

## El telescopio espacial Hubble y su sucesor

Santiago Arribas

### 1. El telescopio espacial Hubble

El telescopio espacial *Hubble* (HST) es ampliamente considerado uno de los logros científicos y tecnológicos más importantes de los tiempos modernos y, después del telescopio de Galileo, el que mayor impacto ha tenido en nuestra imagen del Cosmos. Fue inicialmente concebido en los años 40, diseñado y construido en las décadas de los 70 y 80, y situado en órbita por la tripulación del transbordador espacial *Discovery* en Abril de 1990. De acuerdo con la planificación actual estará operativo hasta 2010, un año antes del lanzamiento de su sucesor, el *James Webb Space Telescope* (JWST), también conocido como *Next Generation Space Telescope* (NGST). En la Sección 3 de este artículo describiré brevemente las características del JWST.

Con un tamaño del espejo primario relativamente modesto (2,4 m. de diámetro), la gran ventaja del telescopio espacial reside en su posición privilegiada. A unos 600 Km. de altura consigue evitar los efectos negativos que la atmósfera terrestre produce en la detección de la radiación electromagnética. Así, por una parte permite la obtención de imágenes con alta resolución espacial (limitadas por difracción para  $\lambda > 600$  nm.) sin las distorsiones producidas por el carácter inhomogéneo e inestable de la atmósfera y, por otra, accede a rangos de longitudes de onda que son total o parcialmente absorbidos por esta. En particular, con los instrumentos actualmente disponibles, el HST puede observar en todo el rangopectral desde el ultravioleta lejano hasta el infrarrojo cercano (i.e., 115 - 2500 nm). Otra ventaja importante del telescopio espacial es que se encuentra en un entorno relativamente estable y muy repetitivo, lo que permite realizar calibraciones, tanto del propio telescopio como de sus instrumentos, de una calidad muy superior a las llevadas a cabo desde tierra.

Desde su puesta en órbita el *Hubble* ha recibido la visita de 4 tripulaciones del transbordador espacial, técnicamente conocidas como misiones de servicio. Además de realizar ciertas tareas rutinarias de mantenimiento, gracias a estas misiones se han podido resolver un buen número de problemas. Por ejemplo, todos recordamos que las primeras imá-



**Figura 1.** El *Hubble Space Telescope* en su órbita a ~ 600 Km. sobre la superficie de la tierra (composición). La imagen muestra los nuevos paneles solares instalados por la tripulación del transbordador espacial *Columbia* durante la última misión de mantenimiento en Marzo de 2002.

genes obtenidas con el HST estaban afectadas por una fuerte aberración como consecuencia de un error en la construcción del espejo primario. Además de este problema, las flexiones en los paneles solares, cuando pasaban de la sombra producida por la tierra a la exposición directa a la luz solar, impedían mantener la estabilidad del apuntado. Aunque inicialmente estos dos problemas hicieron pensar en el fracaso del proyecto, la primera misión de servicio consiguió resolverlos permitiendo la operación del telescopio con los niveles de funcionalidad inicialmente planeados.

Otro de los objetivos fundamentales de las misiones de servicio ha sido instalar nuevos instrumentos científicos. De hecho, en la actualidad, todos los instrumentos científicos operativos en 1990 han sido ya sustituidos. Los nuevos instrumentos tienen en cuenta la forma real del espejo primario y, lógicamente,

incorporan numerosos avances tecnológicos con relación a sus predecesores. Tres son los instrumentos científicos principales: la recién instalada ACS (*Advanced Camera for Surveys*), una cámara para obtener imágenes en el rango ultravioleta-visible; NICMOS (*Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrograph*), una cámara-espectrógrafo que opera en el infrarrojo cercano; y STIS (*Space Telescope Imaging Spectrograph*) una cámara-espectrógrafo optimizada en la región ultravioleta-visible.

El telescopio espacial no realiza un programa científico predeterminado sino que se ofrece periódicamente a la comunidad científica. Esta manera *abierta* de utilizar el tiempo del HST optimiza su rendimiento y permite adaptar los proyectos que con él se llevan a cabo a la propia evolución de una ciencia que está viviendo años de enorme desarrollo y actividad. Actualmente el archivo del HST contiene más de 100.000 observaciones de unas 22.000 zonas (objetos) en el cielo. Los estudios realizados con estos datos han impactado en prácticamente todos los campos de la Astrofísica moderna. Además de su importantísima contribución a la ciencia, las imágenes del HST han tenido también una gran influencia en el público en general, estimulando el interés de los no profesionales por los avances en la exploración del Universo.

