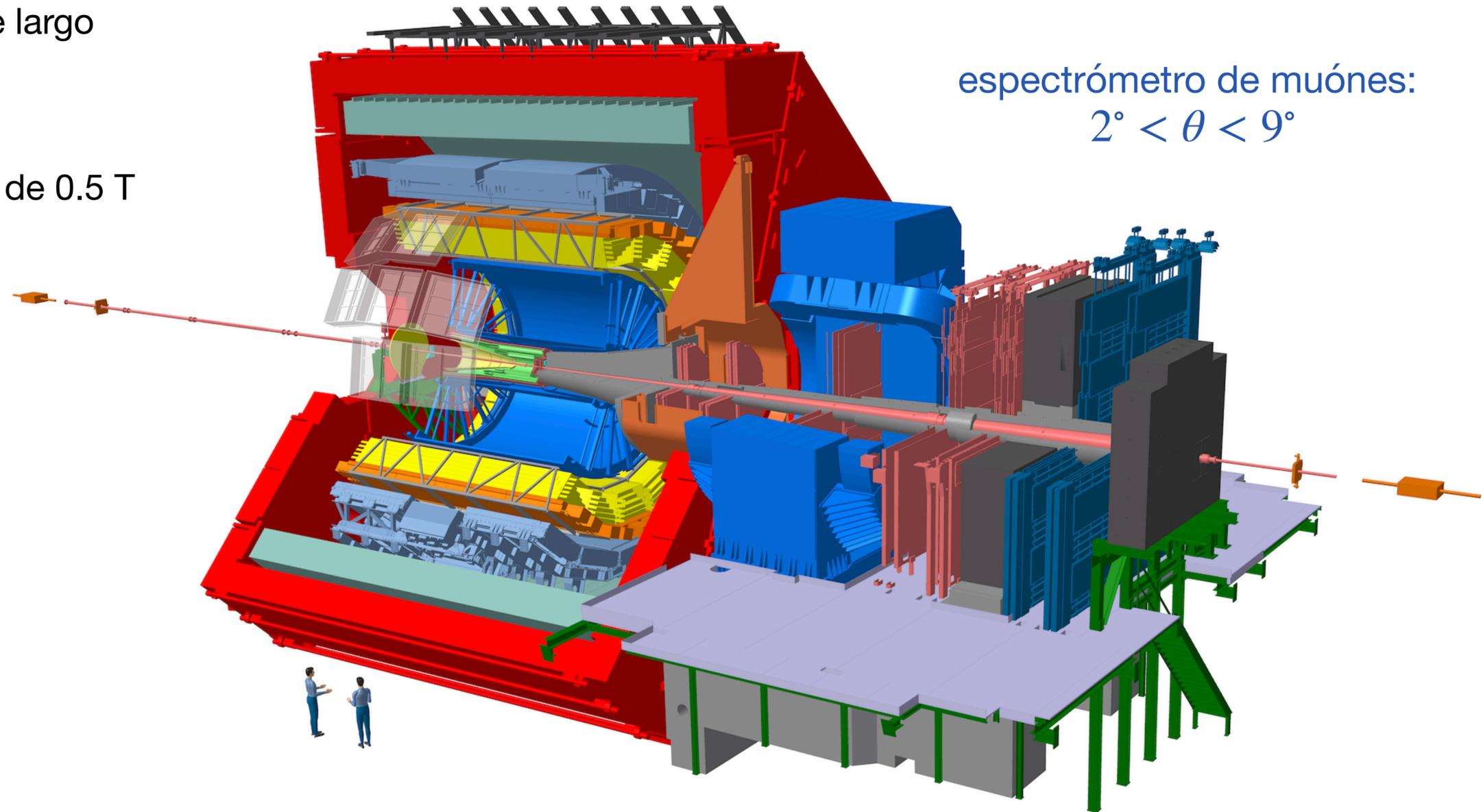
ALICE

A Large Ion Collider Experiment

- Instalado en una caverna 56 m bajo tierra
- Mide 16 m de ancho, 16 m de alto y 26 m de largo
- Pesa 10,000 t más que la torre Eiffel
- Un gran imán produce un campo magnético de 0.5 T curvando el camino de partículas cargadas.

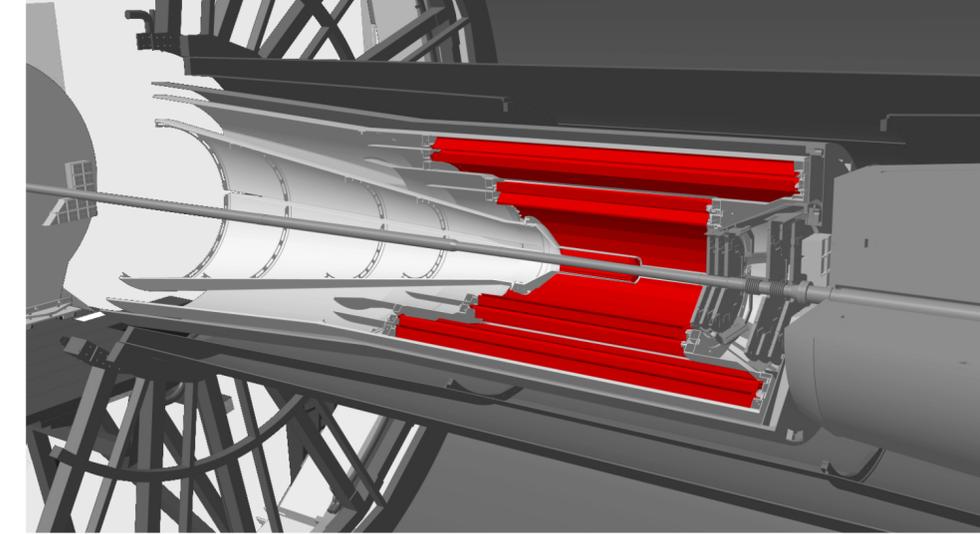
parte central: $-45^\circ < \theta < 45^\circ$
 $B = 0.5 \text{ T}$

espectrómetro de muones:
 $2^\circ < \theta < 9^\circ$

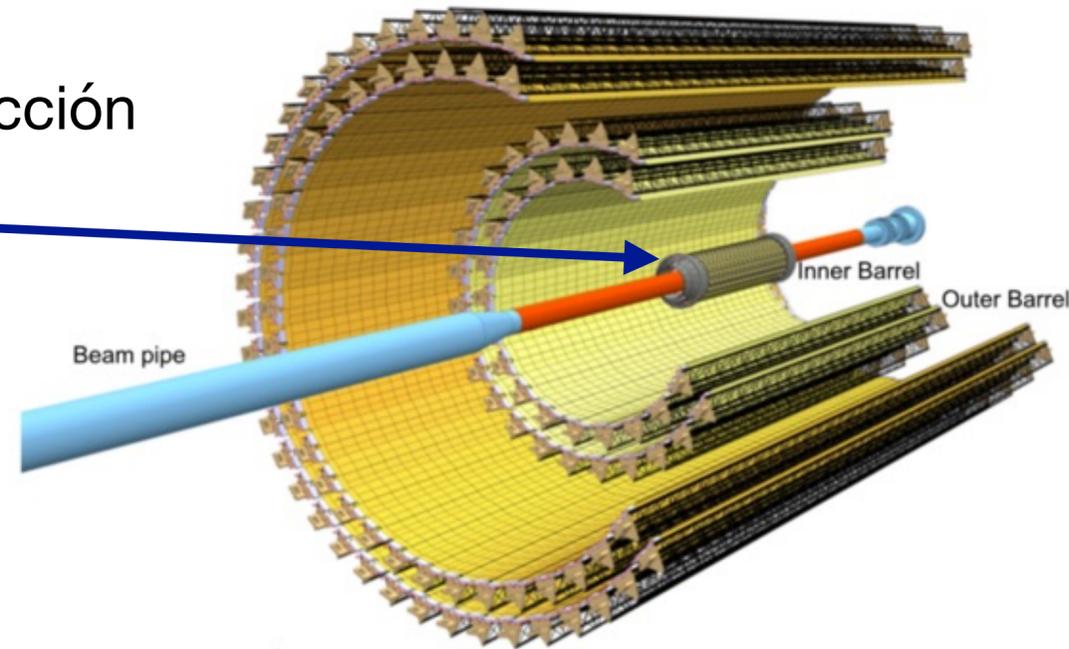


Un tablero de ajedrez enorme

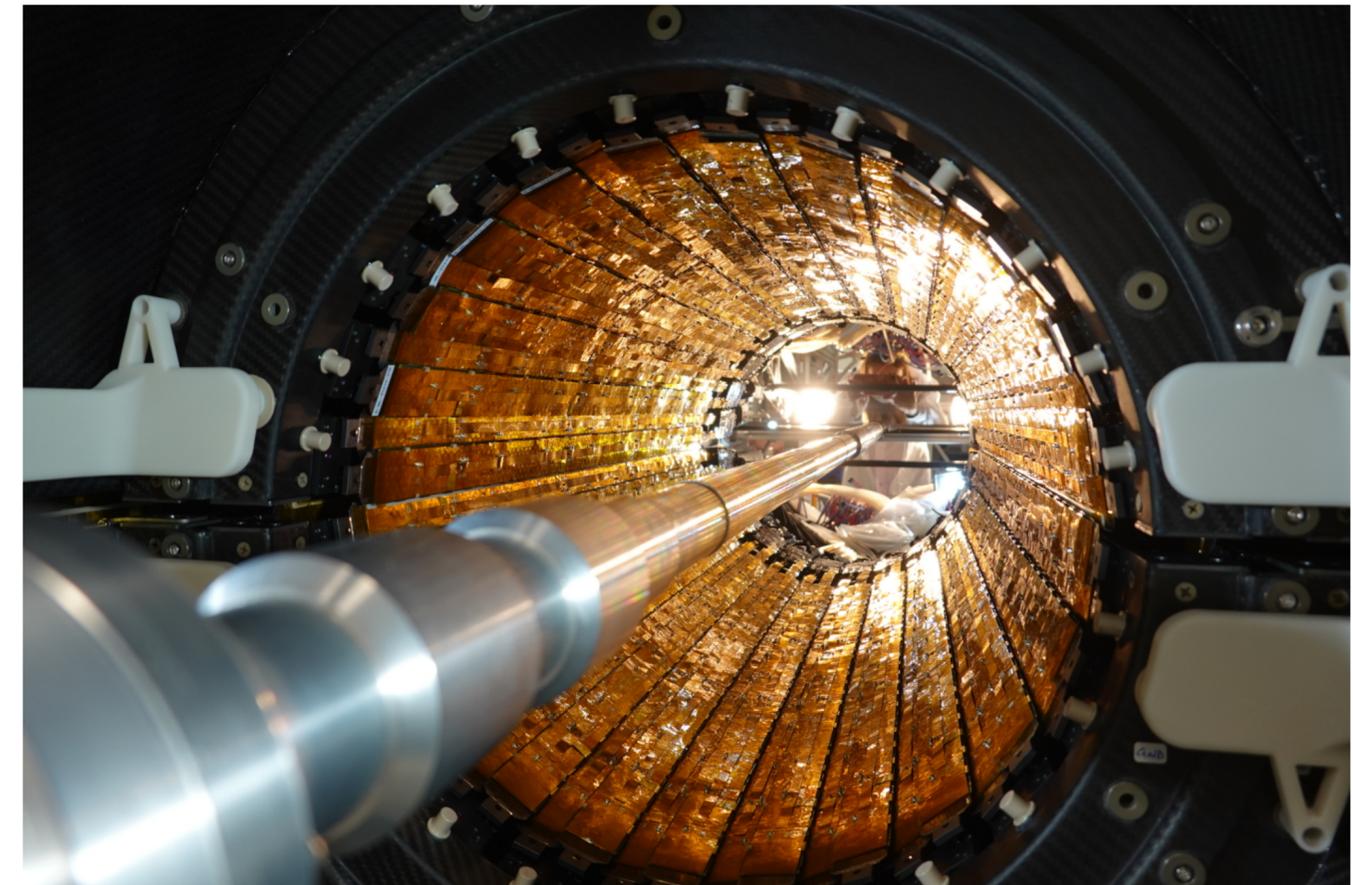
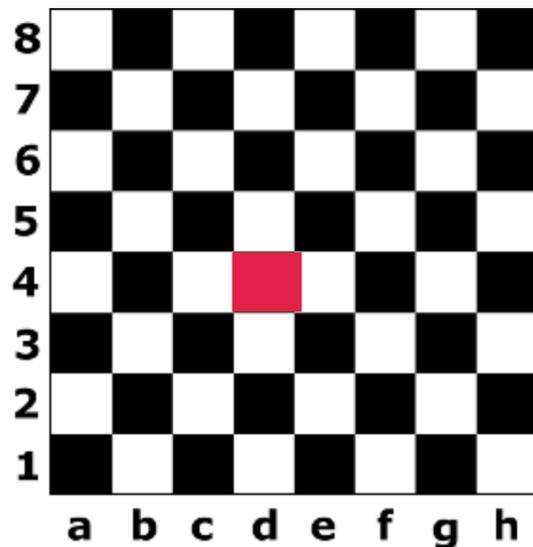
Inner Tracking System ITS



