

El misterio de la antimateria en la Galaxia

Seminario HEP
Nov 2024



Diego Gomez
Instituto de Física
UNAM

¿De que está compuesta la materia?

MATERIA

LEPTONES

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ tau
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ tau neutrino

QUARKS

$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2 u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 c charm	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 t top
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 b bottom

ANTIMATERIA

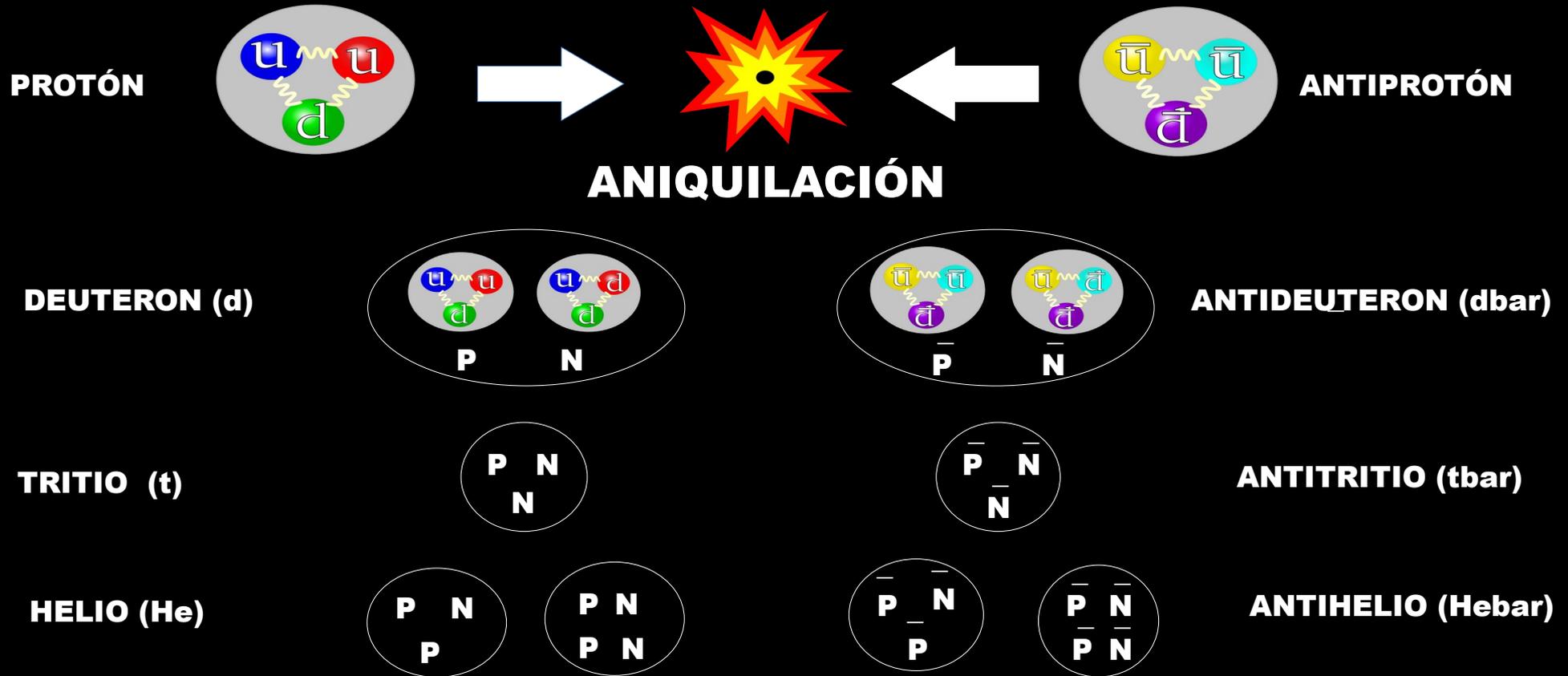
ANTILEPTONES

\bar{e} positron	$\bar{\mu}$ anti-muon	$\bar{\tau}$ anti-tau
$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino

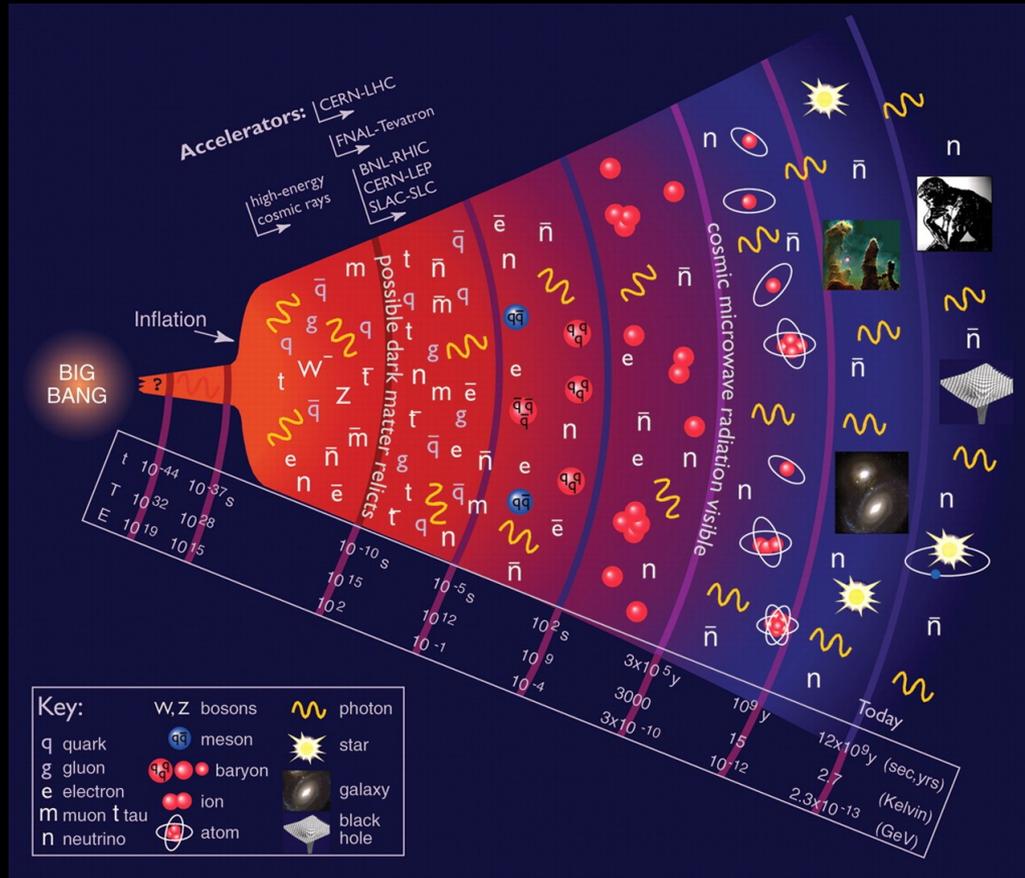
ANTIQUARKS

\bar{u} anti-up	\bar{c} anti-charm	\bar{t} anti-top
\bar{d} anti-down	\bar{s} anti-strange	\bar{b} anti-bottom

Núcleos y antinúcleos ligeros

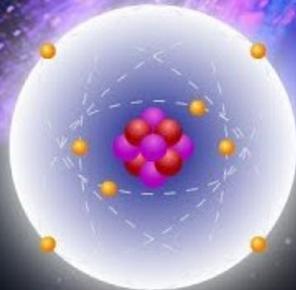


Historia de la materia

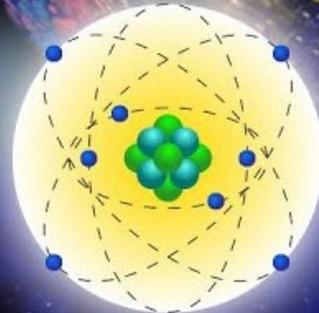


Asimetría materia-antimateria

Nuestro universo es dominado
por materia



ANTI ATOM



ATOM

Medición de antimateria

- En aceleradores

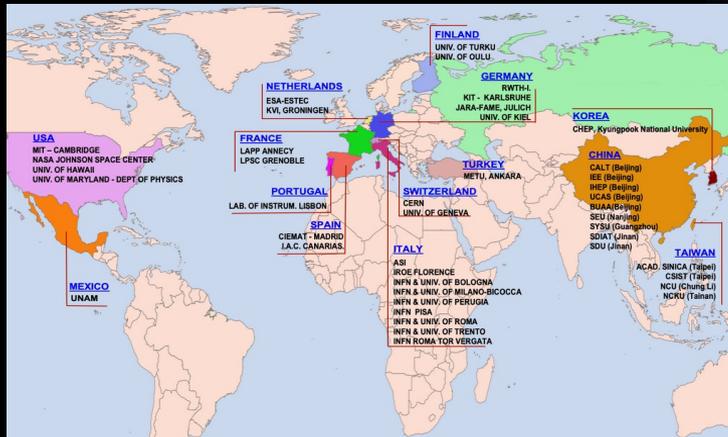


- En el espacio



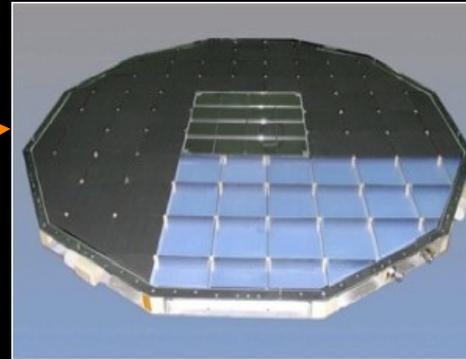
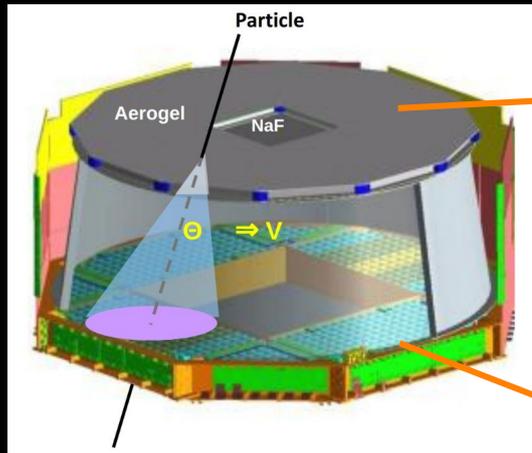
Experimento AMS: detector de antimateria

