

## Ciencia con Euclid: Materia y Energía Oscura

ANTONIO PÉREZ GARRIDO<sup>1</sup>, ANASTASIO DÍAZ SÁNCHEZ<sup>1</sup>, ESTHER JÓDAR  
FERRÁNDEZ<sup>1</sup>  
RAFAEL TOLEDO MOREO<sup>2</sup>, ISIDRO VILLÓ PÉREZ<sup>2</sup>, JAVIER GARRIGÓS  
GUERRERO<sup>2</sup>,  
JOSÉ JAVIER MARTÍNEZ ÁLVAREZ<sup>2</sup>, JAVIER TOLEDO MOREO<sup>2</sup> Y  
JOSÉ MANUEL FERRÁNDEZ VICENTE<sup>2</sup>

1. Departamento de Física Aplicada. UPCT
2. Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. UPCT

antonio.perez@upct.es; anastasio.diaz@upct.es;  
esther.jferrandez@upct.es; rafael.toledo@upct.es;  
isidro.villo@upct.es; javier.garrigos@upct.es; jjavier.martinez@upct.es;  
javier.toledo@upct.es; jmanuel.ferrandez@upct.es;

### Resumen

Recientemente se aprobó la construcción del satélite espacial Euclid, que se encargará de indagar en dos de los grandes misterios actuales de la Ciencia: la materia oscura y la energía oscura. La UPCT participa tanto a nivel tecnológico como científico en esta misión espacial cuyo lanzamiento está previsto para el año 2019. Las primeras evidencias de la existencia de la materia oscura datan de 1932. Se presupone su existencia ya que, entre otras cosas, la distribución de velocidades de las estrellas en galaxias y de las galaxias en cúmulos indican que debe existir mucha más materia de la que podemos *ver*. De ahí su nombre, tiene que haber un nuevo tipo de materia repartida por el Universo que no emite ni absorbe radiación electromagnética, pero que produce efectos gravitatorios sobre el resto de materia. La existencia de la otra componente, la energía oscura, se conoce a finales de los 90 del siglo pasado. Midiendo la luz de supernovas de tipo Ia en galaxias lejanas se llega a la conclusión de que la expansión de Universo aumenta su ritmo con el tiempo. Tenemos que introducir un nuevo término en las ecuaciones para poder explicar esta aceleración en la expansión. A este término se le denominó energía oscura. La naturaleza íntima tanto de la materia oscura como de la energía oscura es hoy en día una de las grandes incógnitas de la Cosmología que la misión Euclid tratará de ayudar en gran medida a resolver.

**Proyecto/Grupo de investigación:** Título: Diseño Preliminar de la Electrónica de Control del Instrumento NISP de la Misión Espacial Euclid.

Entidad Financiadora: Plan Nacional de I+D+I

**Líneas de investigación:** *Cosmología; Astronomía Óptica; Ciencias del Espacio.*

## 1 Introducción

La Cosmología es la rama de la Física que estudia la evolución a gran escala del Universo y que se plantea como principales interrogantes cual es el origen y destino del mismo. Para poder realizar estos estudios los científicos nos encontramos con ciertas restricciones comparados con otras ramas de la Ciencia. No podemos hacer experimentos, ni manipular el sujeto bajo estudio. Lo único que podemos hacer es medir la radiación electromagnética que nos llega de otros puntos del Universo. Entre los parámetros más importantes que podemos obtener es lo que se conoce como desplazamiento al rojo. Cuando nos llega luz de una estrella podemos analizar su espectro e identificar la señal debida a ciertos elementos químicos. Podemos observar determinadas longitudes de onda emitidas o absorbidas por la presencia de esos elementos químicos. Debido al efecto Doppler, los valores de las longitudes de onda se han modificado y gracias a eso podemos medir la velocidad con la que se mueven hacia nosotros (o se alejan) estrellas y galaxias cercanas. Si se mueven hacia nosotros vemos lo que se llama un desplazamiento al azul, las longitudes de onda se hacen más pequeña (se acercan a la parte azul del espectro de colores). Si se alejan vemos que las longitudes de onda se desplazan hacia el rojo, las longitudes de onda se hacen más grandes (se acercan a la parte roja del espectro). Para las galaxias lejanas observamos siempre un desplazamiento al rojo. En este caso ya no es por efecto Doppler sino un efecto cosmológico. Para entendernos: el Universo era más pequeño cuando se emitieron y al llegar a nosotros las longitudes de onda han aumentado por el cambio de escala debido a la expansión. Si llamamos  $\lambda_0$  a la longitud de onda emitida por una galaxia y  $\lambda$  a la que medimos nosotros cuando esa luz llega a la Tierra, podemos definir un parámetro  $z$  para cuantificar el desplazamiento al rojo de la siguiente forma:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}. \quad (1)$$