- 7 capas de Silicon Pixel de una talla de $30 \times 30 \mu\text{m}^2$
- $12.5 \cdot 10^9$ pixels
- Cerca al punto de interacción
- $R_{\text{inner}} = 2.1 \text{ cm}$



cailla = Pixels = sensor
geometria = tablero de ajedrez

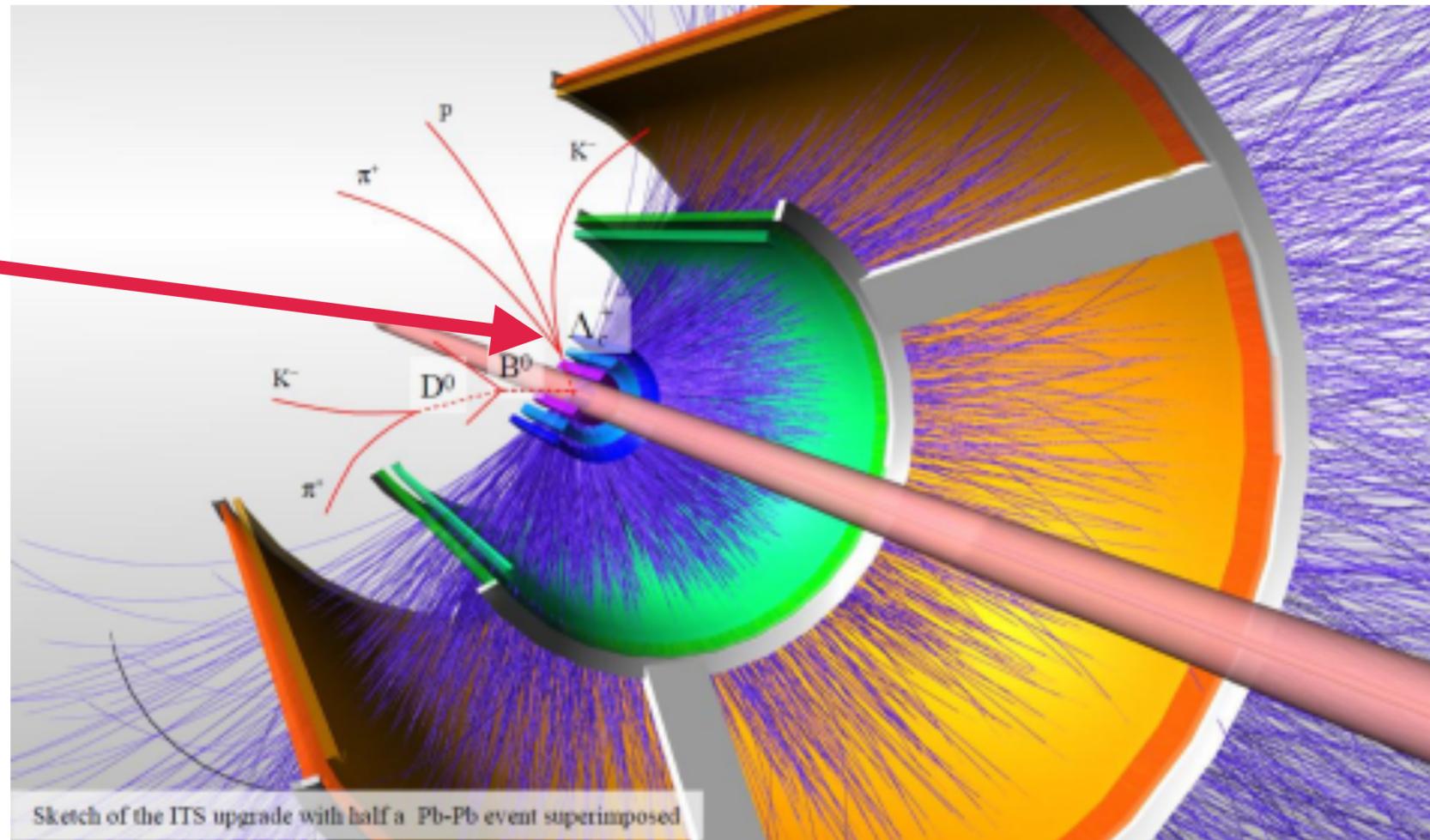


Se identifica el pixel donde paso una partícula, y cada pixel corresponde a una posición en 3 dimensiones.

Encanto y Belleza = Vida Corta

Se necesita detectores cerca del punto de interacción para observar el decaimiento de hadrones con charm o beauty

vertice de decaimiento
 $\mathcal{O}(100 \mu\text{m})$

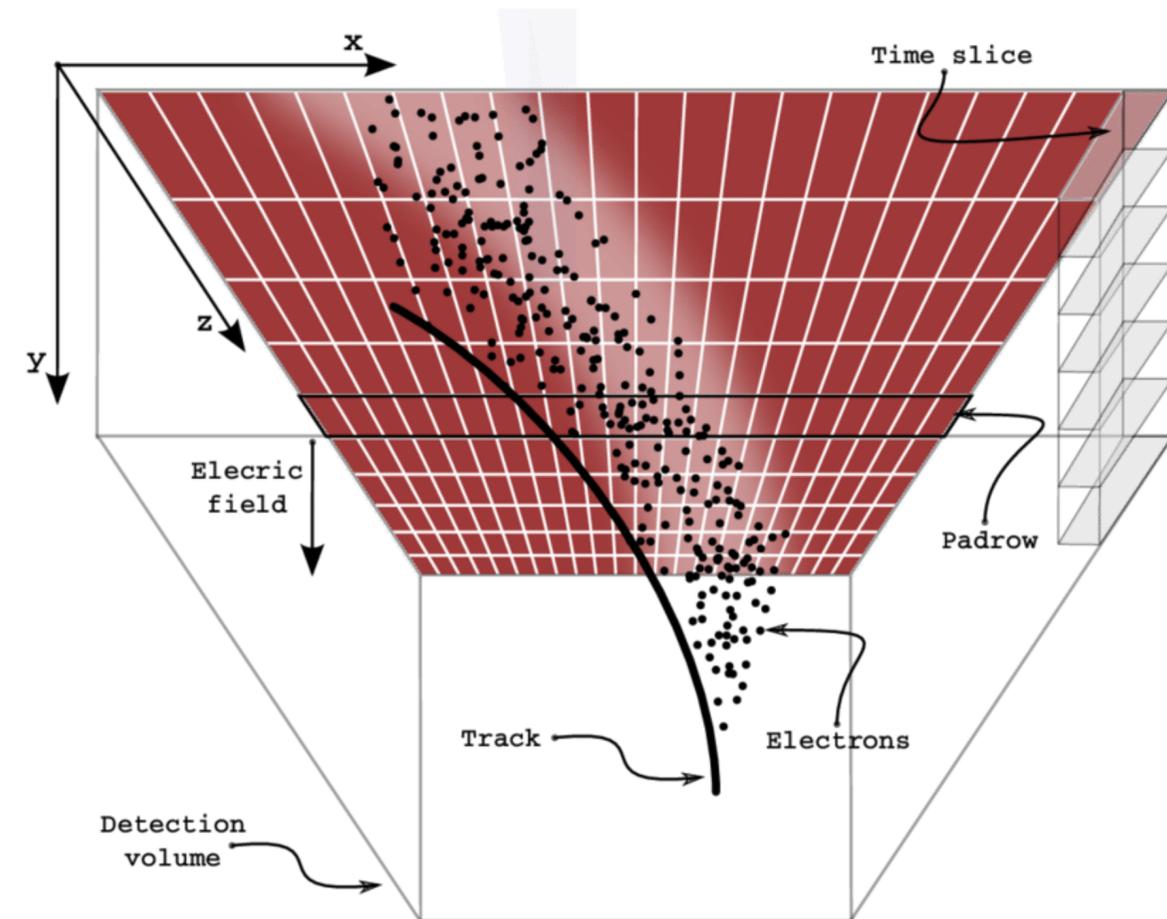
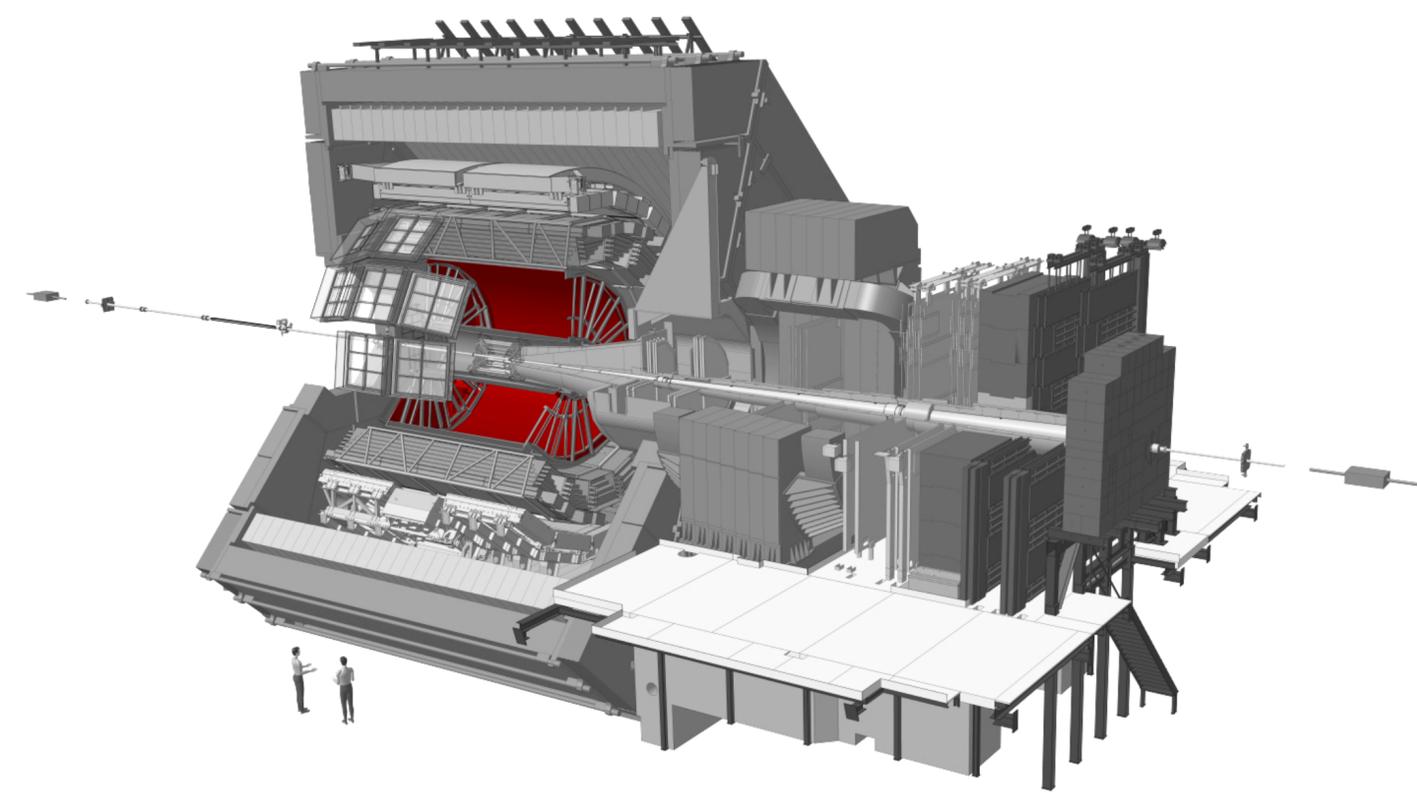
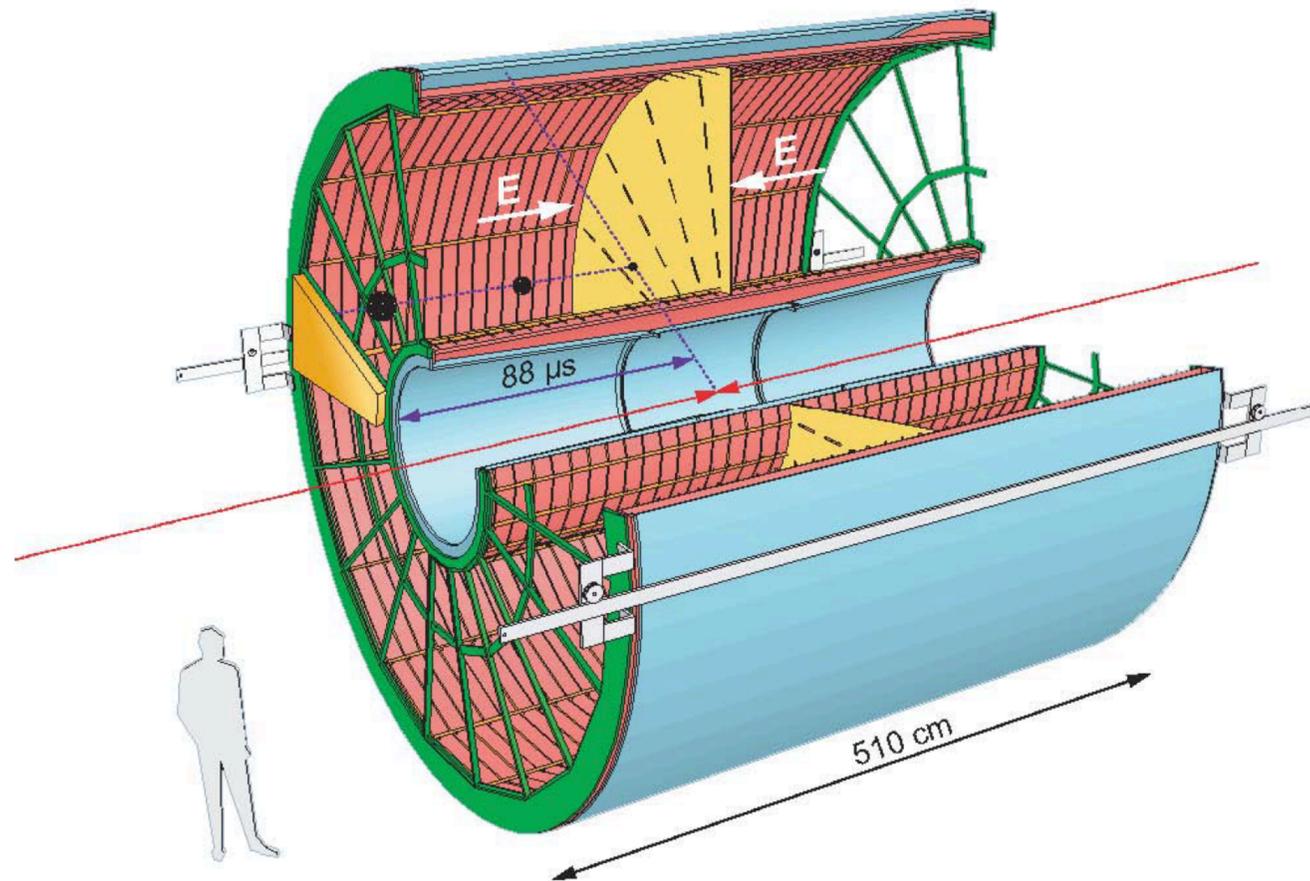


