

EUCLID: INVESTIGANDO EL UNIVERSO OSCURO

La materia oscura y la energía oscura dominan el comportamiento del universo. Entenderlas es uno de los mayores retos de la cosmología en la actualidad. Recientemente, hay muchos estudios que se han diseñado y se están llevando a cabo para esclarecer su naturaleza. La Agencia Espacial Europea ha liderado el desarrollo de la misión Euclid, que fue lanzada al espacio el 1 de julio del 2023. Euclid cuenta con un telescopio de 1.2m de diámetro y con dos instrumentos, uno en el visible y otro en el infrarrojo cercano, que han sido especialmente diseñados para proporcionar un campo de visión muy amplio y con una buena calidad de imagen. Euclid tiene una vida útil nominal de seis años durante la cual llevará a cabo un cartografiado de un tercio del cielo. Euclid investigará, utilizando técnicas de lentes gravitacionales y de agrupamiento de galaxias, la estructura y la evolución del universo.



Francisco Javier Castander Serentill
Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)
ffc@ice.csic.es
Rafael Rebolo López
Instituto de Astrofísica de Canarias
rrl@iac.es

En representación del Consorcio de Euclid en España

La cosmología aglutina los interrogantes de la humanidad para intentar comprender el universo donde vivimos. La cosmología moderna empezó a principios del siglo XX y se asienta en dos pilares fundamentales: el principio cosmológico y la teoría general de la relatividad general. El primero asume que el universo cuando se observa en escalas suficientemente grandes es igual para cualquier observador y por tanto las leyes de la física son las mismas en cualquier lugar. El segundo describe cómo se comporta el universo en presencia de materia y energía, y el desarrollo de sus ecuaciones nos permite entender su comportamiento y evolución global. A lo largo del siglo XX, las observaciones nos han ido ayudando a entender cada vez mejor la composición y el funcionamiento del cosmos. El descubrimiento de la expansión del universo, el estudio de la dinámica de las galaxias y de los cúmulos de galaxias, el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo y el estudio del agrupamiento de las galaxias son hitos que nos han proporcionado pistas esenciales para entender el universo. A finales del siglo XX, especialmente con los resultados de los estudios de supernovas, hemos comprobado que el universo se está expandiendo de manera acelerada. Un comportamiento difícil de entender puesto que esperaríamos que la gravedad, como fuerza atractiva que es, redujese el ritmo de esta expansión. A la causa que produce esta aceleración la denominamos energía oscura, que puede ser debida a un fluido extraño o a leyes de la física que todavía nos son desconocidas.

En las últimas décadas, hemos logrado enormes avances en la determinación de los constituyentes básicos del universo, que marcan su comportamiento. Gracias a las observaciones de la radiación cósmica de fondo, del agrupamiento de galaxias y de supernovas, ahora sabemos que el universo está formado aproximadamente por un 5% de materia bariónica ordinaria, un 25% de materia oscura y un 70% de energía oscura. Sin embargo, no tenemos idea de la naturaleza de estos dos últimos componentes. Es decir, desconocemos lo que constituye el 95% del universo.

Para abordar posibles soluciones a esta cuestión, tenemos que investigar la estructura general y la evolución del universo y sus constituyentes. Desde el punto de vista de la observación, se necesitan estudios de gran envergadura que sondeen áreas amplias y que alcancen una profundidad que nos permita medir en

