



# RAYOS GAMMA: UNA VENTANA AL UNIVERSO MÁS VIOLENTO (y más oscuro)

**Miguel A. Sánchez Conde**

*[Investigador 'Talento' Comunidad de Madrid]*

Instituto de Física Teórica IFT UAM/CSIC & Departamento de Física Teórica  
Universidad Autónoma de Madrid

*Ciclo: El futuro de la física fundamental*

Residencia de estudiantes CSIC, Madrid, 14 de noviembre de 2017

# RAYOS GAMMA: UNA VENTANA AL UNIVERSO MÁS VIOLENTO (y más oscuro)

**Miguel A. Sánchez Conde**

*[Investigador 'Talento' Comunidad de Madrid]*

Instituto de Física Teórica IFT UAM/CSIC & Departamento de Física Teórica  
Universidad Autónoma de Madrid

*Ciclo: El futuro de la física fundamental*

Residencia de estudiantes CSIC, Madrid, 14 de noviembre de 2017



*"Qué es entonces esta bóveda azul, que ciertamente existe  
y nos impide ver las estrellas durante el día"*

[Flammarion "L'Atmosphère: Météorologie Populaire" -- Paris, 1888]

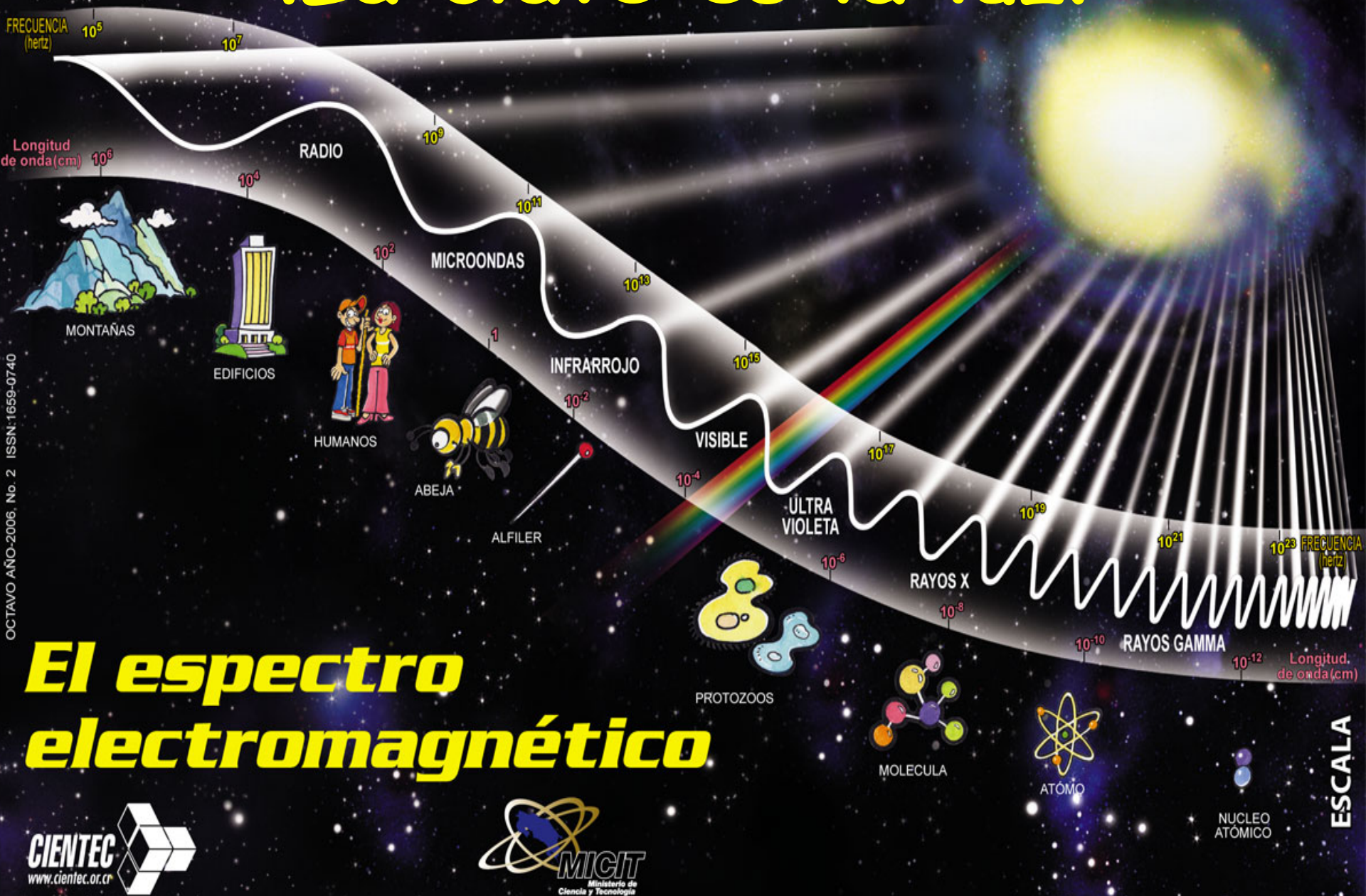
**Esto no es algo nuevo...**



**... pero hemos hecho  
algunos progresos últimamente**



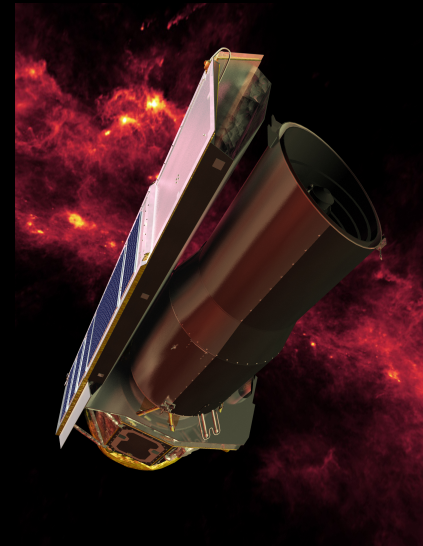
# ¡La clave es la luz!



OCTAVO AÑO-2006, No. 2 ISSN: 1659-0740

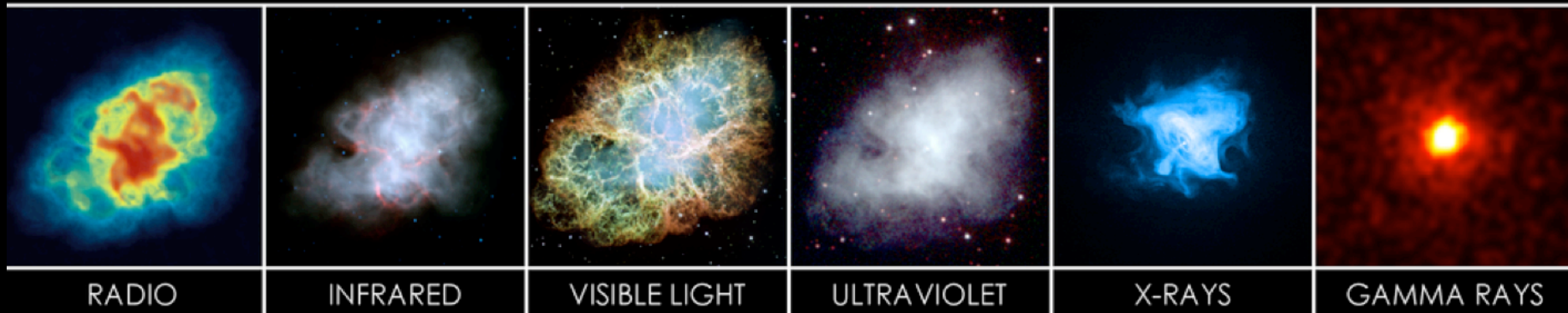
## El espectro electromagnético

# "Gafas" para todo tipo de luz ☺

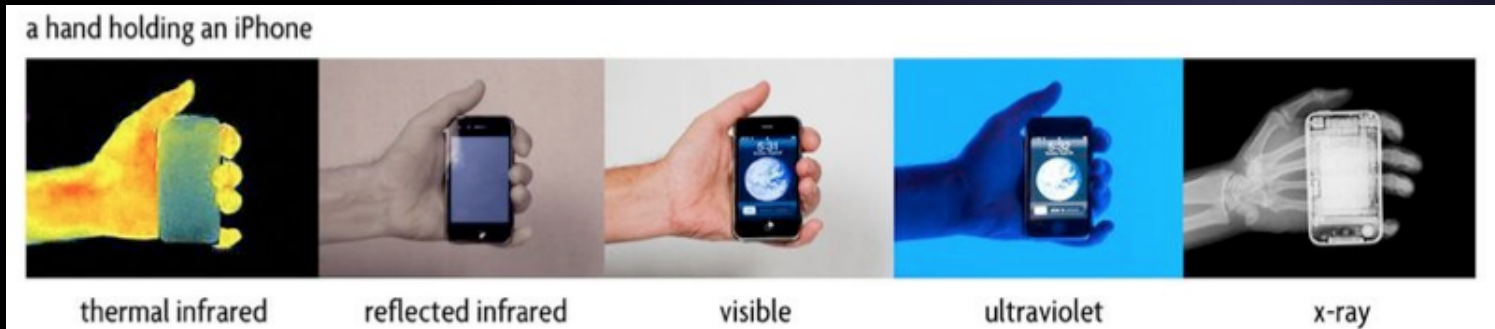


# "Gafas" para todo tipo de luz 😊

## CRAB NEBULA



Observando el mismo objeto a **distintas energías** obtenemos más información acerca de su **naturaleza** y los **procesos físicos** que en él operan.







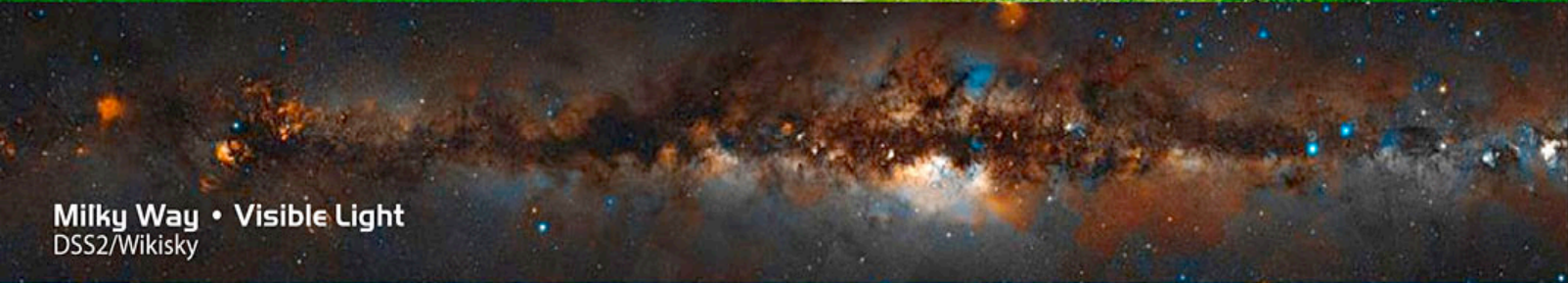
Milky Way • Gamma Rays  
Fermi/NASA

This image shows the Milky Way galaxy as a bright, horizontal band of light against a dark blue background. The light is composed of numerous small, bright spots and a continuous, glowing line, representing high-energy gamma rays.



