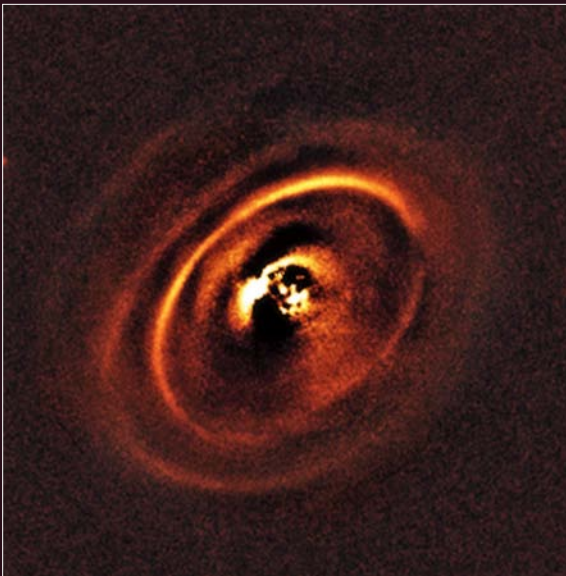
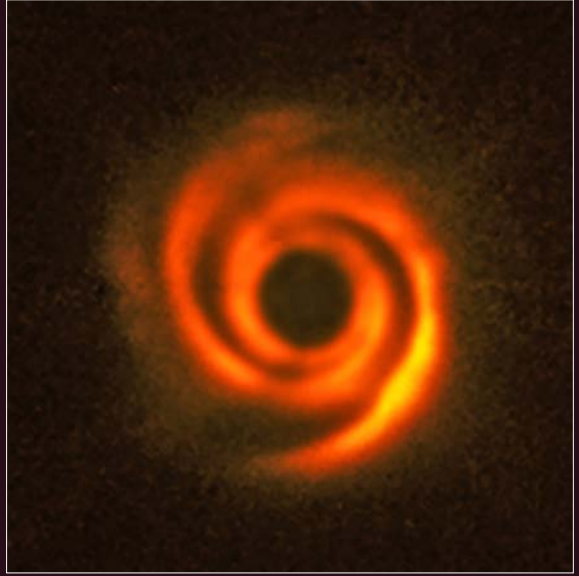
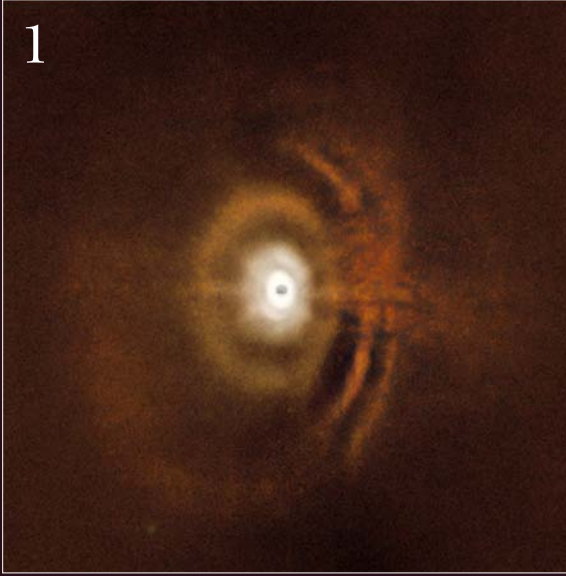


1



Tres discos protoplanetarios observados con el instrumento SPHERE. [ESO/basado en imágenes publicadas por T. Stolker, J. de Boer y C. Ginski en *Astronomy & Astrophysics*]

# DISCOS PROTOPLANETARIOS: FÁBRICAS DE PLANETAS EN ACCIÓN

HÉCTOR CÁNOVAS



Artículo exclusivo  
colaboración de la  
Sociedad Española  
de Astronomía

---

Pocas áreas de la astrofísica han progresado tanto en tan poco tiempo como sucede con la investigación sobre discos protoplanetarios. En unos pocos años hemos pasado de apenas intuir la presencia de estos discos, utilizando solo medidas indirectas, a obtener fotografías (sí, imágenes reales) que revelan brazos espirales, cavidades, anillos múltiples, y otras muchas complejas y variadas estructuras. Es posible que estas estructuras sean creadas por planetas gigantes recién formados en el interior de esos discos, pero mejor vayamos por partes.

