

EL UNIVERSO VIOLENTO (Y OSCURO) A LA LUZ DE LOS RAYOS GAMMA

Miguel A. Sánchez Conde

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

Noche Europea de los Investigadores
Sede Central CSIC, 30 septiembre 2022

EL UNIVERSO **VIOLENTO** (Y OSCURO) A LA LUZ DE LOS RAYOS GAMMA

Miguel A. Sánchez Conde

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

Noche Europea de los Investigadores
Sede Central CSIC, 30 septiembre 2022

EL UNIVERSO VIOLENTO (Y OSCURO) A LA LUZ DE LOS RAYOS GAMMA

Miguel A. Sánchez Conde

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

Noche Europea de los Investigadores
Sede Central CSIC, 30 septiembre 2022

EL UNIVERSO VIOLENTO (Y OSCURO) A LA LUZ DE LOS RAYOS GAMMA

Miguel A. Sánchez Conde

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

Noche Europea de los Investigadores
Sede Central CSIC, 30 septiembre 2022



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

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

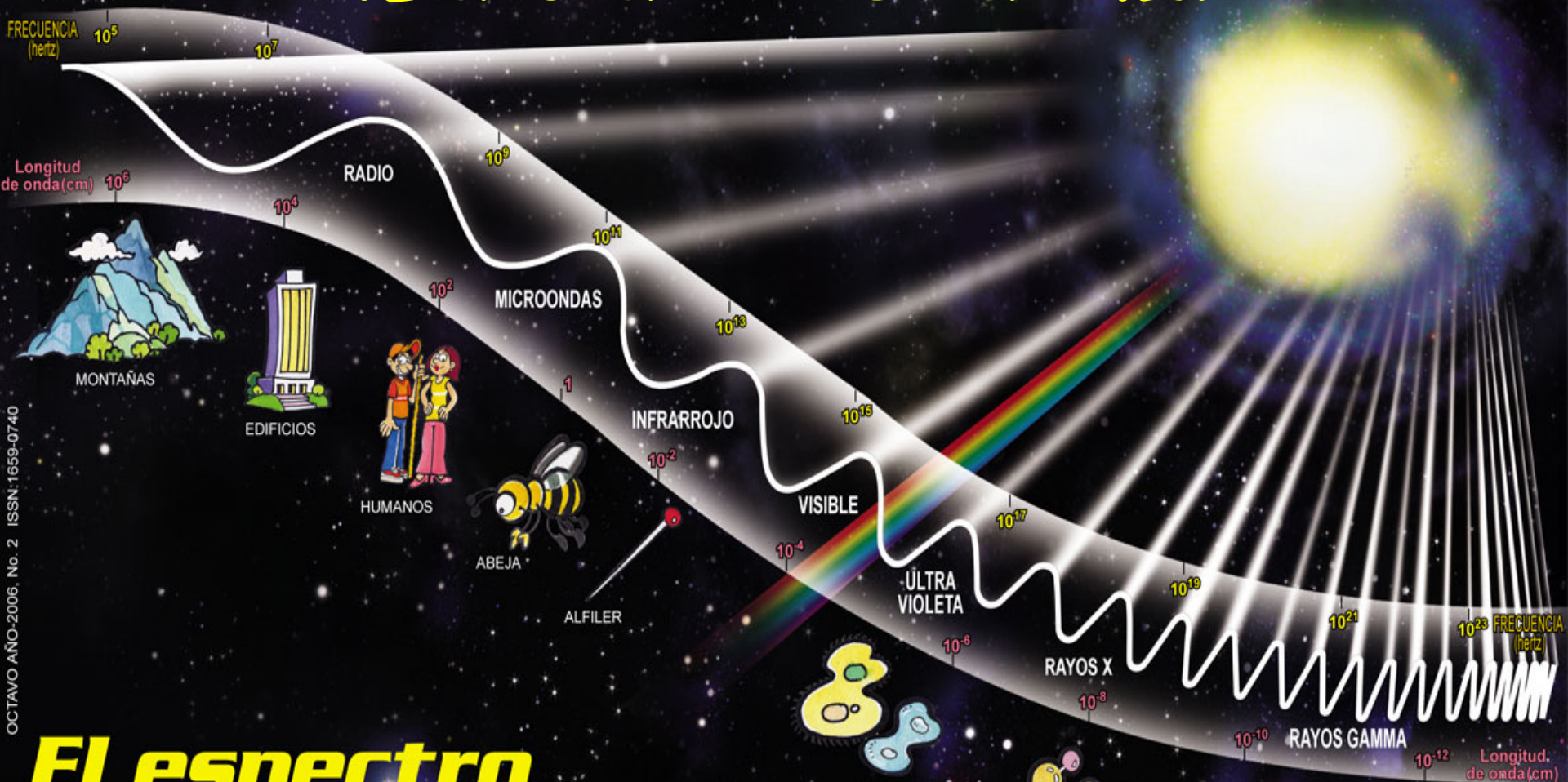
Esto no es algo nuevo...



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



¡La clave es la luz!



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

El espectro electromagnético



ESCALA

"Gafas" para todo tipo de luz ☺



Fermi, rayos gamma



MAGIC, rayos gamma



Spitzer, infrarrojo



James Webb, óptico e IR



INTEGRAL rayos X



GTC, óptico

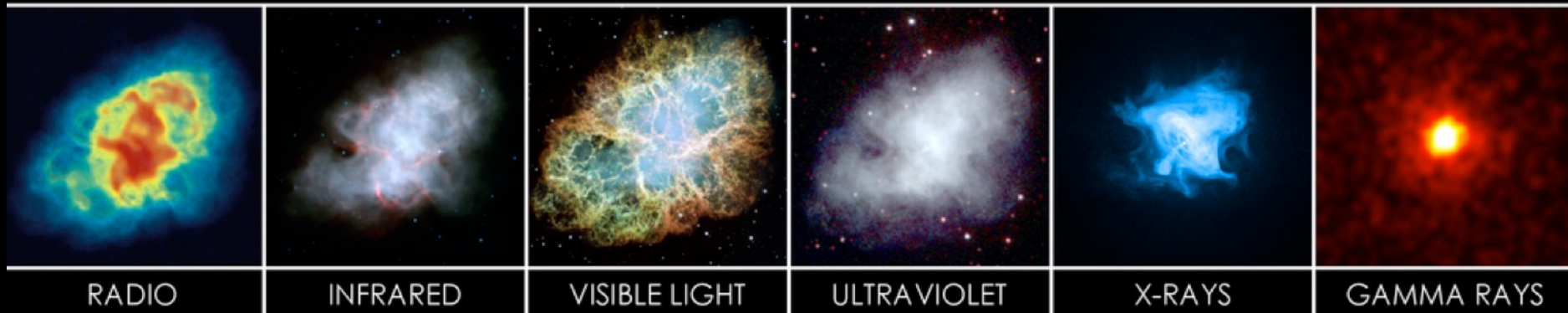


VLA, radio

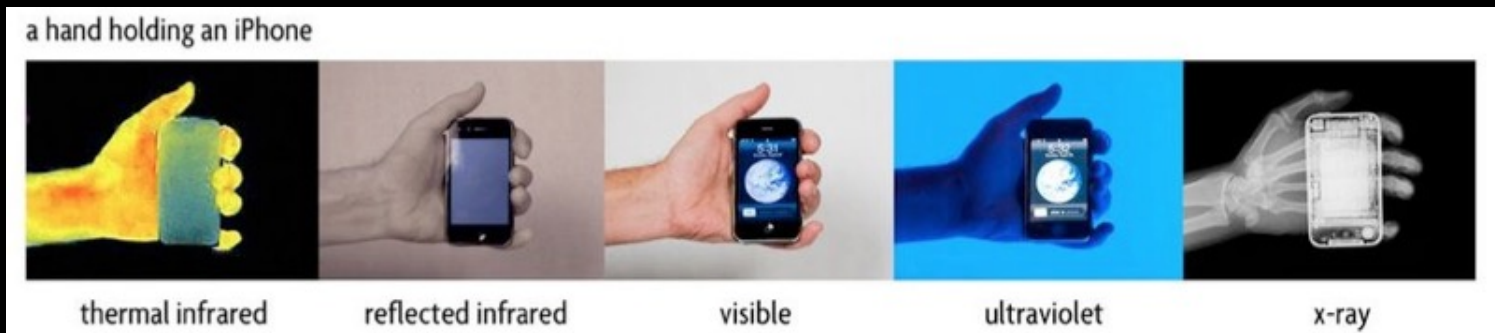
¡Y muchos más!

"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



Milky Way • X-Rays
ROSAT All Sky Survey



Milky Way • Visible Light
DSS2/Wikisky



Milky Way • Infrared
IRAS/NASA



Milky Way • Radio
Haslam et al

¿Con qué ojos observas el universo?

Pese a los progresos, quedan muchas incógnitas.

Hablaré de 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 4.500 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 red star. 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.



Todas las galaxias...

Miles de millones en el Universo observable.

... son sólo la punta del iceberg

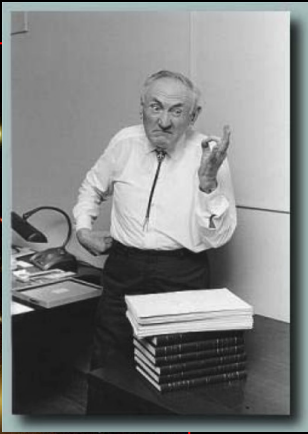


La materia visible
representa sólo una
pequeña fracción
del Universo.



Y todavía no sabemos de qué
está constituido el resto.

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 ,
- Δ the star-density,
- ρ 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,
- ϖ distance to the axis of rotation of the galactic system,
- δ $\partial \log \Delta / \partial \varpi$.

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 $\log \Delta(z)$.

LINDBLAD

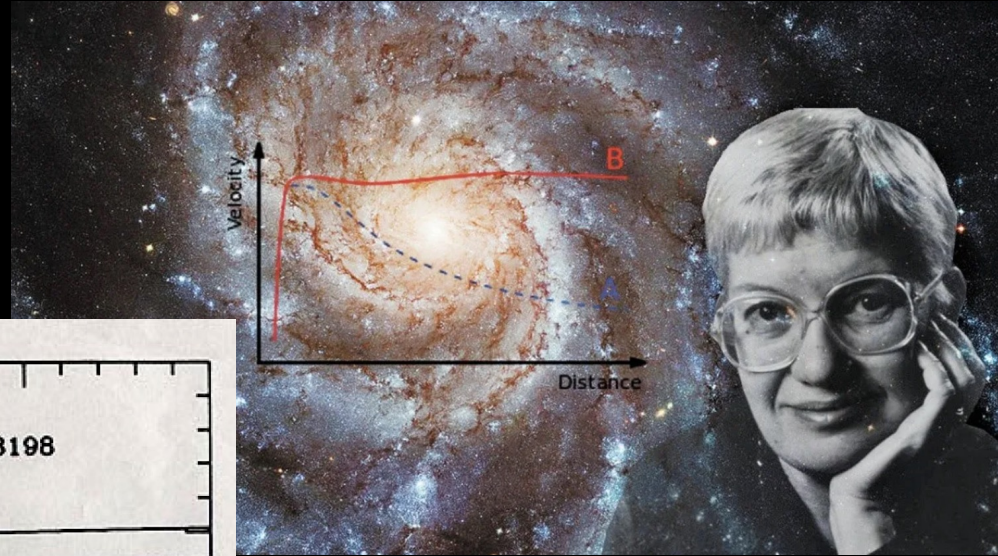
5. With preceding $K(z)$ between were eliminated Figure 4, good agreement values of magnitude the approach. The result absolute z from $z =$ it remains practically constant and equal to $3.5 \cdot 10^{-9}$.



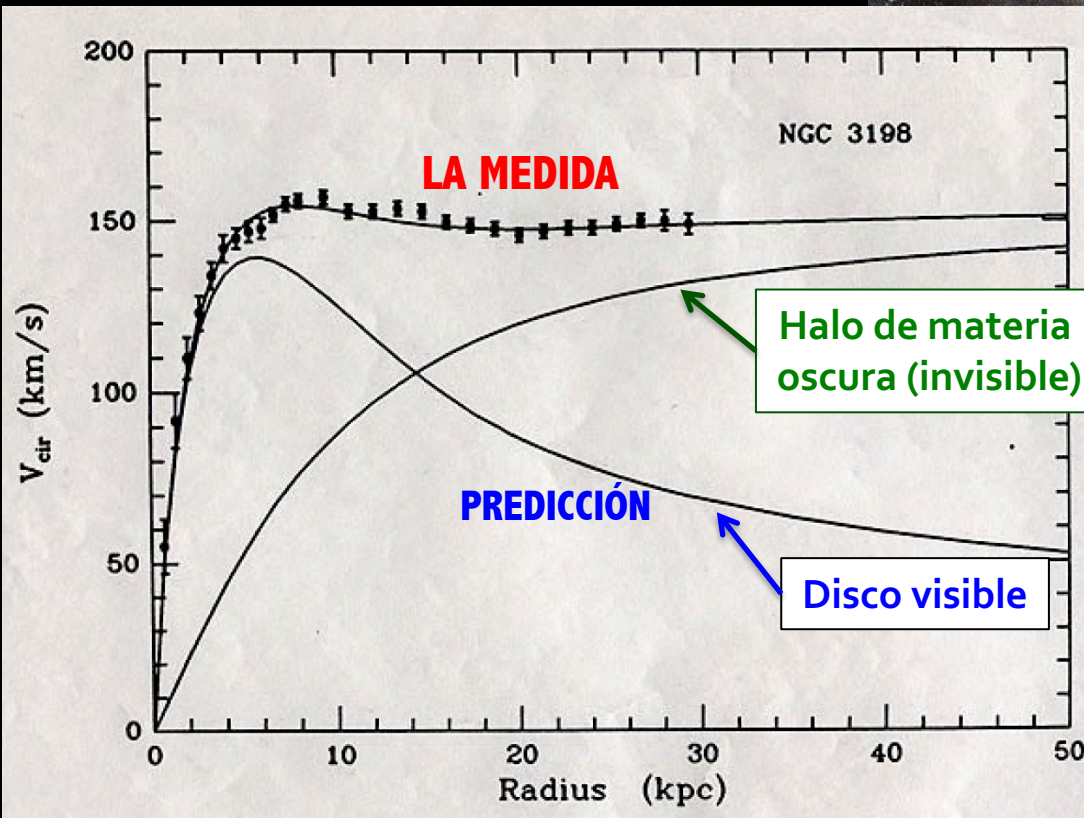
Rotación de galaxias espirales

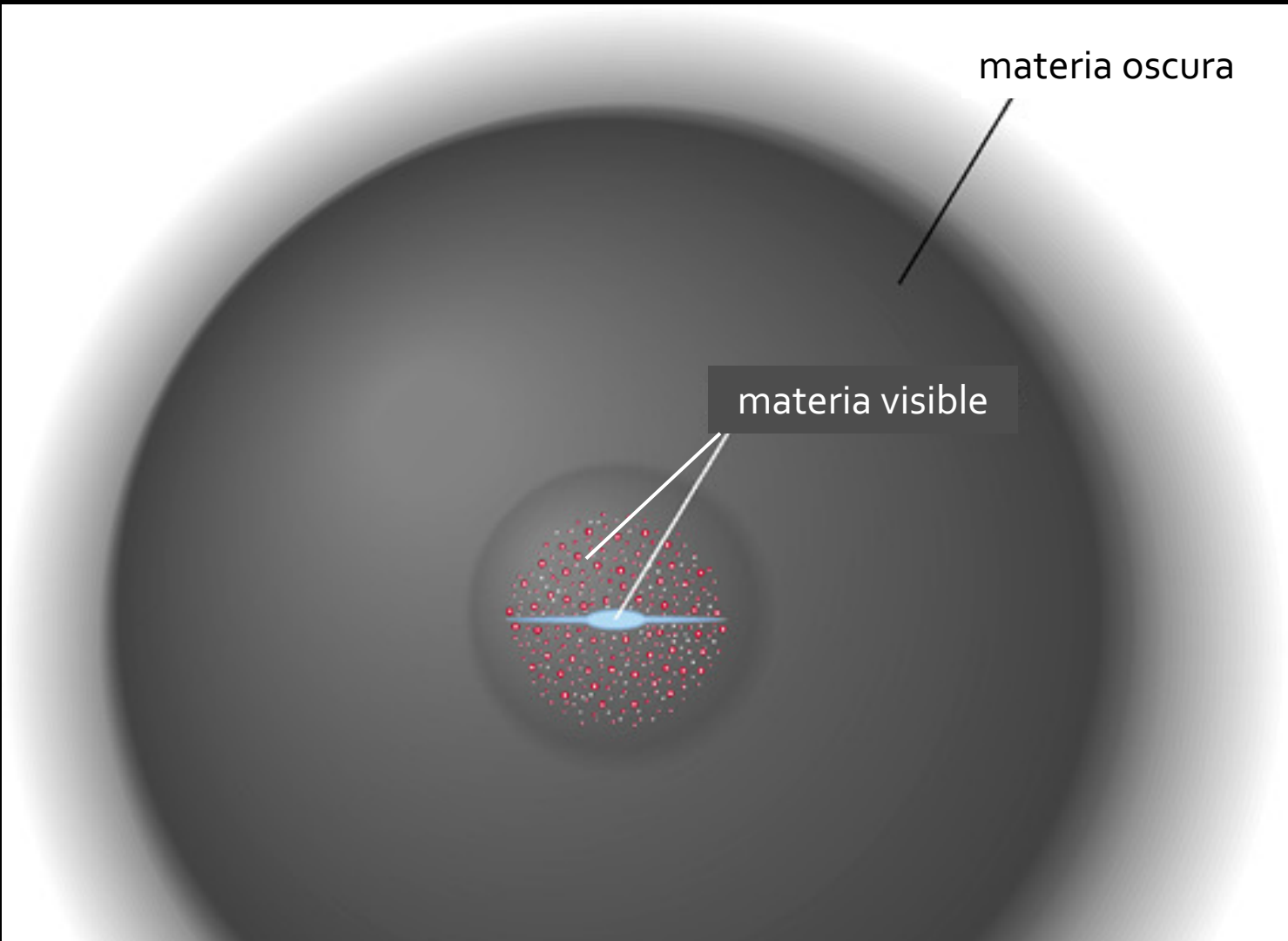
El Economista (2021)