La maquina de tiempo

Cámara de Proyección Temporal (TPC)

- Consiste en
 - Un gran volumen de detección cilíndrico lleno de gas (90 m^3)
 - Se encuentra dentro de un fuerte campo eléctrico (400 V/cm)
 - Detectores como placas terminales miden: (y, y)
 - Con el tiempo de llegada se la señal: z

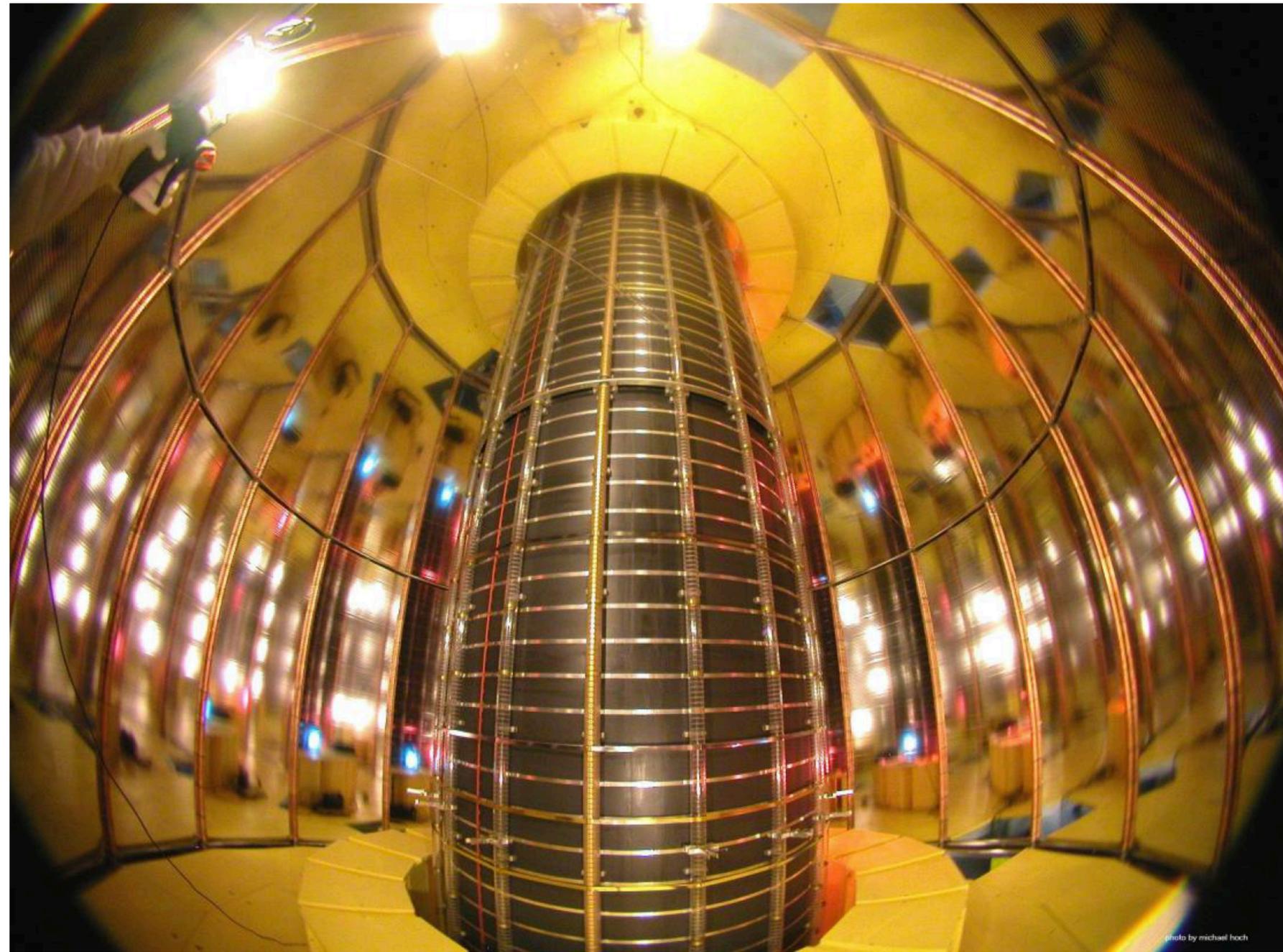
“3D”



placas terminales

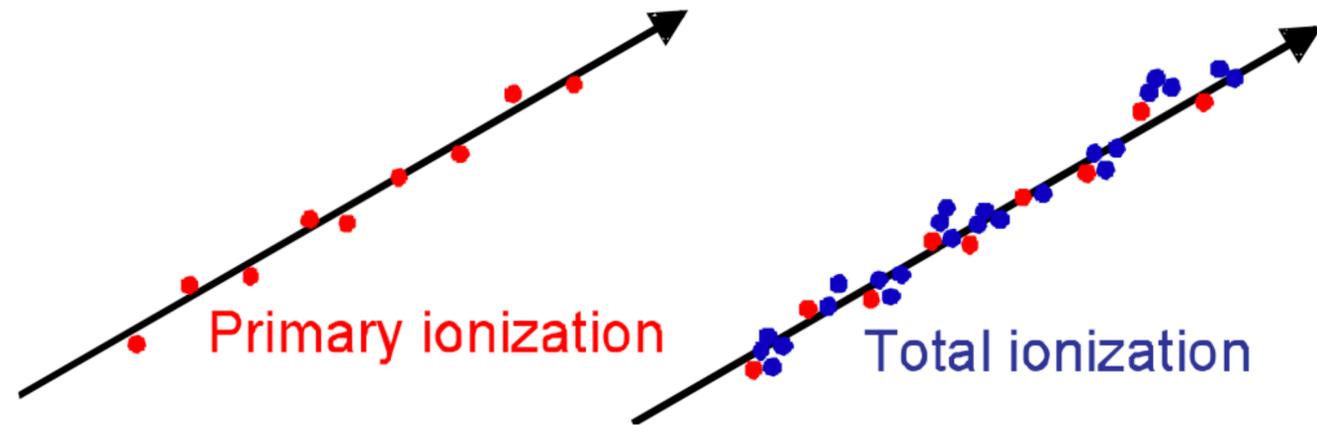


parte central

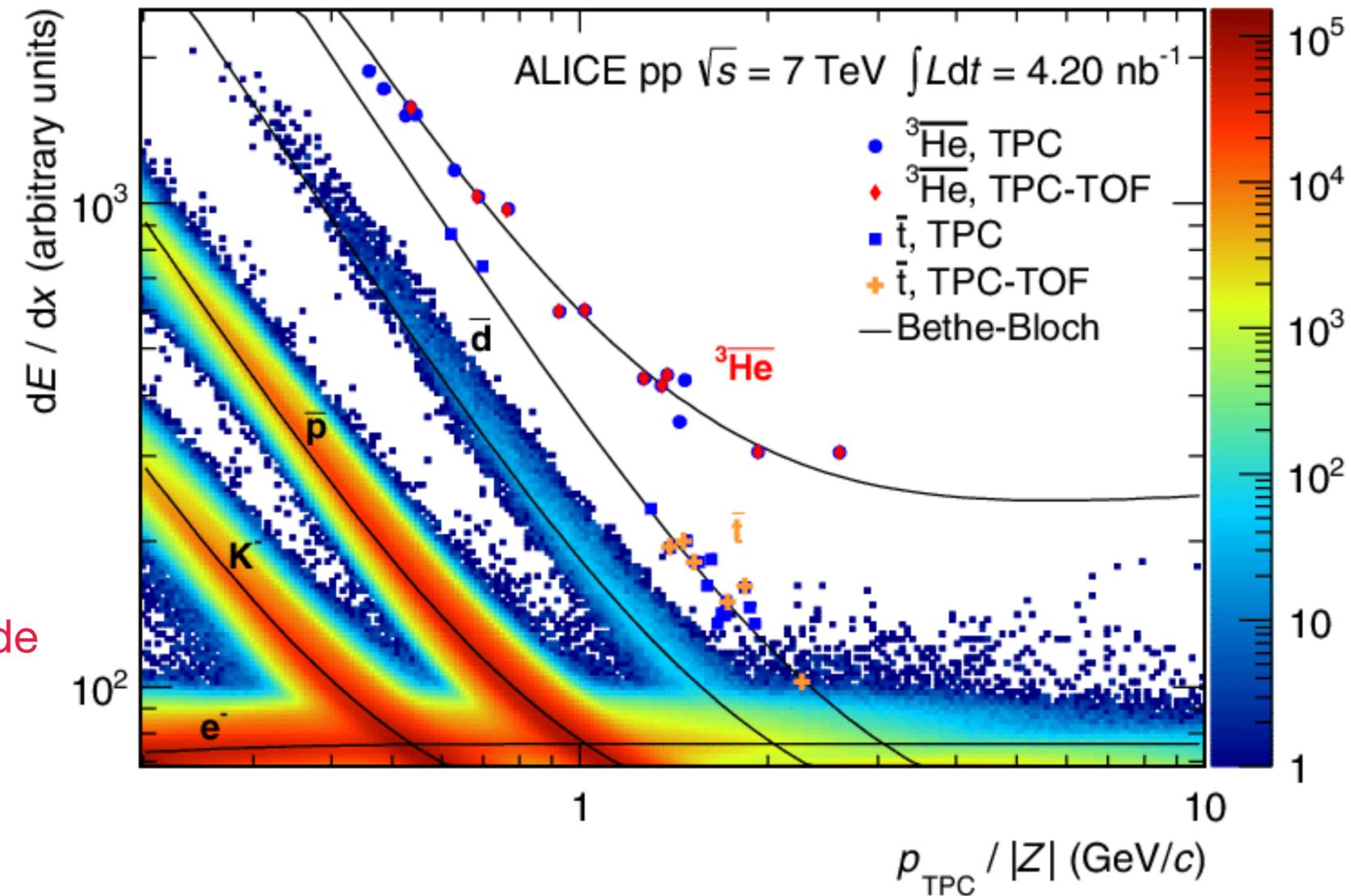


Perdida de energía por ionización

Partículas cargadas que pasan a través de un material ionizan los átomos y producen electrones libres en su trayectoria.