- Espectrómetro magnético operando en la EEI desde 2011.
- IFUNAM única institución de Latinoamérica.
- El experimento AMS-02 mide rayos cósmicos en la región de GeVs hasta pocos TeVs

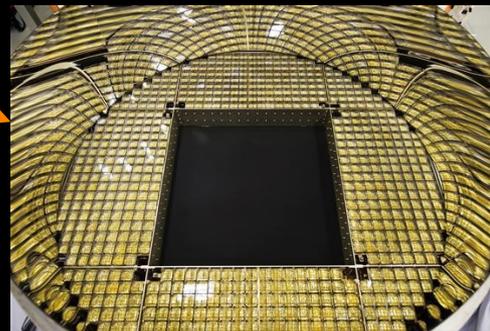


Contribución de México: detector RICH

Ring Imaging Cherenkov Detector



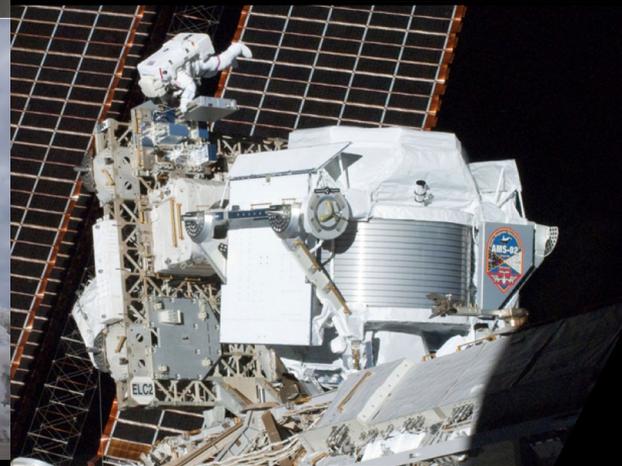
12.5%



2%

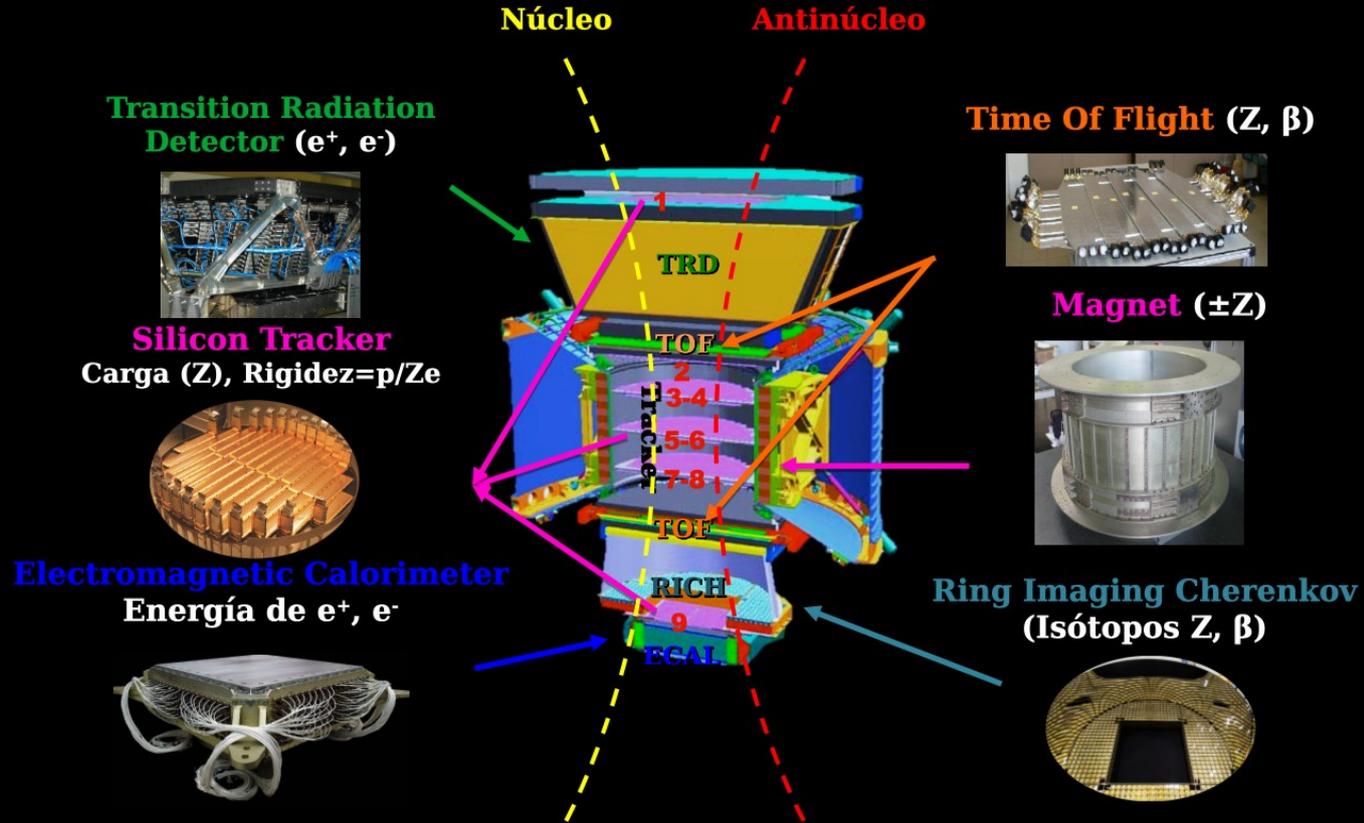


Lanzamiento a la Estación Espacial Internacional (2011)