## 2



Las estrellas nacen en gigantes- cas nubes del medio interestelar compuestas por gas y diminutas partículas de polvo (granos con un tamaño de la milésima parte de un milímetro, aproximadamente). En estas nubes, denominadas regiones de formación estelar, se generan grumos de materia que eventualmente formarán protoestrellas (estrellas muy jóvenes): los discos protoplanetarios son una consecuencia natural de este proceso; más concretamente, son el resultado de la conservación del momento angular, una cantidad física que aparece siempre que haya cuerpos rotando en torno a un centro de movimiento (en este caso, la protoestrella).

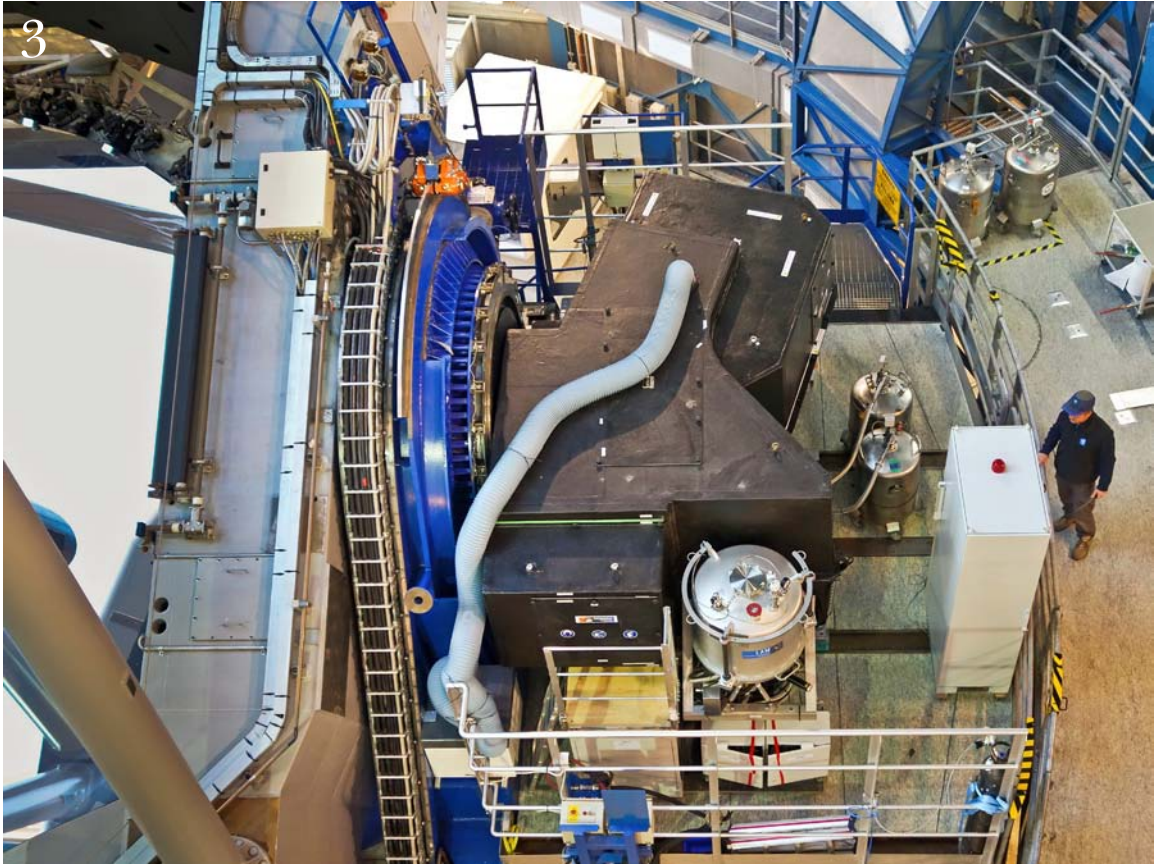
El gas y el polvo que rodean a la joven estrella empiezan a describir órbitas en torno a esta, para terminar generando una estructura con forma discoidal (circular y relativamente plana) con la protoestrella en su centro. En poco menos de diez millones de años la mayor parte del material que forma este dis-

co será absorbido y/o evaporado por la protoestrella, pero también es posible que en ciertas regiones interiores se den las condiciones ideales para que los granos de polvo se aglomeren y crezcan dando lugar a diferentes tipos de planetas. Un escenario similar fue originalmente planteado por Kant en 1755 (*Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*; Historia Natural Universal y Teoría de los cielos), pero solo recientemente hemos podido observar directamente y con gran detalle varios de estos discos o fábricas planetarias (Figura 1).

