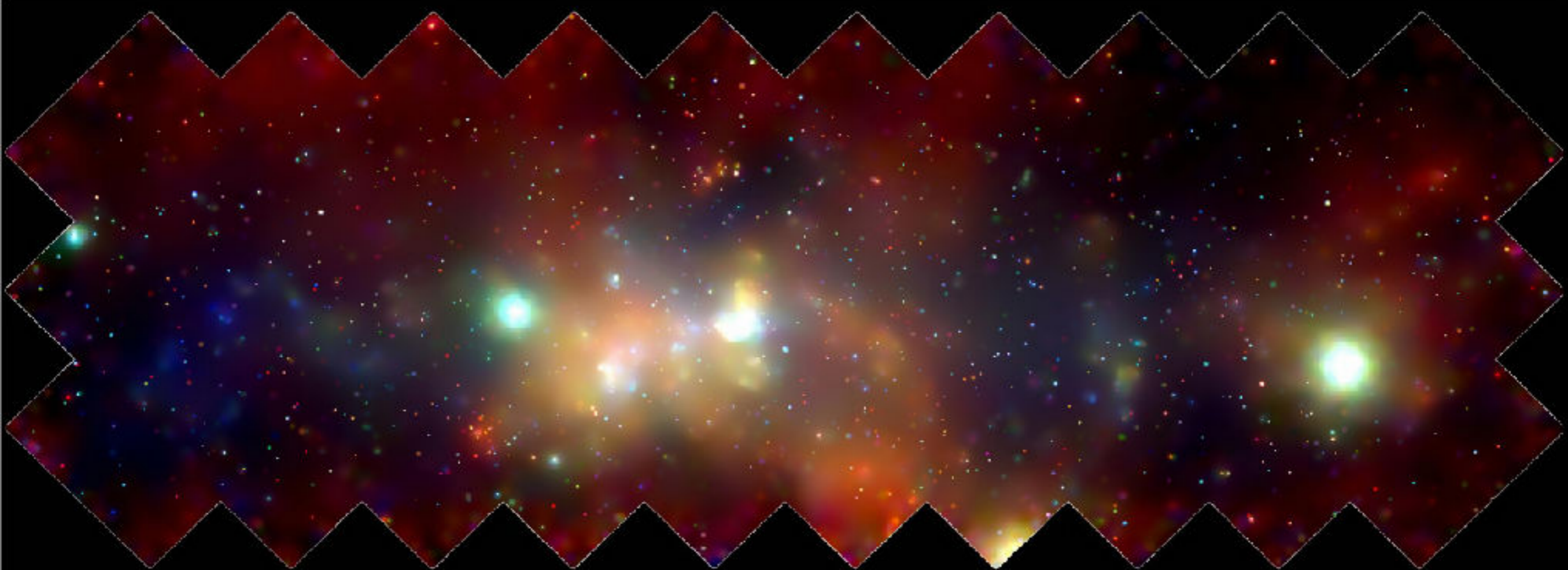


ASTROFÍSICA DE PARTÍCULAS EN EL ESPACIO

EL EXPERIMENTO AMS

Eusebio Sánchez Álvaro
CNEMAT



CONTENIDOS

¿Qué es la astrofísica de partículas?

Astrofísica: rayos cósmicos

Física de partículas: Materia oscura, antimateria, exótica

Detección de rayos cósmicos

El experimento AMS

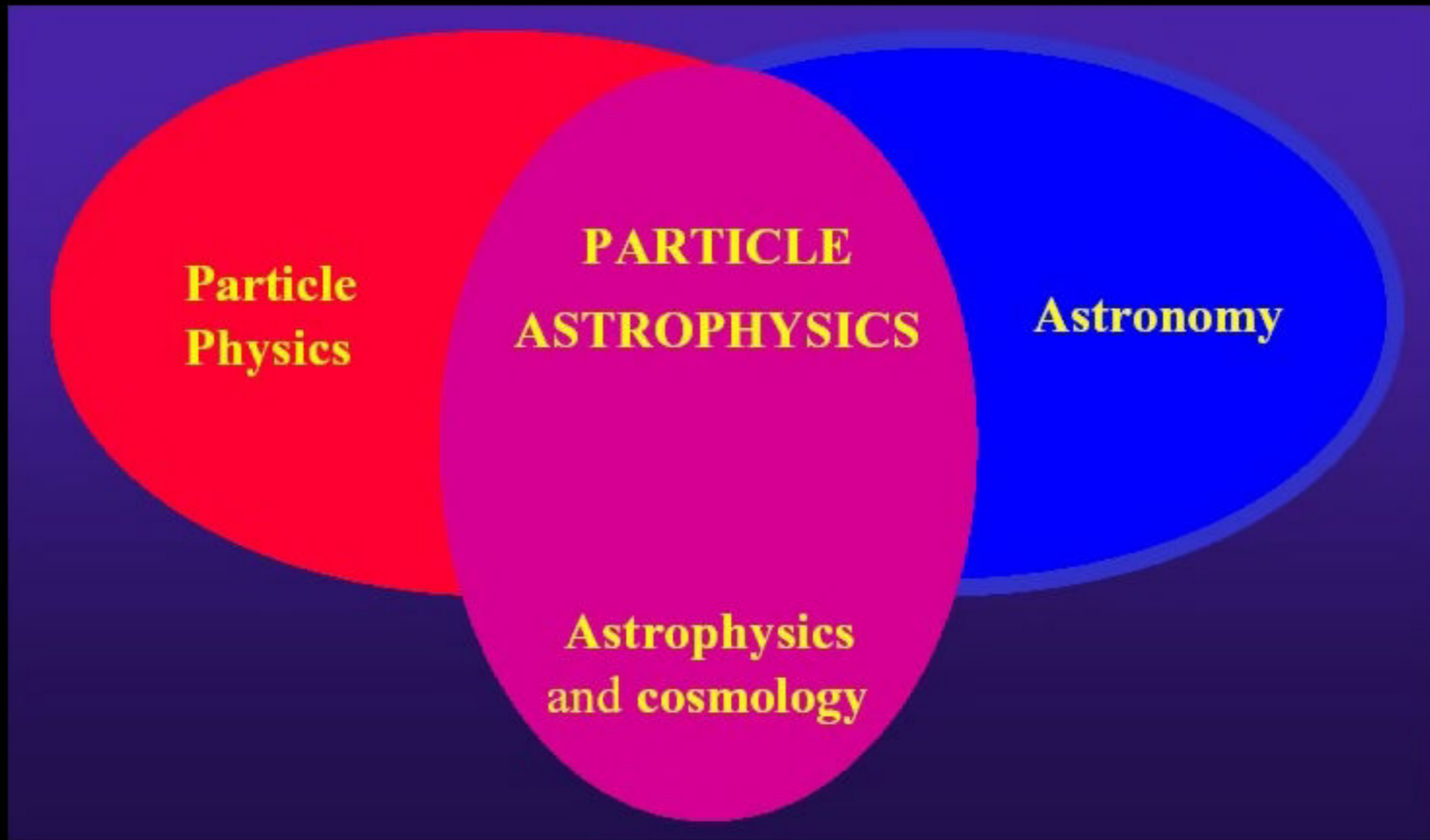
Descripción

Objetivos generales

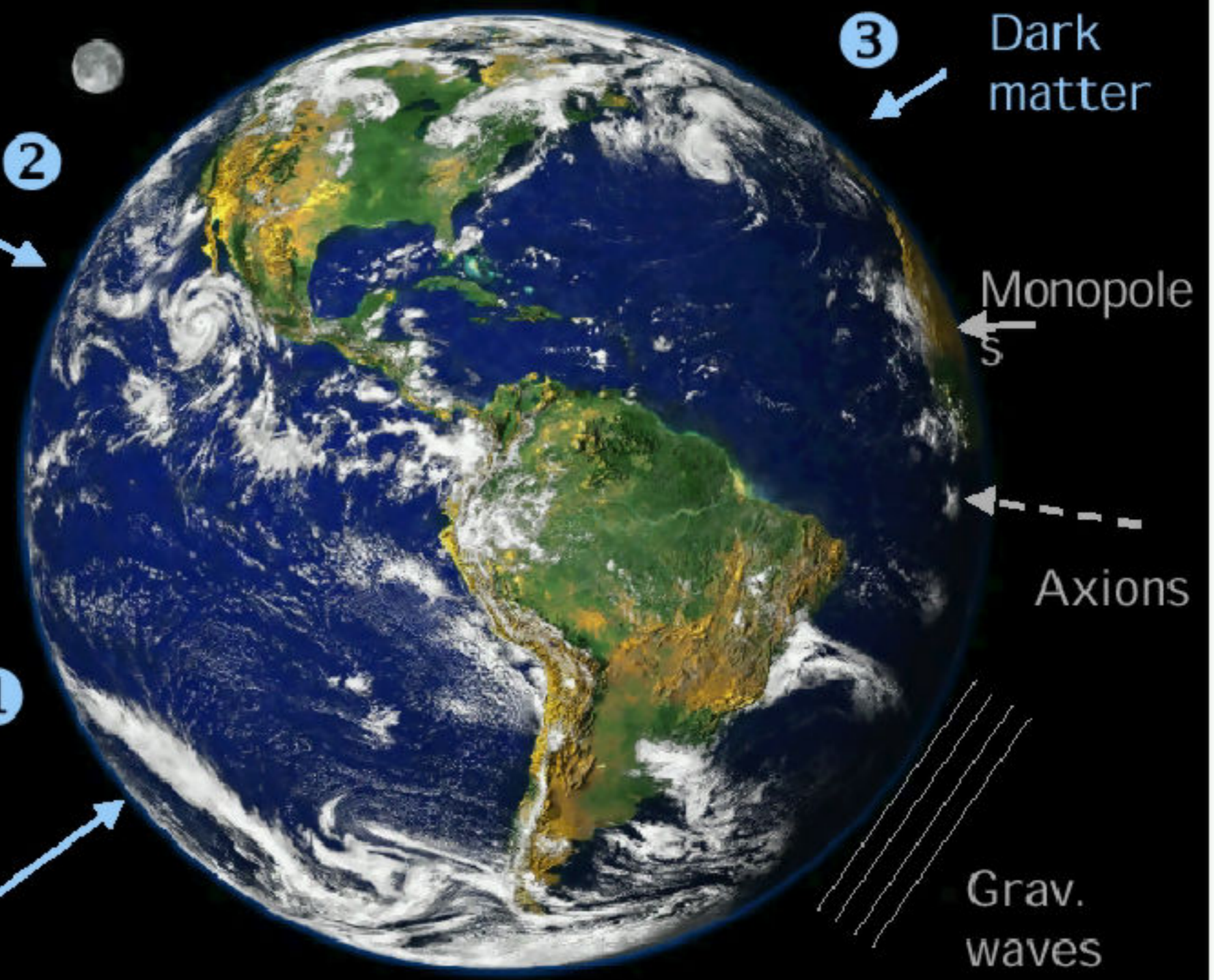
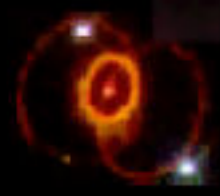
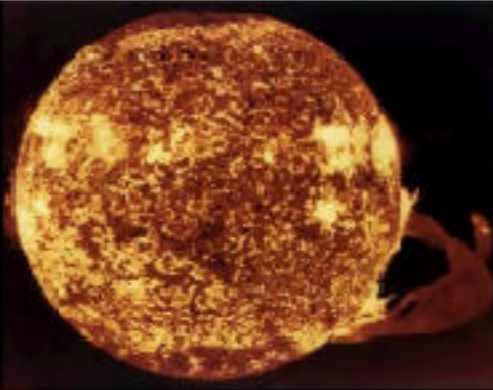
Resultados actuales y perspectivas

Conclusiones

¿Qué es la astrofísica de partículas?



- Utilizar teorías de la física de partículas para explicar el universo.
- Utilizar las técnicas de la física de partículas en astronomía.
- Utilizar partículas del espacio exterior en los experimentos.



Neutrinos
 (MeV: sun, SN
 GeV: atmosphere
 PeV: CR accelerators)



Cosmic ray
 particles $\rightarrow 10^{20}$ eV



Electromagnetic
 radiation $\rightarrow 100$ TeV

2

1

3

Dark matter

Monopole
§

Axions

Grav.
waves

(W. Hoffmann)

Astrofísica de partículas

El estudio de los rayos cósmicos ofrece resultados en dos campos:

Astrofísica: Origen y propagación de los rayos cósmicos, abundancias, isótopos, características del espectro.

Física de partículas: Materia oscura, antimateria, exótica.

Es necesario conocer la física estándar de los rayos cósmicos para poder estudiar los efectos de nueva física.

¿QUÉ SABEMOS DE LOS RAYOS CÓSMICOS?

Composición: 98% de núcleos, 2% electrones.
Fotones, neutrinos, antiprotones y positrones.

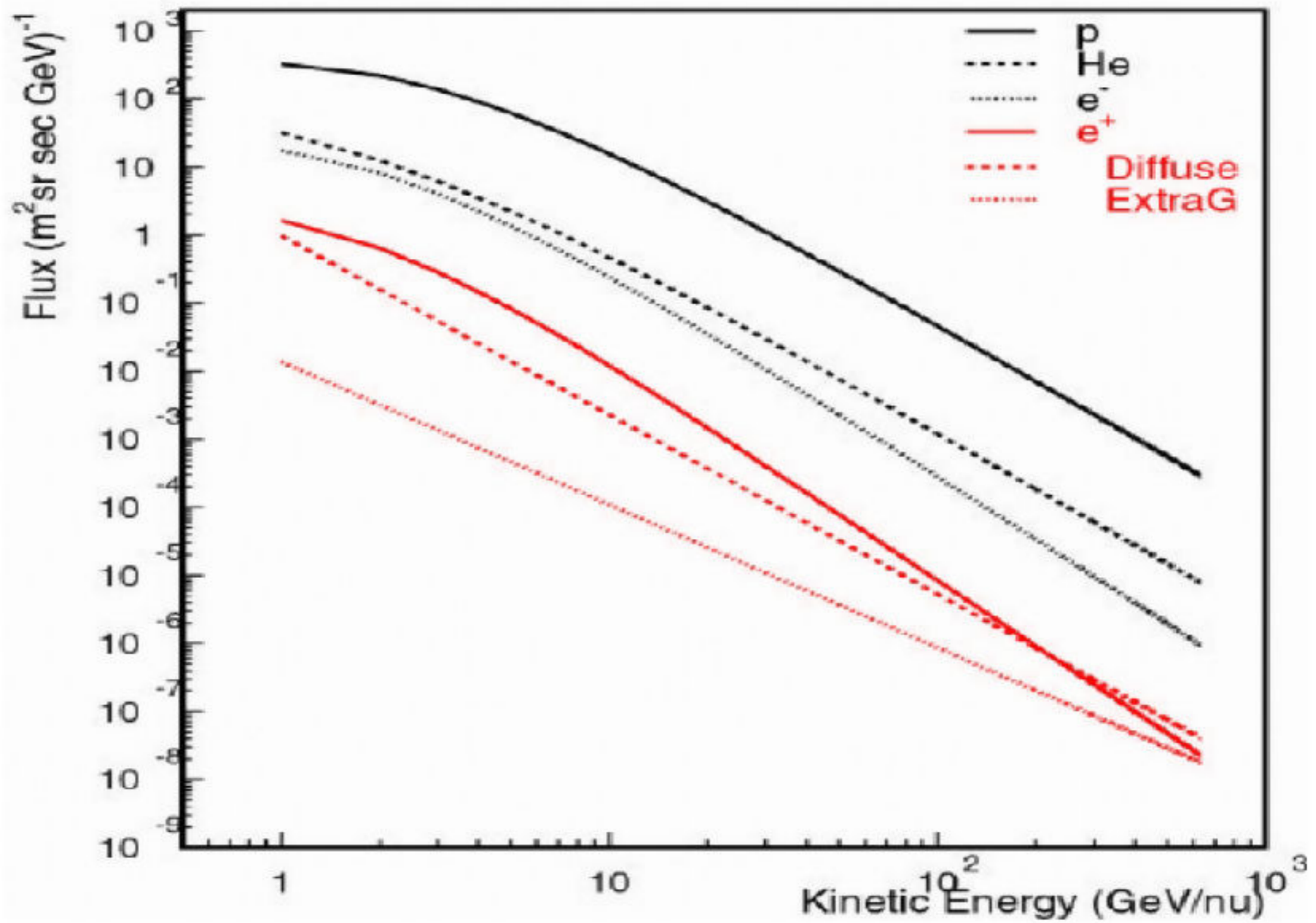
Son la única muestra de materia de regiones distantes de la galaxia, y posiblemente del Universo, que puede observarse en el Sistema Solar.

El rango energético es enorme.

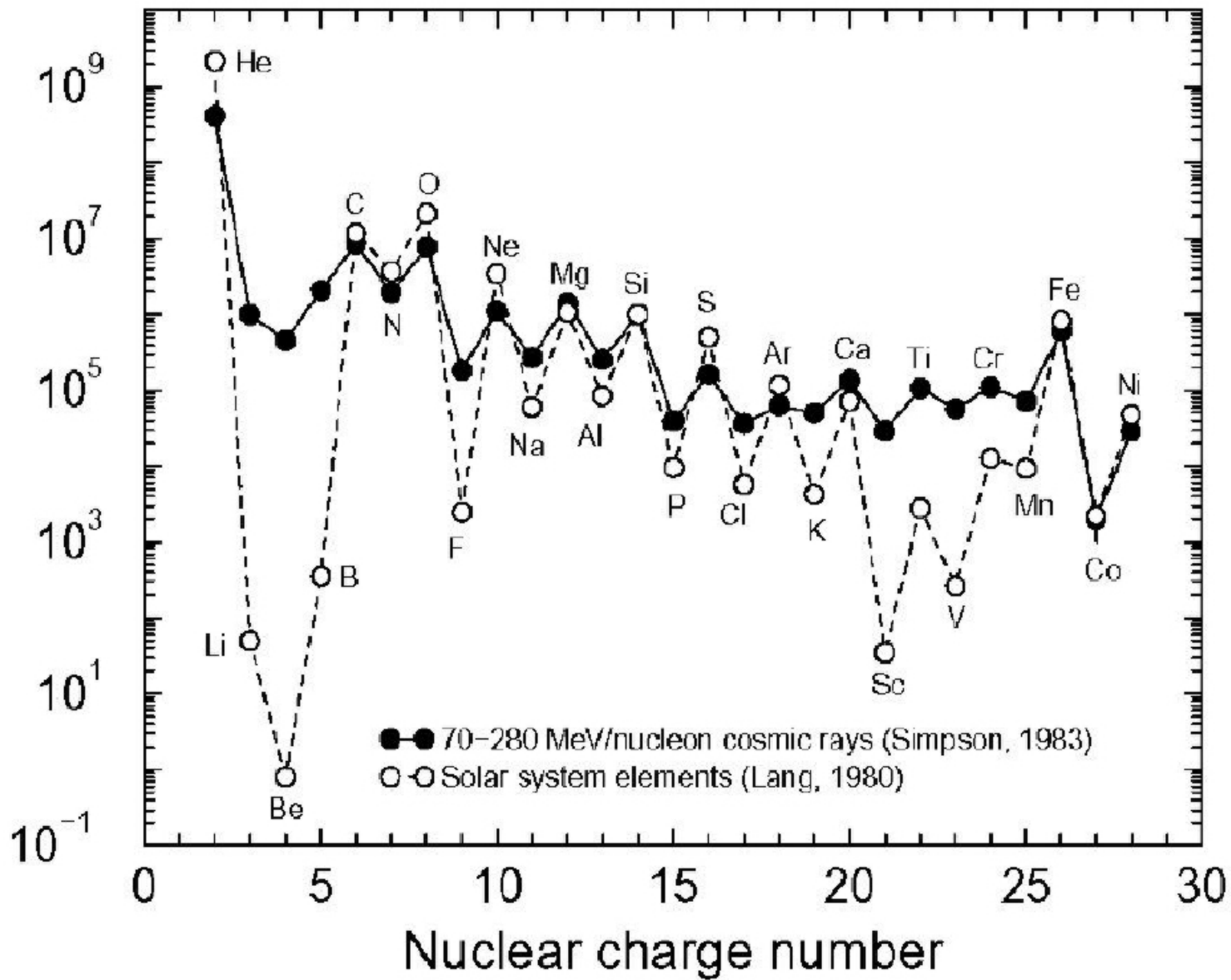
¿De dónde vienen? ¿Cuál es su fuente y el mecanismo de aceleración?
¿Cuál es su composición y cómo cambia con la energía? ¿Qué nos dicen sobre el medio interestelar por el que viajen?

