

# El lado oscuro del Universo

## ¿De qué está hecho el Universo?

David G. Cerdeño

Universidad Autónoma de Madrid  
Instituto de Física Teórica IFT-UAM/CSIC





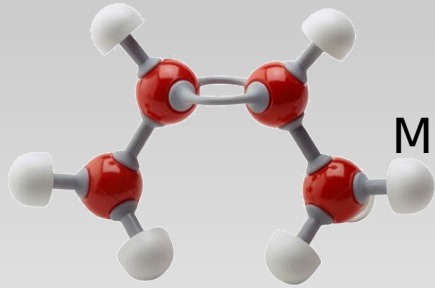
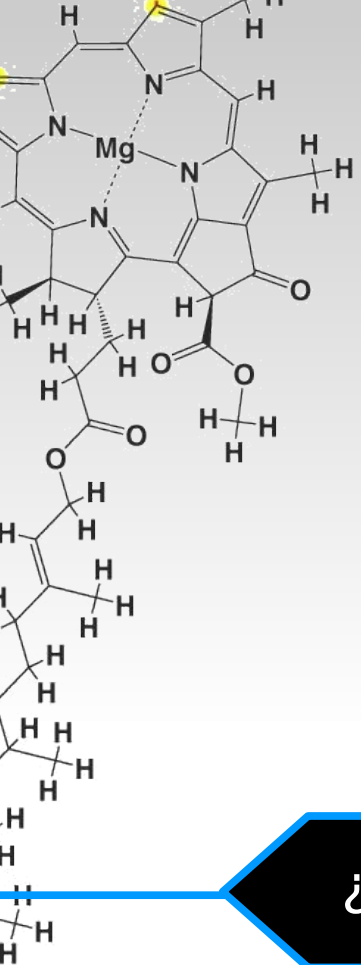
¿Cuál es el componente principal del Universo?



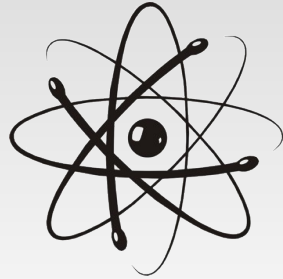


¿Cuál es el componente principal del Universo?

A) Átomos (protones, neutrones, electrones)



Moléculas



Átomos

Electrón

Protón, neutrón (quarks)



¿Cuál es el componente principal del Universo?

A) Átomos (protones, neutrones, electrones)



¿Cuál es el componente principal del Universo?

A) Átomos (protones, neutrones, electrones)

B) Neutrinos



¿Cuál es el componente principal del Universo?

A) Átomos (protones, neutrones, electrones)

B) Neutrinos

C) Luz (fotones)



¿Cuál es el componente principal del Universo?

A) Átomos (protones, neutrones, electrones)

B) Neutrinos

C) Luz (fotones)

D) Otra cosa??





¿Cuál es el componente principal del Universo?

A) Átomos (protones, neutrones, electrones)

B) Neutrinos

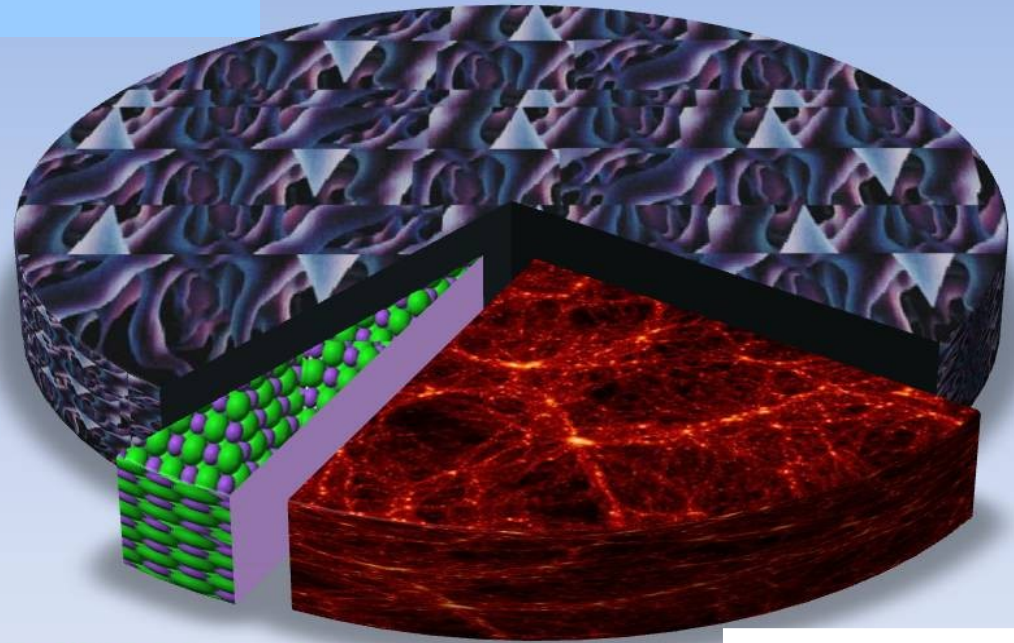
C) Luz (fotones)

D) Otra cosa??

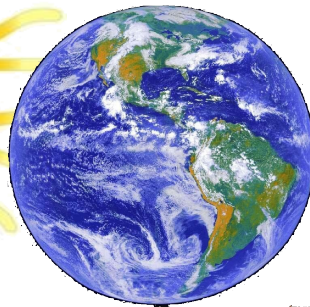
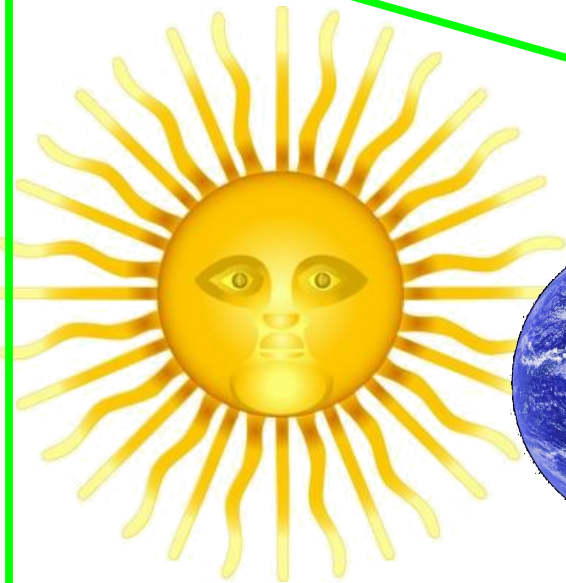


# COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO

La materia de la que estamos hechos (quarks y electrones) es **sólo un 4% del Universo**



**MATERIA ORDINARIA**  
4%



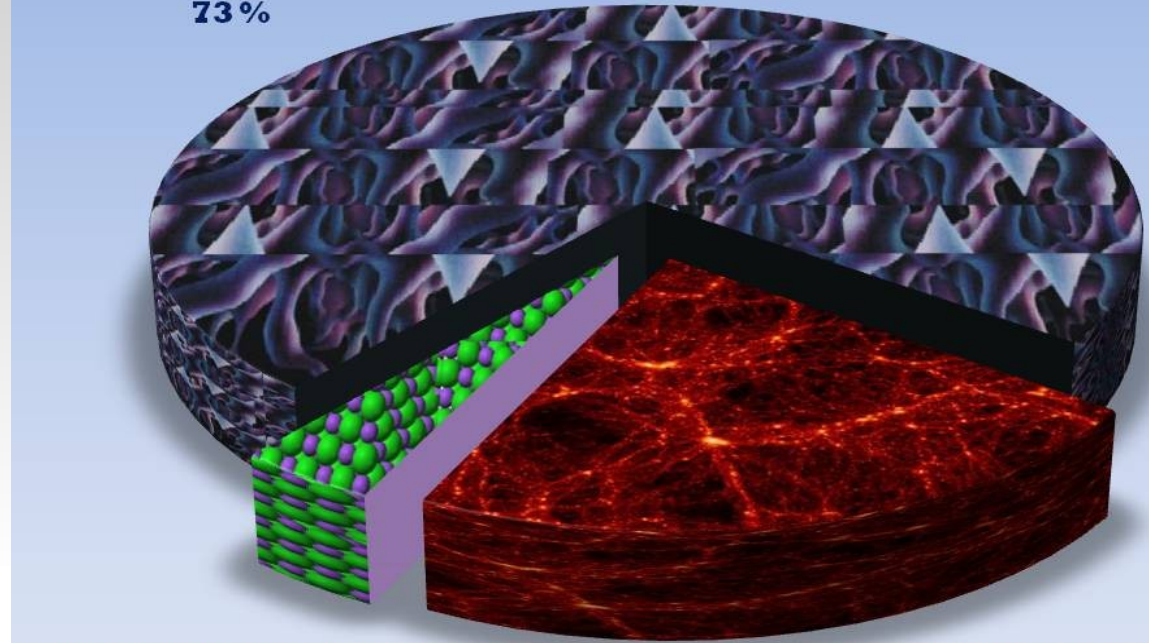
# COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO

**ENERGÍA OSCURA**  
73%

La materia de la que estamos hechos (quarks y electrones) es **sólo un 4% del Universo**

**MATERIA ORDINARIA**  
4%

**MATERIA OSCURA**  
23%



Desconocemos la naturaleza de los principales componentes del Universo

**Materia Oscura:** nueva forma de materia que no emite ni absorbe luz

**Energía Oscura:** “algo” (constante cosmológica?) que hace que la expansión del Universo se acelere

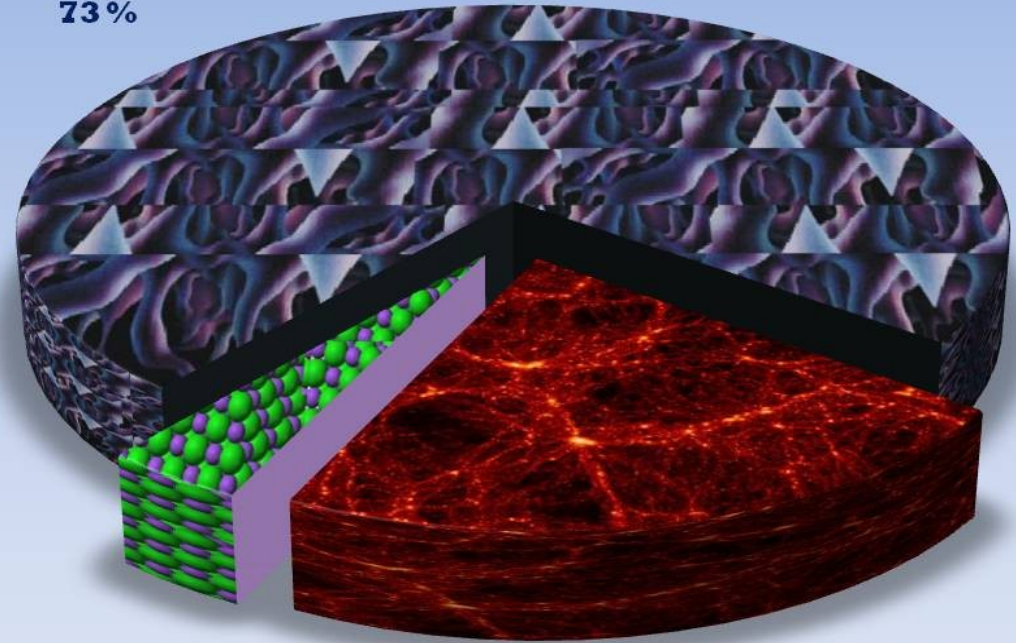
# COMPOSICIÓN DEL UNIVERSO

**ENERGÍA OSCURA**  
73%

La materia de la que estamos hechos (quarks y electrones) es **sólo un 4% del Universo**

**MATERIA ORDINARIA**  
4%

**MATERIA OSCURA**  
23%



## La materia oscura...

¿Cómo sabemos que existe?

¿Qué es?

¿Se puede detectar?



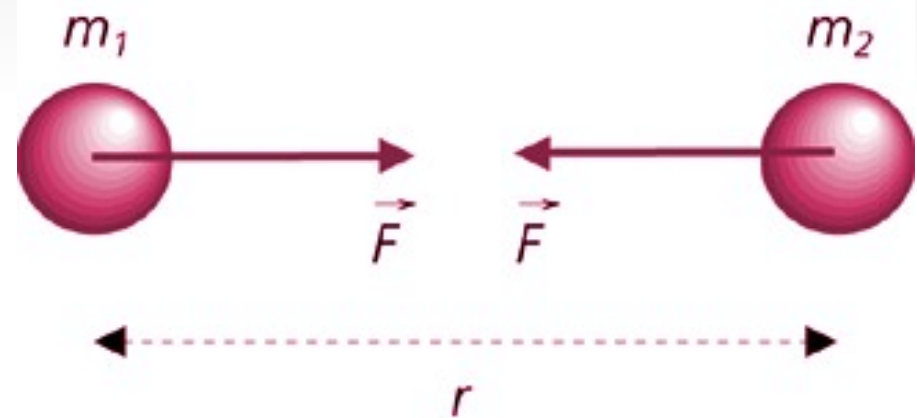
Si no la podemos ver... ¿cómo sabemos que hay materia oscura?



Sir Isaac Newton

## Ley de Gravitación universal

Todo objeto con **masa** ejerce una fuerza de atracción sobre cualquier otro objeto con **masa**.



La fuerza es directamente proporcional a las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa

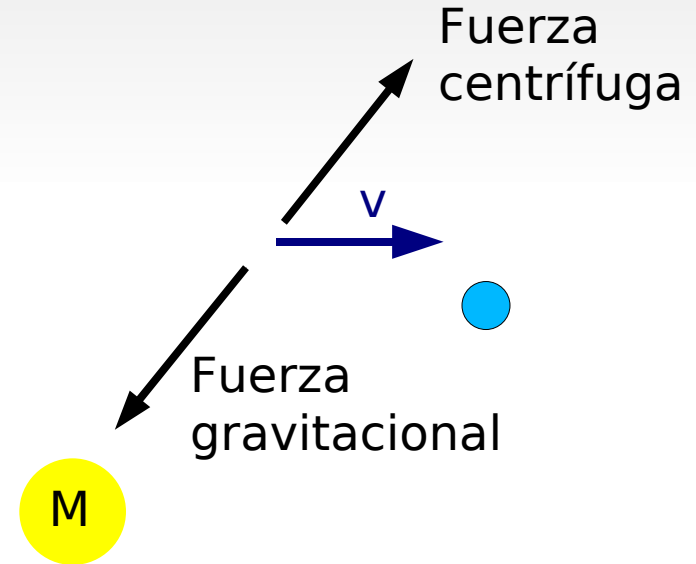
Si no la podemos ver... ¿cómo sabemos que hay materia oscura?



Sir Isaac Newton

## Ley de Gravitación universal

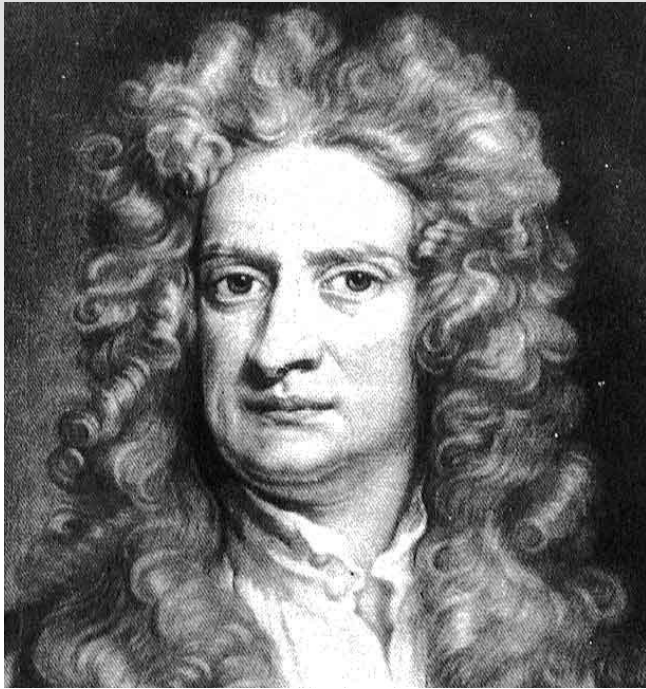
Esta fuerza nos permite entender, por ejemplo, el movimiento de los planetas.



