

LA BÚSQUEDA DE VIDA EN EL UNIVERSO Y EL OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS

JAVIER MÉNDEZ ÁLVAREZ¹

Resumen

La carrera por descubrir alguna forma de vida fuera de la Tierra ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años. Aunque recientemente, el Observatorio del Roque de Los Muchachos también se ha incorporado a esta importante competición. En el presente artículo se ofrece una visión general del estado actual de la búsqueda de vida así como de los trabajos pasados, presentes y futuros que en este sentido se realizan en el Observatorio del Roque de Los Muchachos. También es un resumen de los temas expuestos y debatidos en las diferentes actividades que con motivo de la celebración de la Semana Europea de la Ciencia y la Tecnología se organizaron en Santa Cruz de La Palma, Los Llanos de Aridane y Santo Domingo de Garafía del 8 al 14 de noviembre de 2004.

Palabras claves: Observatorio del Roque de Los Muchachos, búsqueda de vida, planetas extrasolares, exoplanetas, astronomía, astrofísica.

Title: The search for life in the Universe and the Roque de Los Muchachos Observatory.

Abstract

Important progress on discovering any form of life outside the Earth has been made in recent years, and the Roque de los Muchachos Observatory has joined this important venture. The present article gives a general account of the current status of the search for life and the past, present and future studies carried out at the Roque de Los Muchachos Observatory. It is also a summary of the talks and discussions held during the European Science and Technology Week, which took place in Santa Cruz de La Palma, Los Llanos de Aridane and Santo Domingo de Garafía from 8th to 14th November 2004.

Keywords: Roque de Los Muchachos Observatory, search for life, extrasolar planets, exoplanets, astronomy, astrophysics.

¹ Isaac Newton Group of Telescopes (ING); Apartado de correos 321; E-38700 Santa Cruz de La Palma; Islas Canarias; Spain. Dirección de correo electrónico del autor: jma@ing.iac.es. Artículo preparado el 30 de noviembre de 2004 y revisado el 27 de julio de 2005.

1. Introducción

La búsqueda de vida fuera del planeta Tierra es uno de los campos más activos de la astrofísica actual. El 1 de julio de 2005 la revista *Science* publicó, de una lista de 125 temas, los 25 más importantes para la ciencia. Entre ellos se encontraban de directamente relacionados con la astrofísica, y uno de ellos era la búsqueda de vida extraterrestre.

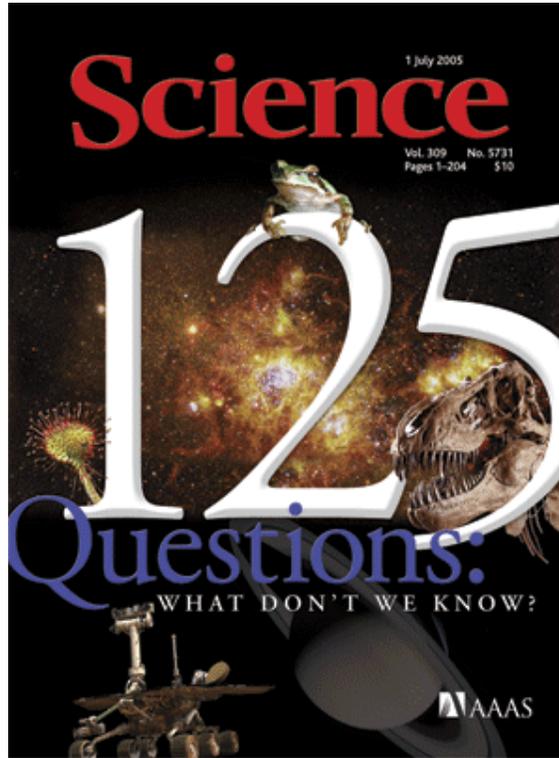


Figura 1. Portada de la revista *Science* el 1 de julio de 2005.

Pero, ¿realmente hay alguien ahí fuera? Antes de comenzar la búsqueda, se deben plantear los principios teóricos en los que se basa. En 1961 Frank Drake, el investigador que inició la búsqueda científica de seres inteligentes extraterrestres, desarrolló una simple ecuación para justificar la existencia de otras civilizaciones en nuestra galaxia capaces de comunicarse con nosotros:

$$N = R_s \times f_s \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$$

Donde:

- N es el número de civilizaciones inteligentes capaces de comunicarse en nuestra galaxia.
- R_s es la tasa actual de formación estelar en nuestra galaxia (número de estrellas por año).

- f_s es la fracción de estrellas que podrían desarrollar sistemas planetarios con buenas condiciones, es decir, pueden tener Zonas Continuamente Habitables (ZCH)². Estas estrellas reúnen las siguientes características: 1) son de tipo solar, es decir, ni frías, ni masivas, o de tipos espectrales F, G y K; 2) no muestran variabilidad de brillo; 3) poseen suficiente metalicidad³.
- f_p es la fracción de estrellas apropiadas (las que cumplen las condiciones anteriores) que desarrollan de hecho sistemas planetarios.
- n_e es el número de planetas de tipo terrestre en la ZCH.
- f_e es la fracción de planetas de tipo terrestre donde se origina la vida tal y como la conocemos, es decir, basada en el oxígeno, el carbono, la luz y el agua líquida.
- f_i es la fracción de formas de vida que evoluciona hacia algún tipo de inteligencia avanzada.
- f_c es la fracción de civilizaciones que han aprendido a comunicarse con nosotros y desean hacerlo.
- L es la duración en años de las civilizaciones que aprenden a comunicarse con nosotros antes de desaparecer (por causas naturales o por autodestrucción).