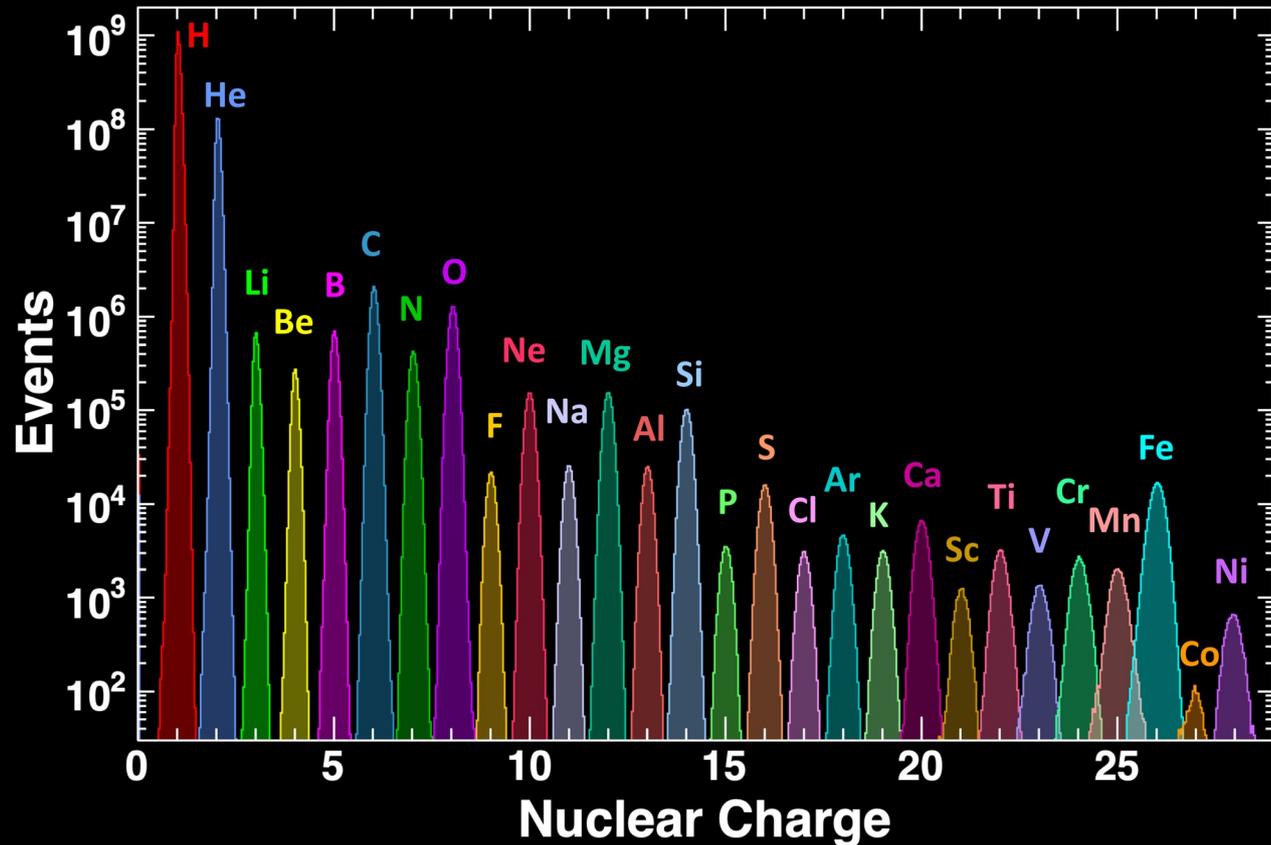


EEL
Peso: 7 t
C. Magnético: 0.15Tm^2
Aceptancia: $0.1\text{m}^2\text{sr}$

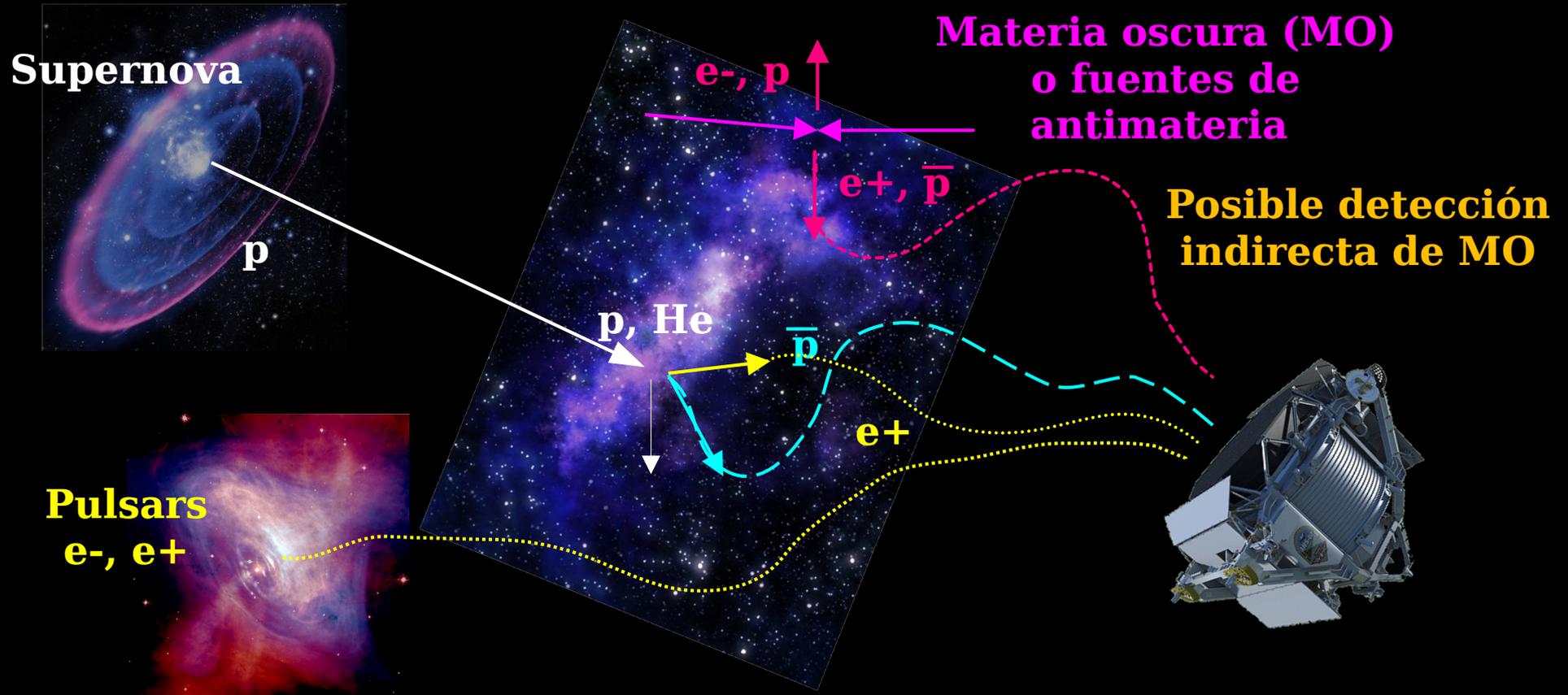
Detector AMS



Capacidad de separación de elementos



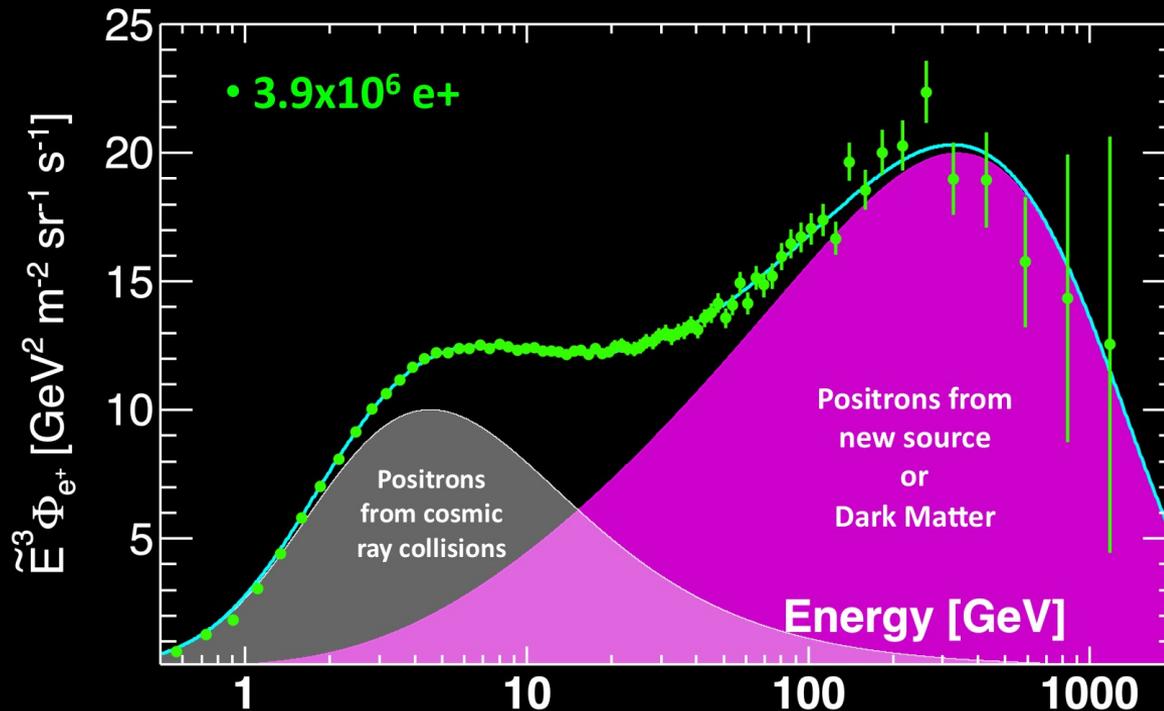
Posibles fuentes de antimateria



Exceso de positrones

$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[C_d (\hat{E}/E_1)^{\gamma_d} + C_s (\hat{E}/E_2)^{\gamma_s} \exp(-\hat{E}/E_s) \right]$$

Solar
Collisions
Pulsars or Dark Matter



El flujo de positrones puede ser descrito por dos componentes.

La primera, a baja energía, proveniente de colisiones de rayos cósmicos

+

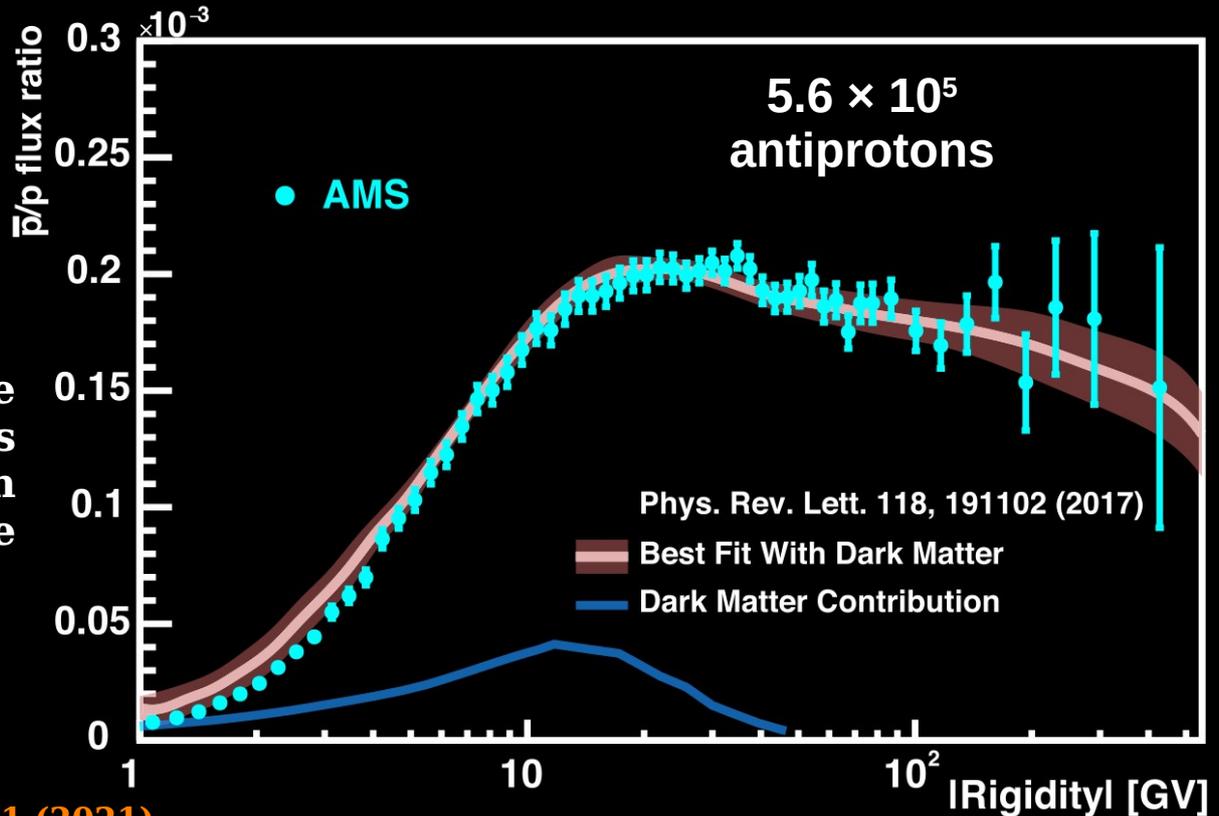
La segunda, a alta energía, proveniente de Pulsares o Materia Oscura con una energía de corte E_s

AMS collaboration. Phys. Rep. 894, 1 (2021)