Las nuevas tecnologías (de la física de partículas) permiten hacer estudios de alta estadística y alta precisión.

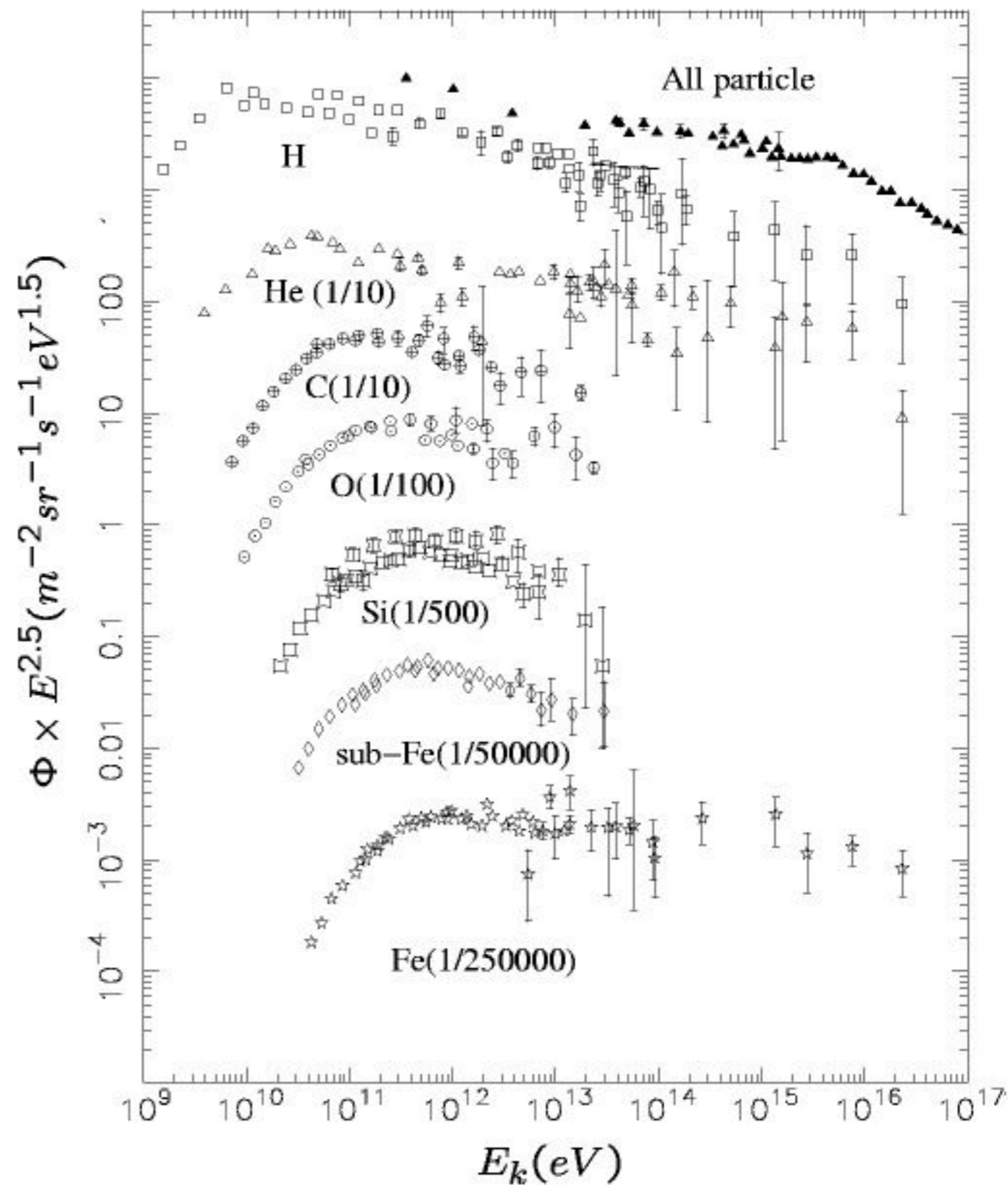
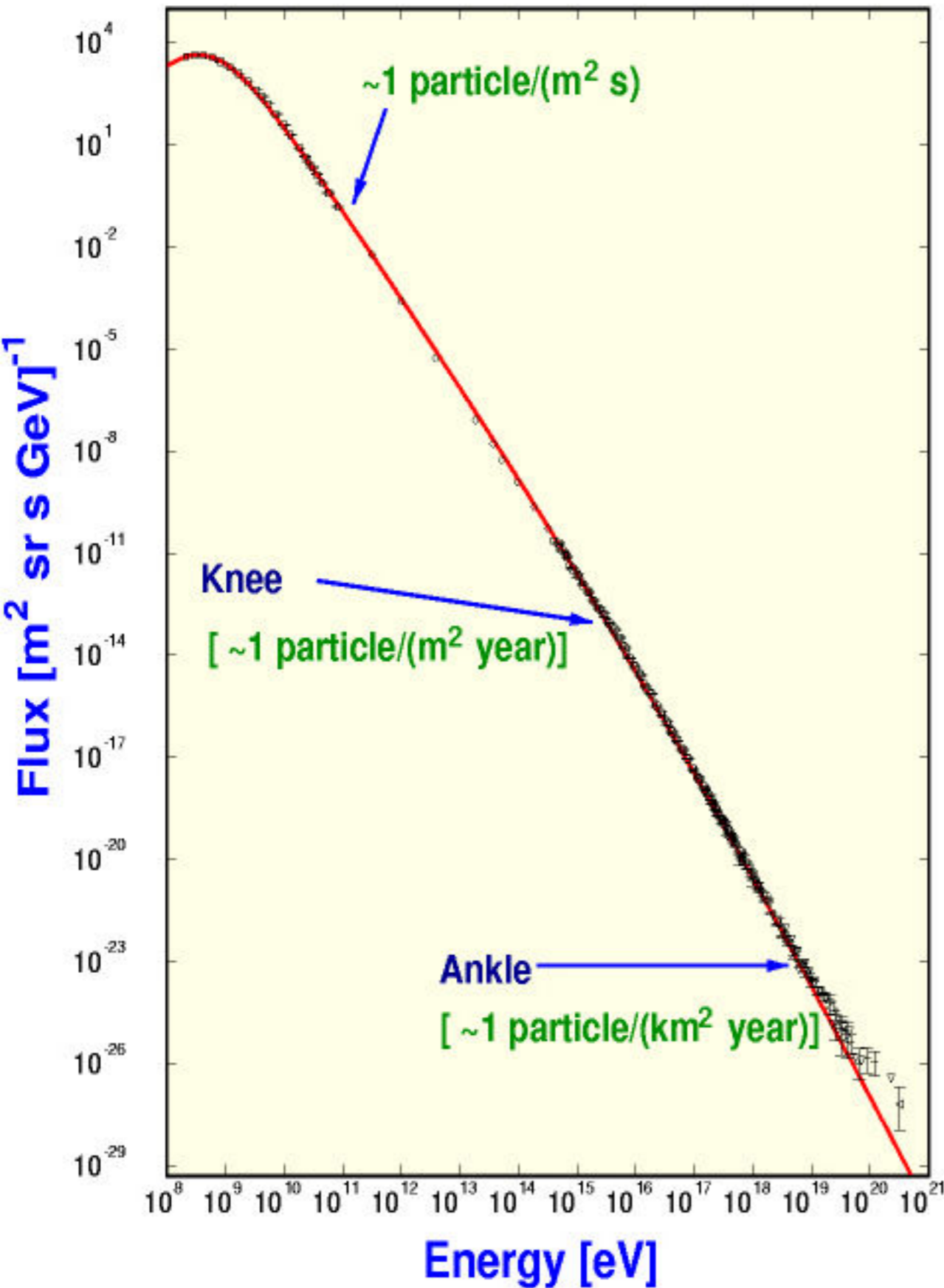
Tipos de partículas en los rayos cósmicos



Abundance relative to silicon = 10^6



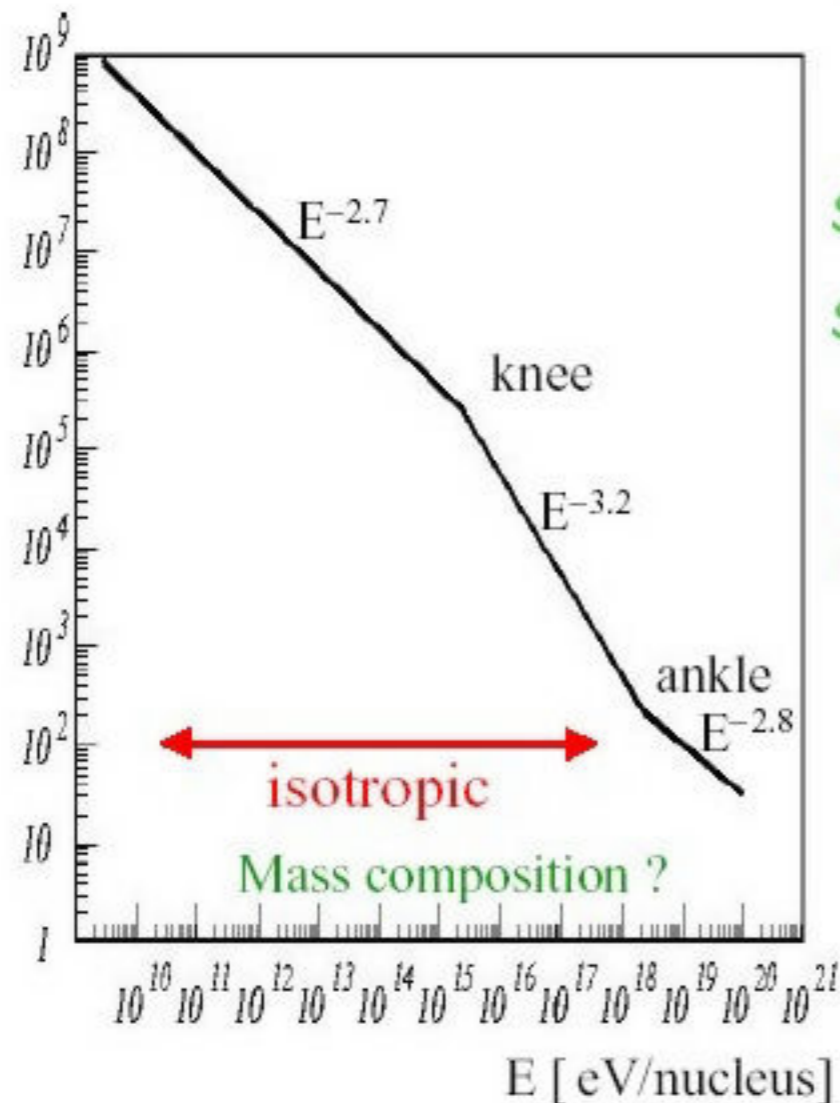
Espectro energético



Las características del espectro y de la composición llevan al modelo actual sobre los rayos cósmicos.

✓ **Varias componentes: galáctica, extragaláctica, de ultraalta energía**

Features of Cosmic Ray Spectrum



Ingredients of models:

$$dN/dE \sim E^{\alpha + \delta}$$

source

propagation

Source acceleration: $\alpha = -2.0$ to $-2.2, \dots$

Source cut-off $E < 10^{18} Z \left[\frac{R}{\text{kpc}} \right] \left[\frac{B}{\mu\text{G}} \right] \text{eV}$

Diffusion models $\delta = -0.3$ to -0.6

GZK cut-off on CMB $\gamma E \approx 7 \cdot 10^{19} \text{ eV}$

‘Conventional Wisdom’:

Galactic SNR $E < 3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

Galactic losses $E > 4 \cdot 10^{14} \text{ eV}$

Extragalactic $E > 3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

exotic $E > 7 \cdot 10^{19} \text{ eV}$

Rayos cósmicos galácticos:

- Origen en supernovas
- Composición similar a la del Sol, pero más cantidad de Li, Be, B, y elementos por debajo del Fe. Se debe a los procesos de espalación en el medio interestelar, que producen elementos que no se generan de forma natural por fusión nuclear.

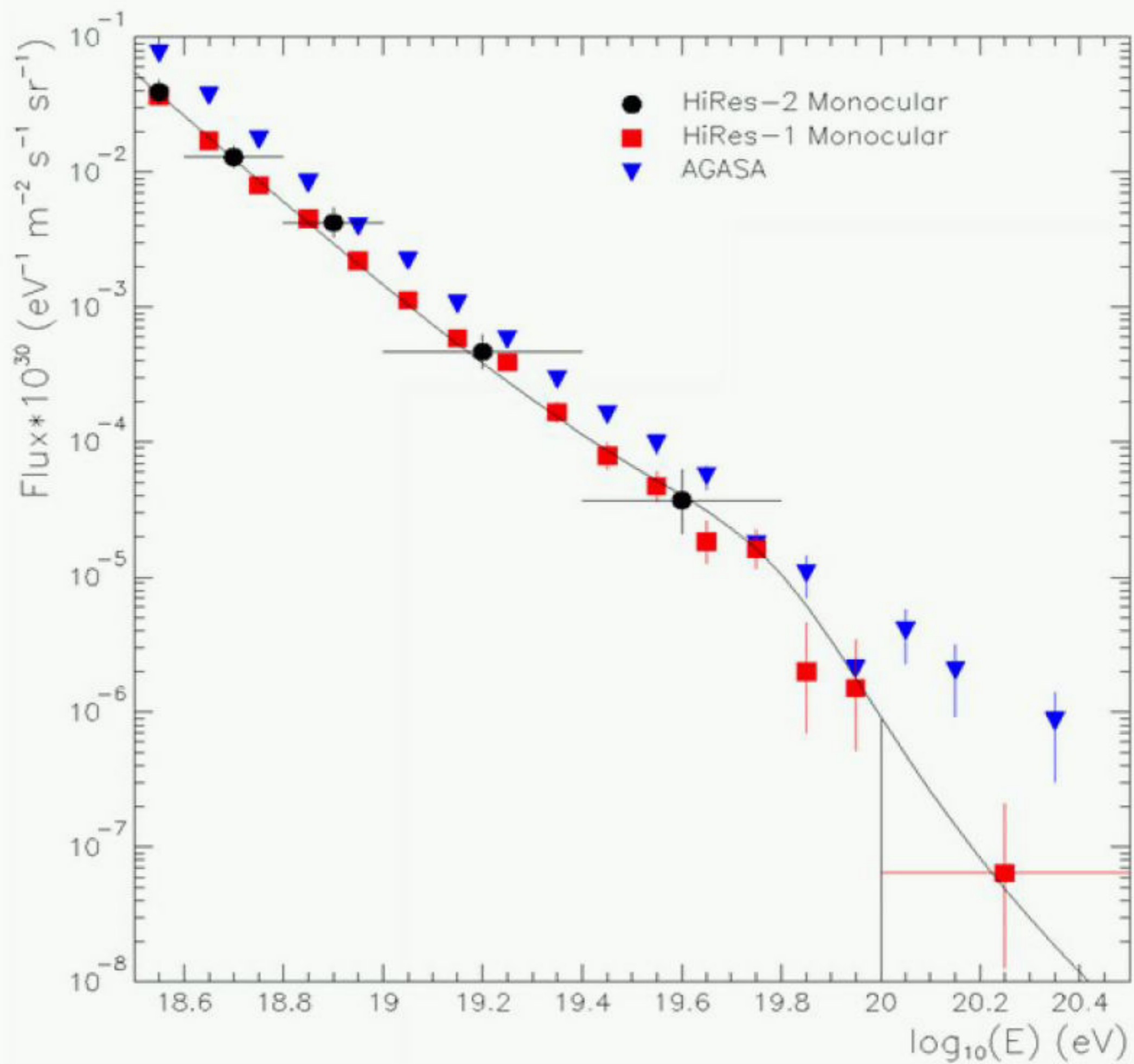
Las secciones eficaces de espalación son bien conocidas de la física nuclear. Las abundancias de los elementos, que se pueden originar de forma primaria o por espalación, están directamente correlacionadas con la cantidad de materia atravesada.

Rayos cósmicos extragalácticos

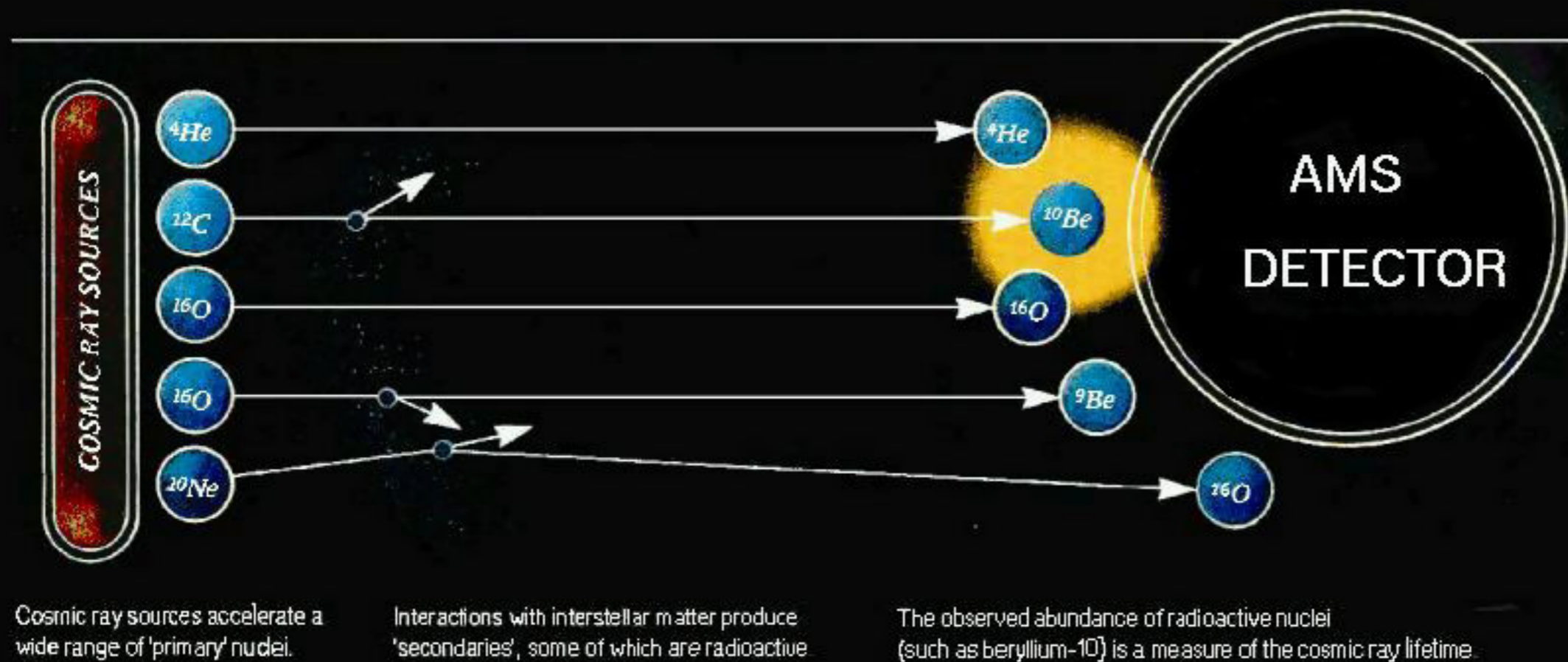
- Origen en fenómenos violentos: AGNs, GRBs ...
-