## 2. Algunos resultados del telescopio espacial

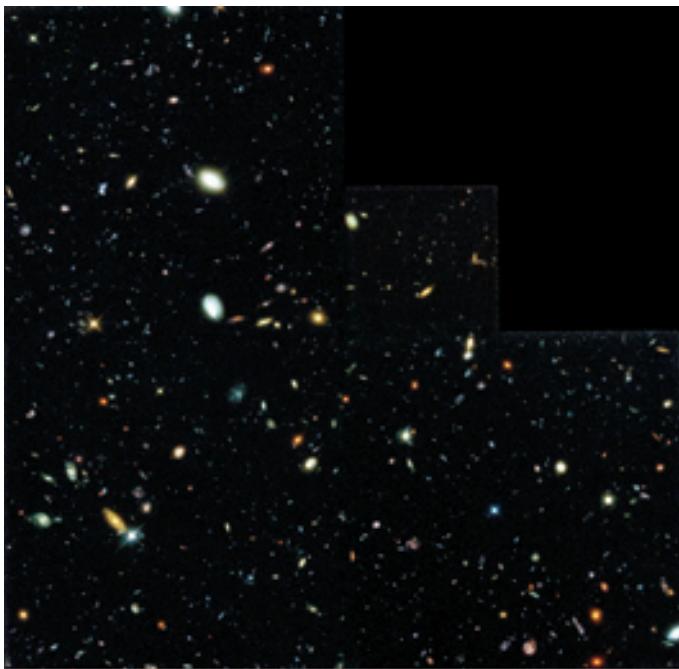
En este apartado destacaré algunos resultados que permiten ilustrar la variedad y relevancia de los trabajos realizados con el telescopio espacial. No pretende ser una selección de los más *relevantes*, ni menos aún un resumen de los mismos. Muchos de los campos mencionados se encuentran en la actualidad en una fase de gran actividad y no tenemos aún la perspectiva adecuada para tales planteamientos. Téngase además en cuenta que en promedio se publica más de un artículo de investigación al día en las revistas especializadas en Astrofísica basado en datos del HST. Por ello, y por limitaciones de espacio, algunos resultados importantes no serán mencionados en esta sección.

### i) El *Hubble Deep Field*: Formación y evolución de galaxias

En diciembre de 1995 el telescopio espacial apuntó a una región del cielo cuidadosamente seleccionada por no tener estrellas brillantes, galaxias cercanas, nubes de gas, etc. En esa región aparentemente vacía del cielo el telescopio espacial realizó una serie de exposiciones de muy larga duración alcanzando su límite práctico de detección, obteniendo así las imágenes más profundas del universo lejano o, equivalentemente, del universo joven en el rango visible de las realizadas hasta esa fecha. En esta minúscula región del cielo (de unos pocos minutos de arco cuadrados) conocida como *Hubble Deep Field (Norte)* (HDF-N, figura 2), se detectaron en torno a 3 000 galaxias muchas de las cuales están a distancias comparables al tamaño del Universo. Este resultado fue una sorpresa para la mayor parte de la comunidad científica pues la creencia general, basada en simulaciones, era que “en el mejor de los casos, exposiciones desde el espacio

mostrarían tantas galaxias lejanas como las obtenidas desde tierra” (c.f. Bahcall *et al.* 1990).

A estas observaciones han seguido otras similares realizadas en otros rangos de longitud de onda (infrarrojo, radio, rayos X, etc.) llevadas a cabo tanto por el propio HST como por otros telescopios. Asimismo, otra región del cielo de propiedades similares y conocida como *Hubble Deep Field (Sur)* (HDF-S) fue también observada con el telescopio espacial en condiciones muy parecidas a las del HDF-N (ver Ferguson, Dickinson, y Williams 2001). Todas estas observaciones han tenido un enorme impacto en la caracterización de las propiedades de las galaxias en esa etapa del universo y, consecuentemente, en estudios de formación y evolución de galaxias. En particular han mostrado que, cuando el universo era muy joven, estaba formado por estructuras más pequeñas e irregulares que las que vemos en el universo moderno (cercaño). En general, estos resultados apoyan los llamados modelos jerárquicos según los cuales las estructuras que observamos a alto *redshift* constituyen los elementos básicos para la formación, mediante procesos de fusión, de las galaxias elípticas y espirales de morfología regular que vemos en el universo cercano. A modo de ejemplo, en la figura 3 presentamos una imagen de la galaxia cercana M51, también obtenida con el telescopio espacial. Aunque los modelos jerárquicos son generalmente aceptados, aún quedan por entender muchos aspectos relativos a la formación y evolución de galaxias, tales como los ritmos de colisión y fusión, los procesos de contracción del gas interestelar, la formación estelar asociada, los ritmos de formación e influencia de agujeros negros muy masivos, etc. A este respecto es interesante destacar que con el HST se obtuvo la primera prueba convincente de la existencia de agujeros negros muy masivos ( $M > 10^9$  masas solares), así como evidencias



**Figura 2.** *Hubble Deep Field North*. Esta imagen en color real se ha obtenido combinando tres imágenes independientes tomadas en el azul, rojo e infrarrojo. Además de las típicas estructuras espirales y elípticas que encontramos en las galaxias cercanas, se observa una gran variedad de formas y colores en las galaxias más lejanas. La proporción de galaxias con morfología irregular aumenta en el Universo lejano (joven).