Antiprotones

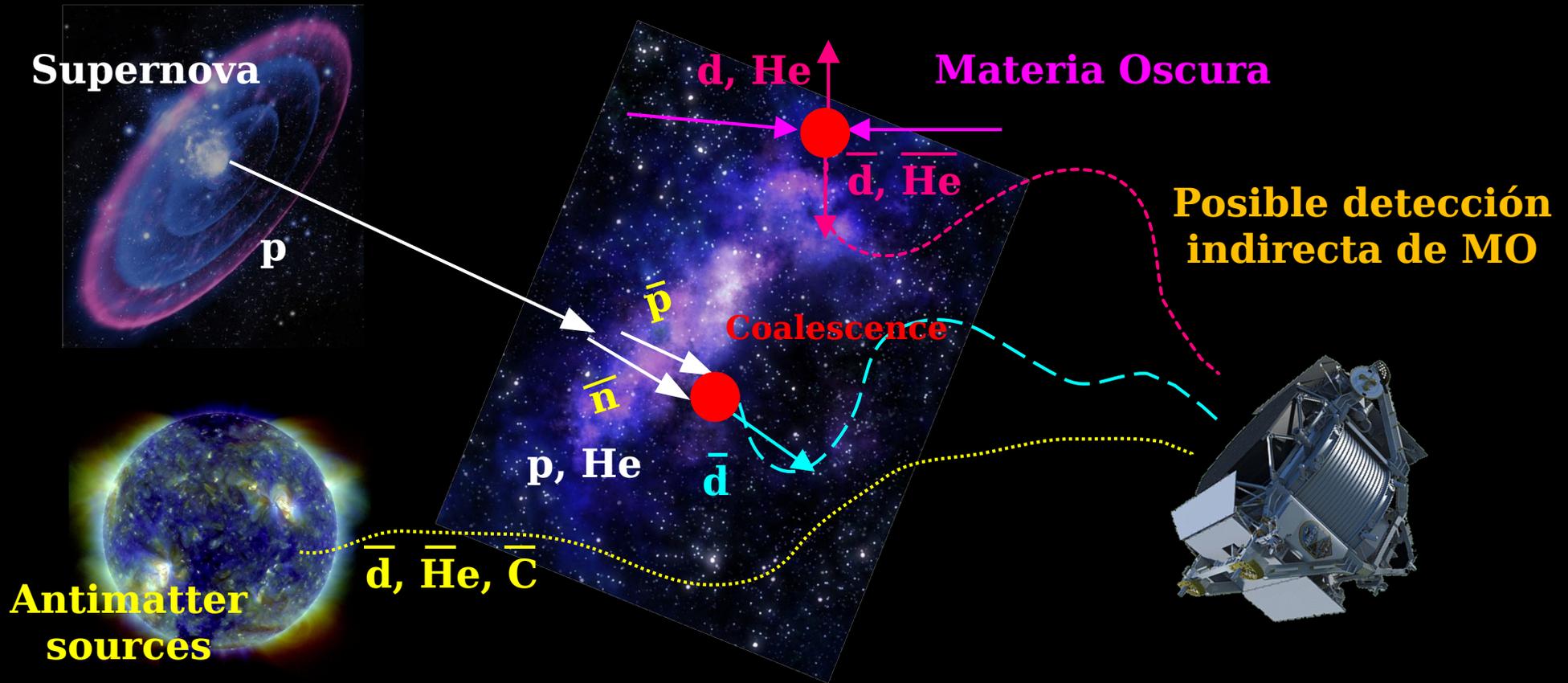
Modelos de **Materia Oscura** tienen problemas para describir los datos de antiprotones de AMS.

Esto se debe a la abundante producción secundaria y las incertidumbres en la sección eficaz de producción de antiprotones



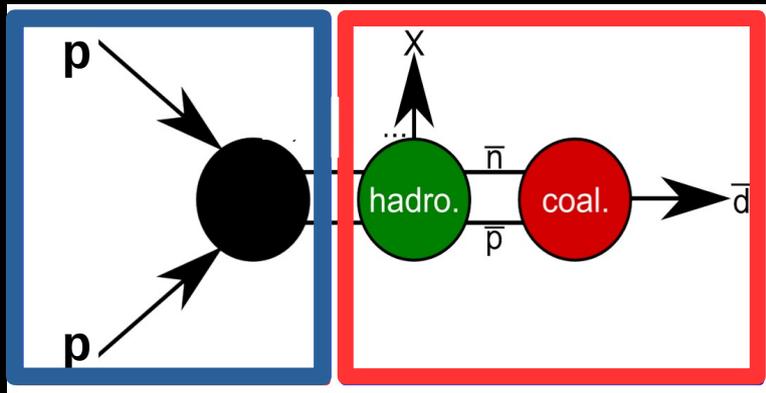
AMS collaboration. Phys. Rep. 894, 1 (2021)

Antinúcleos en la Galaxia



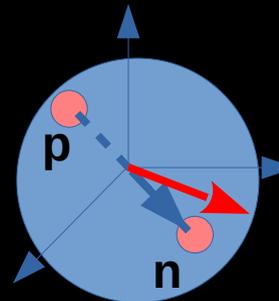
Formación de antinúcleos ligeros

Modelo de Coalescencia



$$\gamma_d \frac{d^3 N_d}{dp_d^3} = \frac{4\pi}{3} p_0^3 \left(\gamma_p \frac{d^3 N_p}{dp_p^3} \right) \left(\gamma_n \frac{d^3 N_n}{dp_n^3} \right)$$

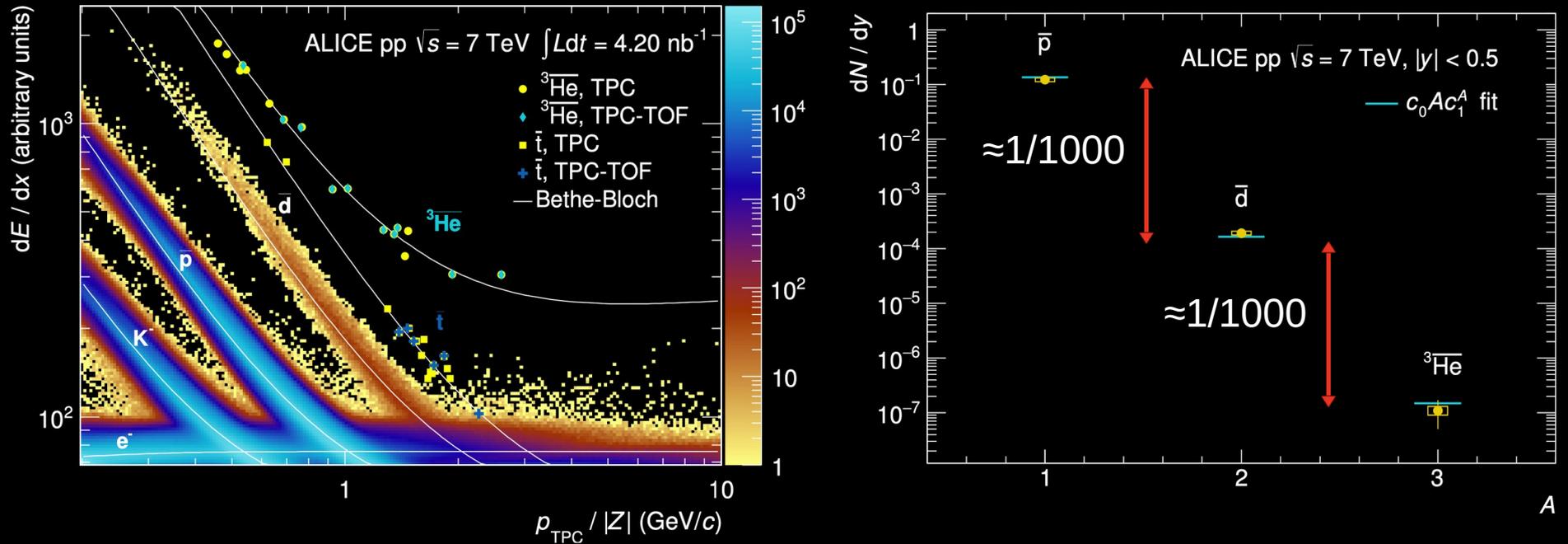
p_0 se obtiene de las
medidas en aceleradores



Antideuterios son
creados de los
pares de nucleones

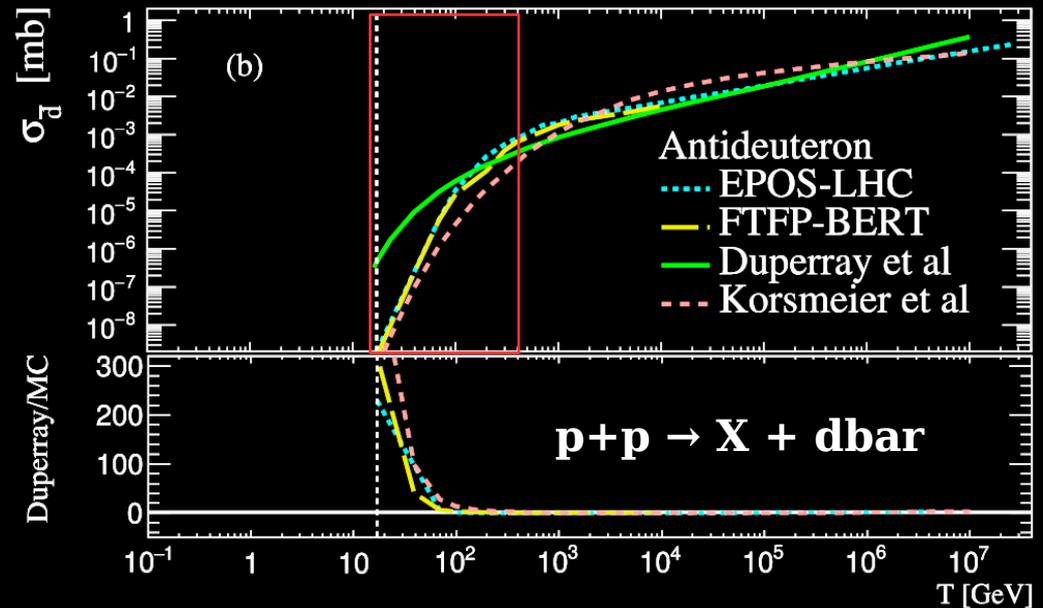
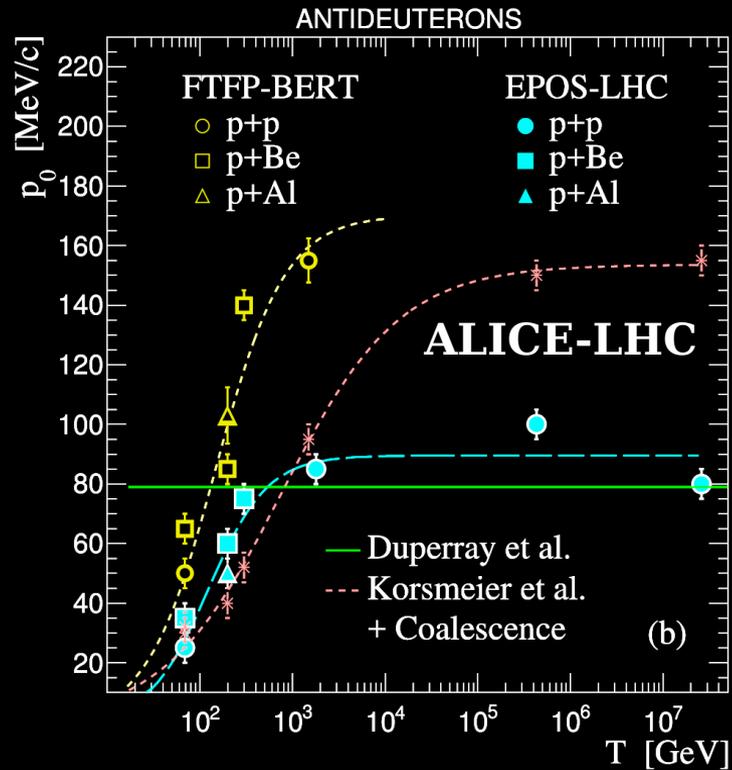
Jerarquía de producción de antinúcleos