Rayos cósmicos de ultraalta energía

- GZK?
-



RADIOACTIVE CLOCKS MEASURE THE LIFETIME OF COSMIC RAYS IN THE GALAXY



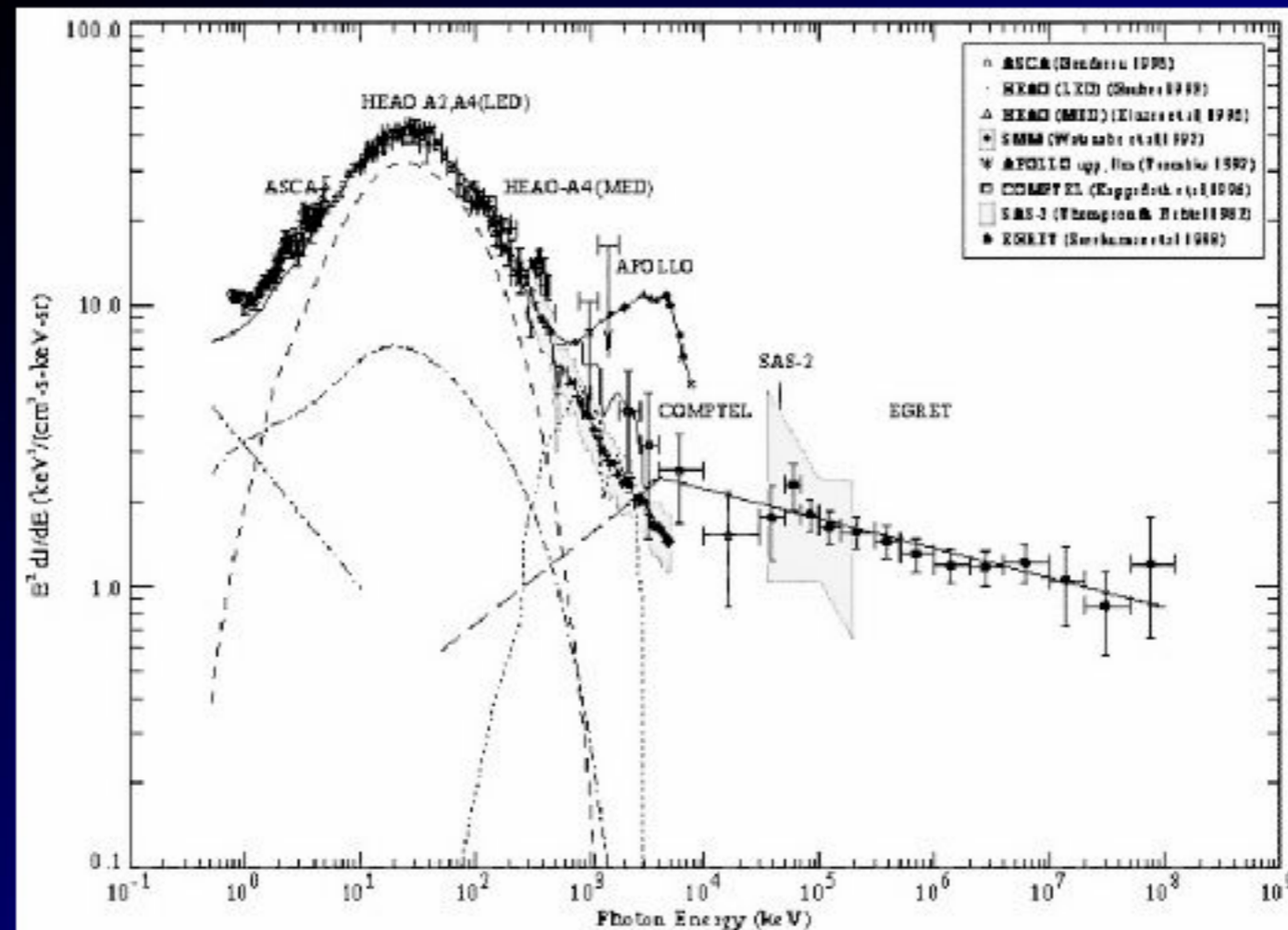
La vida media de algunos isótopos permite usarlos como relojes cósmicos. Ejemplo: Vida media del $\text{Be}10 = 4 \text{ My}$. Al medir la fracción $\text{Be}10/\text{Be}9$ sabemos cuánto $\text{Be}10$ se ha convertido en $\text{Be}9$ en su camino por la galaxia. Otros procesos de pérdida son el escape de la galaxia o la pérdida de energía por otras interacciones.

RAYOS GAMMA

Los rayos gamma no son desviados por los campos magnéticos.
Pueden asociarse a sus fuentes.

Los rayos gamma del disco galáctico se producen por la desintegración de piones neutros que vienen de la interacción de rayos cósmicos con el medio interestelar.

Se puede obtener la densidad de rayos cósmicos midiendo los rayos gamma difusos del plano galáctico. Es necesario conocer el fondo para buscar sucesos raros.



Materia Oscura

La existencia de materia oscura se infiere de múltiples observaciones:

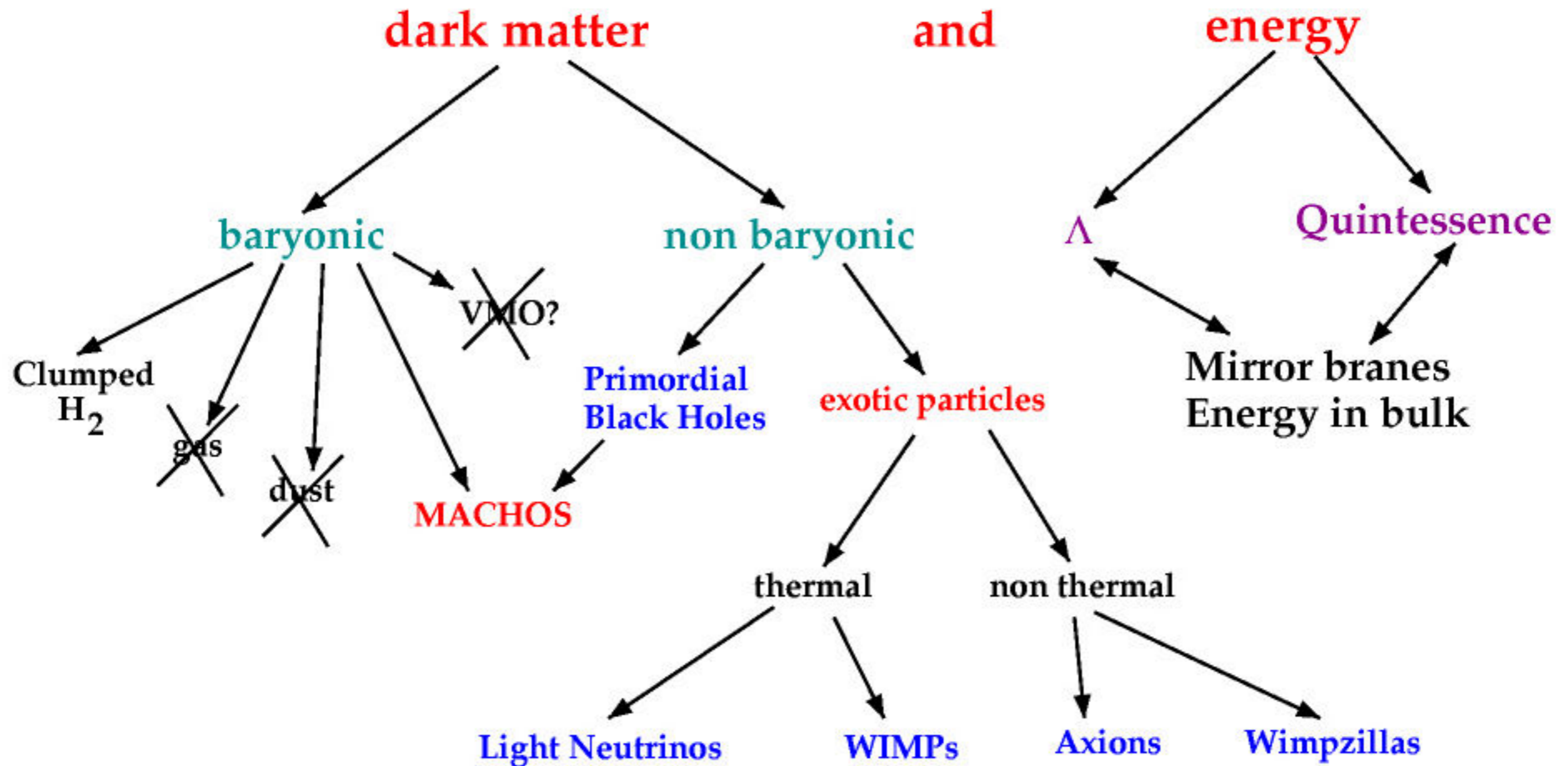
- Curvas de rotación galácticas
- Distribución de velocidades en "clusters"
- CMB, emisión de rayos X en "clusters", lensing

La materia oscura es básicamente FRÍA (formación de estructuras)

La física de partículas proporciona varios candidatos.

MATERIA OSCURA

A complex territory to map experimentally: high priority



Why Ω_b , Ω_m , Ω_Λ , Ω_k ?

Likely to be related to fundamental properties of forces

La LSP es una reliquia:

Si se conserva R-paridad, la LSP (Lightest Supersymmetric Particle) es estable

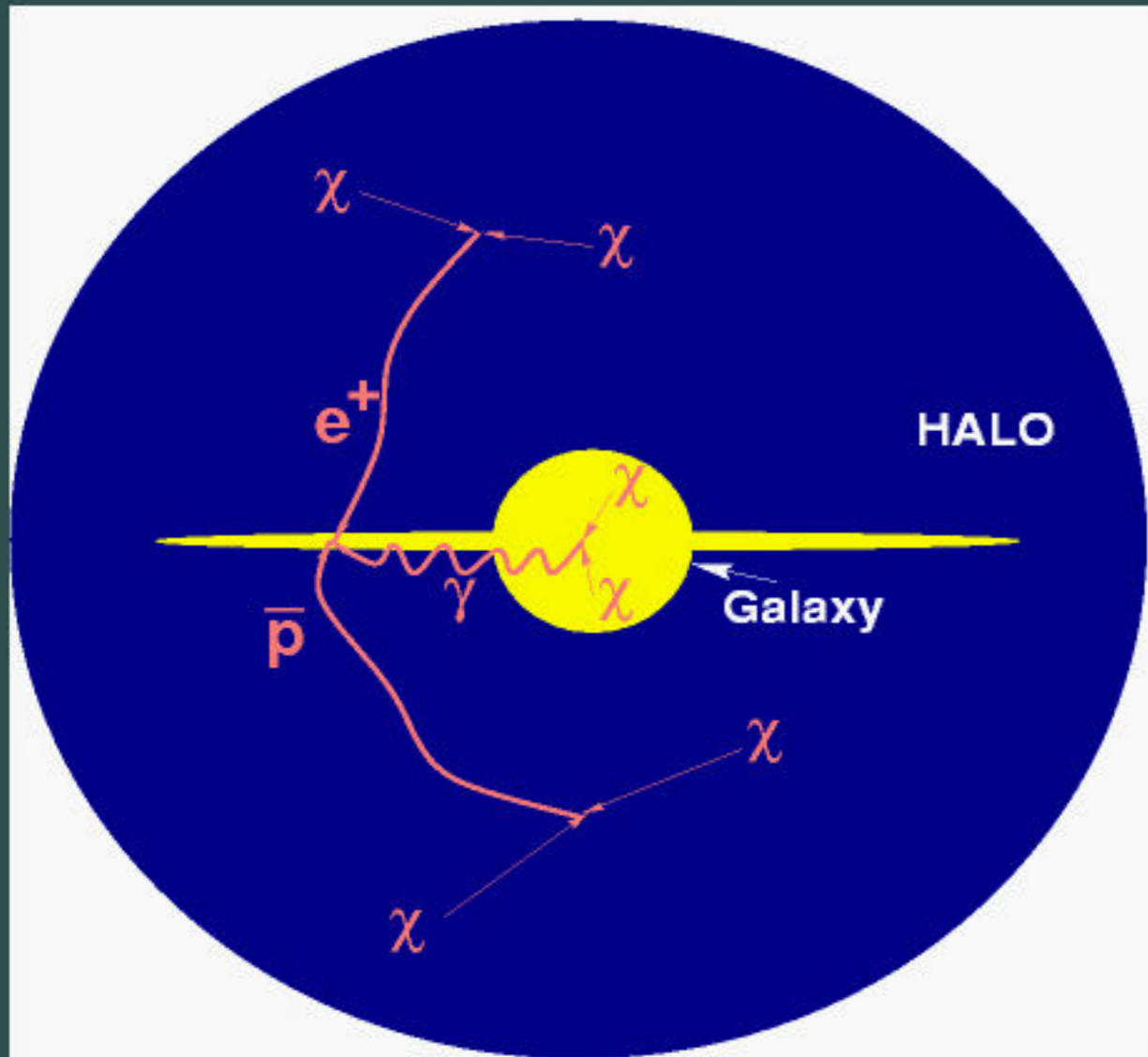
Si además no tiene ni color ni carga, es una realización clara de un WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)

Demasiada libertad en los modelos de SUSY:

La naturaleza de la LSP depende del mecanismo de rotura de SUSY y de la región del espacio de parámetros.

Aquí se considerará siempre "MSSM-gravity mediated" y regiones del espacio de parámetros donde χ es la LSP

Materia Oscura



$\chi\bar{\chi} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow$ ANTIPROTONS

$\chi\bar{\chi} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow$ ANTIDEUTERIUM

$\chi\bar{\chi} \rightarrow W^+W^-, ZZ \rightarrow$ POSITRONS

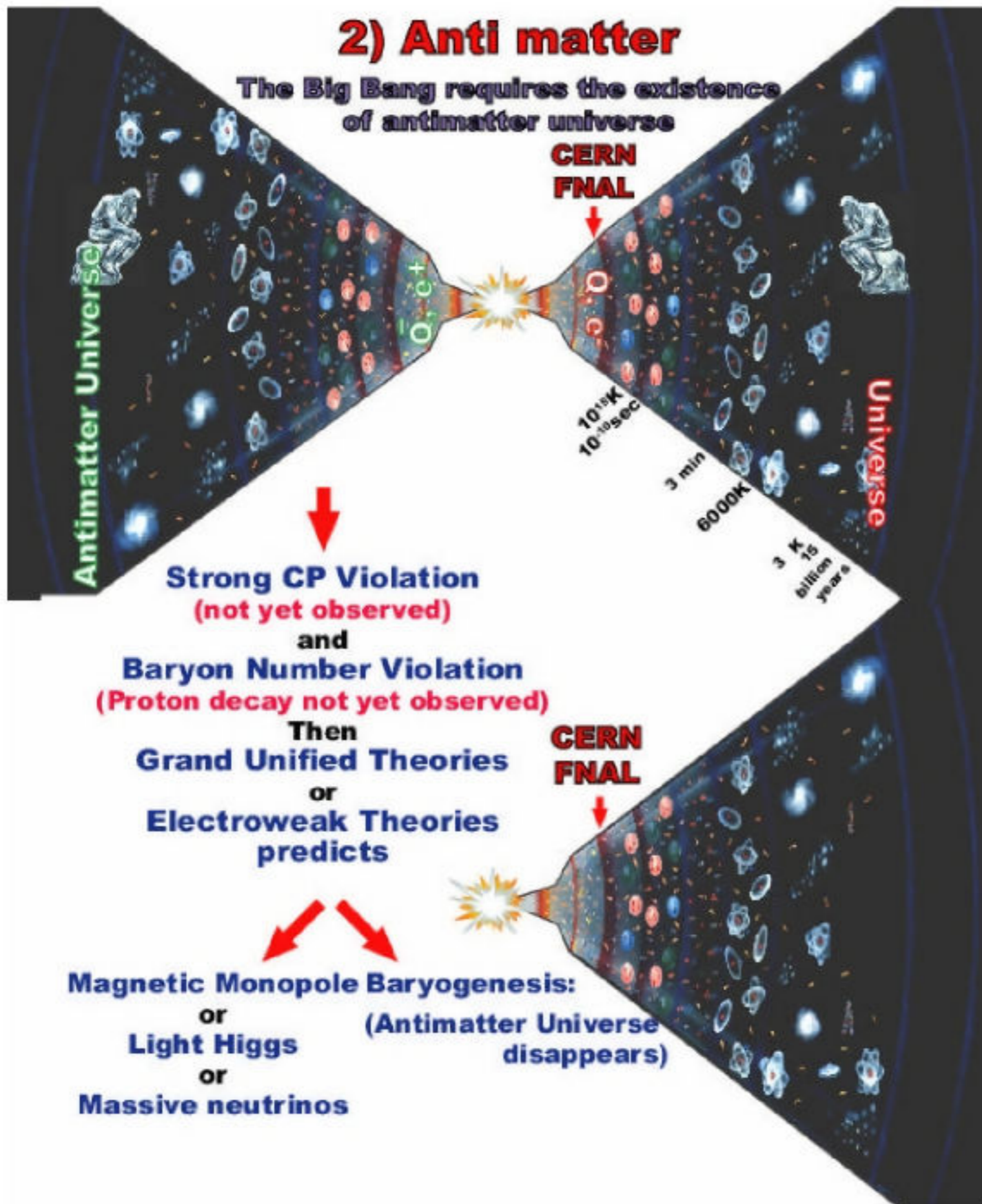
$\chi\bar{\chi} \rightarrow \tau^+\tau^-, b\bar{b}, t\bar{t} \rightarrow$ POSITRONS

$\chi\bar{\chi} \rightarrow \gamma\gamma, Z\gamma \rightarrow$ PHOTONS

Las partículas cargadas contribuyen a los flujos de rayos cósmicos.

Las partículas neutras mantienen la direccionalidad, lo que hace detectable si se emiten en regiones de alta densidad de neutralinos (astronomía de γ, ν)

Los flujos aumentan en caso de que los WIMPS se distribuyan en "grumos".



ANTIMATERIA

"Unlikely", pero no completamente excluido aun

La detección de un núcleo de antihelio (o de carga más negativa) implicaría la existencia de antiestrellas o antigalaxias.

Información experimental acerca de la bariogénesis

Strange Quark Matter, Strangelets

Normal Matter is made up of nucleons (neutrons, protons) each with 3 *up* and *down* quarks

Lumps of strange quark matter (Strangelets) are a single “super nucleon” with many *up*, *down* and *strange* quarks.