Los objetos de nuestro Universo cercano tendrán, despreciando las velocidades peculiares,  $\lambda = \lambda_0$ , luego  $z = 0$ . Al mirar objetos lejanos  $z$  aumenta, pero no solo lo hace la distancia de estos objetos sino también el tiempo transcurrido desde que esa luz se emitió. Cuando miramos objetos con  $z$  grandes estamos viendo cómo era el Universo cuando era más joven.

De los grandes enigmas que existen en la Cosmología actual destacamos la existencia de la materia oscura y la energía oscura. Los primeros indicios de la existencia de la materia oscura aparecieron alrededor de 1930, mientras que la energía oscura se descubre en 1998. Diversos métodos observacionales indirectos recientes arrojan que sólo el 4% del total de constituyentes del Universo está en forma de materia bariónica, esto es, materia tal y como la conocemos, un 23%

en forma de materia oscura y la mayor parte, un 73 %, se encuentra en forma de energía oscura, ver Fig.1. Estas cifras varían un poco de autor a autor, aunque moviéndose siempre en unos factores  $\sim 5\%/\sim 25\%/\sim 70\%$ . La Universidad Politécnica de Cartagena participa en la construcción y explotación científica de la Misión espacial Euclid cuya finalidad es precisamente la de arrojar luz sobre la naturaleza de estos dos componentes de nuestro Universo. En otro artículo de esta misma revista se exponen los detalles del satélite y su instrumentación. Vamos a ver aquí un poco de la historia del descubrimiento de estos ingredientes desconocidos de nuestro Universo y de cómo Euclid abordará su estudio..

## 2 Materia Oscura

Ya en 1932, Oort encontró que el movimiento de las estrellas en la Vía Láctea indicaba la presencia de más materia en nuestra Galaxia de la que se infería a partir de la luminosidad. Para este estudio, Oort midió la velocidad de las estrellas por medio del efecto Doppler y comprobó que muchas estrellas se movían tan rápido que tendrían que haber escapado del tirón gravitacional de la Galaxia hace tiempo[1]. A partir de la luminosidad del centro de la Galaxia se puede hacer una estimación del número de estrellas y su tamaño a a partir de ahí de la masa total de la Galaxia. si las estrellas estaban aún ahí es porque el tirón gravitacional es mayor, lo que implica la existencia de más masa de la que podemos ver. En fechas cercanas al trabajo de Oort, Zwicky llegó a conclusiones semejantes estudiando el movimiento de galaxias en cúmulos[2]. Concretamente, Zwicky midió las velocidades de cada galaxia del cúmulo de galaxias de Coma y aplicó lo que se conoce como el teorema del virial para calcular la masa del cúmulo. Según este teorema, el valor medio de la energía cinética total del cúmulo es la mitad del valor medio de su energía potencial gravitatoria. Lo que encontró fue sorprendente ya que la masa anteriormente estimada por la luminosidad del cúmulo era inferior al 2 % de la que Zwicky obtenía a partir de sus medidas de velocidades. Esto implicaba que la mayor parte de la masa del cúmulo estaba en alguna forma no luminosa. Ahora sabemos que el gas intracumular eleva ese 2 % a un 10 %, pero sigue existiendo un 90 % de materia no visible, esto es, materia oscura. Tuvieron que pasar alrededor de 40 años para que se encontraran otros indicios de existencia de esta extraña materia oscura. Fue al medir las curvas de rotación de galaxia cercanas por Vera Rubin[3]. Mirando la velocidad de cada estrella en función de su distancia al centro de su galaxia comprobó que estas velocidades eran mayores de lo esperado y que en el núcleo de las galaxias debería haber más masa de la medida para que la fuerza gravitacional sobre cada estrella pudiera actuar de fuerza centrípeta. En otras palabras, si no existiera más masa que la que podemos ver, las estrellas al moverse a esas velocidades hace tiempo tendrían que haber abandonado su galaxia.