Milky Way • X-Rays  
ROSAT All Sky Survey

This image shows the Milky Way galaxy as a bright, horizontal band of light against a dark green background. The light is composed of numerous small, bright spots and a continuous, glowing line, representing X-ray emissions.



Milky Way • Visible Light  
DSS2/Wikisky

This image shows the Milky Way galaxy as a bright, horizontal band of light against a dark, starry background. The light is composed of numerous small, bright spots and a continuous, glowing line, representing visible light.



Milky Way • Infrared  
IRAS/NASA

This image shows the Milky Way galaxy as a bright, horizontal band of light against a dark orange background. The light is composed of numerous small, bright spots and a continuous, glowing line, representing infrared radiation.



Milky Way • Radio  
Haslam et al

This image shows the Milky Way galaxy as a bright, horizontal band of light against a dark purple background. The light is composed of numerous small, bright spots and a continuous, glowing line, representing radio waves.

With which eyes do you observe the universe?

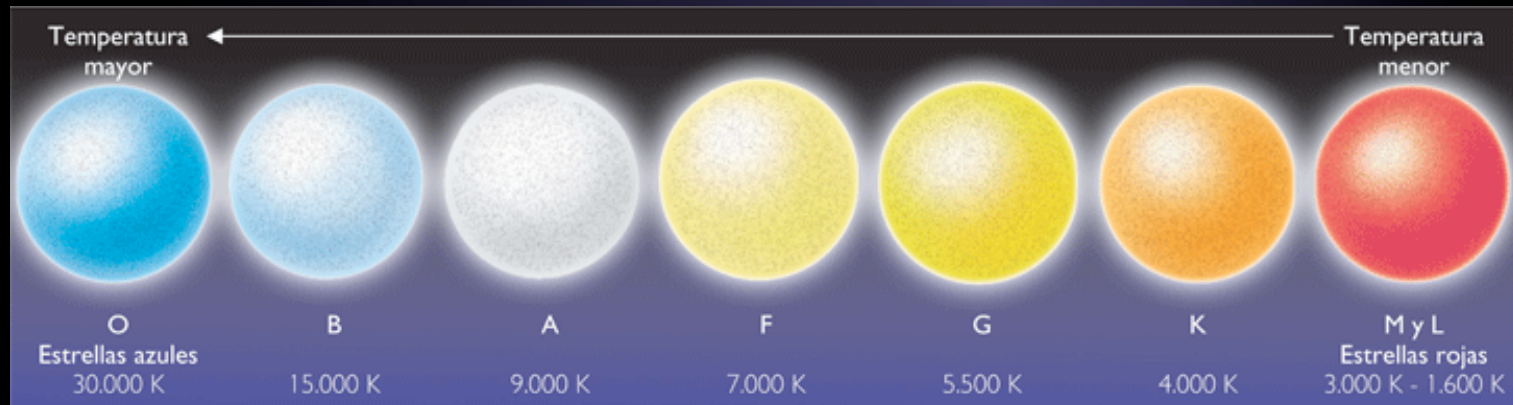
# Emisión térmica... ¿o qué más?



Según se calienta el material, los electrones se aceleran alrededor de sus núcleos y emiten luz.

Los **procesos térmicos** se asocian a temperaturas.

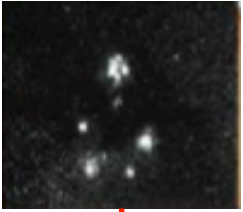
Cada temperatura se asocia a una energía de la luz.



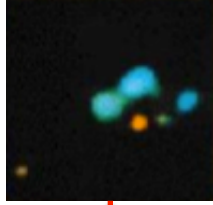
- Máxima temperatura térmica ~ varios millones de grados...
- Pero vemos luz que "necesitaría" del equivalente a 100.000 millones de grados!
- **Procesos no térmicos** aceleran electrones a velocidades incluso mayores

# Rayos gamma: una ventana al universo más violento

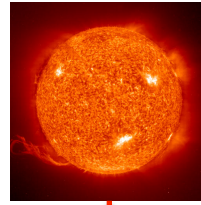
Nebulosa oscura



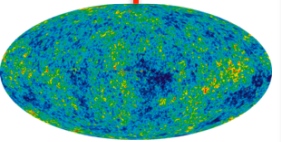
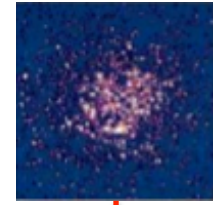
Guarderías estelares



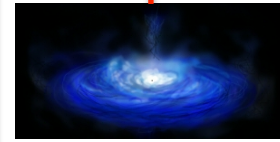
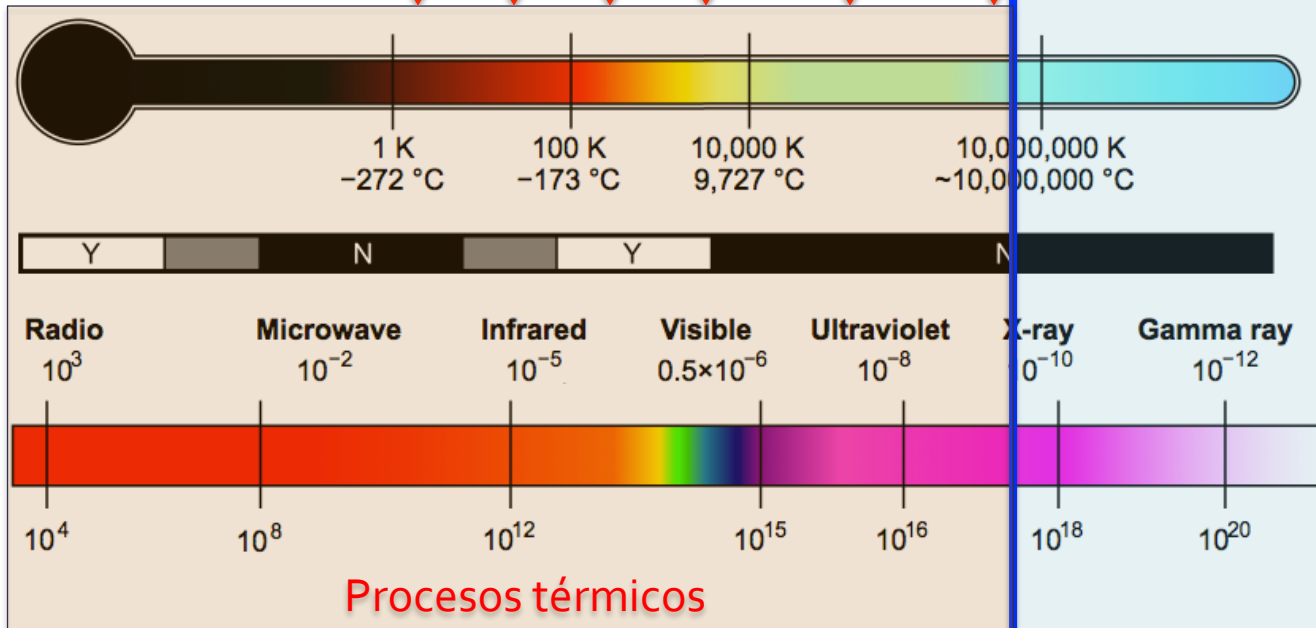
Nuestro sol



Jóvenes estrellas masivas



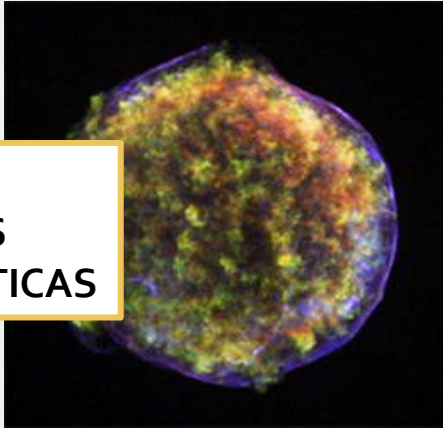
Fondo cósmico de microondas



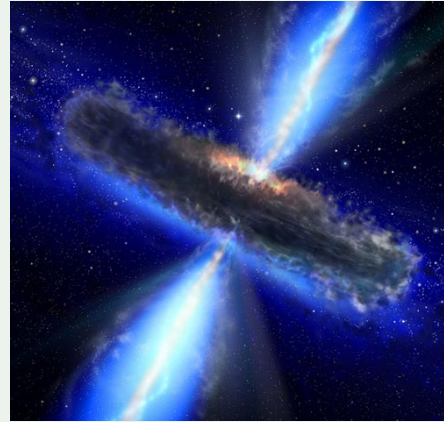
Disco de acreción

# ¿Qué fenómenos producen rayos gamma?

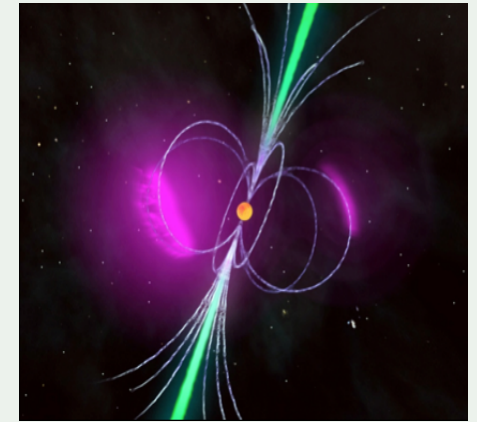
FUENTES  
ASTROFÍSICAS  
MUY ENERGÉTICAS