- **Low charge to mass ratio**
- **Mass from ~ 100 to $\sim 10^{57}$ times proton mass**
- **Many interesting, unusual properties**

Carbon Nucleus



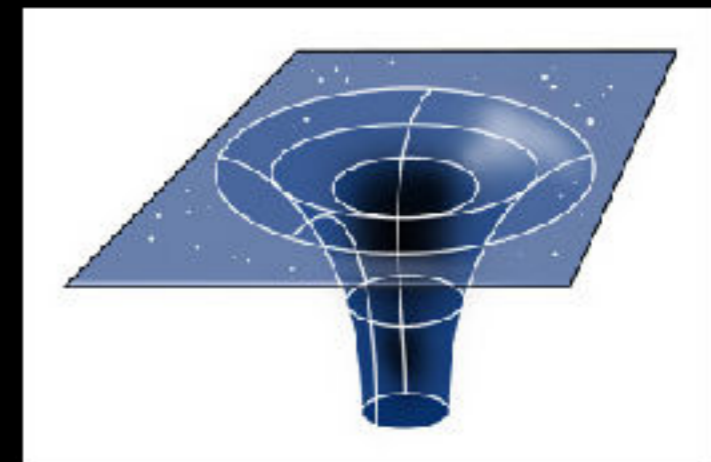
Strangelet



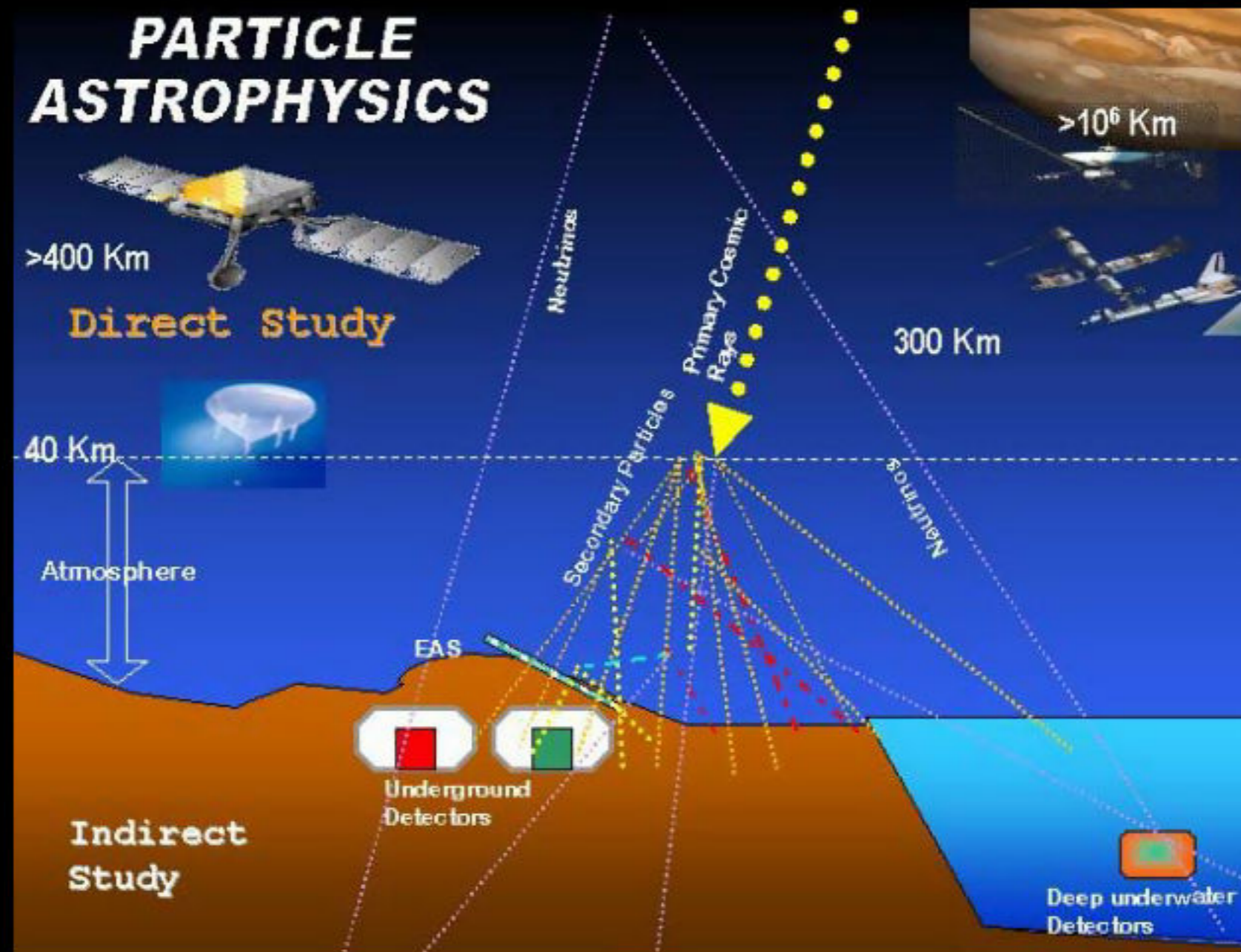
Agujeros negros primordiales

Detectables a través de los flujos de antiprotones y antideuterio.

Fundamentalmente en los flujos a muy baja energía.

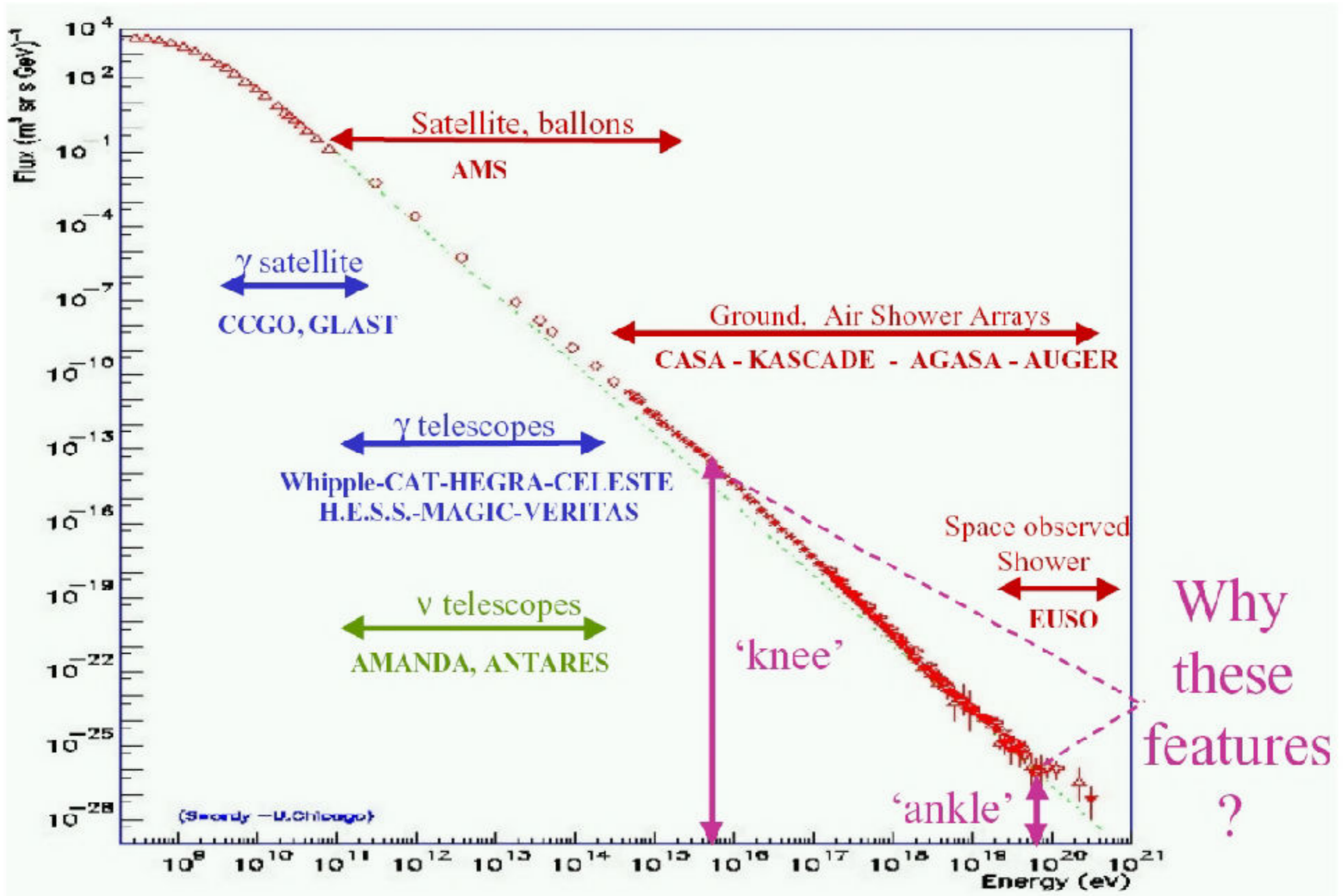


DETECCIÓN DE RAYOS CÓSMICOS

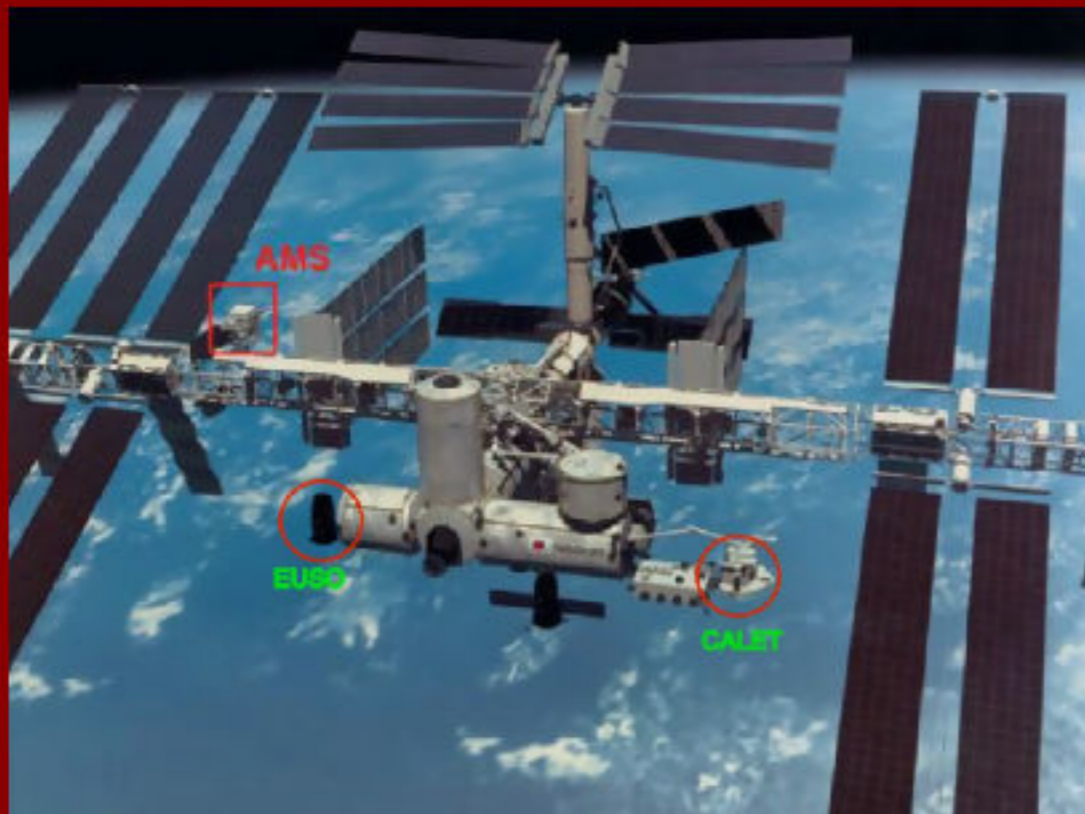


Los detectores en tierra, en globos y en el espacio son complementarios entre si.

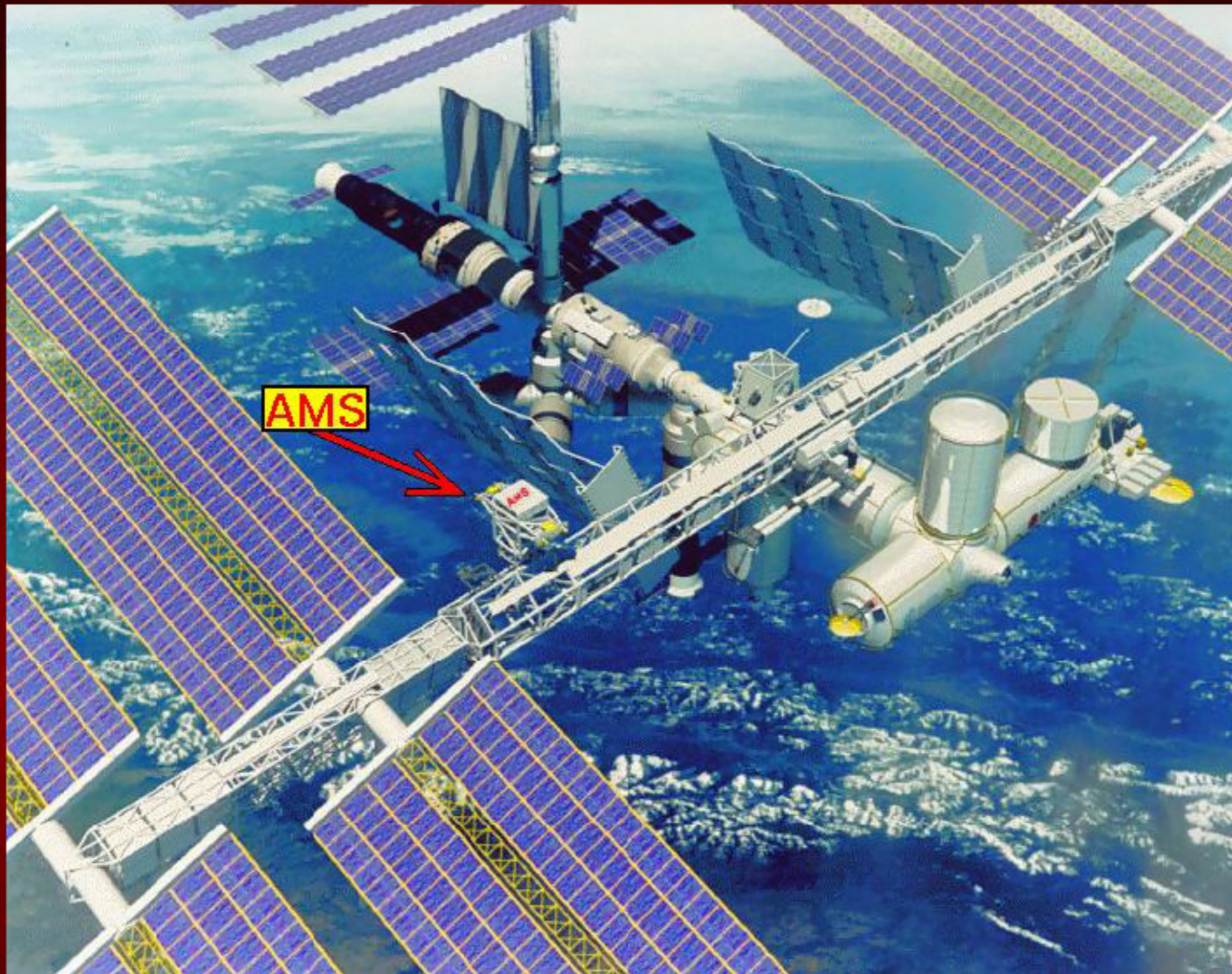
DETECCIÓN DE RAYOS CÓSMICOS



EL EXPERIMENTO AMS



ΕΛ ΕΧΡΕΡΙΜΕΝΤΟ ΑΜΣ



AMS estará colocado en la estación espacial internacional (ISS)

SPACE

C O M

SIZE : approx. 110m x 75 m
Weight : approx. 415 tons
Power : total electricity 89.0 kW
Pressurized Modules : total volume 1140 m³
2 Habitation Modules
2 Logistic Modules

Crew
Orbit

: 7 persons (3 during assembly)
: Circular orbit,
altitude 330 km - 480 km,
inclination 51.6°

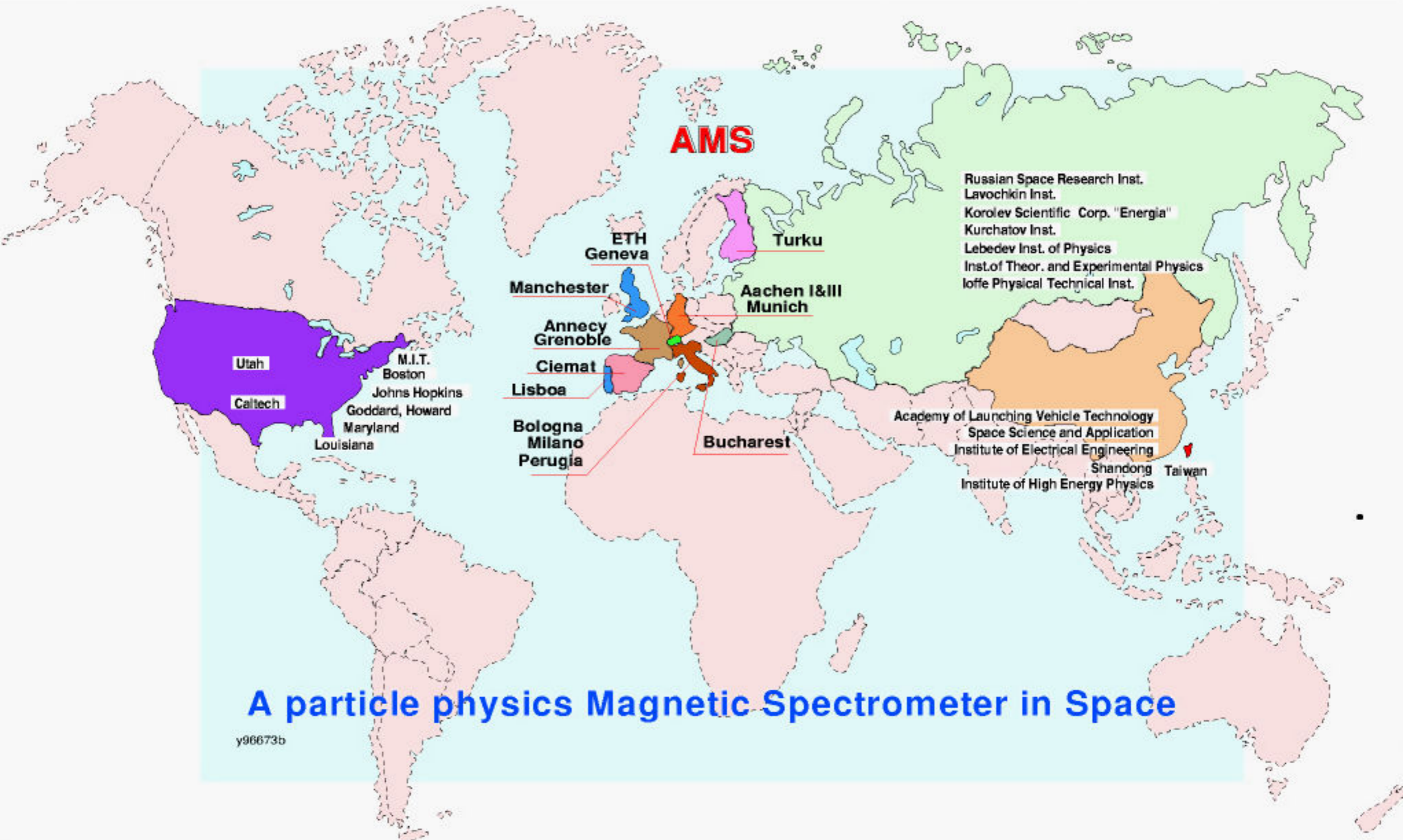
Transportation Systems

: Space Shuttle(NASA), Arian-V(EESA),
Soyuz/Proton(RSA), H-IIA/NASDA)

Communication Systems

: Tracking and Data Relay System (NASA);
Russian and Japanese data relay
satellite systems