La velocidad de rotación de galaxias espirales requiere una gran cantidad de materia (no visible) en las partes externas



Vera Rubin





materia oscura

materia visible

Vía Láctea:
Masa total ~ 10 veces la masa en estrellas
Tamaño total ~ 10 veces el tamaño visible

(ALGUNAS) EVIDENCIAS OBSERVACIONALES DE MATERIA OSCURA

Existen evidencias a todas las escalas.

Escalas galácticas

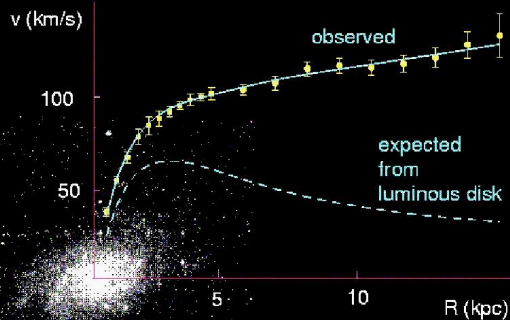
- a) Curvas de rotación.
- b) Lente gravitacional débil.
- c) Dispersión de velocidades de galaxias satélites.
- d) Dispersión de velocidades dentro de galaxias enanas.

Cúmulos de galaxias

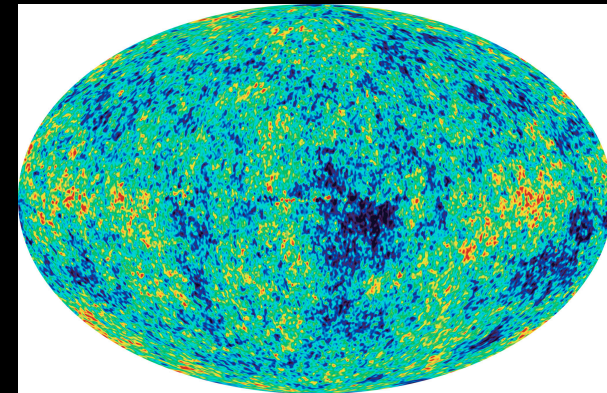
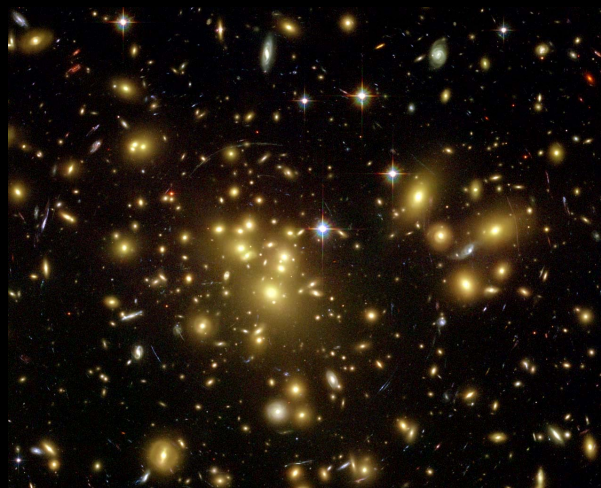
- a) Dispersión de velocidades de galaxias individuales.
- b) Lentes gravitacionales
- c) Velocidades peculiares.
- d) Emisión en rayos X.

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



El 'iceberg cósmico'

Materia visible (5%)

Materia oscura (27%)

Energía oscura (68%)



¿De qué podría estar hecha la materia oscura?

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

Propiedades

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

- Sin candidato viable en el 'Modelo Estándar' de Física de Partículas.
- Un montón de candidatos más allá del Modelo Estándar (**sólo teorías**)



¿De qué podría estar hecha la materia oscura?

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

Propiedades

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

- Sin candidato viable en el 'Modelo Estándar' de Física de Partículas.
- Un montón de candidatos más allá del Modelo Estándar (**sólo teorías**)

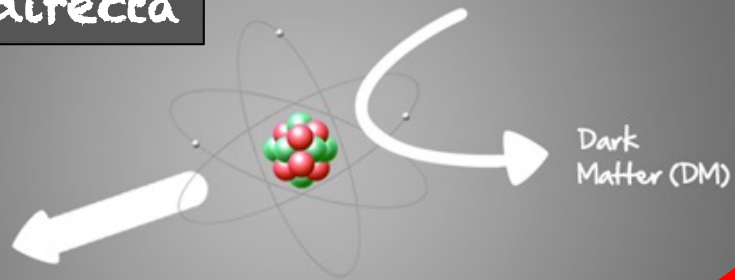


Búsquedas de materia oscura

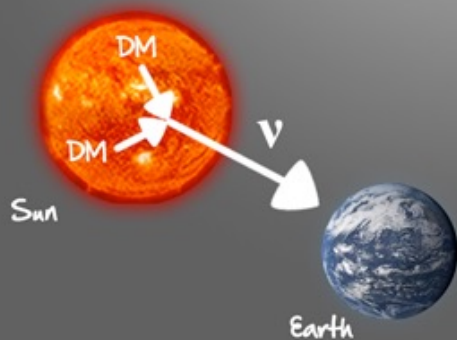


Estrategias de búsqueda de materia oscura (WIMPs)

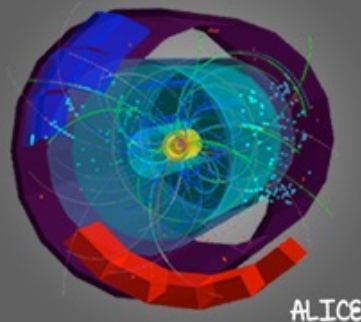
Detección directa



Detección indirecta



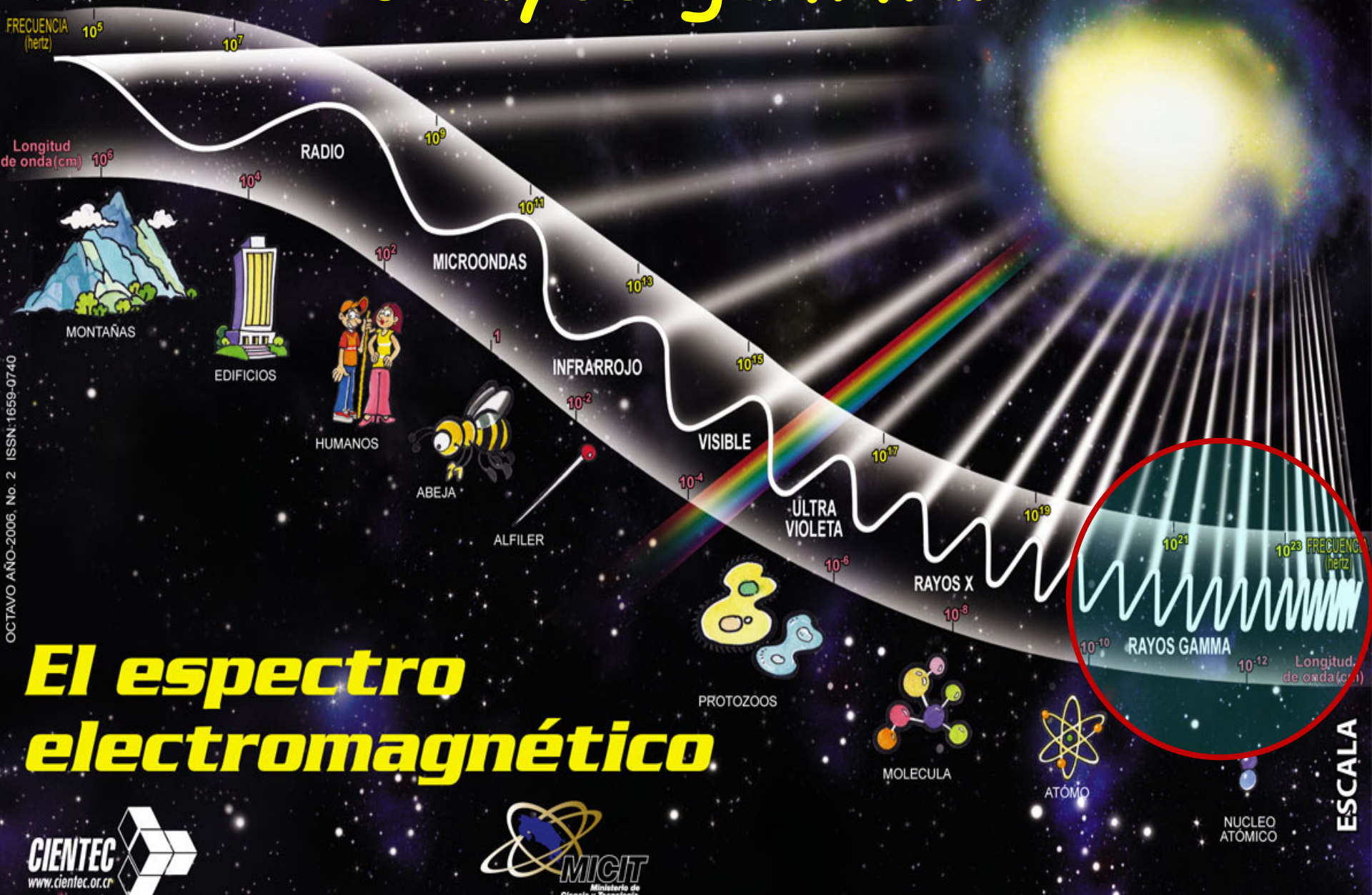
Producción directa en colisionadores



Los rayos gamma son uno de los productos de aniquilación de los WIMPs



¿Rayos gamma?