Para lograr imágenes como las mostradas en la Figura 1 es necesario combinar simultáneamente una gran sensibilidad con una altísima resolución espacial, y esto no es tarea sencilla. Por un lado, la alta sensibilidad es necesaria porque la luz que emiten los discos protoplanetarios es muy débil; por otro lado, necesitamos de la alta resolución espacial porque, debido a las grandes distancias que

nos separan, los discos ocupan un tamaño minúsculo en el cielo. En el óptico y el infrarrojo cercano podemos alcanzar altas resoluciones espaciales (o lo que es lo mismo, obtener imágenes con mucho detalle) observando con telescopios muy grandes, como los cuatro *Very Large Telescopes* (VLT) que el Observatorio Europeo Austral (ESO) ha construido en el desierto de Atacama (Chile), y cuyos espejos primarios miden 8,2 metros de diámetro (Figura 2).

Este tipo de observaciones se enfrentan a un serio problema: la estrella central es muchísimo más brillante que el disco que la rodea. Suprimir la luz estelar para extraer la luz reflejada por el disco es muy complicado y requiere avanzados sistemas ópticos y herramientas de análisis de imagen muy especializadas. Un ejemplo de esto es el instrumento SPHERE en los VLT (Figura 3), construido por un consorcio que involucra a investigadores e ingenieros de Francia, Alemania, Italia, Suiza y Holanda.



**FIGURA 2.** Los cuatro telescopios VLT de 8,2 metros de diámetro del Observatorio de Cerro Paranal (Chile). (ESO)

**FIGURA 3.** Imagen del instrumento SPHERE en uno de los focos Nasmyth del telescopio UT3 del VLT. A la izquierda puede apreciarse parte del espejo primario. (ESO/J. Girard)

Aprovechando que la luz central de la estrella se polariza al ser reflejada en la superficie de los discos, SPHERE es capaz de filtrar la brillante luz estelar y obtener imágenes nítidas del polvo que levita en la superficie de los discos protoplanetarios. Observaciones con este y otros instrumentos similares han revelado detalles sorprendentes e insospechados sobre la estructura de los discos. Ahora bien, es-

te tipo de observaciones son incapaces de penetrar en las capas más frías e interiores de los discos protoplanetarios, lo que en nuestra jerga se conoce como el plano central del disco. Estudiar estas regiones es fundamental para entender la formación planetaria, pues las zonas interiores de los discos están protegidas de la fuerte radiación estelar, y por ello son más densas y frías que las capas más exteriores. Debido a esta particularidad, es en estas regiones donde los granos de polvo pueden aglomerarse y crear partículas de mayor tamaño. Este podría ser el primer paso en el camino de la formación planetaria, y es por ello que el estudio de cómo los granos de polvo comienzan a aumentar de

tamaño es una de las áreas de investigación más activas actualmente.

Con el fin de analizar minuciosamente las regiones internas de los discos protoplanetarios es necesario utilizar un tipo de telescopios e instrumentos que sean sensibles a la luz emitida por cuerpos muy fríos (las zonas interiores de los discos están a unos 20 Kelvin aproximadamente, o lo que es lo mismo, a unos -250 grados Celsius). Esta luz tiene una frecuencia relativamente baja y su longitud de onda característica cae en el denominado rango submilimétrico. Debido a las propiedades de las ondas electromagnéticas, los detectores que funcionan en el óptico o infrarrojo cercano son



incapaces de detectar esta radiación, y es por esto que los telescopios que observan en el rango submilimétrico son totalmente diferentes a los que observan en longitudes de onda más cortas. Para detectar esta radiación fría es necesario utilizar grandes antenas parabólicas como el telescopio de 30 metros IRAM en Granada (Figura 4).