Explosiones

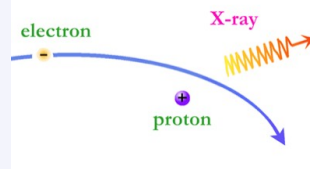


Acreción



Campos magnéticos  
muy intensos

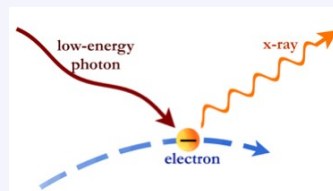
MECANISMOS  
DE EMISIÓN



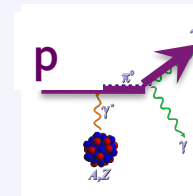
“bremsstrahlung”



sincrotrón

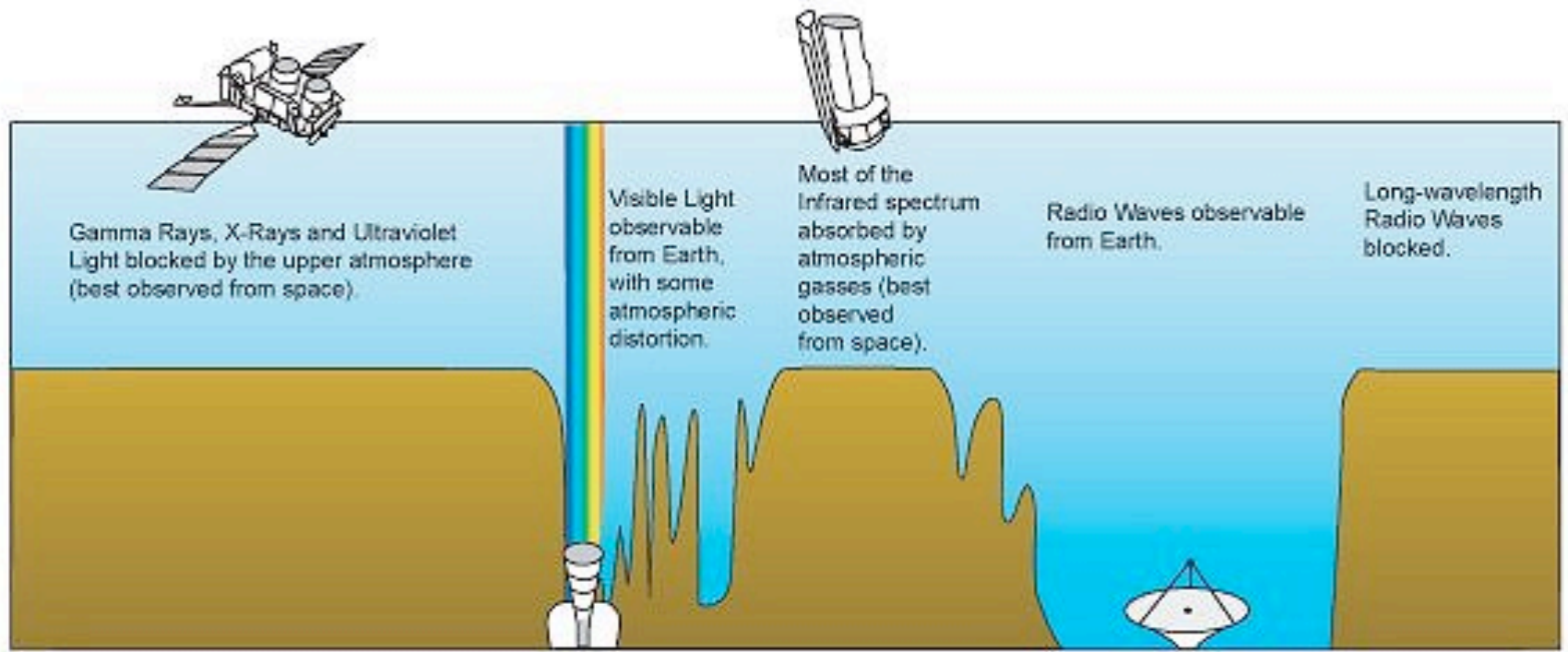
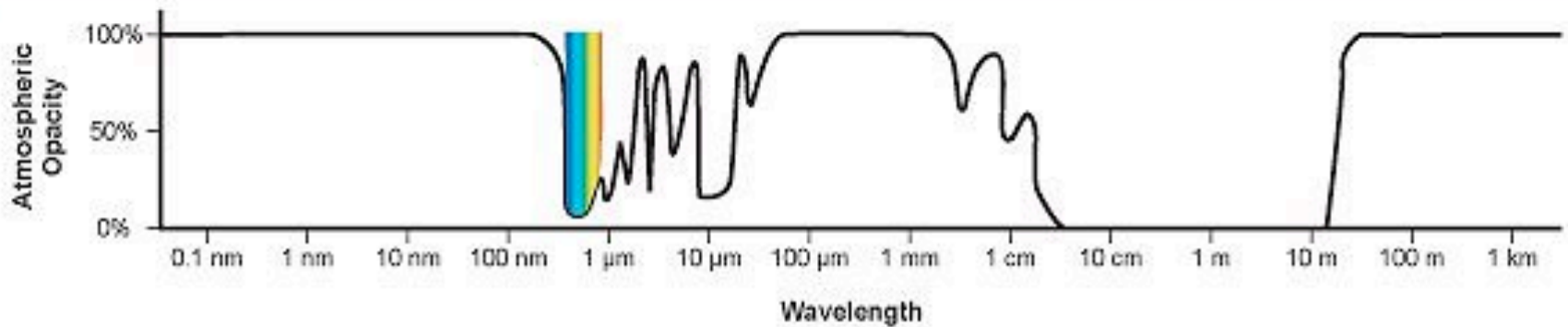


Compton inverso



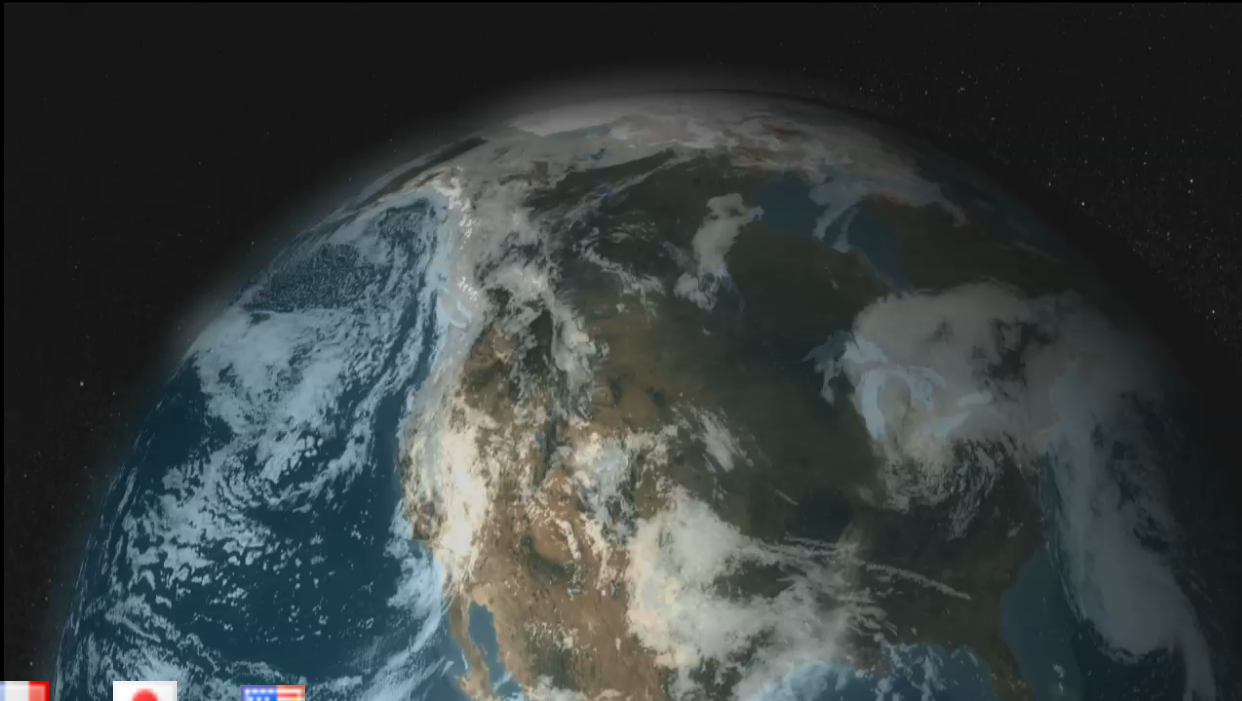
protón-protón

# Opacidad atmosférica a rayos gamma



# Desde el espacio: el satélite Fermi

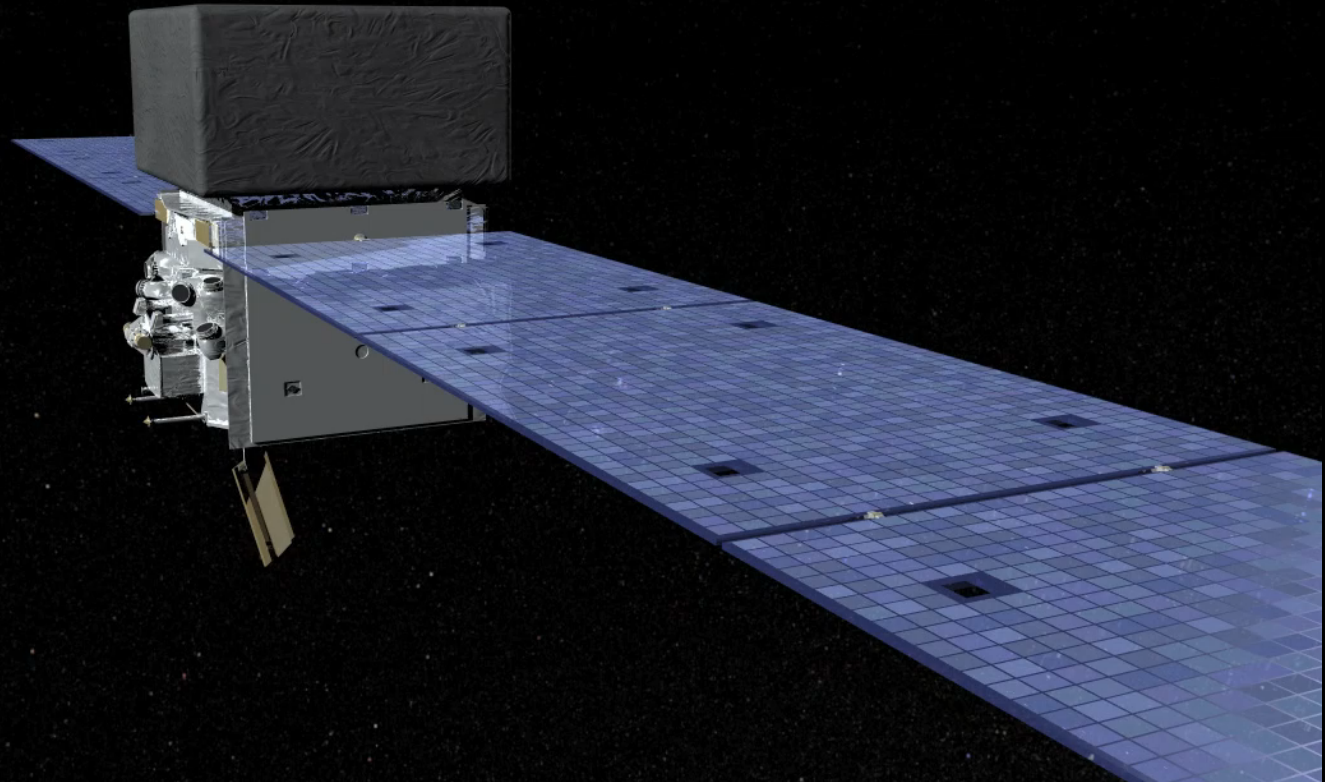
- Lanzado en 2008 por NASA, con colaboración internacional.
- Observa **todo el cielo** en sólo 3 horas con una sensibilidad sin precedentes.
- Del tamaño de un coche pequeño, ¡pero consume como una tostadora!
- Datos **públicos** en ~24 horas.