EL EXPERIMENTO AMS



EL EXPERIMENTO AMS

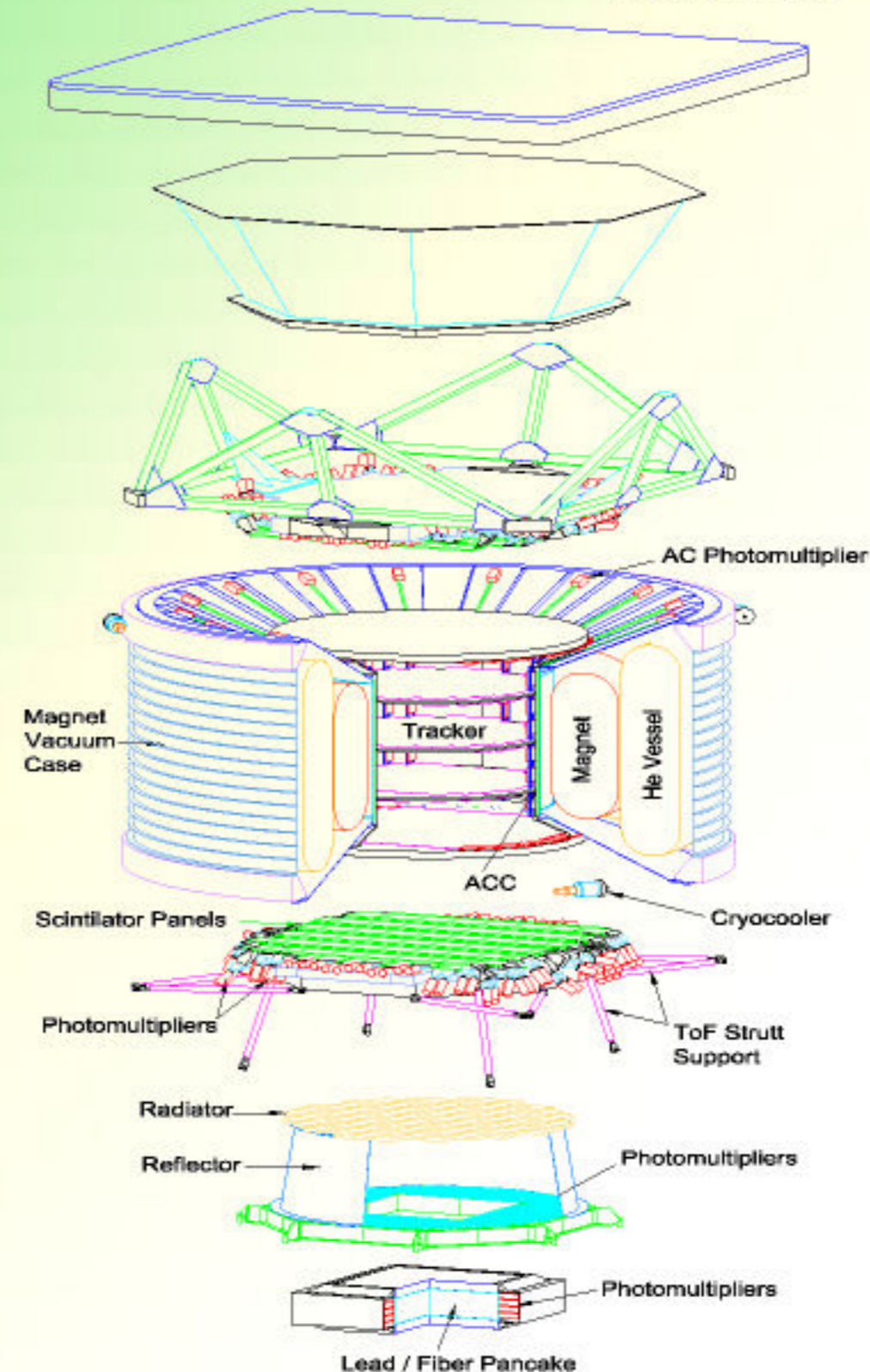
AMS es un detector de física de partículas

Aceptancia geométrica $0.45 \text{ m}^2 \text{ sr}$

Dimensiones aproximadas $3 \times 1.8 \times 1.8 \text{ m}^3$

Peso total 6T

AMS 02 (Exploded View)



TRD:
Transition Radiation
Detector

Truss Structure
TRD, ToF Support

ToF: (s1,s2)
Time of Flight Detector

TR:
Silicon Tracker

ACC:
Anticoincidence Counter
(veto Counter)

MG: Magnet
CC: Cryocooler

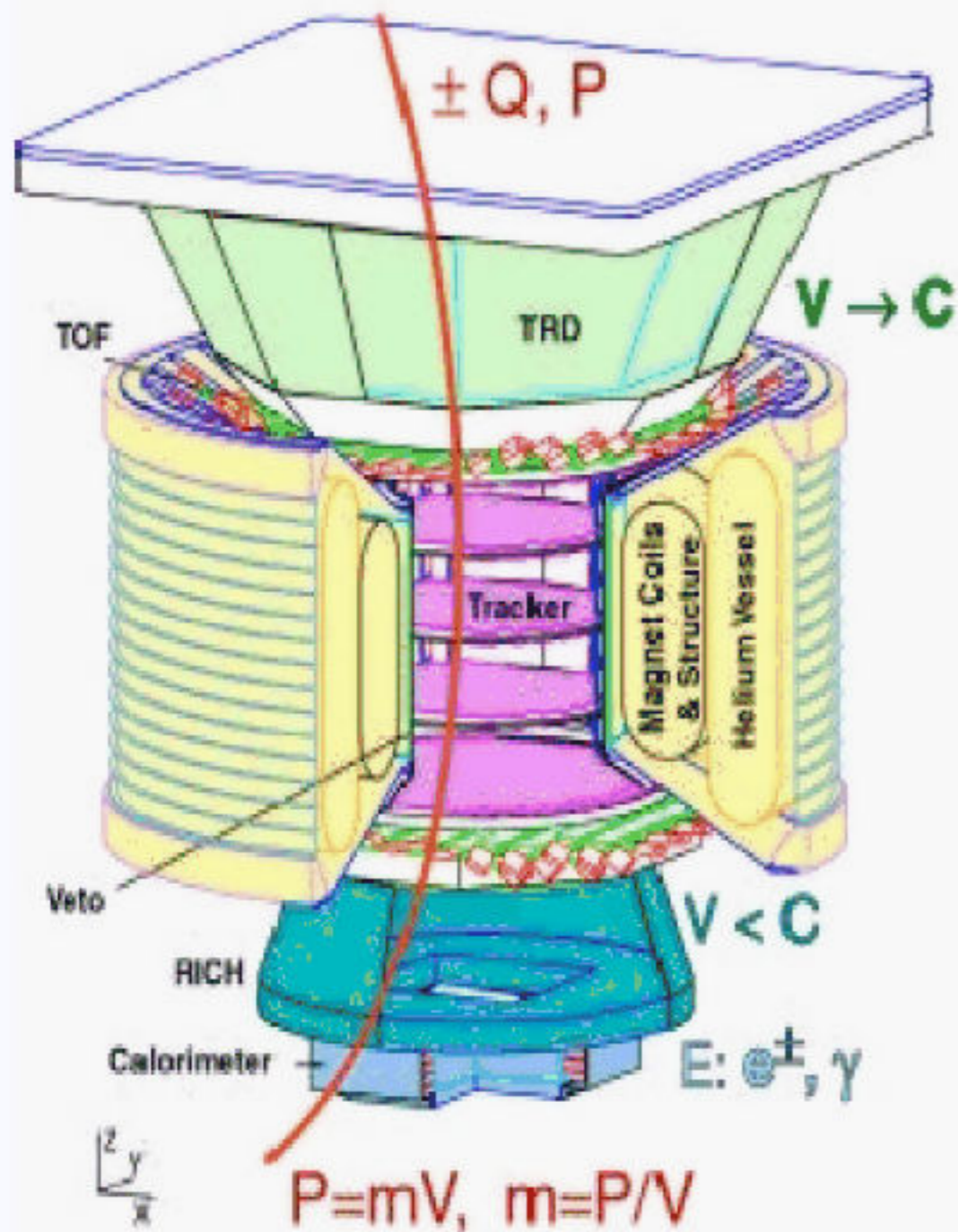
ToF: (s3,s4)
Time of Flight Detector

RICH:
Ring Image Cherenkov
Counter

EMC:
Electromagnetic
Calorimeter

EL EXPERIMENTO AMS

AMS-02



300 GeV	e^-	e^+	P	\bar{He}	γ	γ
TRD						
TOF						
Tracker						
RICH						
Calorimeter						

EL EXPERIMENTO AMS

El espacio es un entorno nuevo (y muy hostil) para los experimentos de física de partículas:

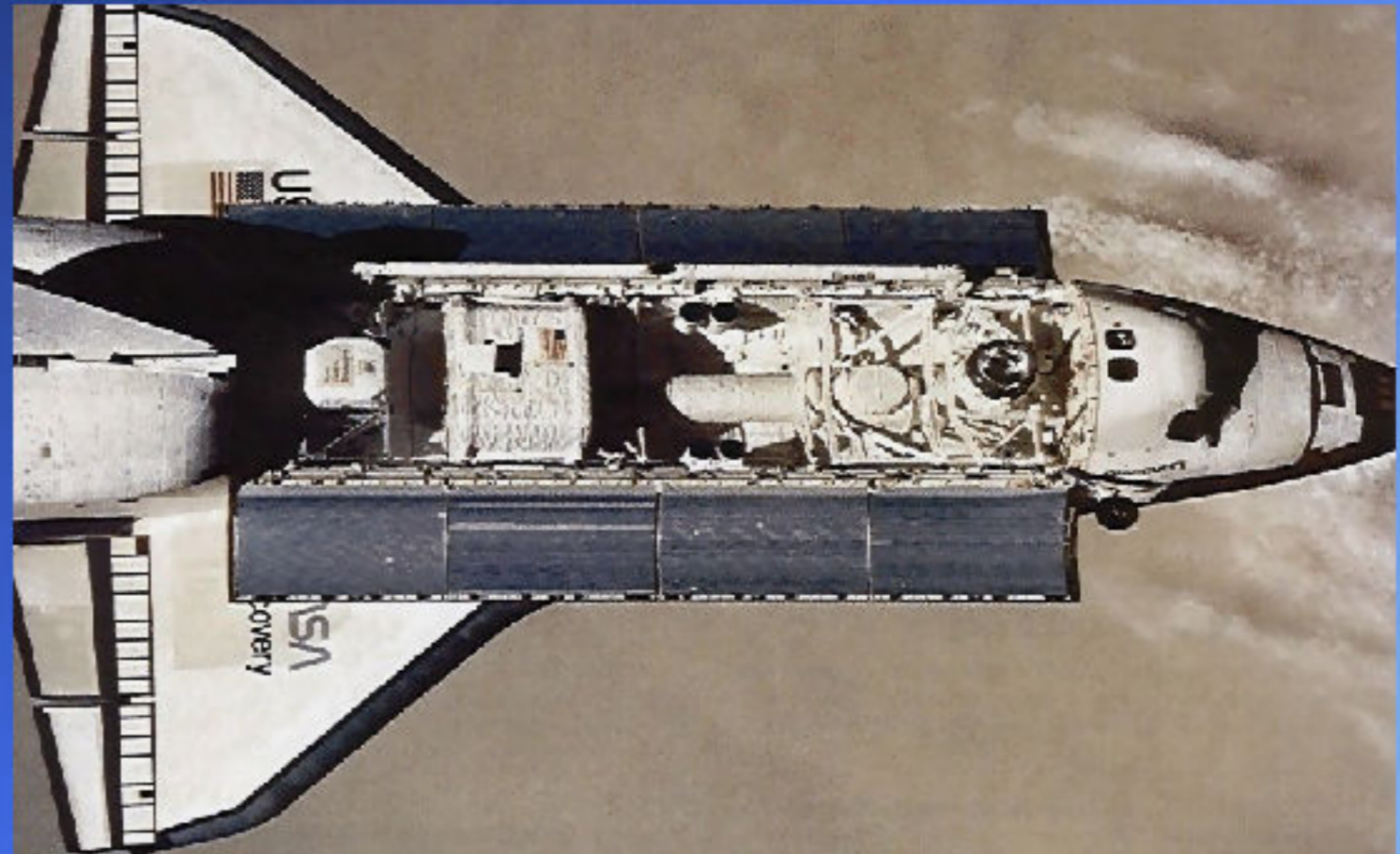
- ◆ *Peso limitado (6 Tm)*
- ◆ *Consumo limitado de energía (2 kW)*
- ◆ *Variaciones de temperatura entre -60°C y $+60^{\circ}\text{C}$*
- ◆ *Aceleración de hasta 9g durante el despegue y la parada en la ISS*
- ◆ *Ancho de banda limitado para la transmisión de datos.*
- ◆ *Funcionamiento en vacío*

EL EXPERIMENTO AMS

El funcionamiento en estas condiciones se ha demostrado posible: AMS01

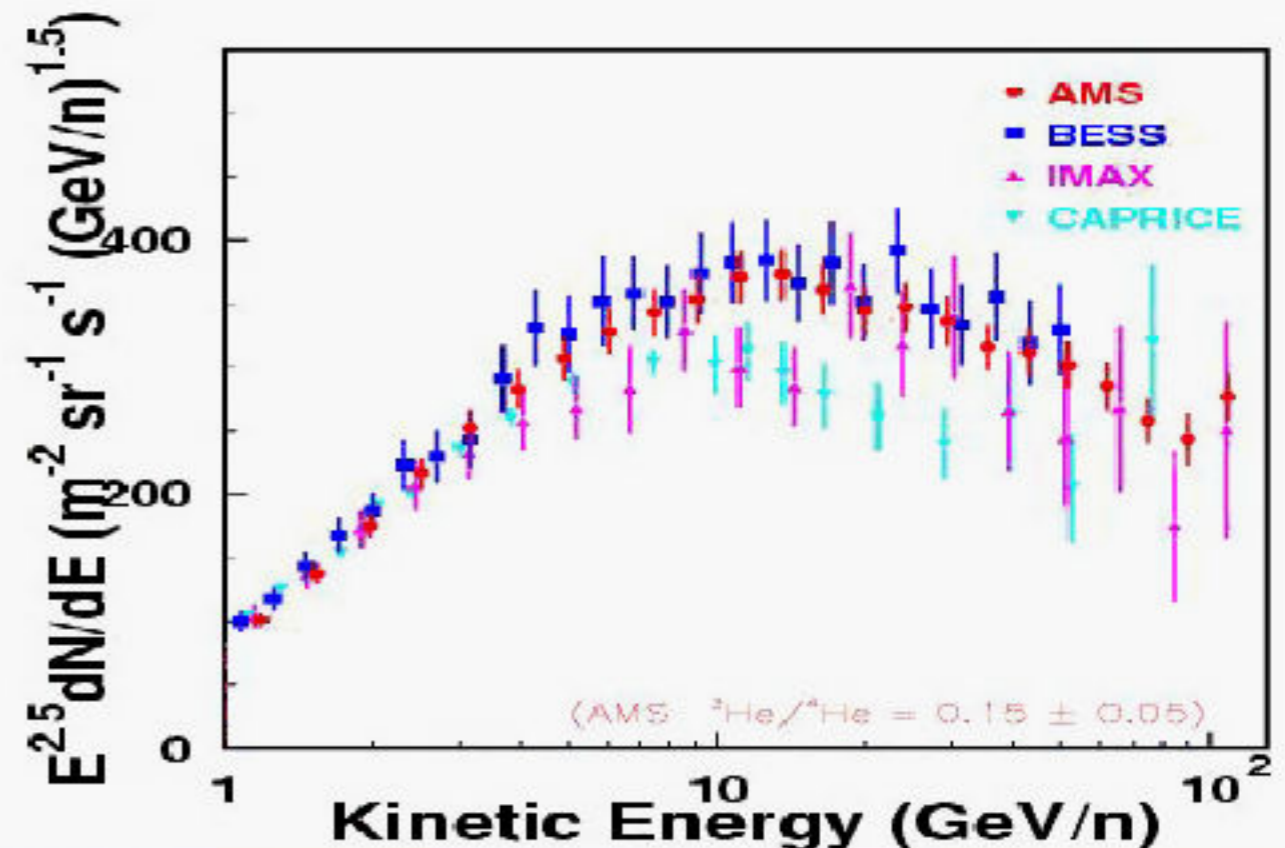
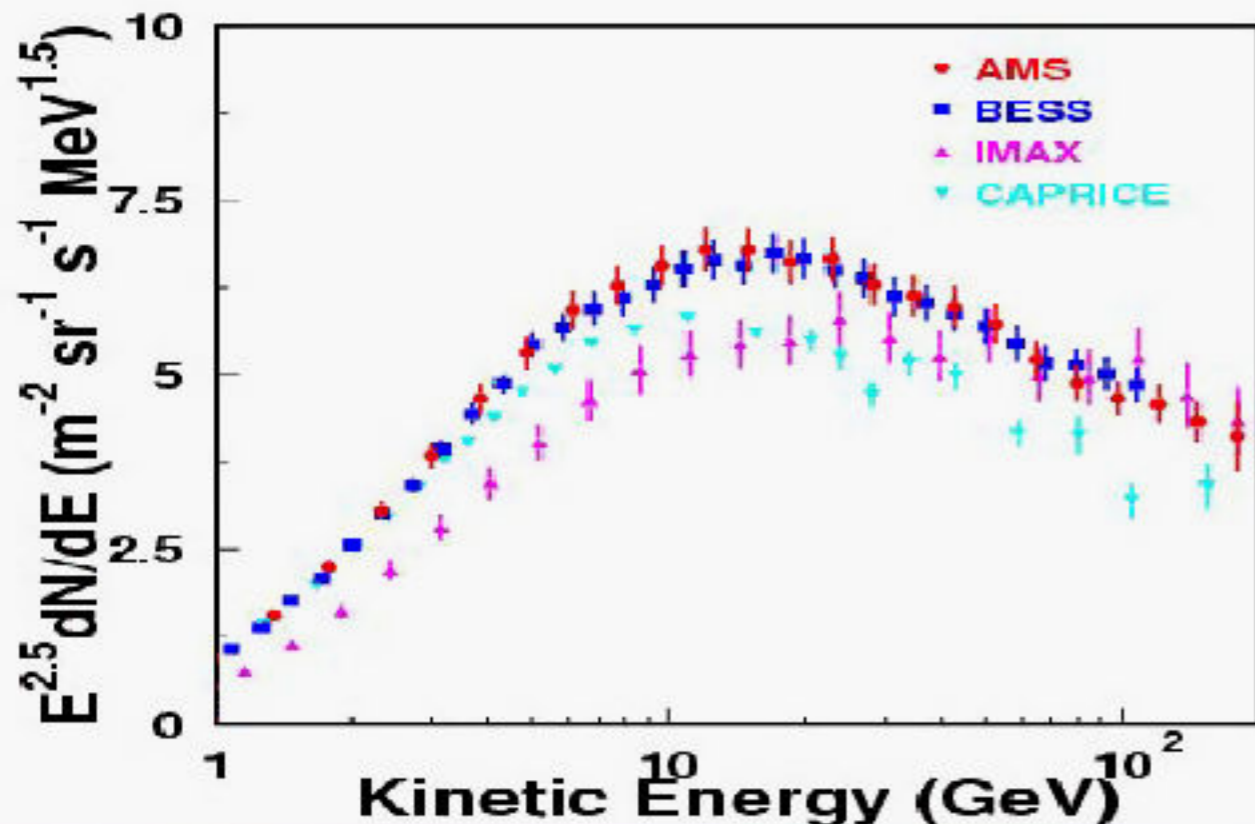
Vuelo de prueba en el transbordador espacial Discovery en 1998.

Toma de datos durante 90 horas.