La fuerza de la gravedad compensa la fuerza centrífuga

$$G \frac{m M}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$

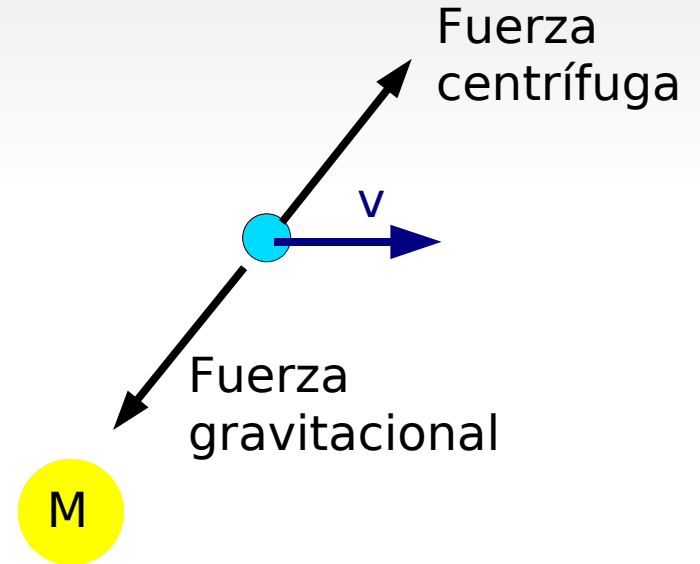
Si no la podemos ver... ¿cómo sabemos que hay materia oscura?



Sir Isaac Newton

## Ley de Gravitación universal

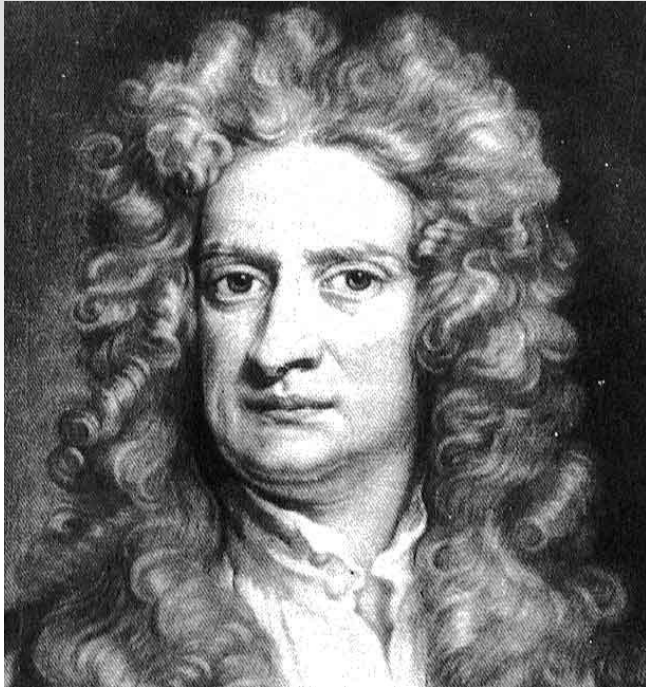
Esta fuerza nos permite entender, por ejemplo, el movimiento de los planetas.



La **velocidad** de rotación es función de la masa y de la distancia

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

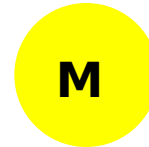
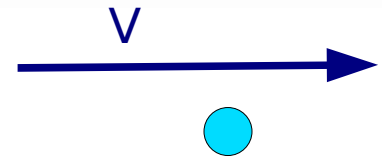
Si no la podemos ver... ¿cómo sabemos que hay materia oscura?



Sir Isaac Newton

## Ley de Gravitación universal

Esta fuerza nos permite entender, por ejemplo, el movimiento de los planetas.

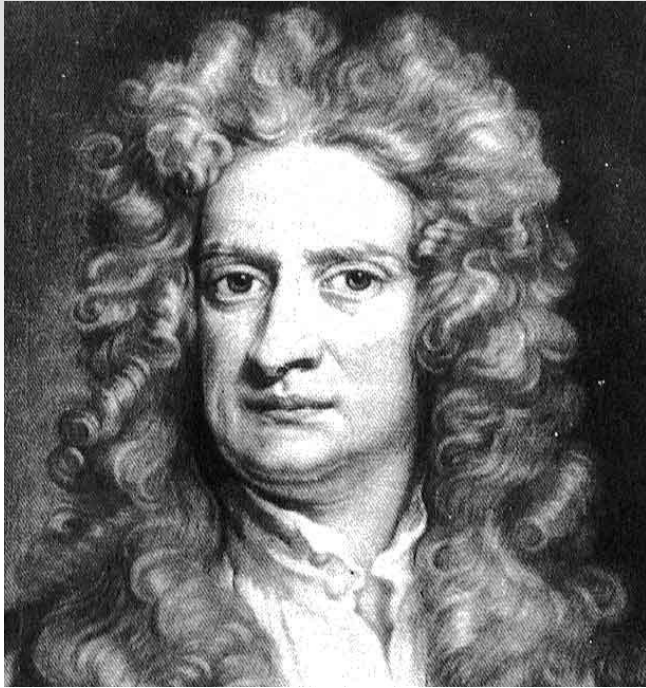


La **velocidad** de rotación es función de la masa y de la distancia

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$



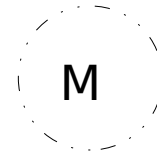
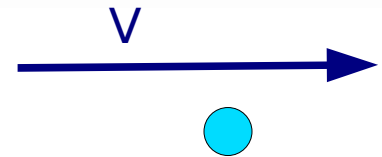
Si no la podemos ver... ¿cómo sabemos que hay materia oscura?



Sir Isaac Newton

## Ley de Gravitación universal

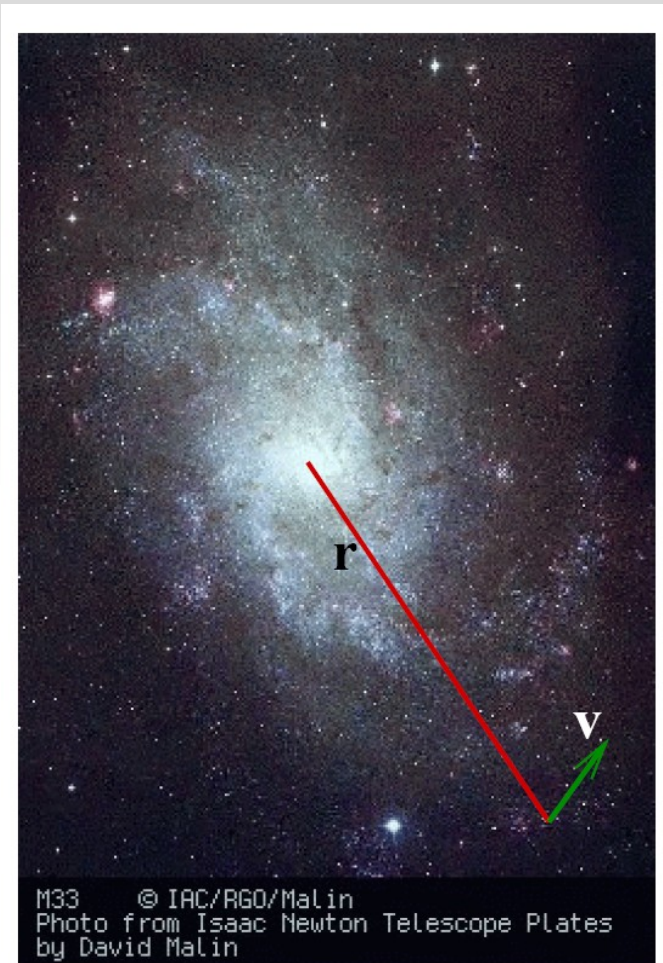
Esta fuerza nos permite entender, por ejemplo, el movimiento de los planetas.



Podemos conocer la masa de objetos invisibles mediante el movimiento de objetos visibles.

$$M = \frac{r}{G} v^2$$

Aplicado a una galaxia, este método nos permite calcular la **masa total** contenida (de objetos luminosos y no luminosos)



$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

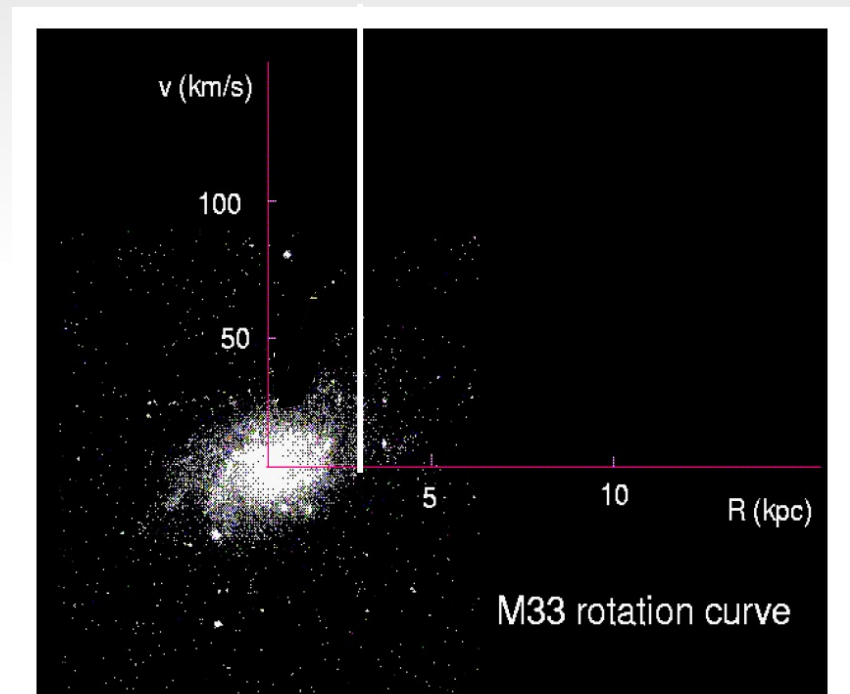
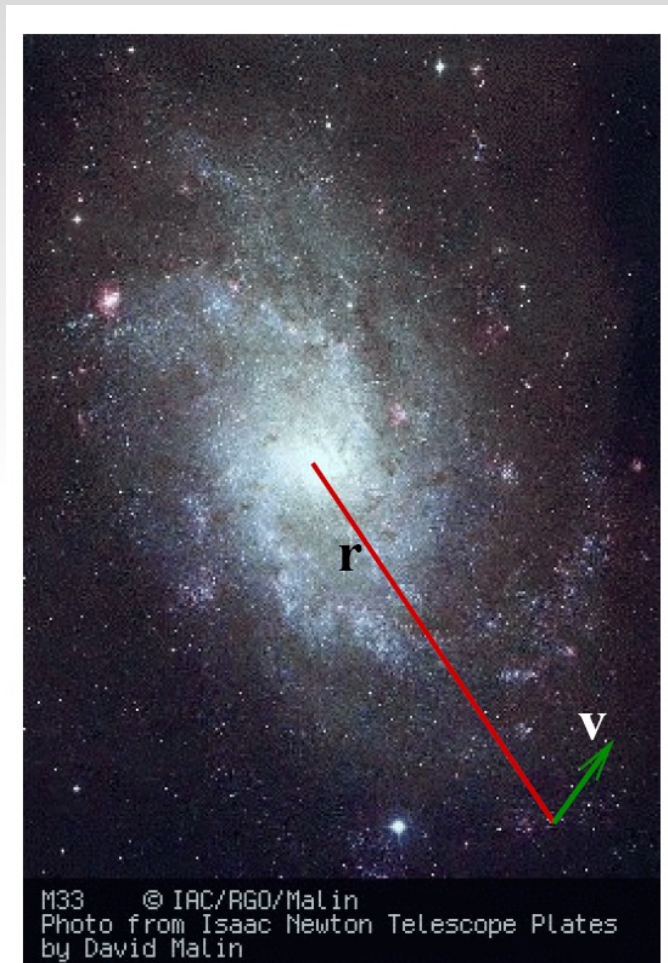
Además, la **luminosidad** de la galaxia está relacionada con la **masa contenida en objetos luminosos**.

**Masa luminosa** << **Masa total**

¡Hay (MUCHA) materia (masa) que no vemos! **MATERIA OSCURA**

La velocidad de rotación no se corresponde con la **masa luminosa** (la que podemos ver)

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$



Roy '00, data from Corbelli, Salucci '99

¡Hay (MUCHA) materia (masa) que no vemos! **MATERIA OSCURA**

Las galaxias están rodeadas de un “halo” esférico de materia oscura

La materia oscura es responsable del **90%** de la masa de la galaxia.

Hay mucha más materia oscura que materia ordinaria (luminosa)





Esto se aplica a todos los cuerpos celestes!  
En cúmulos de galaxias...

¡Los movimientos de las  
galaxias tampoco son  
compatibles con la materia  
luminosa que se ve!



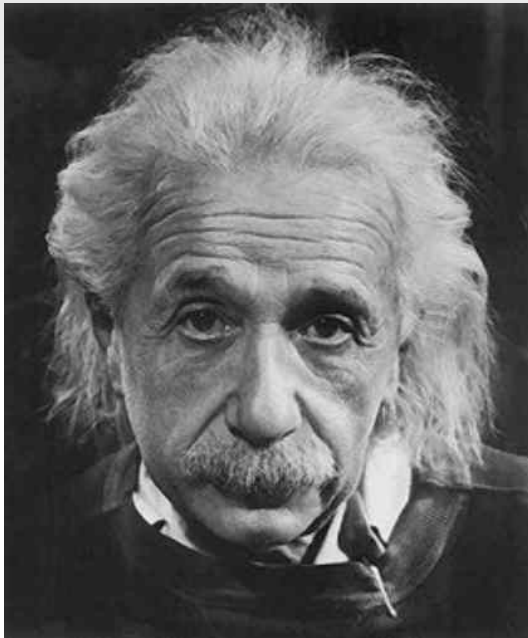
Fritz Zwicky ~ 1933



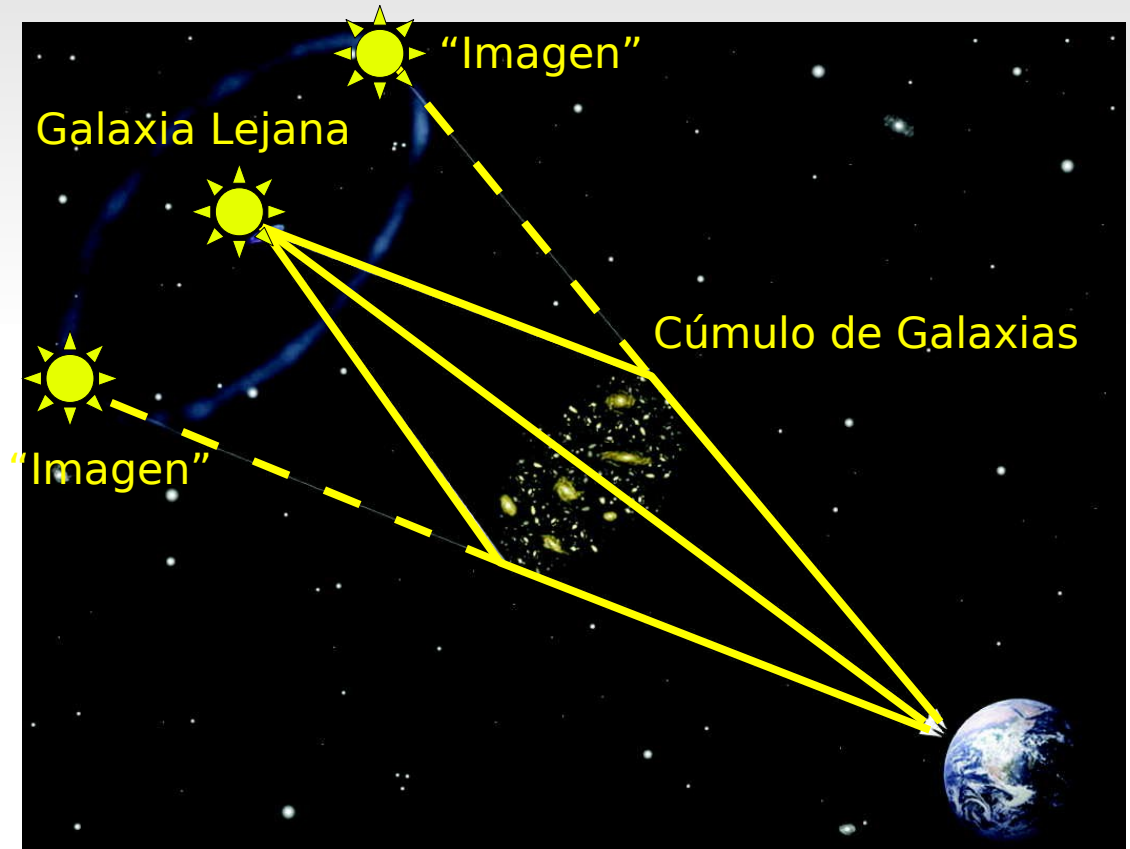
¡Hay (MUCHA) materia (masa) que no vemos! **MATERIA OSCURA**