Coalescencia explica los resultados de ALICE



ALICE collaboration. Phys. Rev. C 97, 024615 (2018)

Producción secundaria de antideuterios

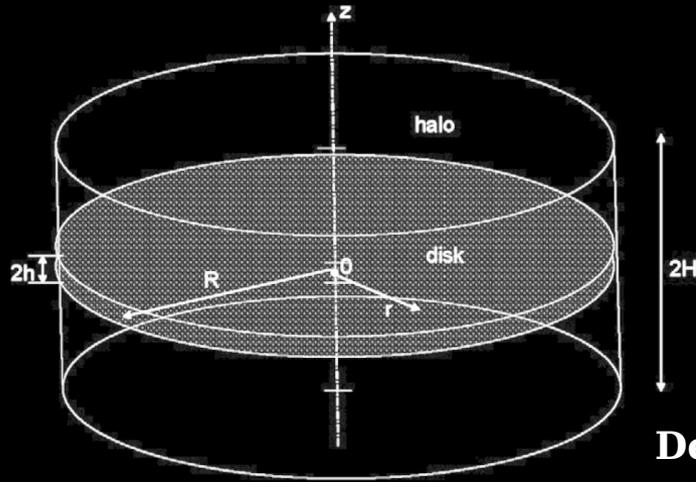


T = Energía del proyectil

Gomez-Coral, D.-M. et al. *Phys. Rev. D* **98**, 023012 (2018)

Propagación en la Galaxia

- Ecuación de difusión-reaceleración:



$$\frac{\partial f(p, \vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D_{xx}(p, \vec{r}) \vec{\nabla} f - \vec{V} f) + \frac{\partial}{\partial p} p^2 D_{pp} \frac{\partial}{\partial p} \frac{1}{p^2} f$$

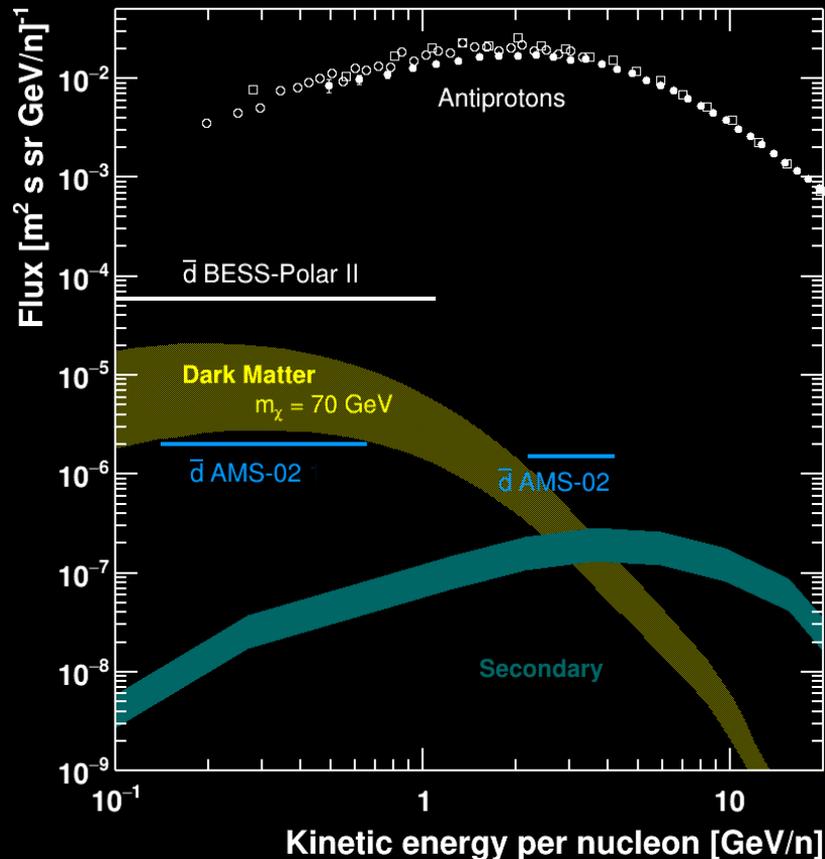
Velocidad de convección **Reaceleración**

$$-\frac{\partial}{\partial p} \left[\dot{p} f - \frac{p}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) f \right] - \frac{1}{\tau_f} f - \frac{1}{\tau_r} f + q(p, \vec{r}, t),$$

Densidad de partículas **Coefficiente de difusión** **Interacciones con el medio** **Procesos adiabáticos** **Fuentes** **Decaimientos, aniquilación, fragmentación**

- Se resuelve numéricamente usando GALPROP.

Flujo esperado de antideuterios



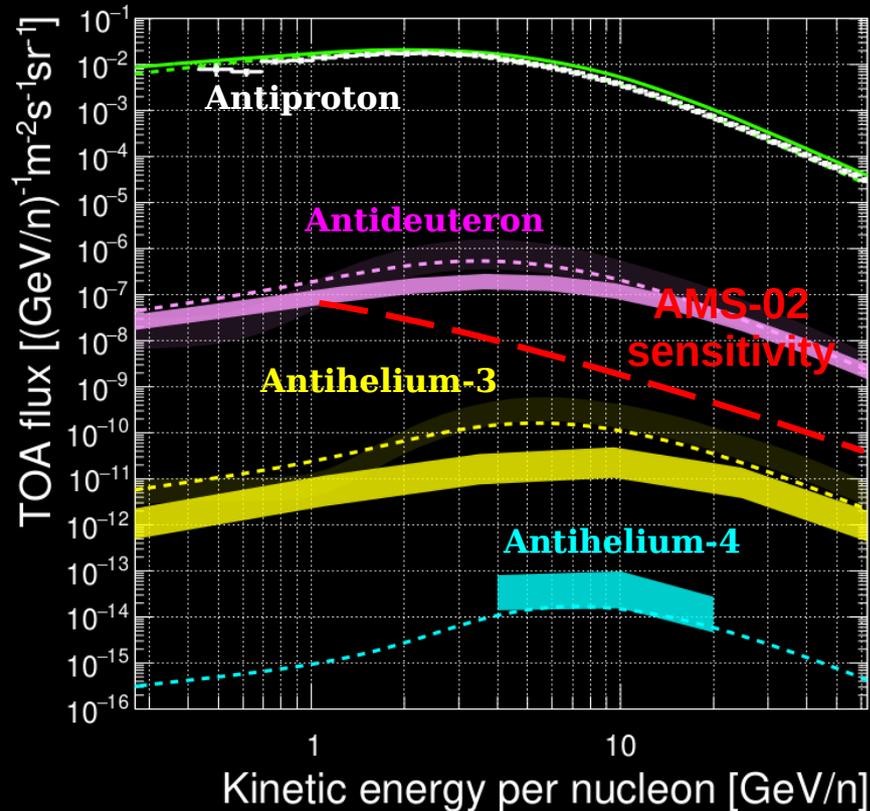
El flujo de antideuterios de Materia Oscura se encuentra en la región de baja energía <1GeV/n (exceso).

El flujo de antideuterios de colisiones de rayos cósmicos es el ruido a una señal de Materia Oscura. Depende de los datos de secciones eficaces.

Gomez-Coral, D., et al. JPCS 1602, 012005 (2020)
Shukla, A., et al Phys. Rev. D 102, 063004 (2020)
Galicía Cruztitla, Luis arXiv:2411.03298 (2024)

Korsmeier, M. et al. Phys.Rev. D 97, 103011 (2018)

Flujos esperados de antihelio



Antihelio y antinúcleos más pesados son poco probables de ser producidos por interacciones de rayos cósmicos o Materia Oscura

El flujo de antihelio-3 está por debajo de la sensibilidad de AMS-02

No se espera que AMS detecte antinúcleos secundarios o antihelio de Materia Oscura

Shukla, A., et al *Phys. Rev. D* 102, 063004 (2020)

Identificación de antinúcleos en AMS

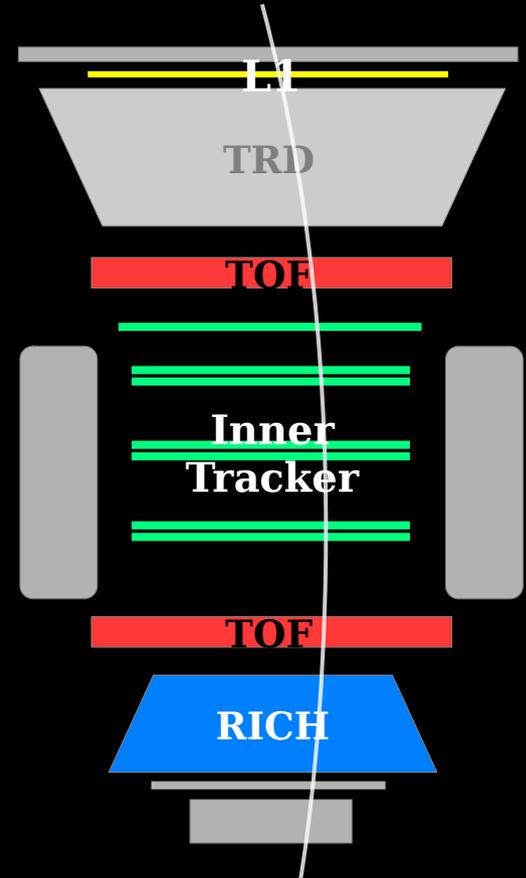
- Los antinúcleos son identificados a través de su masa:

$$M = \frac{ZR}{\beta\gamma} \quad \text{donde } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$Z=1$ en **L1**, **Tracker** y **TOF**.

La rigidez se obtiene de **Inner Tracker**.

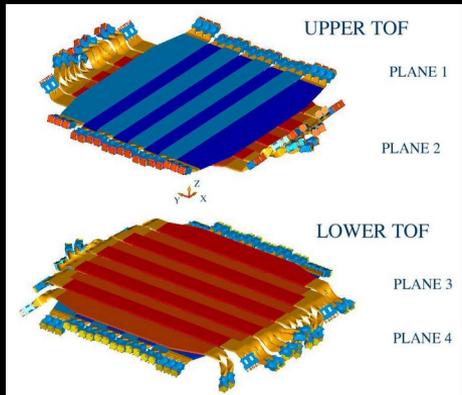
Beta(β) se mide en **TOF** o **RICH**.