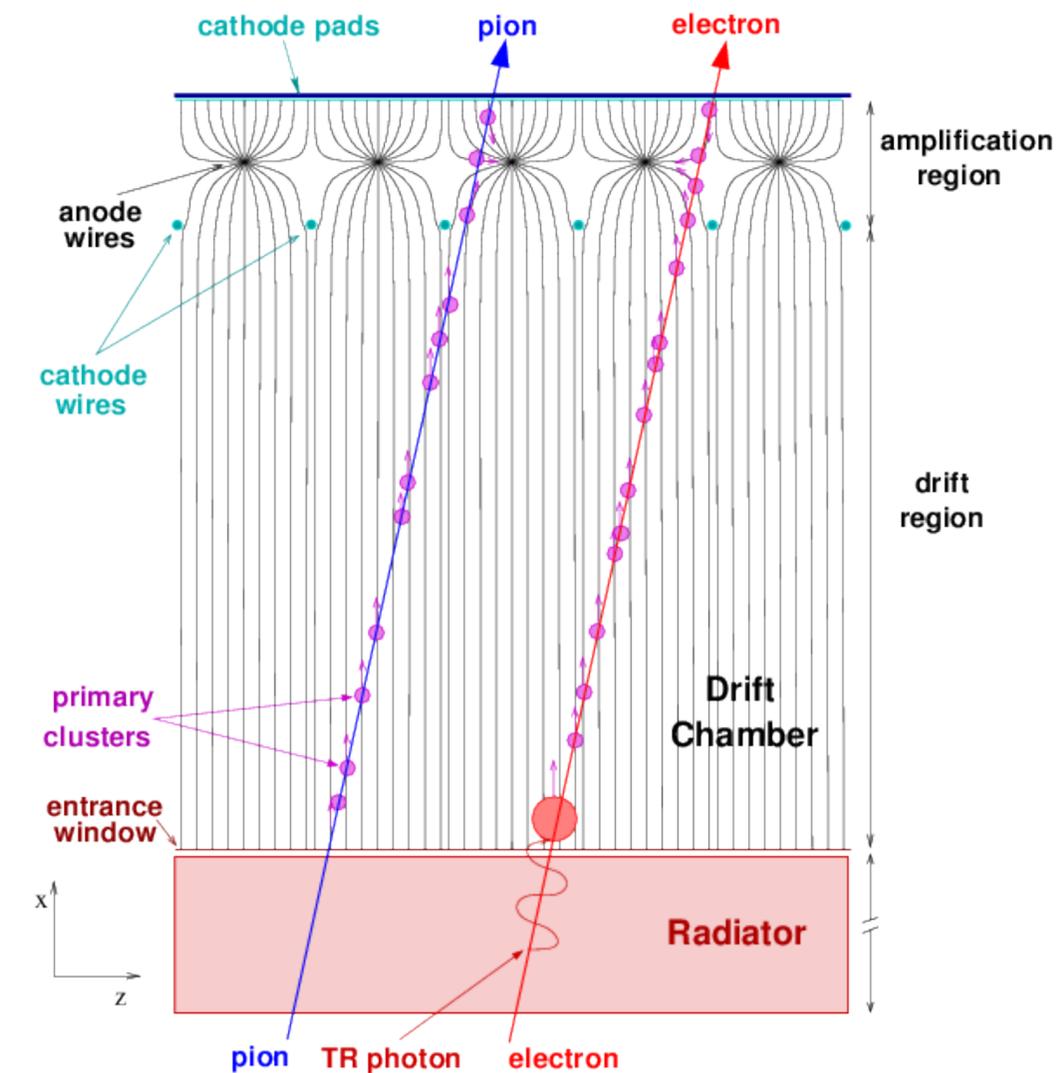
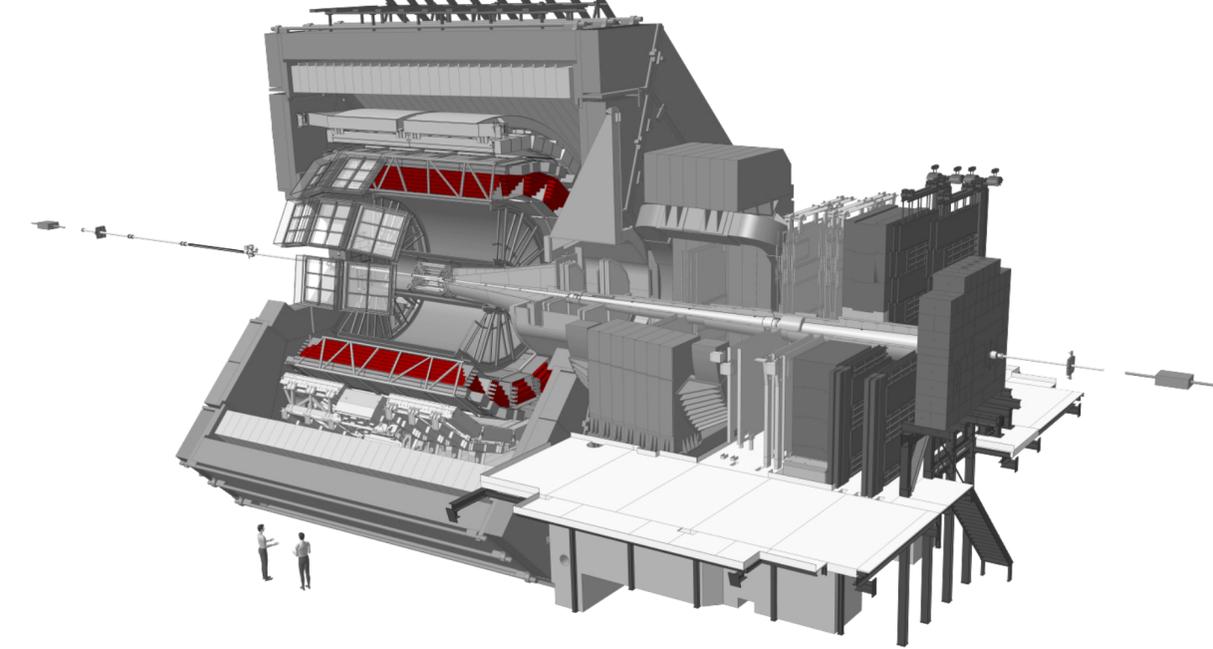
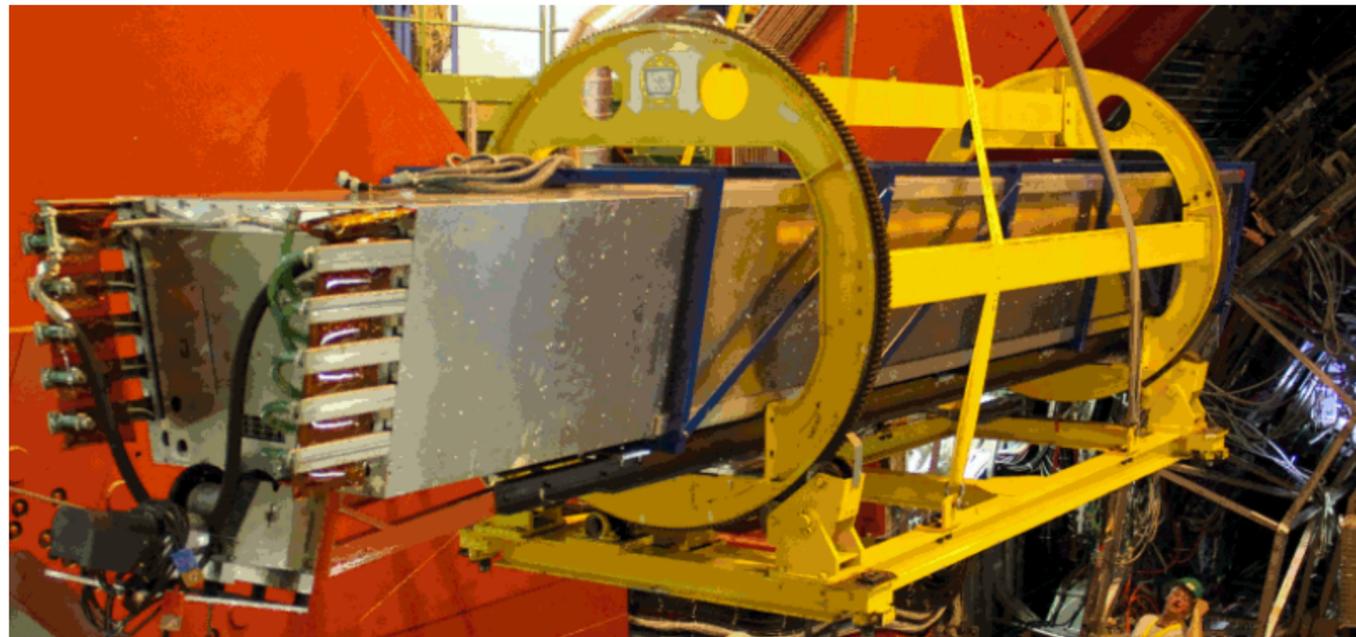
El número de electrones que produce una partícula depende de su impulso y su masa y sirve para identificarla.



El Electron se revela por su radiación

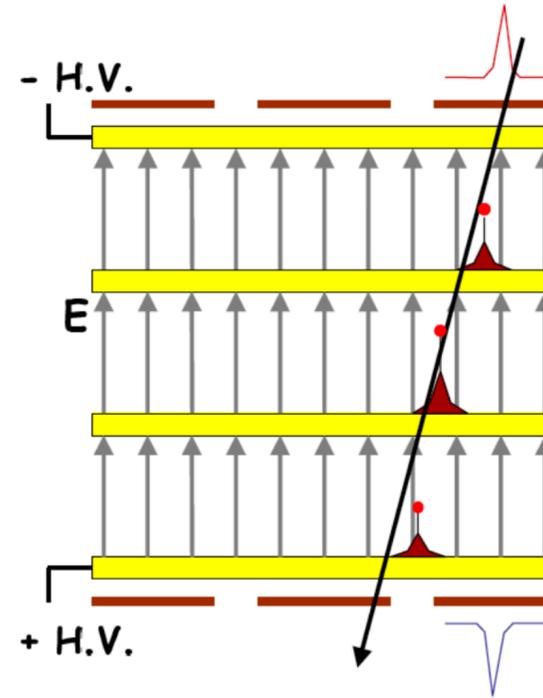
Transition Radiation Detector (TRD)

- Utiliza la **radiación de transición** para identificar electrones, que pasan a través de la interfaz entre dos medios con diferentes índice de refracción (Radiator).

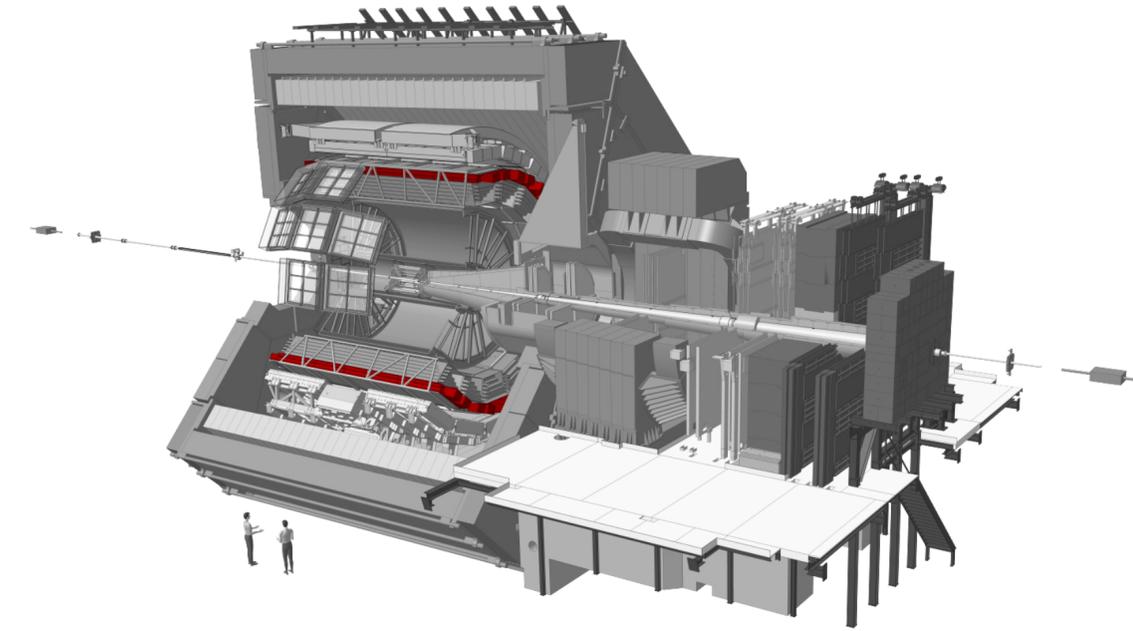


El cronógrafo de ALICE

Time of Flight Detector (TOF)



- Multi Gap Resistive Gap Chamber (*)
- Mide el “tiempo de vuelo” \Rightarrow velocidad
- Impulso y velocidad determinan la masa de la partícula