**Figura 3.** M51 (la galaxia del remolino) observada por el HST. Esta galaxia tiene la típica morfología espiral característica de muchas galaxias en el Universo cercano.

de que su presencia en los núcleos de las galaxias, sean o no activos, es general (ver Macchetto, 2002).

## ii) Calibración de la escala de distancias: medición de la constante de *Hubble*

Las estrellas variables de tipo Cefeida son particularmente útiles como indicadores de distancia pues muestran una relación entre su periodo y su luminosidad intrínseca. Dado que el periodo puede determinarse con relativa facilidad, la comparación de su luminosidad aparente con la intrínseca nos da una medida *directa* de su distancia. Sin embargo la detección de estrellas de tipo Cefeida está limitada a una zona relativamente cercana del Universo, por lo que es necesario la utilización de calibradores de distancia secundarios. Entre ellos las supernovas (SN) de tipo Ia son especialmente útiles por varias razones. En primer lugar, y dado que alcanzan luminosidades altísimas, nos permiten extender las medidas de distancias a galaxias mucho más lejanas. Por otro lado son relativamente frecuentes: en un cúmulo de galaxias típico con, digamos,  $10^{13}$  masas solares en estrellas, se deben producir varias explosiones de SN por año. Sin embargo, para utilizar las SN-Ia como indicadores de distancia absolutos es necesario conocer en detalle sus propiedades y, en particular, su luminosidad intrínseca. En principio, si se dispusiera de un conjunto de galaxias que albergaran tanto estrellas de tipo Cefeida como SN-Ia, resultaría relativamente sencillo determinar la luminosidad intrínseca de las SN-Ia: las estrellas Cefeida nos darían la distancia a la galaxia, y la medida de la luminosidad aparente de la SN-Ia nos permitiría inferir su luminosidad intrínseca. Si las SN-Ia son realmente calibradores estándar, es decir, si sus propiedades son las mismas a lo largo de la historia del Universo, la medida de sus magnitudes aparentes nos daría la distancia (en la práctica este método puede ser más complicado e incierto por efectos, por ejemplo, de la extinción interestelar).

Hace una década, utilizando telescopios terrestres, se habían determinado las distancias a un reducido número de galaxias cercanas, ninguna de las cuales albergaba supernovas de tipo Ia. El HST ha sido el primer telescopio capaz de resolver estrellas de tipo Cefeida en galaxias con SN-Ia, lo que ha permitido encontrar el ritmo medio de expansión del Universo (i.e. la constante de *Hubble*,  $Ho$ ) con mucha mejor precisión. El valor deducido por Tammann, Sandage, y Saha (2002) para  $Ho$  es  $59 \pm 6$  km/s/Mpc, lo que implica que la edad del Universo está en un rango entre 11 y 17 Ga, dependiendo de la aceleración/deceleración que haya podido sufrir en el pasado. Independientemente, y en el marco del llamado 'Proyecto Clave' para determinar  $Ho$ , otro grupo de investigación (Freeman et al 2001) ha combinado varios métodos para determinar distancias (basados en datos del HST) obteniendo un valor para  $Ho$  de  $72 \pm 8$  km/s/Mpc. Al margen de la polémica que esta aparente discrepancia ha originado, el HST ha permitido reducir las incertidumbres asociadas a  $Ho$  de un factor 2 a en torno un 15%. (Los datos recientemente obtenidos por el satélite WMAP, combinados con los del HST, sugieren un valor para  $Ho$  de  $72 \pm 5$  km/s/Mpc, y una edad del Universo de  $13.7 \pm 2$  Ga [Spergel et al. 2003]).

La determinación precisa de distancias extragalácticas no sólo tiene una gran importancia en estudios cosmológicos, si no que también resulta clave para entender las propiedades

físicas de las galaxias, cuyos tamaños, luminosidades, masas, etc. dependen de la distancia.