La teoría de la **Relatividad General** predice que la luz se ve afectada por el campo gravitacional

La luz se curva cuando pasa en la cercanía de objetos muy masivos



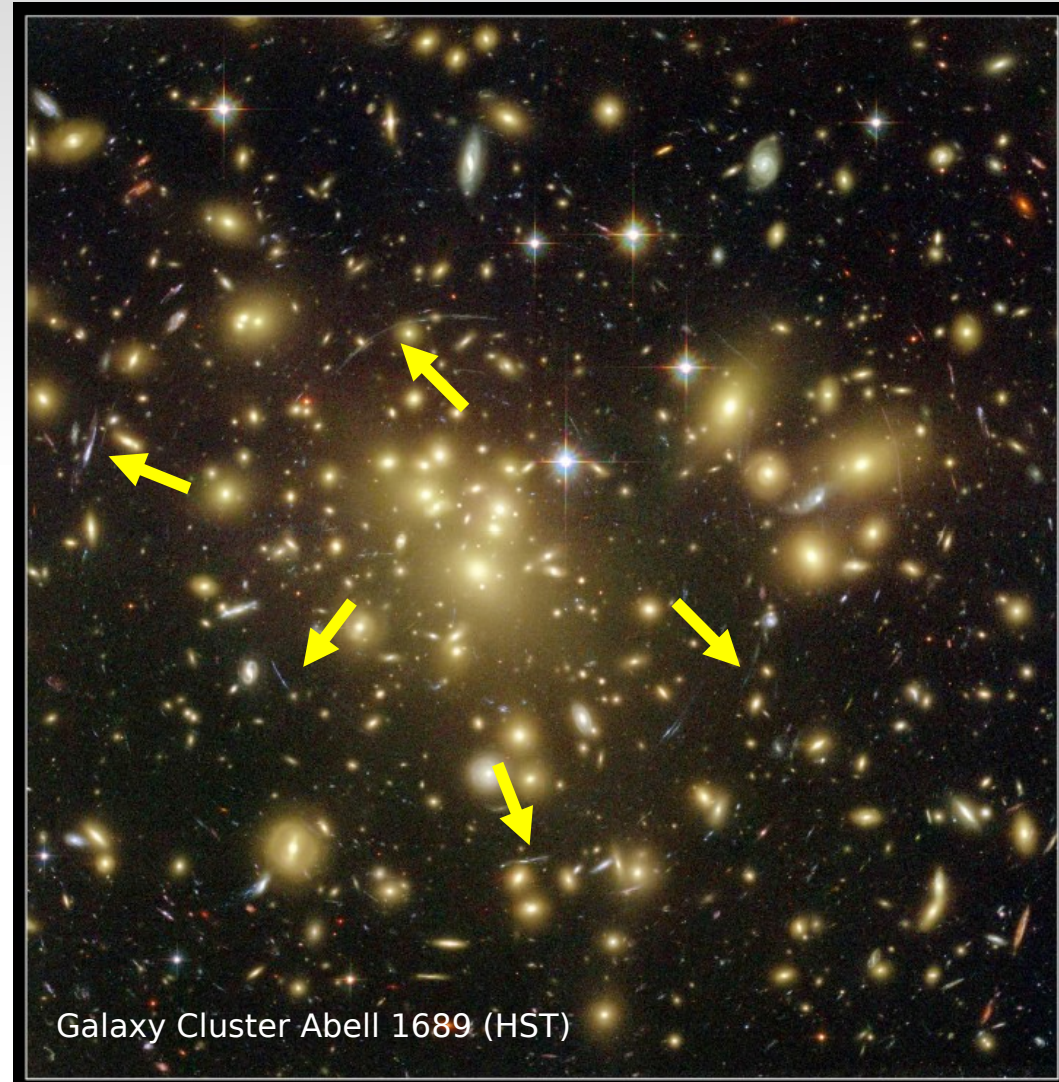
Albert Einstein



Como si de una lente se tratase → **LENTES GRAVITACIONALES**

La teoría de la **Relatividad General** predice que la luz se ve afectada por el campo gravitacional

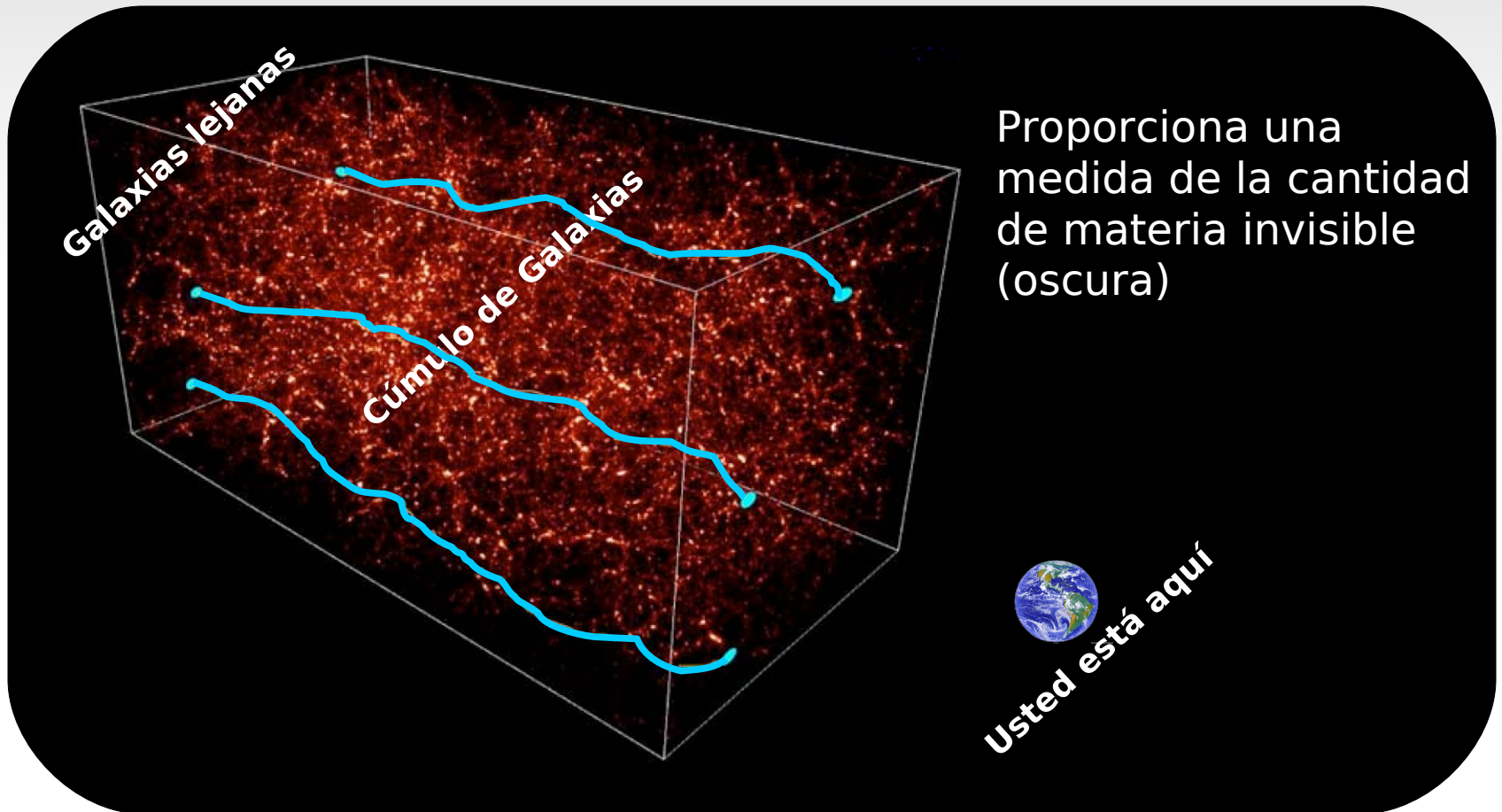
Estas lentes gravitacionales (fuertes) dan lugar a **múltiples imágenes** de un mismo objeto





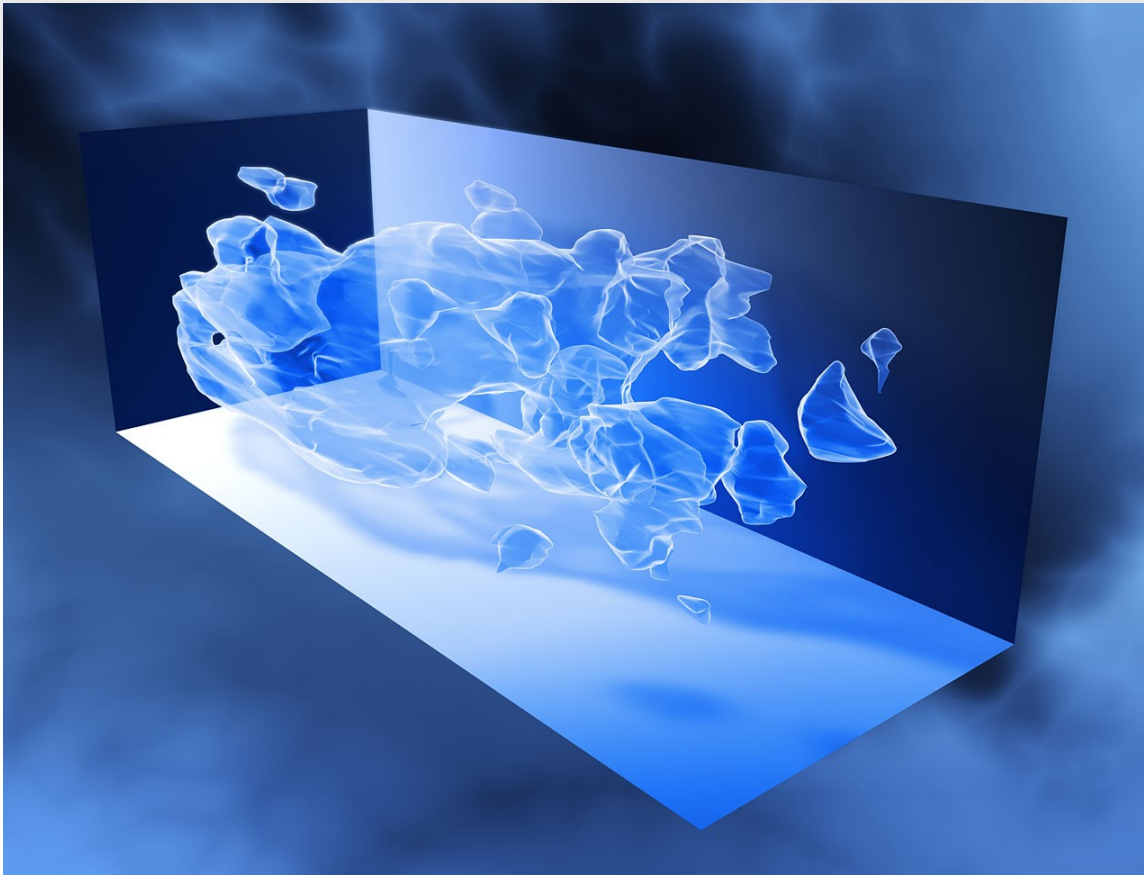
# La materia oscura también se puede “ver” mediante “**lentes gravitacionales**”

Estudiando la distorsión de las imágenes de galaxias lejanas podemos inferir la cantidad de materia que cruza la luz en su camino



La materia oscura también se puede “ver” mediante “**lentes gravitacionales**”

Estudiando la distorsión de las imágenes de galaxias lejanas podemos inferir la cantidad de materia que cruza la luz



Podemos incluso calcular la distribución de materia oscura

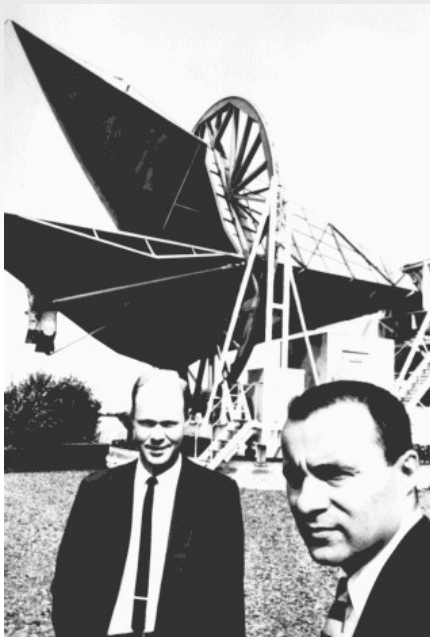
Confirma la existencia de gran cantidad de

**MATERIA OSCURA**

A partir de medidas del Telescopio Espacial Hubble

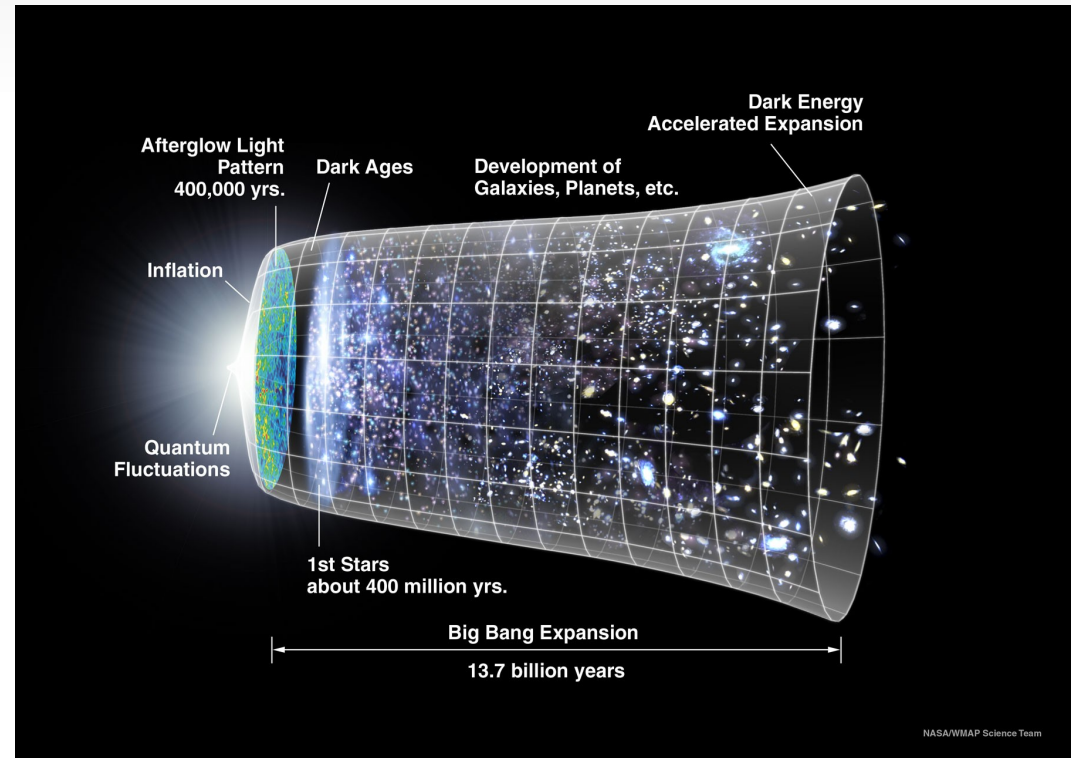
Finalmente, todo esto está confirmado por estudios de la “radiación de fondo de microondas”.