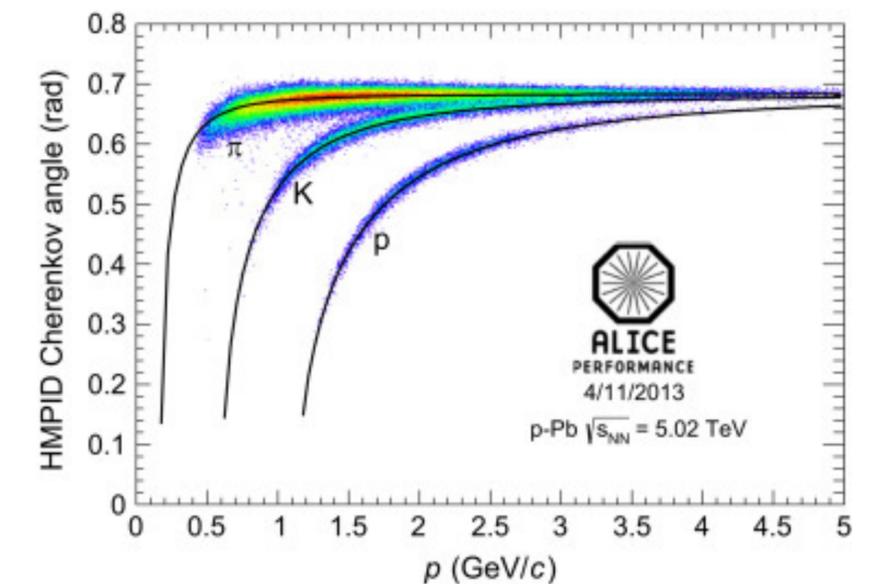
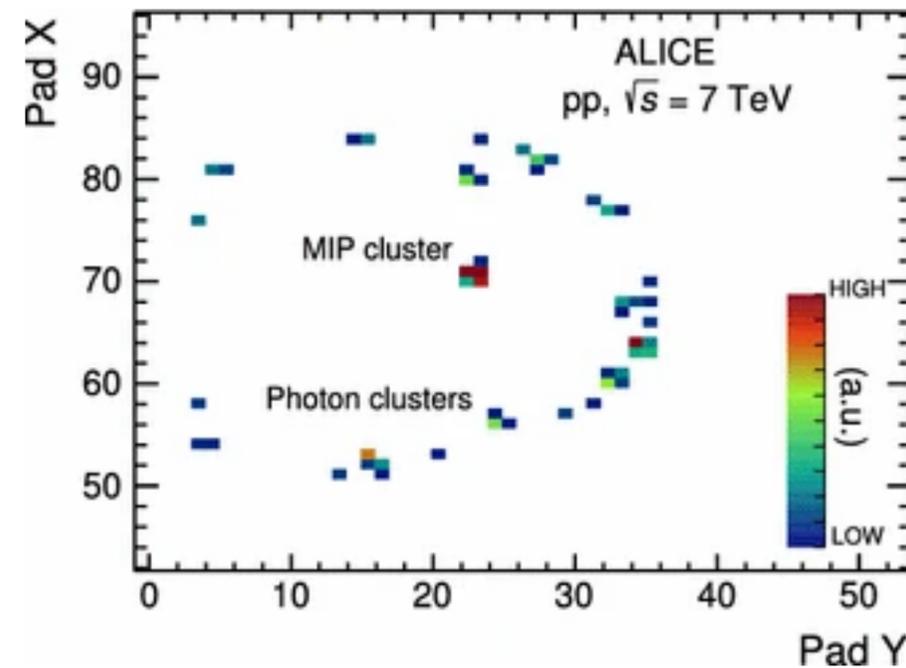
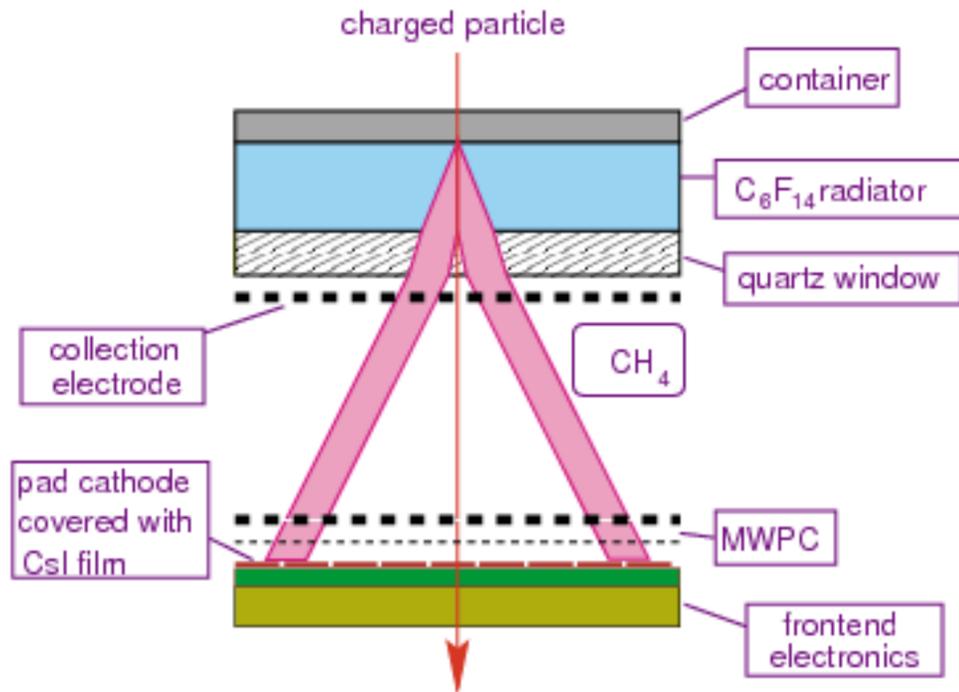
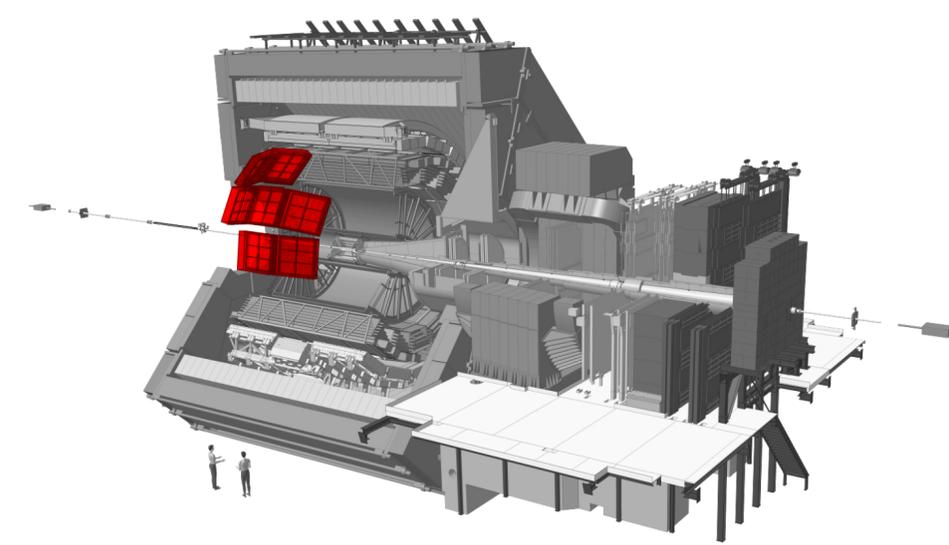


(*) mas información: visita del laboratorio

El Detector de los Anillos

High Momentum Particle Identification (HMPID)

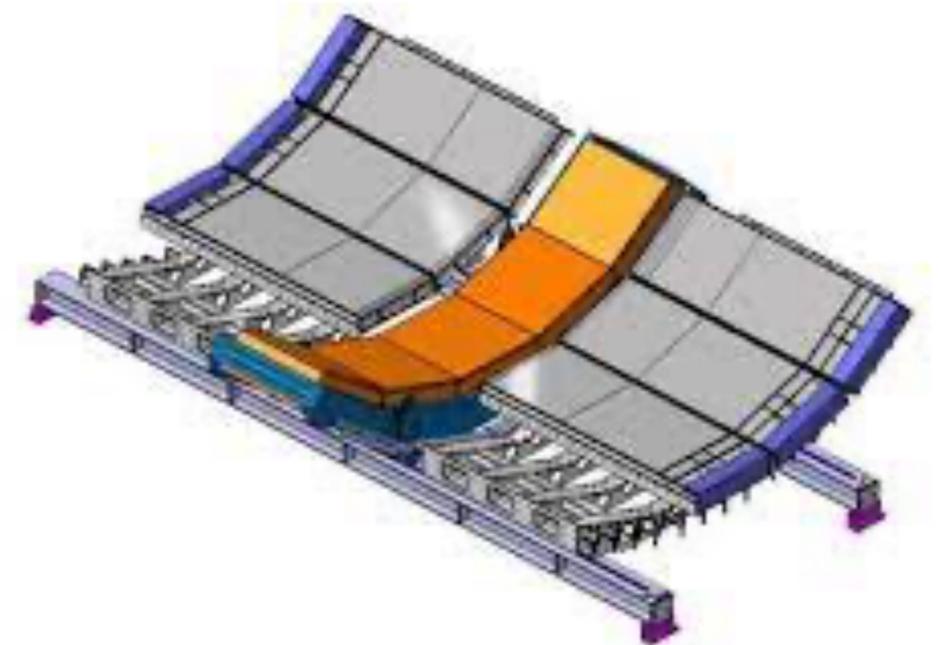
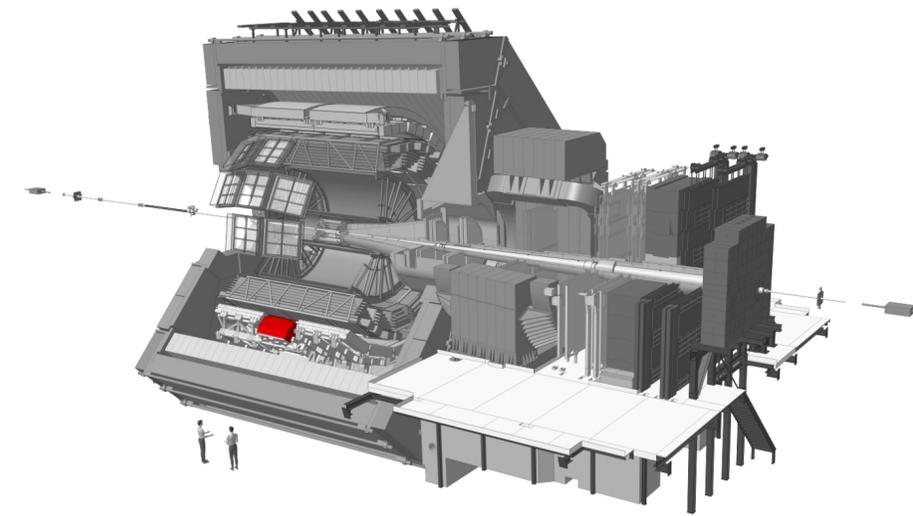
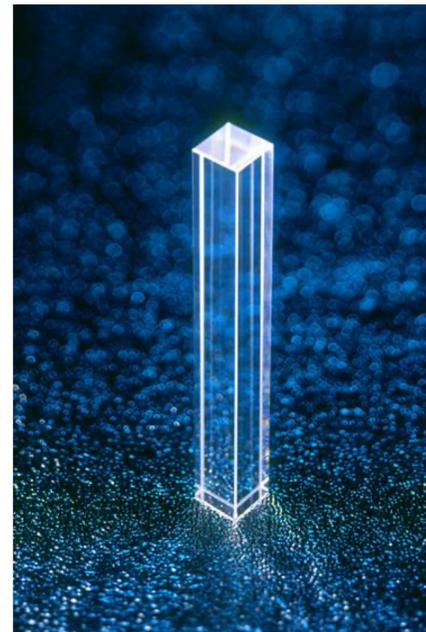
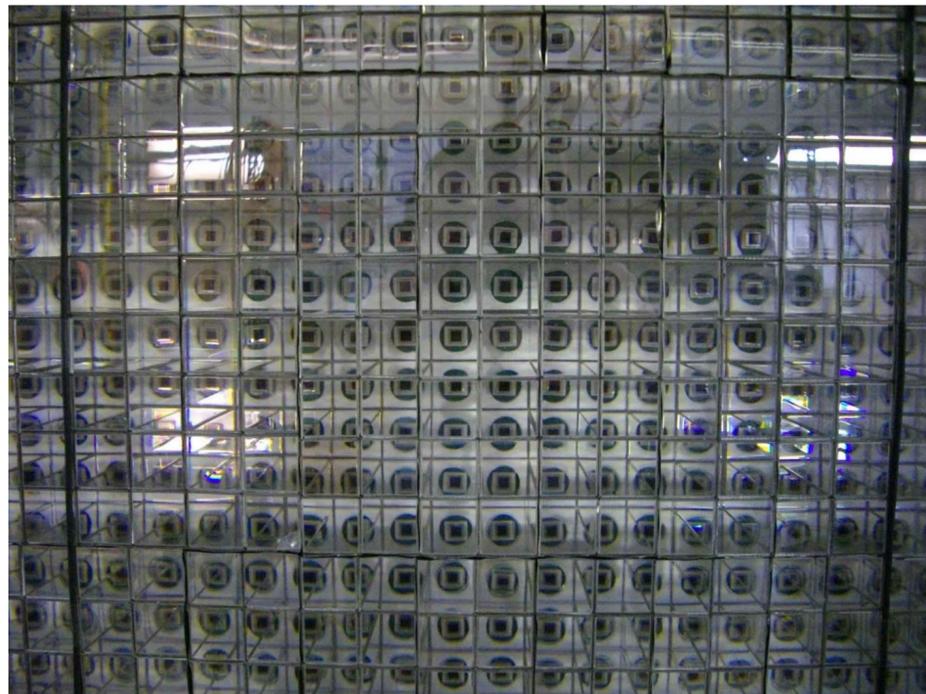
- En un medio partículas pueden viajar más rápidas que luz!
- Emiten luz a ángulo constante (radiación de Cherenkov)
- Angulo (radio) + impulso determina masa



El Ojo Poderoso de ALICE

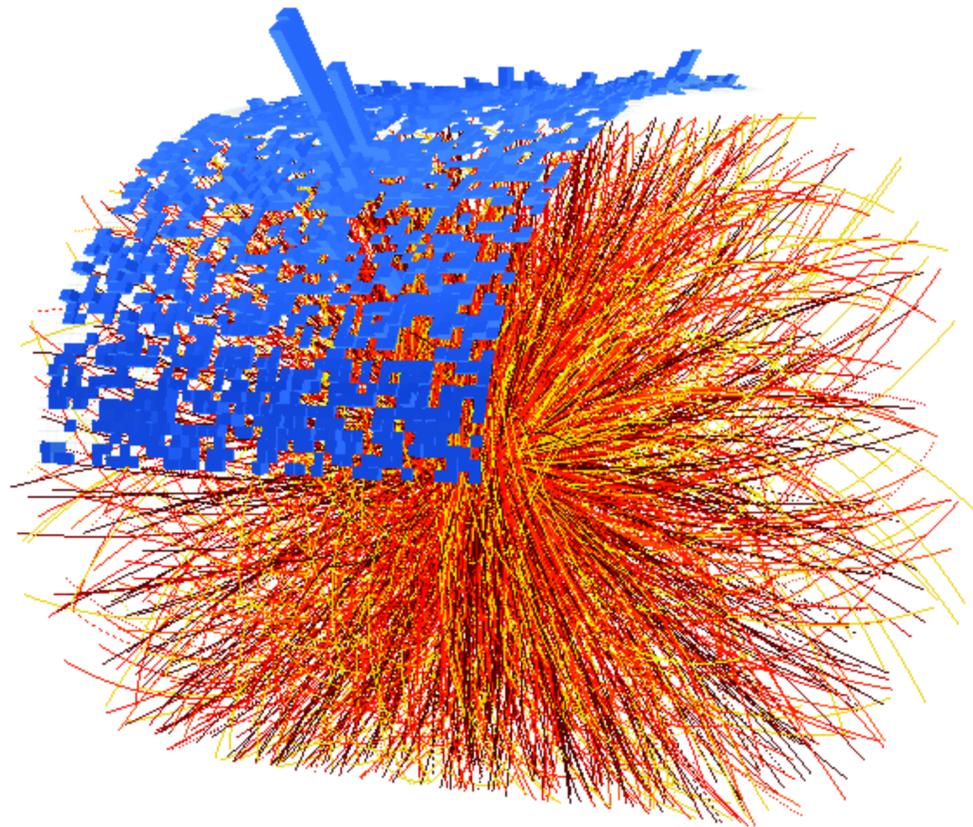
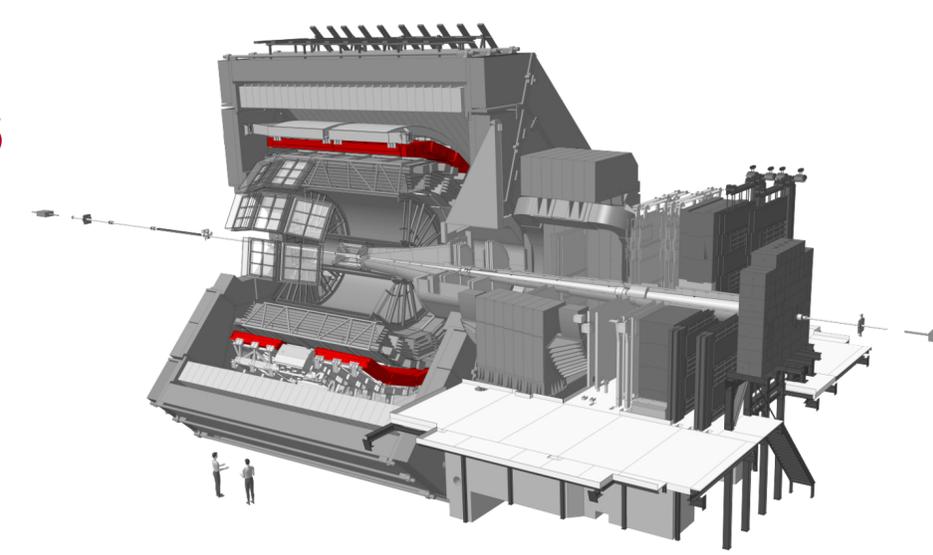
Photon Spectrometer (PHOS)