## iii) Expansión acelerada del Universo

Una vez el ritmo medio de expansión (i.e.  $Ho$ ) ha sido establecido, el siguiente paso es determinar su variación temporal a lo largo de la historia del Universo. En este tipo de estudios, las observaciones de SN-Ia muy distantes son claves para diferenciar entre modelos cosmológicos. Para ello sólo es necesario asegurarse de que las SN-Ia son verdaderamente calibradores estándar, sin necesidad de determinar sus magnitudes absolutas. En otras palabras, uno podría medir los parámetros de aceleración/deceleración sin medir  $Ho$ , y viceversa

Si bien con telescopios terrestres se han podido medir las magnitudes aparentes de un buen número de SN-Ia, la mayoría son relativamente cercanas y, por tanto, no es posible detectar claramente variaciones en la velocidad de expansión del Universo. Observaciones con el telescopio espacial han permitido medir el flujo de las SN-Ia más distantes. De especial relevancia son las observaciones de la supernova más lejana encontrada hasta la fecha, SN 1997ff. Fue descubierta de manera inesperada en el HDF (Gilliland, Nugent, Phillips 1999), y se estima que tiene un desplazamiento al rojo (*redshift*) de 1.7. Su luminosidad, así como la de otras SN-Ia con *redshift* en torno a 1, sugieren que el Universo pasó por una fase de deceleración y que actualmente su expansión es acelerada. El origen de la fuerza que produce dicha aceleración, y que es suficientemente poderosa como para superar a la gravedad, es desconocido. Dicha fuerza ha sido bautizada con el nombre de "energía oscura" (*dark energy*) y es otra representación de la famosa constante cosmológica introducida por Einstein en las ecuaciones de la teoría de la relatividad general.

La reciente instalación de la cámara ACS ha permitido aumentar considerablemente las posibilidades del HST en este campo y posiblemente pronto veremos nuevos resultados al respecto.



**Figura 4.** Colisión de dos galaxias. Imagen obtenida con la recién instalada *Advance Camera for Surveys*. Obsérvese el gran número de galaxias de fondo.

#### iv) Formación estelar

La alta resolución espacial del HST nos ha permitido obtener imágenes con una claridad sin precedentes de regiones de formación estelar. Observaciones de la Nebulosa de Orión (figura 8), la región de formación estelar mejor estudiada, nos han dado muchas sorpresas. Además de las imágenes de los sistemas protoplanetarios que comentaremos más adelante, la mejor resolución espacial del HST nos ha permitido descubrir docenas de estrellas jóvenes con "microchorros" (*jets*), choques entre los frentes de vientos estelares, etc. Mientras que todos los procesos involucrados pueden estudiarse con un impresionante detalle en regiones relativamente cercanas de la Galaxia, la formación estelar es un proceso clave en la historia del Universo.



**Figura 5.** Formado por varios cientos de miles de estrellas, M80 (NGC 6093) es uno de los cúmulos globulares más densos de la Vía Láctea.

Sabemos que la colisión de galaxias produce una pérdida de momento angular en el gas del medio interestelar, que cae hacia las regiones centrales (figura 4). Estas zonas de relativa alta densidad, son propicias para la formación estelar. Las estrellas masivas evolucionan rápidamente y explotan como supernovas. La radiación y material expulsado en estas explosiones enriquecen el medio interestelar con material procesado y comprimen el gas y polvo interestelar, estimulando a su vez la formación de estrellas en impresionantes brotes, dando así lugar a cúmulos estelares masivos y jóvenes. Aunque, como era de esperar, los cúmulos más energéticos tienden a formarse en las regiones centrales, también se crean cúmulos de estrellas muy jóvenes a lo largo de las "colas de marea" generadas por la colisión. Con el HST hemos podido observar y caracterizar las propiedades de esos cúmulos donde la formación estelar tiene lugar de forma masiva. Este tipo de estudios nos permiten entender

de una forma global la conexión de procesos que transcurren a diferentes escalas como son la formación y evolución de estrellas y de galaxias, y su papel en la historia del Universo.

#### v) Últimas etapas de la evolución estelar

Con el HST también hemos podido caracterizar con un detalle sin precedente las etapas últimas de la evolución estelar. Por ejemplo, observaciones de objetos como Nebulosas Planetarias (figuras 6 y 7), Novas, Supernovas, etc realizadas con el HST han permitido entender los procesos físicos que dan lugar a estas fases, así como los efectos producidos en el medio interestelar. Además de su interés intrínseco, estos estudios tienen una importancia central en varios campos de la Astrofísica y Cosmología moderna, como puede deducirse de lo comentado en secciones anteriores. Especial mención merecen los estudios de la supernova 1987A en la Nube Grande de Magallanes, la más brillante desde los tiempos de Kepler. Afortunadamente hemos podido observar esta supernova con el telescopio espacial, y así obtener detalles de una supernova inimaginables hace dos décadas. Aunque estas observaciones han confirmado muchas de las predicciones sobre estos objetos, también han desvelado nuevos misterios. Quizás el más enigmático es la ausencia de un objeto central compacto. Es también sorprendente el sistema de anillos circumestelares (figura 10) para el que no existe una explicación satisfactoria hasta la fecha. La onda de choque debida a la explosión ha comenzado a alcanzar el anillo central. Este impacto marca el comienzo del remanente de supernova, fase en la que el flujo de radiación está dominando el impacto de los residuos con la materia circumestelar. El HST, ahora junto con otros observatorios como Chandra, ALMA, y SIRTF, nos seguirá ofreciendo detallada información en esta nueva fase.