Penzias y Wilson (1965) descubrieron la existencia de una radiación electromagnética homogénea con una temperatura de 2.7 grados Kelvin



Son los fotones (luz) producidos cuando el Universo tenía “sólo” 400 000 años después del Big Bang.

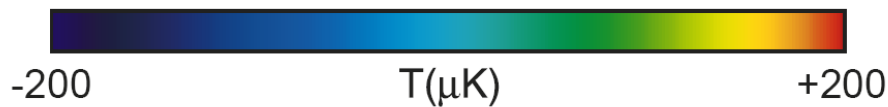
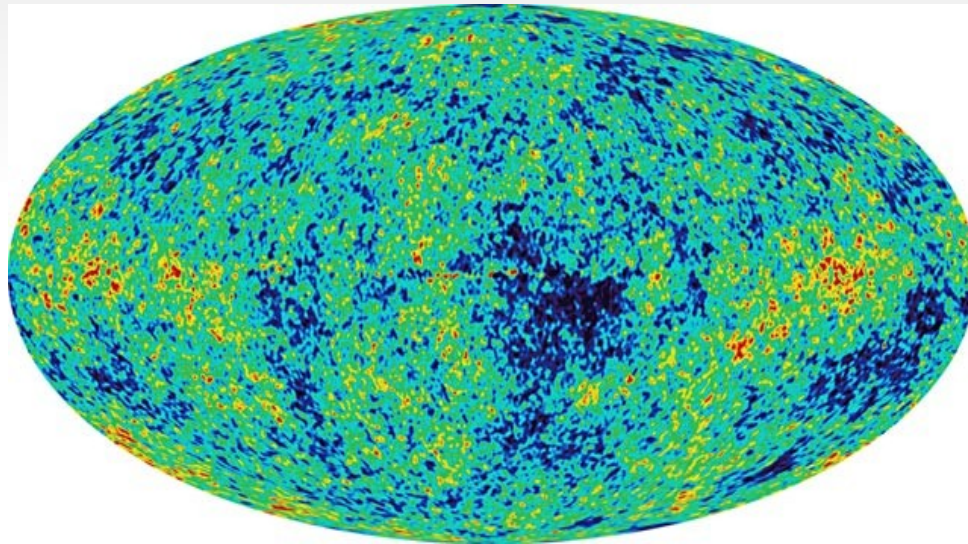
(¡Es una evidencia del Big Bang!)



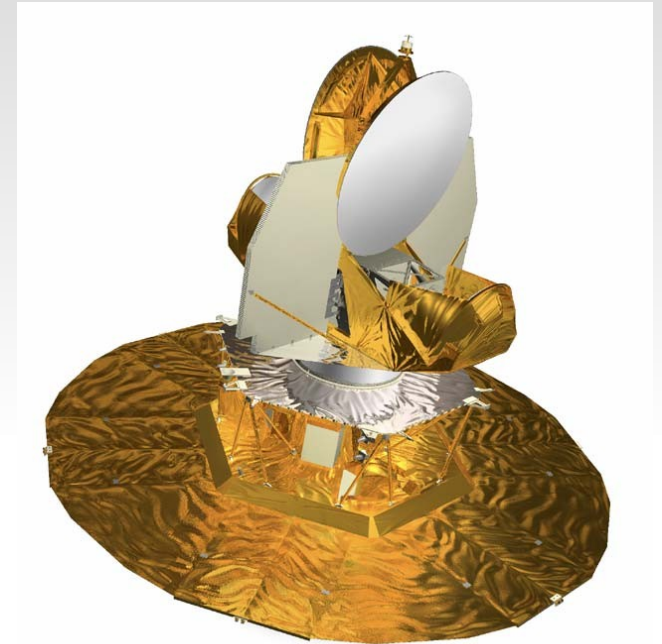


Finalmente, todo esto viene confirmado por estudios del “fondo de radiación de microondas”.

El satélite **WMAP** ha medido la temperatura del fondo de radiación de microondas con gran precisión



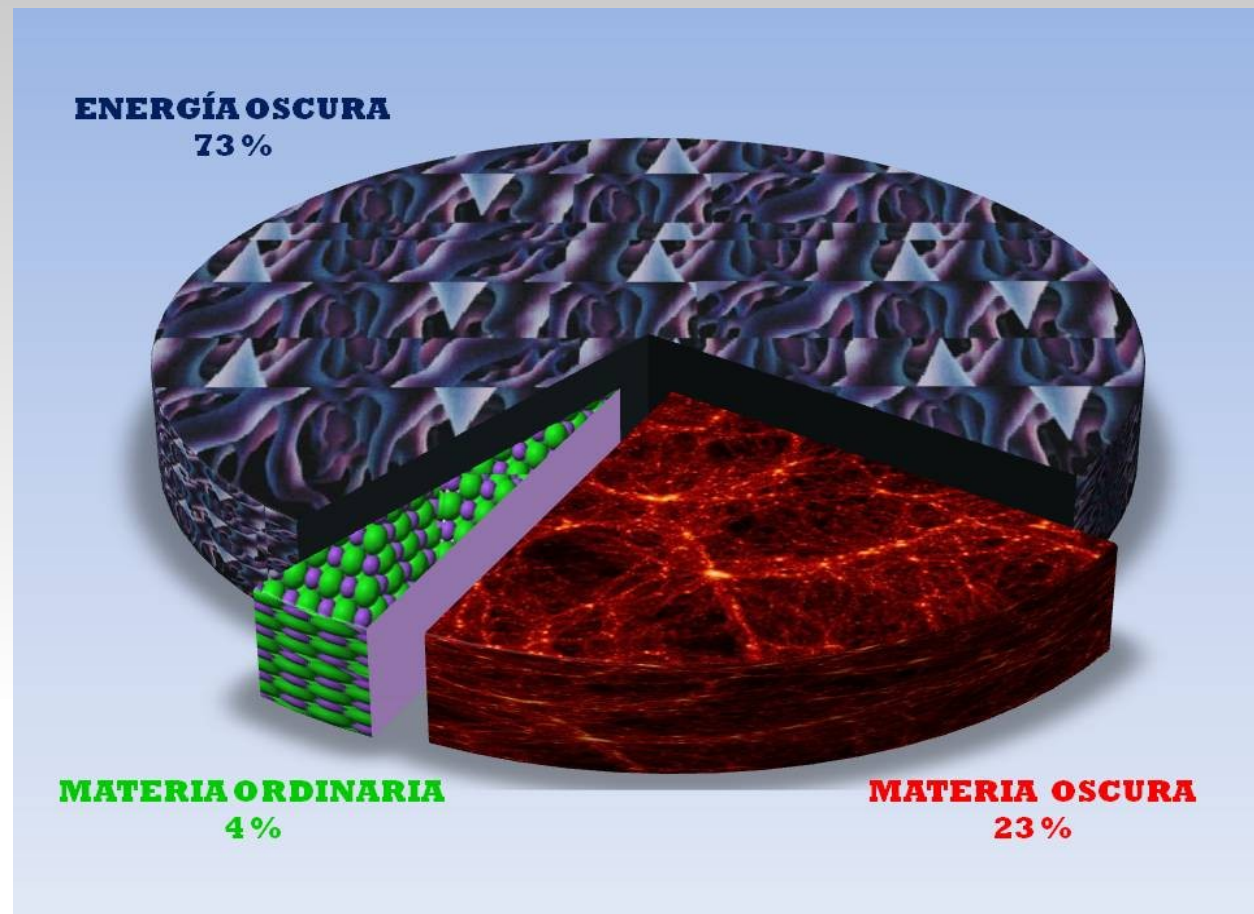
Variaciones de pocas millonésimas de grado!



¡Estudiando la estructura de las ligerísimas variaciones de temperatura se pueden conocer los **ingredientes** del universo!

Todas estas observaciones confirman que...

...la materia de la que estamos hechos (quarks y electrones) forma sólo un 4% del Universo



**¡No sabemos de qué está hecha la mayor parte del Universo!**

¿Cómo sabemos que existe? ✓

¿Qué es la materia oscura?

¿Se puede detectar?

# EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO



## ¿Qué es la materia oscura?

- No emite ni absorbe luz (es oscura)
- No decae (es estable y existe desde los primeros momentos del Universo)
- No tiene carga eléctrica
- Sabemos cuánta hay

## ¿Puede ser materia ordinaria que no vemos (porque emite poca luz)?

- Planetas, enanas marrones, gas frío... no hay suficientes para explicar toda la materia oscura
- Sería incompatible con la teoría del Big Bang, que predice la abundancia de elementos ligeros (Helio, Litio, etc)

¡Es un **nuevo tipo de materia!**



¿Un nuevo tipo de materia? ..... Nuevas partículas

Necesitamos **NUEVA FÍSICA** más allá del Modelo Estándar de Partículas elementales para explicar la naturaleza de la materia oscura.

Muchas posibilidades **teóricas**:

- Axiones
- Supersimetría
- Dimensiones Extra  
(el universo podría tener más de 4 dimensiones)
- Etc



Algunas de estas teorías podrían estudiarse con aceleradores de partículas como el **LHC** (Large Hadron Collider)

# La materia oscura se produce en el Universo temprano

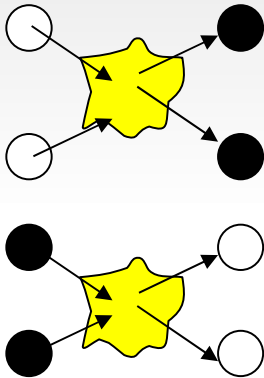
Tiempo

Hoy ~ 14.000 millones de años

Temperatura

$T \sim 3K$

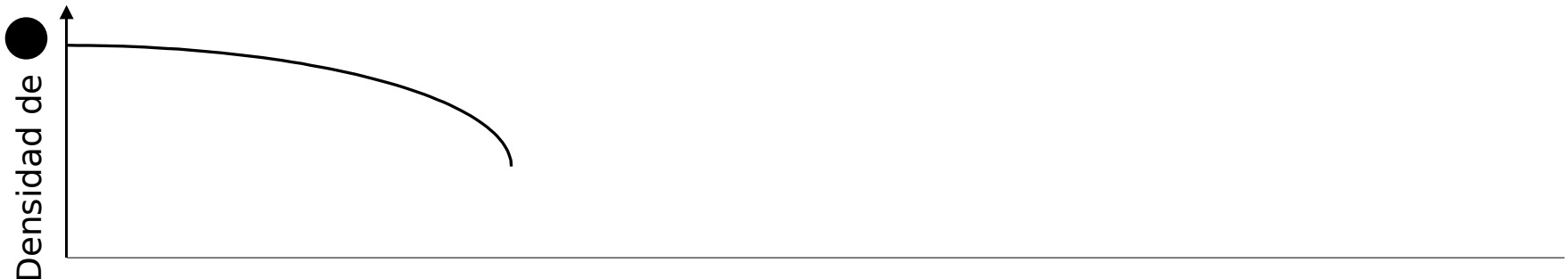
Partículas en equilibrio  
térmico



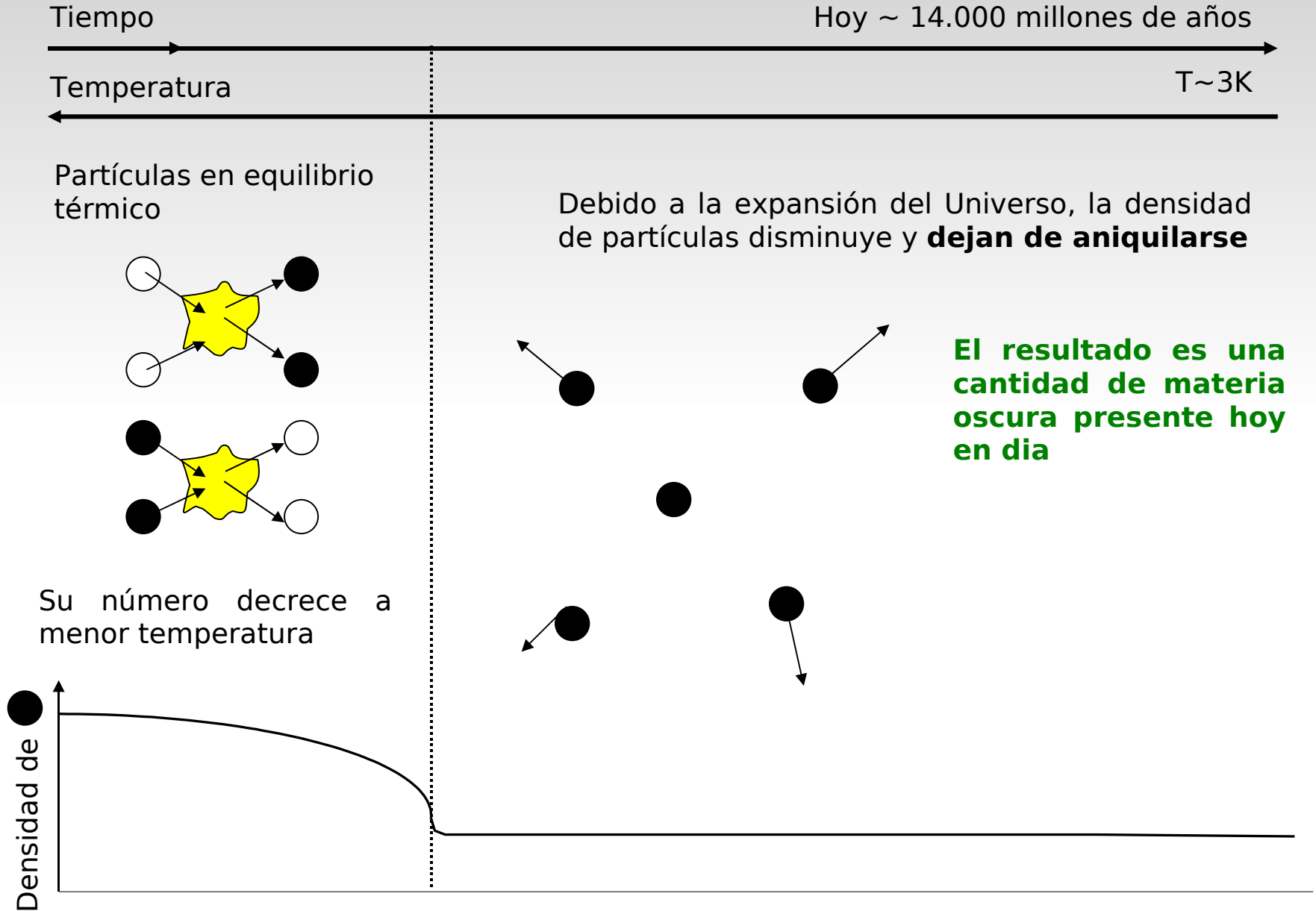
**Producción** por choques de partículas ordinarias  
(quarks, electrones)