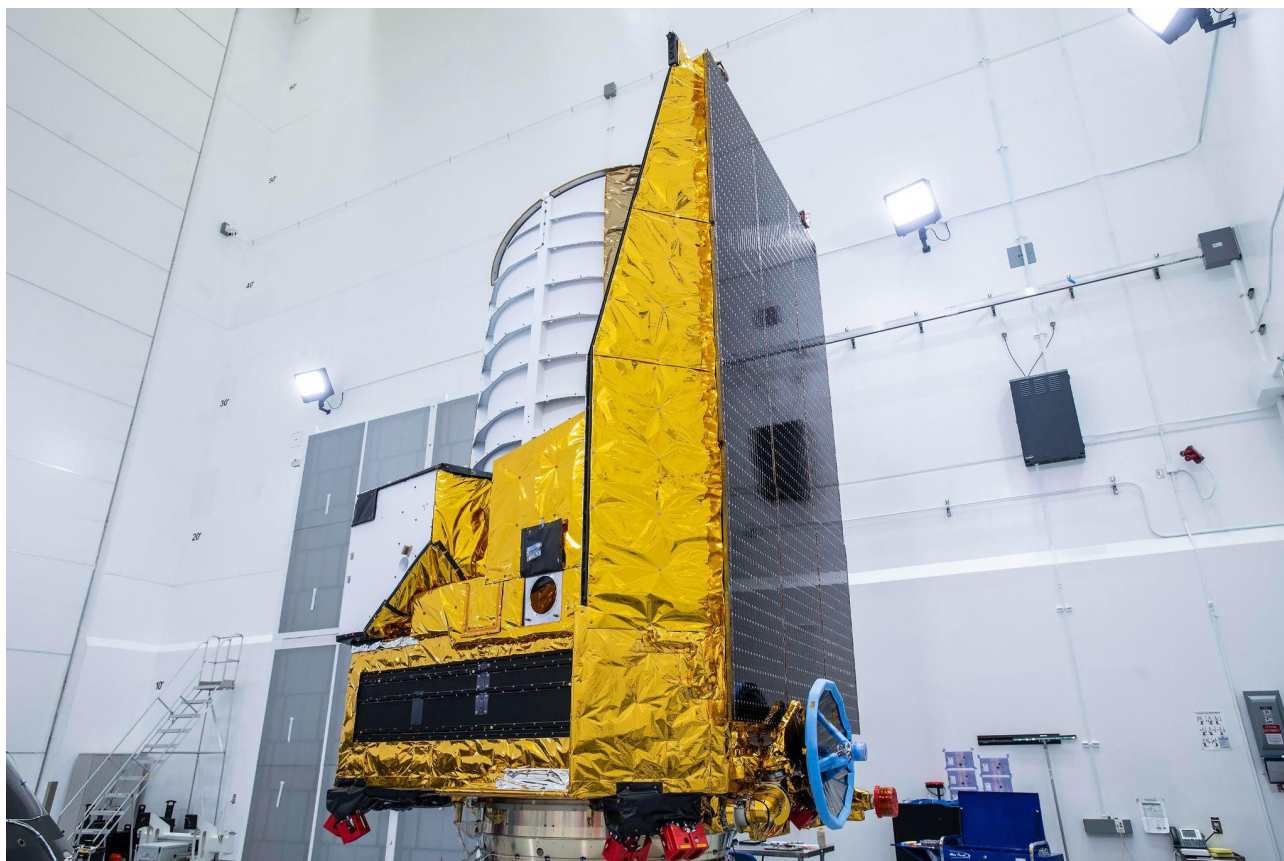
detalle la evolución de las estructuras en la distribución de las galaxias. De hecho, una cuestión fundamental en Cosmología es establecer cómo se han formado y evolucionado las estructuras que observamos hoy. Para poder comprender completamente las estructuras que observamos, necesitamos caracterizar cómo la materia visible, los bariones, interactúa con la materia y energía oscuras que impulsan la dinámica gravitacional del universo. El contenido de densidad de energía del universo también juega un papel clave en el crecimiento de su estructura a gran escala.

En la primera década del siglo XXI, los comités asesores de las principales agencias financiadoras de la investigación delinearon la manera de abordar mediante observación una mejor comprensión del universo. Identificaron cuatro técnicas de observación principales que son las más sensibles a las propiedades de la energía oscura: las supernovas de tipo Ia,

las lentes gravitacionales, los cúmulos de galaxias y el agrupamiento de las galaxias, incluidas las oscilaciones acústicas de bariones (BAO) y las distorsiones espaciales de desplazamiento al rojo (RSD). En los últimos años ha habido un esfuerzo considerable para seguir estas recomendaciones y diseñar y construir instrumentación que permita llevar a cabo grandes estudios cosmológicos y establecer con mayor precisión las propiedades generales de nuestro universo.