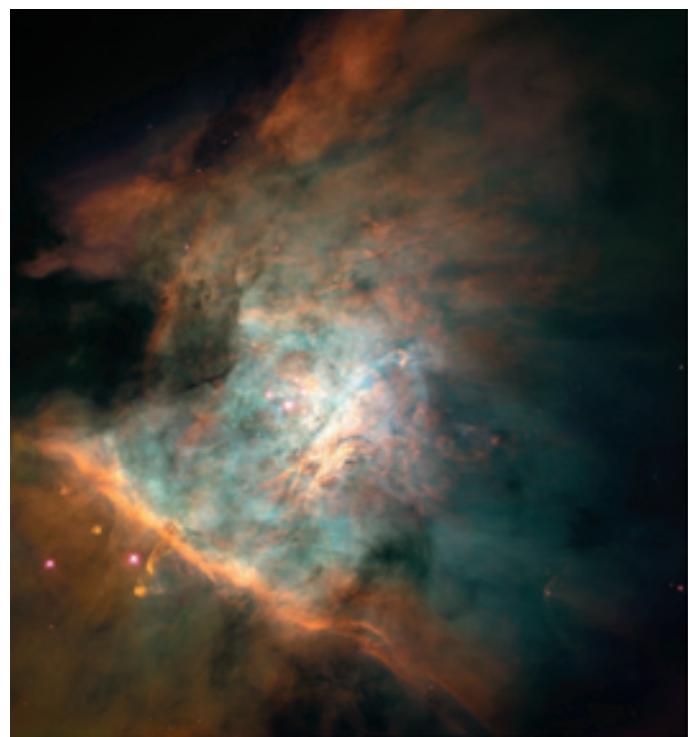


**Figura 6.** Nebulosa Planetaria NGC6543 (Ojo de Gato). El Hubble revela complejas estructuras y chorros de gas con alta velocidad en las etapas finales de la evolución de esta estrella.

### vi) Formación de sistemas planetarios

Durante siglos se ha especulado sobre la existencia de un disco de polvo como precursor de nuestro sistema solar. Dicho disco proveería el material básico a partir del cual se formaron los planetas en etapas posteriores. Bajo esta hipótesis, la existencia de planetas en otras estrellas (planetas *extrasolares*), es un requisito básico para la existencia de estos discos *protoplanetarios*.

Observaciones desde tierra anteriores al HST habían detectado un exceso de radiación infrarroja en un pequeño número de estrellas jóvenes. Estos excesos fueron explicados con la existencia de discos de polvo protoplanetarios, aunque únicamente en el caso de la estrella Beta Pictoris fue posible obtener una imagen desde tierra que apoyara esta hipótesis. Observaciones con el HST han revolucionado este campo; las imágenes obtenidas en la nebulosa de Orión han mostrado que aproximadamente la mitad de las estrellas jóvenes están rodeadas de estructuras de gas y polvo, muchas de las cuales son claramente discos (figura 9). Se ha comprobado que, en efecto, estos discos contienen el material suficiente para formar sistemas planetarios equivalentes a nuestro sistema solar. Actualmente se cree que la mayor parte de las estrellas nacen en entornos similares a la Nebulosa de Orión, donde los discos protoplanetarios están sometidos a un intenso campo de radiación proveniente de las estrellas masivas cercanas. Este campo de radiación tiende a destruir los discos protoplanetarios mediante un proceso de fotoevaporación. Sin embargo, por otro lado, se observa como los granos de polvo son en muchos casos relativamente grandes ( $> 1 \text{ mm}$ ). Por tanto la frecuencia de planetas y la estructura interna de los sistemas planetarios parece estar determinada por la competición de estos dos procesos: el crecimiento de los granos de polvo (dominado por la gravedad) y la destrucción de los mismos como consecuencia de la fotoevaporación. El HST ha abierto este nuevo campo de la astronomía permitiendo el estudio empírico de la estructura y evolución de los sistemas protoplanetarios.



**Figura 8.** Imagen de la Nebulosa de Orión, la región de formación estelar mejor estudiada hasta la fecha, y donde el HST ha desvelado detalles sobre los procesos que tienen lugar en las etapas protoestelares, así como relativos a las primeras etapas estelares.