Como ejemplo, aplicándolo al Sistema Solar y a la humanidad, obtendríamos $f_e=2/3$ (si suponemos que hubo vida en Marte en el pasado y que $n_e=3$ contando con la Tierra, Marte y Venus y considerando una extensa y optimista zona de habitabilidad) y $f_i=1/2$. Usando valores razonables para los demás términos se obtiene una estimación del número total de civilizaciones inteligentes en nuestra galaxia que varía entre algunos millones y uno (nosotros). Si no consideráramos nuestro caso particular pero sí la vida como la conocemos en la Tierra (por supuesto, es muy peligroso extraer conclusiones generales con un solo ejemplo pero es la única solución que se posee) entonces N seguiría teniendo un valor no nulo y tendríamos justificada el inicio de la búsqueda de la vida fuera de nuestro Sistema Solar.

Podría ser que la vida, sin embargo, fuera un fenómeno muy extendido por la galaxia como propuso a principios del siglo XX el premio Nóbel de química Svante Arrhenius cuando elaboró la teoría de la panespermia, según la cual existen mecanismos que transportan la vida de un cuerpo

² Alrededor de las estrellas se define una zona donde es posible que la vida pueda aparecer y desarrollarse de una manera más o menos estable, es decir, que el planeta que la habite pueda disfrutar de temperaturas moderadas en su superficie durante 3 ó 4 mil millones de años. Esta zona es muy pequeña. Se le denomina "Zona Continuamente Habitable". A partir de simulaciones de un planeta como la Tierra girando en torno a una estrella de la Secuencia Principal se obtiene el siguiente radio interno para la ZCH: $r_{interior}=0,958(M/M_{solar})^{2,61}$ UA (1 UA=149.597.892 kilómetros). Para radios menores hace demasiado calor en los océanos o bien se puede generar un efecto invernadero como consecuencia del incremento de la luminosidad de la estrella. Para los mismos parámetros que antes, el radio externo de la ZCH es $r_{externo}=1,004(M/M_{solar})^{2,87}$ UA. Para radios superiores la glaciación impide el desarrollo de la vida a partir de los 2.500 millones de años. Para radios sensiblemente superiores la glaciación comienza a partir de los 3.500 millones de años. Para estrellas más masivas que 1,1 masas solares la estrella emite una gran cantidad de radiación ultravioleta que impide el desarrollo de la vida. Estrellas más masivas que 1,2 masas solares evolucionan más rápido de tal manera que no hay manera de que la vida se desarrolle (para ello se necesita 4.500 millones de años mientras que ya a los 400 millones de años el planeta habría aumentado demasiado su temperatura).

³ En la terminología astronómica, un metal es cualquier elemento más pesado que el hidrógeno o el helio. La abundancia de dichos elementos pesados en los objetos celestes se denomina metalicidad.

celeste a otro. Los cometas son unos buenos candidatos al papel de medio de transporte de la vida; hay pocas dudas de que aportaron gran cantidad de moléculas orgánicas y agua durante la fase del gran bombardeo (ver apartado 2 más abajo).

Podría ser que la respuesta a la pregunta de si hay alguien ahí sea simplemente: no. El físico italiano Enrico Fermi replanteó la cuestión de la siguiente manera: si hay alguien ahí, ¿por qué no han venido todavía? Este interrogante se basa en el siguiente razonamiento: en el Universo hay muchas estrellas miles de millones de veces más viejas que el Sol. Si en alguna de ellas hubiera aparecido la vida inteligente hace millones de años, habría avanzado lo suficiente para colonizar la galaxia y deberíamos haber establecido ya el contacto. Algunas respuestas lógicas podrían ser:

- No existe más vida que en la Tierra. Esto, sin embargo, viola el principio de mediocridad por el cual lo que ocurre en la Tierra no se sale de lo común.
- Los humanos somos los primeros seres inteligentes de la galaxia, alguna civilización tiene que ser la primera. Esto resulta bastante extraño.
- Quizás existe un procedimiento para realizar los contactos entre las civilizaciones: hasta que no se alcance un umbral de desarrollo no se realiza el contacto.
- Las civilizaciones tienden a autodestruirse y no contactan con otras civilizaciones antes de desaparecer.
- Las distancias entre estrellas son enormes y la velocidad de la luz constante y tecnológicamente difícil de alcanzar (la energía requerida para viajar a una fracción considerable de la velocidad de la luz es inmensa). Además, por relatividad sabemos que un viajero navegando a cierta fracción de la velocidad de la luz envejece más despacio que sus congéneres, y podría encontrarse con la sorpresa de que al volver su civilización haya desaparecido por fenómeno natural o autodestrucción.

Esta última respuesta parece ser la más plausible.

La ecuación de Drake de izquierda a derecha puede ser interpretada de la siguiente manera: hasta el término f_e inclusive son términos “observables”, es decir, podemos determinar su valor a partir de la búsqueda observacional de la vida. Los cuatro últimos términos, incluido de nuevo f_e , son dominio sin embargo de la astrobiología⁴.

La búsqueda observacional de la vida fuera del Sistema Solar puede ser pasiva o activa. La búsqueda pasiva se basa en escuchar las señales emitidas hipotéticamente por las civilizaciones que intentan ponerse en contacto con nosotros. Principalmente esta escucha se efectúa en las ventanas

⁴ La astrobiología es la ciencia que estudia la posibilidad de vida en otro lugar del Universo distinto de la Tierra. Trata ramas de la biología como, por ejemplo, la microbiología, la bioquímica y la ecología, además de la astronomía. En sus estudios deben tenerse en cuenta hipótesis sobre las condiciones probables requeridas para el origen y desarrollo de la vida, y sobre los medios de detectar dicha vida. En 2003 se inauguró en Madrid el Centro de Astrobiología (<http://www.cab.inta.es/>), una entidad puntera en este campo.

atmosféricas del radio y más recientemente en el óptico⁵. Hasta la fecha todos los programas han dado un resultado negativo.

La búsqueda activa consiste, o bien, en enviar señales de nuestra vida, o bien, en buscar esas señales fuera. Son ejemplos del primer caso el envío de mensajes a bordo de sondas espaciales y emisión de señales en radio y óptico. El segundo caso implica utilizar los medios existentes junto a técnicas y estrategias de observación para ir progresivamente revelando el valor de los términos de la ecuación de Drake de izquierda a derecha. Volveremos sobre esto en el apartado 3.