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

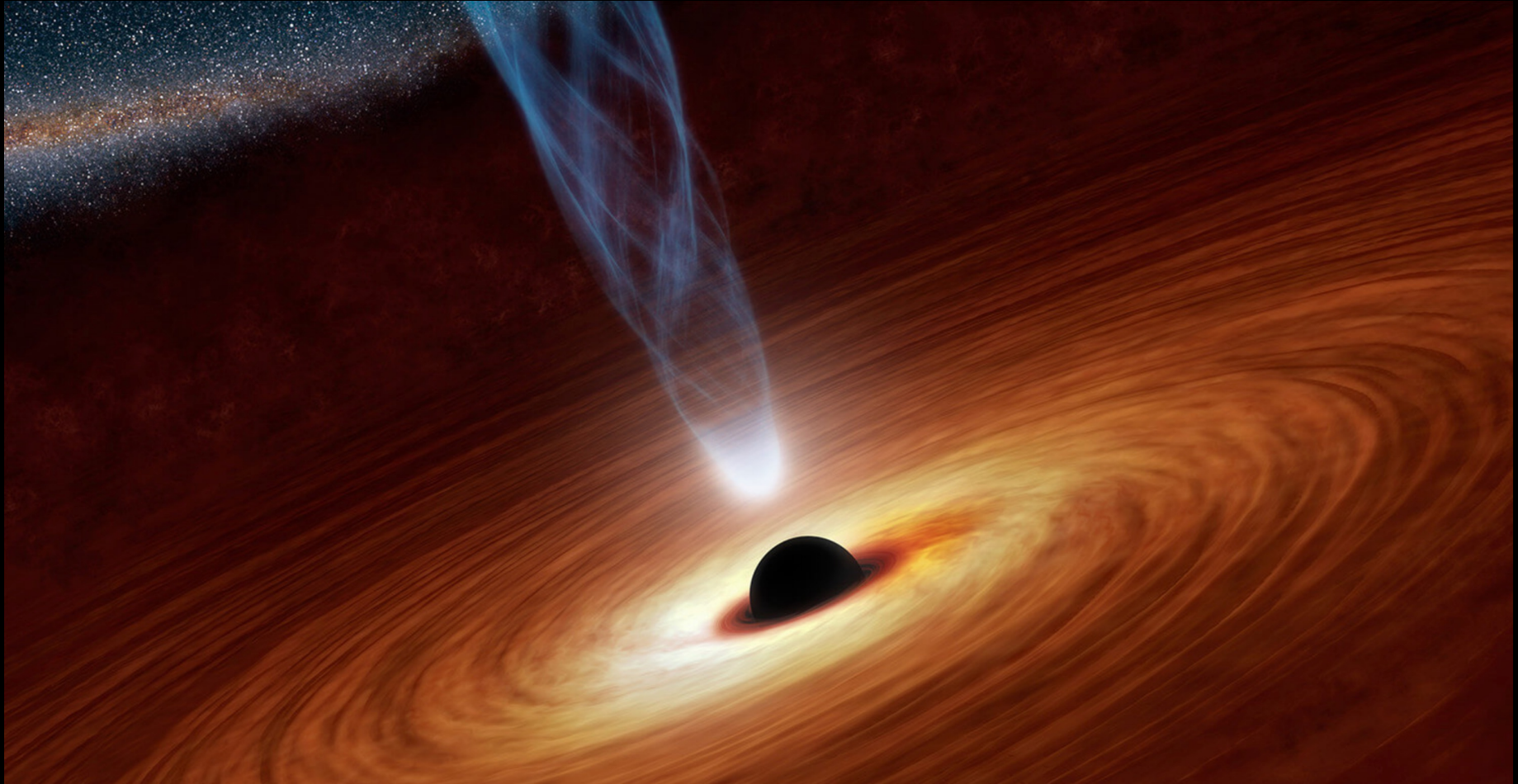
El espectro electromagnético



ESCALA

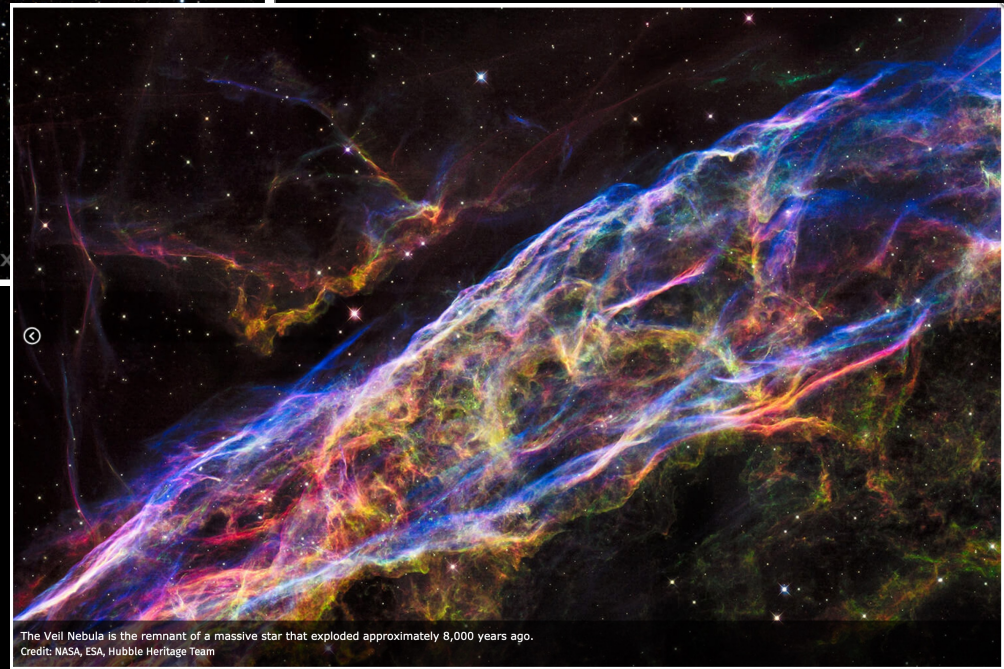
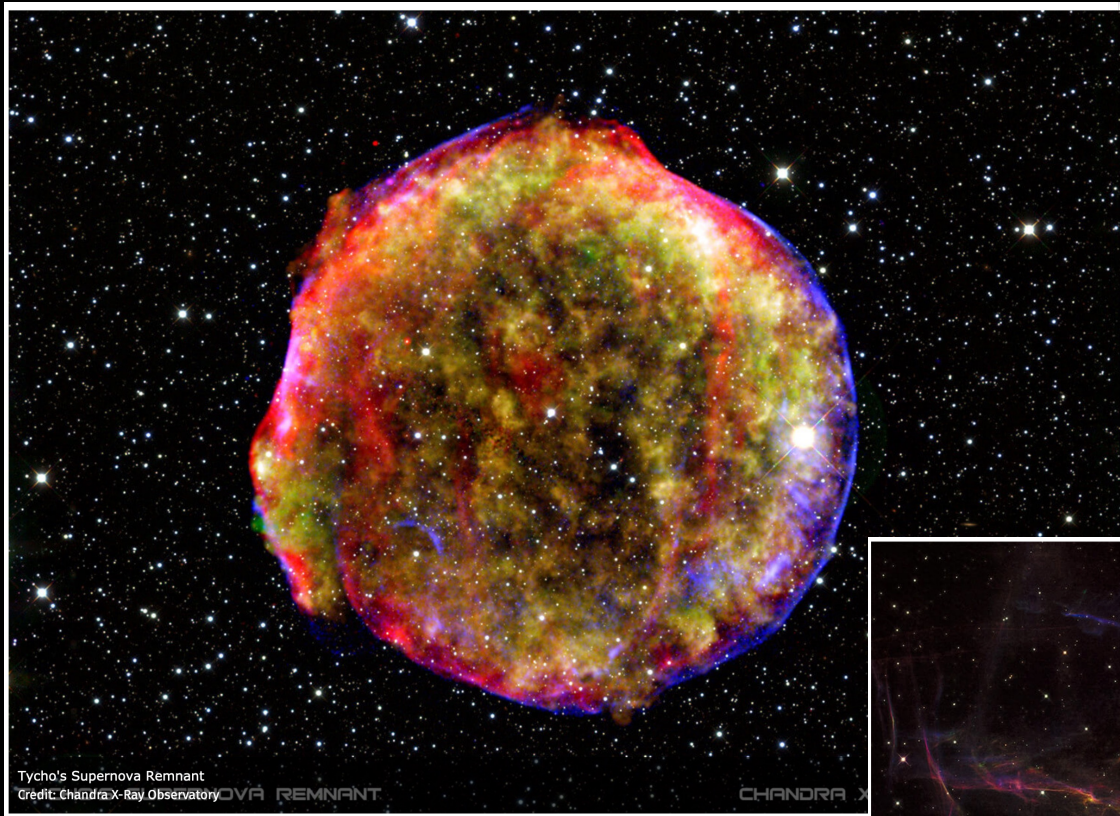
Sólo los fenómenos
más energéticos y violentos en el Universo
pueden generar **rayos gamma**.

Bestiario (I): agujeros negros

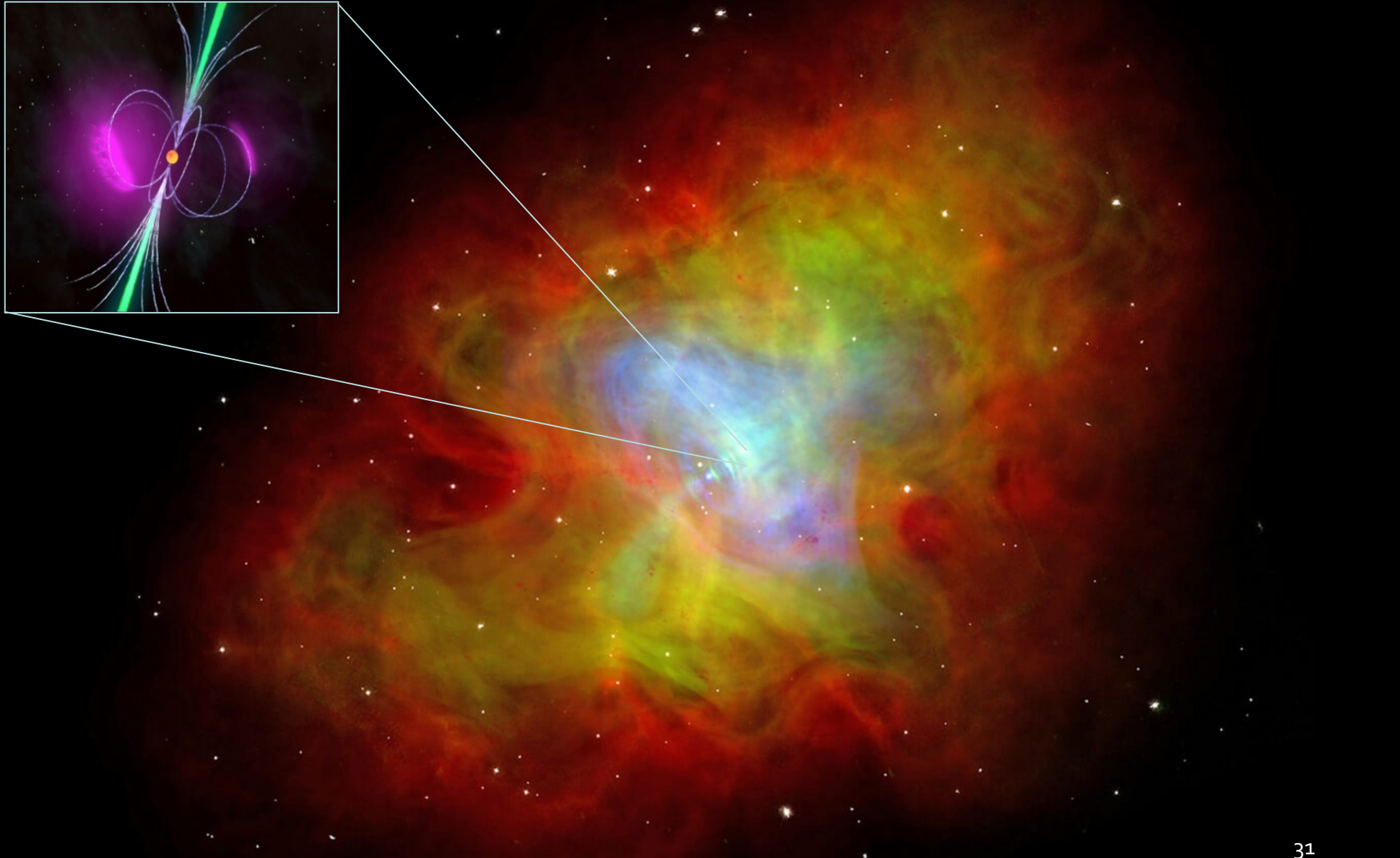
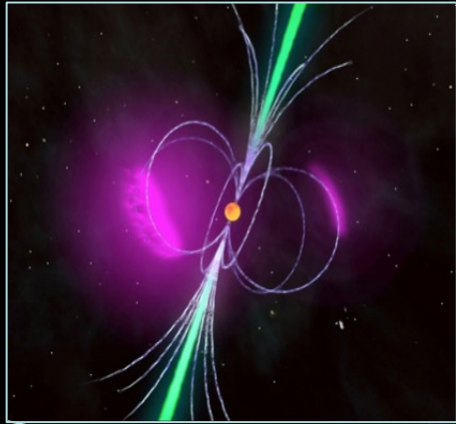


NASA/JPL-Caltech

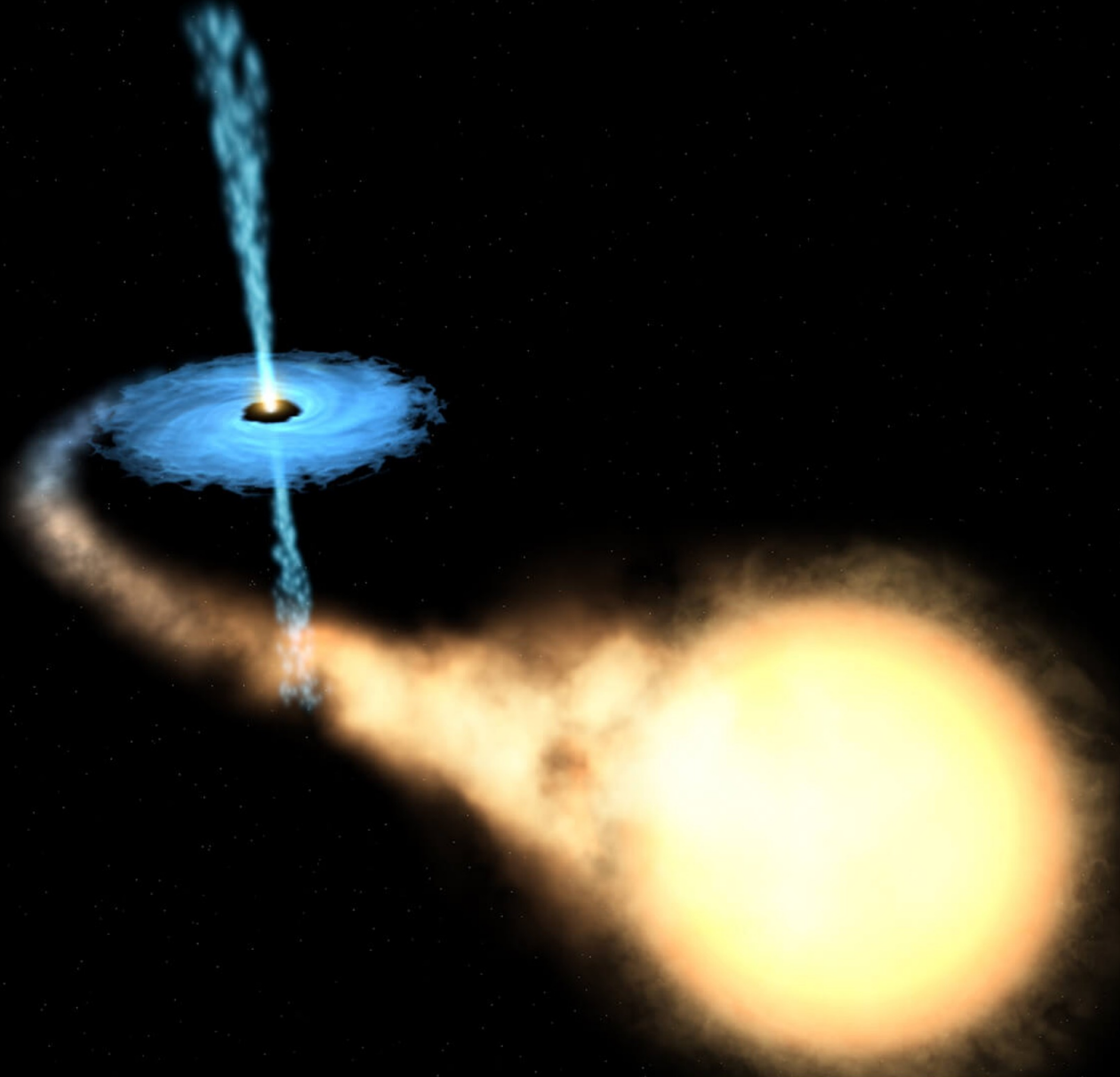
Bestiario (II): supernovas



Bestiario (III): púlsares



Bestiario (IV): sistemas binarios



Bestiario (V): galaxias activas



Bestiario (VI): ¿aniquilación de materia oscura?



Biblioteca Nacional de Suecia


La atmósfera: el escudo terrestre contra los rayos gamma



Cazando gammas en el espacio: El satélite Fermi

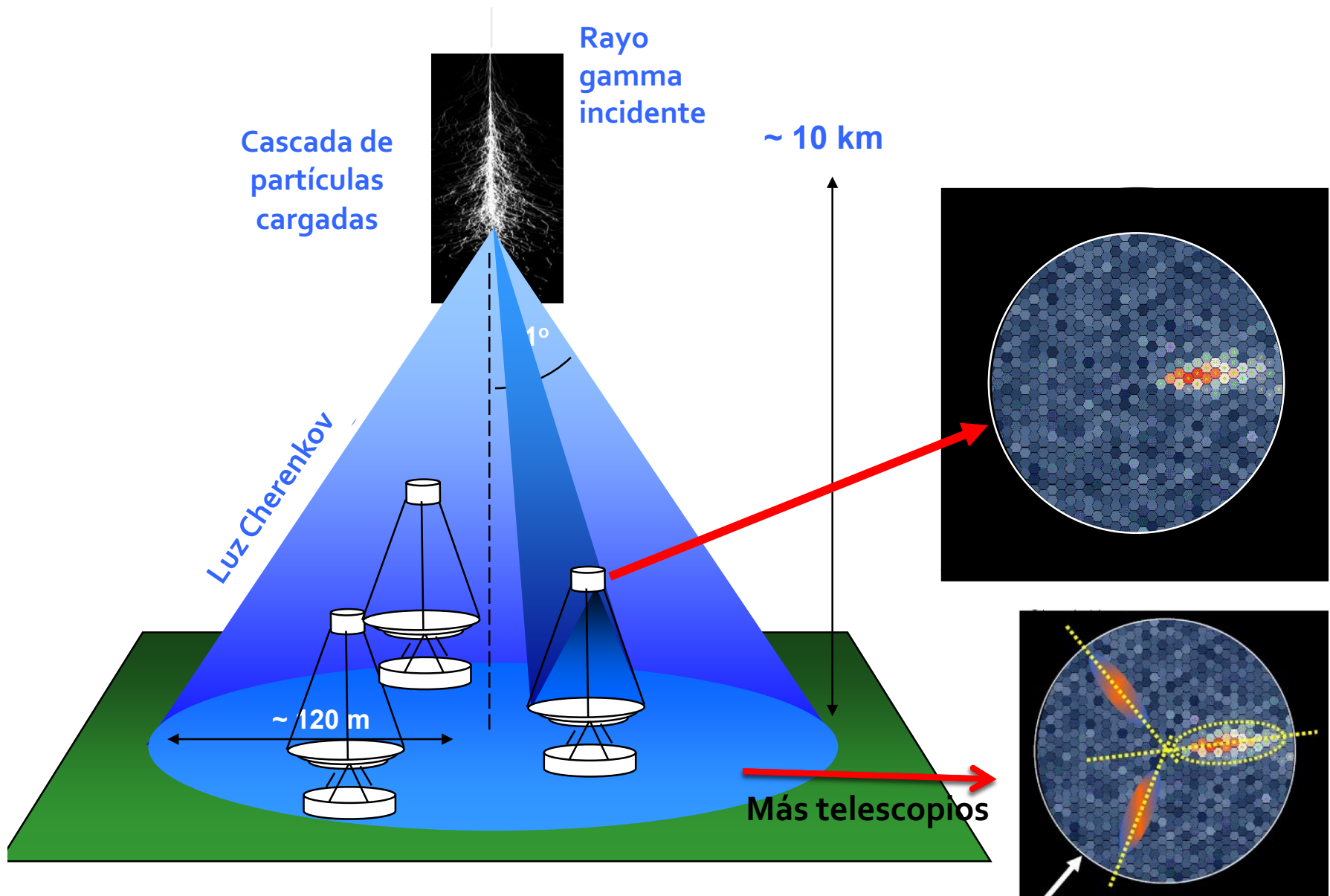
- Lanzado en 2008 por NASA, con colaboración internacional.
- Observa **todo el cielo** en sólo 3 horas con una sensibilidad sin precedentes.
- Del tamaño de un coche pequeño, ¡pero consume como una tostadora!
- Datos **públicos** en ~24 horas.