Flujo de protones

Flujo de Helio



EL EXPERIMENTO AMS

OBJETIVOS GENERALES DE AMS

- 1) Estudio exhaustivo de la composición de los rayos cósmicos y de las abundancias relativas de isótopos de núcleos ligeros**
 - **Composición de las fuentes**
 - **Mecanismos de aceleración**
 - **Interacción con el medio interestelar (propagación)**

- 2) Medidas precisas de los espectros de antiprotones, antideuterios, positrones y fotones**
 - **Materia oscura: candidatos de SUSY**

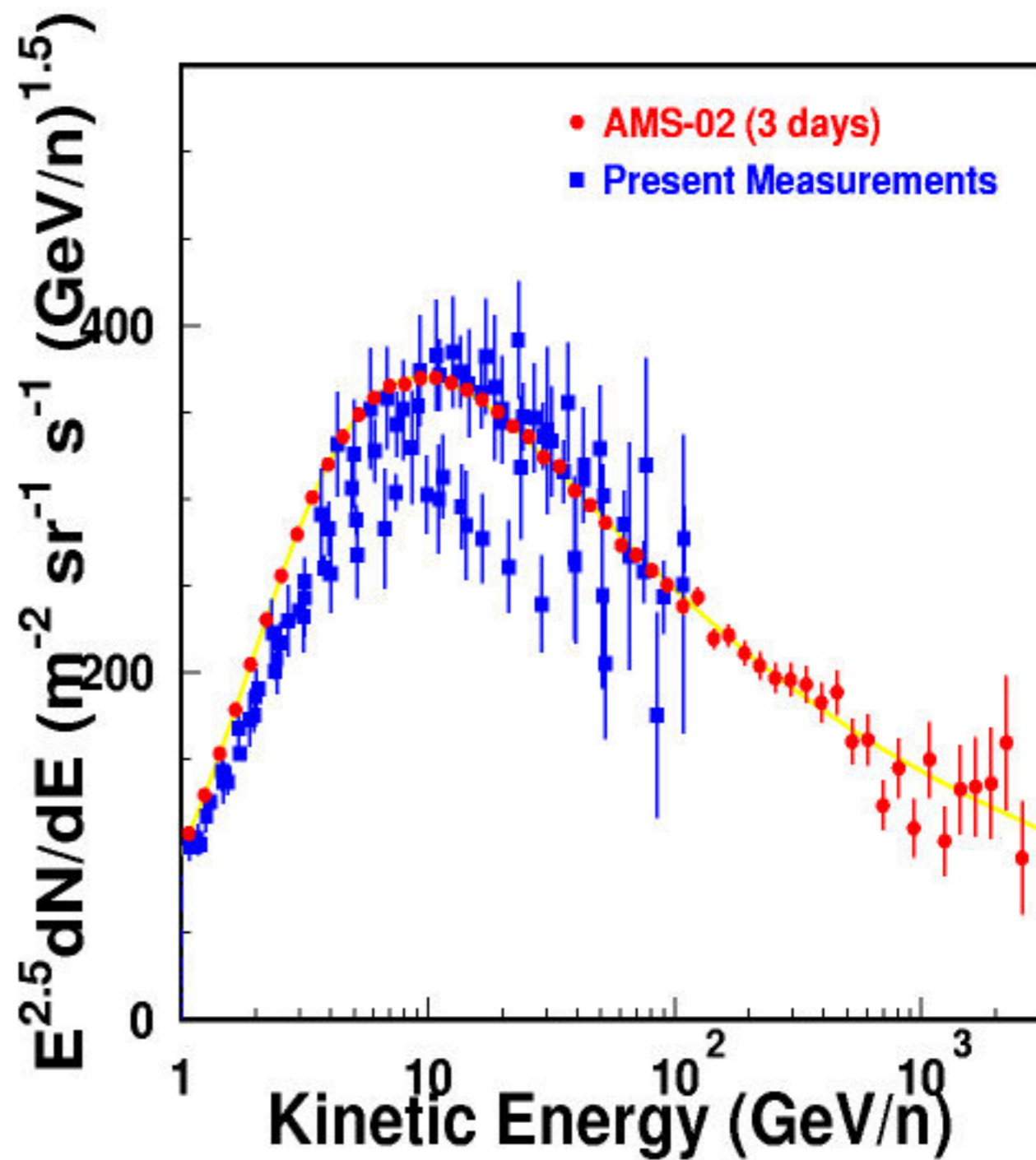
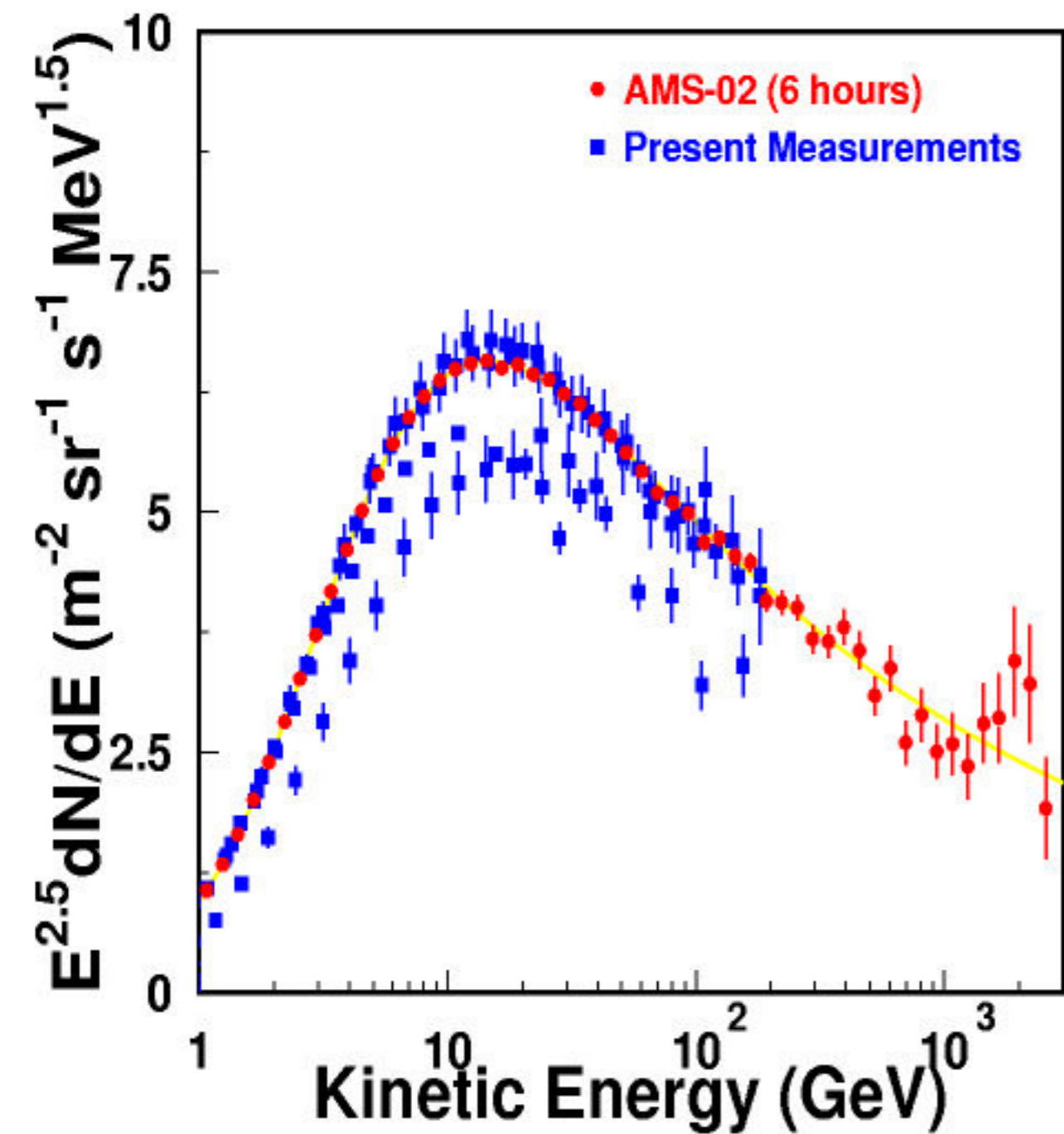
- 3) Detección de antihelio, anticarbono... con sensibilidad 3 o 4 órdenes de magnitud mejor que la actual**
 - **Antimateria: No conservación del número bariónico**
 - **Violación de CP**

- 4) Exótica**
 - **"Strangelets" y otras "Oddities"**

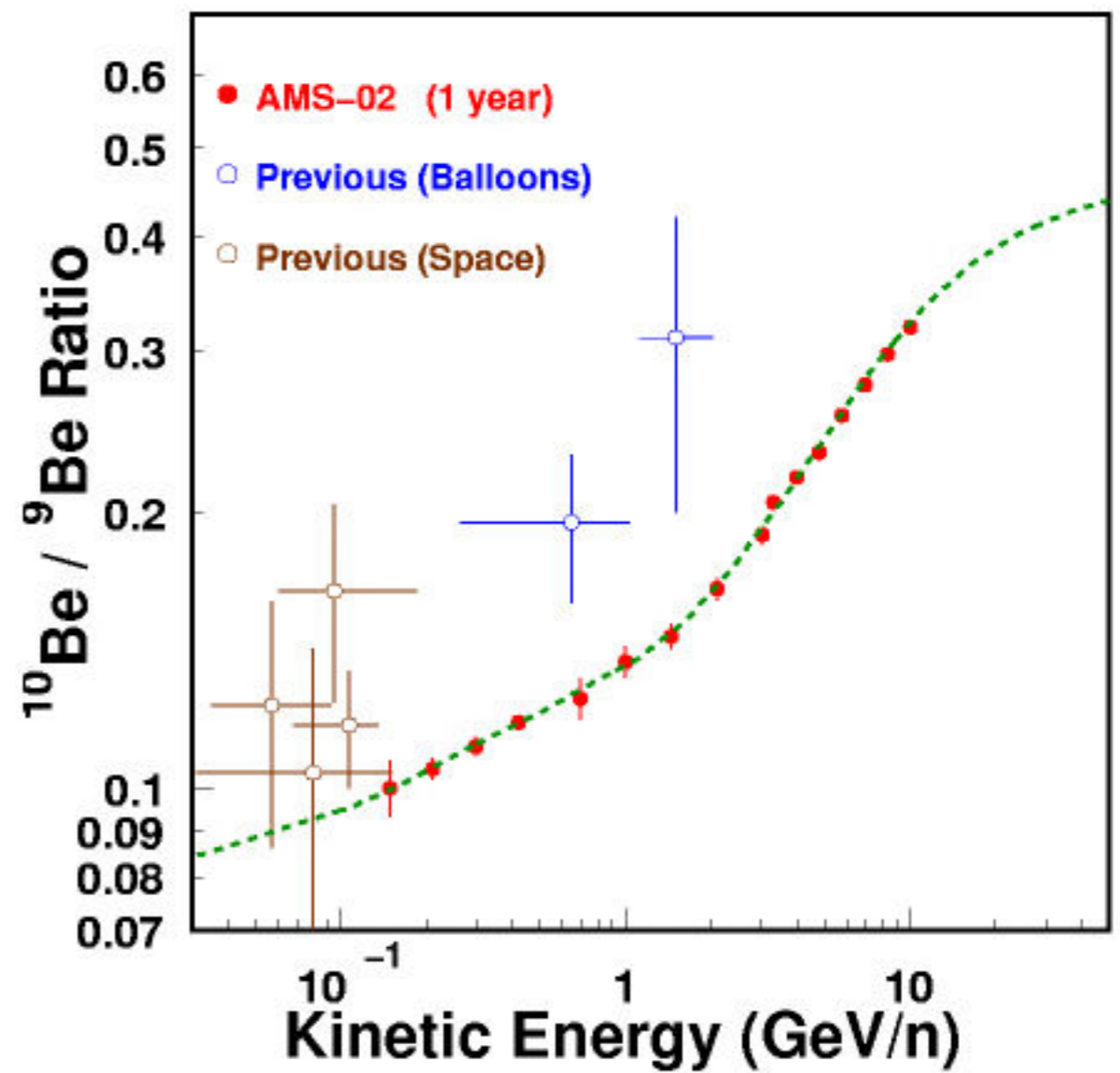
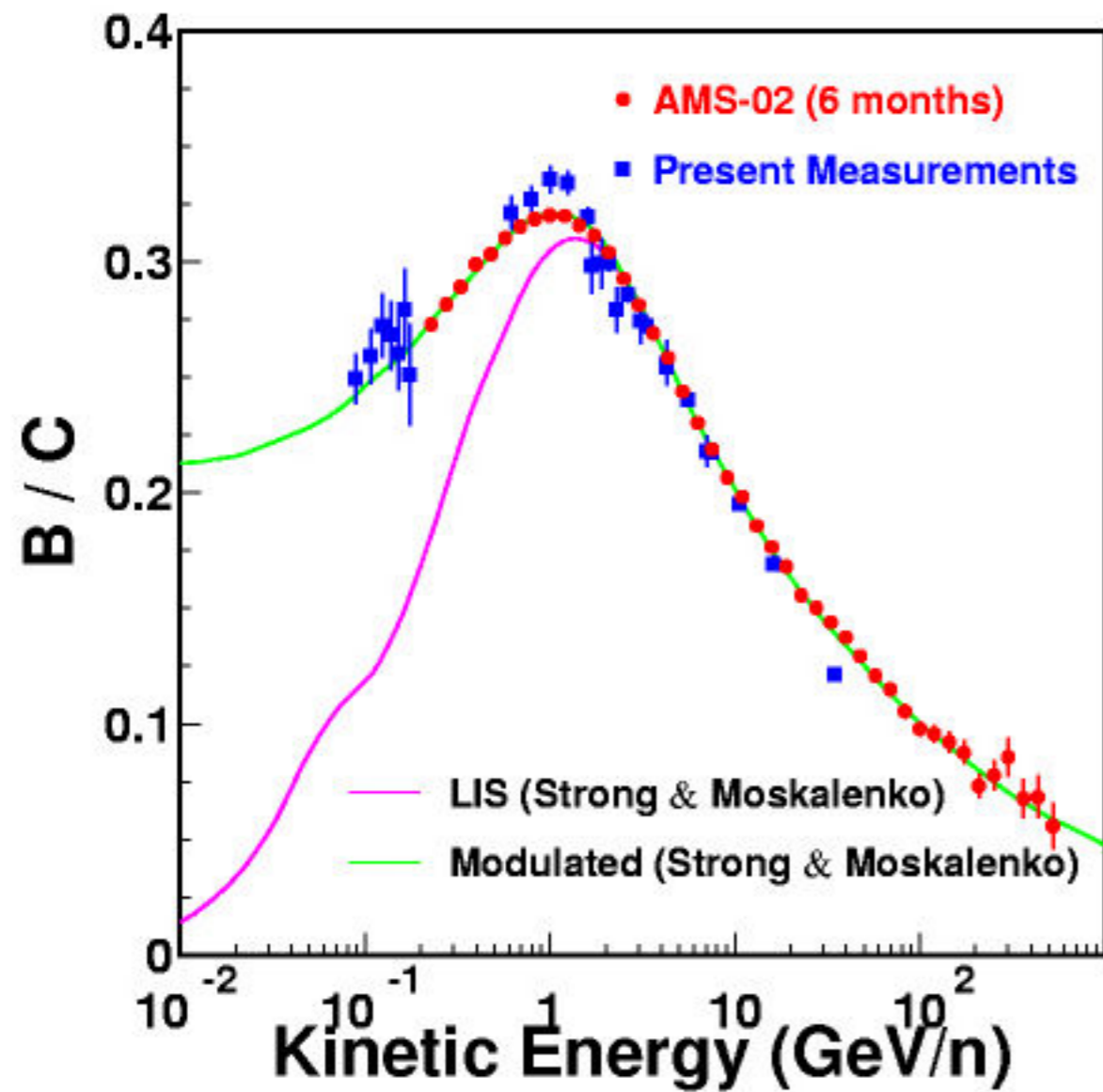
Resultados en flujo de protones y helio

P

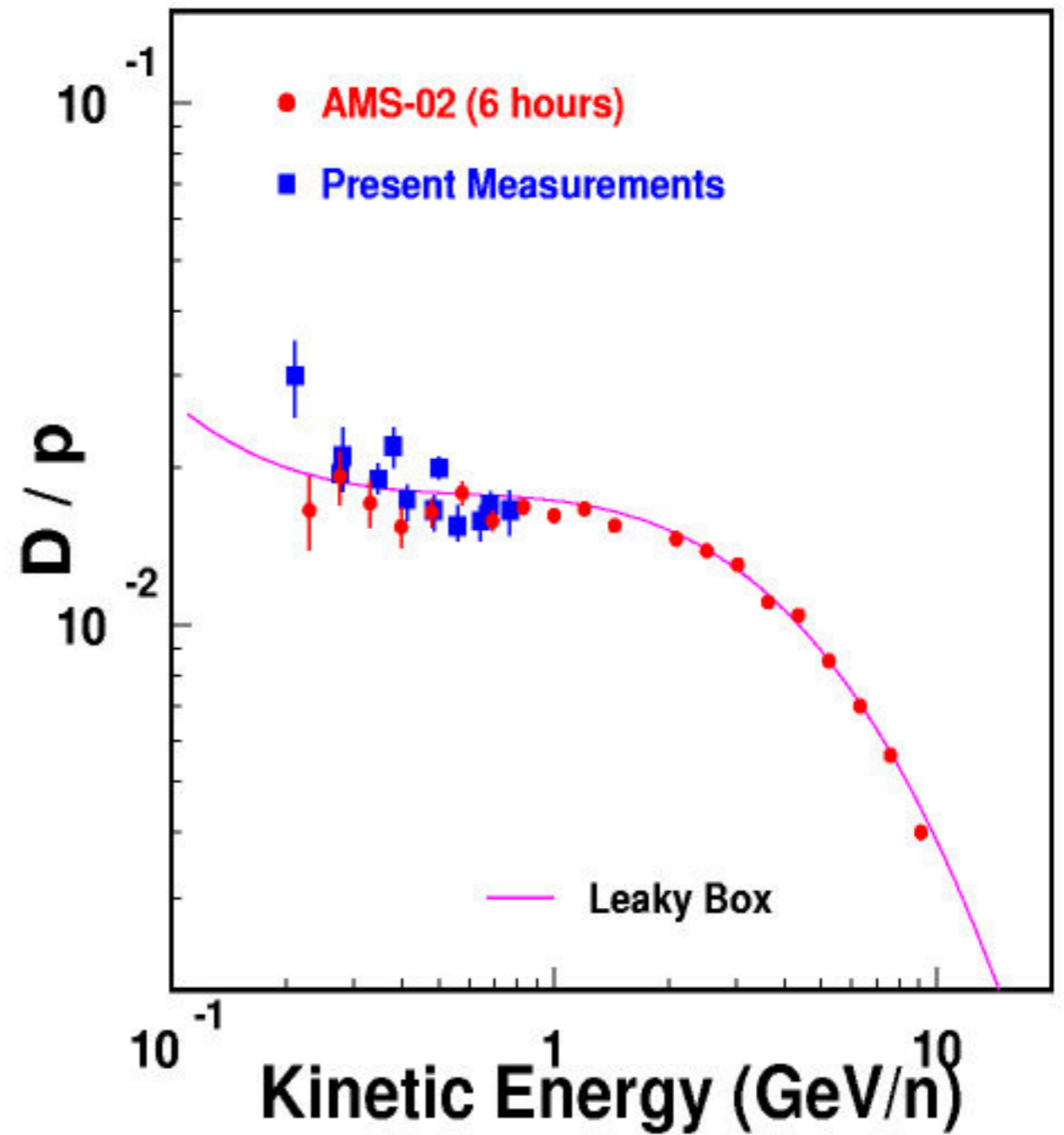
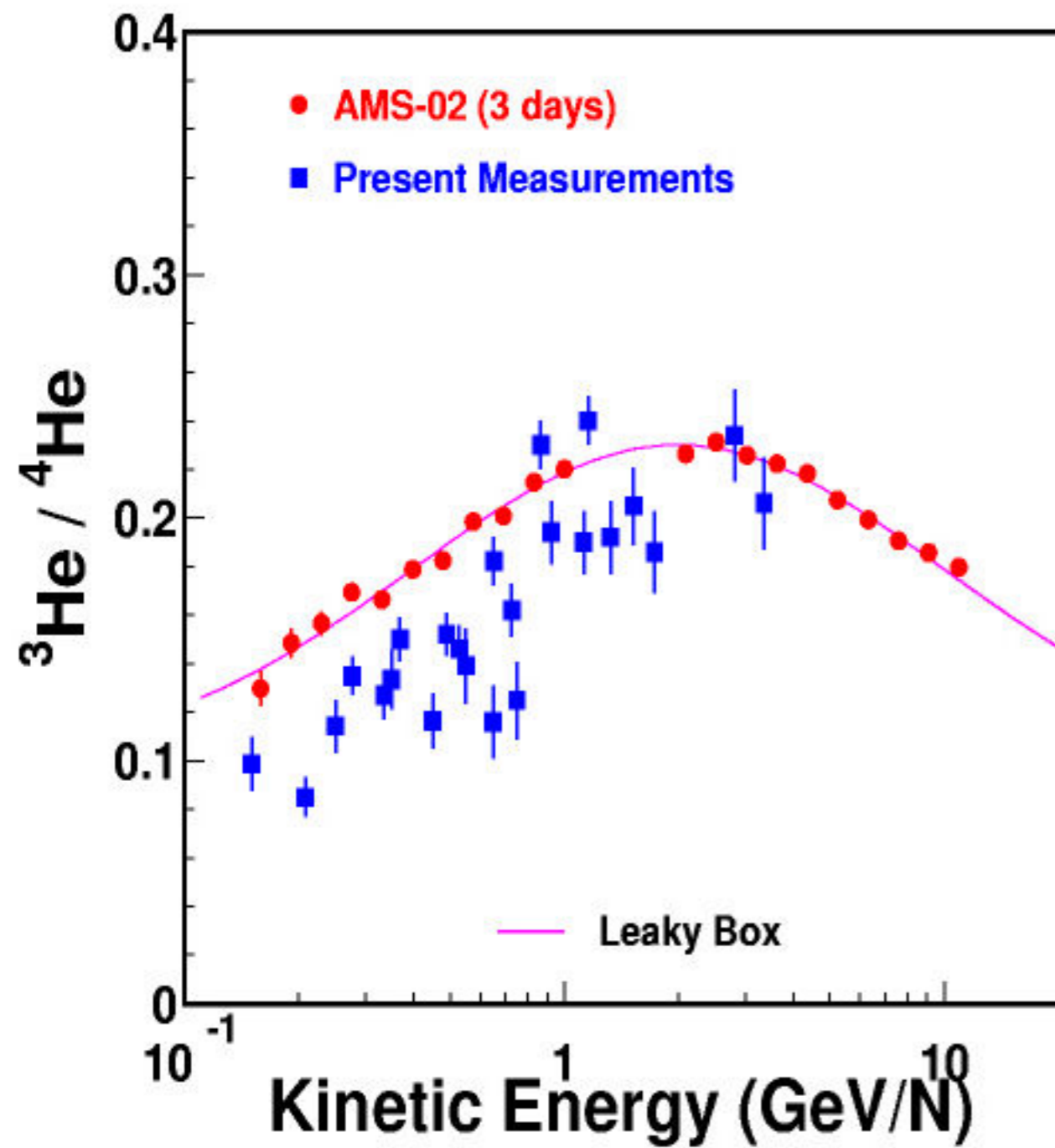
He