2. Astrobiología

Como sucede con todas las nuevas ideas científicas, la astrobiología empezó siendo considerada un tema marginal. Actualmente, sin embargo, la Unión Astronómica Internacional reconoce su importancia y ha organizado una comisión de expertos que debaten periódicamente sobre este campo.

2.1. El origen de los constituyentes básicos de la vida

Nuestra forma de vida está basada principalmente en el hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, y otros elementos pesados. Parece paradójico que la vida se fundamente en elementos tan poco abundantes en el Universo, pero lo cierto es que quizás sea ésa la razón por la cual una forma de vida como la nuestra no es tan frecuente.

El Universo se originó en un Big Bang (Gran Explosión) hace aproximadamente 15 mil millones de años. Toda la energía existente estaba concentrada en un punto más pequeño que un átomo. Las teorías cuánticas más en boga proponen que en las condiciones de elevadísima densidad de energía que imperaron en el Universo primitivo es muy probable que las cuatro fuerzas fundamentales: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil, estuvieran unificadas en una sola (teoría de la superunificación). En el instante 10^{-35} segundos la gravedad se desliga. Es la época de la superfuerza, fruto de la unificación de la fuerza electrodébil y nuclear fuerte. Cuando a temperaturas menores se produce la ruptura de la superfuerza, hay dos consecuencias importantes: por un lado, aparece un pequeño desequilibrio entre la cantidad de materia y antimateria que podría explicar que el Universo actual esté formado por materia; y en segundo lugar, se produce un recalentamiento que provoca una expansión exponencial del Universo en un intervalo de tiempo muy corto (la denominada *inflación*) que explicaría que el Universo es homogéneo. A 10^{-12}

⁵ Una ventana atmosférica es un rango de longitudes de onda a las cuales la atmósfera terrestre es relativamente transparente, de manera que puedan realizarse observaciones astronómicas a esa longitud de onda desde la superficie terrestre. Las mayores ventanas se encuentran en las regiones óptica, infrarroja y radio del espectro electromagnético. La ventana de la región óptica va desde 0,3 micrones hasta 0,9 micrones. Existen varias ventanas infrarrojas en varios rangos de longitud de onda entre 1,25 y 30 micrones, y más allá de 300 micrones. La ventana de radio se extiende en longitudes de onda desde más o menos 1 centímetro hasta 30 metros.

segundos se produce la ruptura de la fuerza electrodébil. Los fotones originan pares partícula-antipartícula que se aniquilan.

Unas milésimas de segundo después del Big Bang el campo de fotones deja de originar los pares partícula-antipartícula de protones y neutrones. En ese momento, los pares existentes se aniquilan y sólo quedan los protones y neutrones en exceso.

A medida que el Universo se expande, se va reduciendo la temperatura y la densidad. Un segundo después del Big Bang los neutrinos comienzan a comportarse como partículas libres con pocas colisiones. A unos dos segundos los fotones dejan de crear pares pares partícula-antipartícula de electrones y estos se aniquilan con sus antipartículas generando una gran cantidad de fotones. Ahora la contribución a la energía del Universo proviene, no ya de la agitación térmica de las partículas elementales, sino del campo de radiación constituido por fotones, por lo que a esta época se la denomina *era de la radiación*. En esta era, aparte de neutrinos y fotones, hay unos pocos electrones, neutrones y protones (un protón por cada 1.000 millones de fotones). Con estas partículas se formarán más tarde las estrellas, las galaxias, los planetas y los seres vivos.

Los núcleos atómicos están hechos de neutrones y protones. A los cien segundos del Big Bang los agregados de protones y neutrones fueron capaces de sobrevivir a los impactos de los fotones y constituir los primeros núcleos atómicos de la historia del Universo. El núcleo más sencillo es el de deuterio, formado por la fusión nuclear de un protón y un neutrón. Este proceso recibe el nombre de *nucleosíntesis primordial*. Grandes cantidades de neutrinos primordiales deben poblar el cosmos incluso en la actualidad, como vestigios de esta época remota, pero su detección es prácticamente imposible con los medios actuales.

A partir de núcleos de deuterio que colisionan con sus semejantes o con protones libres se producen núcleos de tritio (formados por un protón y dos neutrones) y de helio ligero (dos protones y un neutrón). Tanto el tritio como el helio ligero pueden engullir partículas adicionales y acabar formando helio normal (dos protones y dos neutrones). Cabe la posibilidad de que se formen núcleos atómicos más pesados, pero resultan inestables, por lo que la nucleosíntesis primordial sólo dio lugar a la formación de helio en cantidades apreciables, junto a trazas de berilio (cuatro protones y tres neutrones), de litio (tres protones y cuatro o tres neutrones) y de boro (5 protones y 5 neutrones). La nucleosíntesis primordial tocó a su fin cuando la temperatura del Universo descendió hasta hacer que las colisiones entre partículas elementales y núcleos más pesados ya no fueran lo bastante energéticas y la repulsión electrostática impidiera más fusiones nucleares. Los cálculos indican que esta temperatura se alcanzó cuando la edad del Universo era de quince minutos.

Tras el final de la nucleosíntesis primordial, el Universo consistía en una mezcla de neutrinos, fotones y electrones, y núcleos atómicos ligeros (sobre todo de hidrógeno, cuyo núcleo es un protón). La temperatura era tan elevada que los fotones eran capaces de mantener a los electrones separados de los núcleos. Tan pronto un electrón era capturado por un núcleo para formar

un átomo, la radiación lo arrancaba de su órbita. Cuando el Universo tenía una edad de alrededor de 300.000 años, la temperatura descendió por debajo de los 4.000 K y, entonces, el campo de radiación ya no pudo impedir la captura de electrones por los núcleos, y por lo tanto, la formación de átomos completos. Tras este proceso, la llamada *recombinación*, el campo de radiación dejó de interactuar con la materia o, dicho en otras palabras, el Universo se volvió transparente a la luz. La radiación que inundaba el cosmos en esa época ha seguido surcando el espacio y en la actualidad se detecta como un fondo continuo y muy uniforme que proviene de todas las direcciones. El espectro original de esta radiación es el de un cuerpo negro⁶ a 4.000 K de temperatura, con el máximo de emisión en el infrarrojo. Pero debido al desplazamiento al rojo⁷ cosmológico en la actualidad esta radiación presenta su máximo en la banda de microondas de radio y su espectro corresponde al de un cuerpo negro a una temperatura de 2,74 K.