### vii) Detección de planetas extra-solares

La detección mediante tránsitos de planetas extra-solares utiliza otra de las características únicas del HST. Gracias a la ausencia de atmósfera y a la estabilidad y repetitividad de su entorno, los instrumentos del HST son capaces de medir

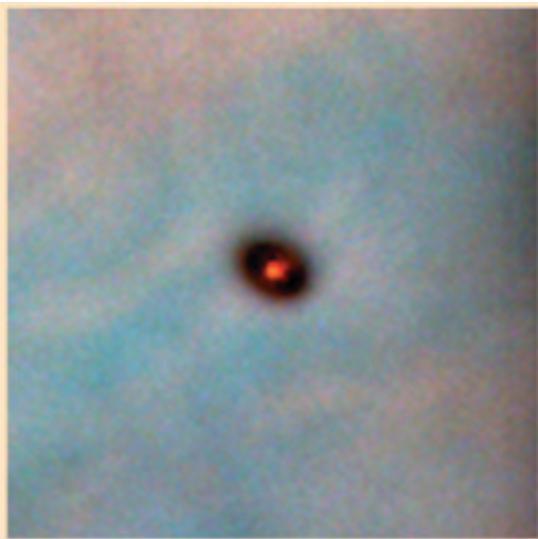
variaciones de flujo muy inferiores a las detectables con telescopios terrestres. Por ejemplo, el HST ha sido capaz de detectar con un nivel de precisión sin precedentes los cambios en el flujo producidos cuando un planeta realiza un tránsito (i.e. se sitúa entre la estrella que orbita y el telescopio, bloqueando parte del flujo de la estrella). Este tipo de observaciones, junto con medidas de la velocidad radial, permiten determinar el tamaño y la masa del planeta, lo que a su vez impone fuertes restricciones a los modelos teóricos de formación de planetas. Observaciones con el telescopio espacial de la estrella HD 209458 han caracterizado con gran precisión las propiedades globales (masa, densidad media, velocidad, etc.) de su planeta. Además observaciones espectrofotométricas han revelado que la atmósfera del planeta es rica en sodio (Charbonneau *et al.* 2002). Esta es la primera detección de una atmósfera en un planeta extrasolar, lo que marca el principio de una era en la que se pueden caracterizar las propiedades químicas de los planetas extrasolares.

### viii) El Sistema Solar

Aunque durante las tres últimas décadas el estudio del sistema solar se ha beneficiado enormemente de los satélites que se han aproximado, orbitado, o incluso se han posado en algunos objetos, el HST también tiene un lugar destacado en este campo por tres razones fundamentales: i) ofrece una alta resolución espacial, lo que permite estudiar estructuras pequeñas (por ejemplo, en el caso de Marte de unos cientos de kilómetros), ii) tiene un conjunto de instrumentos de muy alta calidad, que ofrecen una amplia versatilidad y sensibilidad, y iii) permite un buen muestreo temporal, lo que es fundamental para estudiar una gran variedad de procesos dinámicos.



**Figura 7.** La nebulosa planetaria bipolar M2-9, es otro ejemplo de una estrella con masa similar al Sol en los últimos estadios de su evolución.



**Figura 9.** Un ejemplo de disco protoplanetario descubierto por el *Hubble* alrededor de una estrella joven ( $\sim 10^6$  años) en la nebulosa de Orión.

micos (por ejemplo, los climas planetarios, colisiones cometa-planeta, etc.). Entre otros muchos resultados relevantes en este campo se pueden destacar los siguientes. El HST ha obtenido las primeras imágenes resueltas de Plutón y su satélite Caronte, permitiendo la medida de sus masas así como un cartografiado de sus superficies. También ha mostrado que, contrariamente a lo que se creía, Urano y Neptuno tienen climas dinámicos los cuales han podido ser en cierta medida caracterizados. En Saturno el *Hubble* ha descubierto la existencia de una atmósfera difusa alrededor de los anillos, así como la presencia de satélites no detectados previamente. En 1994 el HST registró las colisiones de 21 fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9 con la atmósfera de Júpiter, así como los efectos de la mismas. Las ondas atmosféricas generadas permitieron estudiar la densidad y composición de su atmósfera. Marte ha sido también objeto de numerosos estudios con el HST, los cuales han contribuido a entender las propiedades de su atmósfera, su superficie, y sus satélites. Por ejemplo, estudios recientes con el HST sugieren que el modelo previamente aceptado del clima en Marte (basado en los datos recogidos durante las misiones *Viking*) debe ser revisado.

### 3. El sucesor del Hubble: *El James Webb Space Telescope*

Según la planificación actual, el telescopio espacial *Hubble* terminará sus operaciones en 2010. Para el año siguiente, en 2011, está planeado el lanzamiento del *Next Generation Space Telescope* (recientemente bautizado como *James Webb Space Telescope*, JWST).

