

## CAPÍTULO III

---

# CARACTERIZACIÓN DE METEOROIDES Y ASTEROIDES CON EL OBSERVATORIO ULTRAVIOLETA LUNAR

## CHARACTERIZATION OF METEOROIDS AND ASTEROIDS WITH THE LUNAR ULTRAVIOLET OBSERVATORY

Ana Inés Gómez de Castro<sup>1/2</sup>, María Frutos<sup>1/2</sup> y Ada Canet<sup>1/2</sup>

*Grupo de Investigación de Astronomía Espacial AEGORA*

<sup>1</sup>*Facultad de Ciencias Matemáticas, Plaza de Ciencias 3, 28040 Madrid, España*

<sup>2</sup>*Joint Center for Ultraviolet Astronomy (JCUVA), Avda Puerta de Hierro s/n, 28040 Madrid, España*

**Índice:** 1. Introducción: caracterización óptica de la composición de meteoroides y asteroides. 2. Observación ultravioleta de meteoroides y asteroides. 2.1. Sensibilidad a la acción de las condiciones espaciales. 2.2. Sensibilidad al grado de carbonación en los asteroides. 2.3. Sensibilidad a la hidratación. Tipo c. 2.4. Sensibilidad a la abundancia de metales (hierro y titanio). 3. El observatorio ultravioleta lunar. 3.1. Objetivos científicos y requisitos de la misión OUL. 3.2. El instrumento. 3.3. Estado actual de la misión. 3.4. Estrategia de operación de la misión. 3.5. Procesado y distribución de datos. 3.6. El consorcio OUL. 4. Resumen y conclusiones. 5. Bibliografía.

**Resumen:** El Observatorio Ultravioleta Lunar (OUL) es un pequeño telescopio espacial equipado con una cámara de gran campo para obtener imágenes de la Tierra, la Luna y su entorno, en una serie de bandas ultravioleta. Dentro de los objetivos de OUL se encuentra la caracterización de meteoroides y asteroides en órbitas cercanas al sistema Tierra-Luna. El rango ultravioleta proporciona herramientas únicas para el estudio de la hidratación de las superficies, la determinación de la abundancia de elementos tales como el hierro o el titanio, el estudio de la carbonización de las superficies o la determinación del origen y edad de estos cuerpos. En este capítulo se describen brevemente las características ópticas de los meteoroides y asteroides en el ultravioleta y las capacidades que proporcionará OUL para el análisis de estos cuerpos.

**Abstract:** The Lunar Ultraviolet Observatory (OUL) is a small space telescope equipped with a wide-field camera to obtain images of the Earth, the Moon and their surroundings, in a series of ultraviolet bands. Among the objectives of OUL is the characterization of meteorites, meteoroids and asteroids, in near-Earth-Moon orbits. The ultraviolet range provides unique tools for the study of the hydration of surfaces, the determination of the abundance of elements such as iron or titanium, the study of the carbonization of surfaces or the determination of the origin and age of these bodies. This chapter briefly describes the optical characteristics of meteorites and asteroids in the ultraviolet and the capabilities that OUL will provide for the analysis of these bodies.

**Palabras Clave:** Meteoroides, Asteroides, Composición química, Análisis por observación remota, Ultravioleta, Observatorio Ultravioleta Lunar.

**Keywords:** Meteoroids, Asteroids, Chemical Composition, Remote sensing, Ultraviolet, Observatorio Ultravioleta Lunar

## 1. Introducción: caracterización óptica de meteoroides y asteroides

El estudio de los materiales sólidos (rocas, hielos, cristales, aglomerados metálicos) que se forman (o han formado) de manera natural en el Sistema Solar es de extraordinario interés para comprender la formación de nuestro sistema planetario, así como para extrapolar este conocimiento a otros sistemas. Desde un punto de vista más práctico, este estudio es importante para evaluar la rentabilidad de la minería espacial o la utilidad de los recursos naturales de la Luna para garantizar la viabilidad a largo plazo de los laboratorios y de las colonias lunares. Desafortunadamente, esta información es muy difícil de obtener y, por lo tanto, cara y escasa.

Una gran fracción de los datos que poseemos en la actualidad proviene del estudio de los meteoritos, restos de rocas espaciales (o meteoroides) que han sido modificadas por la re-entrada en la atmósfera y el impacto con la superficie terrestre. El conocimiento adquirido a través de su análisis se describe en detalle en otros capítulos de este volumen. Básicamente, los meteoritos se clasifican en tres grupos principales atendiendo a su composición:

- Carbonáceos (o Tipo-C): es el tipo más común (alrededor del 75 %-80 % de los asteroides pertenecen a este tipo). Son ricos en carbono y poco reflectantes en las bandas ópticas.
- Silíceos (o Tipo-S): es el segundo tipo en abundancia (15 %-17 %) y están compuestos fundamentalmente de silicatos.
- Metálicos (o Tipo-M): es el tercer tipo en abundancia (5 %-7 %) y están compuestos fundamentalmente de metales y minerales de níquel-hierro.

Estos grupos se corresponden también con la composición de los asteroides, puesto que la mayor parte de los meteoroides se generan en las colisiones entre estos cuerpos y sólo una pequeña fracción proviene de colisiones con la superficie de la Luna y de Marte.

Mientras que el estudio de los meteoritos se desarrolla en los laboratorios terrestres, el estudio de los meteoroides y asteroides, es decir, de los cuerpos espaciales originales, se desarrolla fundamentalmente utilizando técnicas de teledetección y análisis remoto. En ocasiones, y a muy alto coste, estos análisis se realizan «in situ» utilizando robots espaciales que forman parte de misiones dedicadas a la exploración del Sistema Solar. El ejemplo más reciente es la misión Hayabusa 2 de la Agencia Espacial Japonesa que ha tomado muestras del asteroide Ryugu y encontrado uracilo embebido en los hielos, ricos en carbono, de su superficie (Oba y col. 2023). El uracilo es una de las bases nitrogenadas del ADN y su detección tiene profundas implicaciones para comprender el origen de la vida en la Tierra.

En este capítulo nos centraremos en el análisis de asteroides y meteoroides a partir de la radiación que reflejan del Sol. Los diferentes minerales de la superficie responden de distintas formas a la radiación solar dejando su impronta en la distribución espectral de energía (o espectro) y esta señal puede ser utilizada para determinar su composición química.

La superficie de los minerales espaciales está sometida a efectos diferentes de los sufridos por los materiales terrestres, lo que tradicionalmente ha dificultado su análisis remoto. Los materiales en la Tierra están afectados por fenómenos tales como la hidratación o la oxidación mientras que los materiales espaciales están afectados por el efecto ionizante de la radiación ultravioleta (UV) del Sol y por la acción del viento solar: un flujo de partículas (fundamentalmente protones y electrones) de alta velocidad que reacciona químicamente con los compuestos que se encuentran en las superficies de estos cuerpos.

Por este motivo, en la práctica, se ha procedido a realizar clasificaciones taxonómicas utilizando la radiación reflejada en varias bandas y posteriormente se ha comparado esta radiación con los resultados de los experimentos llevados a cabo en los laboratorios terrestres (o con el análisis de las escasas muestras de minerales espaciales, fundamentalmente lunares, recabadas «in situ»).

La mayor parte de la información disponible en la actualidad está basada en observaciones realizadas en el rango visible del espectro electromagnético<sup>1</sup>. El conjunto más voluminoso de datos utilizado para este propósito ha sido obtenido por el Observatorio Apache Point de Nuevo México durante su cartografiado intensivo del cielo que comenzó en el año 2000. Este cartografiado ha proporcionado mapas de gran calidad, entre ellos, el *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)* que ha sido utilizado intensivamente por la comunidad astronómica mundial. Los asteroides son fácilmente identificables en el SDSS, lo que permitió buscar

---

1 Este rango corresponde a longitudes de onda de 350 nm a 750 nm.

a los miembros de algunas de las principales familias de asteroides (Eos, Koronis, Themis) y estudiar sus propiedades ópticas. Cada una de estas familias está caracterizada por tener una composición química específica, lo suficientemente diferente del resto como para poder ser detectada en las clasificaciones taxonómicas basadas en el color. En 2001, Ivezić y col. mostraron que estas diferencias eran también detectables en el color, es decir, en la distribución espectral de la energía reflejada por los asteroides. De esta manera, y a partir de un conjunto inicial de 10.592 asteroides, se demostró que era posible identificar la composición química de los asteroides simplemente recurriendo a la información óptica obtenida a partir de la radiación que reflejan del Sol. Estudios posteriores permitieron extender esta clasificación taxonómica relacionando sus propiedades ópticas con los tipos principales de asteroides tal y como se muestra en Figura 1 (DeMeo y Carry, 2013).