Pasados unos 2 millones de años desde el Big Bang, el desplazamiento al rojo de la radiación de fondo favoreció que la densidad de energía en el Universo proviniera sobre todo de la contribución de las partículas materiales, más que de los fotones. Desde entonces nos hallamos en la *era de la materia*. Esta era se caracteriza por la condensación de las partículas materiales en galaxias, en el seno de las cuales se formaron estrellas y planetas.

La nucleosíntesis ha continuado desde entonces en el seno de las estrellas a lo largo de su vida de forma estable o de forma explosiva. Primero el hidrógeno es convertido en helio por la reacción protón-protón o por el ciclo de carbono-nitrógeno. Cuando la fase de hidrógeno a helio cesa, comienza el proceso triple alfa. Son sintetizados entonces elementos más pesados hasta el hierro, a partir de los productos de la reacción previa.

Si la vida de la estrella termina de forma explosiva como supernova, se forman los núcleos más pesados posibles y, junto a los menos pesados, son eyectados al espacio interestelar. Las nuevas generaciones de estrellas se forman a partir de este material, razón por la cual su contenido en elementos pesados es mayor (mayor metalicidad) que las más viejas.

⁶ Todos los objetos emiten radiación térmica (fotones) por el simple hecho de tener una temperatura. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación exterior y emite toda la radiación interior (equilibrio de radiación).

⁷ El corrimiento o desplazamiento al rojo en el espectro electromagnético de los fotones emitidos por un objeto extragaláctico está causado por la expansión del Universo: la longitud de onda de la luz aumenta su longitud debido a la expansión del espacio entre la fuente y el observador, originando un enrojecimiento de la luz. El desplazamiento al rojo es realmente cosmológico sólo si la fuente se encuentra lo suficientemente lejos de irregularidades cinemáticas locales.

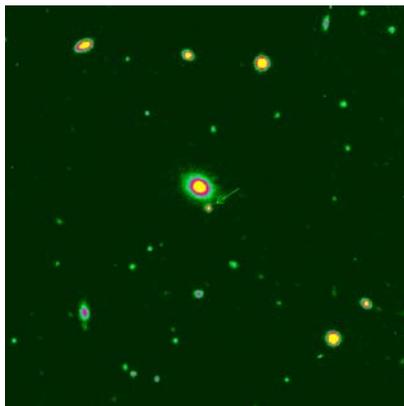


Figura 2. Explosión de una supernova (señalada por una flecha en el centro de la imagen) en una galaxia lejana. Durante la explosión se sintetizan la mayoría de los elementos pesados que encontramos en los organismos vivos. La energía liberada en una explosión de supernova es tal que rivaliza con el brillo de toda la galaxia en la que se encuentra. Esta imagen fue obtenida por el telescopio Isaac Newton del Observatorio del Roque de Los Muchachos. Fuente: Javier Méndez.

Entre 1937 y 1941 los astrónomos descubrieron una serie de líneas en el espectro de estrellas levemente enrojecidas que asignaron correctamente a las transiciones electrónicas de CH, CH⁺ y CN. Concluyeron que se trataba de especies moleculares presentes en el medio difuso interestelar. La presencia de moléculas en el espacio era ya conocida pero sólo se habían detectado en las atmósferas de estrellas frías en las últimas etapas de su evolución. El descubrimiento de moléculas en el medio interestelar abrió una línea de investigación en astrofísica que 60 años más tarde se ha convertido, por derecho propio, en una de las áreas más excitantes de la exploración del Universo: la astrofísica molecular.

Las tres moléculas inicialmente detectadas en el óptico plantearon numerosos problemas de interpretación. ¿Cómo era posible que se formasen en el medio difuso interestelar?, ¿qué escalas de tiempo eran necesarias?, ¿había más moléculas en el espacio?, ¿cuáles podrían ser? Durante el siglo XX se ha ido dando respuestas a todas estas preguntas y hoy en día sabemos que en cualquier dirección de observación existen especies moleculares complejas. La molécula de CO es tan abundante en el medio interestelar y en las galaxias exteriores que puede ser utilizada para trazar una gran variedad de condiciones físicas. Hasta en los objetos más lejanos la molécula de CO puede ser utilizada para trazar la masa gaseosa de los objetos observados. H₂, CO, así como otras especies más complejas, son moléculas omnipresentes en el Universo. Hasta ahora se han detectado cerca de 130 especies moleculares en el espacio y el número aumenta a razón de 2 ó 3 especies por año.

Uno de los resultados más curiosos obtenidos a partir de las observaciones ópticas de los años 30 y 40 fue que la temperatura de rotación, es decir, la temperatura a la que aparentemente estaban poblados los niveles de la molécula de CN, era de aproximadamente de 2,3 a 2,7 K. Por otra parte, dicha temperatura era independiente de la dirección de observación seleccionada. Este resultado histórico no pudo ser apreciado dentro de un contexto cosmológico. En lugar de una

excitación por radiación ultravioleta o por colisiones, como se sugirió, esa temperatura indicaba, como hoy sabemos, que las moléculas se encuentran en equilibrio con la radiación de fondo.