A large, multi-faceted reflecting telescope (MAGIC-I) is shown at night, illuminated by a bright light source. The telescope's primary mirror is composed of many small, rectangular segments. A secondary mirror is suspended from the top of the primary mirror by a long, curved support structure. The telescope is mounted on a complex metal frame. In the background, a dark, starry sky is visible, with a few bright stars and a faint nebula. The ground is dark, and a small white dome is visible in the distance.

**Pero...
¡También
desde tierra!**

Los "telescopios Cherenkov"



Observatorios actuales de rayos gamma



Fermi

[>2008]



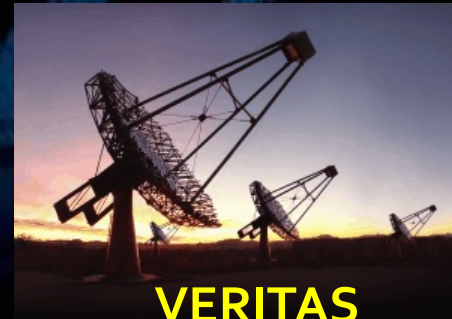
MAGIC

[>2003]



HESS

[>2002]



VERITAS

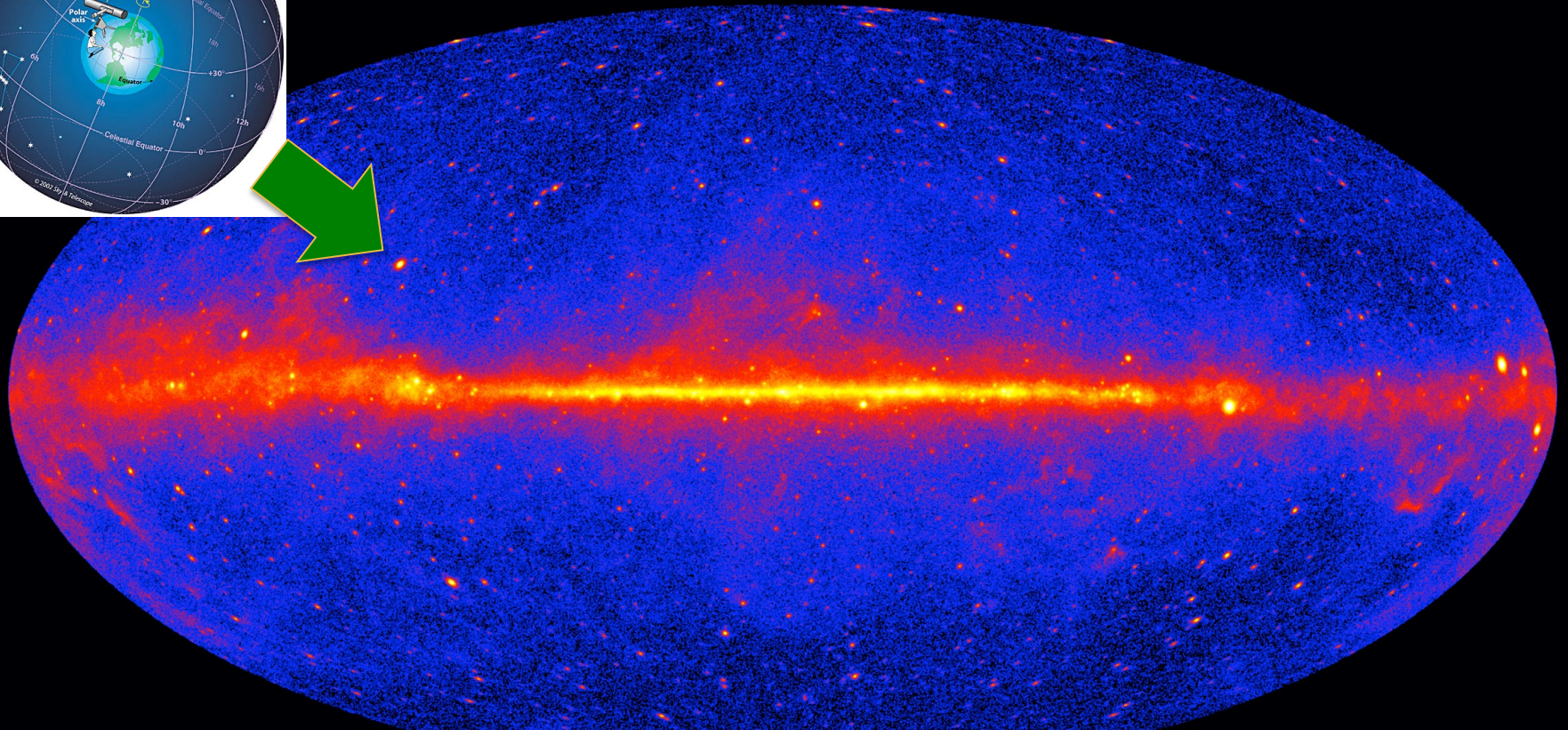
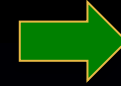
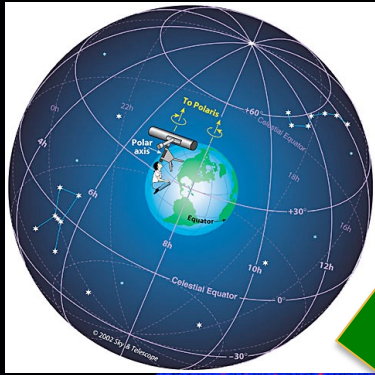
[>2006]



HAWC

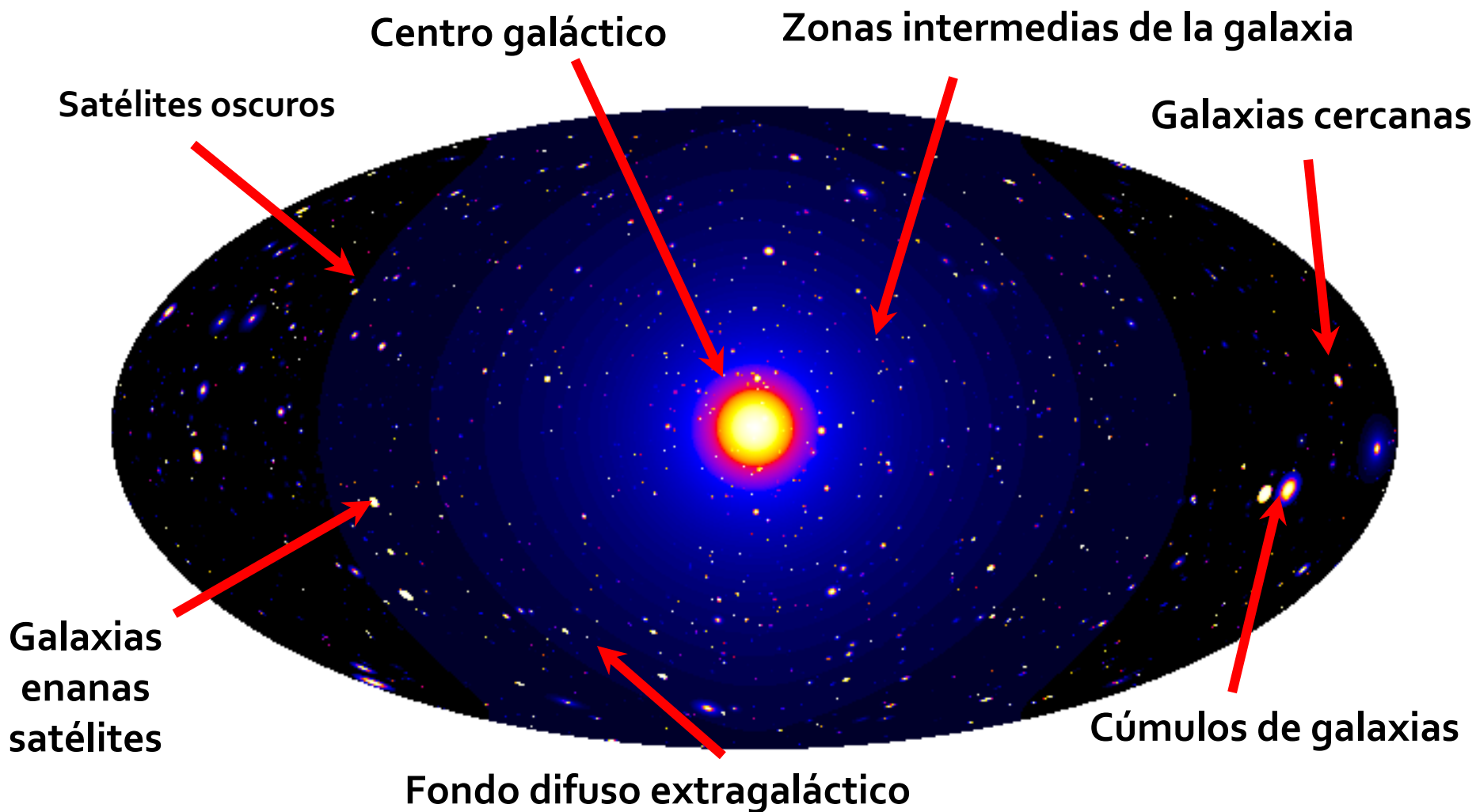
[>2015]

El cielo en rayos gamma



¡cerca de 7.000 objetos en la actualidad!

Búsquedas de materia oscura con rayos gamma



Búsquedas de materia oscura con rayos gamma

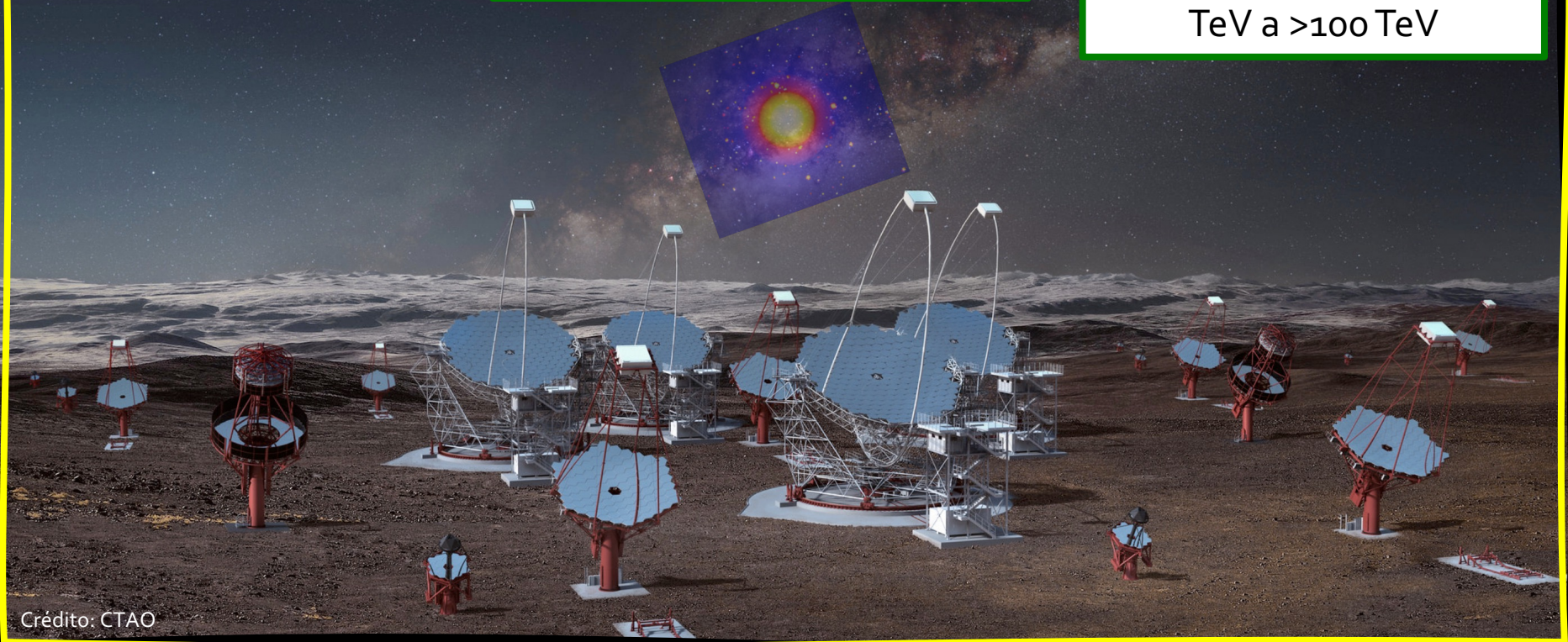


Futuro: Cherenkov Telescope Array (CTA)

Telescopios de 23 m
Menor energía
20-200 GeV

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

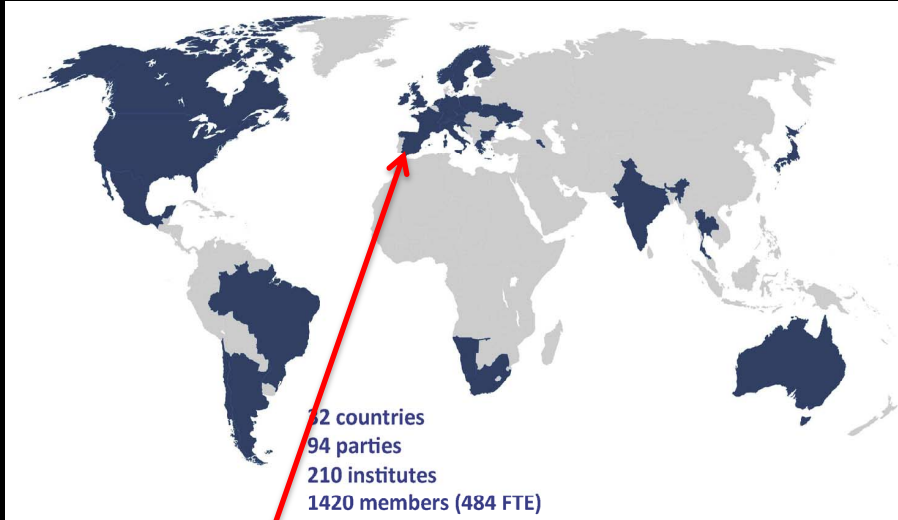
Telescopios de ~4-6 m
Energías más altas
TeV a >100 TeV



Crédito: CTAO

CTA: la revolución gamma

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



España es un socio capital.
Albergamos CTA-Norte.



Inauguración del primer telescopio en 2018 en La Palma.
¡CTA totalmente operativo en una escala de unos pocos años!