# “Pillando” gammas con Fermi

Los rayos gamma no pueden “enfocarse” → ¿cómo detectarlos?

Fermi utiliza la “producción de pares electrón-positrón” para pillar gammas.



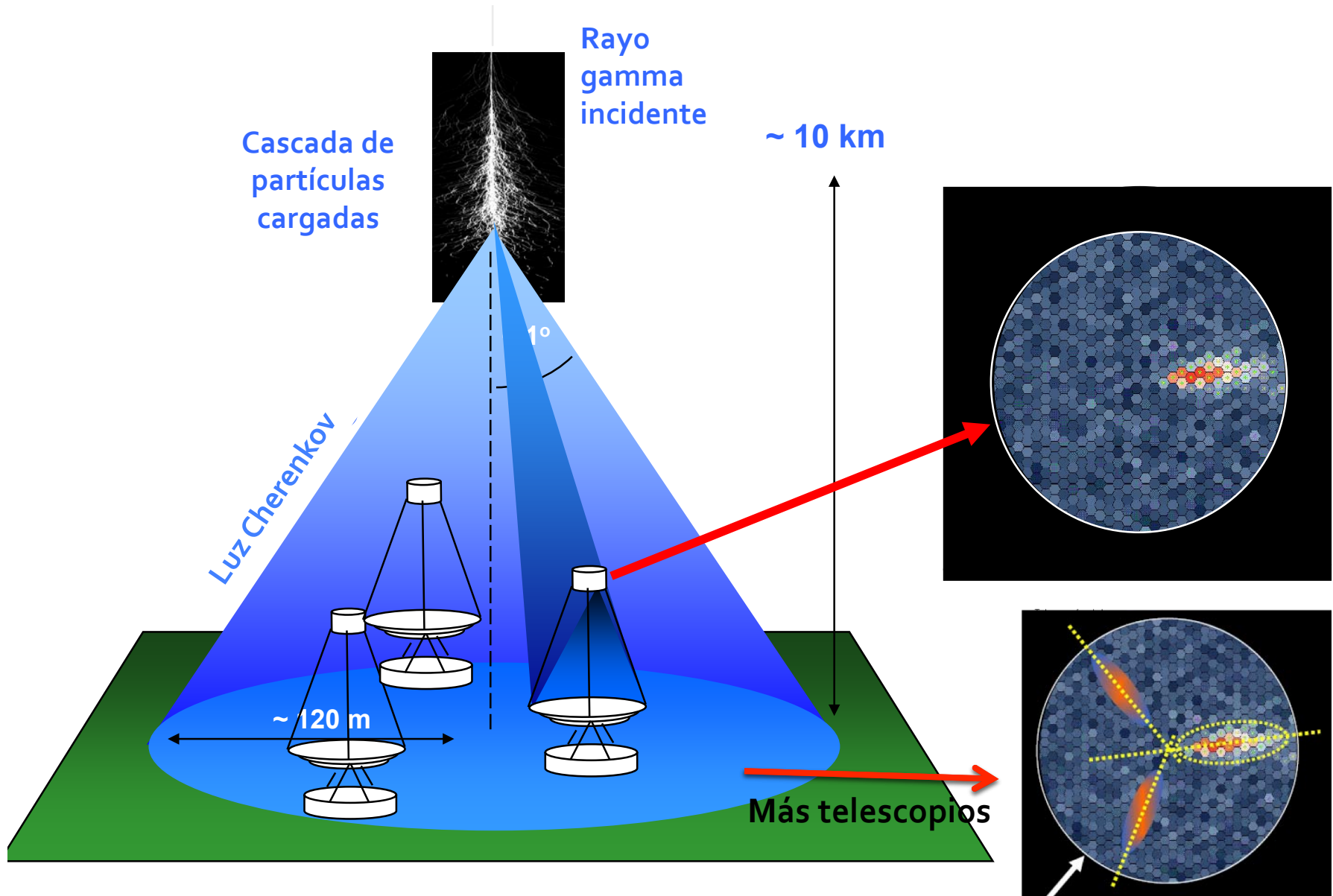
¡También  
desde  
tierra!

Telescopio MAGIC-I





# Los "telescopios Cherenkov"



# Observatorios actuales de rayos gamma



**Fermi**

[>2008]



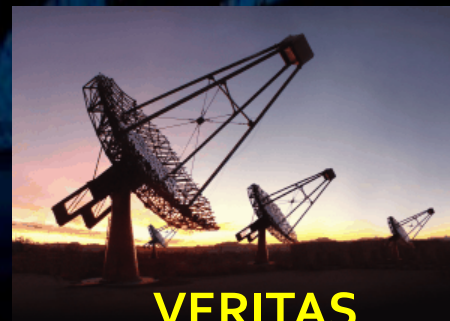
**MAGIC**

[>2003]



**HESS**

[>2002]



**VERITAS**

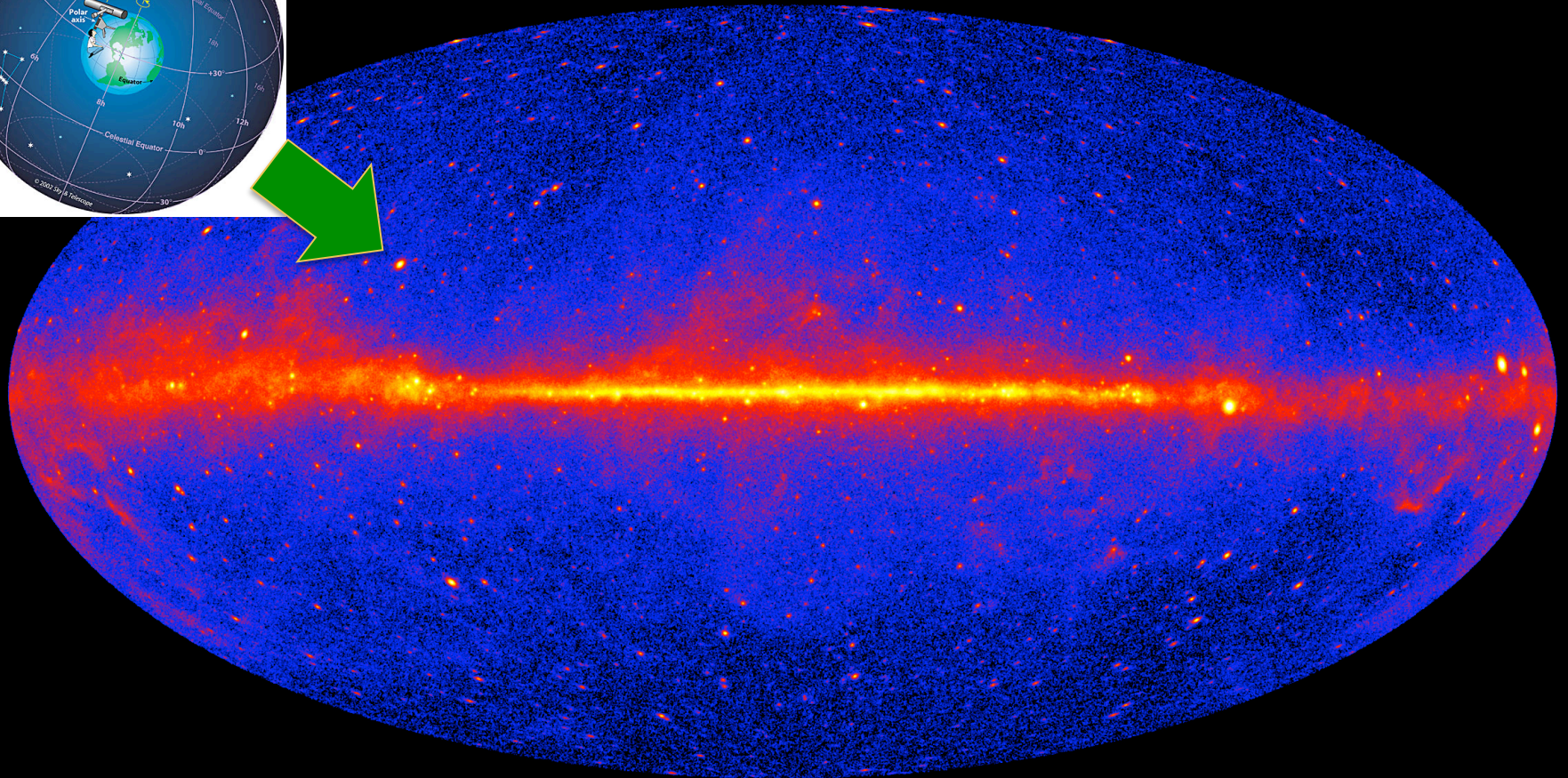
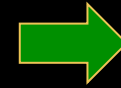
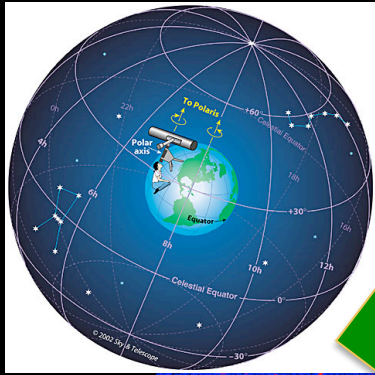
[>2006]