No menos de 65 de las especies interestelares detectadas hasta ahora contienen carbono. Estas son denominadas moléculas *orgánicas* y así, mucha de la química del espacio es química orgánica. Muchas de las moléculas entre las estrellas se reconocen que son las precursoras de la vida. Por ejemplo, el cianuro de hidrógeno (HCN) y el formaldehído (H₂CO) formados abundantemente en los experimentos de laboratorio para simular las condiciones en la atmósfera y océanos tempranos de la Tierra. Tales experimentos también producen aminoácidos, los bloques constructores de las proteínas. Ciertos aminoácidos que no ocurren naturalmente sobre la Tierra son encontrados en meteoritos, así que es razonable pensar que podrían estar ocultos en las denominadas nubes interestelares oscuras.

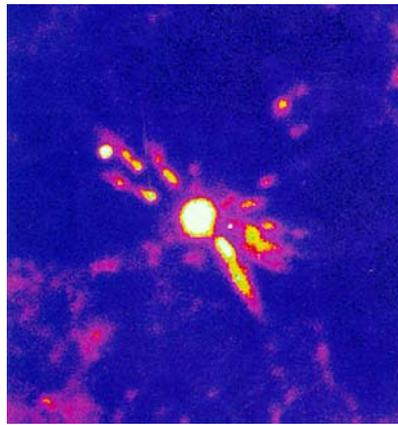


Figura 3. Imagen de la nebulosa planetaria Abell 78 obtenida con el telescopio William Herschel. Los jets presentes en este objeto son un buen ejemplo de pérdida de material estelar enriquecido en metales en forma de viento intenso⁸. Fuente: ING.

¿Jugaron las moléculas interestelares un rol en el desarrollo de la vida sobre la Tierra? Muy pronto después de que la Tierra se formó debe haber sido bombardeada por cometas que llevaban incorporados muchas de las especies moleculares encontradas en nubes oscuras. Parece altamente probable que algún material interestelar sobrevivió a la formación del Sistema Solar y llegó a estar incorporado en objetos primitivos tales como condritas carbonáceas y cometas.

⁸ Todas las estrellas de 2 a 3 masas solares tienen en las últimas etapas de su vida procesos violentos de pérdida de masa. En su fase de gigantes rojas desarrollan una envoltura a su alrededor. Esta envoltura circumestelar contiene los elementos producidos en el núcleo estelar. La temperatura típica del gas es de 1.500 a 2.000 K en la zona de la fotosfera estelar y evidentemente el gas es esencialmente molecular. Debido a que algunas de esas especies moleculares son refractarias, tienen tendencia a formar agregados que forman los núcleos de condensación donde otras especies moleculares pueden depositarse. La presión de radiación empieza a producir una aceleración en esos esbozos de granos de polvo que arrastran al gas. Cuando la temperatura desciende a 800-1.000 K una buena fracción de las moléculas se depositan sobre los granos de polvo produciendo un importante incremento de su tamaño y por consiguiente de la presión de radiación que se ejerce sobre ellos. Esto, unido a la pérdida de masa producida por las pulsaciones estelares, genera una velocidad suficiente para que el gas escape a la atracción gravitatoria de la estrella. La envoltura se expande y termina incorporándose al medio interestelar donde al cabo de unos cuantos millones de años terminará incorporándose a una nueva estrella. En el proceso, una fracción importante, >50% de la masa procesada en el núcleo de la estrella, será eyectada al medio interestelar.

La química de la vida está claramente relacionada a la química del espacio, y las mezclas orgánicas requeridas para construir cosas vivientes es común en las gélidas profundidades entre las estrellas. Los cometas se cree que son muestras prístinas de las ruinas dejadas desde la formación del Sistema Solar y ellos pueden haber sido los puentes entre la química interestelar y la prebiótica.

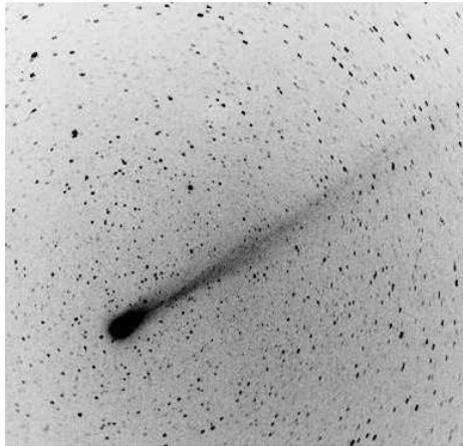


Figura 4. El cometa Hyakutake observado por la cámara CoCAM del Grupo de Telescopios Isaac Newton en 1996. El paso de cometas todavía hoy nos recuerda cuál pudo ser el origen de la química de nuestra forma de vida. Fuente: ING.

2.2. La aparición y evolución de la vida en la Tierra

En cualquier caso, la vida parece ser un fenómeno muy robusto. Se han encontrado indicios de actividad biológica en algunas de las rocas más antiguas de la Tierra, datadas en unos 3.850 millones de años de antigüedad. En aquella época remota, la corteza de la Tierra, recién solidificada, estaba sometida a un continuo bombardeo por grandes meteoritos. Cada impacto podía arrasarse el planeta entero, haciendo que se perdiera toda su atmósfera y que toda el agua de los océanos entrara en ebullición. Haber encontrado indicios de organismos vivos en una época tan temprana sugiere que la vida apareció más de una vez, tras ser borrada de la faz de la Tierra por sucesivos impactos. Si fuera así, se podría decir que la vida es un fenómeno inevitable si se dan las condiciones apropiadas para su desarrollo, y que su aparición se produce en poco tiempo.

Algunos experimentos bioquímicos parecen apuntar en esta dirección. A principios de la década de los años 50, los químicos Harold Urey y Stanley Miller reprodujeron las condiciones de la atmósfera primitiva: mezclaron los gases apropiados (metano, amoníaco, hidrógeno y agua) y los sometieron a los efectos de la radiación ultravioleta y a descargas eléctricas. A los pocos días se había formado un fluido negro y espeso cuya composición incluía aminoácidos, los constituyentes básicos de la vida. Aunque actualmente se cree que la composición química original de la atmósfera terrestre podría ser bastante distinta de la que supusieron Urey y Miller, ambos dieron un paso importante en la dirección correcta.