Midiendo la velocidad

- La velocidad se obtiene en tres regiones complementarias

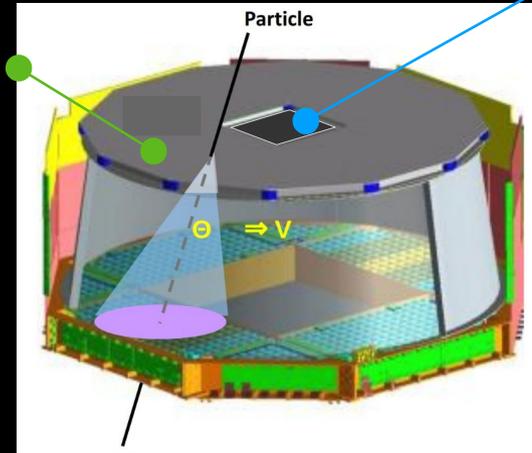
TOF



- β se obtiene de la diferencia de tiempo entre los planos superior e inferior. $0.5 < \beta < 0.8$
- $\Delta\beta \approx 4\%$ ($Z=1$)

RICH

Aerogel
 $n = 1.05$
 $\beta > 0.96$



NaF
 $n = 1.33$
 $\beta > 0.75$

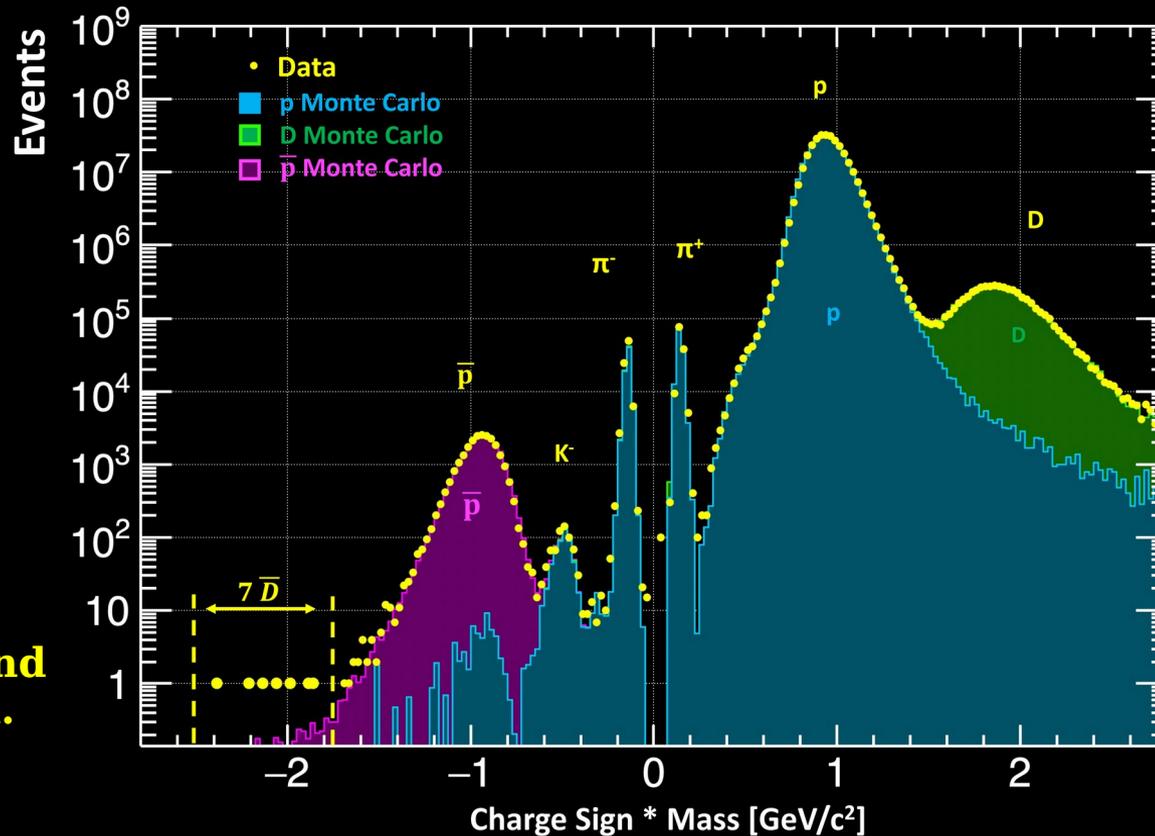
β se obtiene del ángulo en el cono de luz.

Dos tipos de radiadores:

RICH-NaF $\Delta\beta \approx 0.35\%$ ($Z=1$)

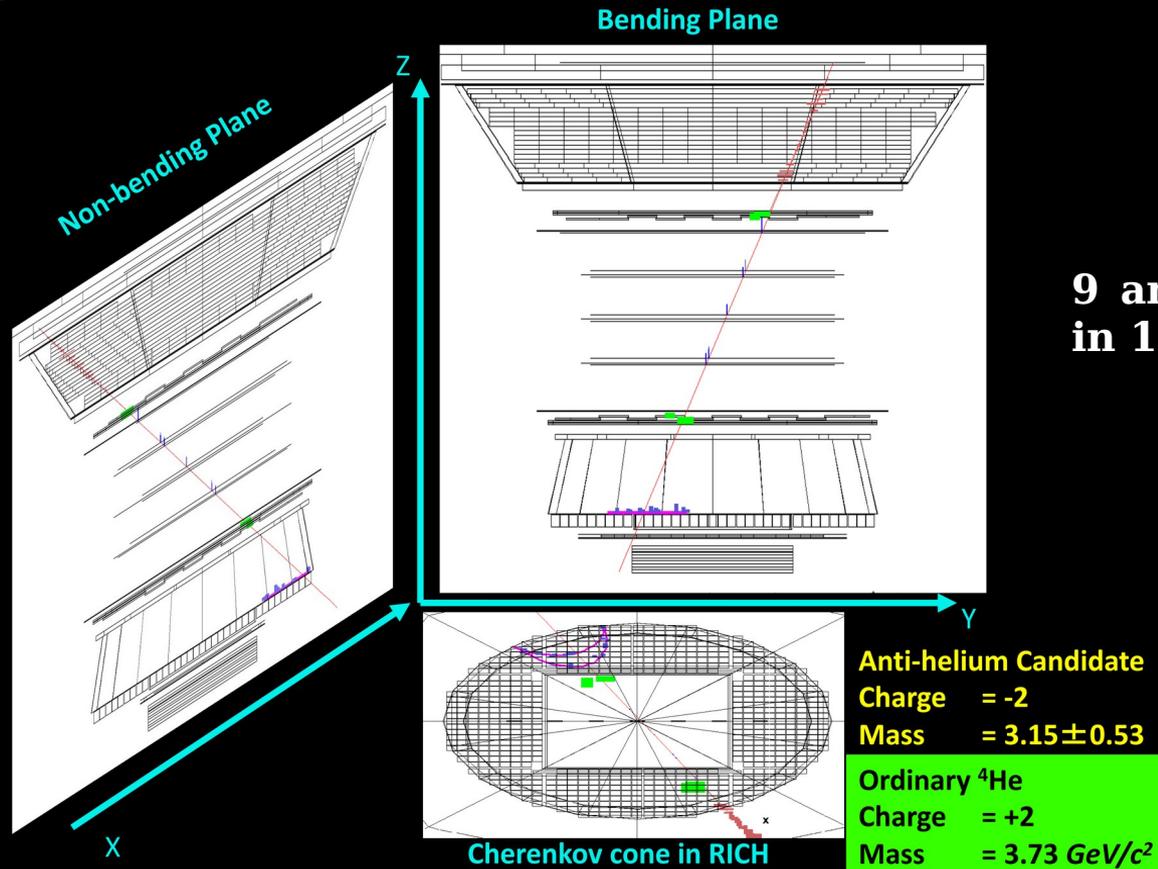
RICH-Aerogel $\Delta\beta \approx 0.12\%$ ($Z=1$)

Candidatos a antideuterones



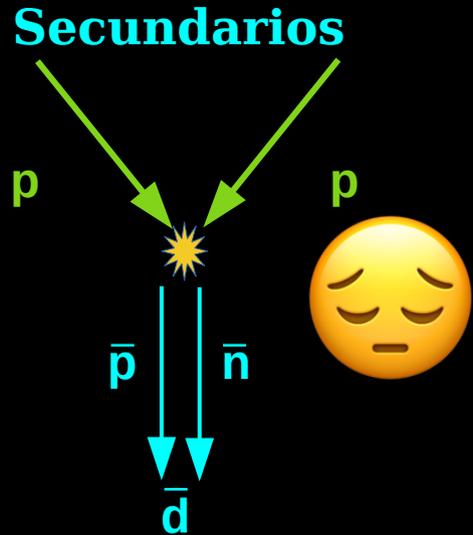
**Antideuterons found
in the RICH region.**

Candidatos a antihelio



**9 antihelium candidates
in 12 years of data.**

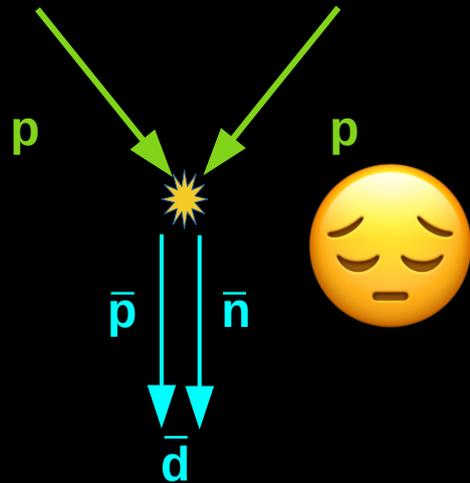
¿De donde provienen estos antinúcleos?



Producción por debajo
de la sensibilidad de
AMS

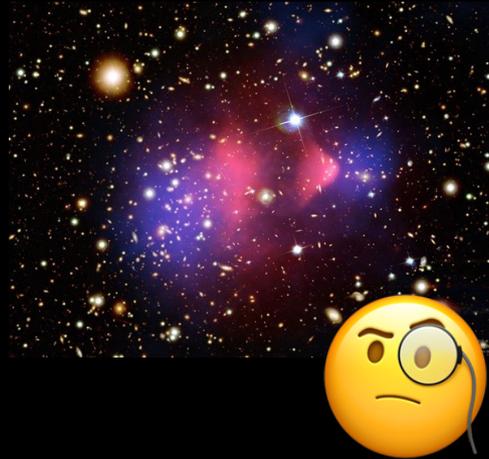
¿De donde provienen estos antinúcleos?