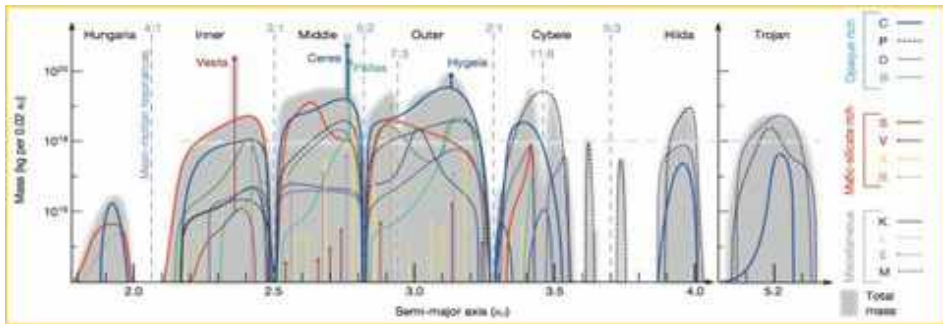


Figura 1: Distribución espacial de los asteroides por composición basada en la información fotométrica de 34.503 asteroides detectados en el SDSS (DeMeo y Carry, 2013). El tipo de asteroide está indicado en el panel derecho: en tonos azules se muestran los Tipo C, en rojos los Tipo S y en tonos grisáceos el resto. El eje horizontal muestra el semieje mayor de la órbita (aproximadamente la distancia al Sol) en unidades astronómicas (1 AU = 15 billones de kilómetros). El eje vertical muestra la masa total en kilogramos (contando todos los asteroides de cada tipo por color y en sombreado gris la envolvente); 1020 kg es equivalente a 1 milésima de la masa de la Luna.

Esta clasificación inicial fue refinada posteriormente con observaciones más detalladas (espectroscópicas). En la actualidad, se dispone de datos detallados de unos 9.000 asteroides (Bus y Binzel 2002; Lazzaro y col. 2004; Fornasier y col. 2014) incluyendo alrededor de 1.000 asteroides en órbita cercana a la Tierra (Near Earth Asteroids o NEAs, Perna y col. 2018; Devogèle y col. 2019; Binzel y col. 2019). Estas medidas se han realizado en los rangos óptico e infrarrojo, que son accesibles desde la superficie de la Tierra (ver Figura 2). Estos datos proporcionan información sobre una mínima fracción de los casi 20.000 NEAs y de los 860.000 asteroides catalogados en el Cinturón Principal de Asteroides. Sin embargo, las propiedades de los asteroides en el rango UV

permanecen en gran medida inexploradas. Sólo se han observado en detalle algunos asteroides con el International Ultraviolet Explorer (IUE) o con el telescopio espacial Hubble. Desafortunadamente, el cartografiado del cielo en el UV realizado por el Galactic Evolution Explorer (GALEX) no ha podido proporcionar muchos detalles porque utilizó una banda demasiado ancha como para poder separar las contribuciones de los principales compuestos.

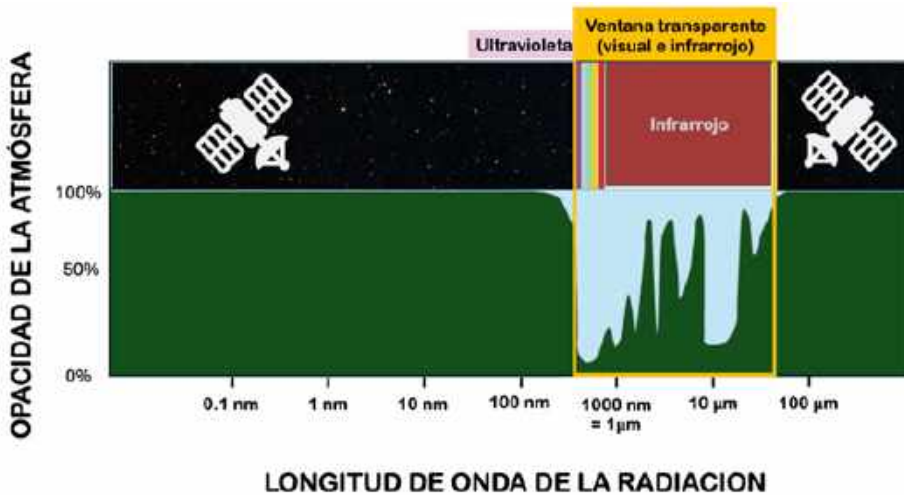


Figura 2: Transparencia de la atmósfera a la radiación electromagnética.

La atmósfera terrestre es fundamentalmente opaca a la mayor parte de las longitudes de onda y sólo permite ver el espacio en el rango visual, al que es sensible el ojo humano, y en el rango infrarrojo. Por este motivo, rangos espectrales de gran interés para el estudio de los asteroides, tales como el ultravioleta, han sido escasamente utilizados.

Sin embargo, la observación de asteroides y meteoroides en el UV es de un extraordinario interés; entre otros motivos, el UV es muy sensible a la presencia de rocas hidratadas, al procesado químico de las superficies por la acción del entorno espacial, a la presencia de materiales carbonáceos y ha mostrado ser útil para la detección de metales tales como el titanio o el hierro. Por este motivo, un pequeño observatorio como el Observatorio Ultravioleta Lunar (OUL) dedicado a la monitorización continua del entorno terrestre podrá proporcionar información única sobre la composición de los asteroides cercanos a la Tierra (o NEAs) y abrir una ventana inexplorada.

En este capítulo, resumimos las características conocidas de los asteroides y el regolito lunar en el UV (sección 2) y describimos las capacidades de OUL para su estudio (sección 3). El capítulo concluye con un breve resumen de los potenciales de OUL y de la teledetección en el UV para el análisis de la composición de los cuerpos menores del Sistema Solar.

## 2. Asteroides y meteoroides en el ultravioleta

Los asteroides sólo han sido estudiados en la banda UV desde los años 60, con los orígenes de la astronomía espacial, puesto que el rango UV es inaccesible desde la superficie terrestre debido al bloqueo de la capa de ozono. La magnitud medida es la reflectancia espectral o fracción de la radiación solar reflejada por la superficie en función de la longitud de onda, tal y como se muestra en la Figura 3 para varias muestras de la superficie lunar.

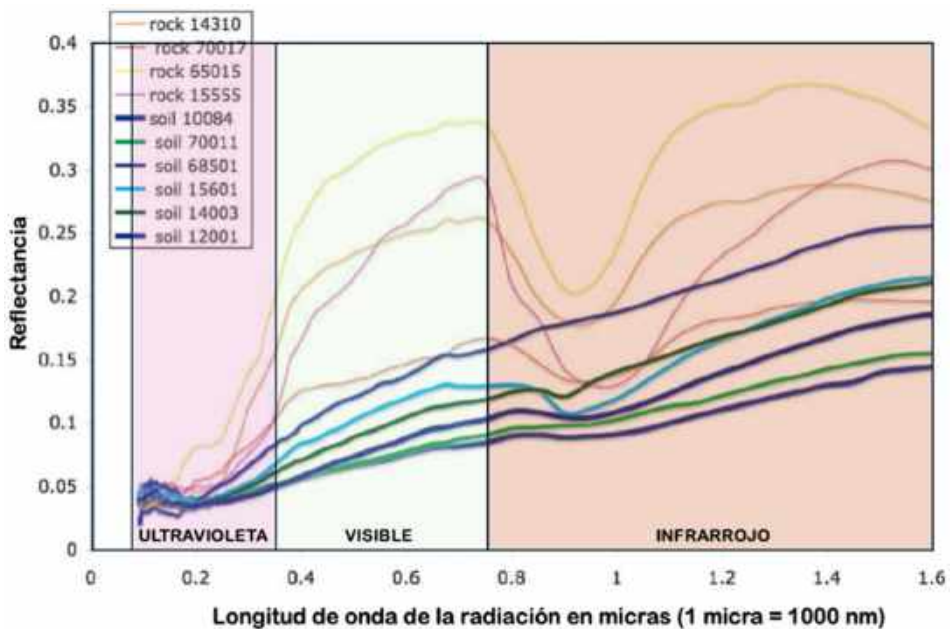


Figura 3: Reflectancia del suelo lunar (trazos gruesos) y de rocas lunares molidas (trazos finos) con diferentes grados de exposición al entorno espacial.

La reflectancia del suelo lunar en el UV es menor (5 % de la radiación) que en visible (~10 %) o en el infrarrojo (15 %). La reflectancia del suelo en el UV es mayor a medida que permanece más tiempo expuesto a la acción de viento solar y a la radiación espacial (Wagner y col., 1987).

Las características que hacen del rango UV un rango de especial interés para el estudio de los asteroides y meteoroides se describen en las siguientes subsecciones.