Respondiendo a esta necesidad, la Agencia Espacial Europea (ESA) adoptó la misión cosmológica Euclid como su segunda misión de clase media, M, dentro de su Programa de Visión Cósmica 2015-25. La comunidad científica europea ha acogido este esfuerzo con entusiasmo y un número récord de más de dos mil astrónomos y cosmólogos se han inscrito en el Consorcio de Euclid y trabajado para que esta misión sea un éxito.

Euclid en Cabo Cañaveral el 23 de junio de 2023 antes de ser acoplado al lanzador Falcon 9. Crédito de la imagen: ESA.



LOS ORÍGENES DE EUCLID

Una de las técnicas más prometedoras para el estudio de la energía oscura es el estudio de las deformaciones por efectos de lentes gravitacionales, que dependen de la geometría del universo y de cómo la materia se agrupa. Desde observatorios terrestres su estudio se complica debido a las distorsiones de la atmósfera. La misión DUNE se propuso a la ESA para realizar un estudio de los efectos de lentes gravitacionales desde el espacio.

Otra técnica fundamental para el estudio de la energía oscura es el estudio del agrupamiento de las galaxias. En particular, la escala del BAO es una medida de la geometría del universo y las RSD son indicadoras de cómo se comporta la gravedad. El estudio desde el espacio permite acceder a la parte infrarroja del espectro y estudiar estos indicadores a un desplazamiento al rojo más alto y por tanto a una edad más temprana del universo. La misión SPACE se propuso a la ESA para llevar a cabo estos estudios desde el espacio.

La Agencia Espacial Europea decidió juntar ambas misiones. El resultado de varios estudios condujo al concepto de la misión Euclid como amalgama de las dos misiones anteriores. Euclid se presentó a la selección de misiones dentro del programa de Visión Cósmica 2015-25 de la ESA y fue finalmente

seleccionada como su segunda misión del tipo medio M en octubre del 2011, el mismo día en que se concedió el premio Nobel por el descubrimiento de la expansión acelerada del universo por el estudio de supernovas. Desde entonces la ESA, las empresas Thales Alenia como contratista principal y Airbus como responsable del módulo de carga útil y el consorcio de Euclid, responsable de los instrumentos de la carga útil y del segmento científico de tierra junto a la ESA han venido desarrollando la misión, que finalmente se lanzó con éxito el día 1 de julio del 2023.

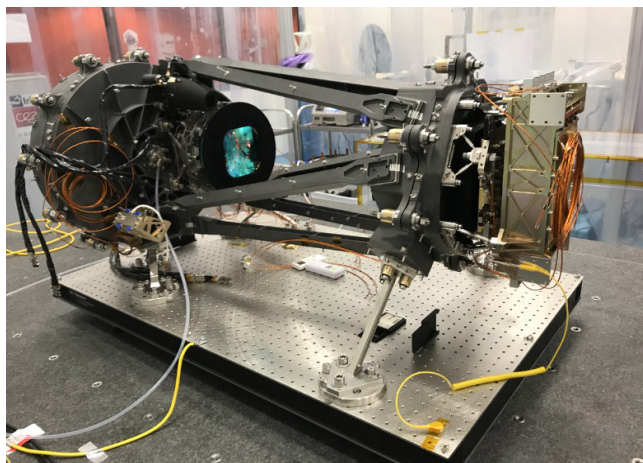
LOS INSTRUMENTOS Y EL SEGMENTO CIENTÍFICO DE TIERRA DE EUCLID

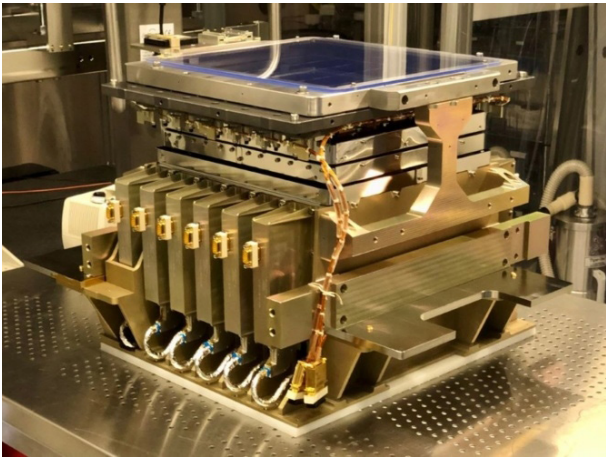
Euclid consiste en un telescopio de 1.2m de diámetro con un diseño anastigmático de tipo Korsch de tres espejos que proporciona un amplio campo de visión con mínimas distorsiones.