Secundarios



Producción por debajo
de la sensibilidad de
AMS

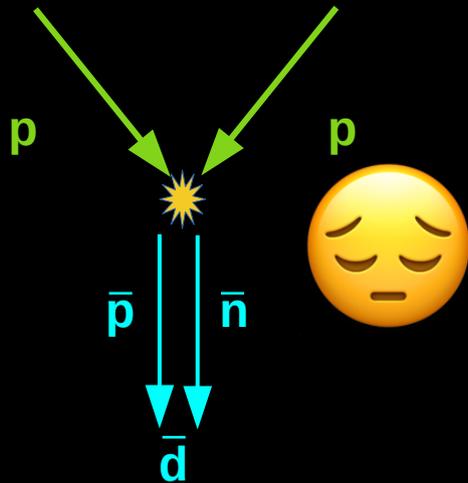
Materia Oscura



MO tiene problemas
para explicar la
detección de antihelios

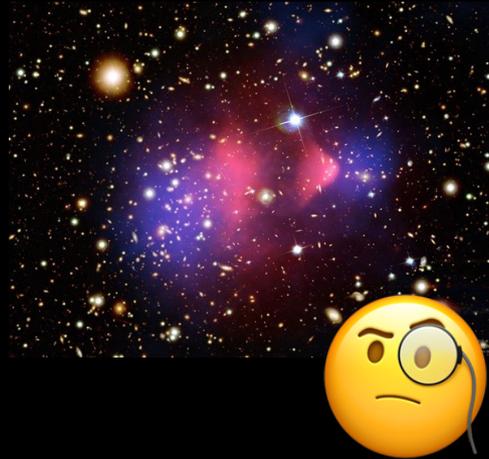
¿De donde provienen estos antinúcleos?

Secundarios



Producción por debajo
de la sensibilidad de
AMS

Materia Oscura



MO tiene problemas
para explicar la
detección de antihelios

Otras fuentes
Anti estrellas
BBN



No hay explicación satisfactoria
a la ausencia de antimateria.
Se sabe poco sobre abundancia
de antimateria en la Galaxia

Dupourqué et al Phys. Rev. D 103, 083016 (2021)
Fedderke et al Phys. Rev. D 109, 123028 (2024)

Conclusiones

- **AMS es el único espectrómetro magnético en el espacio capaz de medir flujos de materia y antimateria con alta precisión.**
- **AMS ha medido antimateria como positrones y antiprotones con una precisión sin precedentes**
 - ♦ **El flujo de positrones muestra un exceso a altas energías con una energía de corte. El exceso puede ser por pulsares o MO.**
 - ♦ **MO tiene problemas para explicar el flujo de antiprotones debido a la abundancia de secundarios.**
- ♦ **AMS ha reportado candidatos a antideuterio y antihelio**

Conclusiones

- **Los candidatos a antideuterio han sido observados en la zona del detector RICH, donde se espera producción secundaria.**
- **Además, la producción esperado de antideuterios secundarios parece estar por debajo de la sensibilidad de AMS.**
- **Por último, se espera que la formación de antihelios o antinúcleos sea mucho menor que la de antideuterios en interacciones de rayos cósmicos o MO.**
- **La observación de antihelio y antideuterio en rayos cósmicos es un misterio.**



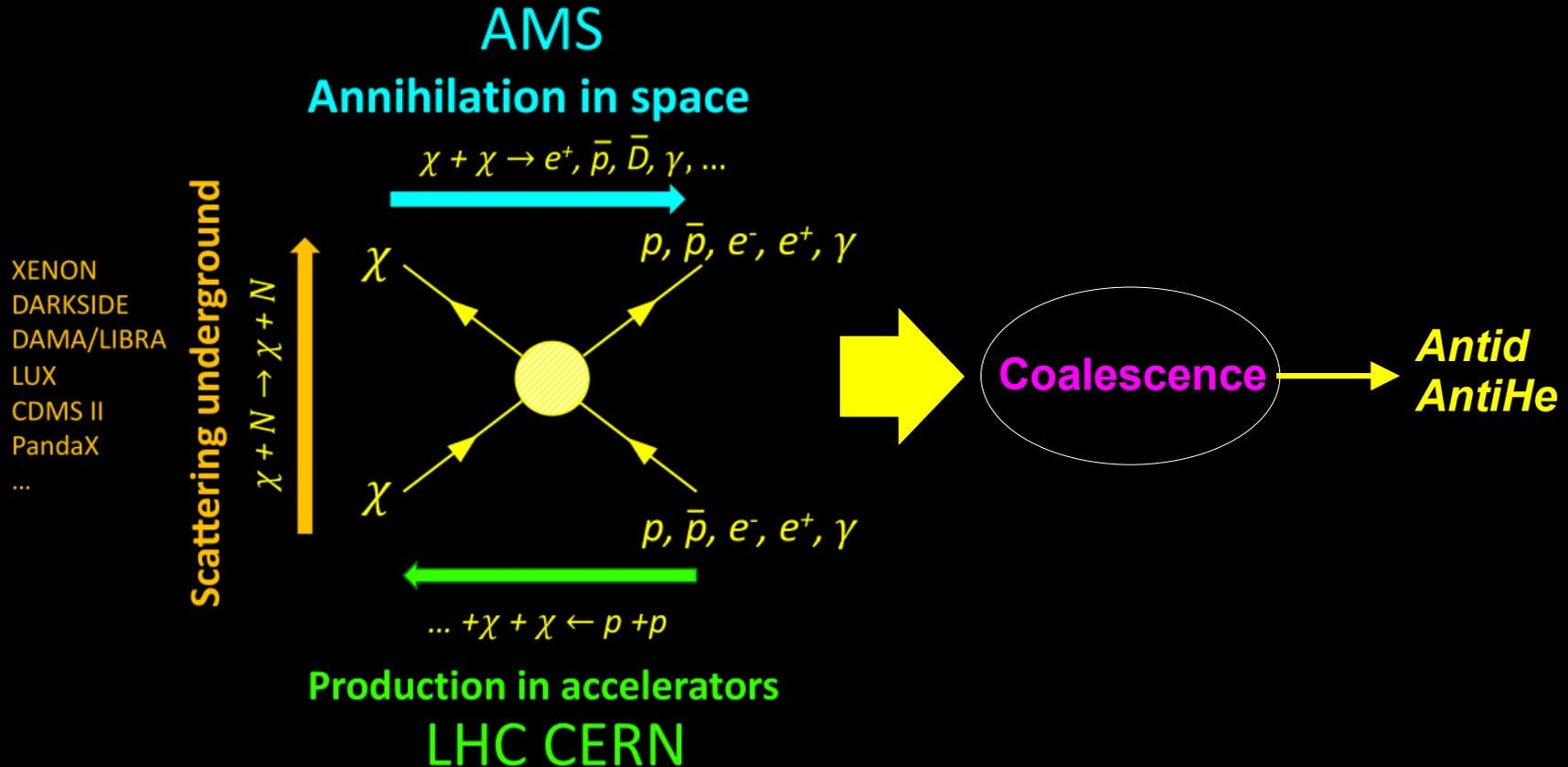
¡Gracias!