Observaciones de este tipo tienen una gran ventaja sobre las realizadas en el óptico/infrarrojo cuando estudiamos discos protoplanetarios: la mayor parte de la luz emitida por las estrellas cae en el rango óptico e infrarrojo cercano, mientras que la radiación estelar en el rango submilimétrico es bajísima. Dicho de otro modo, cuando observamos discos protoplanetarios en el rango submilimétrico no tenemos que preocuparnos por la luz de la estrella, pues esta es tan débil que es prácticamente invisible y es posible extraer de forma relativamente sencilla la luz fría emitida por el disco. Ahora bien, no todo son

ventajas. Observar en longitudes de onda largas conlleva un problema técnico muy importante: el denominado *límite de difracción*. Imaginemos que fuera posible utilizar el mismo telescopio para observar en todas las longitudes de onda desde el visible hasta el submilimétrico, pasando por el infrarrojo cercano, medio y lejano. Comprobaríamos que al observar a longitudes de onda cada vez más largas nuestras imágenes pierden nitidez y se emborronan cada vez más, como si nuestro telescopio sufriera una especie de miopía. Esto es debido a una propiedad intrínseca de los sistemas ópticos, y la única manera de solucionarlo es construir telescopios (o antenas) cada vez más grandes. Así, para observar en el submilimétrico con una resolución comparable a la resolución obtenida por los telescopios VLT en el óptico necesitaríamos una antena de unos 18 kilómetros de diámetro. Una antena semejante es prácticamente imposible de construir, pero por suerte

es posible utilizar una técnica alternativa: la *interferometría*.

Sin entrar mucho en detalle, utilizando esta técnica es posible combinar las observaciones de varias antenas separadas entre sí para obtener una especie de antena equivalente, cuyo diámetro se corresponde con la separación máxima entre antenas. Este es el principio en el que se basa el observatorio ALMA (*Atacama Large Millimeter and submillimeter Array*), que una vez finalizado –aún está en fase de desarrollo–, constará de un total de sesenta y seis antenas de 12 metros de diámetro cada una. Las antenas de ALMA pueden moverse adoptando diferentes configuraciones, lo que permite ajustar la sensibilidad y resolución espacial de sus observaciones (Figura 5).

Gracias a estos impresionantes avances, hoy día es posible observar los discos protoplanetarios con un altísimo nivel de detalle. Además, combinando diferentes tipos de observaciones podemos entender la estructura tridimensional de los discos protoplanetarios.

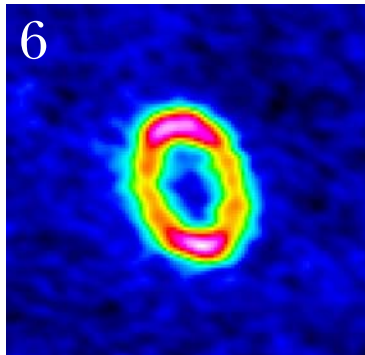
Una consecuencia importante de estas primeras imágenes es la confirmación de la existencia de grandes cavidades o agujeros en el interior de algunos discos. En 1989, y utilizando métodos indirectos de observación, se acuñó el término «discos de transición» para definir una clase de discos que parecían albergar grandes cavidades vacías de polvo en su interior [1]. Tal denominación hace referencia a la posibilidad de que estos discos representan un estadio intermedio de su evolución, estando en la fase de transición entre un disco jo-



**FIGURA 4.** Imagen del radiotelescopio IRAM (30 metros de diámetro), en Pico Veleta (Sierra Nevada, Granada). [Cortesía del autor]

**FIGURA 5.** Panorámica de varias antenas de ALMA bajo el cielo de Chajnantor (Chile). (Carlos Padilla -AUI/NRAO-)

**FIGURA 6.** Imagen del disco anular Sz 91. La estrella, en el centro, es invisible en la imagen de ALMA. [ALMA/Cánovas *et al.* 2016]