Euclid tiene dos instrumentos científicos: el instrumento de imagen visible (VIS) y el espectrógrafo y fotómetro en infrarrojo cercano (NISP). El camino óptico tiene un dicroico que refleja la luz al instrumento visible, VIS, y la transmite al instrumento infrarrojo, NISP.

El instrumento VIS consiste en un plano focal de 36 detectores CCD de e2v dispuestos en una matriz de 6 x 6. Los detectores son de 4k x 4k píxeles y proporcionan una escala de 0.1" por píxel en el

El Instrumento NISP antes de la instalación del aislante externo (izquierda) y después (derecha). Crédito de la imagen: Euclid Consortium.





Plano focal completamente ensamblado del instrumento VIS. Crédito de la imagen: CEA.

cielo. El campo de visión de VIS es de 0.54 deg^2 . De esta manera, VIS proporciona un campo de visión amplio con una buena resolución para poder hacer estudios de lentes gravitacionales. Los diversos revestimientos de las superficies ópticas y la eficiencia cuántica de los detectores proporcionan un filtro efectivo, IE, con transmisión entre las longitudes de onda de 530 a 920 nm.

El instrumento NISP consta de 16 detectores de Teledyne Hawaii 2GR de $2k \times 2k$ dispuestos en una matriz de 4×4 . La escala del píxel es $0.298''$. NISP tiene un campo de visión de 0.57 deg^2 . El instrumento NISP cuenta con una rueda de filtros y una rueda de grismas que permite hacer imagen en tres bandas en el infrarrojo cercano, Y_E , J_E y H_E y espectroscopía sin rendija con un grisma "azul", BG, que cubre las longitudes de onda de 926 a 1326 nm y tres grismas "rojos", RG, que cubren de 1206 a 1892 nm. Ambos grismas tiene una resolución aproximada de 400. Los tres grismas rojos tienen diferentes orientaciones para permitir resolver la confusión por el solapamiento de los espectros.

Estos dos instrumentos permiten tomar imágenes en el óptico con gran resolución en un campo de visión muy amplio y también imágenes en el infrarrojo cercano en tres bandas y tomar espectros sin rendija en la misma región del cielo que el instrumento vi-

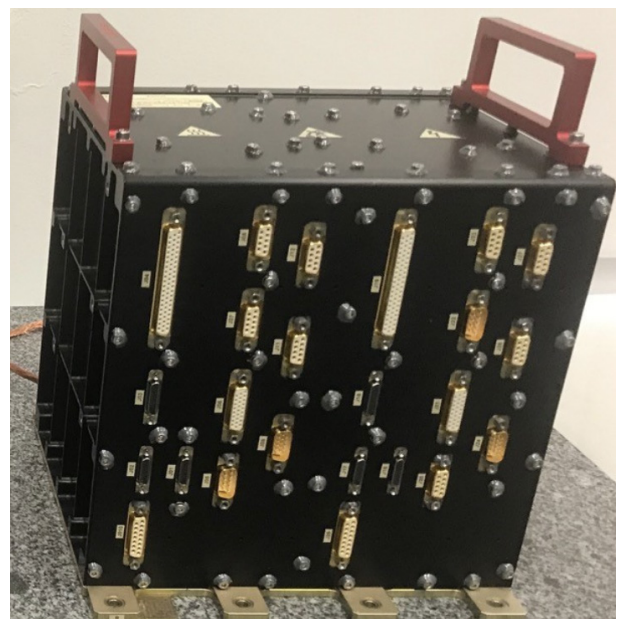
sible. Para complementar la fotometría desde el espacio, que sólo dispone de una banda amplia en el óptico, Euclid necesita imágenes a una profundidad similar en el óptico con los filtros tradicionales más estrechos para poder caracterizar las distribuciones espectrales de energía y así poder determinar los desplazamientos al rojo fotométricos de las galaxias.