**Aniquilación** en partículas ordinarias

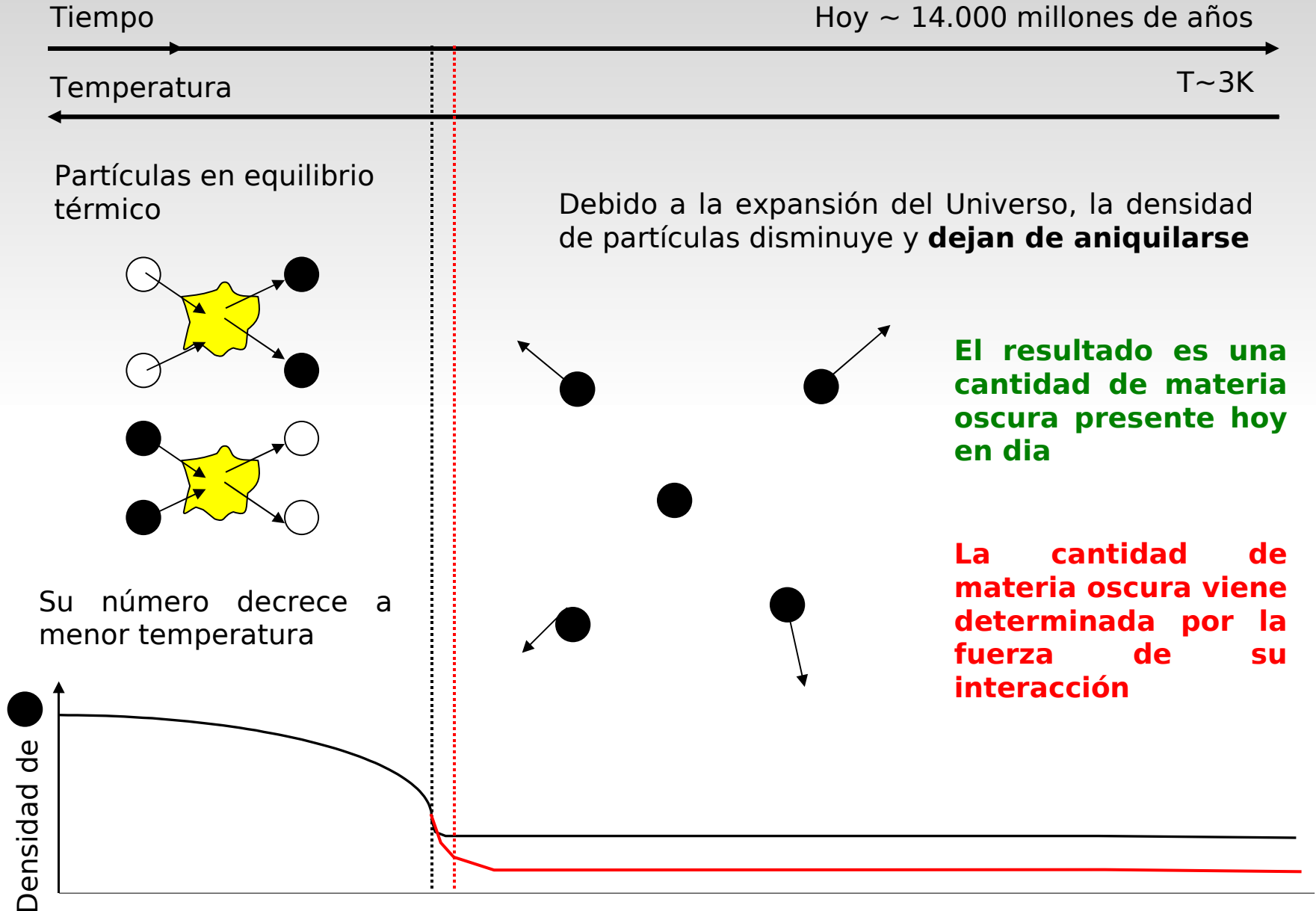
Su número decrece a  
menor temperatura



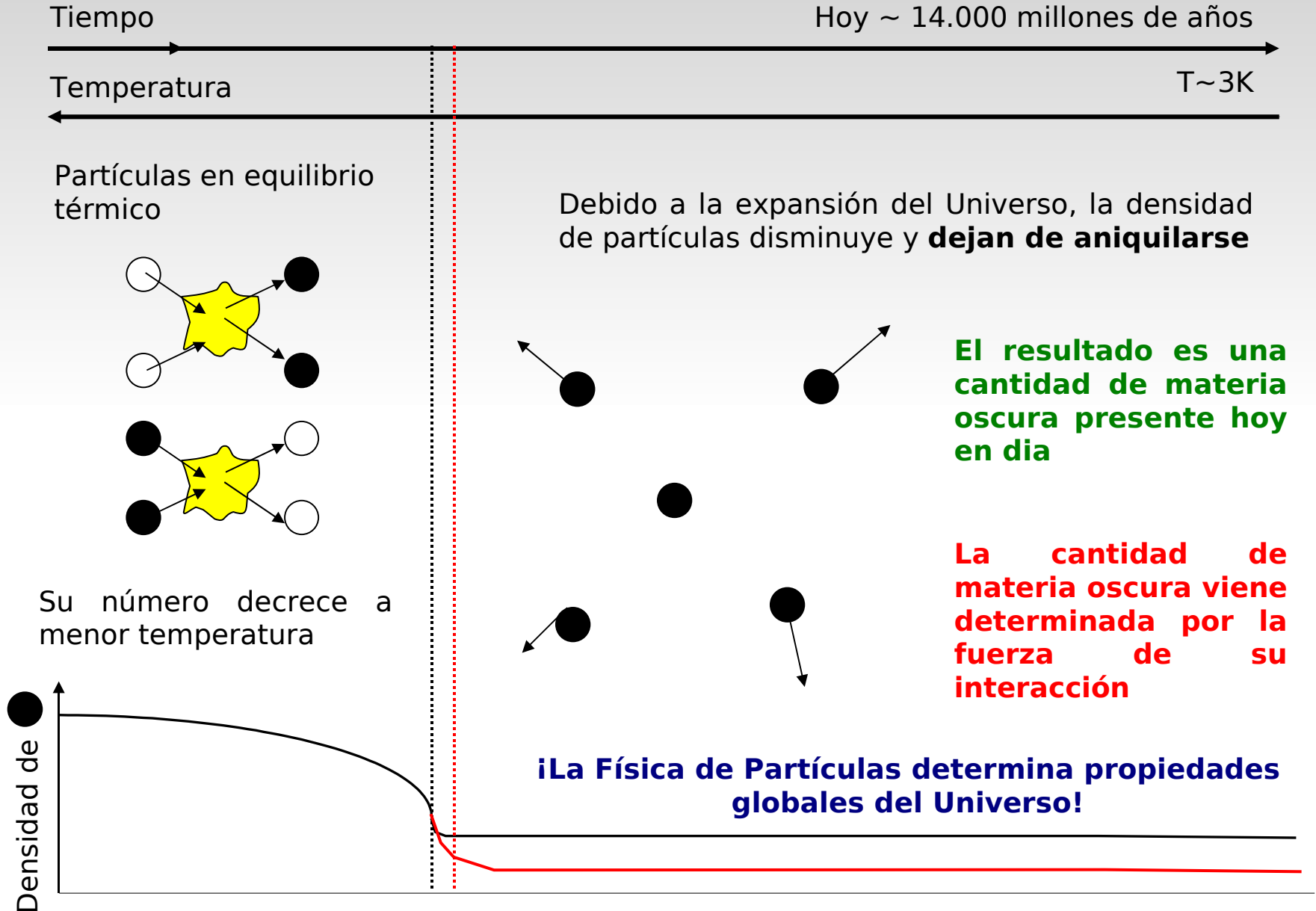
# La materia oscura se produce en el Universo temprano



# La materia oscura se produce en el Universo temprano



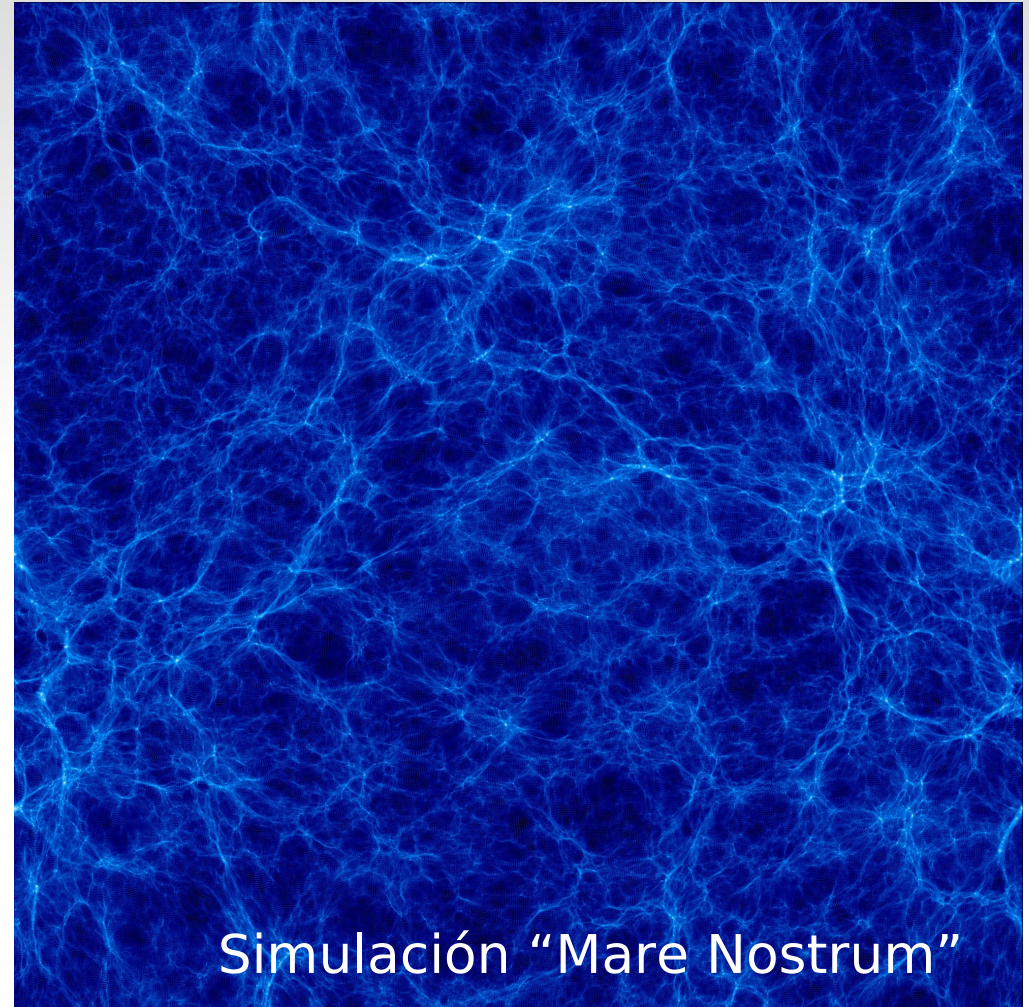
# La materia oscura se produce en el Universo temprano



El proceso de formación de estructuras en el Universo se estudia computacionalmente por medio de simulaciones numéricas de muchos cuerpos.

La distribución de materia oscura forma una **estructura filamentosa**

Las galaxias se formarían en las regiones con mayor densidad



Simulación "Mare Nostrum"

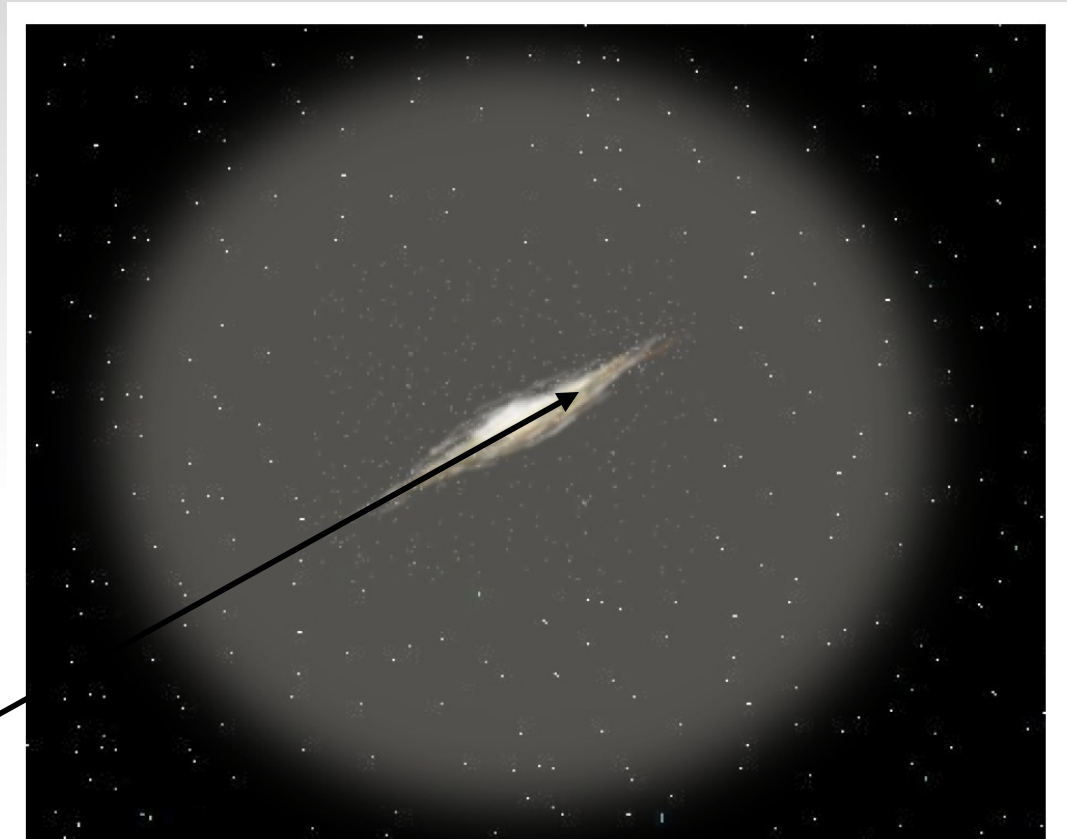
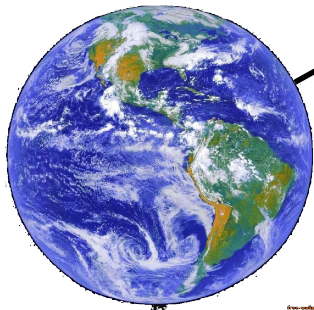
Otro ejemplo del Institute for Computational Cosmology Durham



Las galaxias están rodeadas de un “halo” esférico de materia oscura

La materia oscura es responsable del **90%** de la masa de la galaxia.

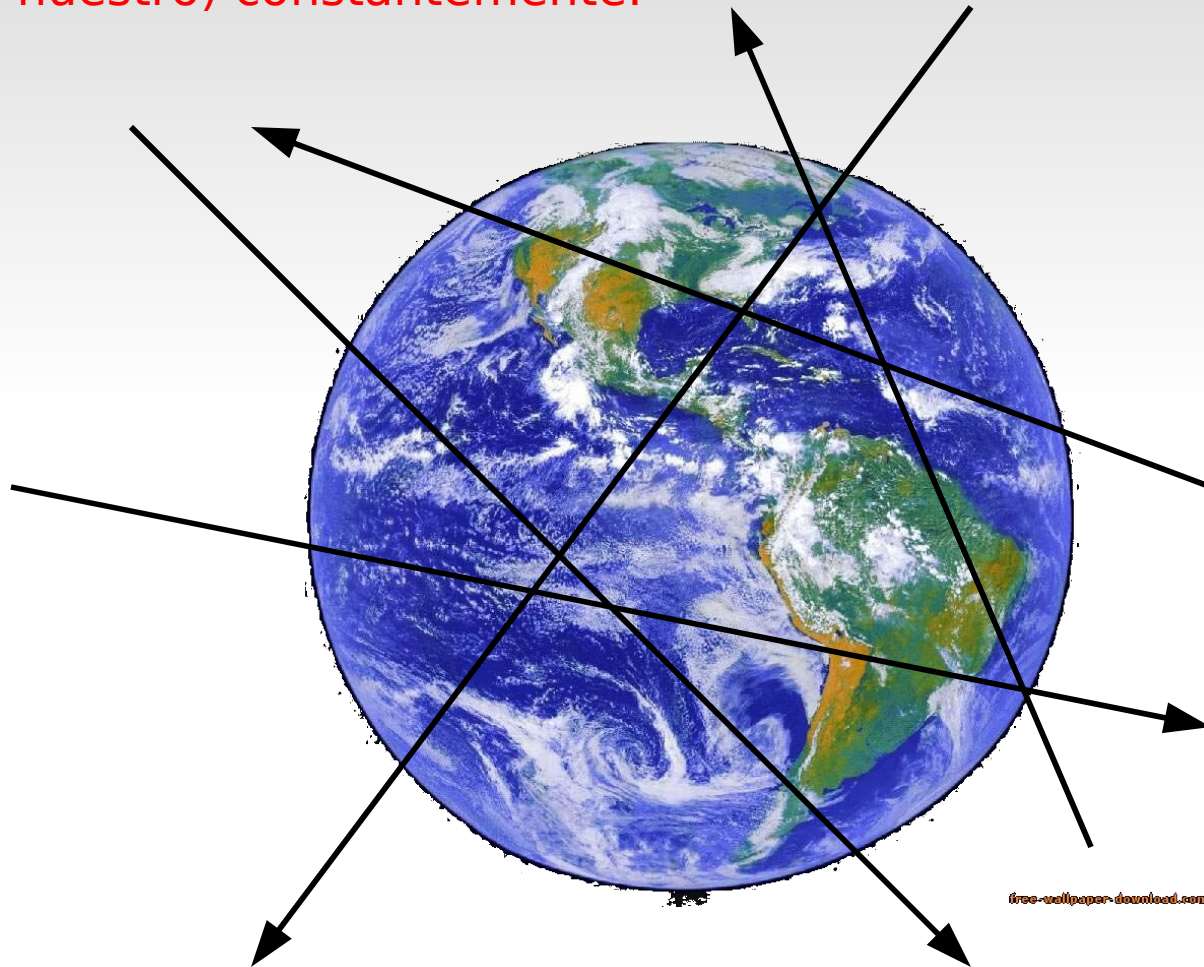
¡Estamos rodeados de materia oscura!