- Calorímetro electromagnético que mide la energía de fotones con alta resolución
- Medición destructiva de energía
- 12544 cristales de tungstato de plomo (PbWO_4)

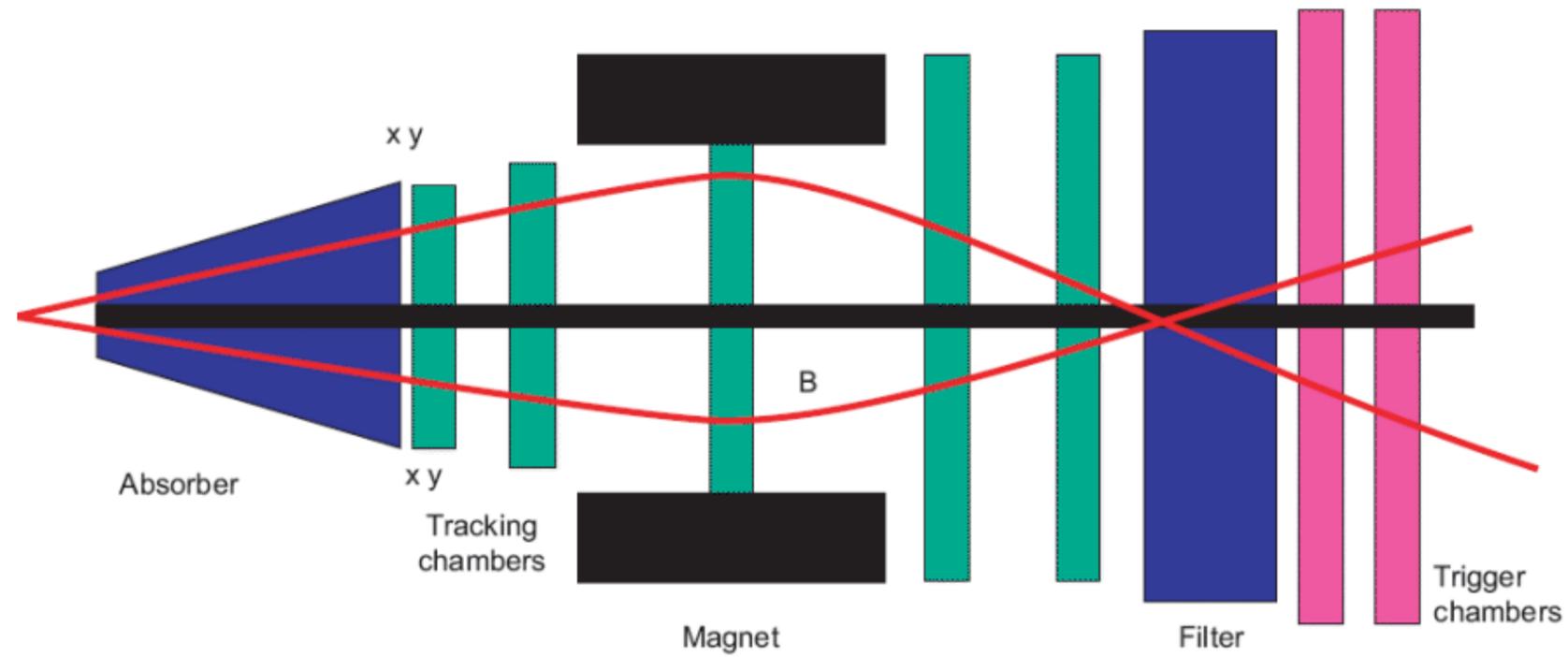
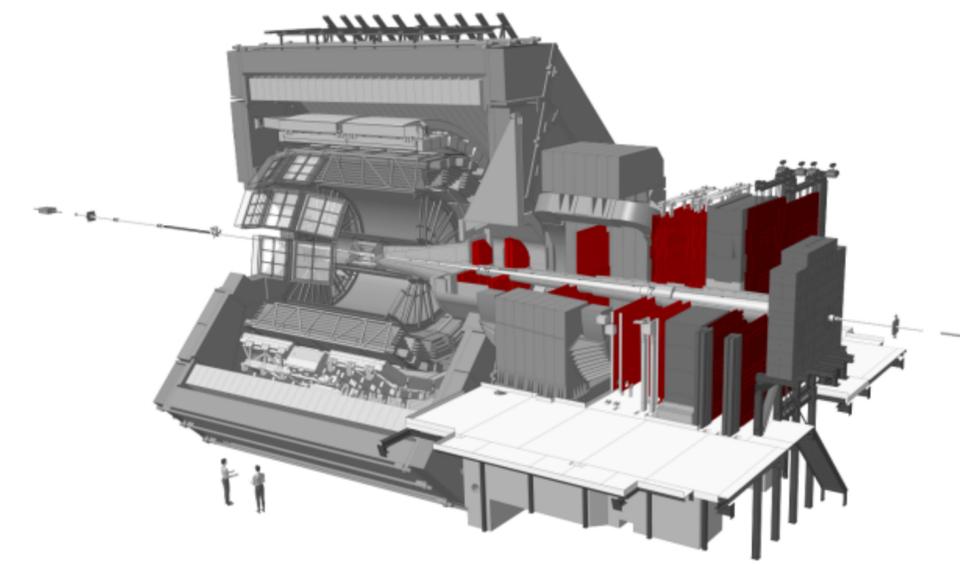