Hay quien plantea que los efectos anteriores son debidos, no a la presencia de otro tipo de materia que no podemos ver, sino más bien a que la teoría de la gravitación debe ser corregida porque no es válida a grandes escalas. Se han

postulado diversas modificaciones que todas ellas reciben el nombre genérico de MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*). Aunque esta teoría suelen presentar discrepancias con los ciertos resultados de ciertas observaciones que no tienen fácil solución.

## 2.1 Lentes gravitatorias

Sabemos que la materia deforma el espacio-tiempo, lo curva. Las grandes acumulaciones de materia curvan tanto el espacio-tiempo que el efecto sobre la luz que nos llega de objetos situados detrás es apreciable. Por ejemplo, la luz de un cuasar situado detrás de una galaxia puede seguir varios caminos hasta llegar a nosotros de manera que vemos múltiples imágenes del mismo objeto, véase Fig.2. Otro efecto que producen estas lentes gravitacionales es la distorsión de la forma de galaxias lejanas por el paso de su luz a través de grandes pozos de potencial gravitatorio. En la figura 3 vemos cómo un cúmulo de galaxias, en concreto Abell 2218, distorsiona la luz de objetos situados detrás hasta el punto de que los vemos como arcos luminosos.

La materia oscura también puede producir estos efectos de lente gravitacional aunque mucho más débiles, de manera que, aunque no podemos verla, podemos trazar un mapa de su distribución observando los efectos de lente gravitacional débil (*weak gravitational lensing*). Euclid observará millones de galaxias con una resolución no alcanzada hasta ahora y podrá medir minúsculas variaciones en su forma debidas al efecto de la materia oscura que hay entre esta galaxia y nosotros. Como la distancia de cada galaxia será medida también usando el desplazamiento al rojo de su luz, podremos trazar un mapa tridimensional de la distribución de materia oscura en el Universo. En base a esta distribución espacial (perfiles de densidad y espectro de potencias) se podrán extraer conclusiones acerca de su naturaleza. Como, por ejemplo, obtener una medida de su sección eficaz de autointeracción, en otras palabras, saber si la materia oscura interactúa con ella misma además de poner límite a la masa de las partículas que la forman y a qué velocidades se mueven, lo que nos pondría en la pista de su naturaleza.

## 3 Energía Oscura

El descubrimiento de la energía oscura es bastante reciente. Las primeras evidencias observacionales se producen a finales de los años 90 del siglo XX. Actualmente sabemos que el Universo está en expansión. Desde cualquier punto del Universo las galaxias aparentan estar alejándose unas de otras. La velocidad con que se aleja una galaxia es proporcional a la distancia a la que se encuentra de nosotros. Esto lo podemos expresar matemáticamente por medio de lo que se conoce como ley de Hubble:

$$v = H(z)l, \quad (2)$$

donde  $v$  es la velocidad de alejamiento,  $l$  es la distancia a nosotros,  $H(z)$  es el parámetro de Hubble y  $z$  es el desplazamiento al rojo. Este parámetro se

pensó que tendría que ir disminuyendo con el tiempo debido a los efectos de atracción gravitatoria de unas galaxias con otras. Esto es, que el ritmo de expansión tendría que estar desacelerándose con el tiempo. La sorpresa saltó cuando descubrimos que esto no era así.