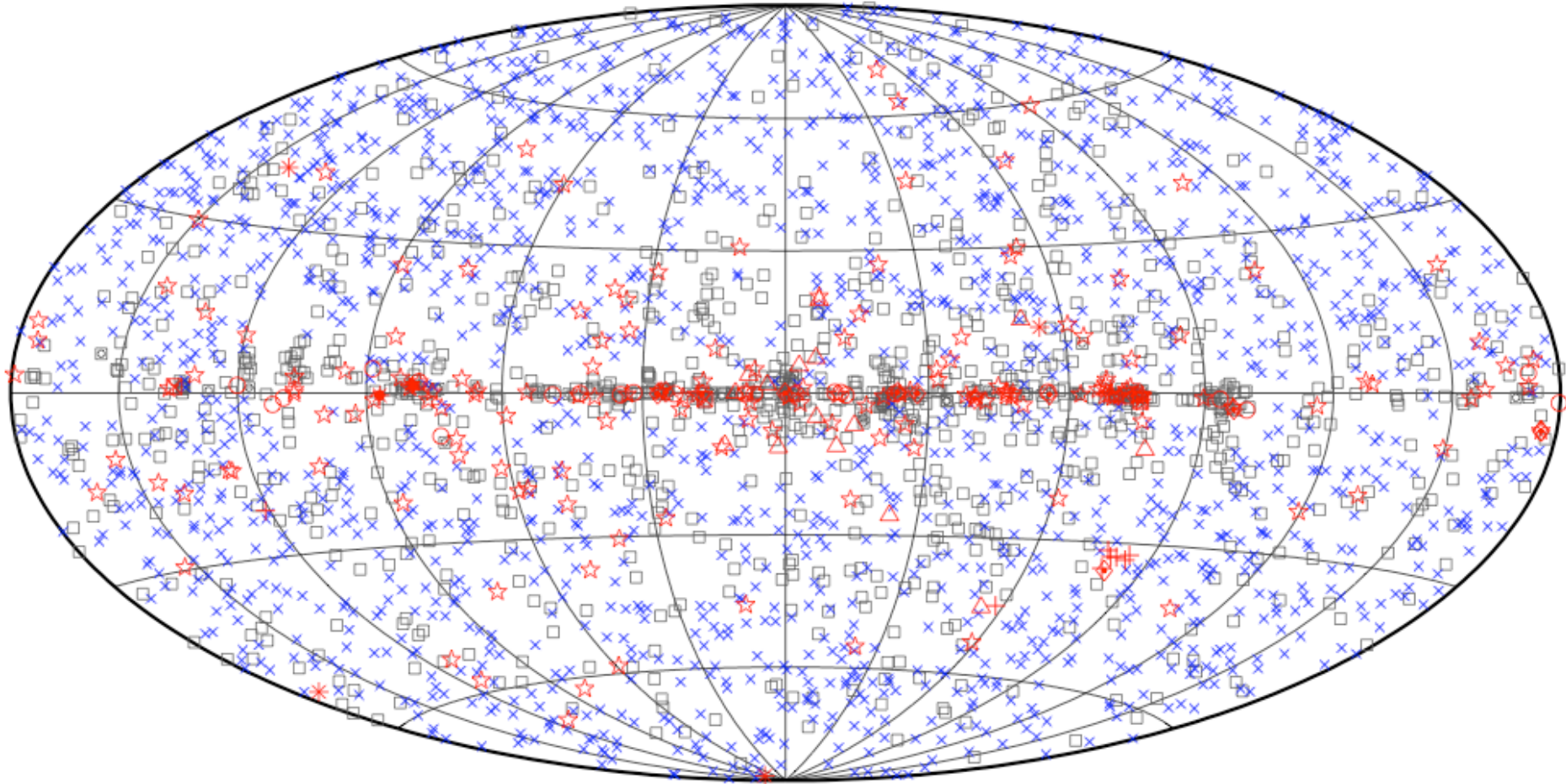
**HAWC**

[>2015]

# El cielo en rayos gamma visto por Fermi



# ¡Más de 3.000 objetos en la actualidad!

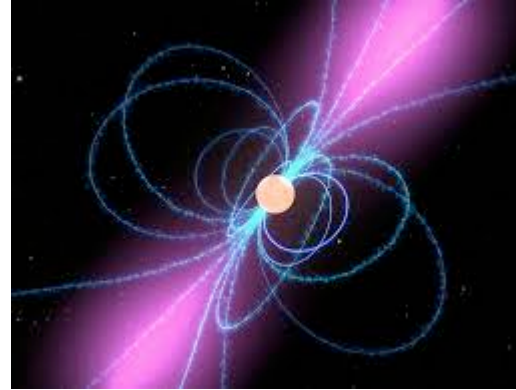


□ No association	▣ Possible association with SNR or PWN	× AGN
☆ Pulsar	△ Globular cluster	* Starburst Galaxy
⊠ Binary	+ Galaxy	◇ PWN
★ Star-forming region	○ SNR	★ Nova

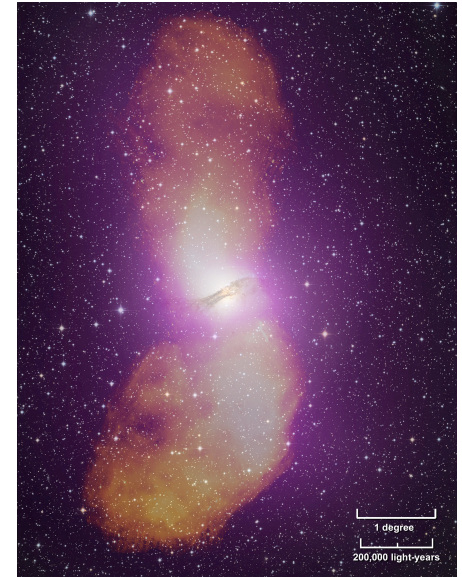
# El "bestiario" de los rayos gamma



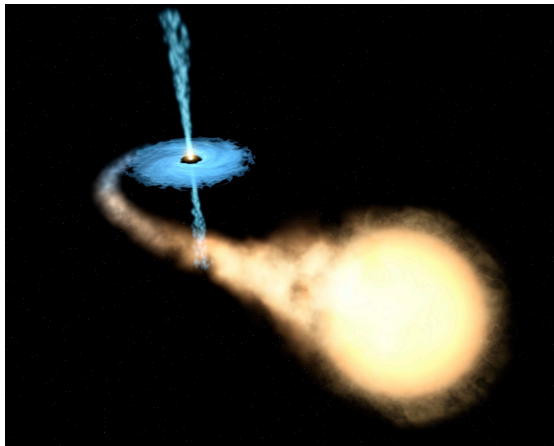
Agujeros negros



Púlsares



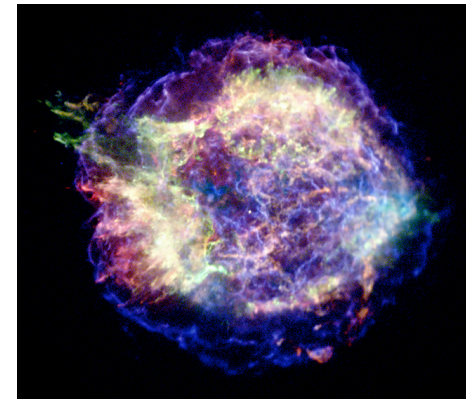
Radio galaxias



Sistemas binarios



Galaxias con alta formación estelar



Remanentes de supernova

+ ¿desconocido?

Ahora, hablaremos sobre uno de los **misterios no resueltos** más grandes de nuestro tiempo.

Y de su **conexión** con los rayos gamma.

# Todos los mundos...



Ocho en el Sistema Solar.

Más de 4,000 orbitando  
alrededor de otras estrellas  
(y subiendo).

A wide-field photograph of the night sky, showing a dense field of stars. The stars vary in color, including bright white and yellow stars, blue stars, and a prominent reddish-pink nebula on the right side. The background is a dark, star-filled expanse, likely representing the Milky Way galaxy. A yellow text box is overlaid on the image, containing the text "100,000 millones sólo en nuestra galaxia.".

Todas las estrellas...

100,000 millones sólo en nuestra galaxia.

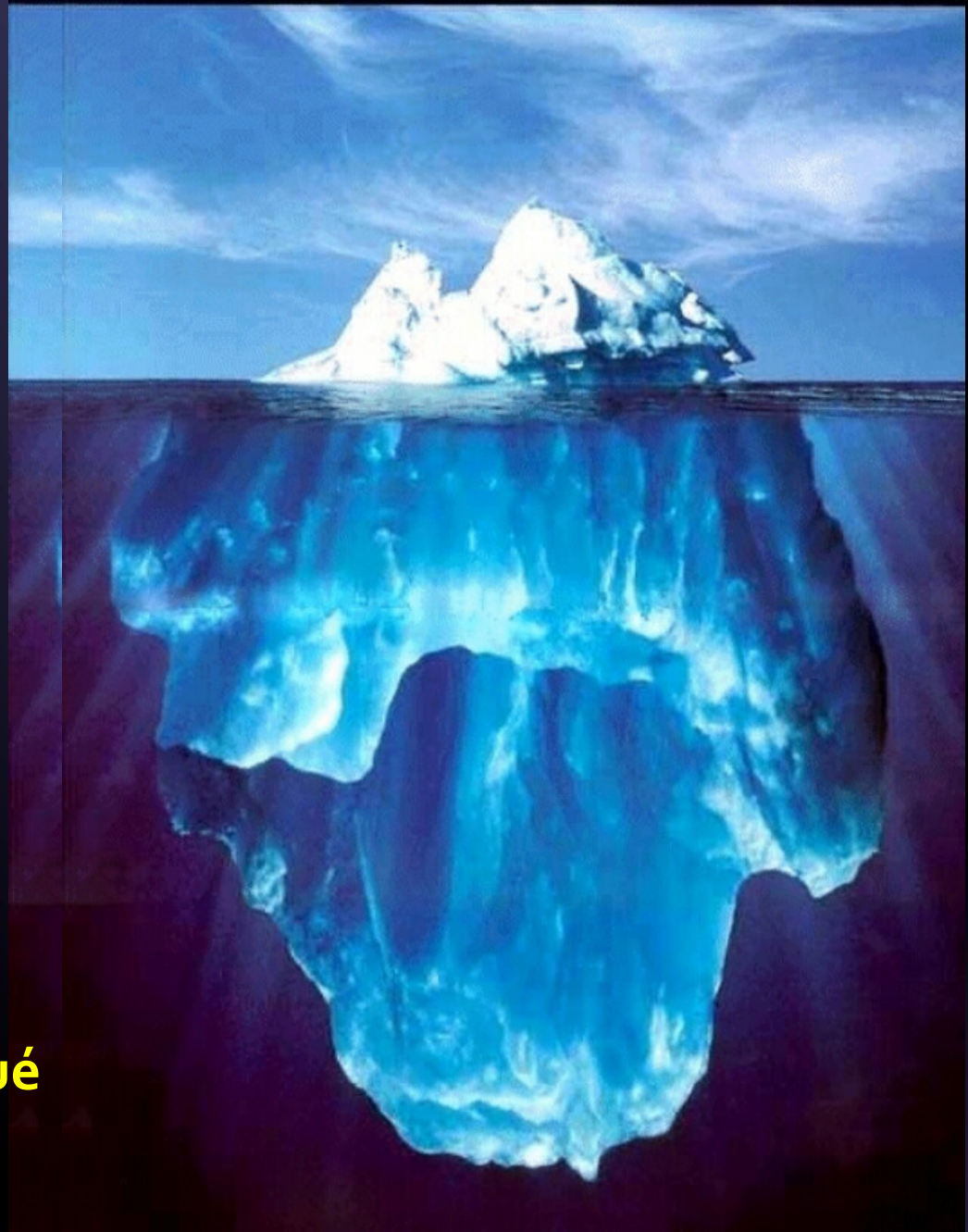


A deep-field image of the universe showing a vast field of galaxies. The galaxies are scattered across the frame, appearing in various shapes and colors, including yellow, orange, blue, and purple. Some are bright and clear, while others are faint and distant. The background is a dark, starry space.