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

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





*"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]

EL UNIVERSO VIOLENTO (Y OSCURO) A LA LUZ DE LOS RAYOS GAMMA

Miguel A. Sánchez Conde

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

Noche Europea de los Investigadores
Sede Central CSIC, 30 septiembre 2022

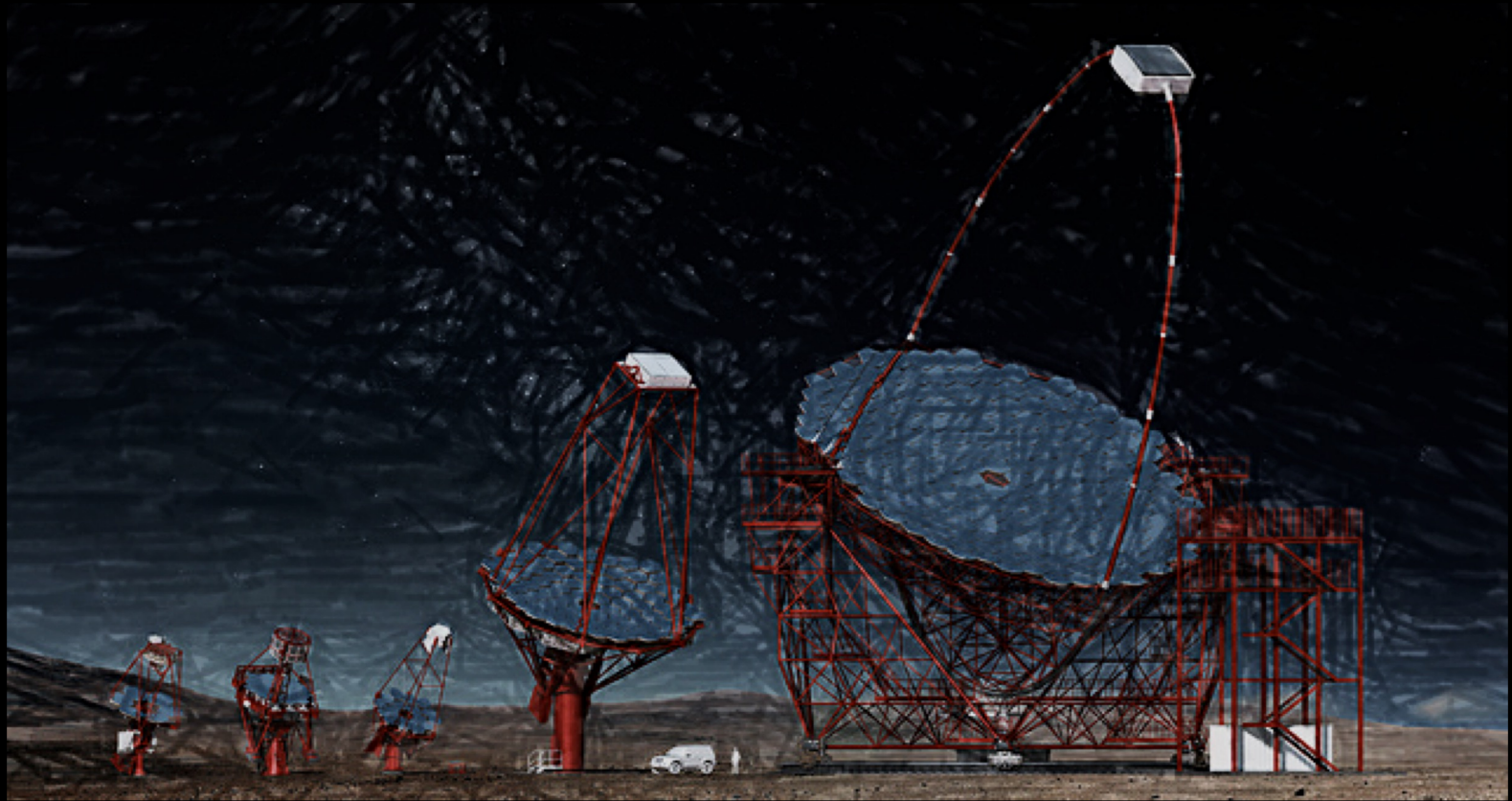
¡Gracias!

¿Más preguntas?
¡Contáctame!

Miguel A. Sánchez-Conde

miguel.sanchezconde@uam.es

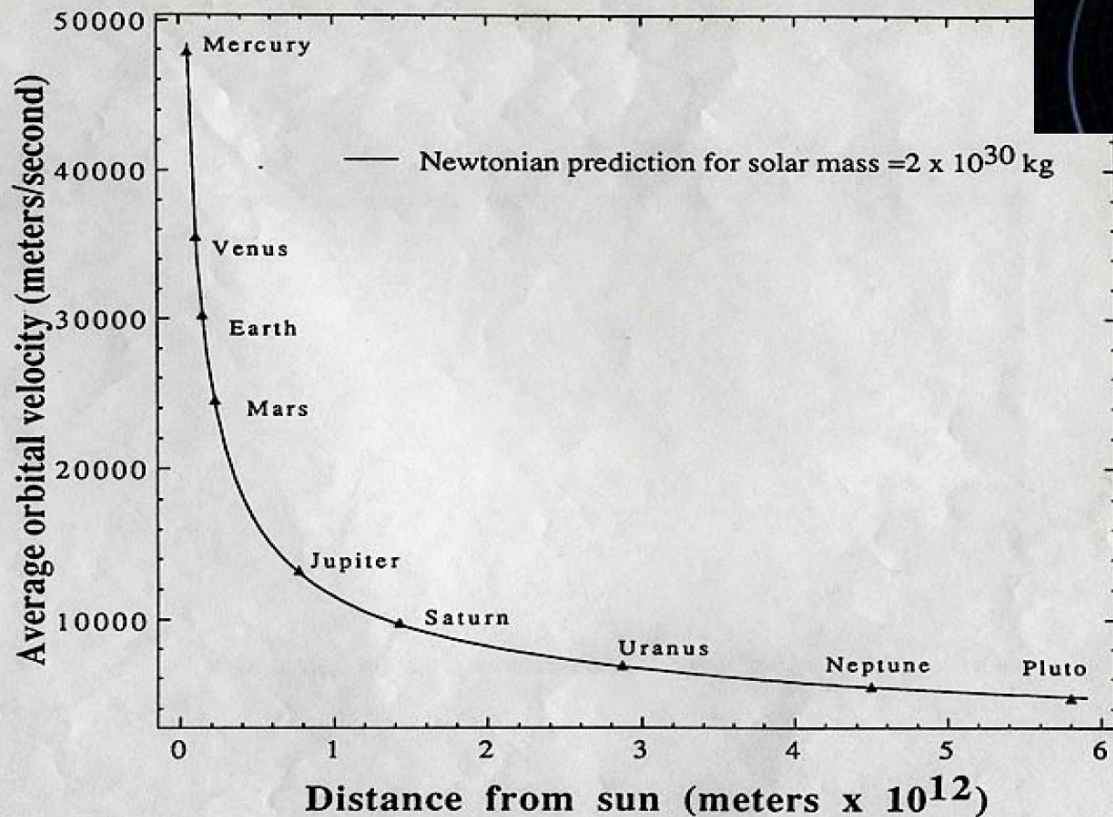
<https://projects.ift.uam-csic.es/damasco/>



backup slides

Uso del movimiento para medir la masa

Viejo argumento muy usado en Astrofísica



Fuerza gravitación fuerza centrífuga

$$G \frac{mM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$M(R) = \frac{V_{\text{rot}}^2 R}{G}$$

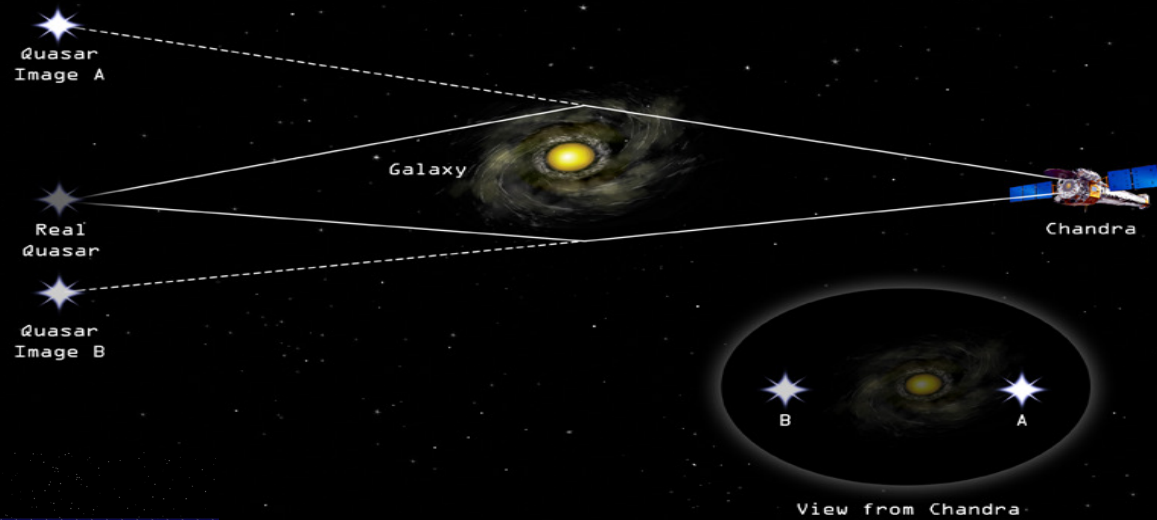
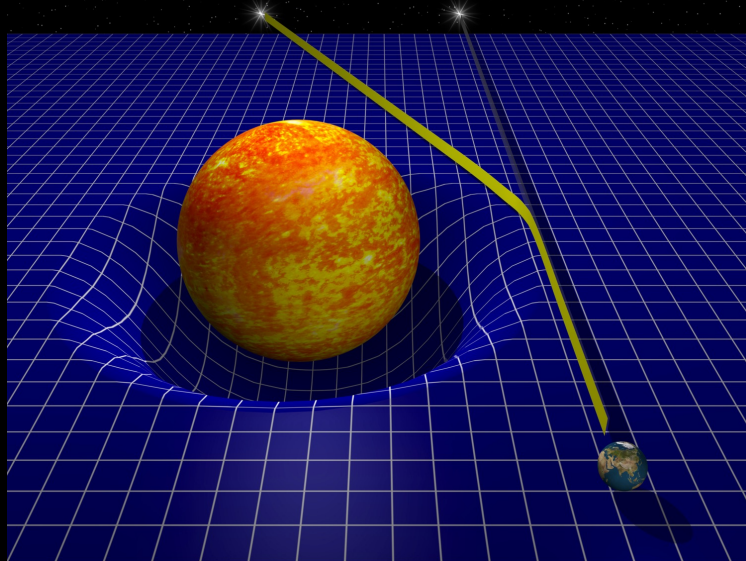
Lentes gravitacionales

Múltiples imágenes de una misma fuente debido a la **curvatura de la luz** en el pozo gravitacional del objeto lente.

Predicción GR.

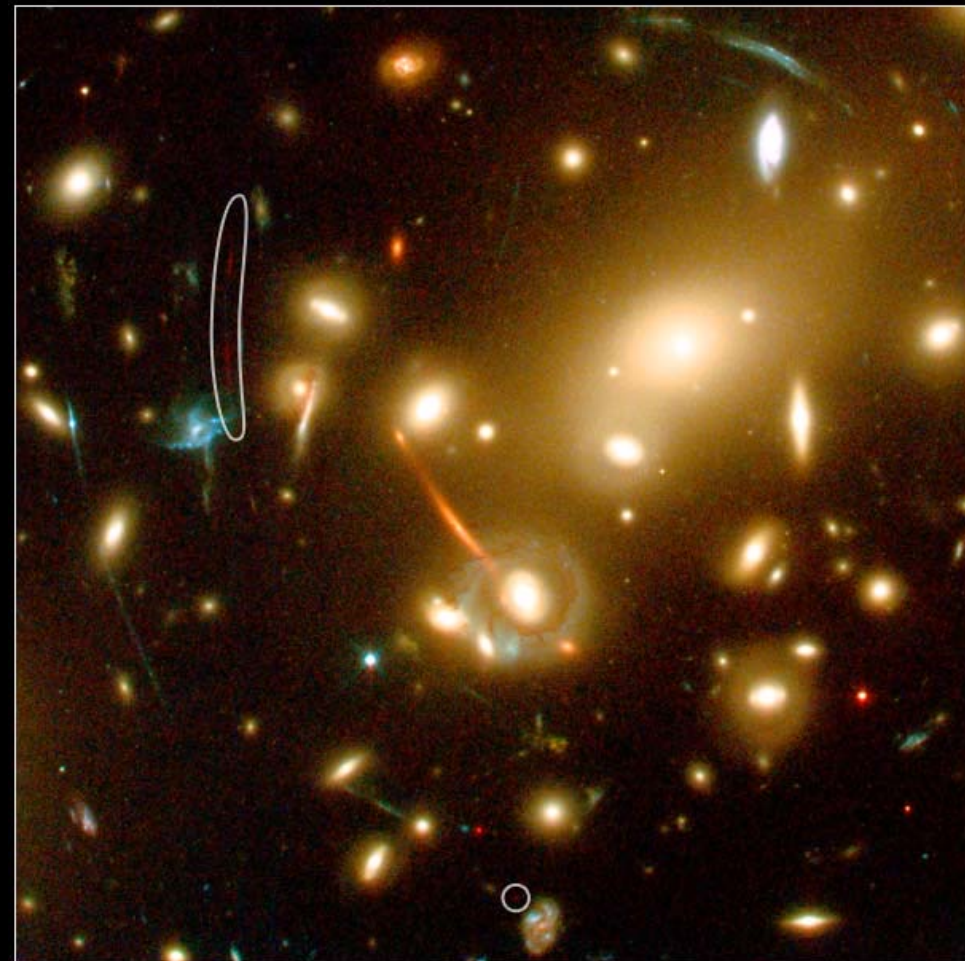
$$\theta = \frac{4GM}{rc^2}$$

Real Observed

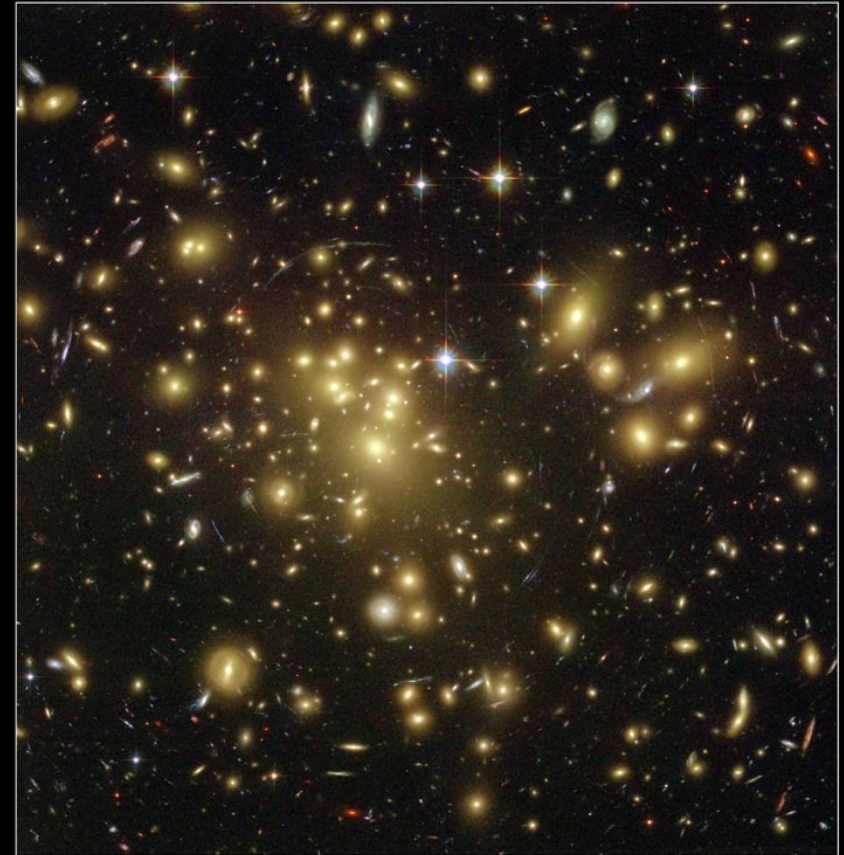


Un ejemplo: Lente gravitacional en cúmulos de galaxias

Distant Galaxy Lensed by Cluster Abell 2218 HST • WFPC2 • ACS



ESA, NASA, J.-P. Kneib (Caltech/Observatoire Midi-Pyrénées) and R. Ellis (Caltech) STScI-PRC04-08