Todavía hoy no se conoce con seguridad el mecanismo que puede llevar a la construcción de las primeras células sencillas a partir de moléculas orgánicas. En cualquier caso, este importante paso para la vida se produjo hace muchísimo tiempo.

Cada cien millones de años aproximadamente, el registro fósil recoge la súbita desaparición de un gran número de especies. Se conocen cinco de esas extinciones masivas, la última de las cuales sucedió hace unos 65 millones de años, al final del Cretácico. Tan remoto acontecimiento dio el pistoletazo de salida a la evolución de los mamíferos. Hasta entonces, y durante más de cien millones de años, los dinosaurios habían dominado la Tierra. En 1980 un equipo dirigido por el premio Nóbel de física Luis Álvarez propuso que los dinosaurios, y con ellos más del 60% de las especies existentes, fueron víctimas de la caída de un asteroide o cometa de unos 10 kilómetros de diámetro que impactó en los mares del golfo de México (Álvarez, 1980). Su principal prueba es una capa de iridio, un elemento raro en la corteza terrestre pero común en los meteoritos, que se extiende por toda la Tierra: sólo por debajo de la capa rica en iridio, en estratos más antiguos, se encuentran restos de dinosaurios, nunca por encima de ella.

El riesgo debido a impactos por asteroides y cometas se puede ver incrementado enormemente por el paso de una estrella por las cercanías del Sistema Solar. En tal eventualidad, la gravedad de la estrella haría que incontables cometas de la nube de Oort⁹ se precipitaran hacia el interior de nuestro sistema planetario. Por fortuna, en las búsquedas efectuadas sobre los extensos catálogos del satélite Hipparcos no se ha encontrado ninguna estrella candidata a un fenómeno así, si bien no se puede descartar la posibilidad de que una estrella pequeña y poco brillante, no incluida en los catálogos, pudiera desencadenar la lluvia de cometas (ver, por ejemplo, Farley, 1998; Frogel y Gould, 1998; Leicht y Vasisht, 1998).

En cualquier caso, parece probado que el Sistema Solar está todavía en formación y que las colisiones entre sus miembros, aunque con probabilidades muy bajas, no son imposibles. La observación en directo de la colisión entre el cometa Shoemaker-Levy 9 y Júpiter en 1994 es, por ejemplo, una de las pruebas más concluyentes. Esto ha llevado a los astrónomos a emprender programas de vigilancia y seguimiento de objetos cercanos a la Tierra (Near-Earth Objects o NEOs) y potencialmente peligrosos (Potentially Hazardous Asteroids o PHAs) utilizando varios telescopios en varias localizaciones.

⁹ La Nube de Oort es un halo aproximadamente esférico de núcleos cometarios que rodea al Sol a unos 10.000-100.000 UA, más de un tercio de la distancia a la estrella más próxima. La Nube de Oort sigue siendo una propuesta teórica ya que no podemos en la actualidad detectar cometas inertes a tan grandes distancias. Se estima que la nube contiene 1.000.000.000.000 cometas supervivientes de la formación del Sistema Solar. Estos cometas se pueden ver afectados por la influencia gravitatoria de las estrellas cercanas, y la consiguiente perturbación puede enviarlos a órbitas que los llevan hacia el interior del Sistema Solar.

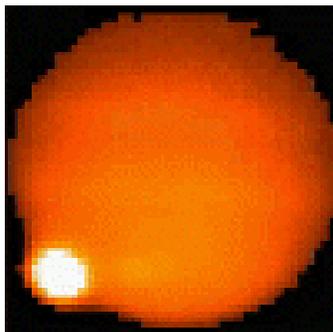


Figura 5. Impacto del fragmento L (abajo a la izquierda) del cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter en 1994. Esta imagen fue obtenida por el telescopio Jacobus Kapteyn del Observatorio del Roque de Los Muchachos¹⁰. Fuente: ING.

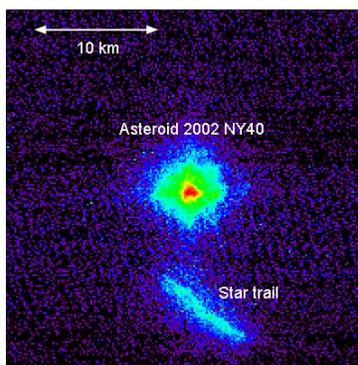


Figura 6. Imagen en la banda H (1,63 micrones) obtenida por el sistema de óptica adaptativa NAOMI en el telescopio William Herschel del asteroide 2002 NY40, en la noche del 17 al 18 de agosto de 2002¹¹. En ese instante el asteroide se encontraba a 750.000 kilómetros de distancia, dos veces la distancia entre la Tierra y la Luna. El asteroide 2002 NY40 es un objeto que recibe la calificación de NEO (ver texto). Esta imagen fue la primera que se obtuvo de un NEO utilizando un sistema de óptica adaptativa¹². Fuente: NAOMI team.

En el año 2000 el gobierno británico encargó a un grupo de expertos la elaboración de un informe¹³ para evaluar el peligro potencial de los NEOs y recomendar acciones encaminadas a emprender un programa para la detección, seguimiento e incluso destrucción de amenazas. El gobierno británico aceptó las recomendaciones y en la actualidad varias de ellas han cristalizado en acciones concretas. En particular, cabe destacar el papel relevante que podría ser asignado a varios telescopios del Grupo Isaac Newton¹⁴. También podemos encontrar la búsqueda de NEOs entre los objetivos científicos de otra instalación de reciente inauguración en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, SuperWASP¹⁵.

¹⁰ Más información en: http://www.ing.iac.es/PR/SH/SH94/high_94.html.

¹¹ Más información en: <http://www.ing.iac.es/PR/press/ing32002.html>.

¹² Un sistema de óptica adaptativa corrige el frente de onda de la luz, librándola de los defectos introducidos por la turbulencia atmosférica. El resultado es una imagen de alta resolución espacial, mayor que la proporcionada por el telescopio en condiciones normales. Más información sobre óptica adaptativa en el Grupo de Telescopios Isaac Newton puede encontrarse en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/development/ao/aodev.html>.