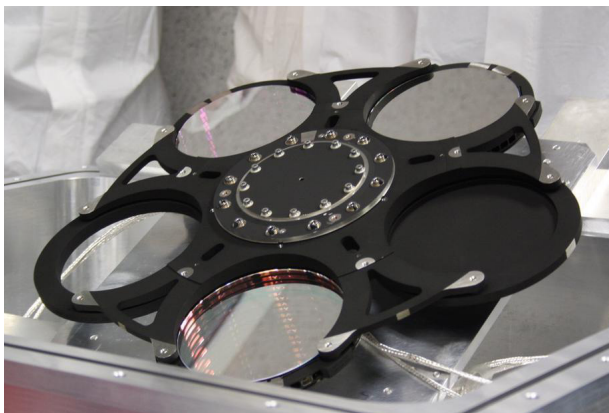
Otra parte importante de la misión la constituye el Segmento Científico de Tierra (SGS), que es el responsable de tratar y analizar los datos que proporciona el satélite además de los datos adicionales necesarios tomados desde tierra. El SGS se divide en diferentes unidades de organización (OU) para cubrir cada una de las fases del procesado de datos y cuenta con centros de datos científicos (SDC) en diferentes países que soportan el cómputo necesario de las diferentes OUs.

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA

La contribución española a la misión Euclid empezó con sus predecesoras, DUNE y SPACE. Después de las fases preliminares de estudio y de negociación, España se comprometió a través del Multi-Lateral

Unidad de control del instrumento (ICU) completamente ensamblada. Crédito de la imagen: Euclid Consortium.





Rueda de Filtros (FWA) del instrumento NISP. Crédito de la imagen: Euclid Consortium.

Agreement (MLA) firmado con la ESA y las otras agencias financiadoras a financiar la unidad de control del instrumento (ICU) y la rueda de filtros (FWA) del instrumento NISP y la unidad de organización de simulaciones (OU-SIM) y el centro de datos científico español (SDC-ES) del SGS.

Los grupos de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) han sido los responsables de diseñar, construir, testear y entregar la ICU del instrumento NISP. A esta

labor ha contribuido la empresa Airbus Crisa. Los grupos del Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE-CSIC) y el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC) han sido los responsables de la FWA del instrumento NISP. Los grupos del ICE-CSIC y del IEEC son los responsables y coordinadores de OU-SIM del SGS. El Port d'Informació Científica (PIC) es el SDC-ES.

Además de las contribuciones especificadas en el MLA, desde España también se contribuye a la gobernanza del proyecto y a la preparación del análisis científico. Participamos en el equipo de ciencia de Euclid (EST) de la ESA. Hemos dirigido el Consorcio de Euclid los años 2020 y 2021. Lideramos el grupo de trabajo de simulaciones cosmológicas, y el grupo de modelos no lineales. También contribuimos a otros grupos de trabajo y tenemos uno de los dos *Independent Legacy Scientists* de la misión. En la actualidad hay más de cien participantes españoles activos en el Consorcio de Euclid.

LAS PRIMERAS ETAPAS DE EUCLID

Euclid se lanzó al espacio el día 1 de julio de 2023 desde Cabo Cañaveral con un cohete Falcon 9 de la empresa SpaceX. El lanzamiento estaba previsto con un Soyuz desde Kourou, pero la guerra de Ucrania imposibilitó el lanzamiento previsto. Tras unos



Lanzamiento de Euclid el 1 de julio de 2023 desde Cabo Cañaveral. Crédito de la imagen: ESA.



Composición de las primeras imágenes de Euclid (EROs). Arriba izquierda: galaxia espiral IC 342; arriba medio: nebulosa de la cabeza de caballo; arriba derecha: cúmulo globular NGC 6347; abajo izquierda: galaxia irregular NGC 6822; abajo derecha: cúmulo de galaxias de Perseo. Crédito de la imagen: ESA / Euclid Consortium / NASA / J.C. Cuillandre y G. Anselmi.

meses de incertidumbre, finalmente la ESA llegó a un acuerdo con SpaceX que culminó con un lanzamiento exitoso con un tiempo de preparación muy corto.