# ¿Cómo la podemos detectar? **BÚSQUEDAS DIRECTAS**

Partículas de materia oscura “cruzan” a través de la Tierra (y a través nuestro) constantemente.



## ¿Cómo la podemos detectar? **BÚSQUEDAS DIRECTAS**

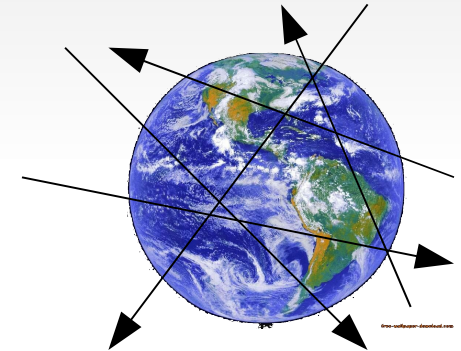
Partículas de materia oscura “cruzan” a través de la Tierra (y a través nuestro) constantemente.

Usando medidas de la velocidad de rotación podemos calcular la densidad de materia oscura en la Vía Láctea

$$\rho_{\text{Dark Matter}} = 5 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$$

Las partículas de materia oscura tienen una velocidad media de

$$v = 300 \text{ km s}^{-1}$$



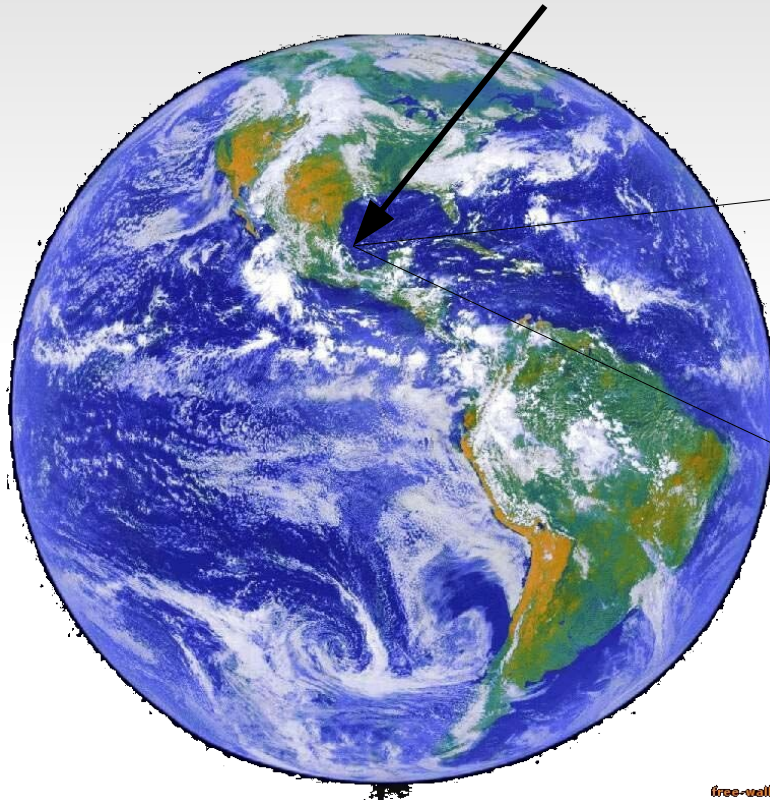
¡Aproximadamente unas **10 000 000 000** partículas de materia oscura nos han atravesado (a cada uno) durante esta charla!

Pero no las notamos....

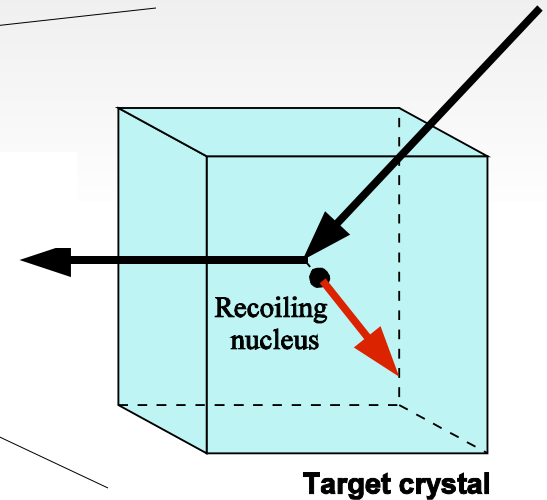
¿Cómo la podemos detectar?

## BÚSQUEDAS DIRECTAS

Podemos emplear **detectores muy sensibles** para buscar estas partículas



La partícula de materia oscura entra en el detector...



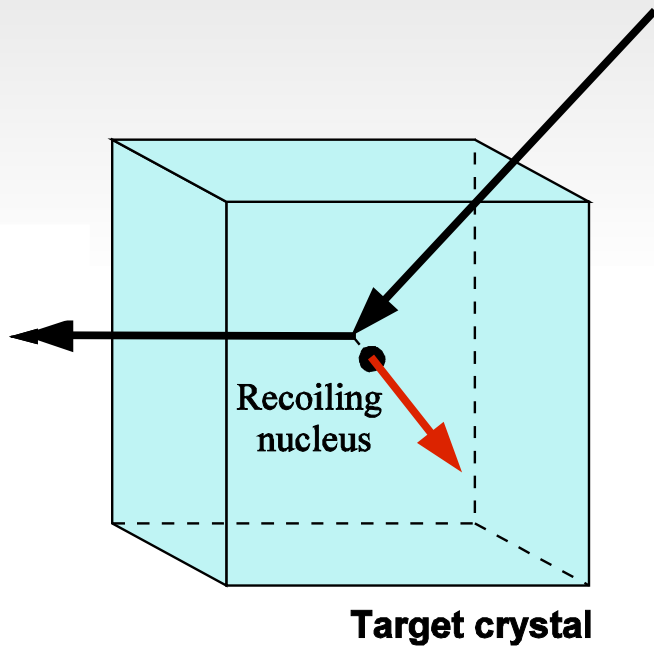
Choca con un núcleo y lo **desplaza**

En experimentos actuales intentamos observar el desplazamiento de núcleos debido a choques con materia oscura

¿Cómo la podemos detectar?

## BÚSQUEDAS DIRECTAS

Podemos emplear **detectores muy sensibles** para buscar estas partículas



El desplazamiento del núcleo provoca

- Emisión de luz
- Ionización
- Aumento de la temperatura

Los experimentos de detección **DIRECTA** intentan observar estas señales

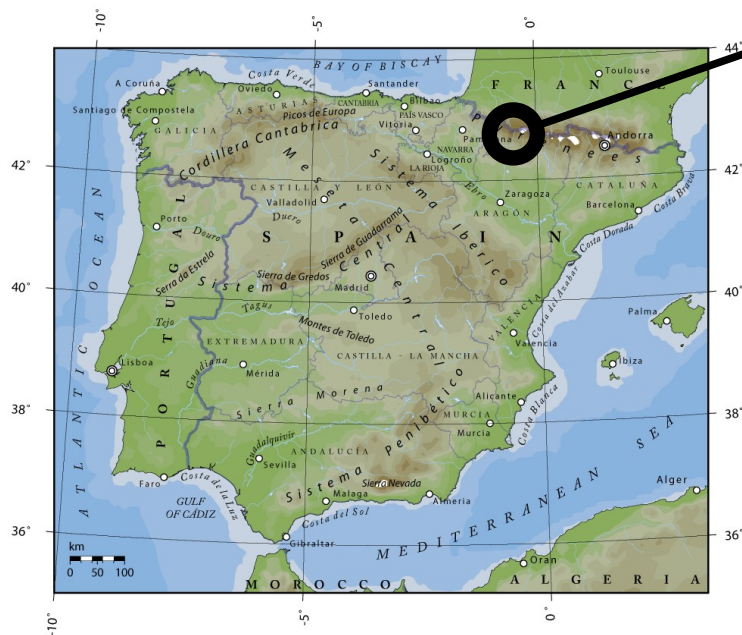


Estas partículas interaccionan tan poco que los experimentos tienen que estar aislados de otros tipos de partículas...

¡Han de estar bajo tierra para protegerse de los rayos cósmicos!

Estos experimentos se sitúan en Laboratorios Subterráneos.

Por ejemplo el de **Canfranc**



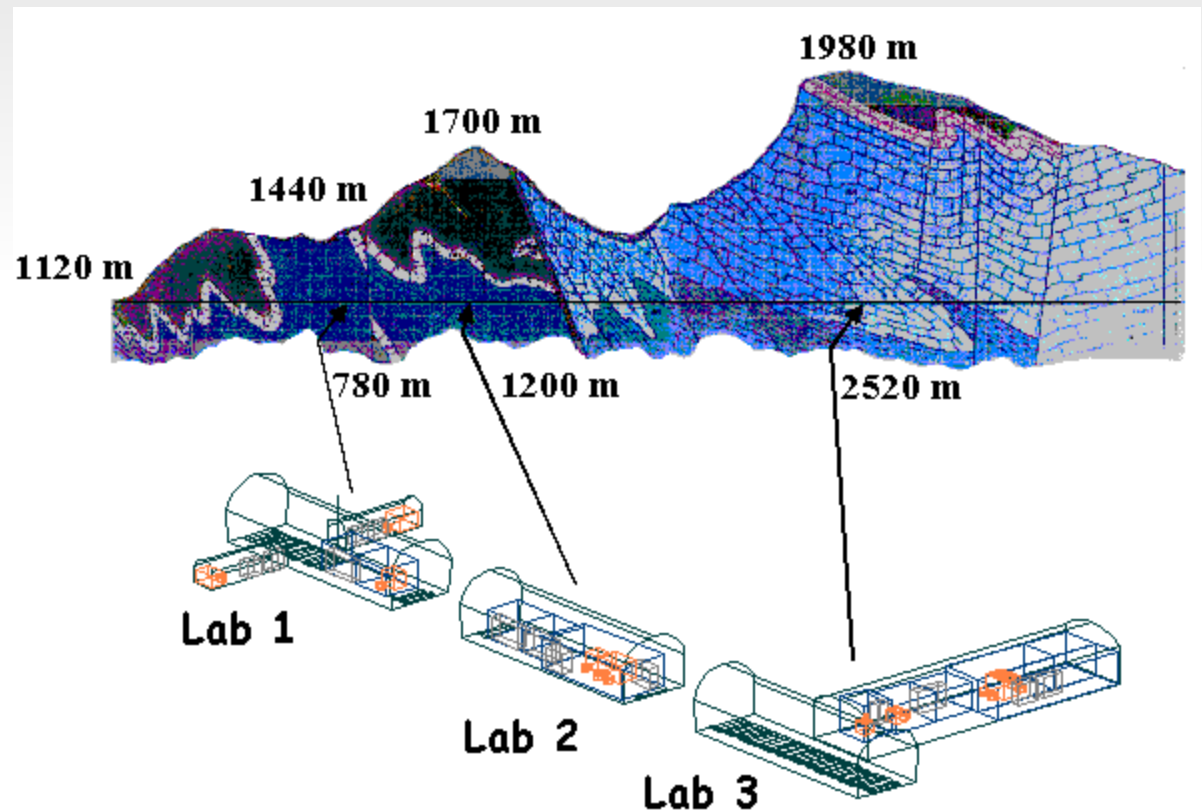
Estas partículas interaccionan tan poco que los experimentos tienen que estar aislados de otros tipos de partículas...

¡Han de estar bajo tierra para protegerse de los rayos cósmicos!

Estos experimentos se sitúan en Laboratorios Subterráneos.

Por ejemplo el de **Canfranc**

IGEX, NaI32,  
ROSEBUD, ANAIS

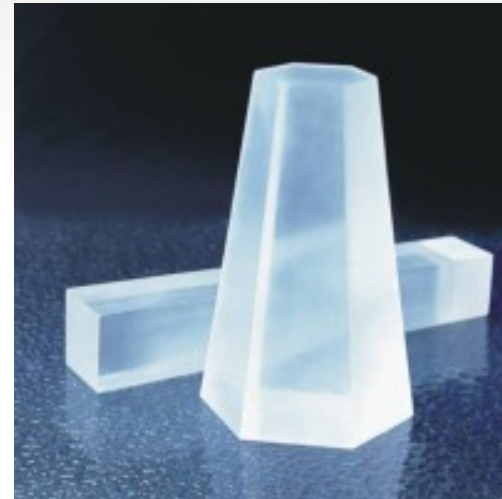


Estas partículas interactúan tan poco que los experimentos tienen que estar aislados de otros tipos de partículas...

¡Han de estar bajo tierra para protegerse de los rayos cósmicos!



Los experimentos se “blindan” frente a rayos cósmicos

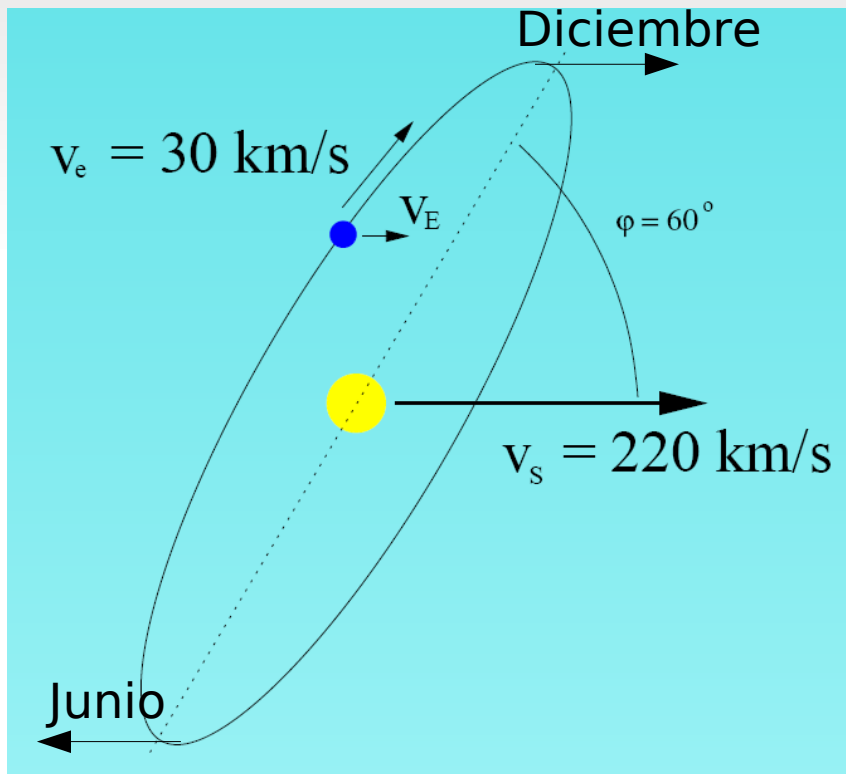


En su interior, cristales de Yoduro de Sodio detectan retrocesos nucleares emitiendo luz

**ANAIS, Laboratorio Subterráneo de Canfranc**

## Una posible forma de identificar la señal de materia oscura:

La Tierra orbita alrededor del Sol, que a su vez se desplaza alrededor de la Galaxia...