¹³ El informe completo puede encontrarse en: http://www.nearearthobjects.co.uk/report/resources_task_intro.cfm.

¹⁴ Más información actualizada puede encontrarse en: <http://www.nearearthobjects.co.uk/>.

¹⁵ Más información sobre SuperWASP en: <http://www.superwasp.org/>.

2.3. Otras formas de vida en la Tierra

Ya que no se conocen ejemplos de vida extraterrestre, el único punto de partida accesible es el estudio de los organismos y ecosistemas de la Tierra. Asentando una base firme en los conocimientos científicos recopilados por la biología, se puede intentar el siempre peligroso ejercicio de la extrapolación hacia lo desconocido.

Para extrapolar de forma conveniente es preciso conocer los valores extremos de las condiciones de habitabilidad, condiciones que se dieron cuando surgió la vida en la Tierra, que existen o existieron en otros cuerpos del Sistema Solar (Marte, Titán, Europa, etc.) y que quizás puedan existir en algunos exoplanetas. A los seres que viven en condiciones ambientales extremas se les denomina *extremófilos*. Son extremófilos los organismos que viven en condiciones extremas de temperatura, presión, acidez, basicidad, salinidad y concentración de oxígeno y se encuentran en ambientes tan dispares como fuentes y surtidores hidrotermales, aguas congeladas, permafrost, lagos hipersalinos, rocas, etc.

Se conocen cientos de organismos extremófilos, algunos de los cuales son de especial interés para muchos aspectos de la biología y, en particular, para la astrobiología pues permiten comprobar los métodos utilizados en la exploración biológica de otros mundos y son los ejemplos necesarios para la definición de la zona de habitabilidad en sistemas planetarios.

Una de las clases más interesantes de extremófilos son las bacterias termófilas, que viven en surtidores termales a casi 100 grados centígrados. Frecuentemente, las aguas tienen una concentración notable de ácido, por lo que muchos termófilos son también acidófilos. Por alguna razón, las proteínas de los termófilos no pierden sus propiedades pese a la gran temperatura a la que están sometidas. También en el reino abisal, el de las grandes presiones, oscuridad y falta de alimento, existe la vida. En 1977 una expedición oceanográfica descubrió una fumarola volcánica en una cordillera dorsal en el fondo del océano Pacífico y a su alrededor, sometidas a presiones de cientos de atmósferas, extrañas criaturas, la mayoría totalmente desconocidas para la ciencia en aquella época. Hubo que estudiar las colonias con mucho detenimiento para explicar cómo podían mantenerse sin la aportación de vegetales. El organismo en el cual se basa la ecología de estos sistemas es un tipo de bacteria que extrae energía oxidando el azufre. El resto de animales de la colonia se aprovecha, de forma directa o indirecta, de ellas, por lo que desempeñan el mismo papel que las plantas verdes en otros hábitats. Algunos ecosistemas cavernarios autocontenidos, encerrados en sí mismos para siempre fuera del alcance de la luz solar, se basan en un mecanismo análogo.

En el otro extremo se encuentran los microbios de los valles secos de la Antártida, que viven en el interior de las rocas protegidos del salvaje frío que reina en el exterior por unos milímetros de

piedra. Incluso en su refugio, durante el invierno estas colonias microbianas están expuestas a temperaturas inferiores a 50 grados centígrados bajo cero.

Podría ser que, incluso, ciertos organismos simples fueran capaces de resistir la exposición prolongada a las condiciones del vacío espacial. Un ejemplo es el de varios miles de semillas de tomate, embarcadas en un satélite durante más de dos años, que germinaron en más de un 99% cuando fueron sembradas tras ser devueltas a la Tierra.

Nuestras naves de exploración han visitado casi todo el Sistema Solar y han encontrado, sin excepción, mundos cuyo ambiente los hace intolerables para la vida tal como la conocemos. La Tierra nos parece un planeta acogedor en el que la vida se desarrolla en unas condiciones muy benignas, y olvidamos con facilidad que ello no es así para todos los organismos: los hay que viven en ambientes que parecen extraídos de otros planetas.

3. La búsqueda pasiva

A mediados de los años sesenta del pasado siglo se publicó “Vida inteligente en el Universo”, un libro de divulgación científica que proponía una visión optimista de la existencia de vida inteligente extraterrestre. Sus autores, Yosif Shklovskii y Carl Sagan, sostenían la existencia de decenas e incluso miles de civilizaciones en nuestra galaxia y la posibilidad real de entablar comunicación con ellas.

Poco antes, en un artículo en la prestigiosa revista *Nature*, Giuseppe Cocconi y Philip Morrison (1959) proponían el uso de ondas de radio en la longitud de onda de 21 centímetros (correspondiente a la emisión del hidrógeno atómico neutro, por otro lado, el elemento más abundante del Universo) para una posible comunicación interestelar. Sólo un año más tarde Frank Drake usó un radiotelescopio para observar dos estrellas de tipo solar cercanas, tau Ceti y épsilon Eridani: era el denominado proyecto Ozma. Su intento, que por primera vez alcanzó un nivel de sensibilidad adecuado para afrontar el problema, fracasó como todos los realizados hasta la fecha.

Desde el experimento de Drake se han sucedido los proyectos de búsqueda de inteligencia extraterrestre o Search for Extraterrestrial Intelligences (SETI), algunos de los cuales han usado receptores muy sensibles, análogos a los empleados en radioastronomía. Los Estados Unidos y la URSS fueron los principales protagonistas, aunque con estrategias diferentes. Los americanos se centraron en observar estrellas próximas de tipo solar. En cambio, los soviéticos buscaban manifestaciones físicas de la presencia de supercivilizaciones en objetos extragalácticos.