## 2.1. Sensibilidad a la acción de las condiciones espaciales

La acción de la radiación espacial y del viento solar sobre las rocas espaciales, así como el impacto de micrometeoritos es conocido desde los primeros estudios del regolito lunar. Un ejemplo de este efecto sobre muestras de la superficie lunar se muestra en la Figura 3 (Wagner *et al.* 1987). La exposición al entorno espacial aumenta la reflectancia hacia longitudes de onda del ultravioleta, haciendo que el material tenga una respuesta de color más violeta. Un fenómeno similar ha sido también reportado del estudio de muestras de meteoritos (condritas) que han sido sometidas a experimentos que emulan el entorno espacial reportando resultados similares (Kohout y col. 2014, Kanuchova y col. 2015).

Se cree que esta respuesta es provocada por la deposición de hierro en nanofase ( $npFe^0$ ) procedente de las partículas portadoras de hierro de los asteroides al ser sometidas al bombardeo de partículas e iones del viento solar (Hapke, 2001, Hendrix y Vilas 2006; Markley y Kletetschka 2016; Pieters y Noble 2016); de hecho, los cambios pueden ser detectados en el rango ultravioleta a partir de una cantidad de  $npFe^0$  del 0.0001 %, haciendo de esta banda espectral fundamental para el estudio de la meteorización espacial, ya que los efectos son apreciables con dos órdenes de magnitud menos que la cantidad necesaria para comenzar a observar los efectos característicos en longitudes de onda del visible y del infrarrojo.

El análisis de las muestras del asteroide 25143 Itokawa (asteroide de tipo S) recogidas en la misión espacial Hayabusa ha confirmado la presencia de estos recubrimientos de  $npFe^0$  y la respuesta de color violeta (Noguchi y col. 2011, 2014).

Además, este efecto es acumulativo, es decir, que una mayor exposición al viento solar produce un mayor cambio de color, tal y como se observa en la Figura 4. En consecuencia, el análisis del color puede ser utilizado para estimar la localización de los asteroides (su distancia al Sol) así como su edad (o equivalentemente, el tiempo de exposición al viento solar). Comparando asteroides de diferentes edades (y por tanto menos alterados por la acción erosiva del entorno espacial), es posible datar dichos cuerpos a través del análisis de sus huellas espectrales. Usando esta técnica se ha datado el asteroide cercano a la Tierra 163249 2002 GT teniendo una edad entre 109 y 138 mil años.

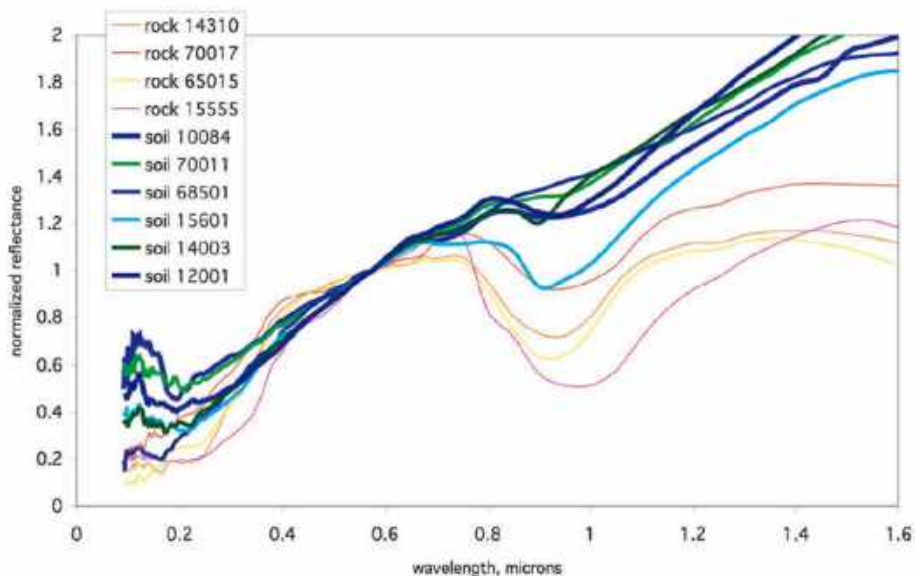


Figura 4: Reflectancia del suelo lunar (trazos gruesos) y de rocas lunares molidas (trazos finos) con diferentes grados de exposición al entorno espacial. En la Figura se muestra la reflectancia de la Figura 3 pero normalizada a la longitud de onda de 600 nm (0.6 micras) para mostrar en más detalle el incremento de la reflectancia por debajo de 200 nm causado por la exposición al entorno espacial. Esta Figura proviene del trabajo publicado por Wagner y col. (1987).

## 2.2. Sensibilidad al grado de carbonación en los asteroides Tipo C

Los asteroides de tipo C suelen relacionarse con las condritas de tipo CI (Cloutis y col. 2011a) y CM (Cloutis y col. 2011b) ya que comparten valores bajos de albedo, así como espectros en el visible e infrarrojo cercano con bandas muy poco pronunciadas o ausentes. Las condritas CM están formadas principalmente por minerales como la serpentina<sup>2</sup>, tochilinita<sup>3</sup> y olivino<sup>4</sup>. Por su parte, las condritas CI son ricas en filosilicatos<sup>5</sup> así como en magnetita<sup>6</sup>.

2 Fórmula genérica del grupo:  $(\text{Mg,Al,Fe,Mn,Ni,Zn})_{2-3}(\text{Si,Al,Fe})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ .

3 Fórmula genérica del grupo:  $\text{Fe}^{2+}_{5-6}(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{S}_6(\text{OH})_{10}$ .

4  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ .

5 En los filosilicatos, los tetraedros de  $(\text{SiO}_4)$  se agrupan formando planos continuos infinitos (hojas), con una unidad del tipo  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ . Entre los filosilicatos más abundantes (en el espacio) se encuentran las serpentinas.

6  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Los materiales carbonáceos son espectralmente activos en la región del UV<sup>7</sup> produciendo un aumento del brillo en la región comprendida entre los 100 nm y 200 nm que está asociado a una banda de absorción alrededor de los 220 nm (Hendrix y col. 2016).

Si comparamos los asteroides de tipo C con estas condritas carbonáceas, se observa que los asteroides son más brillantes en el UV cercano (200 nm – 300 nm). Este aumento de reflectividad se atribuye a la formación de material grafitico<sup>8</sup> y de otros componentes opacos (hierro) en la superficie de los asteroides por la acción del entorno espacial. Estudios de laboratorio que emulan estas condiciones, muestran que los materiales se tornan más opacos a medida que incrementa la radiación de alta energía inyectada simulando el entorno espacial (Gillis-Davis y col. 2015, 2017; Matsuoka y col. 2015; Lantz y col. 2017; Thompson y col. 2019). Los diferentes niveles de absorción son dependientes fundamentalmente de tres agentes: el tipo de filosilicato presente, la cantidad de material carbonizado presente, así como el nivel de carbonización. En general, los minerales con menor abundancia de hierro reflejan una fracción más alta de la radiación UV (Hendrix y col. 2016, Hendrix y Vilas 2019).

La presencia de magnetita también afecta a la radiación reflejada en el rango de 200 nm a 500 nm (Izawa 2019). Estas diferencias son prácticamente imperceptibles en otros rangos espectrales como el visible o el infrarrojo cercano lo que hace del UV una herramienta fundamental para su detección. Esta interpretación ha sido mostrada «in situ» por el análisis de los espectros de reflexión de los asteroides Ryugu y Bennu de tipo C y su comparación con los producidos por materiales carbonizados.

### 2.3. Sensibilidad a la hidratación

Una de las aplicaciones más relevantes de las observaciones en la región del UV es su uso en la determinación de la presencia de agua en asteroides o meteoroides. La fotodisociación de la molécula de H<sub>2</sub>O por la radiación solar produce una molécula de OH que se detecta en el UV a 308 nm y ha sido utilizada tradicionalmente para detectar la presencia de agua en los cometas. Desde 1985, se han encontrado evidencias de una banda similar en la reflectancia de los asteroides (Hiroi y col. 1993) que se observa también en condritas carbonáceas. Pruebas posteriores realizadas sobre los meteoritos demostraron que las bandas se volvían menos intensas después de ser deshidratados por acción del calentamiento (Hiroi 1996a,b).

7 Las principales huellas espectrales del carbono aparecen a 80 nm y a 220 nm y son ocasionadas por las transiciones electrónicas desde la banda de valencia ( $\sigma$  o  $\pi$ ) hasta la de conducción ( $\sigma^*$  o  $\pi^*$ ).

8 Los granos de carbono amorfo pueden formar granos de grafito a partir de la irradiación UV.

Además de esta banda, existe otra muy intensa a 166 nm que se ha empleado para medir el grado de hidratación de las rocas lunares y su variación con los ciclos diurnos. El instrumento Lyman Alpha Mapping Project (LAMP) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) de la NASA realizó un mapa de la hidratación y la erosión del terreno lunar midiendo la pendiente del espectro UV en el rango de 164 nm – 190 nm (Hendrix y col. 2012). Tal y como se muestra en la Figura 5, existen variaciones muy significativas con la latitud.