Después de su lanzamiento, Euclid viajó en un mes al punto de Lagrange L2 donde ahora se encuentra siguiendo una órbita de Lissajous. La primera fase de la misión fue la puesta en marcha del telescopio y de los instrumentos que se llevó a cabo en el mes de julio y comienzos de agosto. Se optimizó el foco del telescopio y se comprobó que los instrumentos funcionaran. Después empezó la fase de verificación del rendimiento que incluía un programa completo de calibraciones que a finales de noviembre se ha completado. En estas primeras fases se ha podido corroborar la calidad de imagen excepcional del telescopio y el rendimiento que cumple con los requisitos de diseño.

No obstante, ha habido tres contratiempos que no se esperaban. En primer lugar, en ciertas orientaciones del telescopio respecto al Sol entra luz parásita. También, cuando se produce una tormenta solar, el flujo de rayos X resultante traspasa el aislamiento de las placas solares y deposita radiación en los detec-

tores del instrumento VIS. Y, por último, el sistema de apuntado fallaba en algunas ocasiones debido al alto flujo de rayos cósmicos. Pero estas inesperadas ocurrencias no inhabilitan la misión y se han logrado solucionar en parte sus efectos. La luz parásita ha obligado a cambiar la estrategia de apuntados del cartografiado para evitarla. Las tormentas de rayos X es algo inevitable y eso hará perder algo de eficiencia a la misión. El software de apuntado ha sido mejorado y ya no se producen pérdidas de guiado.

Durante estas primeras fases, la ESA programó observaciones de diferentes objetos para demostrar las capacidades de Euclid. El 7 de noviembre hizo públicas las imágenes de estas observaciones tempranas (EROs). Estas imágenes incluyen un cúmulo de galaxias, una galaxia espiral local, una galaxia irregular, un cúmulo globular y una nebulosa con formación estelar, que permiten ilustrar el potencial de descubrimiento de Euclid evidenciando la calidad de imagen y el amplio campo que proporciona.

EL CARTOGRAFIADO DE EUCLID

En diciembre del 2023 empezó el cartografiado de Euclid, que tiene una duración prevista de seis años

en los que cubrirá unos 14000 deg², aproximadamente un tercio del cielo, evitando el plano galáctico y la eclíptica, donde la alta densidad estelar y el fondo de cielo más brillante hacen el cartografiado extragaláctico menos eficiente.

Las observaciones consisten en ir cubriendo el cielo con un patrón prediseñado de apuntados. Cada apuntado consta de 4 tomas de datos en posiciones con un ligero desplazamiento, siempre con el mismo patrón. En cada una de estas posiciones se toma una imagen con el instrumento visible y simultáneamente espectros sin rendija con el instrumento NISP. Después se toman imágenes en el infrarrojo cercano sucesivamente con los tres filtros: J_E, H_E y Y_E.

Con esta estrategia de observación, se llegará a una profundidad de magnitud AB de 24.5 a 10σ para fuentes extensas en el filtro visible I_E y a 24.0 a 5σ para fuentes puntuales en los filtros del infrarrojo cercano. La espectroscopía permitirá detectar líneas de emisión de un flujo 3 x 10⁻¹⁶ erg cm⁻² s⁻¹ con una significancia de 3.5σ.

Estas observaciones se complementarán con observaciones desde tierra en los filtros ópticos que se obtienen de los cartografiados UNIONS (CFHT, Pan-STARRS y Subaru), DES y Rubin-LSST. La combinación de estos datos con los de Euclid permitirá tener una buena caracterización de la distribución espectral de energía de las galaxias que se observen, y así poder obtener unas estimaciones precisas de los desplazamientos al rojo con métodos fotométricos, necesarios para los estudios tomográficos de lentes gravitacionales débiles.