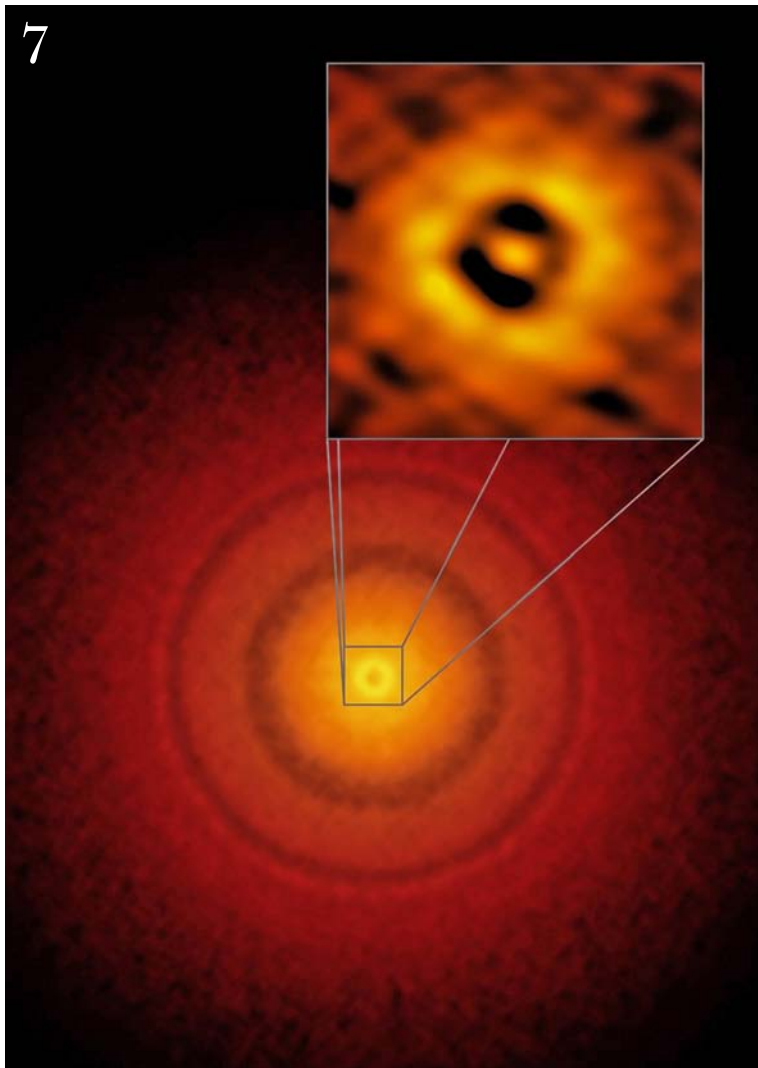
ven y con gran contenido en gas y polvo y un disco ya casi vacío de material. Aunque actualmente esta hipótesis es motivo de debate, es indiscutible que los discos con grandes cavidades son una realidad. Un ejemplo de estos objetos es el disco en torno a la joven estrella Sz 91 (Figura 6). Observaciones realizadas con ALMA en 2015 mostraron que el agujero interior de Sz 91, donde casi no hay partículas de polvo, tiene un tamaño aproximado de casi 100 unidades astronómicas de radio [2], es decir, prácticamente todo nuestro Sistema Solar podría caber dentro

de dicha cavidad. Es destacable además que los granos de polvo de tamaño milimétrico (aque- llos que son observables con ALMA) estén distribuidos en una región relativamente estrecha en forma de anillo. Esta particularidad ha sido observada hasta ahora en unos pocos discos, y no es descabellado imaginar que la alta concentración de partículas de polvo facilite la creación de partículas aún más grandes, quizás pavimentando el camino a la formación de embriones planetarios.

Otro resultado impactante ha sido el descubrimiento de lo

que parecen ser estructuras en forma de anillos oscuros a lo largo de algunos discos. Gracias a la creciente capacidad de resolución de ALMA (que aún no ha alcanzado su etapa final, como hemos dicho), unos pocos discos protoplanetarios han podido ser observados con ALMA operando al máximo de su resolución. Estas observaciones muestran anillos oscuros que parecen estar vacíos de granos de polvo. Un claro ejemplo de esto son las múltiples estructuras observadas en el disco de la estrella TW Hya que, a unos 50 pársec de distancia (aproximadamente 160 años luz), es uno de los discos protoplanetarios más estudiados hasta la fecha (Figura 7).

En el espectacular caso de TW Hya, las observaciones de ALMA muestran también una cavidad interna de unas pocas unidades astronómicas que parece estar conectada con el disco exterior por medio de dos filamentos de material [3]. Hasta que ALMA no pueda operar al más alto nivel de manera rutinaria, no podre-



**FIGURA 7.** Imagen de TW Hya obtenida con ALMA. Se observa una cavidad interior de unas pocas unidades astronómicas, y dos anillos oscuros. (S. Andrews/ESO)

mos saber si este tipo de estructuras anulares representan un fenómeno relativamente común a lo largo de la vida de los discos protoplanetarios o se trata de una interesante excepción.