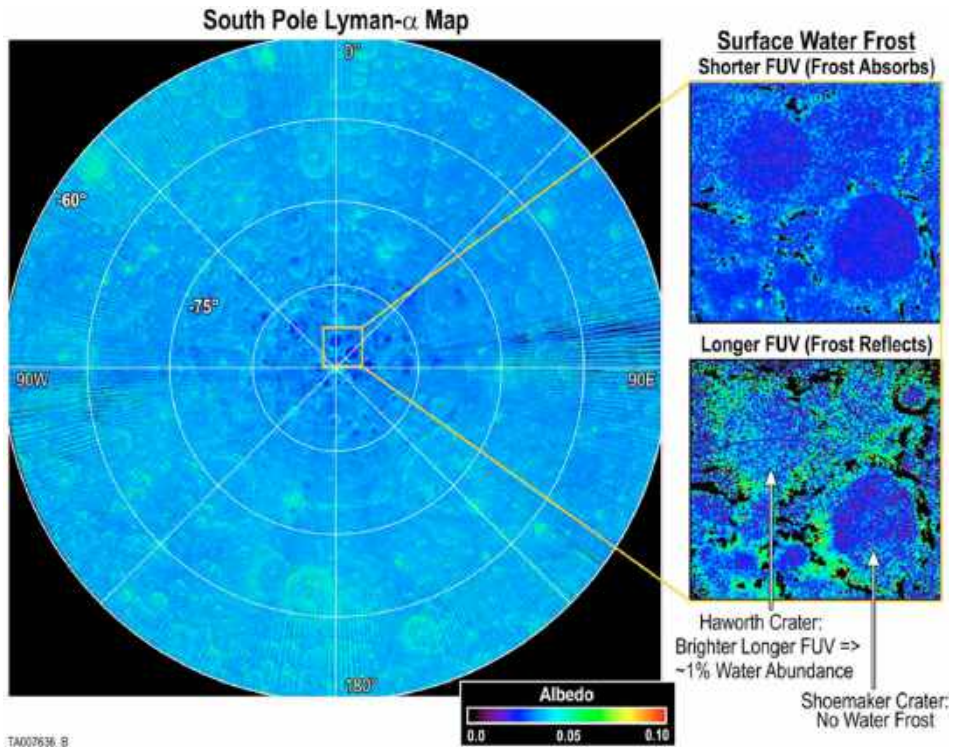


Figura 5: Medida de la hidratación de las rocas lunares en el hemisferio sur utilizando el instrumento UV LAMP a bordo de la misión LRO de la NASA. Estos datos son una referencia fundamental para la determinación de la localización de las futuras bases lunares. En las imágenes laterales se observa cómo las rocas hidratadas reflejan la radiación del Sol. Fuente: NASA misión LRO/LAMP.

## 2.4. Sensibilidad a la abundancia de metales (hierro y titanio)

La sensibilidad a los recubrimientos de  $npFe^0$  es la responsable de la sensibilidad del UV a las condiciones espaciales del rango UV (ver sección 2.1).

La presencia de Ti produce unas bandas específicas en el espectro UV que fueron detectadas en el polvo de Marte por primera vez por el Mariner 9 y que fue comprobada con posterioridad por los Viking en la superficie marciana (Pang y col. 1982).

## 3. El observatorio ultravioleta lunar (OUL)

OUL es un pequeño instrumento espacial diseñado para monitorizar la respuesta global de la exosfera y la magnetosfera terrestre a las erupciones solares. La Luna proporciona un punto de observación privilegiado para este propósito tanto por la distancia como por la órbita. El observatorio está diseñado para monitorizar la Tierra y la heliosfera durante su órbita alrededor de la Luna.

OUL está equipado con una cámara de gran campo que rastrea de manera continua el cielo en el UV (115 nm – 175 nm) que es el rango en el que se encuentran los trazadores más sensibles para este estudio. Por su diseño, OUL obtendrá también información de extraordinario interés para estudiar la composición de la Luna y de los asteroides cercanos a la Tierra, de los cometas y de la heliosfera en general. Su sensibilidad permitirá estudiar la magnetosfera joviana, la variabilidad de las estrellas más masivas (tipos: O, B, A) y las super-fulguraciones de estrellas de tipo solar en nuestra vecindad.

OUL es un telescopio técnicamente sencillo, sin capacidad de apuntado, pero con un control de actitud que le permite apuntar hacia la Luna (dirección Nadir) y en el sentido contrario (dirección Zénit) con precisión (Gómez de Castro y col. 2019). La misión ha sido diseñada para navegar en una órbita polar circular, contenida en el meridiano  $0^\circ$  de la Luna<sup>9</sup>, a una altura de 500 km sobre la superficie lunar. OUL estará equipado con unos pequeños motores iónicos para el mantenimiento de la órbita.

Desde esta órbita, se seguirá un ciclo de trabajo bien definido durante las 2,64 horas del periodo orbital tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 5. El ciclo consistirá en la observación de la exosfera/magnetosfera terrestre durante 64 minutos, seguida de la observación del Polo Sur lunar

9 El meridiano 0 es el plano perpendicular al eje de rotación de la Luna y que contiene el centro de la Tierra y el centro de la Luna. Este meridiano no coincide con el meridiano 0 de las coordenadas selenográficas y se desplaza durante el ciclo lunar debido al movimiento de libración de la Luna.

durante 12 minutos, otros 64 minutos de observación de la heliosfera y unos últimos 12 minutos de observación del Polo Norte de la Luna.

Los aspectos fundamentales del proyecto OUL se describen en las siguientes subsecciones.

### 3.1. Objetivos científicos y requisitos de la misión OUL

Los requisitos de la misión están fijados por la observación de procesos globales en la exosfera y magnetosfera de la Tierra, pero se han añadido pequeñas modificaciones y elementos ópticos para acomodar las necesidades de las otras áreas de investigación y hacer de OUL un instrumento versátil de investigación espacial. Los requisitos de la misión se resumen en la Tabla 1.

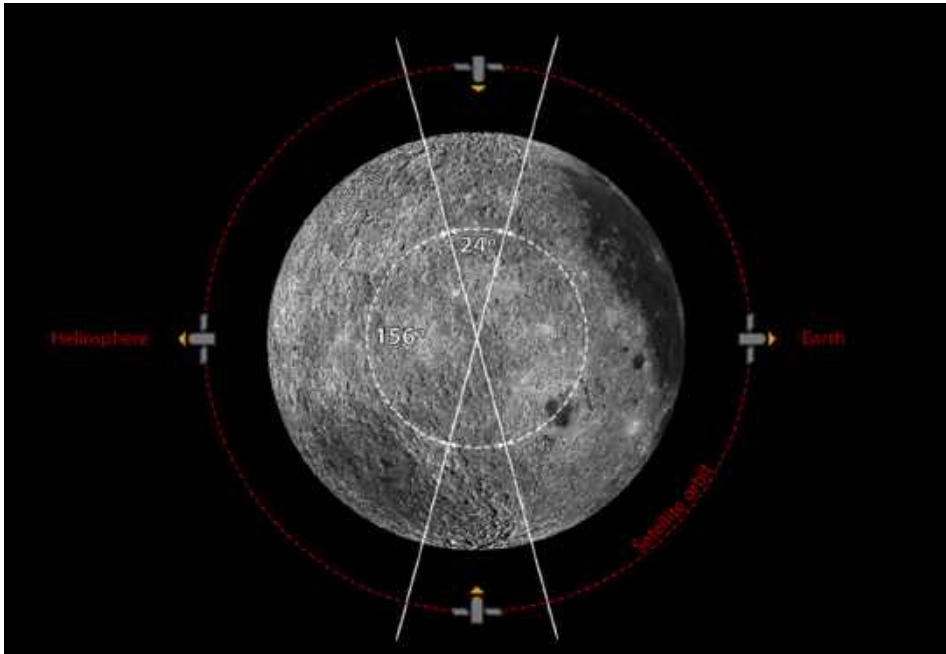


Figura 6: Esquema de la planificación de las observaciones durante el periodo orbital de OUL. El ciclo consistirá en la observación de la exosfera/magnetosfera terrestre durante 64 minutos (posición *Earth*), seguida de la observación del Polo Sur lunar durante 12 minutos, otros 64 minutos de observación de la heliosfera (posición *Heliosphere*) y unos últimos 12 minutos de observación del Polo Norte de la Luna. La orientación del telescopio pasa de Zénit a Nadir dos veces durante el ciclo para poder observar la superficie lunar.