Todas las galaxias...

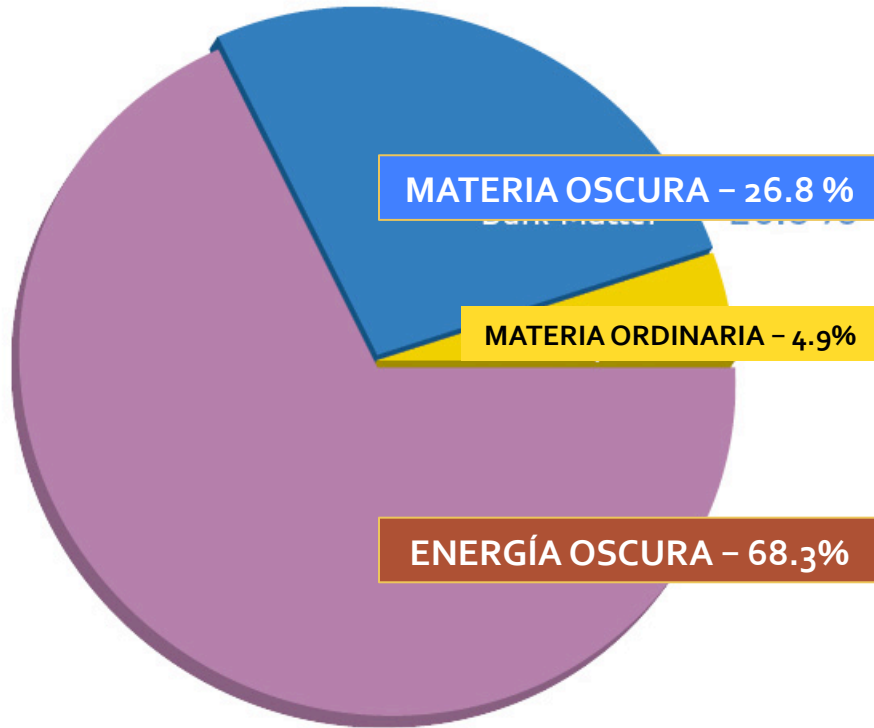
Miles de millones en el Universo observable.

Todo ello  
representa sólo una  
pequeña fracción  
del Universo.

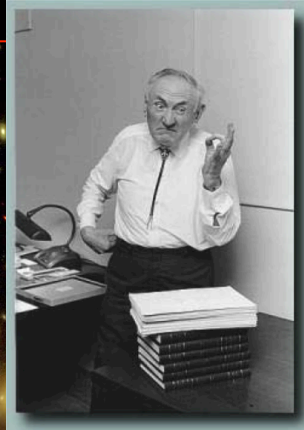


Y todavía no sabemos de qué  
está constituido el resto.

# El pastel cósmico



# Primeras evidencias de materia oscura



Masa "invisible"  
en la vecindad solar  
[ J. Oort 1932 ]

Las galaxias en el cúmulo de Coma se mueven a velocidades **demasiado** elevadas  
[ F. Zwicky, ~1933 ]

## BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES OF THE NETHERLANDS.

1932 August 17

Volume VI.

No. 238.

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN.

The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, by *J. H. Oort*.

### Notations.

- $z$  distance from the galactic plane,
- $Z$  velocity component perpendicular to the galactic plane,
- $Z_0$  the value of  $Z$  for  $z = 0$ ,
- $l$  the modulus of a Gaussian component of the distribution of  $Z$  (formula (5), p. 253),
- $K(z)$  the acceleration in the direction of  $z$ ,
- $\Delta$  the star-density,
- $\rho$  the distance of a star from the sun,
- $\Phi(M)$  the number of stars per cubic parsec between  $M - \frac{1}{2}$  and  $M + \frac{1}{2}$ ,
- $A(m)$  the number of stars per square degree between  $m - \frac{1}{2}$  and  $m + \frac{1}{2}$ ,
- $b$  galactic latitude,
- $\varpi$  distance to the axis of rotation of the galactic system,
- $\delta$   $\partial \log \Delta / \partial \varpi$ .

4. From VAN RHIJN's tables in *Groningen Publication* No. 38 the density distribution  $\Delta(z)$  has been computed for four intervals of visual absolute magnitude (Table 13 and Figure 1). Figures 2 and 3 show  $\log \Delta(z)$  for A stars and yellow giants, as derived by LINDBLAD and PETERSSON.

5. With the aid of the data contained in the two preceding sections I have computed the acceleration  $K(z)$  between  $z = 0$  and  $z = 600$ . The computations were made by successive approximations; the B stars were eliminated first. The results are in Table 14 and Figure 4,  $K'(z)$  giving the values finally adopted. The good agreement between the practically independent values of  $K(z)$  derived from the separate absolute magnitude groups is a strong argument in favour of the approximate correctness of the data up to  $z = 400$ . The result may be summarized by stating that the absolute value of  $K(z)$  increases proportionally with  $z$  from  $z = 0$  to  $z = 200$ ; between  $z = 200$  and  $z = 500$  it remains practically constant and equal to  $3.8 \cdot 10^{-9}$ .

# (ALGUNAS DE LAS) EVIDENCIAS OBSERVACIONALES DE MATERIA OSCURA

Existen evidencias a todas las escalas.

## Escalas galácticas

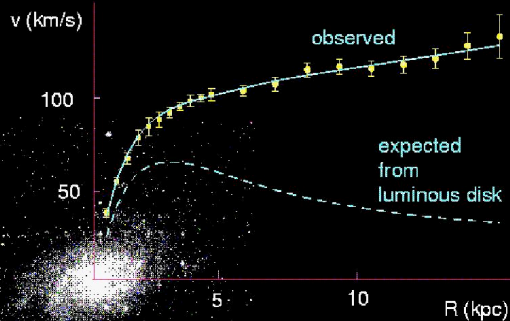
- a) Curvas de rotación de galaxias.
- b) Lente gravitacional débil.
- c) Dispersión de velocidades de galaxias satélites.
- d) Dispersión de velocidades dentro de galaxias enanas.

## Cúmulos de galaxias

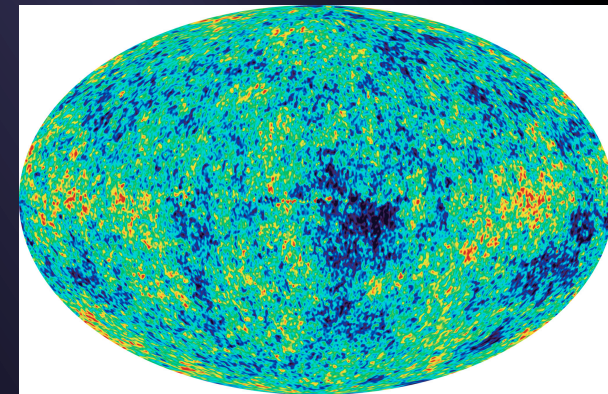
- a) Dispersión de velocidades de galaxias individuales.
- b) Lente gravitacional débil y fuerte.
- c) Flujos de velocidades peculiares.
- d) Emisión en rayos X.

## Escalas cosmológicas

- a) Anisotropías CMB
- b) Formación de estructuras
- c) Distribución a gran escala
- d) Oscilaciones acústicas de bariones.
- e) Efecto Sunyaev-Zeldovich



M33 rotation curve





**Vía Láctea:**

Masa total ~ 10 veces la masa en estrellas

Tamaño total ~ 10 veces el tamaño visible

# ¿De qué podría estar hecha la materia oscura?

La mayor parte de la materia oscura en el Universo no puede estar hecha de átomos.

- Sin candidato viable en el Modelo Estándar.
  - ✓ Los neutrinos son demasiado ligeros.
- Un montón de candidatos más allá del Modelo Estándar.

## Propiedades

- 1) Oscura.
- 2) Neutra.
- 3) Estable.
- 4) “Fría”.
- 5) 5 veces más abundante que la materia ordinaria.