En astronomía existen determinados objetos cuya luminosidad intrínseca es conocida (*standard candles*). Estos objetos los podemos usar para medir distancias en el Universo comparando la luz que nos llega con la luz total que sabemos que emiten. Un ejemplo de estos objetos son un tipo de estrellas variables llamadas Cefeidas. A partir de la medición de la luminosidad aparente de las Cefeidas en otras galaxias se pudo calcular la distancia a la que se encontraban de nosotros. Esta técnica la podemos emplear para conocer la historia de la expansión del Universo. El método consiste en medir el desplazamiento al rojo y el brillo de un objeto cuya luminosidad intrínseca es conocida. Como hemos dicho, podemos para estos objetos obtener su distancia y entonces dibujar un diagrama de distancia frente a desplazamiento al rojo y de ahí sacar el valor de  $H$  en diversos instantes de la historia del Universo. ¿Qué objetos nos pueden servir para esto? Pensemos que para poder medir de forma fiable como varía  $H$  con  $z$  tenemos que ir a objetos con  $z$  relativamente grande, o sea, objetos que estarán muy lejos, luego tiene que ser muy brillantes. Resulta que la supernovas tipo Ia son ideales para esto, pero ¿qué son estas supernovas? Las estrellas de baja masa al morir desprenden sus capas exteriores y queda al descubierto su núcleo, objeto que conocemos como enana blanca. Si esta enana blanca tiene una estrella compañera moribunda, ésta desprendera sus capas exteriores que la enana blanca se *tragará* aumentando su propia masa. Cuando la masa de la enana blanca alcanza lo que se conoce como el límite de Chandrasekhar (masa igual a  $1,4M_{\odot}$ , donde  $M_{\odot}$  es la masa del sol) la fuerza gravitatoria es excesiva y no puede ser contrarrestada. Se produce un colapso que genera grandes cantidades de energía. Como esta explosión se produce siempre a la misma masa, la energía liberada por cualquier supernova de este tipo es la misma y, por lo tanto, su luminosidad es siempre la misma. El brillo de una supernova de tipo Ia puede equipararse al brillo total de la galaxia que la alberga. Perlmutter y Riess por separado midieron la luminosidad y  $z$  para diversas supernovas en galaxias alejadas[4, 5]. Encontraron que la expansión del Universo está acelerada en tiempo recientes ( $z < 0,5$ ) mientras que en el universo primigenio ( $z > 0,5$ ) la expansión era decelerada. Traduciendo  $z$  a tiempo, esto supone que el Universo comenzó un periodo de expansión acelerada cuando tenía aproximadamente 9 mil millones de años, recordemos que se estima la edad del Universo en unos 13 mil millones de años. Esto es, no sólo se encontró una expansión acelerada, algo que nadie esperaba, sino que además esto sólo ocurría desde tiempos relativamente *recientes*. La única forma de explicar esta aceleración de la expansión es introduciendo en las ecuaciones matemáticas que gobiernan la dinámica del Universo un termino adicional, una energía que no podemos detectar directamente: una energía oscura, que perfectamente podría ser la constante cosmológica de Einstein. Perlmutter, Riess y Schmidt recibieron este mismo año un merecido premio Nobel de Física por su descubrimiento. Las manifestaciones de esta energía se han hecho evidentes en otros ambitos como

en el fondo cósmico de microondas. Existen diversas teorías para explicar esta misteriosa energía y su naturaleza además de que hay quien propone que teorías tipo MOND, mencionadas anteriormente, servirían de explicación sin necesidad de acudir a un nuevo tipo de energía.

Euclid realizará el mayor y más profundo mapa tridimensional del Universo. Para esto medirá el desplazamiento al rojo de millones de galaxias. Usando este mapa se podrá estudiar lo que se conoce como oscilaciones acústicas bariónicas que, básicamente, consiste en observar los patrones de agrupamiento de la materia a gran escala. Según cual sea la naturaleza de la energía oscura tendremos unos patrones diferentes. Estudiando el factor de crecimiento del agrupamiento de la materia podremos acotar qué modelo se adecúa más a la realidad ya que cada uno arroja una dependencia diferente con  $z$ . Otro parámetro importante que estudiará Euclid es lo que se conoce como la ecuación de estado de la energía oscura:

$$p(z) = w(z)\rho(z), \quad (3)$$

donde  $p(z)$  es la presión y  $\rho(z)$  es la densidad de la energía oscura, ambas función del desplazamiento al rojo  $z$ . El cociente entre  $p$  y  $\rho$ ,  $w(z)$  es el parámetro a medir y que con los datos de Euclid se podrá acotar de forma precisa. A partir de las ecuaciones que gobiernan la expansión podemos obtener que, para una expansión acelerada, se tiene que verificar que  $w < -1/3$ . Si, por ejemplo fuera  $w < -1$  la energía oscura sería lo que se denomina energía phantom. Esta energía tiene la particularidad de que su densidad aumenta con el tiempo y en el Universo se produciría un *Big Rip*. La hipótesis del *Big Rip* nos dice que la escala del Universo se haría infinita en un tiempo finito. Vaya, que cualquier partícula subatómica estaría a una distancia infinita de la más próxima. La mayor parte de los científicos se inclinan a pensar que  $w$  tendrá un valor entre  $-1$  y  $-1/3$  correspondiendo a los modelos conocidos como de quintaesencia. Si  $w = -1$  en todo el rango de  $z$ , entonces la energía oscura sería la constante cosmológica que Einstein introdujo en sus ecuaciones. El problema ahora sería encontrar una respuesta a porqué la teoría cuántica de campos nos da un valor de esa constante más grande en un factor  $10^{120}$  al valor que obtenemos mediante observaciones. A esta discrepancia se la conoce como la *peor predicción en la historia de la Física*