Algunos de estos requisitos admiten pequeñas modificaciones. Por ejemplo:

- El campo de visión puede reducirse ligeramente para mejorar la sensibilidad.
- La resolución angular de 6 minutos de arco es suficiente para la mayor parte de las aplicaciones, pero sería conveniente poderla reducir a 3 minutos de arco para la observación de estructuras en la Luna y los NEAs, en los polos terrestres (auroras) y en la magnetosfera joviana.

En el momento de escribir este artículo, se están optimizando estos requisitos.

**Tabla 1. Lista de requisitos**

Imagen de gran campo: 20° x 20°.
Resolución angular de 3 minutos de arco – 6 minutos de arco.
Detector con capacidad de rechazar fotones fuera de la banda espectral: 115 nm – 180 nm.
Capacidad de acomodar varios filtros: Banda estrecha: Ly $\alpha$ , OI, Hell, CIV. Banda media: UV1 (145 nm), UV2 (175 nm).
Capacidad de obtener imagen sin filtro conservando la calidad óptica.
Filtro neutro con factor de atenuación 0.01 para la observación de la exosfera de la Tierra durante eclipses.

### 3.2. El instrumento

El diseño óptico de OUL está optimizado para obtener imágenes de gran campo en el UV y está inspirado en el sistema de óptica reflectiva WALRUS<sup>10</sup> (Hallam y col. 1984) que consiste en tres espejos de potencia: dos de ellos (M1 y M3) son esféricos y el intermedio (M2) tiene una curvatura prolata (ver Figura 7). Este sistema es acromático y permite obtener imágenes de gran campo.

<sup>10</sup> Wide Angle Large Reflective Unobscured System.

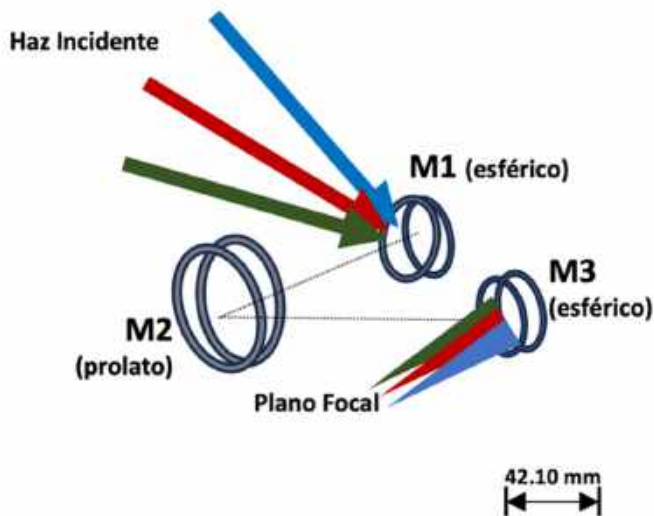


Figura 7: Esquema del diseño óptico del gran angular WALRUS de OUL (Gómez de Castro y col. 2023).

En el plano focal se sitúa un detector de alta sensibilidad MCP<sup>11</sup> (Gómez de Castro y col., 2022) que ya está disponible y cualificado para uso espacial. El detector está específicamente constituido por una placa de micro-canales (o MCP) en cuya cara de entrada se ha depositado un sustrato fotosensible al rango 115 nm – 175 nm de CsI. Los fotoelectrones generados son amplificados por un factor  $\sim 100.000$  dentro del MCP y posteriormente transformados en fotones ópticos en una lámina interna de fósforo. A esta lámina se acopla un mazo de fibras ópticas que transportan los fotones a un detector CMOS<sup>12</sup> para la lectura final. Cada fotón UV que entra en el detector se transforma en una nube de fotones ópticos que son detectados por el CMOS (ver Figura 8). El objetivo final de la medida es contar estos fotones y determinar su localización sobre la imagen. Básicamente, a partir de las imágenes del CMOS obtenidas a una tasa rápida de lectura de entre 0.1 y 1 segundo, se construyen listas de eventos (fotones) donde se indican las coordenadas cartesianas (x,y) del fotón en el plano del CMOS y el tiempo de llegada. Las imágenes finales se obtienen a partir de sumar todos los eventos detectados.

11 MCP son las siglas de Micro Channel Plate o placa micro-canales. Este es un elemento cerámico cilíndrico con múltiples poros a lo largo de su eje en los que los fotoelectrones son amplificados aproximadamente 100.000 veces para facilitar su detección.

12 Complementary Metal-Oxide Semiconductor.

Tal y como se muestra en la Figura 9, delante del detector habrá una rueda de filtros en la cual se incorporarán varios elementos para seleccionar la radiación en las bandas de interés. Dos de estos elementos serán filtros estrechos diseñados para detectar la emisión de hidrógeno y de oxígeno tanto de la exosfera terrestre como de Júpiter, así como la procedente de la fotodisociación del agua en cometas y asteroides activos; OUL proporcionará una resolución angular 10 veces superior a la de la misión SOHO<sup>13</sup> que lleva rastreando la heliosfera de manera sistemática desde el año 1995, proporcionando datos de inestimable valor sobre el contenido de agua de los cometas. Un tercer filtro estrecho estará sintonizado a 164 nm para estudiar la emisión de helio ionizado (He II) producido en tormentas magnéticas y fenómenos similares en el entorno solar. Los otros tres filtros están destinados a caracterizar la emisión UV de las superficies de la Luna y los NEA y poder así determinar su grado de hidratación utilizando una técnica similar a la mostrada en la Figura 7. La comparación de las imágenes UV obtenidas por OUL con imágenes ópticas e infrarrojas obtenidas desde la Tierra permitirá determinar el grado de envejecimiento de los NEA y de la superficie lunar (la lista de filtros aceptada actualmente por el proyecto se encuentra en la Tabla 2).

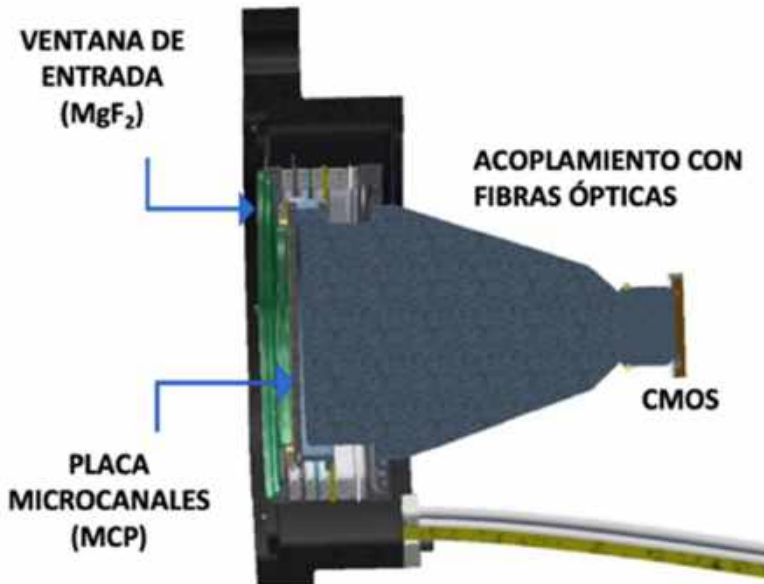


Figura 8: Esquema del detector de OUL.

Tabla 2. Lista de Filtros

Identificador	Longitud de onda central (nm)	Ancho de Banda
Ly $\alpha$	121.5	5
OI	130.6	5
CIV	155.0	5
Hell	164.0	5
UV1	145	20
UV2	175	20
Filtro Neutro	NP	NP
Lente MgF <sub>2</sub>	NP	NP

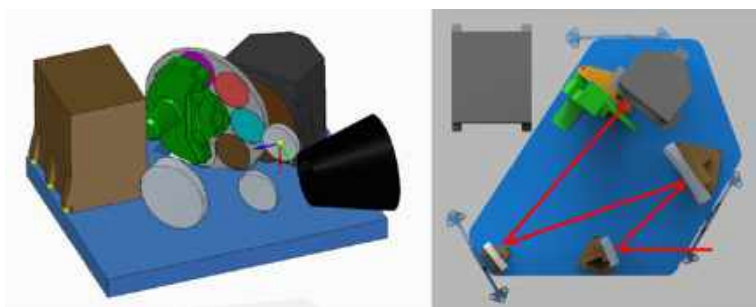


Figura 9: Imagen 3D del diseño actual de OUL (panel izquierdo). En el panel derecho, se muestra el recorrido de la luz desde la apertura de entrada hasta el detector. La rueda de filtros está localizada delante del detector.

### 3.3. Estado actual de la misión

Junto con la re-evaluación de los requisitos, en estos momentos se están analizando estrategias para optimizar la calidad óptica del recubrimiento de los espejos y de los filtros incluyendo la implementación de técnicas de control de la micro-rugosidad de las superficies (Quijada y col. 2022, Kim y col. 2023, Conti y col. 2022), con las que se espera duplicar el área efectiva del instrumento con respecto a las primeras evaluaciones que están representadas en la Figura 10.