Además del cartografiado amplio del cielo, Euclid incluirá observaciones en tres campos profundos (Euclid Deep Fields) en los que se observará a dos magnitudes más de profundidad, con el objetivo de caracterizar las poblaciones de galaxias que se estudian en el cartografiado amplio y entender la función de selección. Además, hará posible otros estudios astrofísicos no cosmológicos con estos datos de alta calidad en un área considerable.

LA CIENCIA DE EUCLID

Los observables principales para determinar el modelo cosmológico que mejor describe el universo en que

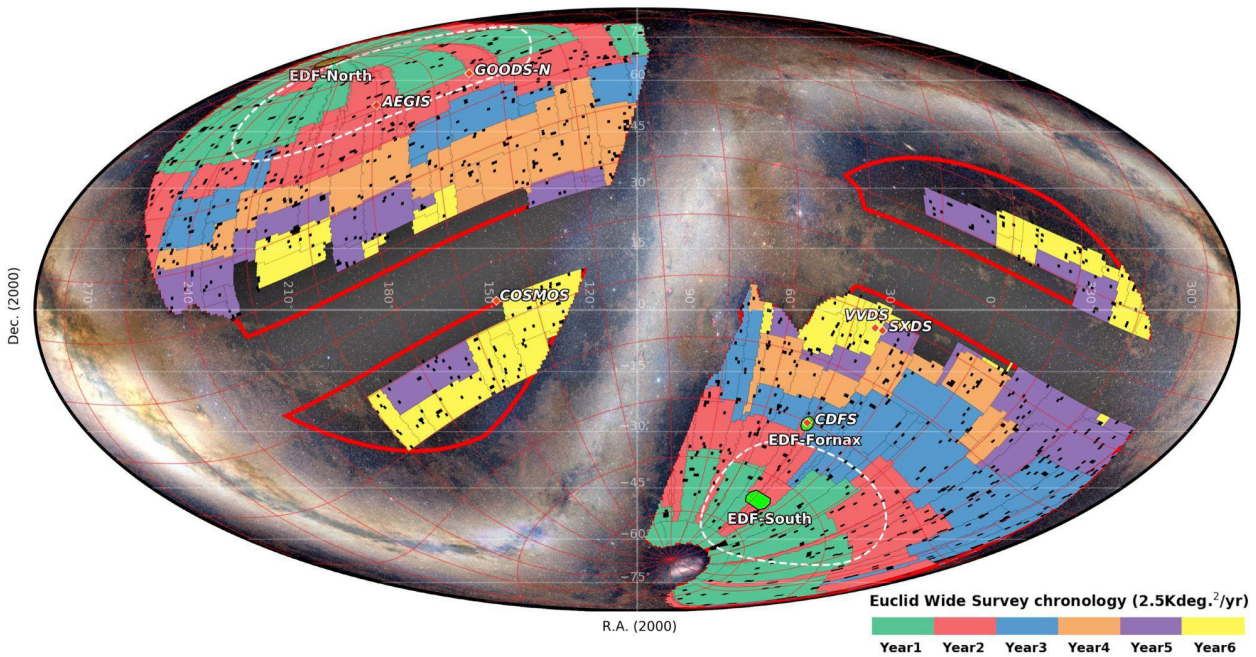
vivimos es el estudio del ritmo de expansión del universo, que depende de su contenido de materia y energía y por tanto de su geometría; y el estudio del agrupamiento de las estructuras, que depende del comportamiento de la gravedad y también de la geometría.

Los objetivos fundamentales de Euclid son: 1) estudiar la energía oscura determinando su ecuación de estado, 2) poner a prueba nuestra descripción de la fuerza de la gravedad, y si se corresponde con la teoría General de la Relatividad, 3) estudiar la naturaleza de la materia oscura, y en particular la masa de los neutrinos, y 4) estudiar el origen de la estructura cósmica, y en particular el índice espectral del espectro de fluctuaciones primordiales, su amplitud y su gaussianidad.