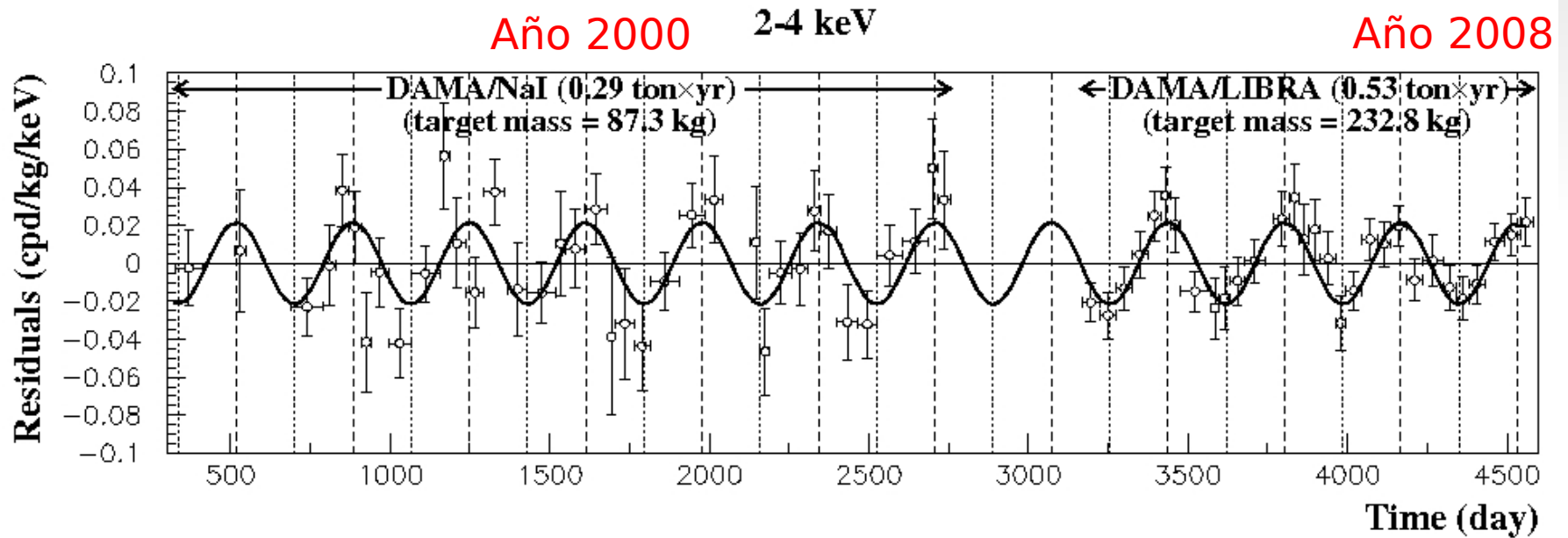
...la velocidad de la Tierra dentro del "gas" de materia oscura depende de la época del año.

Por lo tanto la interacción de materia oscura tiene una **dependencia estacional**



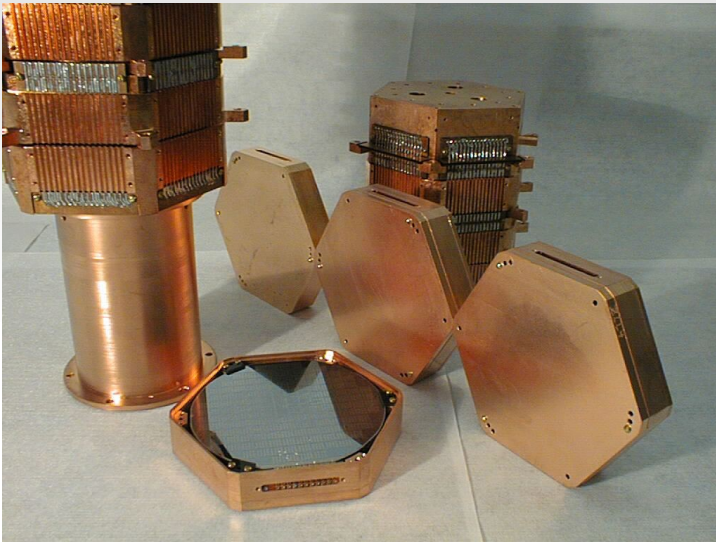
## Un experimento podría haber detectado ya la materia oscura

La colaboración **DAMA/LIBRA** en Italia ha detectado **durante los últimos 10 años** una modulación en su señal, que podría ser compatible con materia oscura



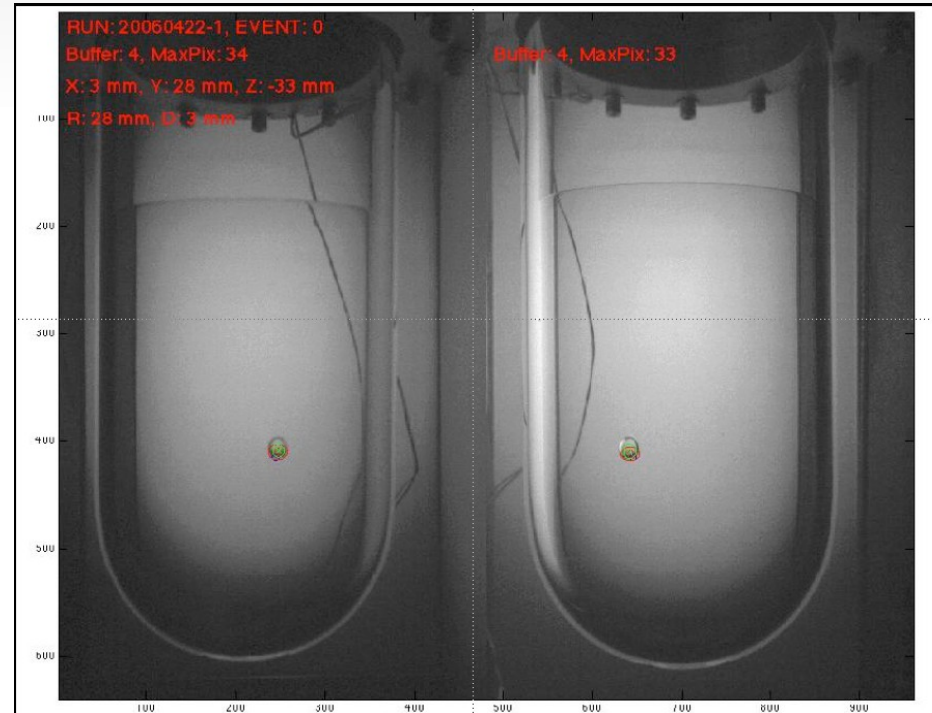
Sin embargo, esta observación no ha sido confirmada por otros experimentos.

Actualmente otros experimentos alrededor del mundo buscan señales directas de materia oscura, empleando otras técnicas y materiales.



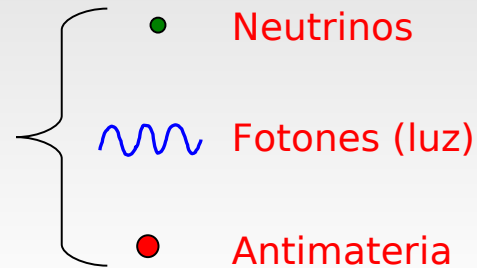
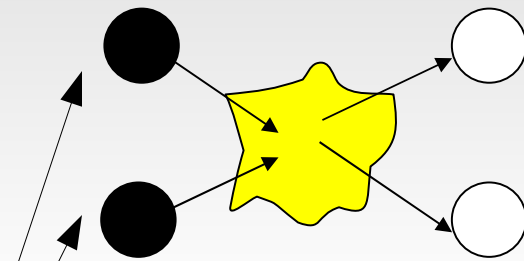
CDMS, Soudan mine

COUPP, Chicago



## Otra posibilidad... **BÚSQUEDAS INDIRECTAS**

Las partículas de materia oscura colisionan entre ellas y se aniquilan dando lugar a otras partículas (que intentamos detectar)



### Diversos experimentos:

Detectores de neutrinos

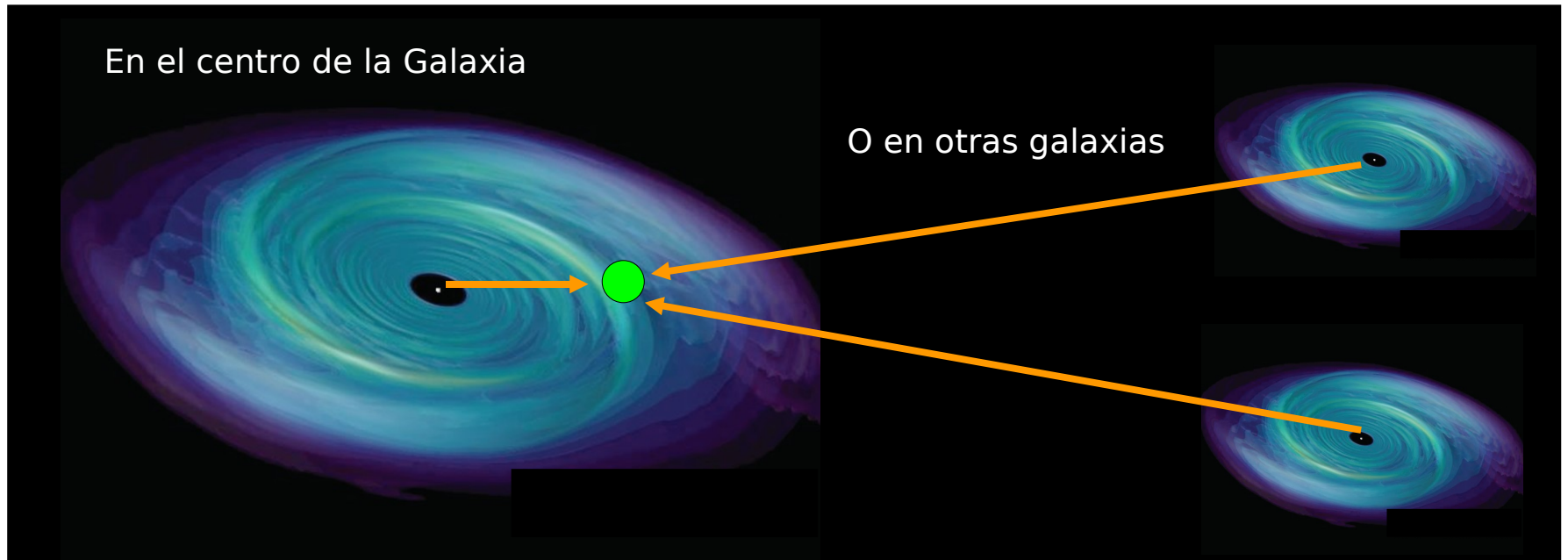
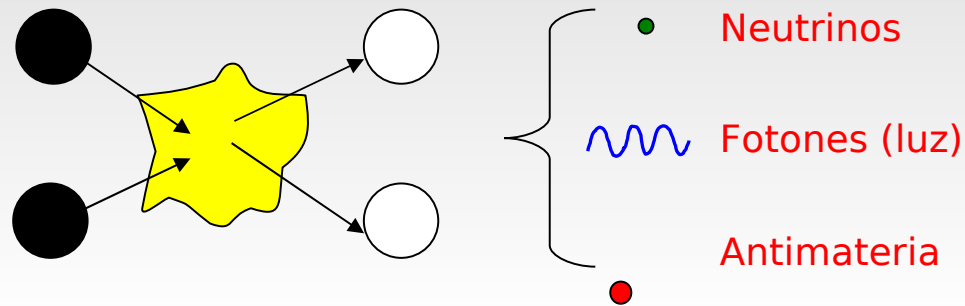
Detectores de Rayos cósmicos

Telescopios (para rayos gamma)



## Otra posibilidad... **BÚSQUEDAS INDIRECTAS**

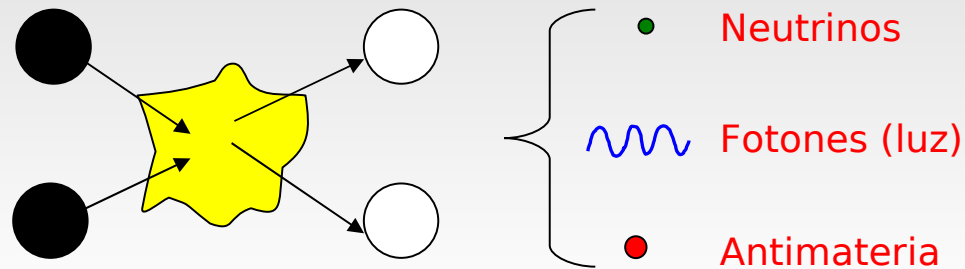
Las partículas de materia oscura colisionan entre ellas y se aniquilan dando lugar a otras partículas (que intentamos detectar)



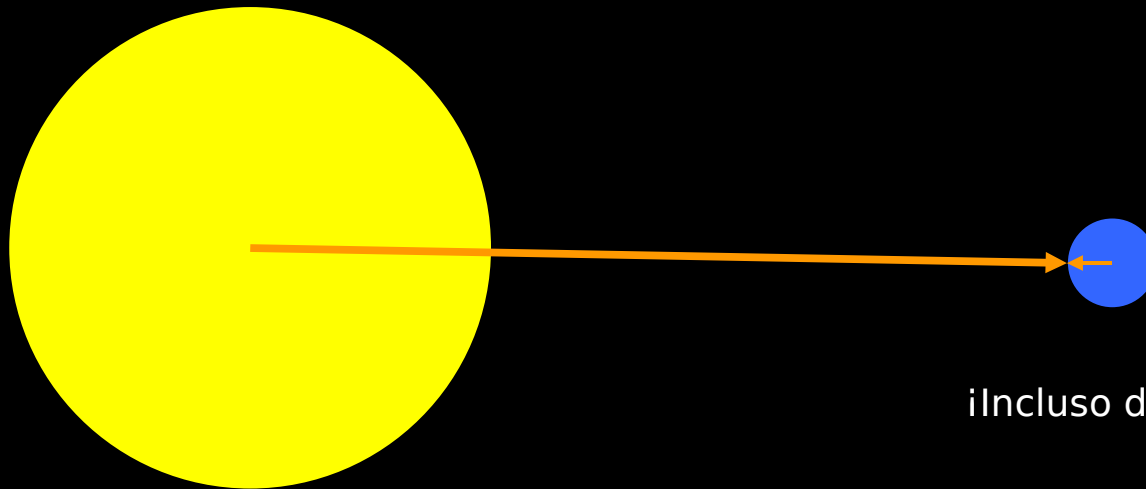


## Otra posibilidad... **BÚSQUEDAS INDIRECTAS**

Las partículas de materia oscura colisionan entre ellas y se aniquilan dando lugar a otras partículas (que intentamos detectar)