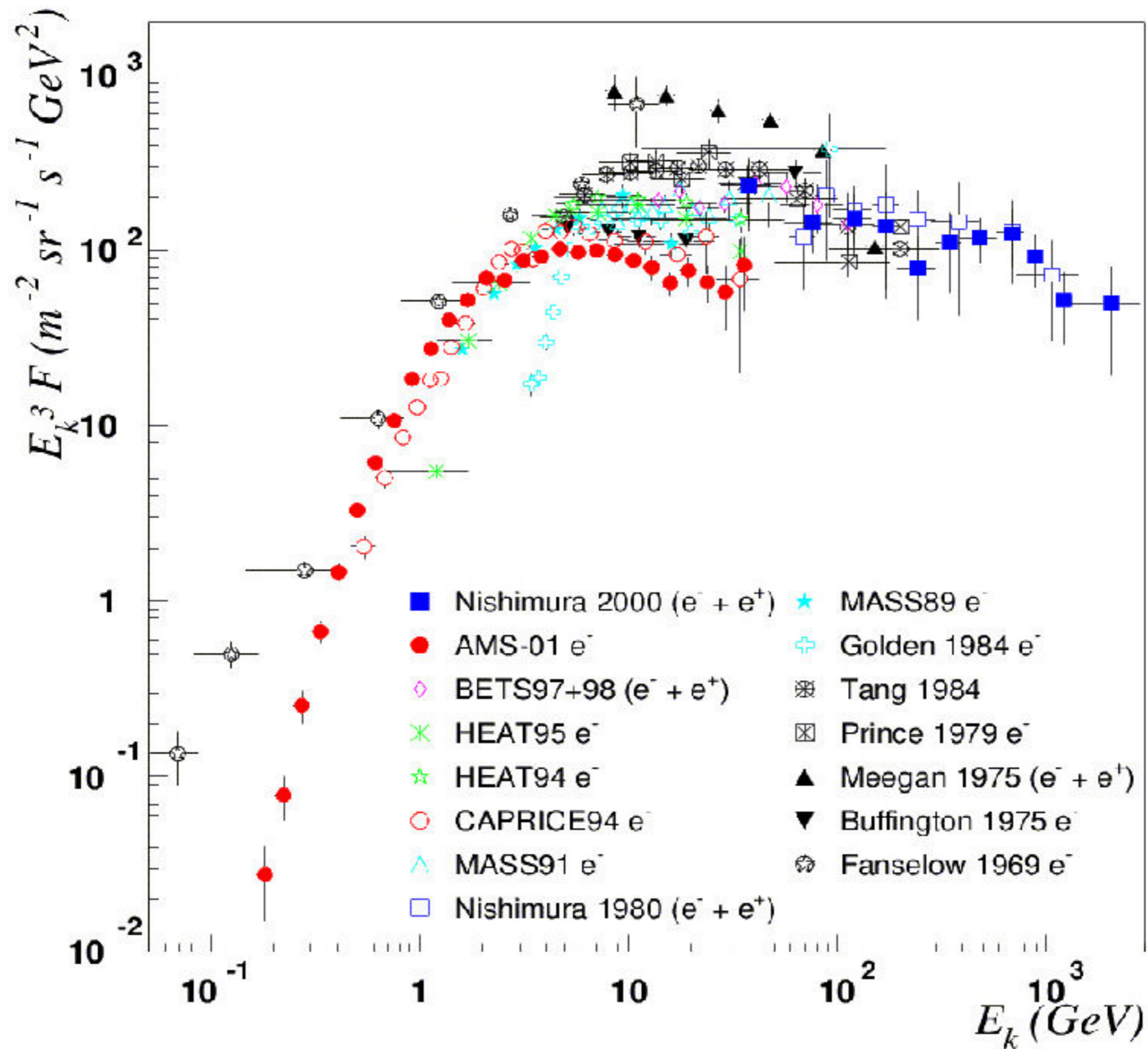


Relojes cósmicos

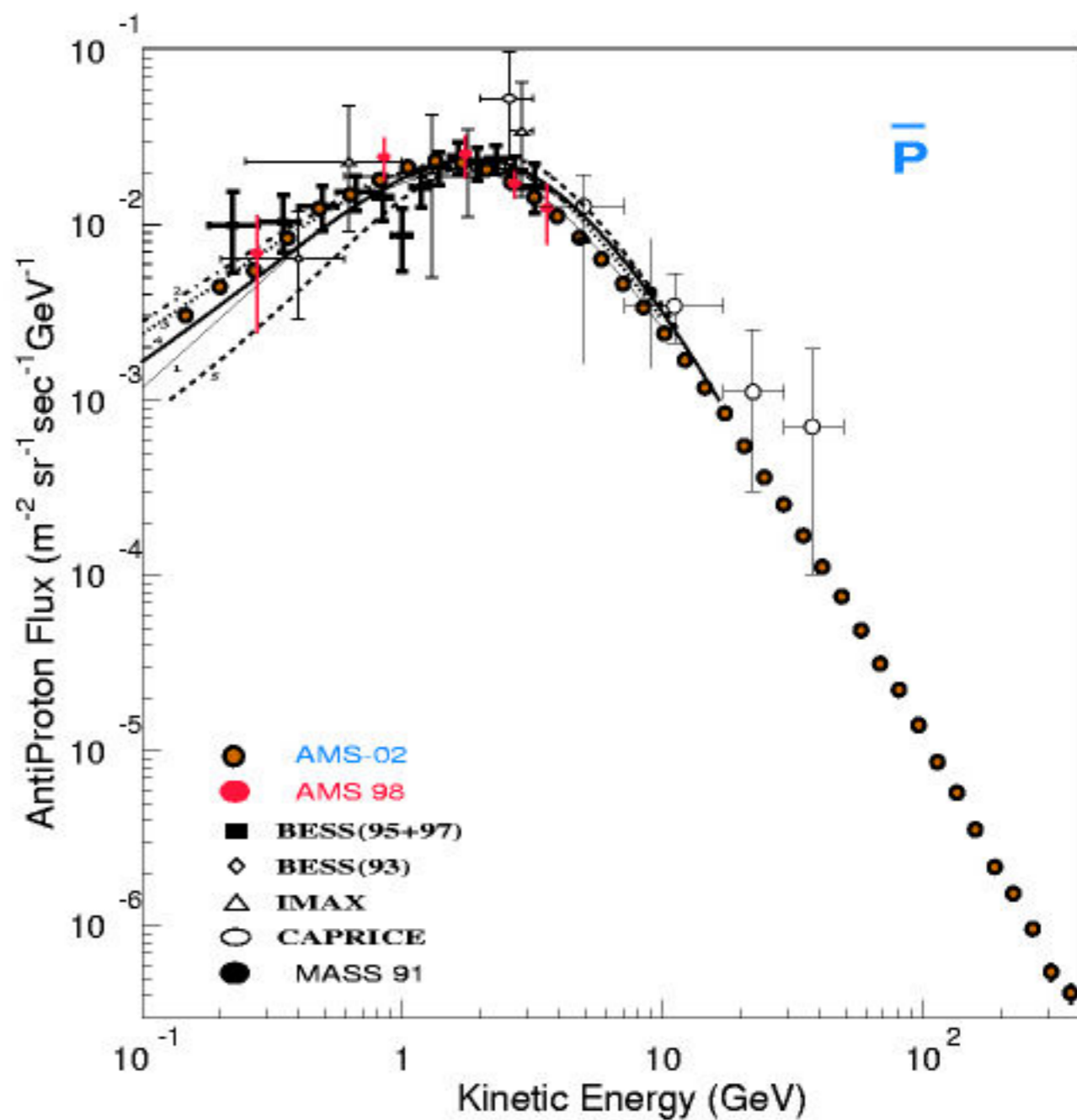
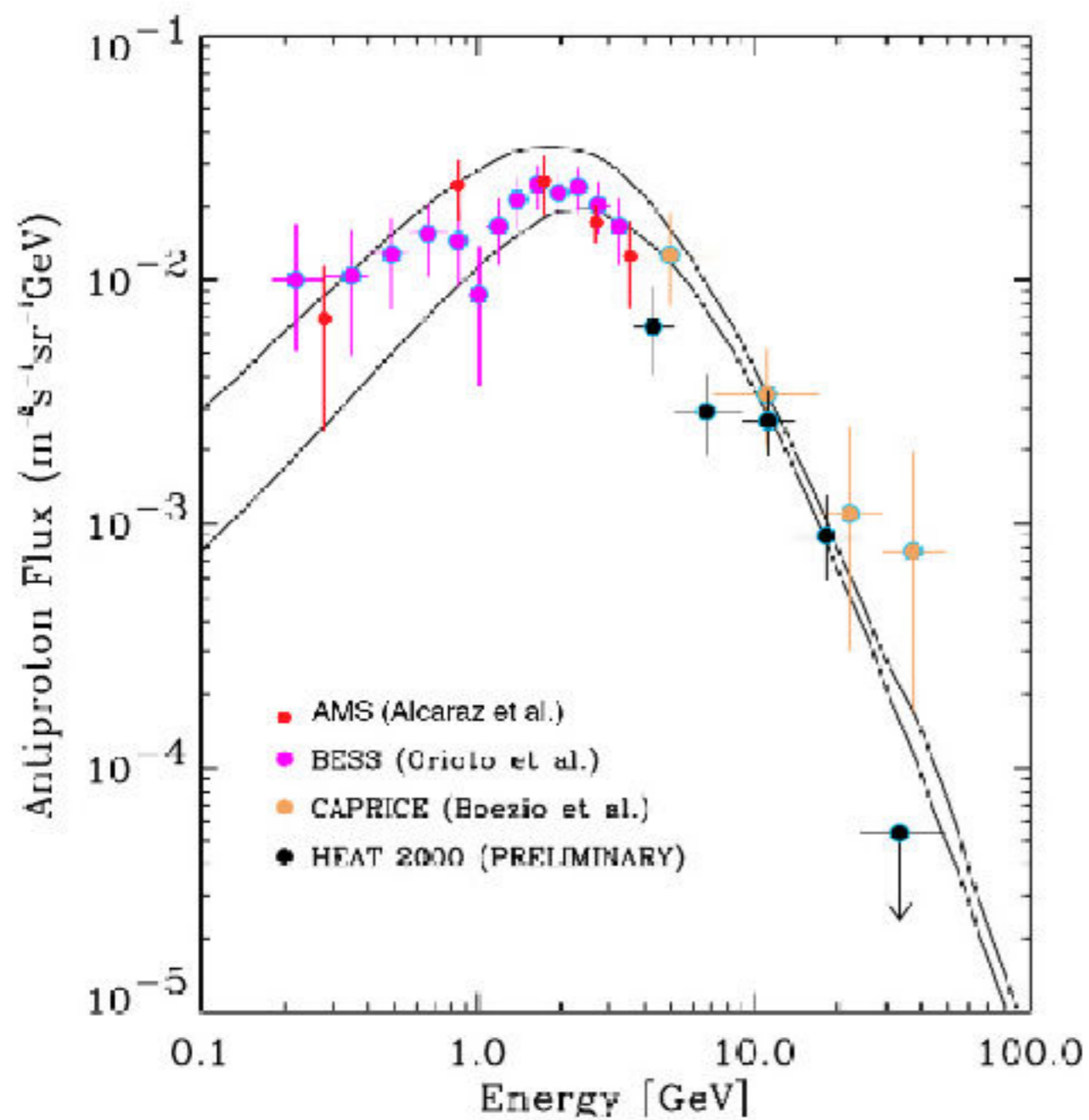


Relojes cósmicos

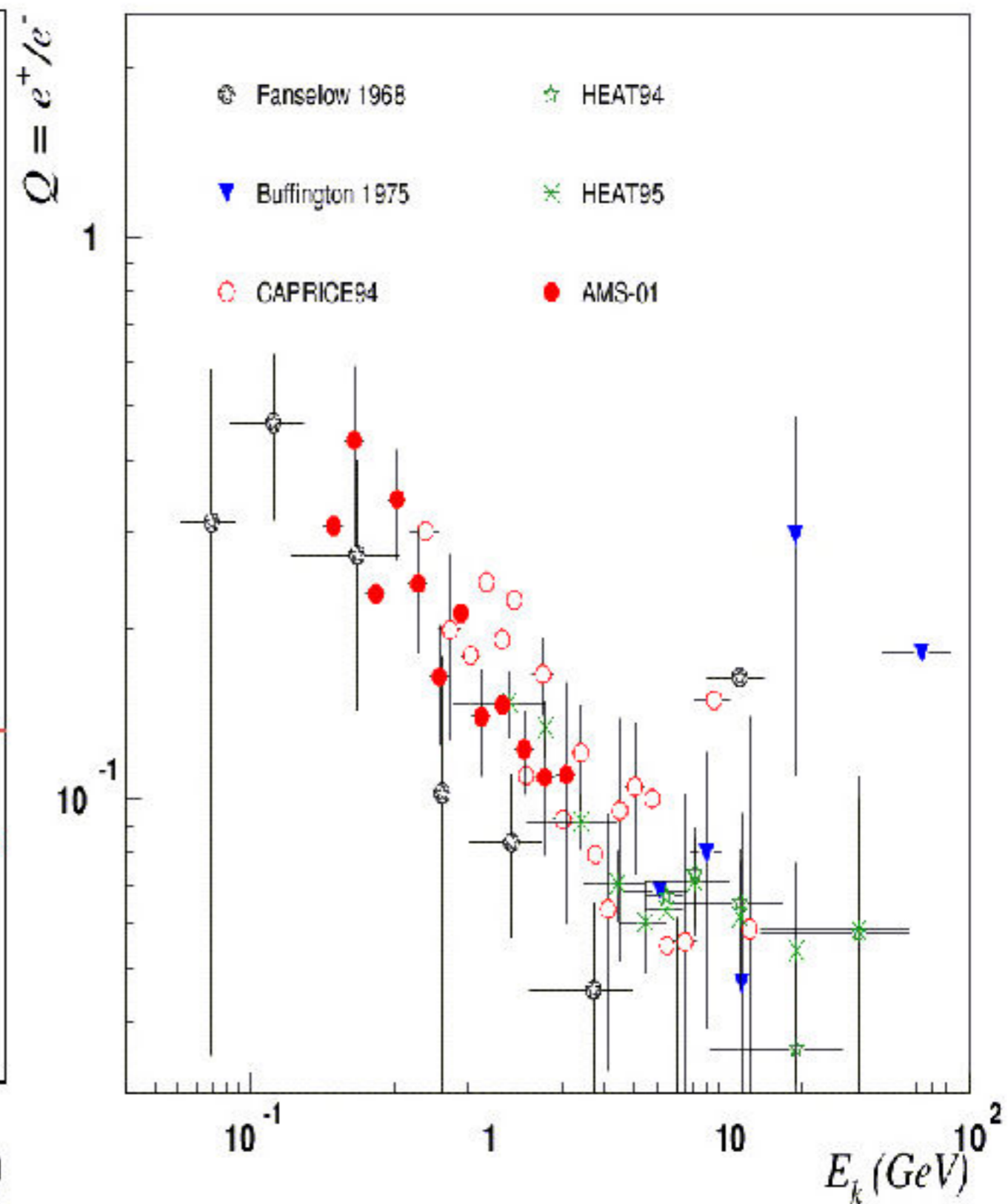
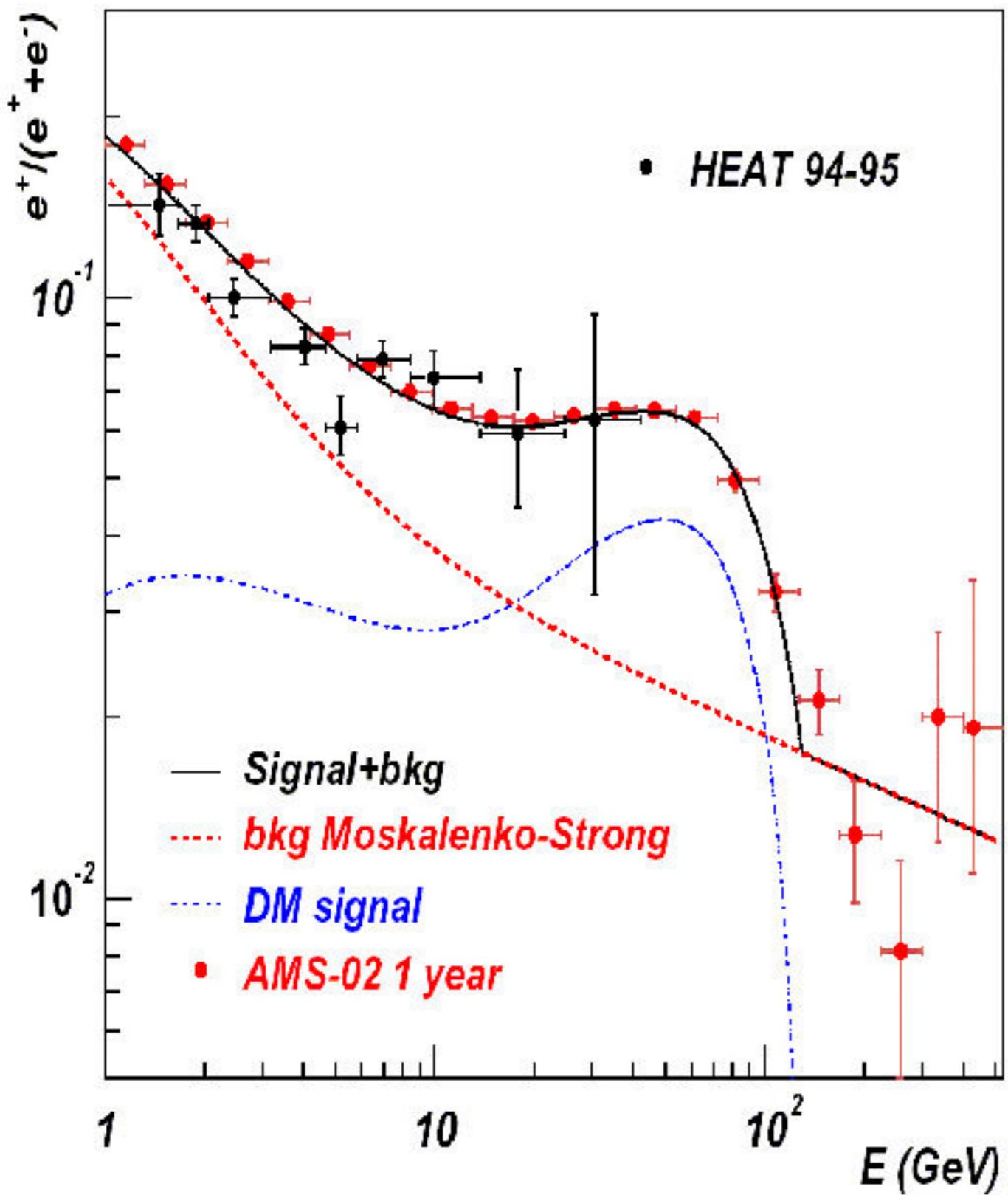