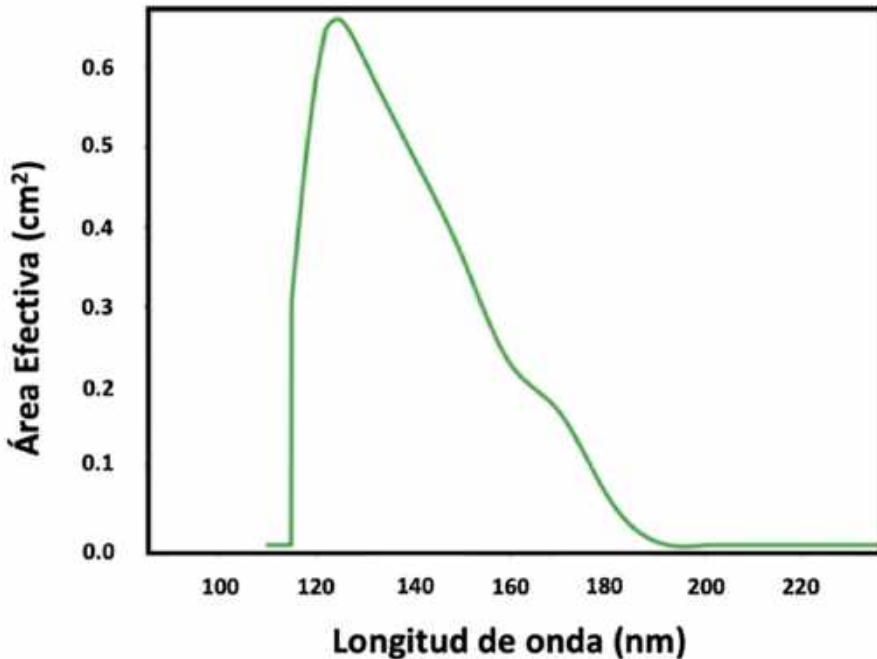


Figura 10: Área efectiva de OUL (Gómez de Castro *et al.* 2022). El área efectiva tiene en cuenta las pérdidas radiométricas de la radiación que penetra la apertura del telescopio ( $4,9 \text{ cm}^2$ ) por las múltiples reflexiones internas en el instrumento, la transmitancia de los filtros y la eficiencia cuántica del detector. Tal y como se muestra en la imagen estas pérdidas están comprendidas en un rango entre el 85 % (a 120 nm) y el 96 % (a 160 nm).

OUL es un instrumento pequeño que ocupa un volumen equivalente a  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$  (o 12 unidades de cubesat), tiene una masa de 15 kg y requiere de una potencia de operación de 4 W. Por tanto, OUL puede formar parte del conjunto de mini-satélites lunares que están siendo puestos en órbita dentro del marco del programa Artemisa de la NASA en colaboración con sus socios. El programa también garantiza el apoyo de un repetidor de comunicaciones Luna-Tierra.

### 3.4. Estrategia de operación de la misión

OUL está diseñado para medir simultáneamente la emisión exosférica y la radiación de fondo heliosférica para, de esta manera, obtener las medidas más precisas jamás realizadas de la distribución de hidrógeno a grandes distancias de la Tierra. Estas medidas son viables a bajo costo utilizando la Luna como tractora gravitacional, y además, como la Luna recorre una órbita com-

pleta alrededor de la Tierra en un mes, en este periodo se puede reconstruir una imagen 3D de la exosfera y de la magnetosfera terrestre (ver Figura 11).



**Figura 11: Visión artística de la variación esperada de las imágenes de la magnetosfera de la Tierra tal y como será observada por OUL durante media órbita lunar.**

OUL orbitará a 500 km de altura sobre la superficie de la Luna. A esta altura, el período orbital es de  $\sim 2,6$  horas y el elemento de resolución máximo (ver Tabla 2) es barrido en 1,3 s. De acuerdo a las estimaciones de sensibilidad mostradas en la Fig. 10, se podría obtener un mapa de la emisión  $\text{Ly}\alpha$  de la Tierra con una relación Señal/Ruido (SNR) de 10 a  $15R_{\oplus}$ , en menos de un solo barrido u órbita<sup>14</sup>.

OUL está diseñado para cambiar los filtros en escalas de tiempo comparables al periodo orbital, de manera que se realicen barridos completos del cielo en una de las bandas antes de cambiar de filtro.

OUL está diseñado para comunicarse con Tierra vía un relé en órbita lunar para abaratar costes. Es muy probable que este relé esté asociado al Lunar Gateway que estará en órbita lunar polar<sup>15</sup> y permitirá más de 12 horas de visibilidad por órbita, suficiente para una transferencia eficiente de los datos. En la actualidad sólo se disponen de estimaciones groseras del flujo de datos basadas en el peso de transferir las imágenes completas de 2048 x 2048 píxeles del CMOS, en vez de las listas de eventos, que son mucho menos pesadas. A una tasa de una imagen de 2048 x 2048 píxeles de 10 bits por segundo, se producirían un máximo de 49 GB por órbita (2,6 h). En el otro extremo, si se detectan 1.000 eventos por imagen, y sólo se bajan 5 x 5 píxeles centrados en los eventos, la tasa se reduciría a 300 MB por órbita.

14 Esta estimación está basada en las medidas realizadas por Østgaard y col. (2003) de la emisión  $\text{Ly}\alpha$  exosférica en las peores condiciones (ángulo cenital solar de  $90^\circ$ ) que determinó un flujo de 0,16 kR a  $15 R_{\oplus}$  sobre un fondo heliosférico de 1,1 kR (Pryor y col. 1998, Quémerais y col., 2014). La señal que llegaría al elemento de resolución de OUL es de 115 cuentas  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

15 De acuerdo a las previsiones actuales la órbita será excéntrica con periápside a 3.000 km sobre el polo norte lunar y apoápside a 70.000 km sobre el polo Sur.

### 3.5. Procesado y distribución de datos

El procesado de datos y la gestión de OUL se llevará a cabo desde el centro de operaciones científicas (COC). EL COC comprenderá todos los sistemas técnicos, procedimientos operativos y mano de obra disponible necesarios para respaldar la planificación, el seguimiento, el control y la evaluación del rendimiento de los elementos de OUL a bordo del segmento espacial. Como tal, combinará:

- La cadena de telecomando de las operaciones del satélite (o *uplink*), sistemas encargados de planificar las secuencias de alto nivel ante las limitaciones de visibilidad y de recursos impuestas por el portador del instrumento. Estas secuencias se enviarán más adelante al centro de operaciones de la misión correspondiente para su conversión en telecomandos de bajo nivel que se remitirán al satélite desde las estaciones de Tierra, todavía por determinar.
- La cadena de bajada de datos (o *downlink*), sistemas encargados de recibir y procesar la telemetría del instrumento.
- El COC también proporcionará servicios de archivo científico y difusión de datos que distribuirán los productos del instrumento a la comunidad científica.

Para el *uplink*, se debe tener en cuenta que el diseño del instrumento OUL pretende ser lo más simple posible. Por lo tanto, no habrá ningún mecanismo de orientación y OUL funcionará en modo de rastreo, sin capacidad de apuntado. Por lo tanto, el proceso de planificación de la observación sólo incluirá la selección del filtro a utilizar antes de iniciar un rastreo determinado, el número de órbitas que se observarán con este filtro y la dirección de observación.

La planificación científica también tendrá en cuenta las limitaciones impuestas por la plataforma (como la actitud del orbitador, la potencia disponible, la situación del relé de transferencia de datos...) y las limitaciones de visibilidad vinculadas a la posición del Sol. Un aspecto clave del proceso de planificación de la misión será la disponibilidad de un verificador de restricciones y de visibilidad que esté respaldado por herramientas de visualización 3D. Este visualizador será clave para la corrección de la precesión de la órbita de OUL.

Además, se desarrollarán productos de datos de alto nivel para investigaciones científicas específicas tales como mapas de la emisión exosférica, magnetosférica y heliosférica. Debido a la pequeña área efectiva de OUL (Fig. 7), las campañas de observación para un objetivo designado requerirán sumar diferentes escaneos ráster del mismo campo celeste hasta obtener la SNR necesaria; mientras que una órbita es suficiente para cartografiar la exosfera de la Tierra hasta  $15 R_{\oplus}$ , un mapeo en He II podría requerir hasta 10 órbitas. La calibración y el procesamiento de

estas imágenes dependerán de la adecuada caracterización de la respuesta del instrumento. Además, se requerirá información orbital y de actitud de la plataforma en cada secuencia del rastreo.