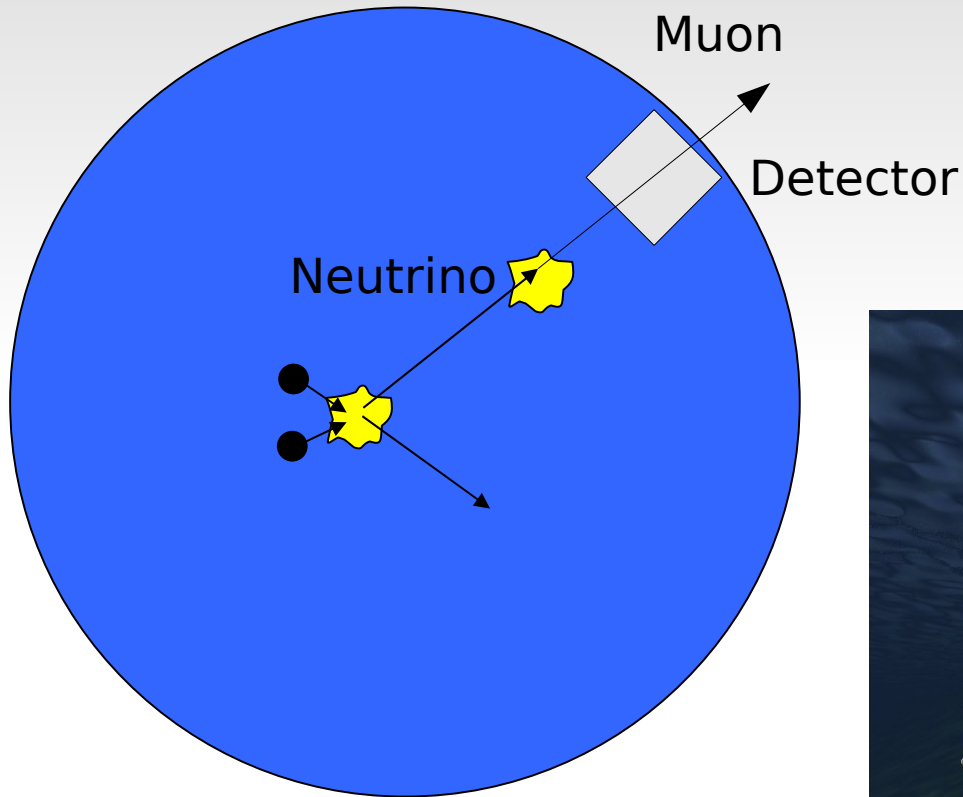


Dentro del Sol

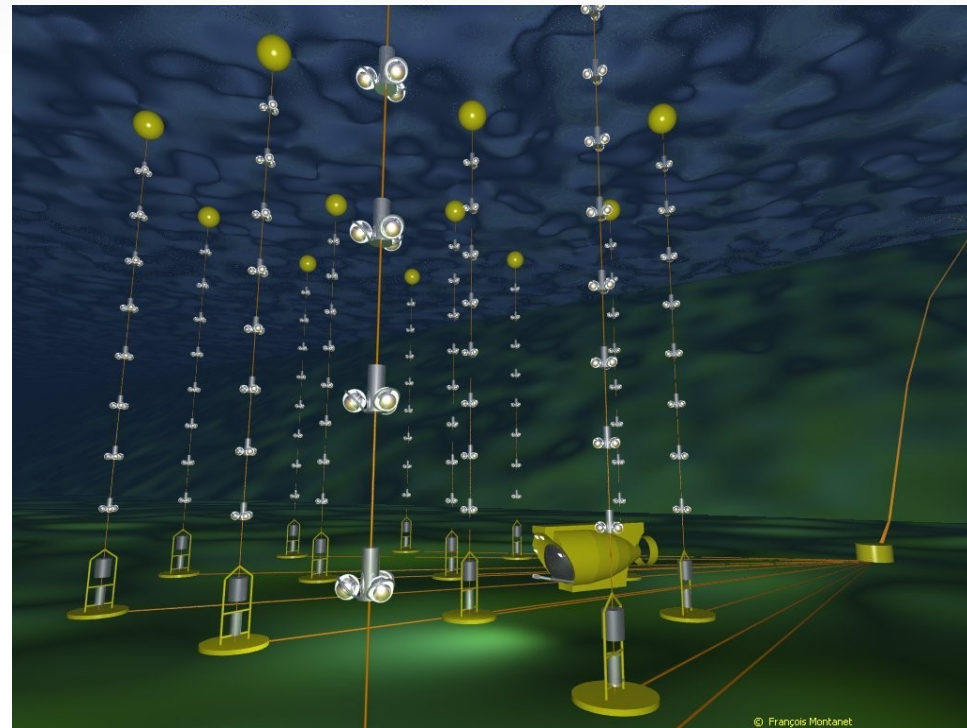


¡Incluso dentro de la Tierra!

La aniquilación de materia oscura dentro de la Tierra puede producir **neutrinos**, que interactúan con la roca y producen muones

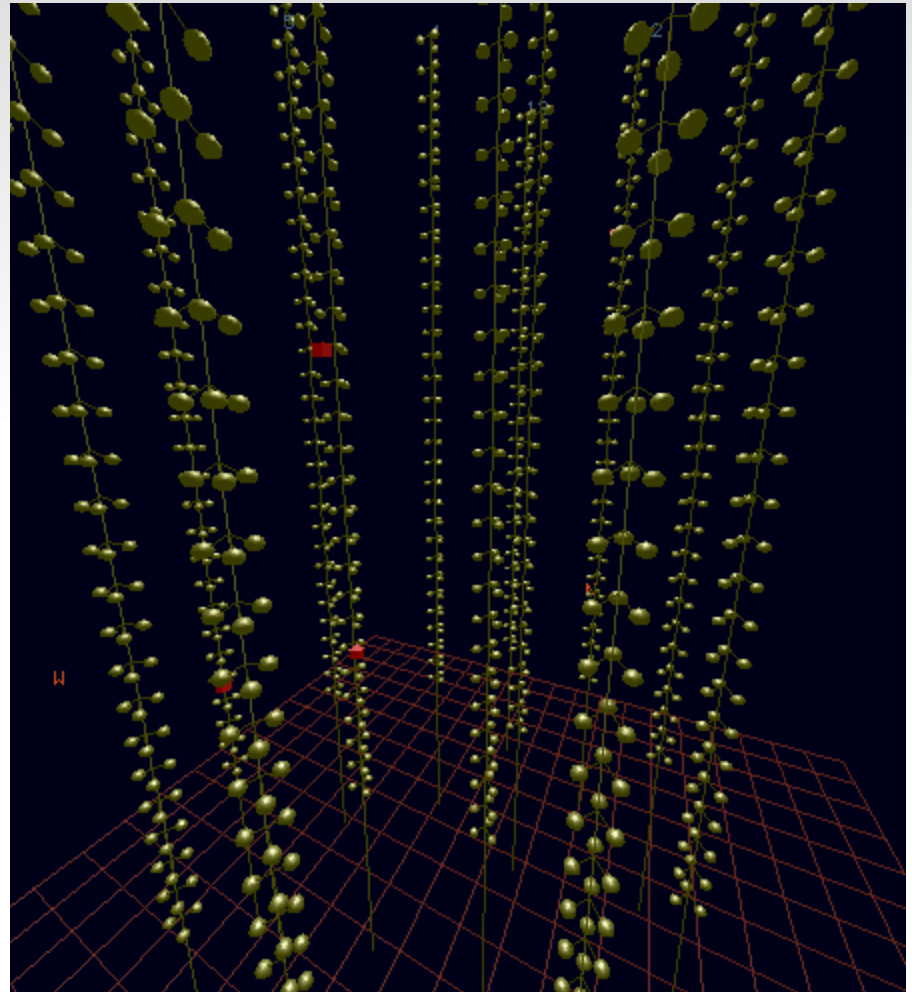


Por ejemplo, el detector **ANTARES** en el Mediterráneo



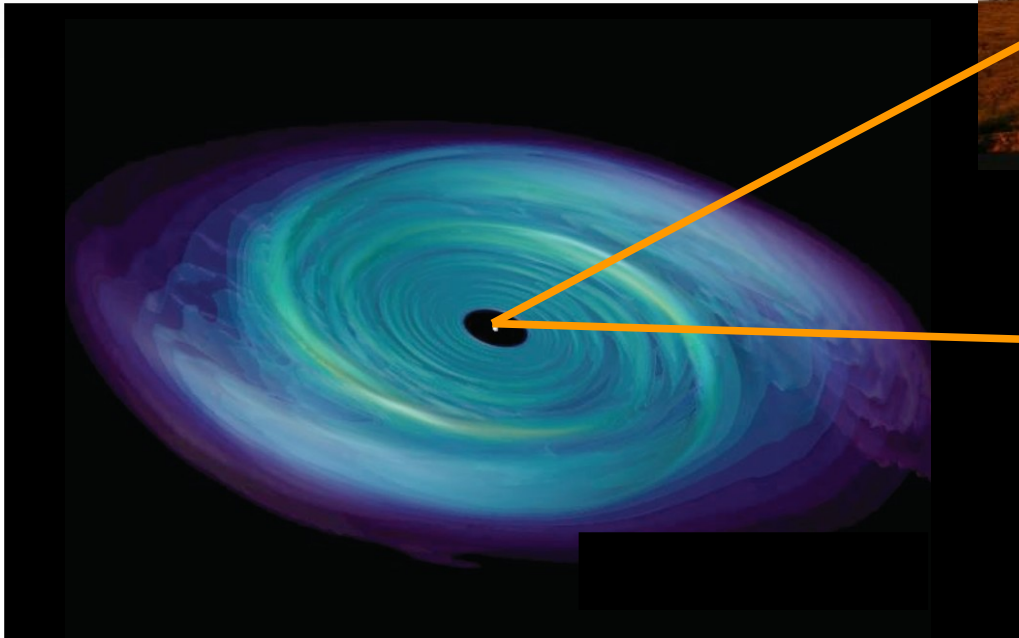
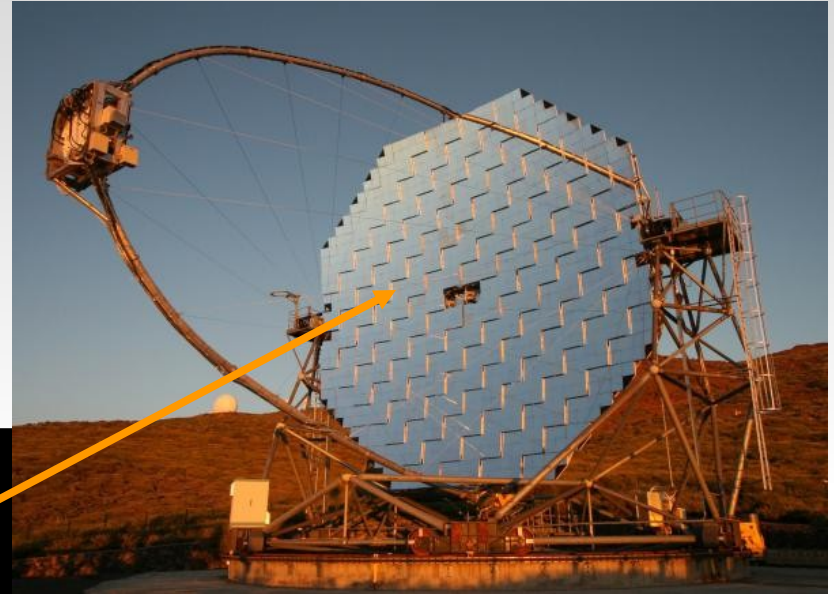
Estos muones se pueden detectar porque producen luz (radiación de Cerenkov) al atravesar agua o hielo

La radiación Cerenkov se detecta con cientos de “ojos” electrónicos



La aniquilación de materia oscura en el halo galáctico se puede detectar con satélites o telescopios

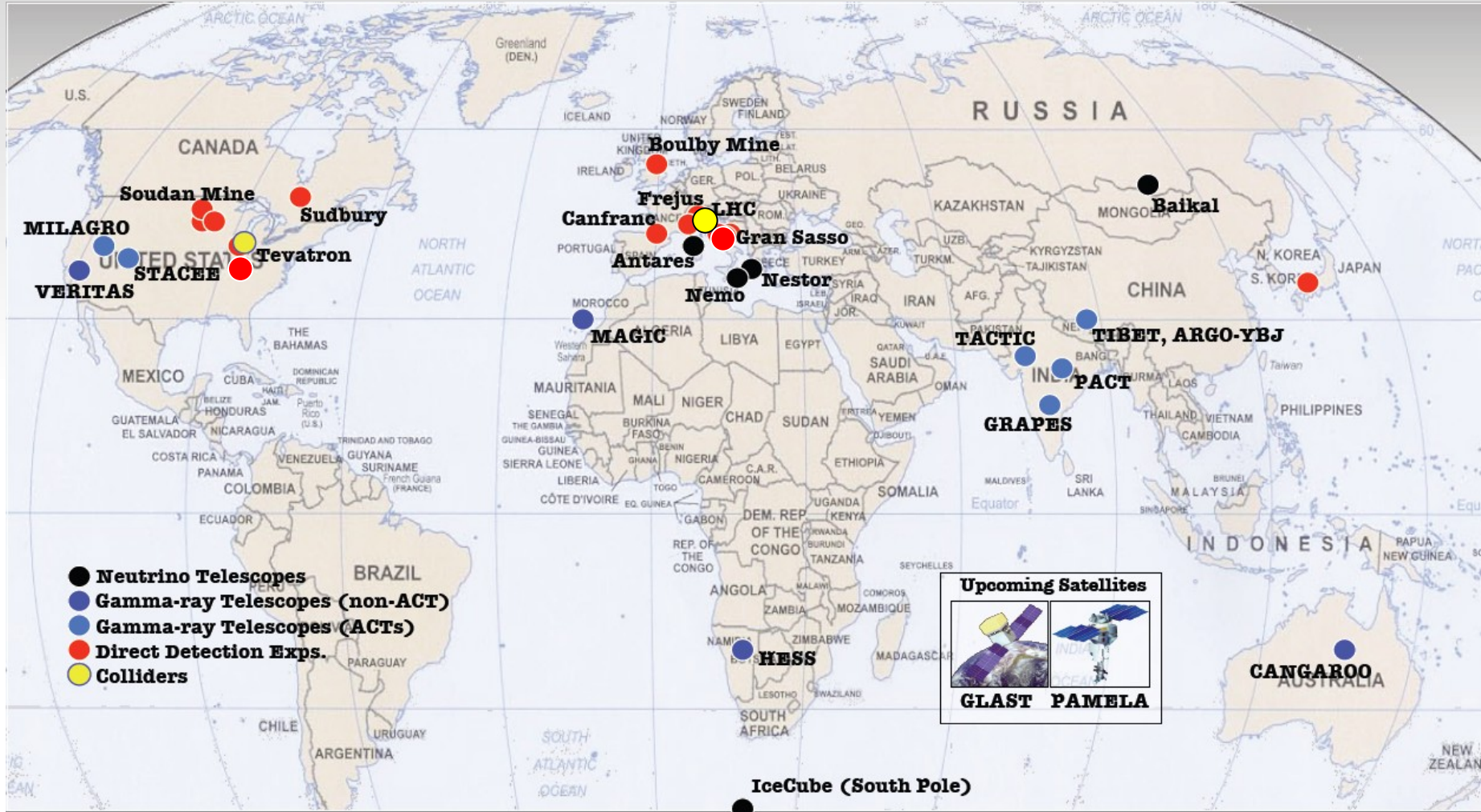
Por ejemplo, el telescopio **MAGIC** en el Canarias (Observatorio del Roque de los Muchachos)



O el satélite **PAMELA**...



# Experimentos de materia oscura alrededor del mundo



# Grupos españoles de detección de materia oscura

---

## Detección directa

Universidad de Zaragoza en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc  
(IGEX, NaI32, ROSEBUD, ANAIS)

## Detección indirecta

Instituto de Astrofísica de Andalucía  
Instituto Astrofísica de Canarias  
Universidad de Complutense de Madrid  
Instituto de Física de Altas Energías IFAE (MAGIC, CTA)

Universidad de Murcia  
Universidad de Alcalá de Henares (Auger, JEM-EUSO)

Instituto de Física Corpuscular IFIC  
Universidad Politécnica de Valencia (Antares, KM3Net)

# Grupos españoles teóricos de materia oscura

---

## Modelos de materia oscura y física más allá del modelo estándar

Universidad Autónoma de Madrid  
Instituto de Física Teórica IFT  
Universidad Complutense de Madrid  
Universidad de Barcelona  
Instituto de Física Corpuscular IFIC  
Universidad de Murcia  
Universidad de Huelva  
...

# Conclusiones

---

La mayor parte del Universo es “OSCURO” y aún DESCONOCIDO

Para explicar la materia oscura necesitamos NUEVA FÍSICA

La materia oscura se podría DETECTAR en experimentos actuales y futuros