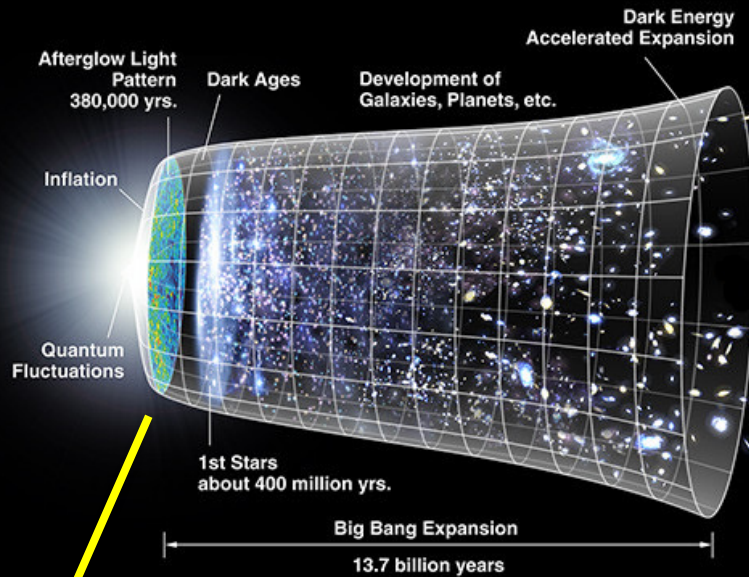


Galaxy Cluster Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, N. Benítez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA STScI-PRC03-01a

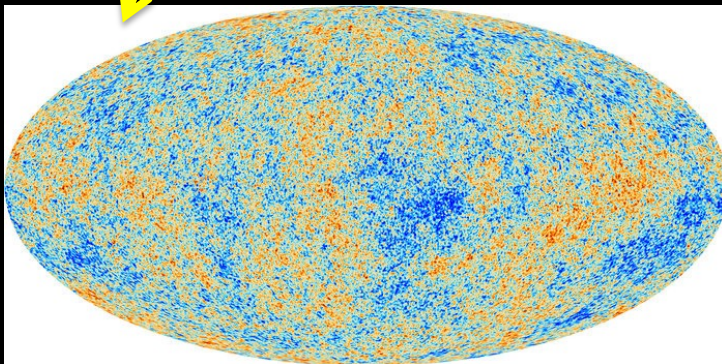
Nos permite “pesar” el objeto con mucha precisión.

El Fondo Cósmico de Microondas (CMB)



La radiación más distante jamás observada: primera luz en el Universo

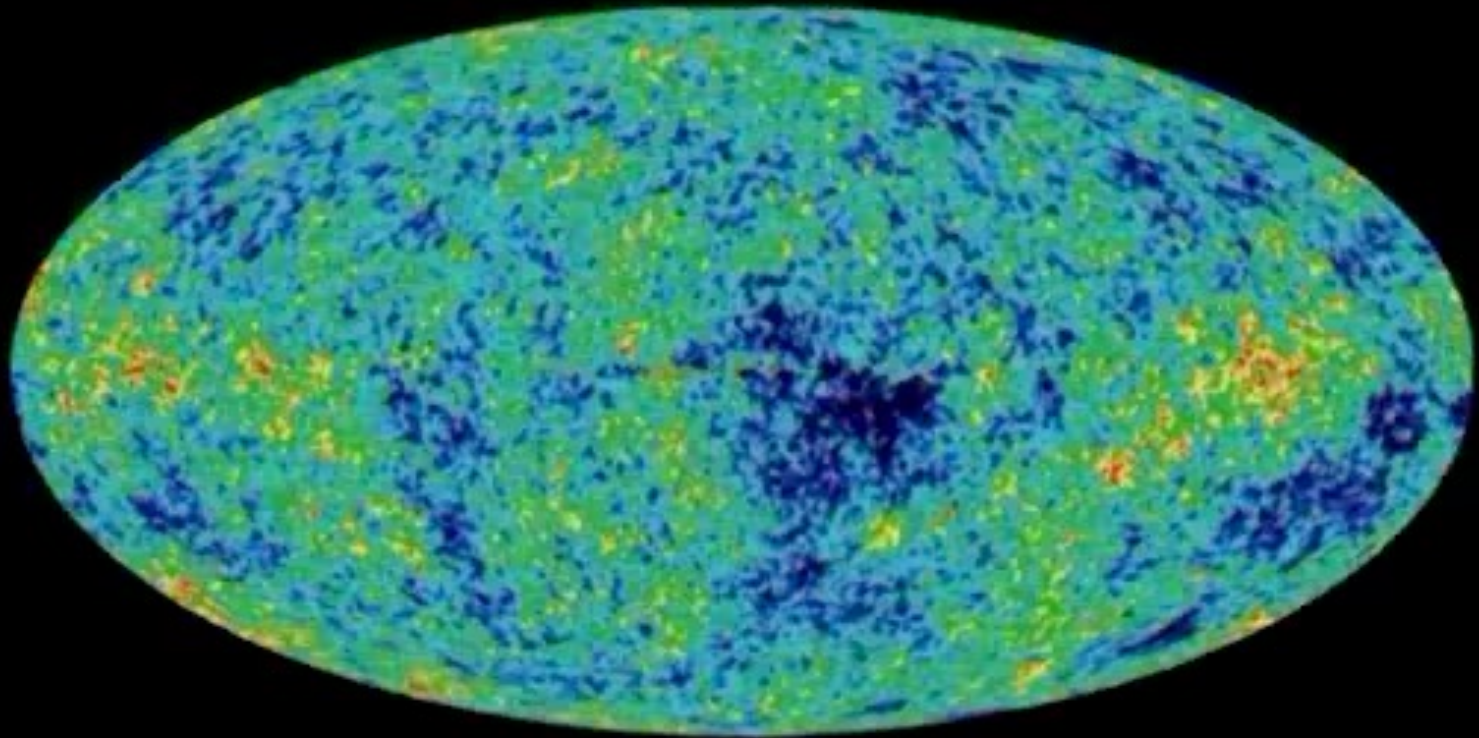
Debido a la expansión del Universo → 2.73 K actualmente



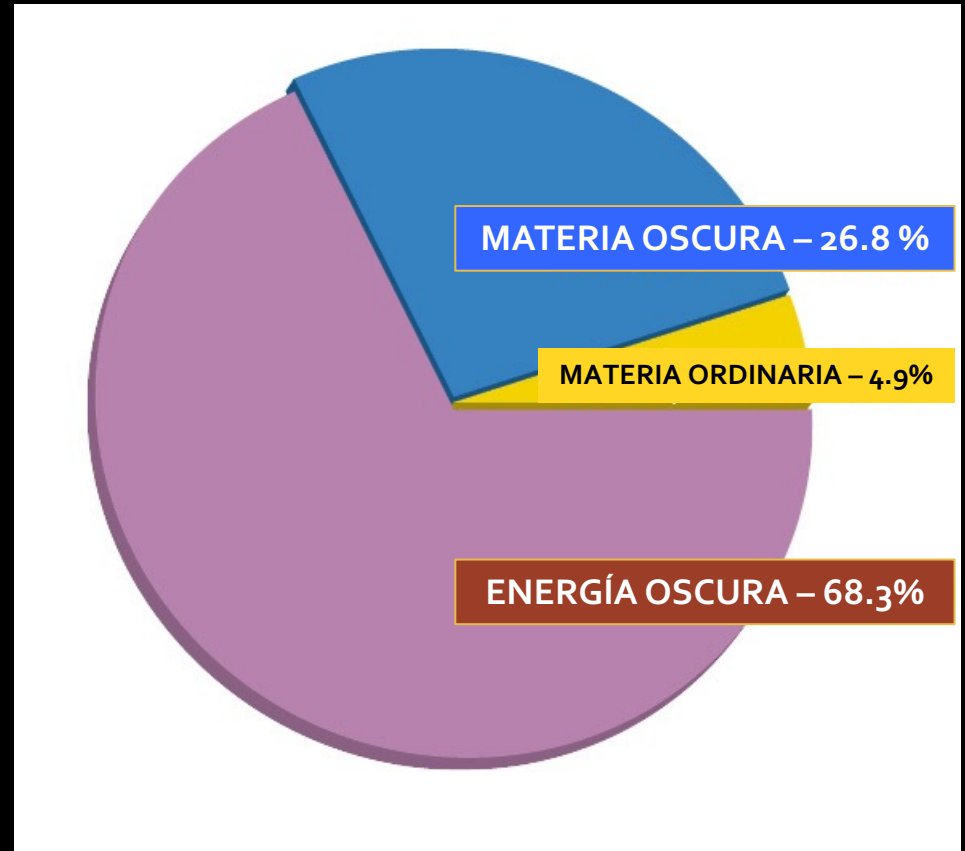
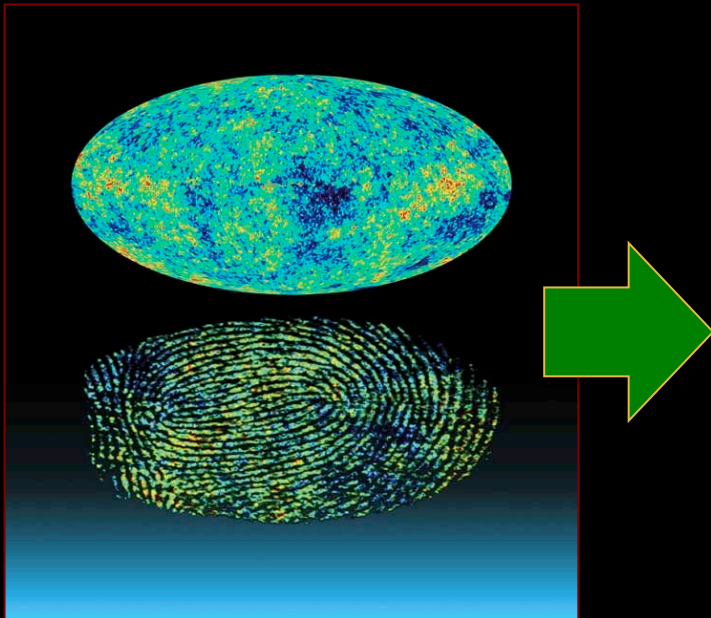
NASA/WMAP Science Team

Planck collab. (2013)

El Fondo Cósmico de Microondas (CMB)

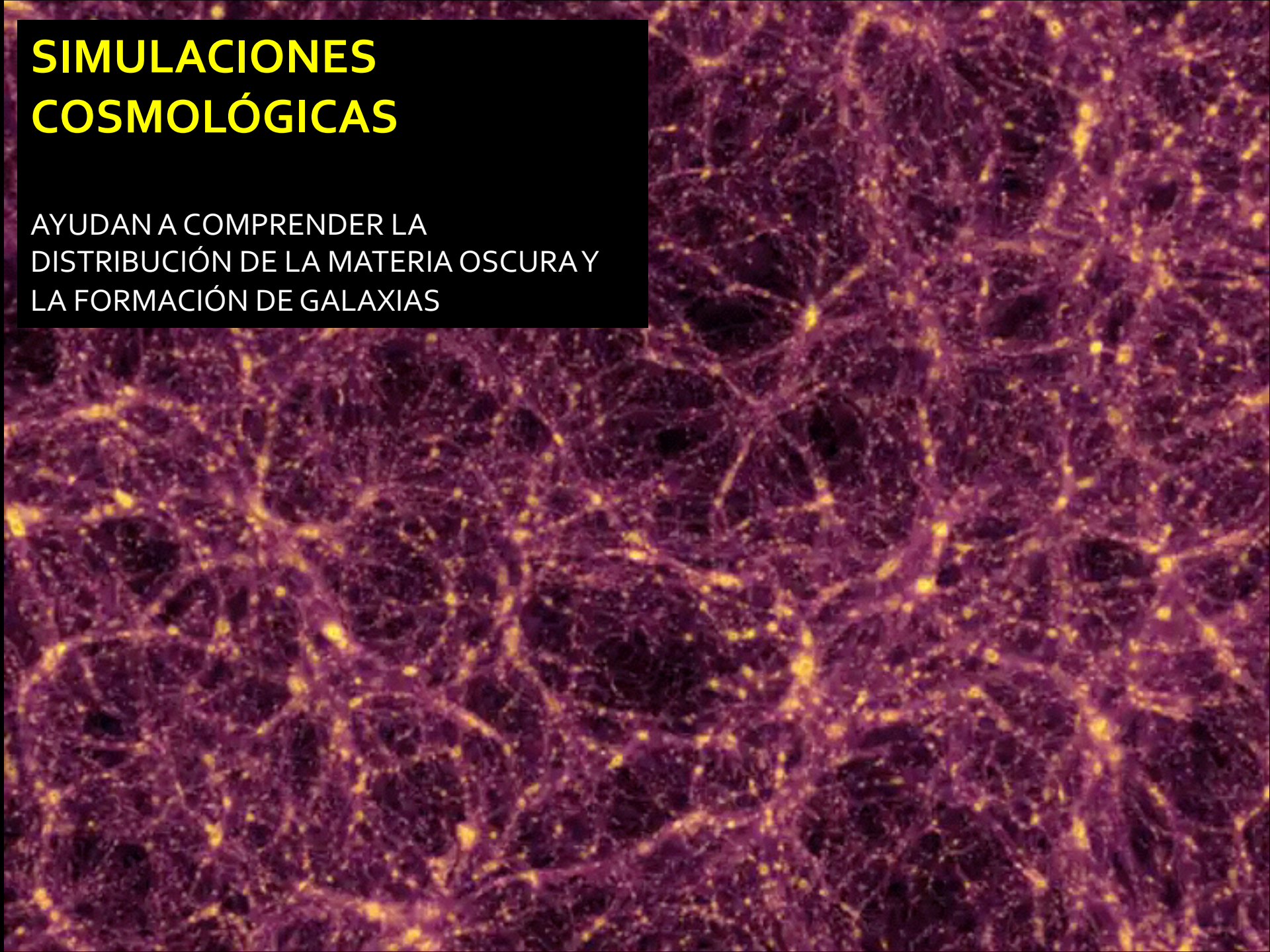


El pastel cósmico



SIMULACIONES COSMOLÓGICAS

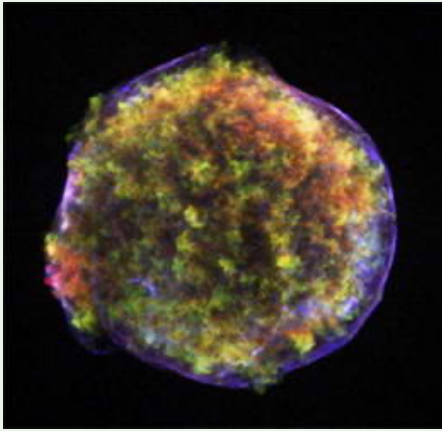
AYUDAN A COMPRENDER LA
DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA OSCURA Y
LA FORMACIÓN DE GALAXIAS



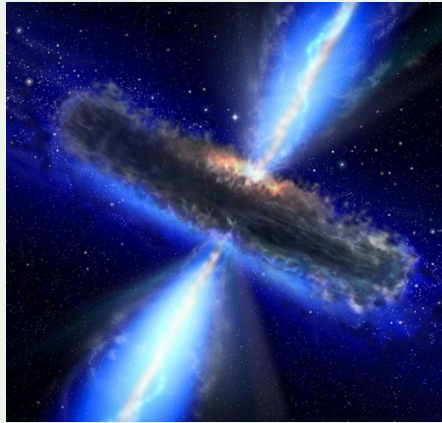
SIMULACIONES COSMOLÓGICAS:

Herramienta para guiar las búsquedas de materia oscura

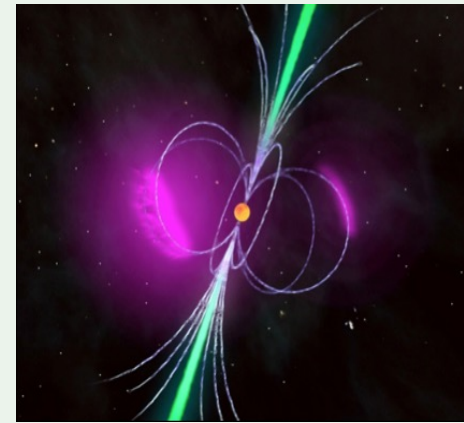
¿Qué fenómenos astrofísicos pueden generar rayos gamma?