El JWST tendrá un espejo primario de  $\sim 6$  m. y estará optimizado en el infrarrojo cercano. Estas características están motivadas por el objetivo científico central del proyecto que es estudiar el universo lejano (joven) hasta la época de la *primera luz*, es decir, cuando comenzaron a brillar las primeras estrellas. No obstante, el JWST será clave para otros muchos proyectos relativos a nuestro universo local. En cualquier caso, al igual que el *Hubble*, el JWST será un observatorio de propósito general, abierto a la comunidad

científica la cual, en última instancia, decidirá el mejor uso del mismo.

Para optimizar su comportamiento en el infrarrojo el JWST se situará en una órbita L2, es decir a aproximadamente 1.5 millones de kilómetros de la tierra (5 veces la distancia tierra-luna) en la dirección contraria al Sol. Esta órbita impone fuertes restricciones a la masa y dimensiones del observatorio, así como a las operaciones del mismo que, en principio, deben cubrir un periodo mínimo de 5 años, con una posible extensión a 10. Por ejemplo, a diferencia del *Hubble*, el JWST no tendrá misiones de servicio (mantenimiento) y, por tanto, se dispondrá únicamente de los instrumentos inicialmente instalados. Debido a las limitaciones de espacio en las bodegas de los cohetes actuales, el telescopio debe ser desplegable y el espejo primario segmentado. Es decir, este estará compuesto por varios subespejos que deben ser situados y alineados adecuadamente una vez el telescopio esté en órbita. Por otra parte, la energía necesaria para alcanzar una órbita L2 restringe fuertemente la masa total del observatorio, y hace necesario que los espejos estén basados en óptica (ultra)ligera.

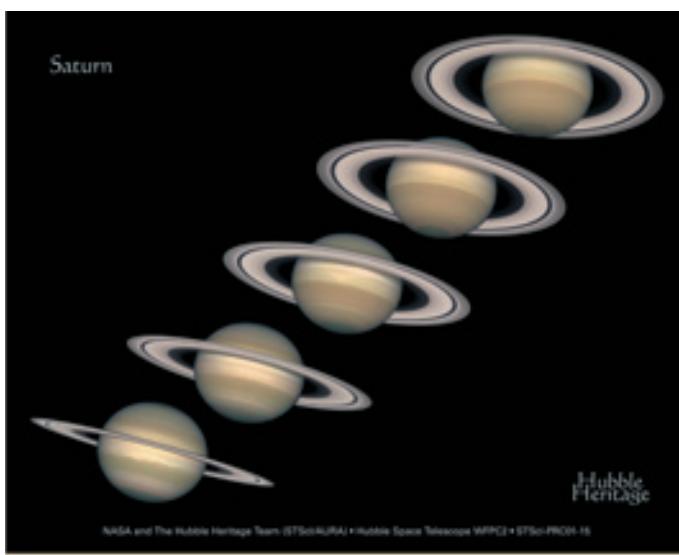


**Figura 10.** Imágenes de la supernova SN1987a obtenidas con el *Space Telescope Imaging Spectrograph* (STIS). Obsérvese el complejo sistema de anillos circumestelares.

Aunque estará optimizado para trabajar en el infrarrojo cercano (1-5 micras), tendrá extensiones tanto hacia el infrarrojo medio (5-28 micras) como hacia el visible (0,6-1 micras). La calidad de la óptica debe ser tal que las imágenes estarán limitadas por difracción en longitudes de onda mayores a 2 micras y, por tanto, permitirá observar en el infrarrojo cercano con resoluciones equivalentes a las del HST en el óptico. Para poder trabajar adecuadamente entre 1 y 5 micras tanto el telescopio como los instrumentos deben enfriarse hasta una temperatura de unos 30 - 50 K, necesaria para la correcta operación de los detectores. Estas temperaturas se consiguen de forma *pasiva*, dejando el telescopio a la sombra de un gran escudo que bloquea la radiación directa del sol. Gracias a esta baja temperatura la radiación emitida por el observatorio será inferior a la luz zodiacal en ese rango de longitud de onda. En otras palabras el observatorio no contribuirá de manera significativa al nivel de ruido de

fondo en el infrarrojo cercano, por lo que se llevará su sensibilidad a su límite práctico. En el rango visible no será necesario observar en longitudes de onda menores de 0,6 micras, lo que permitirá utilizar oro como material reflectante en los espejos del telescopio e instrumentos, garantizando un óptimo comportamiento en el infrarrojo.