Se planea el lanzamiento de Euclid para el 2019 y hasta entonces quedan años de trabajo de ingeniería y preparativos científicos. Los resultados que se espera obtener revolucionarán no sólo el campo de la Cosmología sino otras ramas de la Astrofísica por la calidad de los datos obtenidos. Por citar alguno, se calcula que se encontrarán cientos de galaxias con un  $z > 7$  y decenas de cuasar con  $z > 8$ , que son de los objetos más alejados que se conocen. La galaxia más alejada actualmente tiene un  $z = 8,6$ , pero la segunda más alejada tiene  $z = 6,96$ . El gran número de objetos que se encontrarán a esas elevadas distancias nos permitirá tener una muestra significativa a nivel estadístico para entender los procesos de formación en el Universo primigenio. Además, la profundidad de los datos en el infrarrojo cercano también servirán para realizar multitud de

estudios en el campo de objetos cercanos de baja masa como enanas marrones ultrafrías y planetas extrasolares.

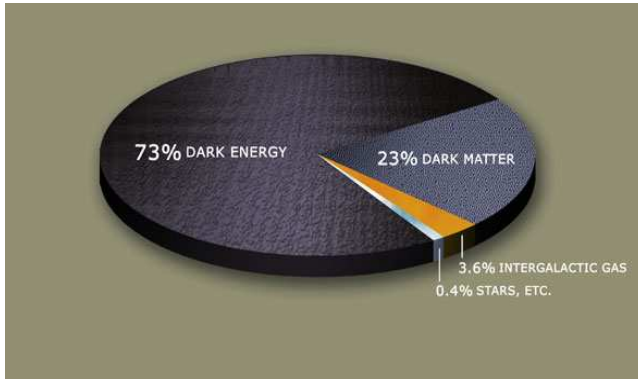


Figura 1: Distribución de masa-energía en el Universo. Sólo el 4% es materia bariónica, la mayor parte en forma de gas interestelar, un 73% está en forma de energía oscura y un 23% en forma de materia oscura



Figura 2: Ejemplo de lente gravitatoria. Arriba a la izquierda imagen real de un imagen cuádruple del mismo quasar producida por lente gravitatoria

## Referencias

- [1] J. H. Oort, *The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems*, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 4 p. 249 (1932).

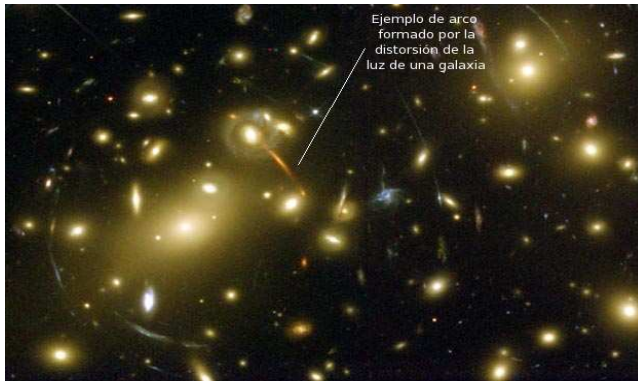


Figura 3: Arcos luminosos producidos por la deformación de la luz de diversas galaxias a su paso por el cúmulo galáctico Abell 2218. Indicado uno de los arcos para su identificación.

- [2] F. Zwicky, *On the masses of nebulae and clusters of nebulae*, The Astrophysical Journal, **86** p. 217 (1937)
- [3] V. C. Rubin, *Dark matter in spiral galaxies*, Scientific American, **6** p. 96 (1983)
- [4] A. G. Riess et al. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, Astron. J. **116** 1009 (1998)
- [5] S. Perlmutter et al. *Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae*, Astrophys. J **517** 565 (1999)