Explosiones de supernova



Acreción de material



Campos magnéticos muy intensos

**¡SÓLO LOS OBJETOS
MÁS ENERGÉTICOS Y 'VIOLENTOS'!**

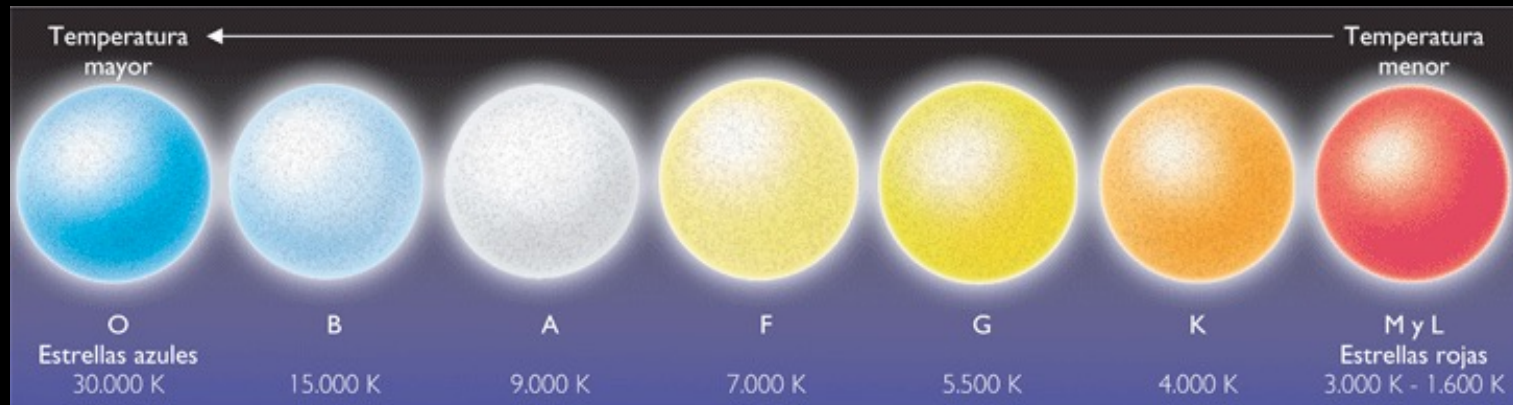
Emisión térmica... ¿o qué más?



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.



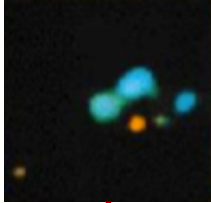
- Máxima temperatura térmica ~ varios millones de grados...
- Pero vemos luz que “necesitaría” del equivalente a 100.000 millones de grados!
- **Procesos no térmicos** aceleran electrones a velocidades incluso mayores

Rayos gamma: una ventana al universo más violento

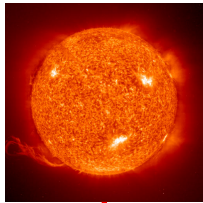
Nebulosa oscura



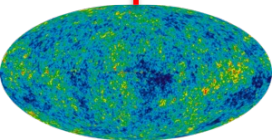
Guarderías estelares



Nuestro sol



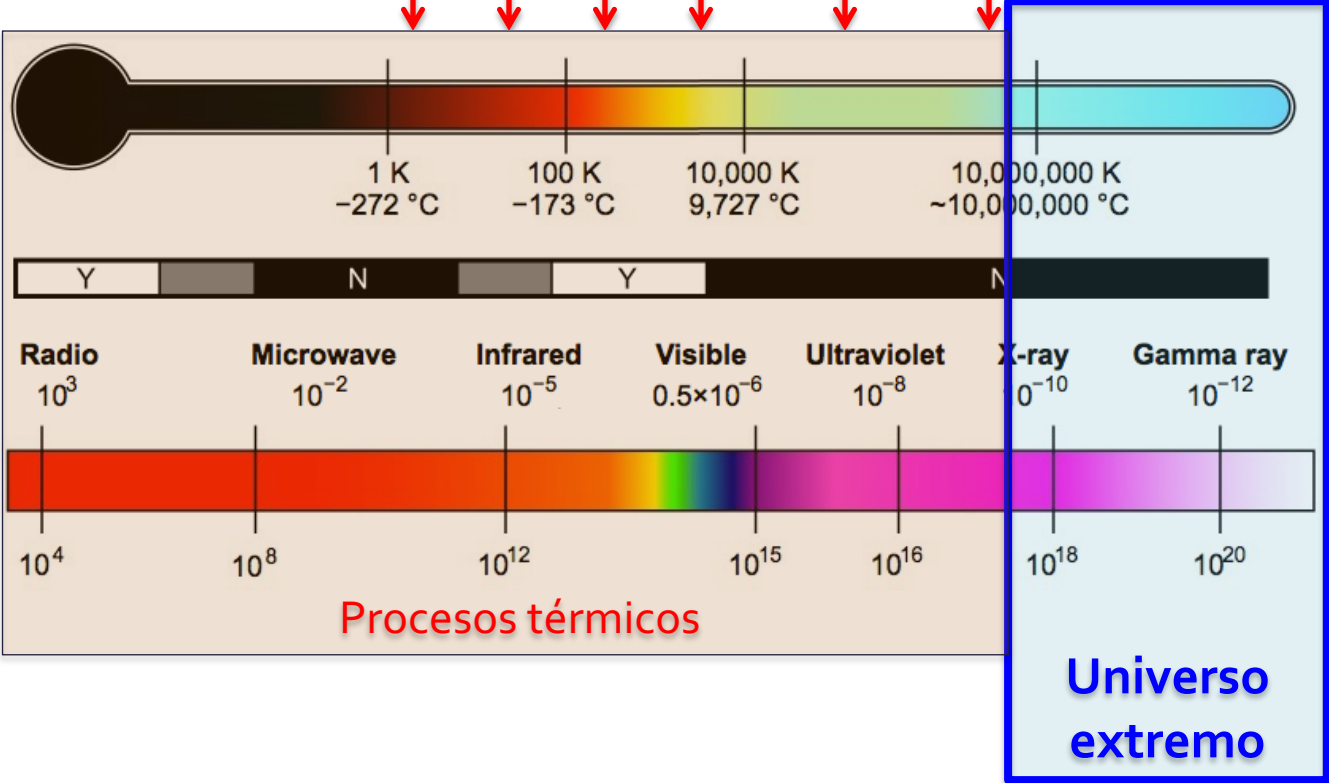
Jóvenes estrellas masivas



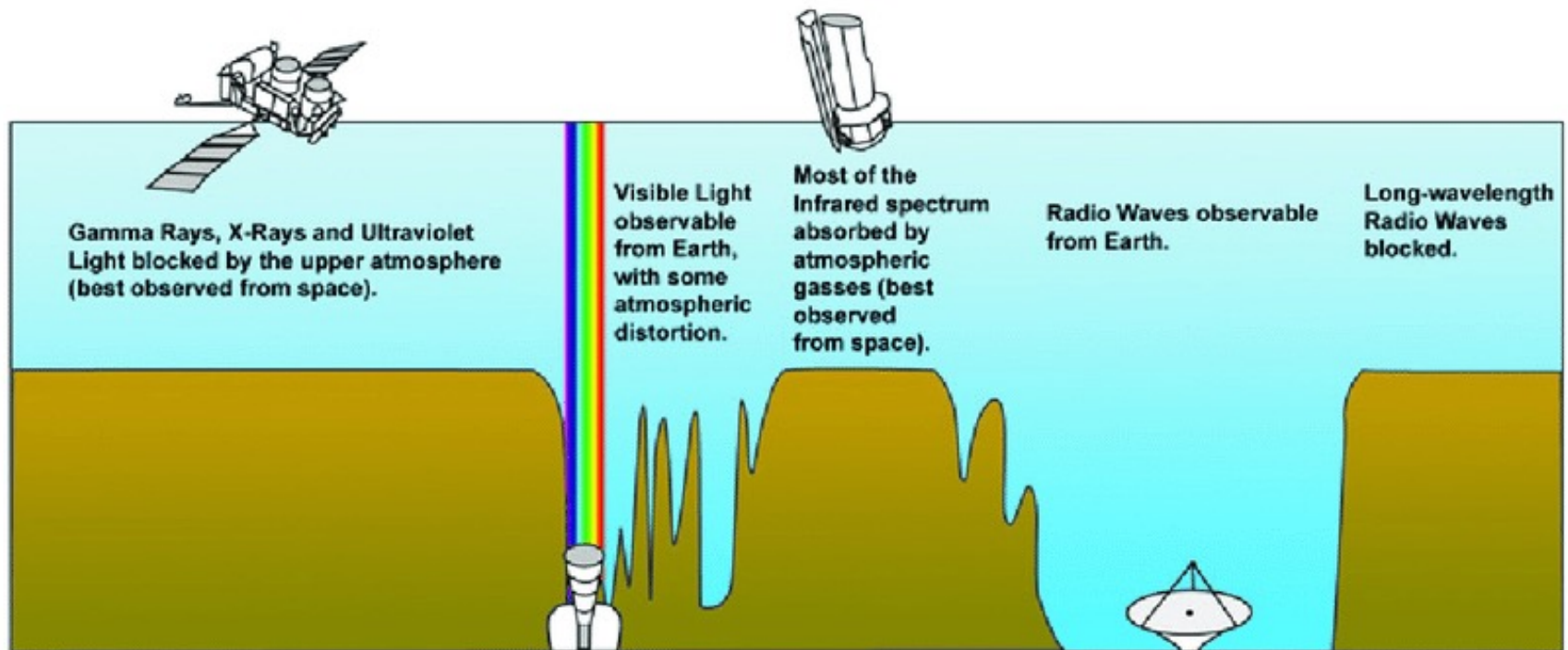
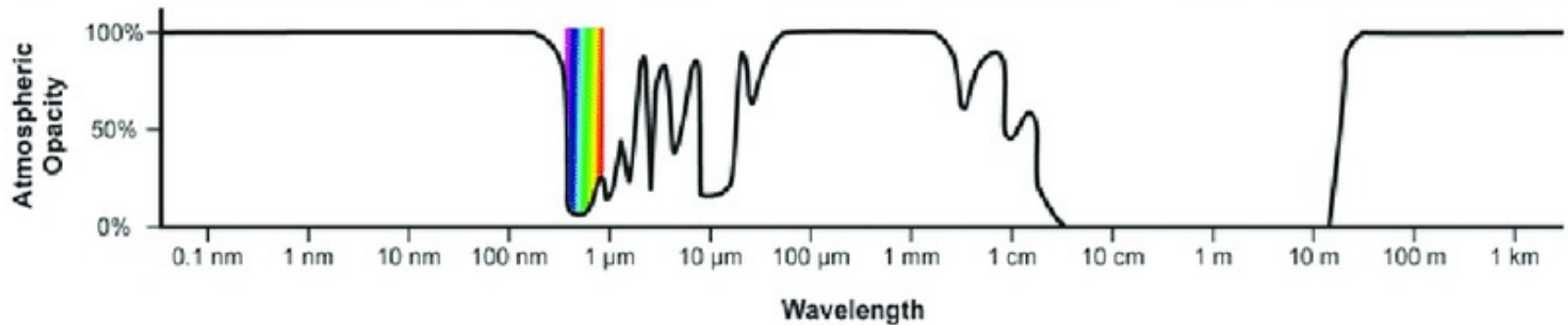
Fondo cósmico de microondas



Disco de acreción



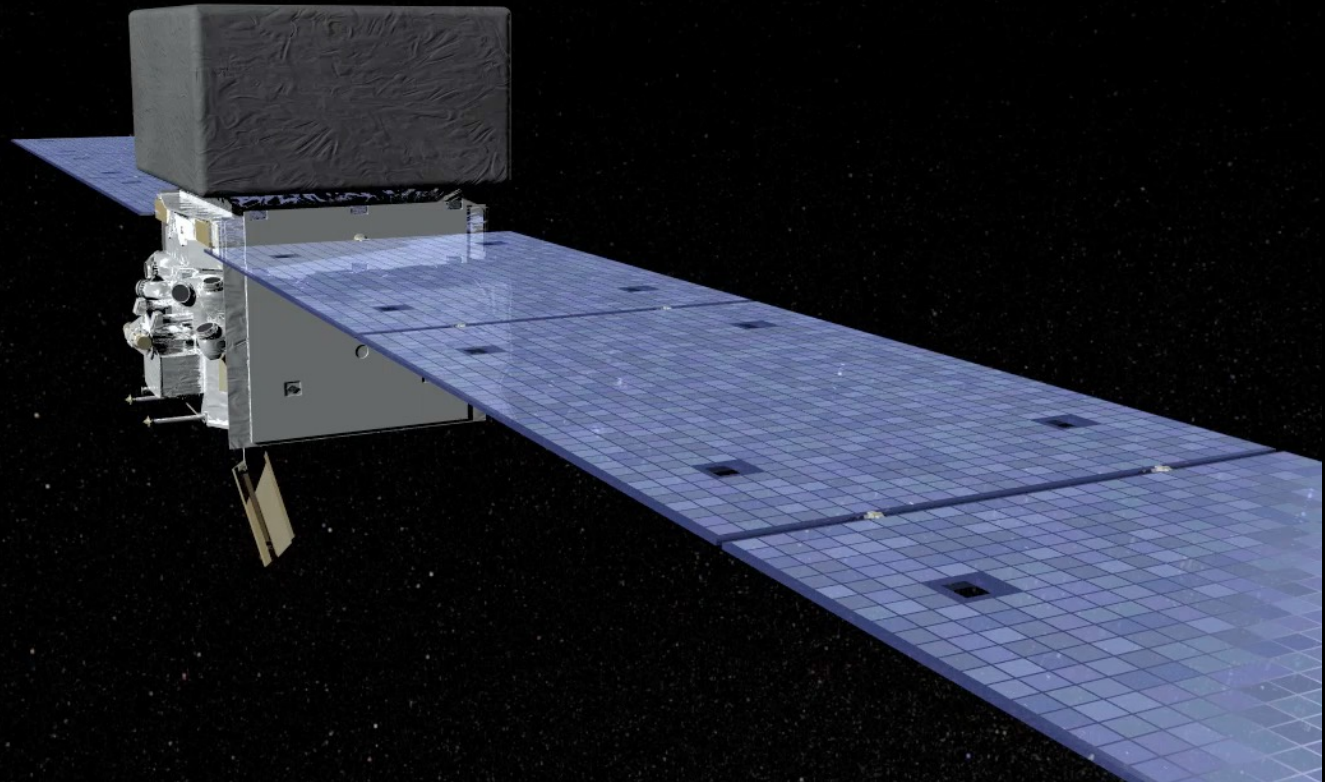
Opacidad atmosférica a rayos gamma



“Pillando” gammas con Fermi

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

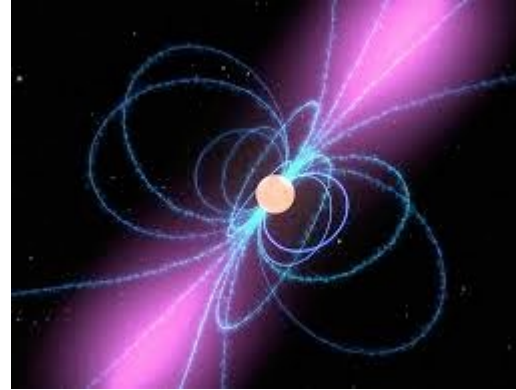
Fermi utiliza la “producción de pares electrón-positrón” para pillar gammas.