El funcionamiento del JWST en el infrarrojo medio es algo más complicado. La fuente primaria de emisión de fondo en el infrarrojo medio será la radiación emitida por la parte trasera del escudo solar y dispersada posteriormente por el telescopio. Teniendo en cuenta que la temperatura del escudo solar será de  $\sim 110$  K, se estima que para longitudes de onda menores que 10 micras la emisión térmica que llegará a los detectores será menor a la luz zodiacal (aunque este comportamiento dependerá de los niveles de contaminación por polvo en la óptica). El principal candidato como detector en este rango es un mosaico de Si:Al que opera a una temperatura de entorno a 8 K, es decir, significativamente menor que la de 30 - 50 K del telescopio y módulo de instrumentos obtenida de forma pasiva mediante el escudo solar. Por ello, para observaciones en el infrarrojo medio, es necesario un sistema de enfriado activo, que en la actualidad se basa en un criostato de hidrógeno sólido.



**Figura 11.** Imágenes de Saturno obtenidas entre 1996 y 2000 con el HST. La primera imagen corresponde al equivalente al equinoccio de otoño y la última al solsticio de invierno en el hemisferio Norte de dicho planeta. Ademas de a otro tipo de estudios planetarios, el HST ha contribuido de forma significativa a la caracterización del clima en varios planetas del sistema solar.

El JWST dispondrá de tres instrumentos científicos: NIRCAM, una cámara de amplio campo de visión optimizada en el rango 0,6 - 5 micras; NIRSPEC, un espectrógrafo multiobjeto que cubrirá el rango 1 - 5 micras y permitirá observar más de 100 objetos simultáneamente y MIRI, una cámara-espectrógrafo en el rango 5 - 28 micras.

El principal contratista para construir el telescopio ya ha sido seleccionado y los instrumentos entran en una fase de mayor definición. Es esperable que revisiones posteriores del proyecto dejen obsoletos algunos de los párrafos y números presentados en este artículo. En cualquier caso las características generales del JWST garantizan que, al igual que lo es actualmente el Hubble, será un observatorio clave para la exploración del Universo durante las próximas décadas.



**Figura 12.** Composición artística del *James Webb Space Telescope* (diseño de TWR/Ball), el sucesor del *Hubble*

**Agradecimientos.** El telescopio espacial *Hubble* (HST) es un proyecto conjunto entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la ESA (Agencia Europea del Espacio). El telescopio espacial *James Webb* (JWST) es un proyecto conjunto entre la NASA, la ESA, y la Agencia Canadiense del Espacio (CSA). Agradezco a mis compañeros del *Space Telescope Science Institute*, M. Livio, D. Macchietto, J. Maíz, y N. Panagia, por haberme facilitado parte de la información que aparece en este artículo.

## Referencias

- [1] BAHCALL, J.N., GUHATHAKURTA, P., SCHNEIDER, D.P. 1990, 'What the longest exposures from the Hubble Space Telescope will reveal', *Science*, **248**, 178.
- [2] CHAMBORNEAU, D., BROWN, T.M., NOYES, R.W., AND R.L. GILLILAND 2002, 'Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere', *Astrophys. J.* **568**, 377
- [3] FERGUSON, H.C., DICKINSON, M., WILLIAMS, R. 2000, "The Hubble Deep Fields", in *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **38**, 667.
- [4] FREEDMAN, W.L. et al. 2001, 'Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant', *Astrophys. J.* **553**, 47.
- [5] GILLILAND, R.L., NUGENT, P.E., PHILLIPS, M.M. 1999, 'High-Redshift Supernovae in the Hubble Deep Field', *Astrophys. J.* **521**, 30.
- [6] LIVIO, M. 2003, "The World According to the Hubble Space Telescope", *Astro-ph/0303500*
- [7] LIVIO, M., NOLL, K., STIAVELLI, M. (Eds.) 2002 "A Decade of Hubble Space Telescope Science", Cambridge University Press.
- [8] MACCHETTO, F.D. 2002, "Supermassive Black Holes", en "A Decade of Hubble Space Telescope Science", Cambridge University Press (Eds. M. Livio, K. Noll, M. Stiavelli), p. 198.
- [9] PANAGIA, N. 2002, "The Hubble Space Telescope at the beginning of a New Millennium", 2001 Frascati Workshop "Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources" (Eds. F. Giovannelli & L. Sabau-Graziati), *Men. S.A.I.*, 73-4.
- [10] SPERGEL, D.N., VERDE, L., PEIRIS, H.V. et al. 2003, *Astrophys. J.* (in press) *Astro-ph/0302209*
- [11] TAMMANN, G.A., SANDAGE, A., SAHA, A. 2002, "Ho from Type Ia Supernovae", en "A Decade of Hubble Space Telescope Science", Cambridge University Press (Eds. M. Livio, K. Noll, M. Stiavelli), p. 222.

**Santiago Arribas**

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), y División de Operaciones del Telescopio Espacial de la Agencia Europea del Espacio (ESA). Miembro del Personal Científico del Space Telescope Inst. (STSCI). Baltimore. EE.UU.