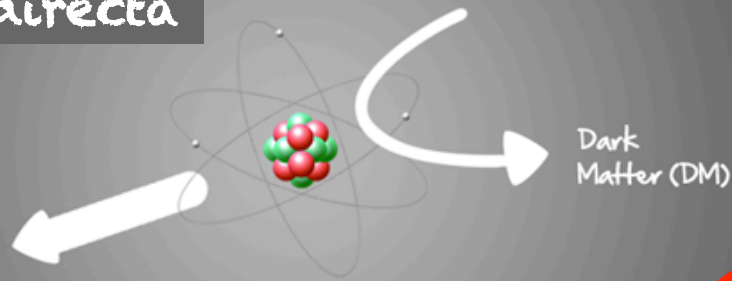
# Búsquedas de materia oscura



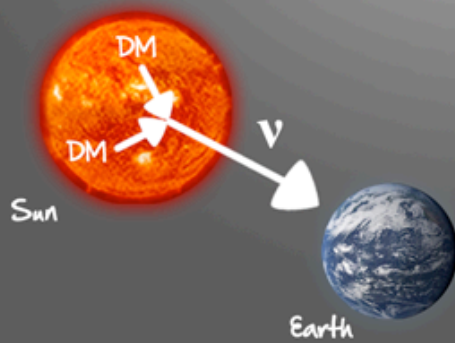


# Estrategias de búsqueda de materia oscura

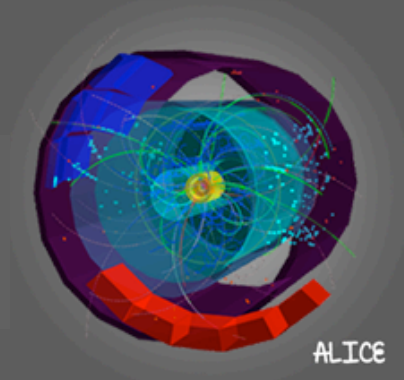
Detección directa



Detección indirecta

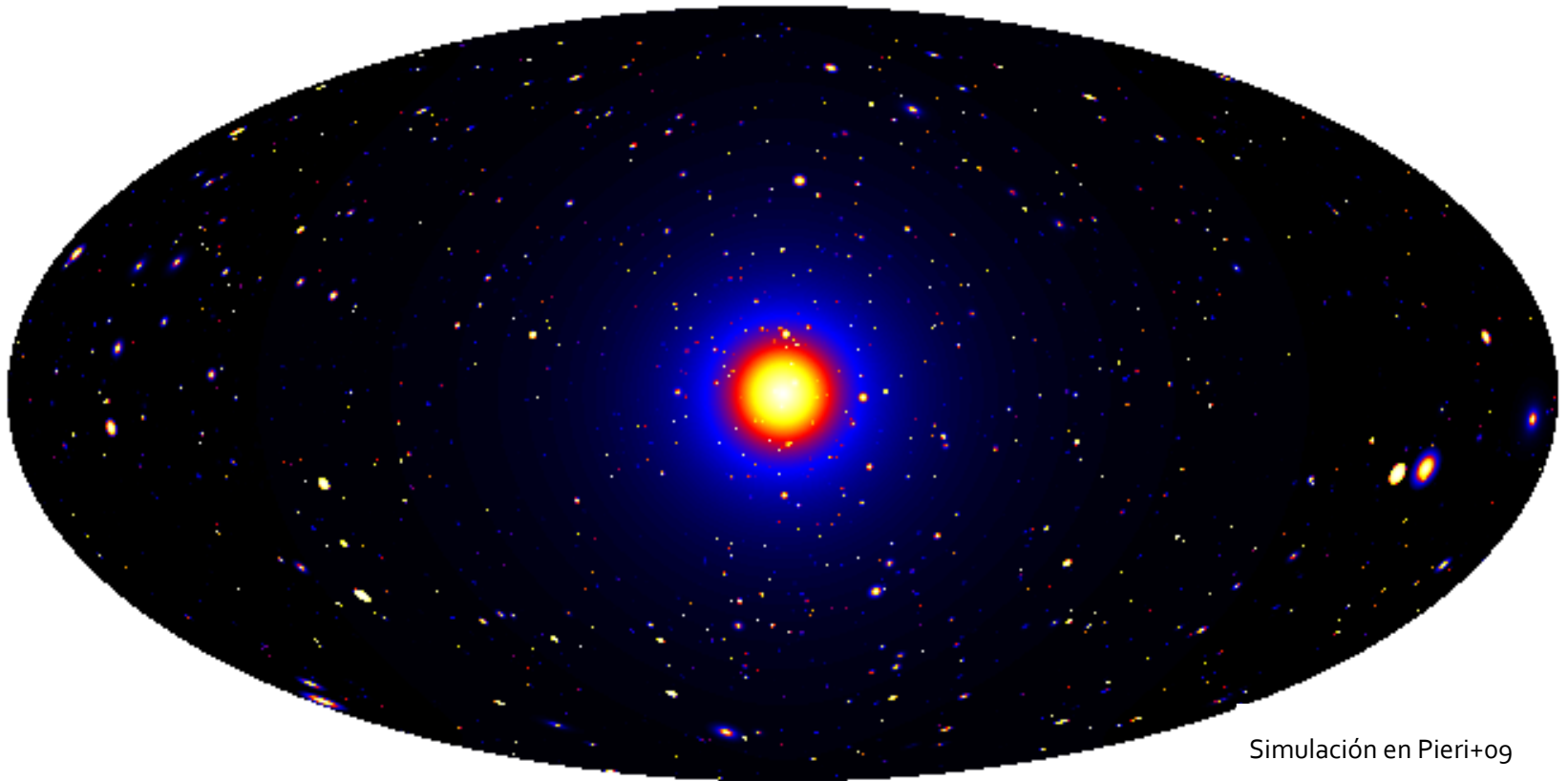


Producción directa en el LHC



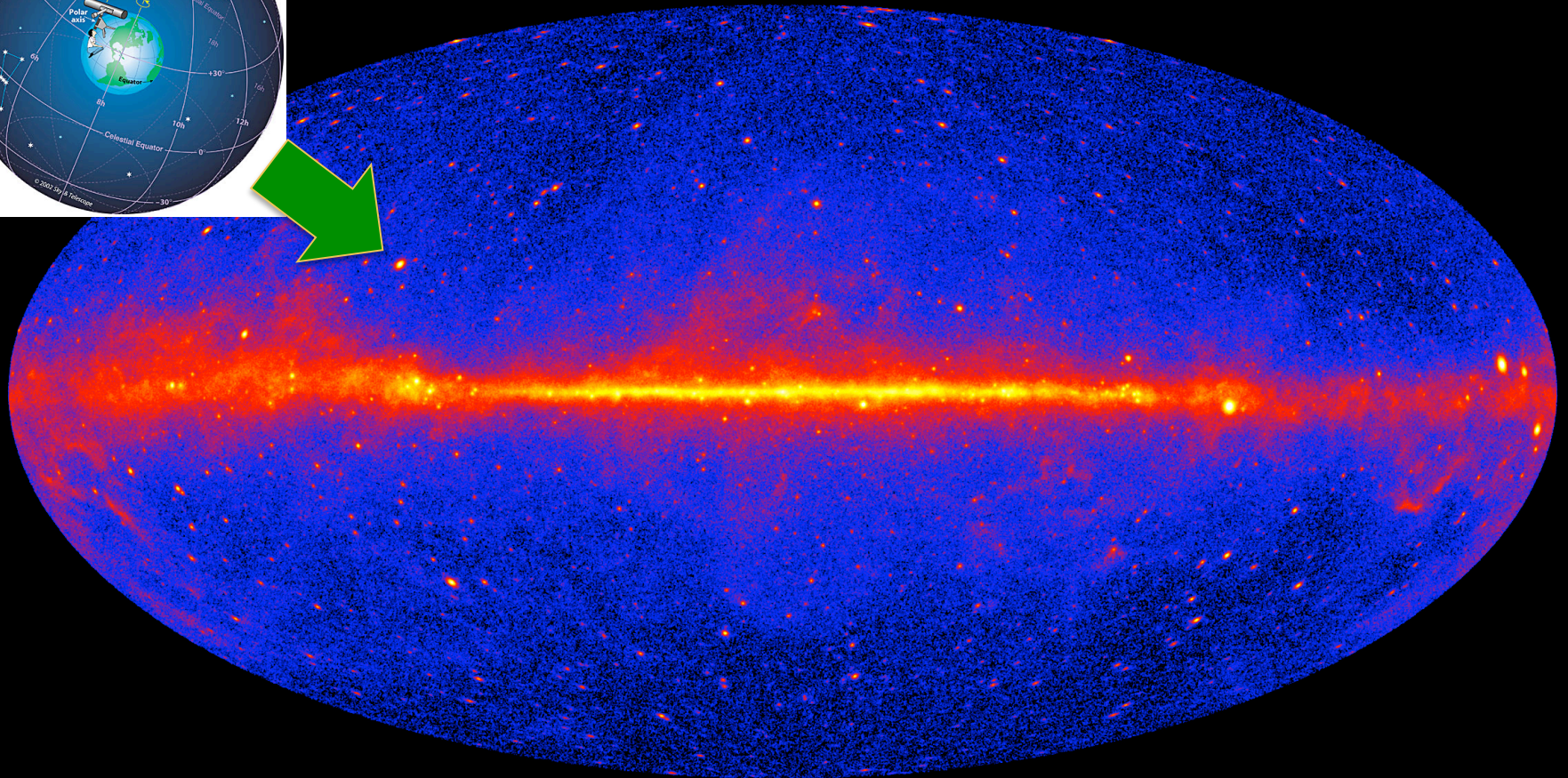
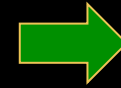
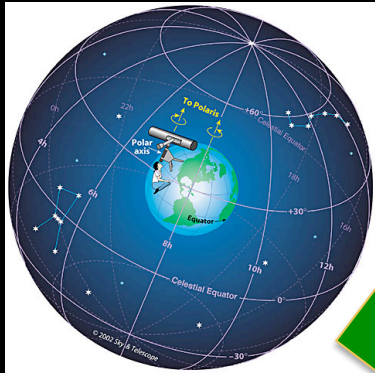
¡Los rayos gamma son uno de los productos de aniquilación de la materia oscura!

# EL cielo de rayos gammas inducido por la materia oscura



Simulación en Pieri+09

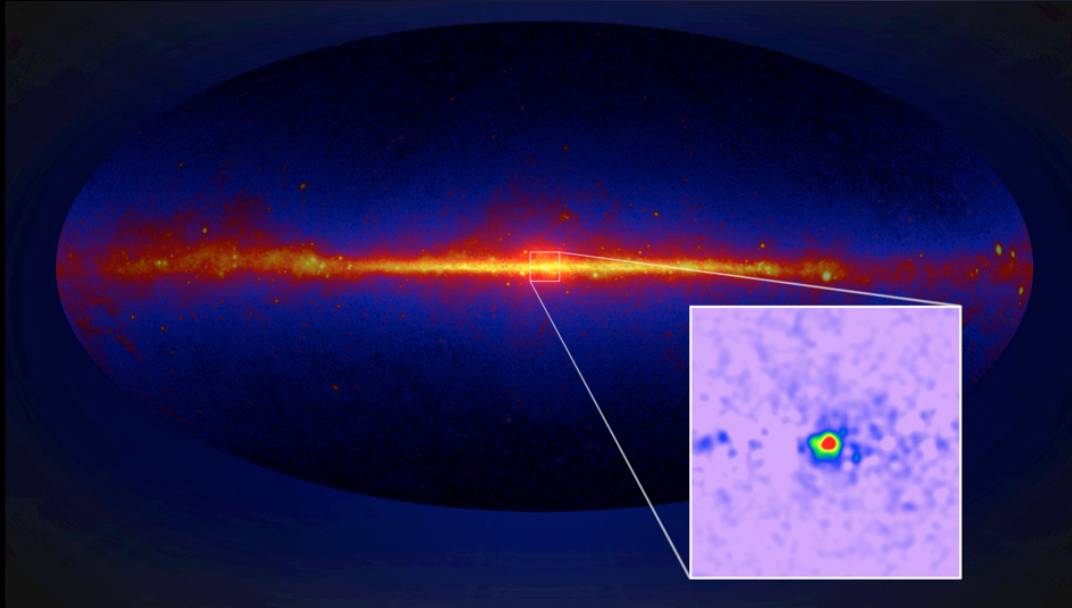
# El cielo en rayos gamma visto por Fermi



Necesario **discriminar** posibles aniquilaciones de materia oscura frente a procesos astrofísicos “convencionales”.

Crítico **comprender** los procesos astrofísicos en gran detalle.

# ¿Materia oscura en el centro galáctico?



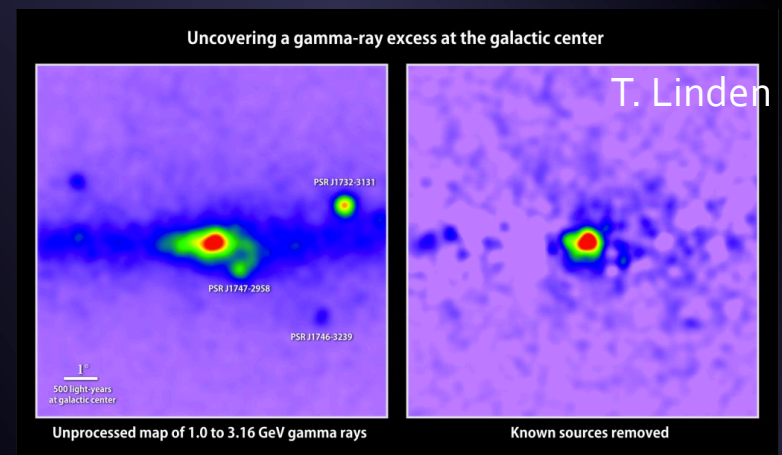
Vemos un **exceso** de rayos gamma en el centro de la Vía Láctea.