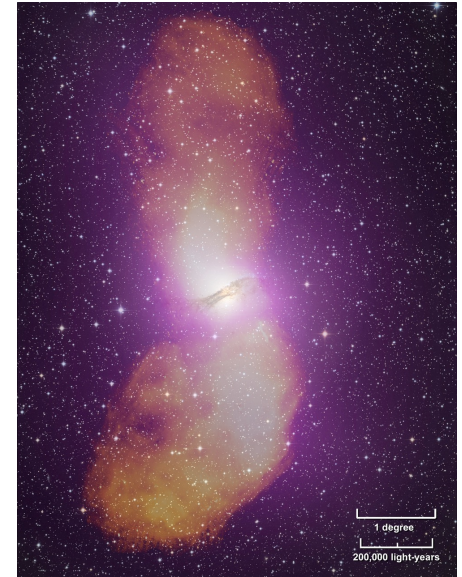
El "bestiario" de los rayos gamma



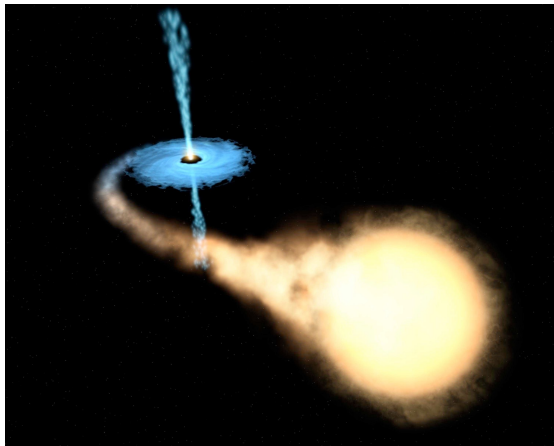
Agujeros negros



Púlsares



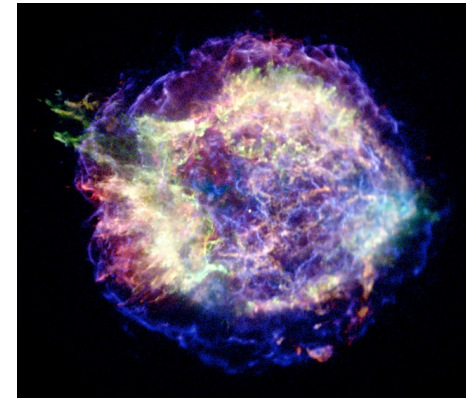
Radio galaxias



Sistemas binarios



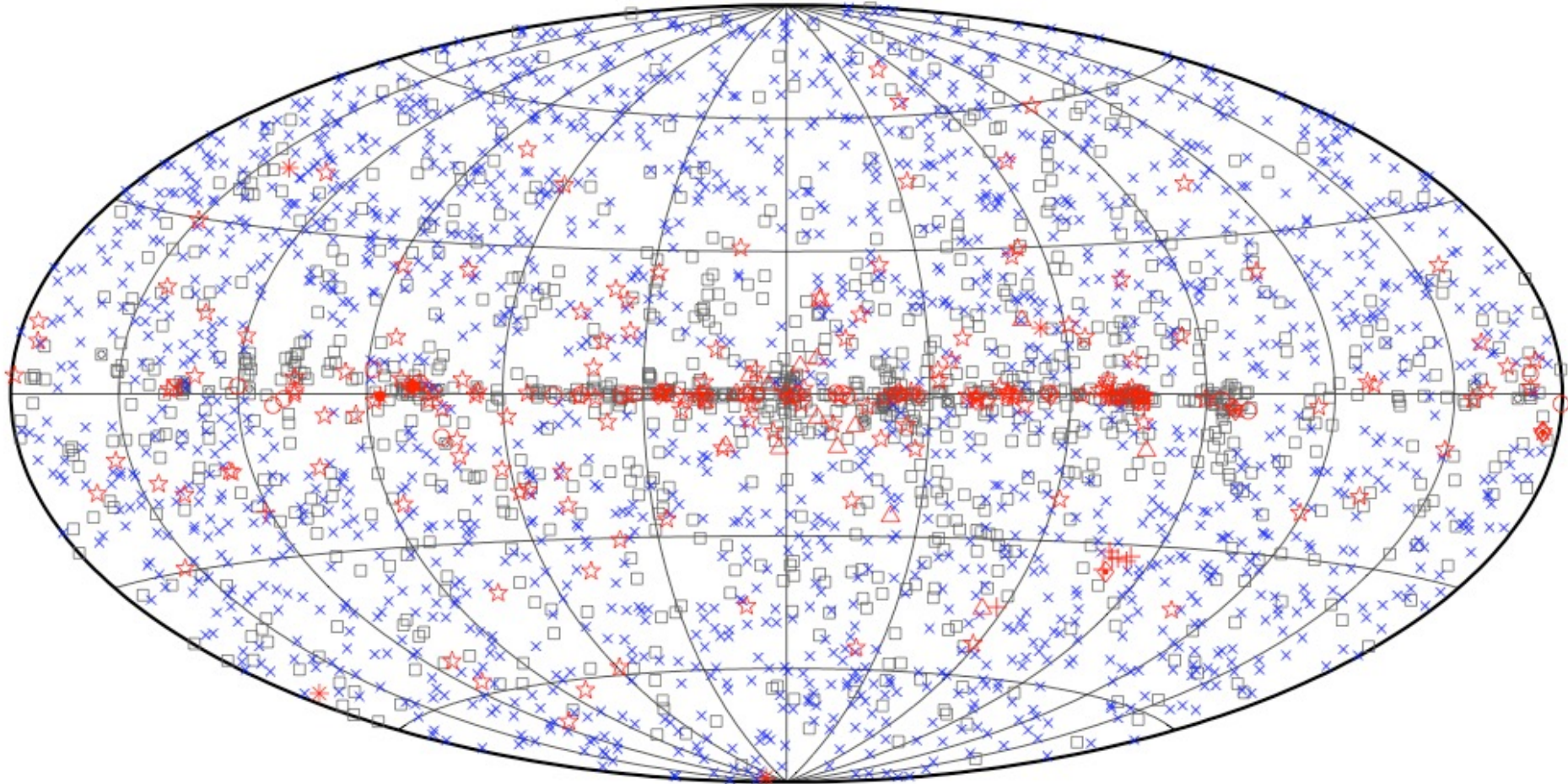
Galaxias con alta formación estelar



Remanentes de supernova

+ ¿materia oscura?

¡Cerca de 7.000 objetos en la actualidad!



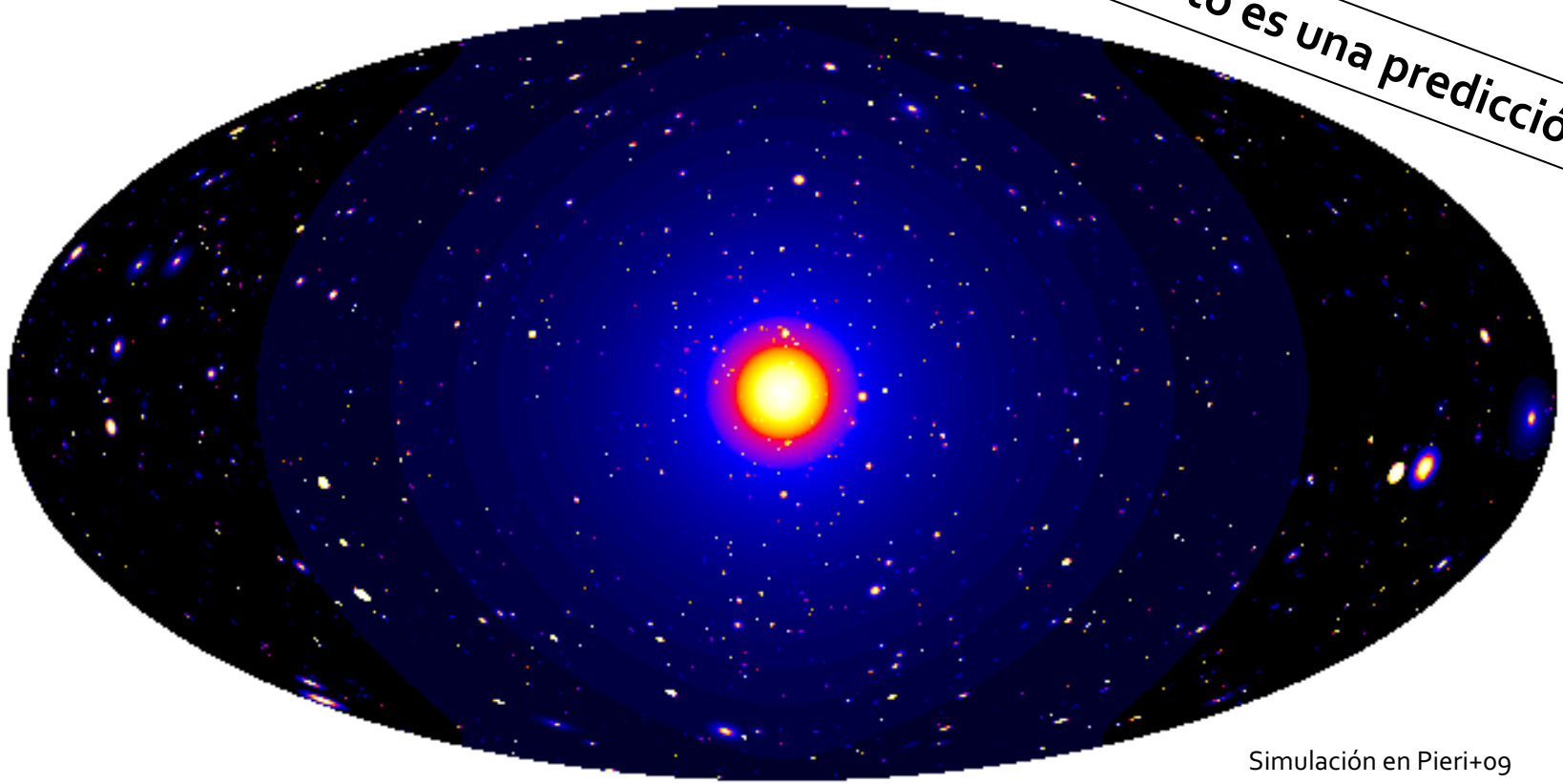
| | | |
|-----------------------|--|--------------------|
| □ No association | ⊠ Possible association with SNR or PWN | × AGN |
| ☆ Pulsar | △ Globular cluster | * Starburst Galaxy |
| ⊠ Binary | + Galaxy | ◇ PWN |
| ★ Star-forming region | ○ SNR | ★ Nova |

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

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

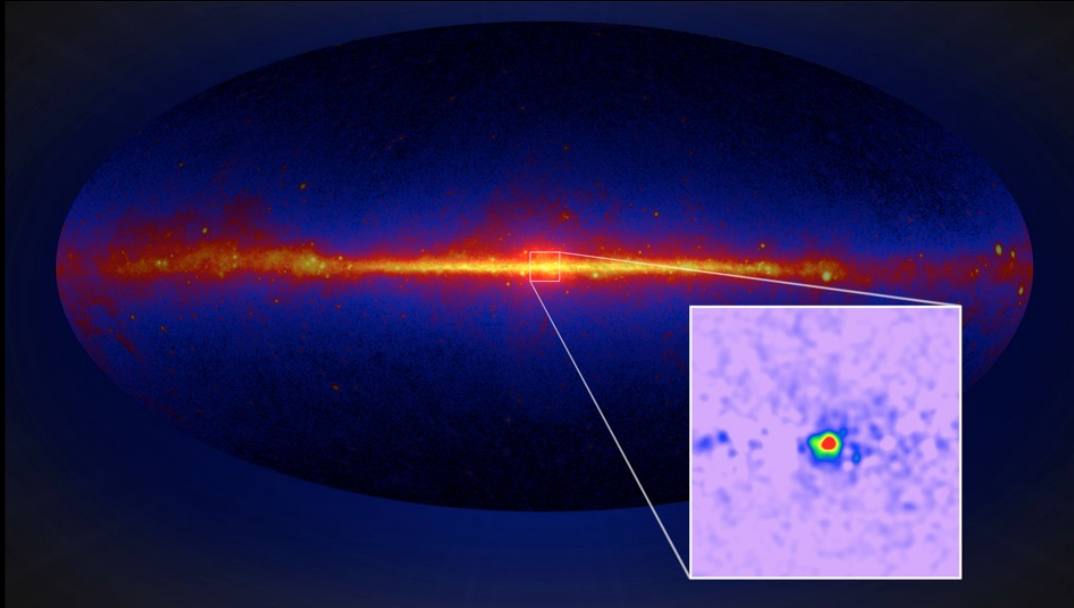
El cielo de rayos gamma inducido por aniquilación de materia oscura

¡Ojo, esto es una predicción!



Simulación en Pieri+09

¿Materia oscura en el centro galáctico?



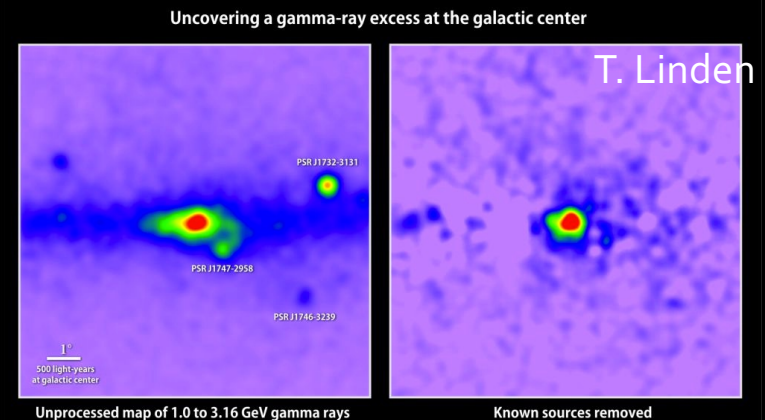
Vemos un **exceso** de rayos gamma en el centro de la Vía Láctea.

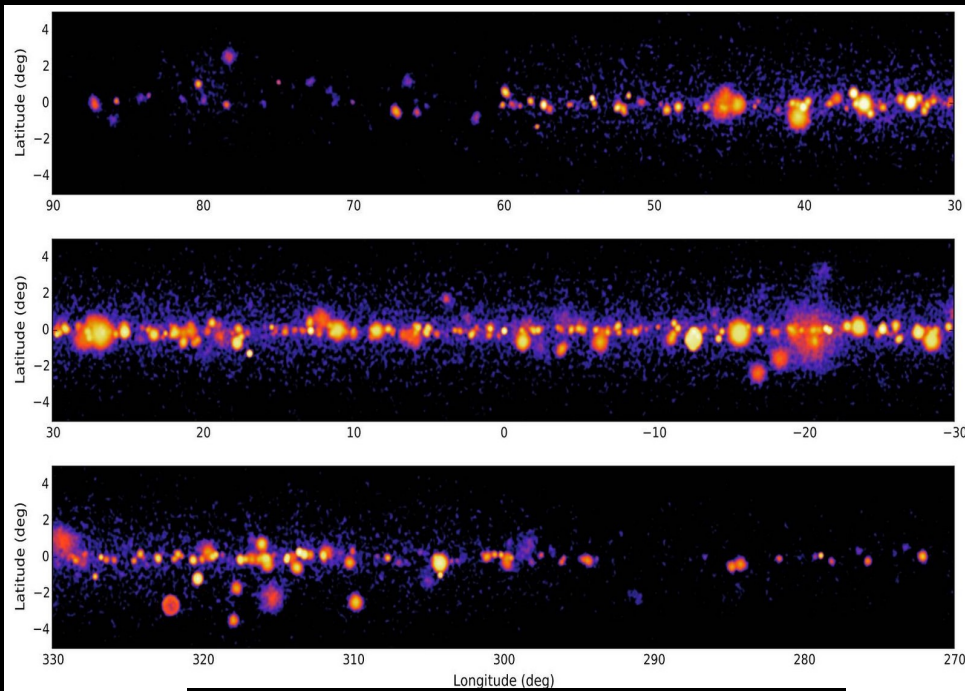
Propiedades **compatibles** con materia oscura.

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

No conocemos bien todas los objetos que emiten rayos gamma en esa zona ☹️

¡Estamos en ello!





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 LAS BÚSQUEDAS DE MATERIA OSCURA Y DE LA ASTROFÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS o **ASTROPARTÍCULAS**