Uno de los mayores retos del proyecto es la reconstrucción de la estructura 3D de la exosfera y magnetosferas de la Tierra basada en observaciones parciales 2D, y el desarrollo de herramientas de visualización 3D para ayudar a los científicos en la interpretación de los resultados.

Finalmente, otro elemento clave del centro científico es el archivo científico y las instalaciones de difusión de datos asociadas. Está previsto que existan diferentes clones del archivo científico principal distribuidas entre los miembros del consorcio asociados a los centros científicos y de procesamiento de datos de OUL.

Uno de los aspectos más novedosos de OUL es la implementación de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para gestionar la interacción de los usuarios con el archivo, la optimización de los procesos y el post-procesamiento de datos.

El Instituto Universitario de Enviado (IUE) está trabajando en modelos para usar IAs en la reconstrucción 3D de la exosfera y magnetosfera terrestre a partir de las observaciones de OUL. Las opciones que se están barajando pasan por el uso de diferentes técnicas, desde la visión artificial clásica hasta la implementación de redes neuronales convolucionales, residuales y recursivas, para el reconocimiento de los patrones. La IA reconocerá estructuras y patrones basándose en la experiencia visual registrada en bases de datos científicas. Para lograrlo, la información será preprocesada mediante filtrado, estandarización y selección de características apropiadas para optimizar el entrenamiento y mejorar la eficiencia de la red neuronal. Las imágenes que se utilizarán para la capacitación y validación de la IA serán preseleccionadas por especialistas del equipo. Se desarrollará un sistema que, partiendo de las imágenes del rastreo realizado por OUL, devuelva las estructuras y patrones detectados. Finalmente, en materia de Big Data y Analytics, se crearán herramientas para verificar consultas, flujo de información, capacidades de procesamiento y seguimiento de la disponibilidad y redundancia de los componentes de la base de datos de OUL.

### **3.6. El consorcio OUL**

El consorcio de OUL está en expansión y re-definición en el momento de escribir este artículo. Los socios principales son:

- El grupo de investigación de astronomía espacial (AEGORA) de la Universidad Complutense de Madrid en España que lidera el proyecto. El diseño óptico de OUL, el detector, la integración y los tests del instrumento se realizarán en España. La estructura del segmento terreno y la arquitectura del procesamiento de los datos también se coordinará desde AEGORA.

- El Instituto Nacional de Astronomía Óptica y Electrónica (INAOE) en México que participa en el desarrollo de elementos ópticos para el instrumento y en el procesado de los datos.
- El Instituto Universitario de Envigado (IUE) en Colombia que participa en el procesado de los datos, en las herramientas de visualización 3D y en el uso de herramientas de inteligencia artificial.
- La Universidad de Rikkyo en Japón que participa en el desarrollo del proyecto y de la electrónica, así como en el procesado de los datos.

La estructura básica del consorcio se muestra en la Figura 12 pero todavía se pueden implementar modificaciones. A modo de ejemplo, en la actualidad el desarrollo de la plataforma está también en manos españolas, pero se podría ser llevado a cabo por otros miembros del consorcio; por ejemplo, Chile ha expresado su interés en proporcionar la plataforma cubesat. Igualmente, queda por definir el lanzador y la estructura detallada de la red de recepción y distribución de datos en Tierra.

## El equipo OUL 2023

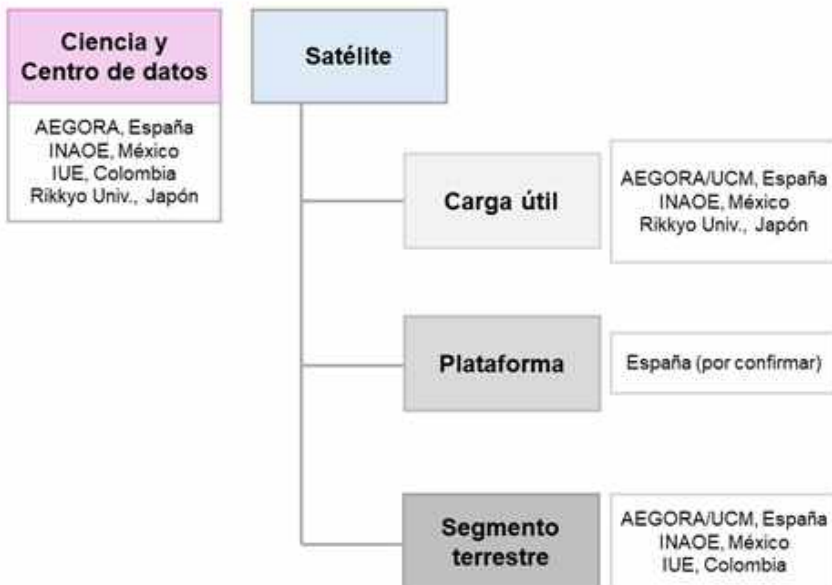


Figura 12: Esquema de la estructura del consorcio.

## 4. Resumen y conclusiones

El rango UV es de extraordinario interés para la observación y el estudio de los asteroides (y meteoroides) debido a múltiples motivos, entre ellos los destacados en este capítulo. El UV es una región muy sensible a la presencia de rocas hidratadas y materiales carbonáceos. Además, es muy sensible al procesado químico de las superficies por la acción del entorno espacial, pudiendo ser utilizado como una técnica fundamental de datación de asteroides. Los escasos datos adquiridos en este rango muestran también su utilidad como herramienta para la detección de metales tales como el hierro y el titanio. Debido a esta escasez de medidas, un pequeño observatorio como el Observatorio Ultravioleta Lunar (OUL) dedicado a la monitorización continua del entorno terrestre podrá proporcionar información única sobre la composición de los asteroides cercanos a la Tierra (o NEAs) y abrir una ventana inexplorada.

La misión OUL aportará, a un coste muy moderado, una herramienta de primer nivel para la caracterización UV de los cuerpos menores del Sistema Solar. OUL ha sido diseñado para investigar de manera sistemática los NEAs, la superficie lunar y los cometas durante la duración del proyecto que se podría extender durante más de 3 años.

OUL es un proyecto maduro desde un punto de vista tecnológico con un diseño optimizado para realizar imagen de gran campo en el rango UV (115 nm – 175 nm).

OUL es compacto, ligero y versátil y se puede instalar en cualquier orbitador lunar. También es operacional por sí mismo, en una plataforma cubesat.

En la actualidad, el proyecto está identificando las oportunidades de vuelo y estacionamiento en órbita lunar. Una vez este término se fije, se optimizará el diseño y en un plazo breve de unos meses se realizará la revisión oficial del diseño preliminar (PDR) por los miembros del consorcio.

## 5. Bibliografía

**BINZEL, R.P., DEMEO, F.E., TURTELBOOM, E.V.** y col., 2019. «Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS)». *Icarus*, 324, 41-76.

**BUS, J.S., BINZEL, R.P.** 2002, «Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey». *Icarus*, 158, 146-177.

**CALVIN, W.M., KING, T.V.V.** 1997, «Spectral characteristics of iron-bearing phyllosilicates: Comparison to Orgueil (C1), Murchison and Murray (CM2)». *Meteoritics and Planetary Science*, 32, 693-701.

- CLOUTIS, E.A., HIROI, T., GAFFEY, M.J., ALEXANDER, C.M.O.'D., MANN, P.,** 2011a. «Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites». *Icarus*, 212, 180-209.
- CLOUTIS, E.A., HUDON, P., HIROI, T., GAFFEY, M.J., MANN, P.,** 2011b. «Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 2. CM chondrites». *Icarus*, 216, 309-346.
- CONTI, L., BARNSTEDT, J., DIEBOLD, S. y col.,** 2022. «A photon counting imaging detector for UV space missions». *Proc. Volume 12181, Space Telescope and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*, 121810H.
- DEMEO, F.E., CARRY, B.,** 2013. «The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all sky-photometric surveys». *Icarus*, 226, 723-741.
- DEVOGÈLE, M., MOSKOVITZ, N., THIROUIN, A. y col.,** 2019. «Visible spectroscopy from the Mission Accesible Near-Earth Objects Survey (MANOS): Taxonomic dependence on asteroid size». *The Astronomical Journal*, 158, 196-219.
- FORNASIER, S., LANTZ, C., BARUCCI, M.A., LAZZARIN, M.,** 2014. «Aqueous alteration on main belt primitive asteroids: Results from visible spectroscopy». *Icarus*, 233, 163-178.
- GILLIS-DAVIS, J.J., GASDA, P.J., BRADLEY, J.P., ISHII, BUSSEY, D.B.J.,** 2015. «Laser space weathering of Allende (CV2) and Murchison (CM2) carbonaceous chondrites». *46th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #1607, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- GILLIS-DAVIS, J.J., LUCEY, P.G., BRADLEY, J.P., ISHII, H.A., KALUNA, H.M., MISRA, A., CONNOLLY JR., H.C.,** 2017. «Incremental laser space weathering of Allende reveals non-lunar like space weathering effects». *Icarus*, 268, 1-14.
- GÓMEZ DE CASTRO, MIRAVET-FUSTER, C.E., TAUBMANN, G.J., DIEZ, L., CASALTA, J.M., TARABINI, L., TOMÁS, A., VALLEJO, J.C., CANET, A., SACHKOV, M., KAMEDA, S.** 2019. «Earth as an exoplanet mission concept for a lunar orbiting cubesat». *Proc. SPIE 128110D*.
- GÓMEZ DE CASTRO, A.I., BEITIA-ANTERO, L., MIRAVET-FUSTER, C.E., TARABINI, L., SACHKOV, S., VALLEJO, J.C., RESTREPO QUIRÓS, L., CHÁVES, M., KAMEDA, S.** 2022. «OUL: an ultraviolet wide field imager for the Luna 26 mission». *Proc. SPIE 5*, 044004.
- GÓMEZ DE CASTRO, A.I.,** 2023. *Revista Española de Derecho Espacial*, 3, 533.
- HALLAM, K.L., HOWELL, B.J., WILSON, M.E.,** 1984. «An all-reflective wide-angle flat-field telescope for space». *Instrumentation in Astronomy V, A. Boksenberg and D. Crawford, Eds., Proc. SPIE 445*, 295-300.