Observar partículas neutras, π^0 , γ , y electrones

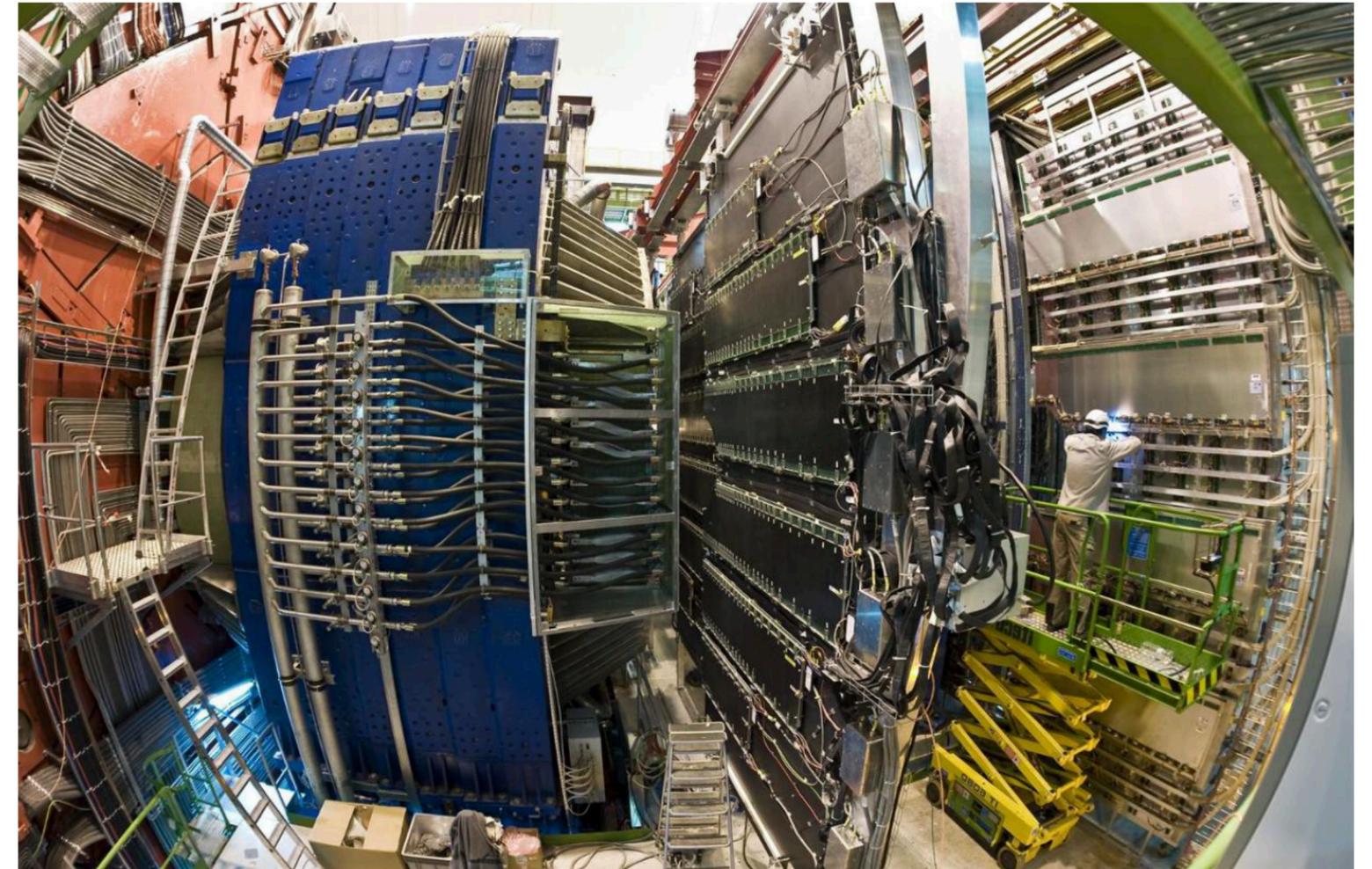
Electromagnetic Calorimeter: EMCAL



Espectrómetro de Muones



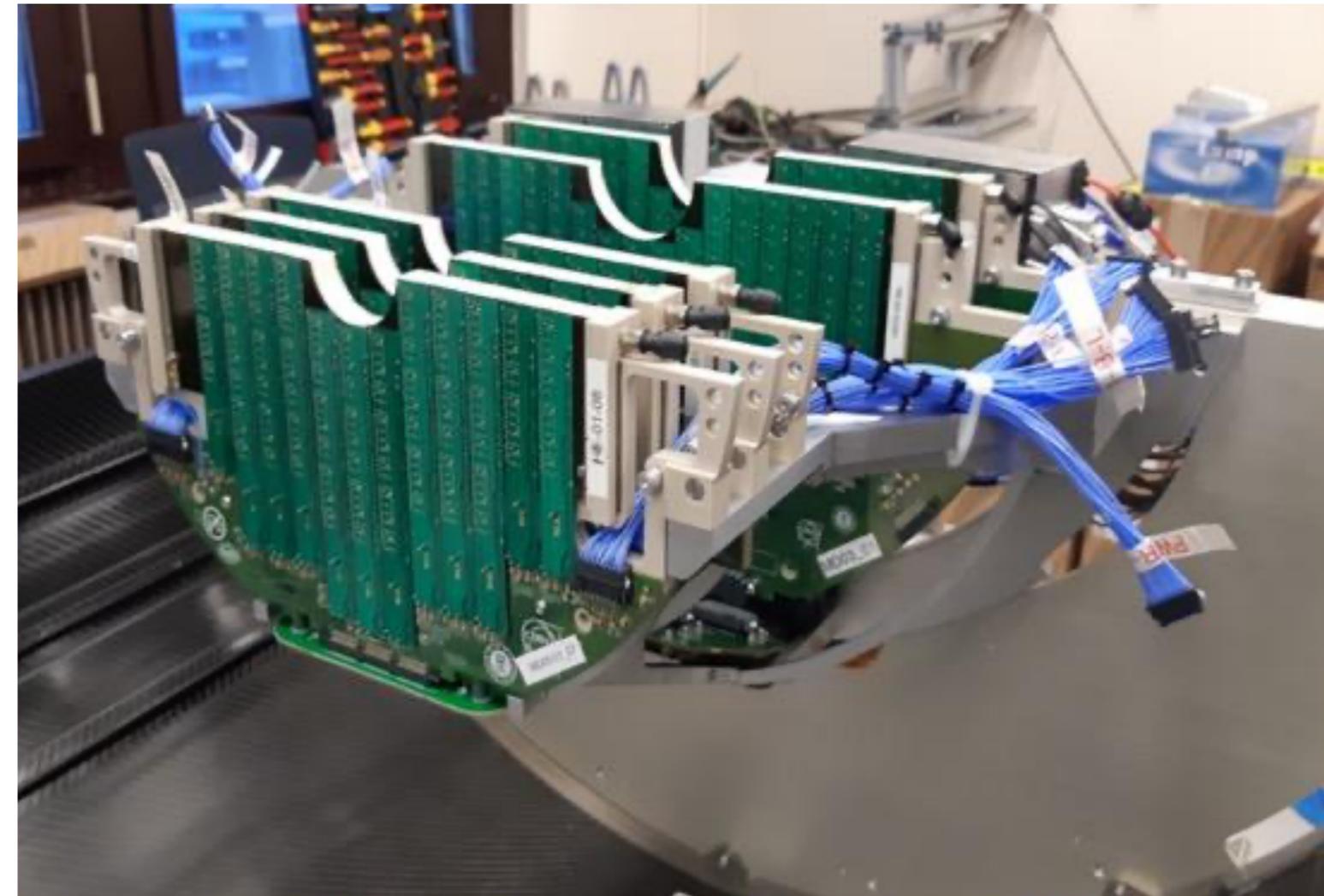
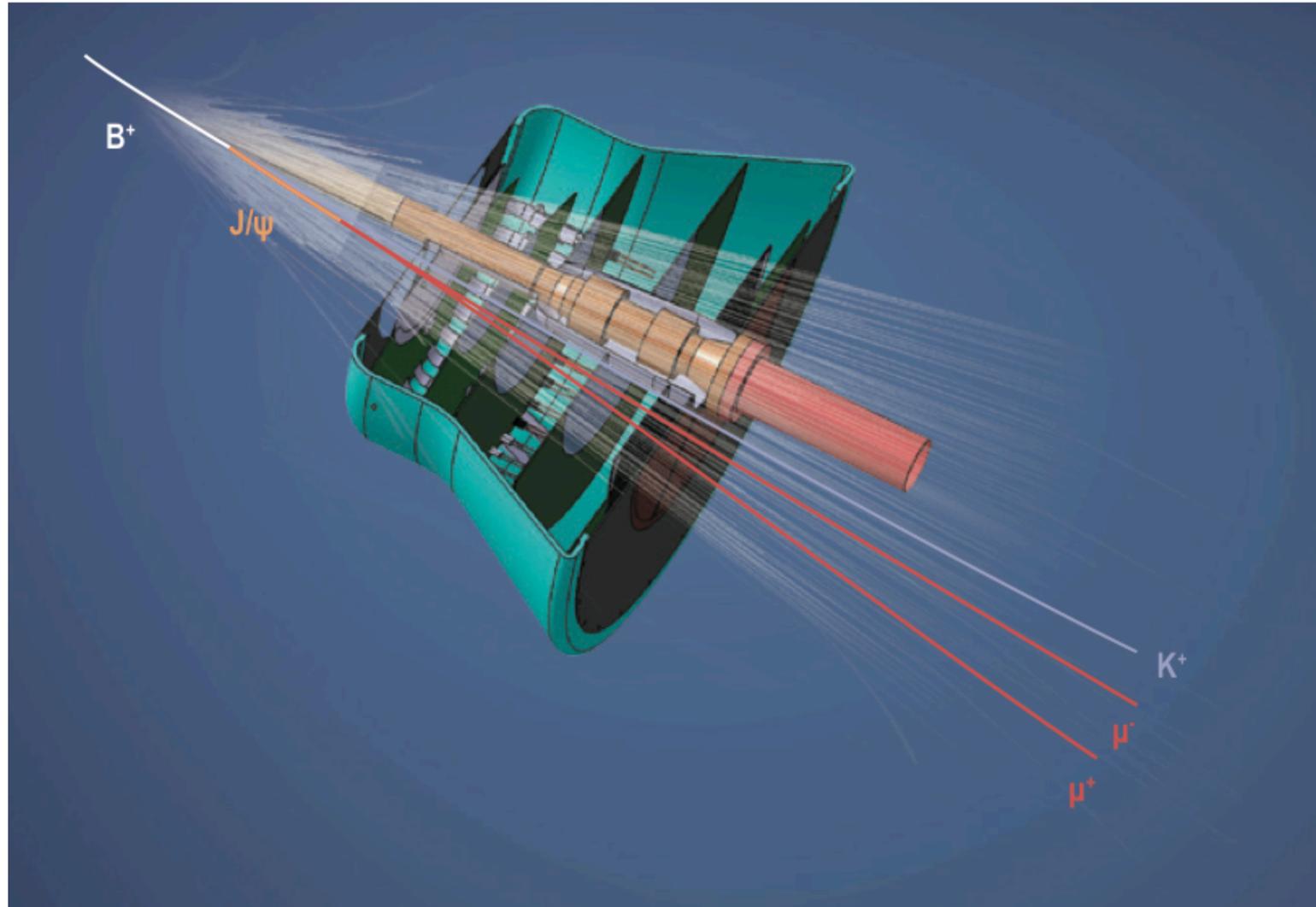
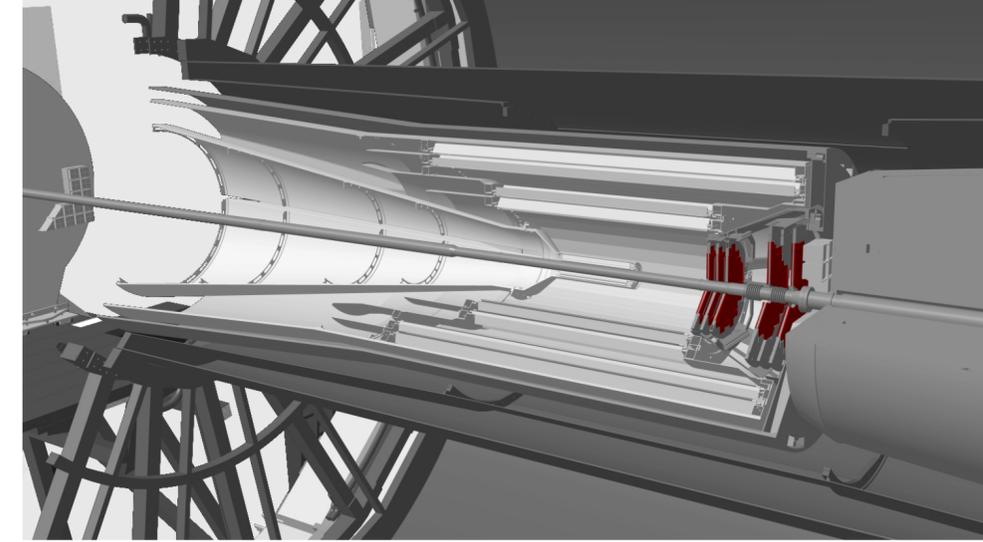
- Absorber: Filtra muones
- Medida de impulso
 - dipolo (3 T.m)
 - 5 estaciones de trayectoria



Muones de Encanto y Belleza

Muon Forward Tracker (MFT)

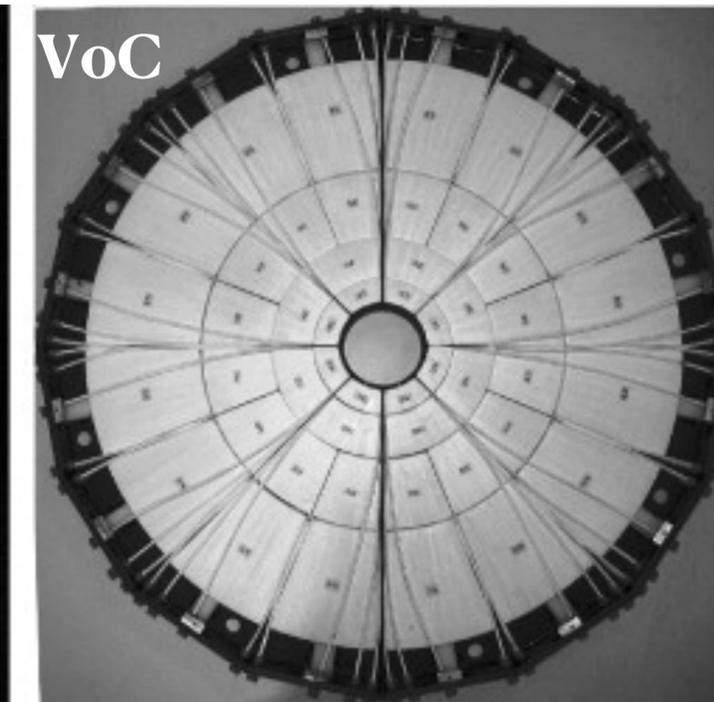
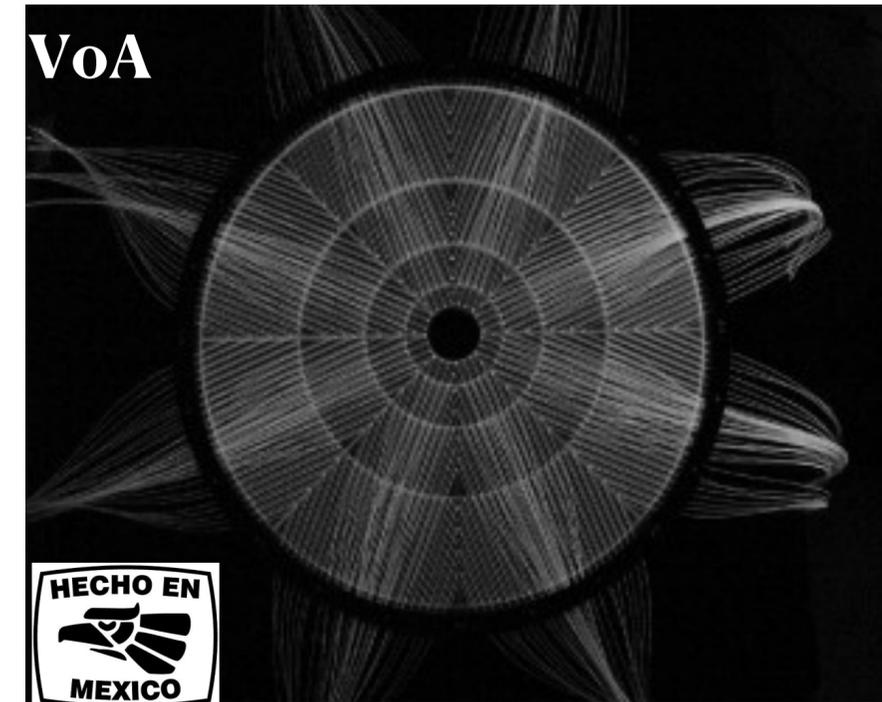
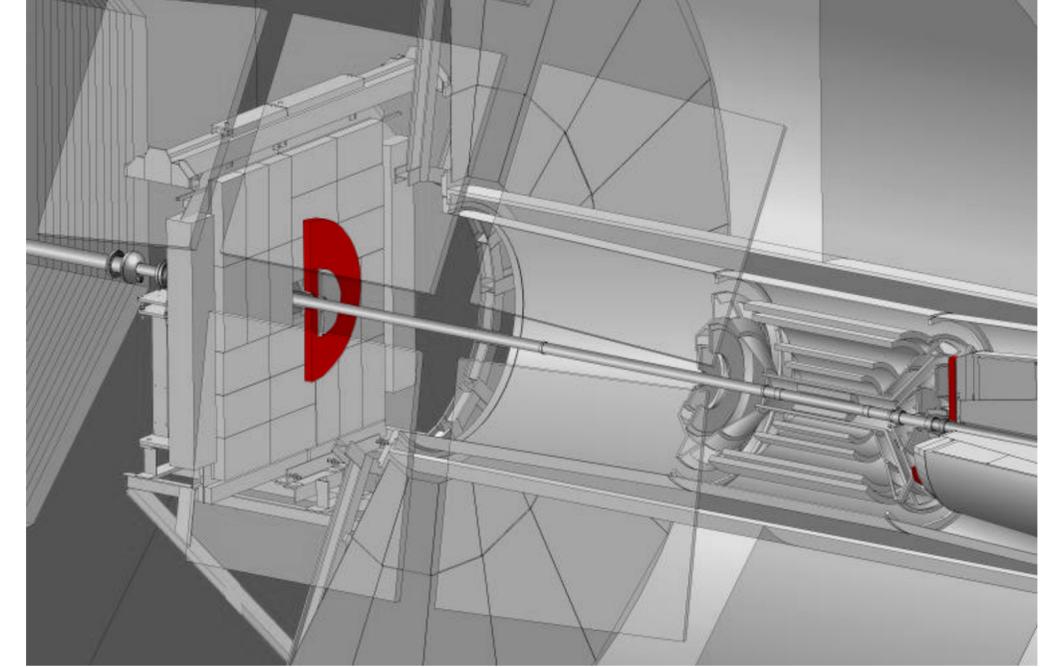
- Competa el espectrómetro de muones
- Misma tecnología que el ITS
- Identificación de muones de decaimiento de charm y beauty



Bien Hecho en México

V0 Detector (Run 2+3)

- 2 contadores de partículas con excelente resolución temporal
- Consiste de un conjunto de centelleadores
- Funciones importantes
 - da un señal de disparo
 - rechazo de interacciones entre haz y gas
 - medición de multiplicidad
 - centralidad de colisiones Pb-Pb