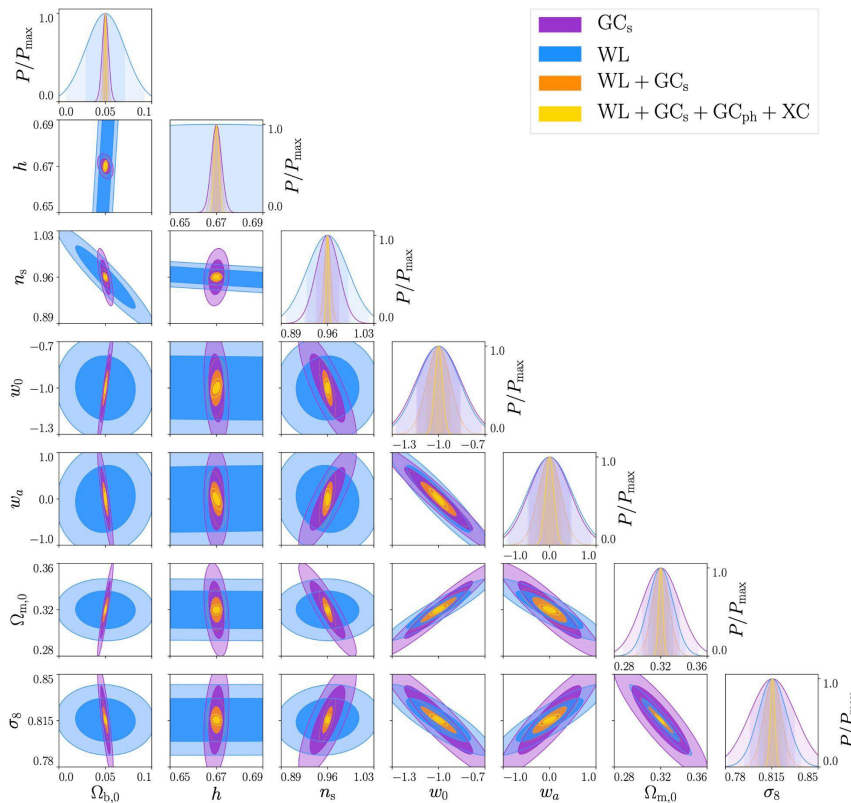
Los dos principales observables cosmológicos de Euclid son el estudio de lentes gravitacionales y el estudio del agrupamiento de las galaxias. Para ello, se determinará la forma y tamaño de miles de millones de galaxias y se determinará el desplazamiento al rojo de decenas de millones de galaxias. Con ambos observables, se determinará el parámetro de la ecuación de estado de la energía oscura con una precisión del 2%, obteniendo una figura de mérito, FoM > 400, que es una estimación de los errores en su valor y en su primera derivada, y es uno de los parámetros utilizados por la ESA para optimizar la misión.

Además de los estudios cosmológicos, como han podido evidenciar las observaciones de los EROs, la amplitud y calidad de los datos permitirá una infinidad de otros estudios astrofísicos, entre los cuales se puede mencionar estudios de objetos a alto desplazamiento al rojo en la época de reionización, estudios de la estructura y morfología galáctica, galaxias activas, la evolución de la formación estelar, la física de los cúmulos de galaxias, objetos transitorios, el grupo local, estrellas frías, objetos subestelares y objetos del sistema solar.

Los datos de Euclid se harán públicos 14 meses después de ser adquiridos con una periodicidad anual para que la comunidad internacional pueda aprovechar y estudiar la riqueza de los datos que esta misión espacial adquirirá. Tenemos un emocionante y esperanzador futuro en perspectiva.



Distribución en el cielo del cartografiado de Euclid, incluyendo los tres campos profundos (EDF). El código de color indica el año en que se cubrirá esa parte del cielo. El cartografiado está ahora en proceso de actualización y por tanto no será exactamente como el indicado en la figura. Imagen obtenida de Euclid Collaboration: Scaramella et al 2022, A&A, 662, A112.



Predicción en la estimación de los parámetros cosmológicos con la misión Euclid, dependiendo de la información empleada: GC_s: agrupamiento de galaxias espectroscópico, WL: lentes gravitacionales débiles, GC_{ph}: agrupamiento de galaxias espectroscópico, XC: correlaciones cruzadas. Imagen obtenida de Euclid Collaboration: Blanchard et al 2020, A&A, 642, A191.