- HAPKE, B.**, 2001. «Space weathering from Mercury to the asteroid belt». *Journal of Geophysical Research*, 106, 10039-10073.
- HENDRIX, A.R., VILAS, F.**, 2006. «The effects of space weathering at UV wavelengths: S-class asteroids». *The Astronomical Journal*, 0:1396-1404.
- HENDRIX A.R., RETHERFORD, K.D., GLADSTONE, G.R.** y col., 2012. «The lunar far-UV albedo: Indicator of hydration and weathering». *Journal of the Geophysical Research*, 117, E120021.
- HENDRIX, A.R., VILAS, F., LI, J.-Y.**, 2016. «The UV signature of carbon in the solar system». *Meteoritics and Planetary Science*, 51, 1, 105-115.
- HENDRIX, A.R., VILAS, F.**, 2019. «C-Complex Asteroids: UV-Visible Spectral Characteristics and Implications for Space Weathering Effects». *Geophysical Research Letters*, 46, 14307-14317.
- HIROI, T., PIETERS, C.M., ZOLENSKY, M.E., LIPSCHUTZ, M.E.**, 1993. «Evidence of Thermal Metamorphism on the C, G, B and F asteroids». *Science*, 261, 1016-1018.
- HIROI, T., ZOLENSKY, M.E., PIETERS, C.M., LIPSCHUTZ, M.E.**, 1996a. «Thermal metamorphism of the C, G, B, and F asteroids seen from the 0.7  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  and UV absorption strengths in comparison with carbonaceous chondrites». *Meteoritics and Planetary Science*, 31, 321-327.
- HIROI, T., PIETERS, C.M.**, 1996b. «Reflectance spectra (UV-3  $\mu\text{m}$ ) of heated Ivuna (CI) meteorite and newly identified thermally metamorphosed CM chondritas». *Lunar and Planetary Science*, 27, 551-552.
- IVEZIĆ, Ž., TABACHNIK, S., RAFIKOV, R.** y col., 2001. «Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data». *The Astronomical Journal*, 122, 2749-2784.
- IZAWA, M.R.M., CLOUTIS, E.A., RHIND, T., MERTZMAN, S.A., APPLIN, D.M., STROMBERG, J.M., SHERMAN, D.M.**, 2019. «Spectral reflectance properties of magnetites: Implications for remote sensing». *Icarus*, 319, 525-539.
- KANUCHOVA, Z., BRUNETTO, R., FULVIO, D., STRAZZULLA, G.**, 2015. «Near-ultraviolet bluing spectra after space weathering of silicates and meteorites». *Icarus*, 258, 289-296.
- KIM, C., CHANG, S., KIM, D.**, y col., 2023, «Microroughness surface scattering modeling of Low Surface Brightness (LSB) and UV observation for MESSENGER Surveyor Mission», <https://www.nuva.eu>
- KOHOUT, T., GRITSEVICH, M., GROKHOVSKY, V.I., YAKOVLEV, G.A., HALODA, J., HALODOVA, P., MICHALLIK, R.M., PENTTILÄ, A., MUINONEN, K.**, 2014. «Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite-Insight into shock-induced changes in asteroid regolith». *Icarus*, 228, 78-85.

- LANTZ, C., BRUNETTO, R., BARUCCI, M.A., FORNASIER, S., BAKLOUTI, D., BOURÇOIS, J., GODARD, M.**, 2017. «Ion irradiation of carbonaceous chondrites: A new view space weathering on primitive asteroids». *Icarus*, 285, 43-57.
- LAZZARO, D., ANGELI, C.A., CARVANO, J.M., MOTHÉ-DINIZ, T., DUFFARD, R., FLORCZAK, M.**, 2004. «S<sup>3</sup>OS<sup>2</sup>: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids». *Icarus*, 172, 179-220.
- MARKLEY, M., KLETETSCHKA, G.**, 2016. «Nanophase iron production through laser irradiation and magnetic detection of space weathering analogs». *Icarus*, 268, 204-214.
- MATSUOKA, M. NAKAMURA, T., KIMURA, Y., HIROI, T., NAKAMURA, R., OKUMURA, S., SASAKI, S.**, 2015. «Pulse-laser irradiation experiments of Murchison CM2 chondrite for reproducing space weathering on C-type asteroids». *Icarus*, 254, 135-143.
- NOGUCHI, T., NAKAMURA, T., KIMURA, M.**, 2011. «Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles». *Science*, 333, 1121-1125.
- NOGUCHI, T., KIMURA, M., HASHIMOTO, T. y col.**, 2014. «Space weathering rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles». *Meteoritics and Planetary Science*, 49, 188-214.
- OBA, Y., KOGA, T., TAKANO, Y., OGAWA, N.O., OHKOUCI, y col.**; 2023. *Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu*. *Nature Communications*, 14(1):1292.
- ØSTGAARD N., MENDE S.B., FREY, H.U., GLADSTONE, G.R., LAUCHE, H.**, 2003, «Neutral hydrogen density profiles derived from geocoronal imaging», *Journal of Geophysical Research*, 108, 1300.
- PANG, K.D., CHUN, S.F.S., AJELLO, J.-M., NANSHENG, Z., MINJI, L.**, 1982, «Organic and inorganic interpretations of the martian UV-IR reflectance spectrum», *Nature*, 295, 43-46.
- PERNA, D., BARUCCI, M.A., FULCHIGNONI, M., POPESCU, M., BELSKAYA, I., FORNASIER, S., DORESSOUNDIRAM, A., LANTZ, C., MERLIN, F.**, 2018. «A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening». *Planetary and Space Science*, 157, 82-95.
- PIETERS, C.M., NOBLE, S.K.**, 2016. «Space weathering on airless bodies». *Journal of Geophysical Research Planets*, 121, 1865-1884.

- PRYOR, W.R., LASICA, S.J., STEWART, A.I.F., HALL, D.T., LINEAWEAVER, S., COLWELL, W.B., AJELLO, J.M., WHITE, O.R, TOBISKA, W.K.,** 1998. «Interplanetary  $\alpha$ -Lyman observations from Pioneer Venus over a solar cycle from 1978 to 1999». *Journal of the Geophysical Research*, 103, 26833-26849.
- QUÉMERAIS, E., MCCLINTOCK, B., HOLSCLAW, G., KATUSHKINA, O., IZMODE-NOV, V.,** 2014. «Hydrogen atoms in the inner heliosphere: SWAN-SOHO and MASCS-MESSENGER observations». *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 119, 8017-8029.
- QUIJADA, M.A., RODRIGUEZ DE MARCOS, L.V., DEL HOYO, J.G., GRAY, E., WOL- LACK, E.J., BROWN, A.,** 2022. «Advanced Al mirror protected with LiF overcoat to realize stable mirror coatings for astronomical telescope». *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation* 5, 121881V.
- THOMPSON, M.S., LOEFFLER, M.J., MORRIS, R.V., KELLER, L.P., CHRISTOFFERS- EN, R.,** 2019. «Spectral and chemical effects of simulated space weathering of the Murchison CM2 carbonaceous chondrite». *Icarus*, 319, 499-511.
- WAGNER, J.K., HAPKE, B.W., HAPKE, WELLS, E.N.,** 1987. «Atlas of reflectance spectra of Terrestrial, Lunar, and Meteoritic powders and frosts from 92 to 1800 nm». *Icarus*, 69, 14-28.