Actualmente conocemos unos pocos mecanismos que pueden explicar la presencia de las cavidades y/o anillos en los discos. Por ejemplo, es posible que la radiación emitida por la estrella central sea capaz de evaporar las capas internas de los discos para crear pequeños agujeros (cavidades de unas pocas unidades

astronómicas de radio). Sin embargo, este mecanismo, denominado «fotoevaporación», es incapaz de explicar las gigantescas cavidades observadas en algunos discos, y mucho menos de explicar la presencia de anillos vacíos de polvo. Una de las explicaciones más prometedoras (y quizás por ello, una de las más empleadas) es la presencia de planetas gigantes (más grandes que Júpiter) orbitando en el interior de los discos.

Según las predicciones elaboradas con simulaciones por or-

denador, las complejas interacciones entre el planeta (o planetas) gigante recién formado en el disco y el material que lo rodea podrían vaciar de material el interior del disco. Así, mientras el planeta gigante se desarrolla –y simplificando muchísimo el escenario predicho por los modelos–, la interacción planeta-disco podría crear primero un anillo vacío de material a lo largo de la órbita del planeta (como los observados en TW Hya). Estos anillos irían eventualmente aumentando de tamaño para terminar creando cavidades gigantes y libres de polvo. Mientras esto sucede, el material más alejado del disco podría ir acercándose a la estrella central pero, al sentir la perturbación generada por el planeta, las partículas de polvo más grandes dejarían de caer hacia la estrella para en su lugar acumularse en el borde de la cavidad, generando grandes cavidades como la observada en Sz 91.

Si bien el escenario planetario constituye una hipótesis plausible y ciertamente tentadora, lo cierto es que a día de hoy no existe una confirmación indiscutible de este, es decir, todavía no se ha podido observar un planeta gigante (cuya naturaleza planetaria sea aceptada por toda la comunidad científica) orbitando en el interior de la cavidad de un disco. Sin embargo, la falta de detecciones no significa necesariamente que

las complejas estructuras observadas en los discos protoplanetarios no sean debidas a la presencia de uno o varios planetas. Aunque la evolución de los discos protoplanetarios esté posiblemente marcada por variados y diferentes mecanismos, los más de tres mil exoplanetas detectados hasta la fecha [4] sugieren que muchos –al menos el 50 %– de los discos protoplanetarios son capaces de formar planetas.

Es de esperar que en los próximos años telescopios gigantes como el E-ELT (*European Extremely Large Telescope*) con sus 39 metros de diámetro de espejo primario sean capaces de detectar la tenue luz emitida por un planeta recién nacido. Confirmar directamente y de mane-

ra fidedigna este escenario propuesto por los modelos teóricos es sin duda uno de los grandes objetivos de la investigación en este área, y supondría un paso de gigante para entender cómo se formó nuestro propio Sistema Solar. Mientras tanto, confío plenamente en que los avances en instrumentación y análisis de imagen sigan brindándonos imágenes espectaculares de lo que quizás sean los incipientes primeros pasos de varios (y diferentes) sistemas solares en formación. (A)

#### Referencias

[1] Strom *et al.* 1989, «Circumstellar material associated with solar-type pre-main-sequence stars - A possible constraint on the timescale for planet

building», *The Astronomical Journal*, 97, 1451.

[2] Cánovas *et al.* 2016, «A ring-like concentration of mm-sized particles in Sz 91», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, 458, L29.

[3] Andrews *et al.* 2016, «Ringed substructure and a gap at 1 au in the nearest protoplanetary disk», *The Astrophysical Journal Letters*, 820, L40.

[4] [www.exoplanets.eu](http://www.exoplanets.eu)

#### Héctor Cánovas

es investigador asociado (Research Fellow) en el centro que la Agencia Espacial Europea tiene en Madrid (ESA/ESAC).



**ASTROÁNDALUS**

UN VIAJE AL COSMOS

AGENCIA de VIAJES ESPECIALIZADA  
en turismo ASTRONÓMICO

f t i y 500

[www.astroandalus.com](http://www.astroandalus.com)  
T. 953 150 050 | C. [info@astroandalus.com](mailto:info@astroandalus.com)