Forward Interaction Trigger

Mejora para Run 3+4

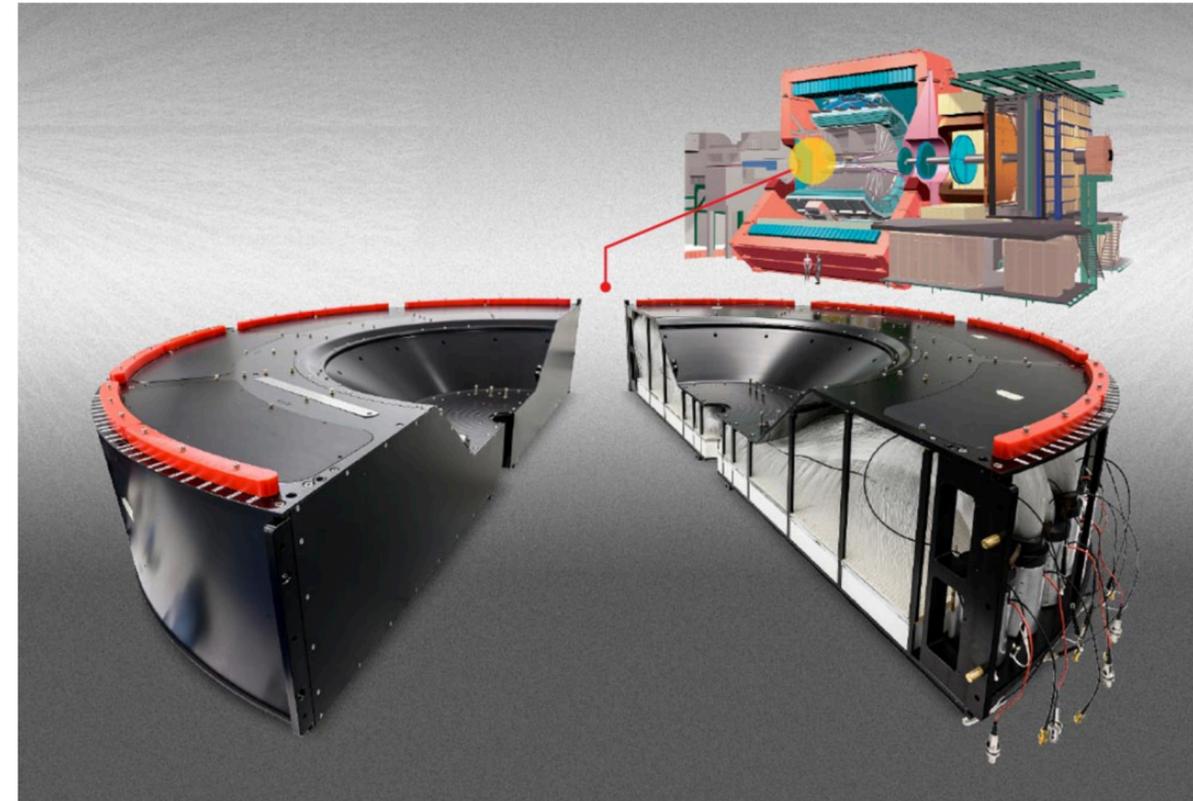
ACADEMIA

Se instalará detector en el LHC

Nueva aportación puma a la investigación del universo

Expertos del Instituto de Física diseñaron un instrumento llamado V0+ para el proyecto ALICE

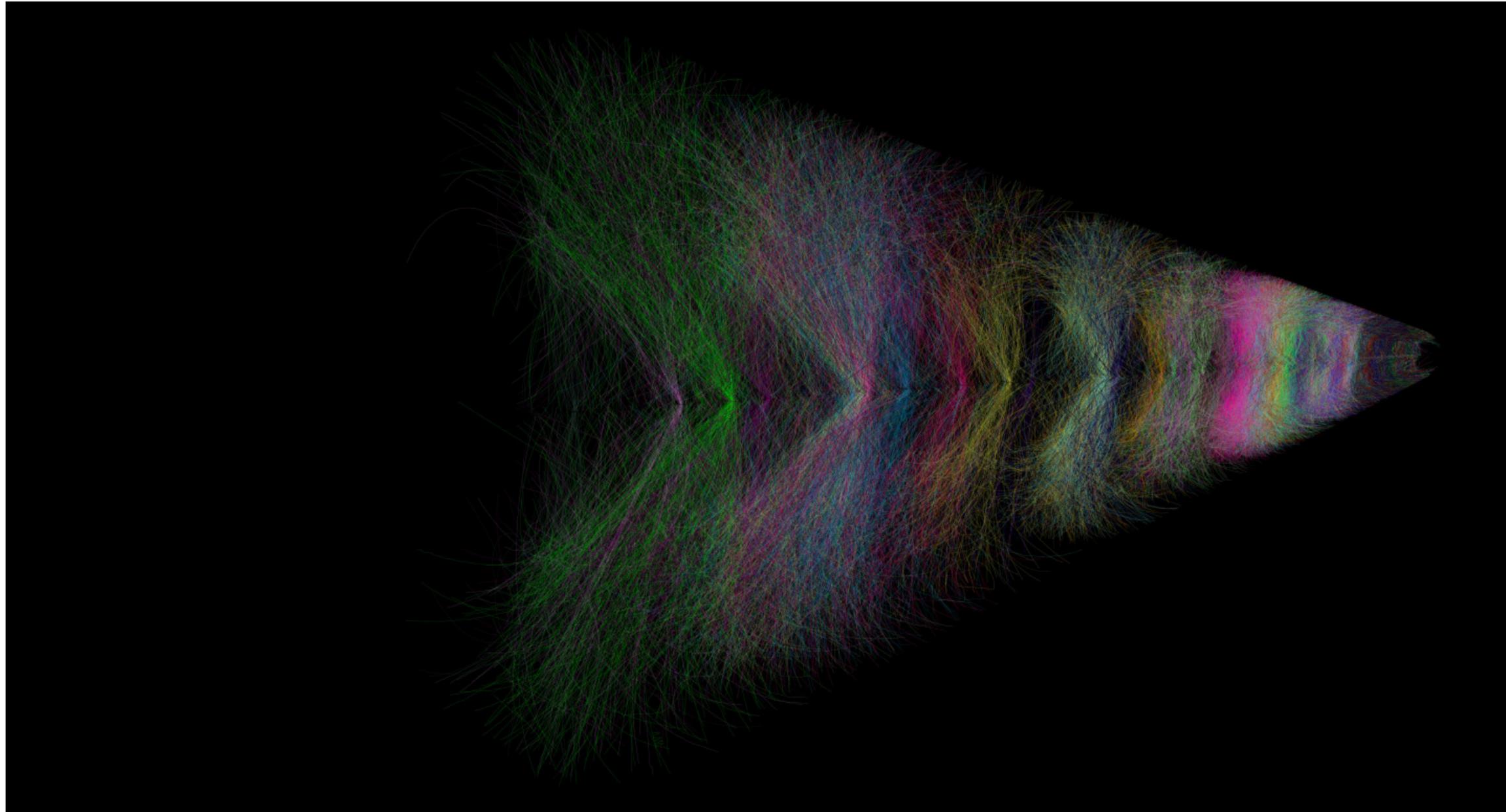
Diana Saavedra — Nov 12, 2020



México participa en ALICE, este experimento revisa el choque de núcleos de plomo a una velocidad muy similar a la de la luz. Con V0+ los científicos serán capaces de detectar una mayor cantidad de datos y avisar a ALICE en fracciones de nanosegundos de tiempo.

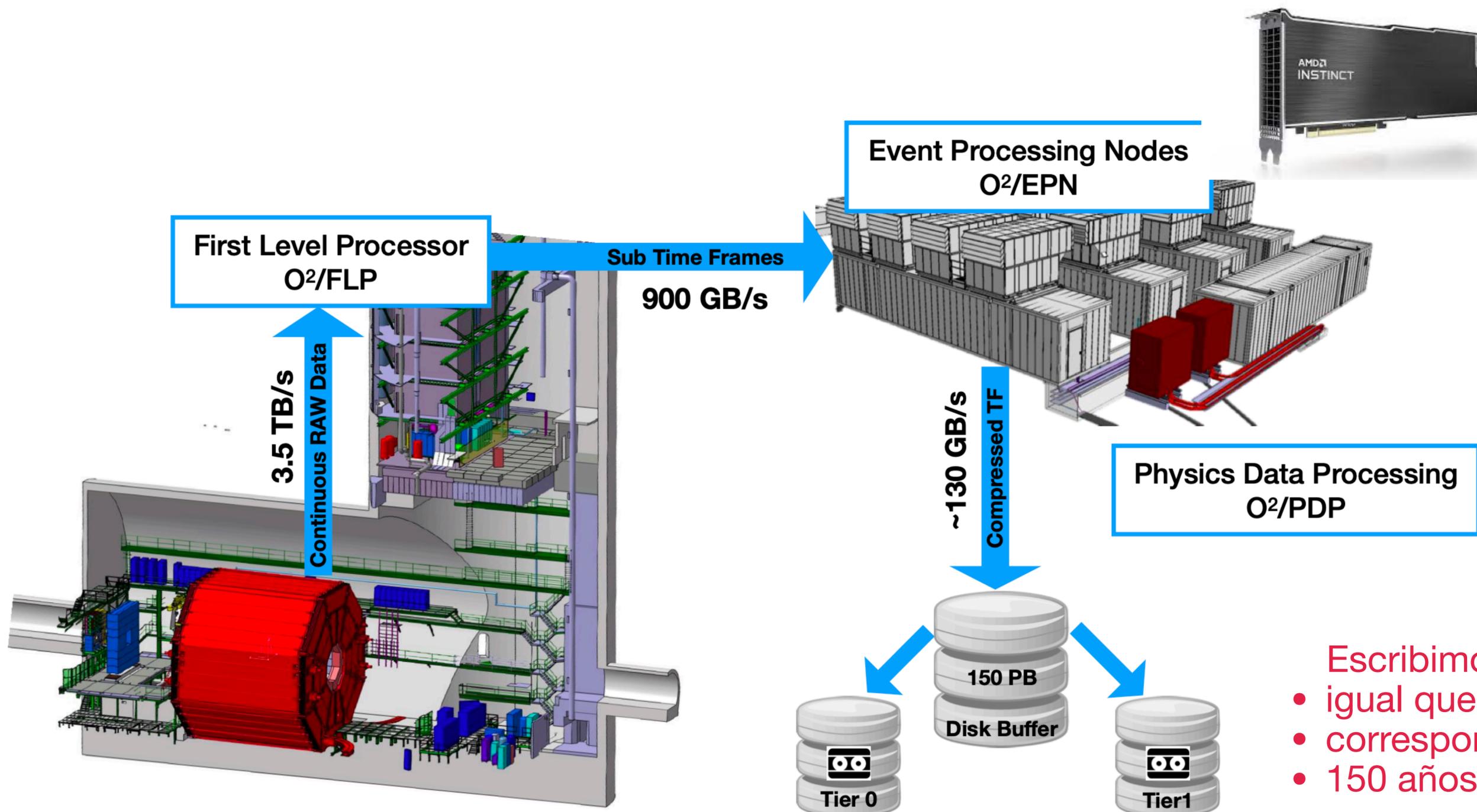
ALICE en Run 3

... una filmadora gigante



Tomamos datos en modo continuo sin rechazar colisiones !

Cartas Gráficas para dominar el flujo de datos



- Escribimos hasta 4 PB por día
- igual que Facebook (fotos de gatos)
- corresponde a 80000 discos Blu Ray
- 150 años de NETFLIX

Toma de datos Pb-Pb in 2023

Heavy Ion : a success



Upgrade fully operational

15 detectors
Data Volume as predicted
Acquisition and online compression with 364 equivalent MI 50 EPNs

Writing up to 190 GB/s without interruption

Run ID	544167	FLP	StfBuilder	StfSender	TFBuilder	DPL in	CTF Writer
Start of run	2023-10-06 19:21:39						
Env ID	2i6Y3Bq7ENV						
Run number	544167						
Detectors	ZDC FT0 FV0 PHS HMP MFT TOF CPV ITS MID MCH FDD TPC						
State	RUNNING						
Run type	PHYSICS						
			747 GB	747 GB	744 GB/s	747 GB/s	186 GB/s

ION PHYSICS : STABLE BEAMS		Fill 9234	Energy= 6799 (GeV)
BEAM INFO		LHC LUMINOSITY	
50ns 1240b 1088 1088 398 56bpi PbPb		BRAN L2 2.00e+03 Hz/ubarn	BEAM Instr. BACKGROUND
Particles Type PB82 - PB82		BRAN R2 6.56e+03 Hz/ubarn	BCM-A RS2 DUMP TH % 1.60
Int. Bunches (IP2) 1088	Beam Intensity	ALICE VISTAR STATUS	
Displaced Coll. 112	B1 1.59e+13	STANDBY	
B1 Non-Int. 40	B2 1.54e+13	ALICE CLOCK STATUS	
B2 Non-Int. 40	Collisions Ready	MANUAL / BEAM1 (0) Ph.Sh. 5.657 ps	
ALICE TRIGGER RATES		ALICE LUMINOSITY	
FTOCE 24.119 KHz	Target instant. 0.00 Hz/ubarn	ALICE BACKGROUND	
FTOSC 30.933 KHz	μ_h 3.92e-03	FT0 NORM SIDE A (HZ) 10156.58	
FTOVX 1570.069 KHz	Instantaneous 6.31e-03 Hz/ubarn	FT0 NORM SIDE C (HZ) 3173.42	
FVOCH 23.650 KHz	Delivery Stable 2023 0.33 nbarn ⁻¹	FT0 NORM SUM (HZ) 13330.00	
ZNA 1272.874 KHz	Leveling Enabled <input type="radio"/> Beta* Leveling <input type="radio"/>		
ZNC 1273.005 KHz			
BEAM INTS. - TRIGGER RATES		LUMINOSITY	
	Instantaneous (ZNC)	BACKGROUND	
		SIDE A	SIDE C
		SUM	

45 kHz Hadronic Interaction Rate

EPN input data rate showing the natural fluctuations from centrality distributions

Processing under control