Antiprotones

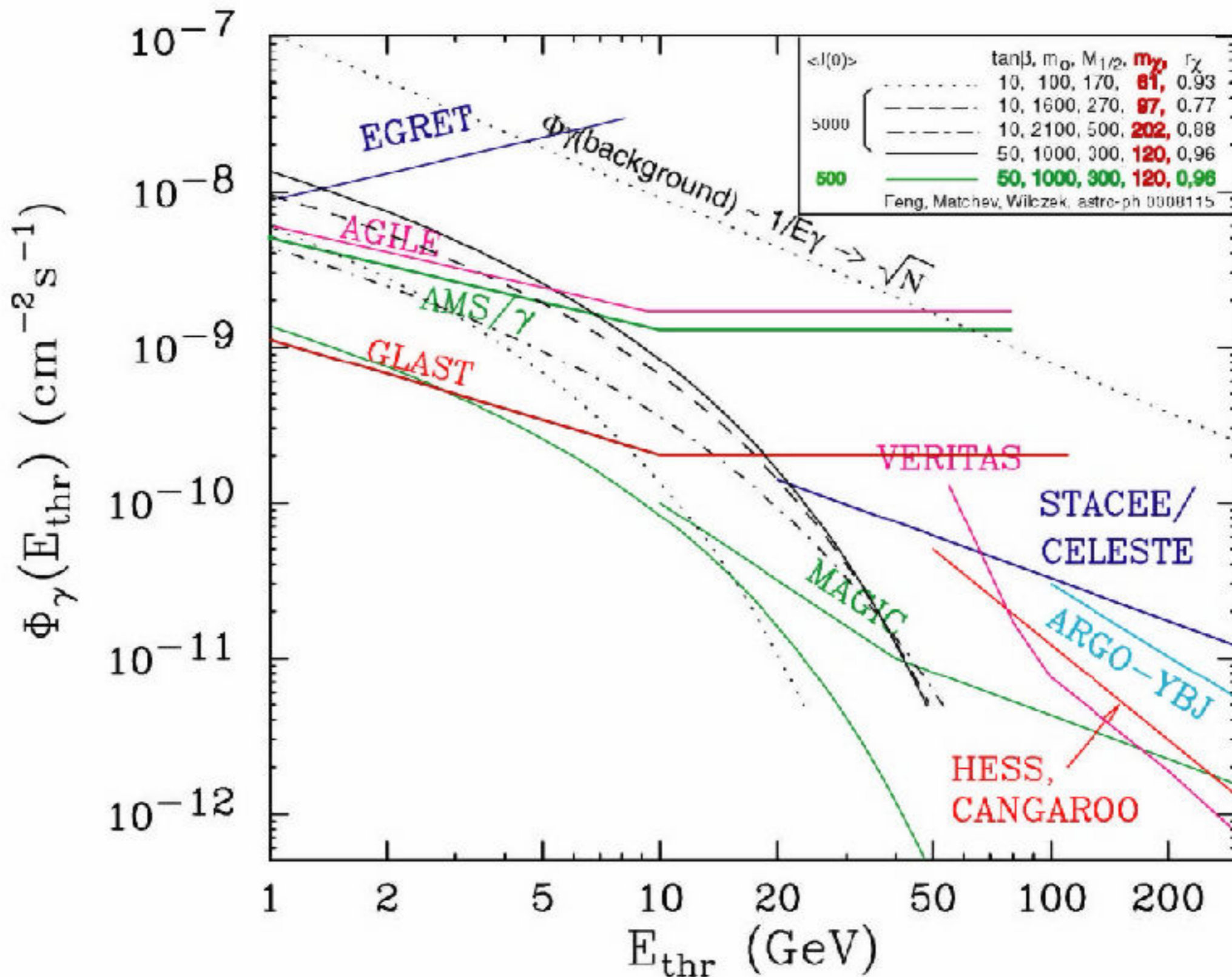


Positrons

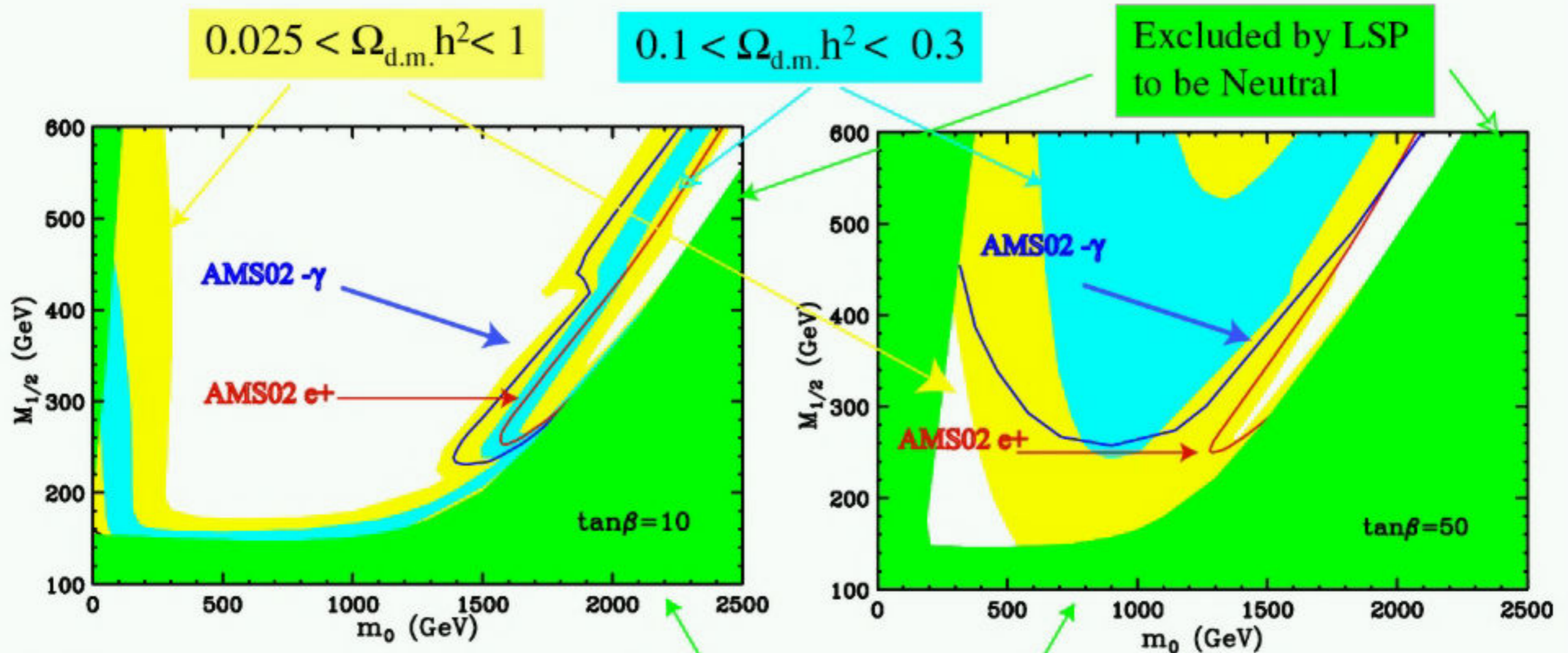


Rayos gamma

SUSY D.M. γ fluxes above E_{thr} vs Point Source Sensitivity



SUSY en AMS



MSSM

$$A_0 = 0$$

$$\mu > 0$$

$$m_t = 174 \text{ GeV}$$

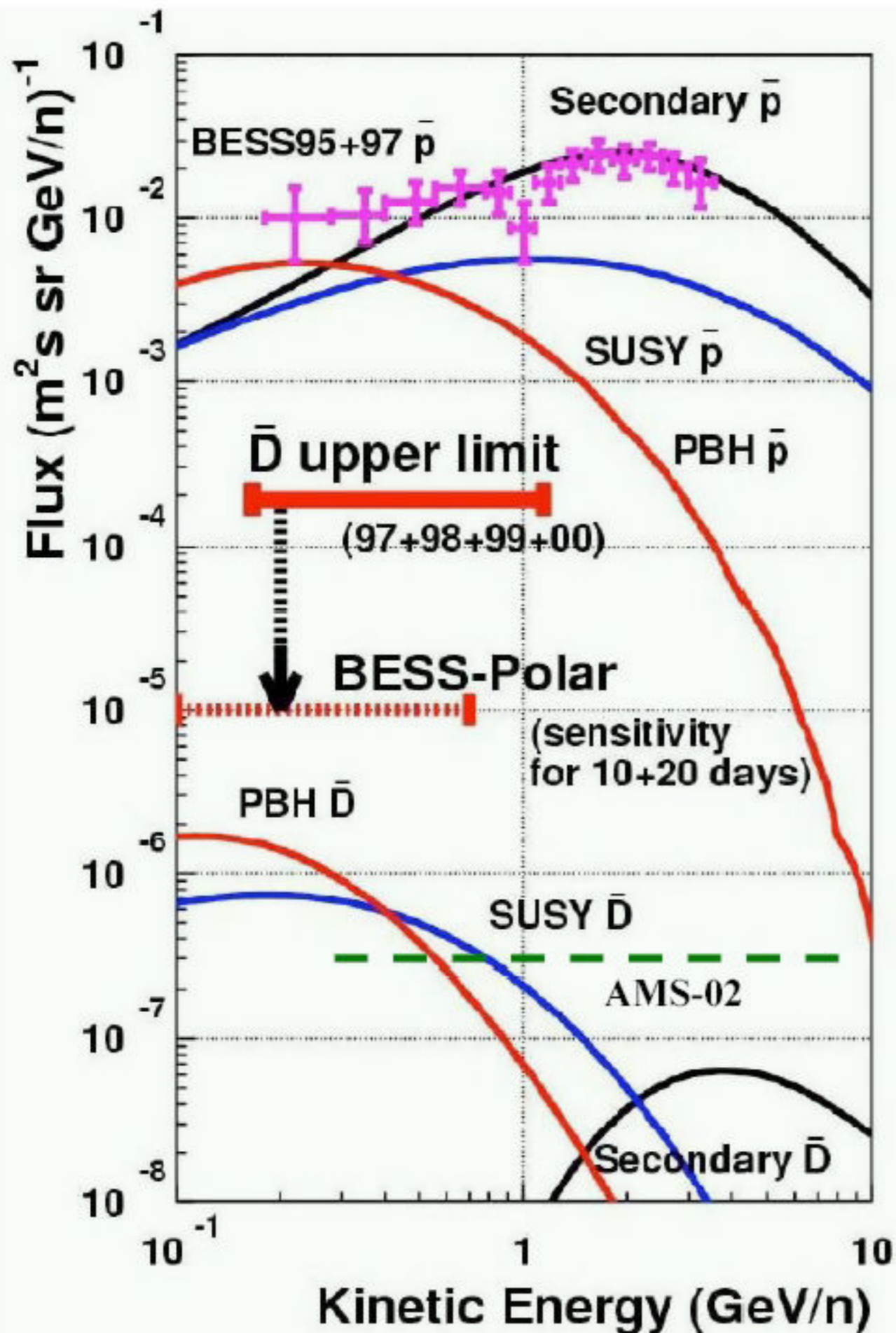
$$\tan\beta = 10$$

Fixed Halo profile,
indirect limits better if
halo is clumpy

Excluded by chargino mass limit > 95 GeV

adapted from astro-ph 0008115

Resultados altamente dependientes del modelo (de halo galáctico y de SUSY)

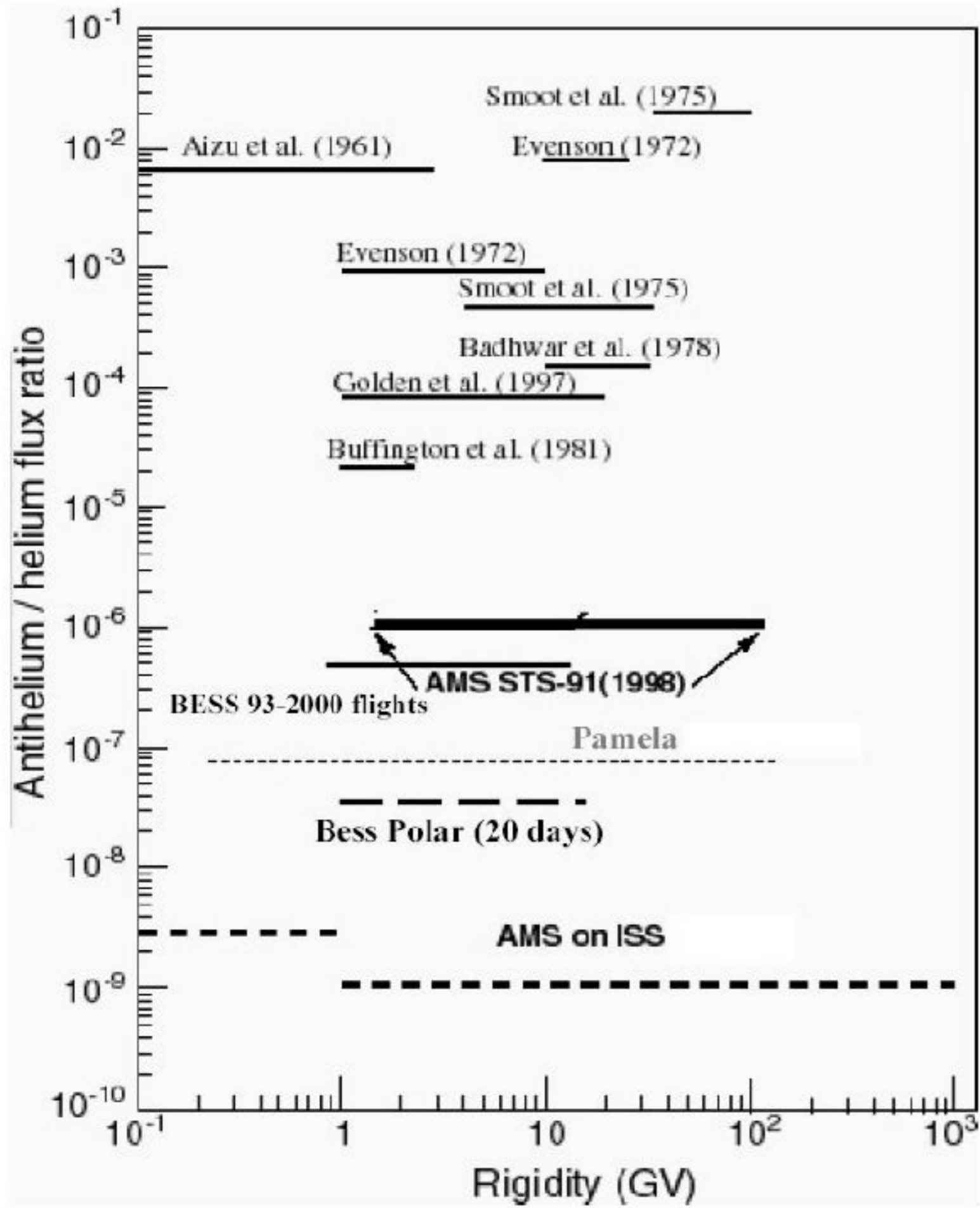


ANTIDEUTERIO

No observado hasta la fecha

Se espera mejorar la sensibilidad en varios órdenes de magnitud.

AMS-02 empieza a ser sensible a nueva física.

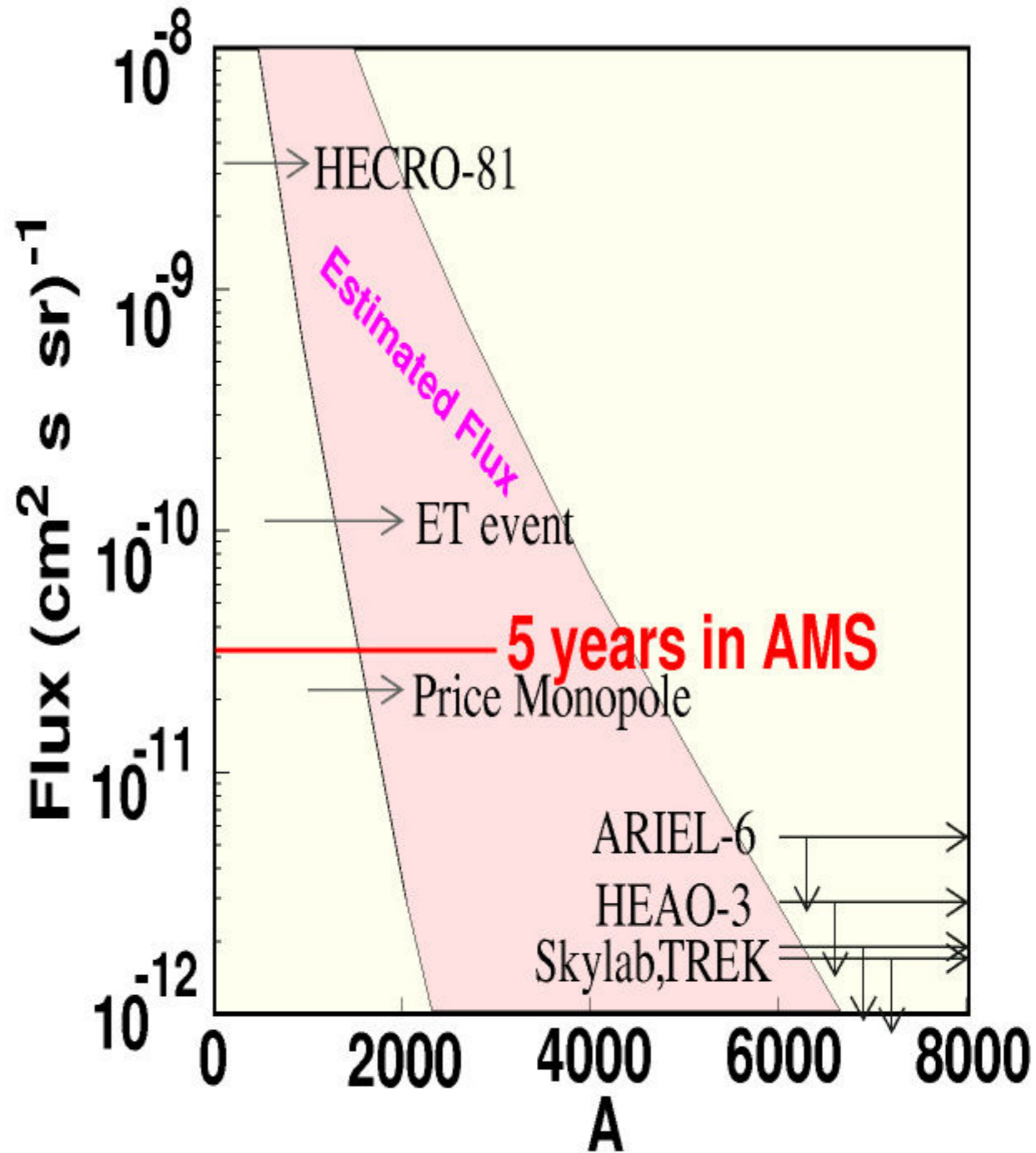


ANTIMATERIA

Búsquedas de núcleos de antihelio.

Aun no están excluidos todos los modelos.

Strangelets



CONCLUSIONES

El estudio de los rayos cósmicos ha dado resultados muy interesantes tanto para la astrofísica como para la física de partículas

Los experimentos espaciales darán en los próximos años las medidas más precisas realizadas de los rayos cósmicos

Hay posibilidades de descubrir nueva física más allá del Modelo Estándar: Materia oscura (SUSY), agujeros negros primordiales, antimateria primordial, "strangelets",...

Fundamentalmente en los flujos de antiprotones, positrones, antideuterios, rayos gamma.