Grupo de Física Nuclear y Subnuclear

FINSU

Email: dgomezco@fisica.unam.mx

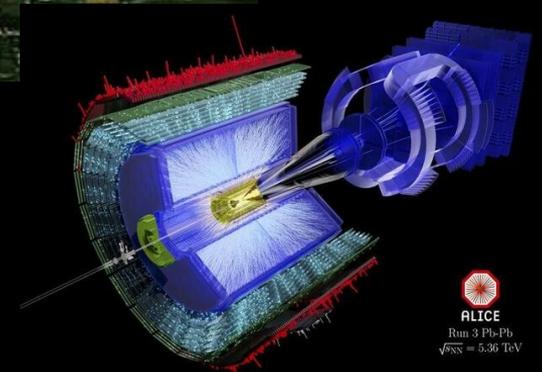
Búsqueda indirecta de Materia Oscura



Antinúcleos en aceleradores

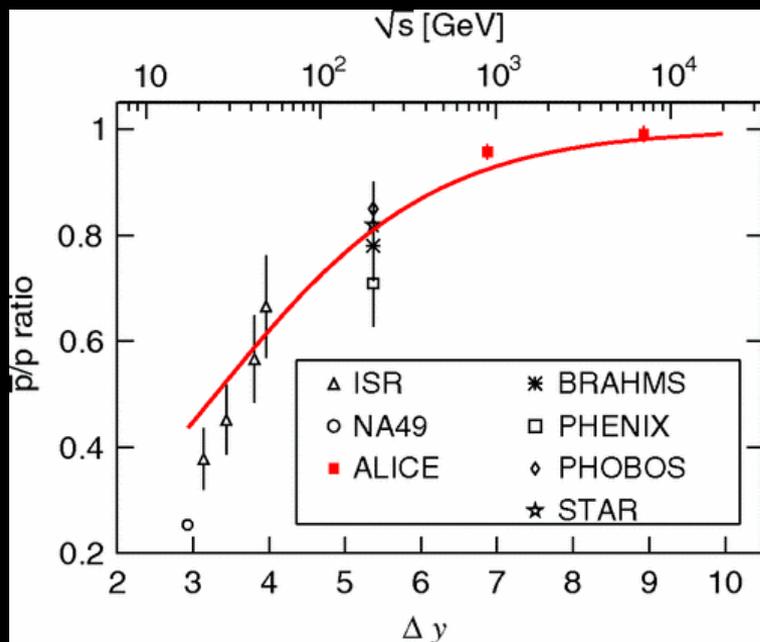


- Acelerador LHC en Suiza-Francia
- Colisiones de protones hasta 14TeV

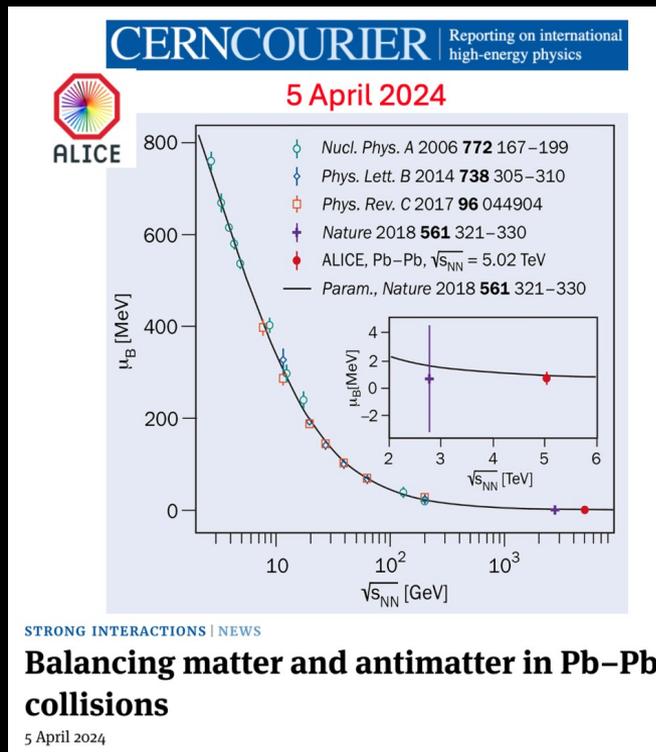


Observaciones en el LCH

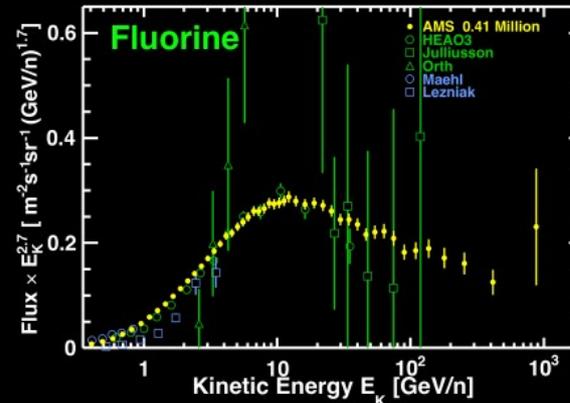
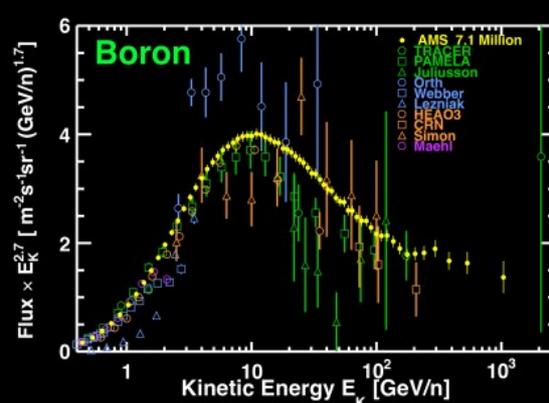
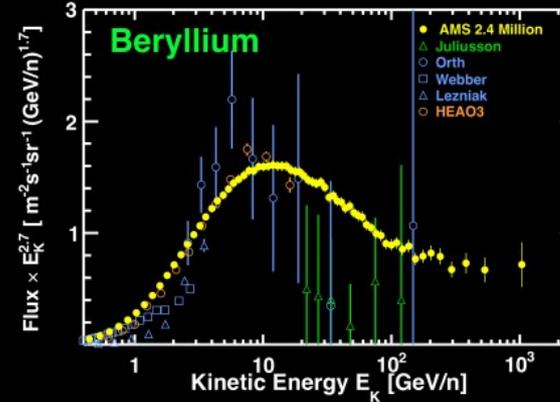
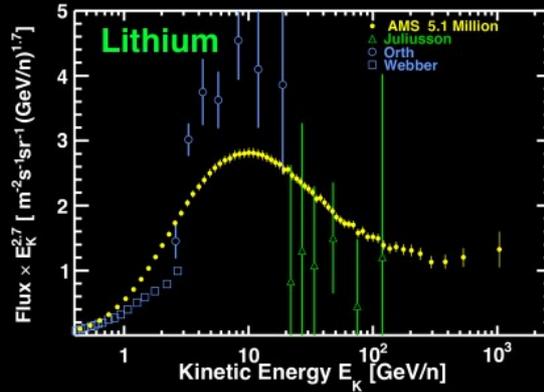
- Los experimentos están de acuerdo con el modelo estándar.
- Número bariónico = 0



Phys. Rev. Lett., 105, 7, 2010, 072002

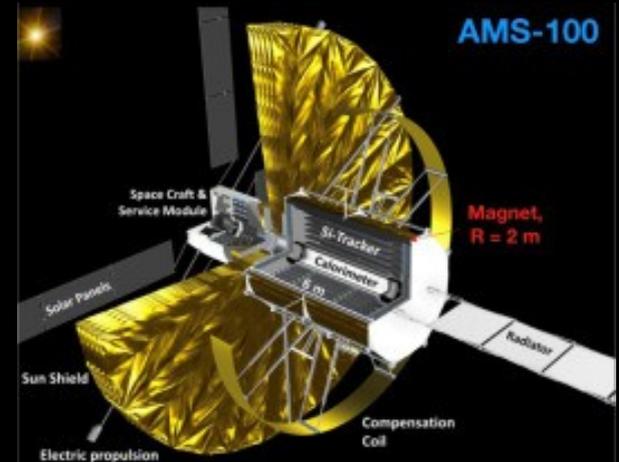
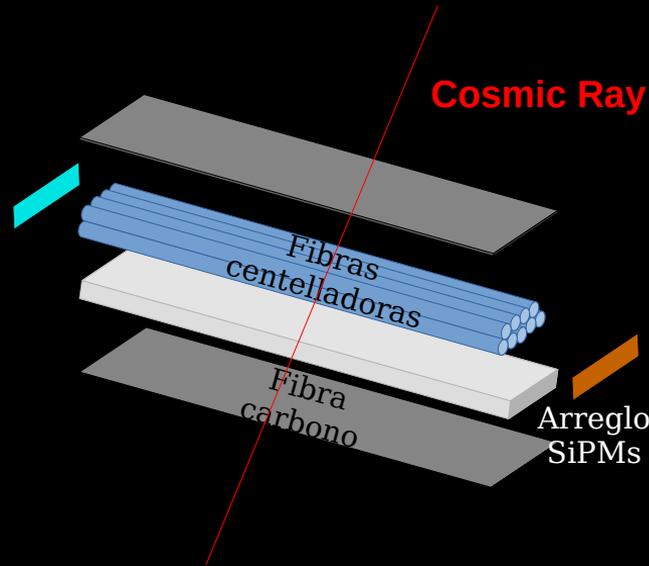
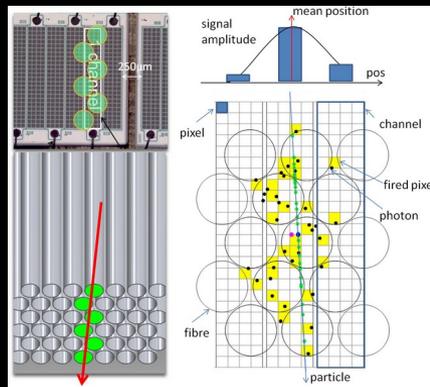


Mediciones realizadas por AMS



Desarrollo de detectores

- **Detector de trazas usando fibras centelladoras y Fotomultiplicadores de Silicio (SiPMs)**
- **Siguiente generación de detectores en el espacio**



Lagrange point 2

Peso: 40 t

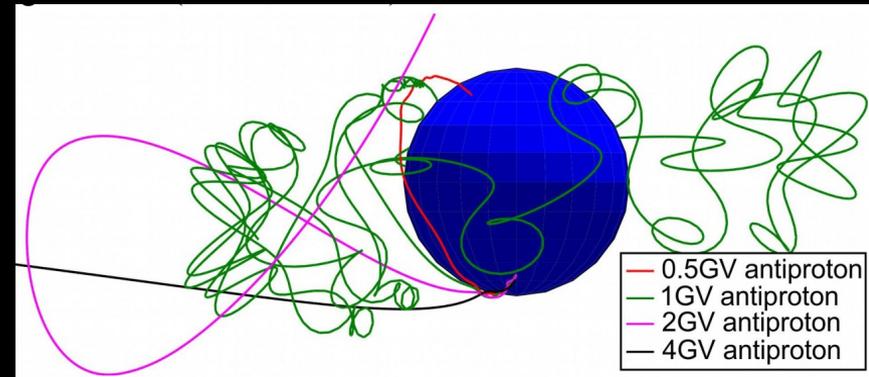
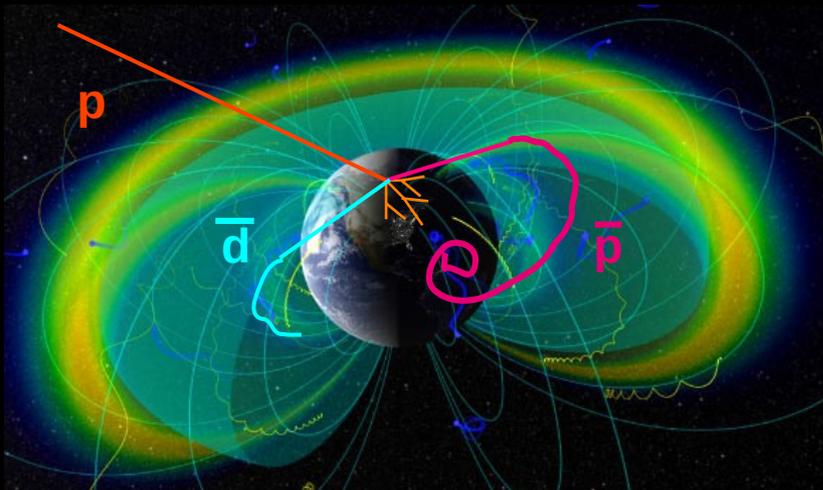
C. Magnético: 15Tm²

Aceptancia: 100m²sr

LHCb Technical Design Report, CERN-LHCC-2014-001

Antinúcleos locales

- Antinúcleos pueden ser producidos por la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera Terrestre.
- Algunos de estos antinúcleos quedan atrapados en el campo magnético terrestre.
- Posible fuente de ruido para AMS-02 y otros experimentos.



PLANETOCOSMICS

Herramientas de Machine Learning para análisis en AMS

- Usar ML para mejorar las técnicas de análisis en el experimento.
- Por ejemplo mejorar la reconstrucción del cono de luz Cherenkov en el detector RICH.