Propiedades **compatibles** con materia oscura.

Pero el centro galáctico es un lugar muy **complicado**...

Tal vez **no conocemos bien** todas las fuentes que emiten rayos gamma en esa zona ☹️

**¡Estamos en ello!**



# ¿Y en galaxias enanas satélites?

- Muy **dominadas** por materia oscura.
- Sin emisión gamma de origen astrofísico: ¡mejor!
- Hay varias **cercanas**.
- ¿Estamos viendo materia oscura en el centro de la galaxia?  
→ Tal vez alguna señal **aquí**.

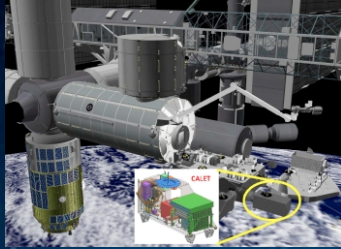
(Galaxia enana Fornax)

Aún no hemos detectado **ninguna señal** (pero de todo se aprende, oye)

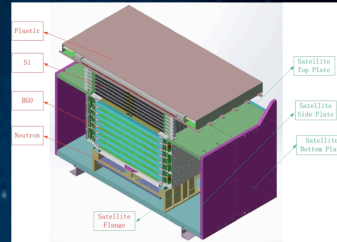
# Gammas: el futuro



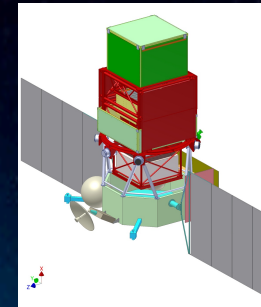
**Fermi**



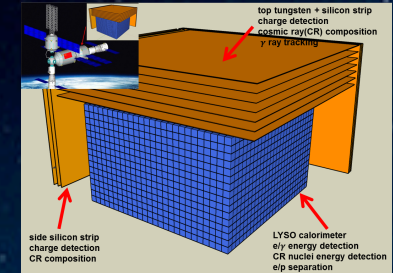
**CALET**  
[ > 2016 ]



**DAMPE**  
[ >2016 ]



**GAMMA-400**  
[ ? ]



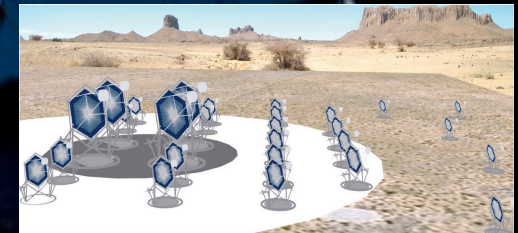
**HERD**  
[ > 2019 ]



**HESS-II  
MAGIC  
VERITAS**



**HAWC**  
[ >2015 ]



**CTA**  
[ >2019? ]

Lista completa de futuras misiones de Astrofísica de Altas Energías:  
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/concepts.html>

# Futuro: Cherenkov Telescope Array (CTA)

Gran esfuerzo internacional: más de 30 países y 200 instituciones.

Telescopios de 23 m  
Menor energía  
20-200 GeV

Telescopios de ~12 m  
Energía intermedia  
100 GeV a 10 TeV

Telescopios de ~4-6 m  
Energías más altas  
TeV a >100 TeV

4 LSTs [N & S]

15 MSTs [N]  
25 MSTs [S] (+ 24 SCTs)

70 SSTs [S]

Adapted from W. Hofmann

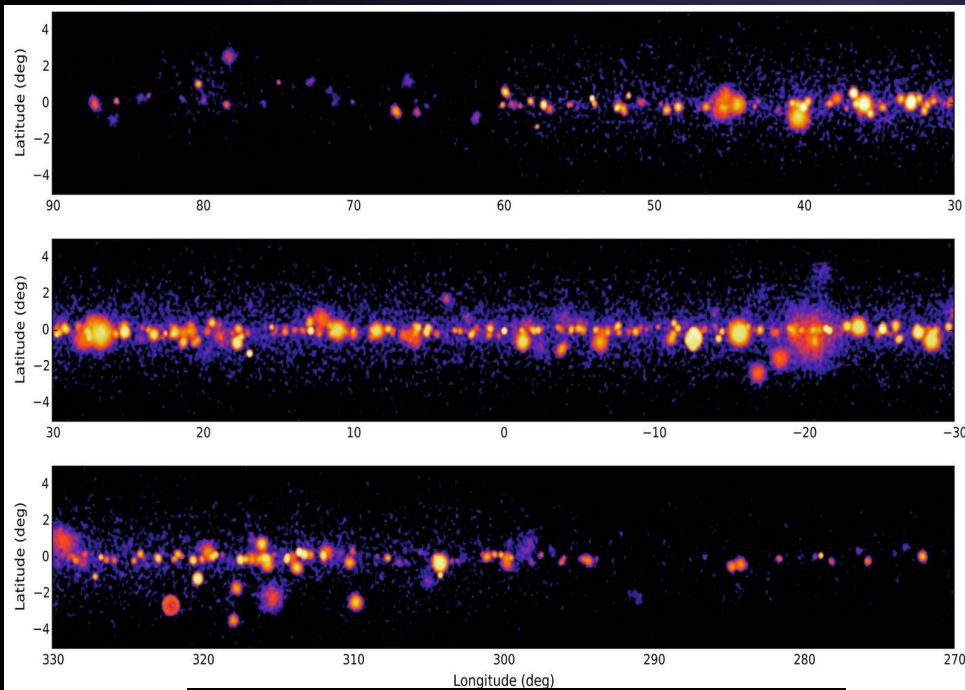


# ¡CTA en La Palma!

Habr  un CTA en el Hemisferio Sur (Chile) y otro en el Norte (España).



¡La construcción ya ha comenzado!



Simulación CTA del plano galáctico

CTA será **10 veces más sensible** que los mejores telescopios actuales.

**Mejor resolución** espacial y resolución en energía.

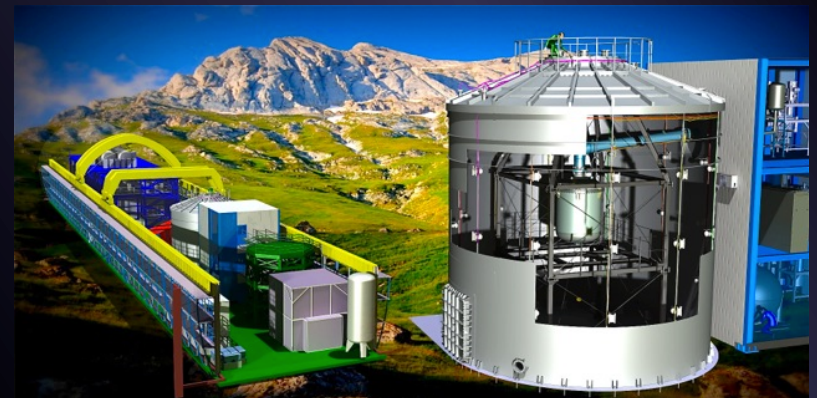
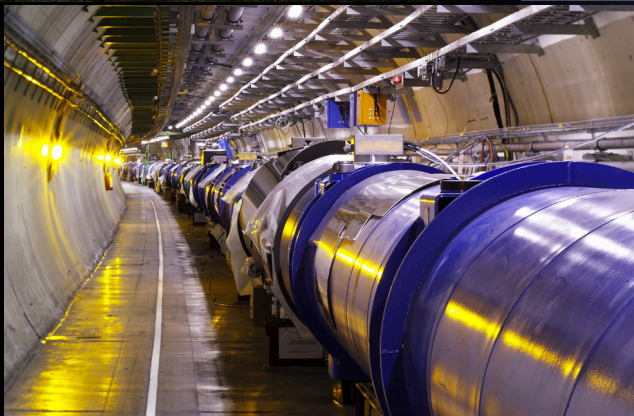
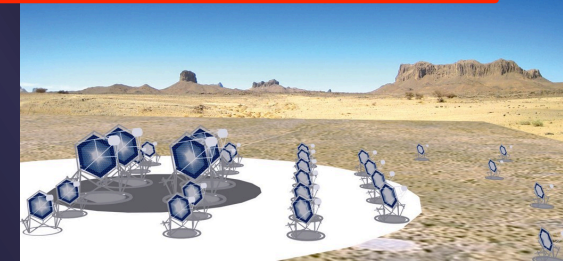
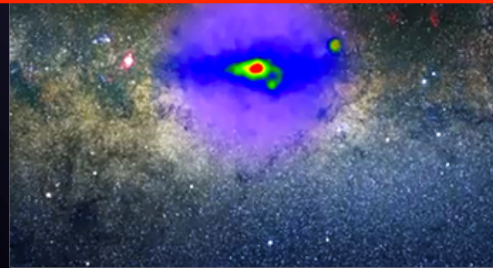
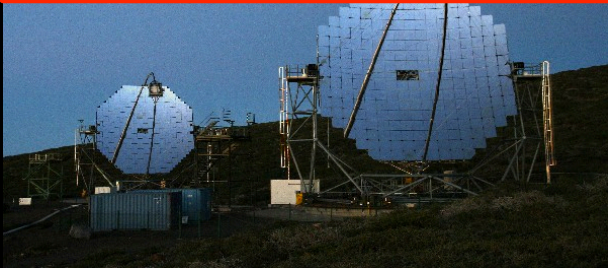
¡Observatorio **abierto** a la comunidad!

CTA desvelará el Universo violento **en mayor detalle**.

Junto con Fermi, permitirá testar los principales modelos de **materia oscura**.



# EDAD DORADA DE LA ASTROFÍSICA DE RAYOS GAMMA Y DE LAS BÚSQUEDAS DE MATERIA OSCURA



# RAYOS GAMMA: UNA VENTANA AL UNIVERSO MÁS VIOLENTO (y más oscuro)

**Miguel A. Sánchez Conde**

*[Investigador 'Talento' Comunidad de Madrid]*

Instituto de Física Teórica IFT UAM/CSIC & Departamento de Física Teórica  
Universidad Autónoma de Madrid

*Ciclo: El futuro de la física fundamental*

Residencia de estudiantes CSIC, Madrid, 14 de noviembre de 2017



*"Qué es entonces esta bóveda azul, que ciertamente existe y nos impide ver las estrellas durante el día"*

[Flammarion "L'Atmosphère: Météorologie Populaire" -- Paris, 1888]



# ¡Gracias!

¿Preguntas?  
¡Contáctame!

Miguel A. Sánchez-Conde  
[miguel.sanchezconde@uam.es](mailto:miguel.sanchezconde@uam.es)  
[www.miguelsanchezconde.com](http://www.miguelsanchezconde.com)