En 1976 entra en escena la NASA, que se involucra en SETI utilizando radiotelescopios y la red de estaciones de seguimiento de satélites, y observando tanto en todo el cielo como en estrellas cercanas de tipo solar. En 1992 la NASA anuncia la puesta en funcionamiento de un gran proyecto de radioescucha, el High Resolution Microwave Survey (HRMS) que incluía radiotelescopios como

el de Arecibo en Puerto Rico. Sin embargo, en 1993 recortes presupuestarios del congreso americano obligaron a cancelarlo cuando se le denegaron todos los fondos solicitados.

En 1993 comienza la era actual de SETI caracterizada por una financiación casi exclusivamente privada de sus actividades. En la actualidad, los proyectos más avanzados son BETA, financiado por la Planetary Society, y SERENDIP, cuyos fondos proceden, principalmente, de un reducido grupo de donantes. Tanto SERENDIP como BETA se basan en receptores que exploran millones de canales de radio y buscan señales intensas en unos pocos canales. Cuando se descubre alguna señal de este tipo se vuelve a observar la región donde se ha producido. Hasta la fecha todas las detecciones que superan un umbral determinado han sido falsas alarmas. Otros proyectos relevantes son Phoenix (antiguo HRMS) y META, y el Instituto SETI de Estados Unidos ha sido una de las instituciones que los ha impulsado.

Los modernos receptores del proyecto SERENDIP IV reciben una cantidad de datos inmensa. Para tratarlos adecuadamente se ha puesto en marcha el programa seti@home, que envía paquetes de datos por Internet a decenas de miles de usuarios. Cuando sus ordenadores están descargados de trabajo, empiezan a estudiar los datos recibidos.

En general, no se patrulla todo el espectro de radio sino sólo la porción conocida como el “abrevadero”, la comprendida entre la línea de 21 centímetros del hidrógeno neutro (HI) y la de 18 centímetros del OH. Entre otras ventajas, esta porción está afectada por niveles especialmente bajos de ruido electromagnético. Conforme pasan los años, la búsqueda se hace cada vez más difícil debido a la contaminación artificial del espectro electromagnético. De forma recurrente se proponen planes para instalar una serie de radiotelescopios en el hemisferio oculto de la Luna, pues allí, protegidos por 3.500 kilómetros de roca sólida los instrumentos estarían libres de las interferencias de origen terrestre. El coste del proyecto lo convierte en un asunto a tratar dentro de unas décadas.

En los últimos años se ha empezado a buscar emisiones extraterrestres en el espectro óptico. El motivo es que los pulsos rápidos de láser son un medio de comunicación mucho más efectivo que las ondas de radio y, por tanto, sería más propio de una civilización avanzada. A este programa de Optical SETI (OSETI) se destinan telescopios de pequeña apertura sobre los cuales existe una baja presión de solicitud de tiempos de observación. Con diámetros superiores sería posible detectar señales de civilizaciones más distantes¹⁶.

4. La búsqueda activa: la exploración del Sistema Solar y el envío de señales sobre nuestra forma de vida

4.1. La búsqueda de vida en el Sistema Solar

¹⁶ Más información sobre la búsqueda pasiva de vida puede encontrarse en este artículo de César Esteban: <http://www.caosciencia.com/ideas/articulo.php?id=140504>.

Desde la antigüedad conocemos planetas y los hemos observado. Los antiguos conocían cinco planetas o “astros errantes”: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. La revolución astronómica de Copérnico, Kepler y Newton demostró que aquellos cuerpos estaban más emparentados con la Tierra que con el Sol o las demás estrellas. En 1781 la comunidad científica quedó sorprendida por el anuncio del descubrimiento de un planeta más alejado, Urano, por el fabricante de telescopios aficionado William Herschel (el telescopio William Herschel del Grupo de Telescopios Isaac Newton le debe su nombre). En 1800 el pequeño cuerpo Ceres fue detectado entre las órbitas de Marte y Júpiter y desde entonces se han observado decenas de miles de asteroides en esta región. El planeta Neptuno, por su parte, indicó su presencia por su efecto gravitatorio sobre la órbita de Urano y fue observado por primera vez en 1846. Por último, Plutón, el planeta más lejano actualmente conocido del Sistema Solar, apareció a resultas de una búsqueda sistemática acometida por Clyde Tombaugh en 1930.

Para nuestro Sistema Solar el radio interior de la ZCH sería 0,958 UA y el radio exterior 1,004 UA, es decir, una estrecha franja de tan solo 0,046 UA. Venus y Marte quedan, pues, fuera de la ZCH. La Luna, sin embargo, no, pero su baja masa impide que pueda retener una atmósfera que a su vez origine el efecto invernadero necesario para la existencia de la vida.

Es posible definir una zona de habitabilidad menos restrictiva que la ZCH, pero de nuevo Venus estaría demasiado cerca del Sol y Marte tendría demasiada poca masa. Sin embargo, la era de la exploración espacial y la exploración de nuestro propio planeta nos ha traído numerosas sorpresas: la existencia de nuevos ambientes donde puede existir vida.

Se pondría pensar que las naves espaciales enviadas a explorar otros mundos no son adecuadas para el descubrimiento de la vida. A modo de comprobación Carl Sagan y sus colaboradores aprovecharon un paso de la sonda Galileo por las cercanías de la Tierra, mientras estaba en ruta hacia Júpiter, para intentar descubrir vida en nuestro planeta a partir de los datos recogidos por sus instrumentos científicos (Sagan, 1993). El resultado del experimento fue muy satisfactorio. La abundancia de un gas tan reactivo como el oxígeno y cantidades menores de otros compuestos como el metano eran claros indicios de la existencia de vida pues ningún planeta de tipo terrestre puede tener ninguna de estas sustancias en su atmósfera sin la intervención de organismos vivos. Por ejemplo, Marte y Venus presentaron sólo trazas de oxígeno.

Dejando la Tierra de lado, Marte y la Luna son los únicos cuerpos del Sistema Solar que han sido explorados en busca de vida. Las muestras lunares traídas por los astronautas del proyecto Apollo se mostraron totalmente estériles. Las naves Viking transportaban tres experimentos diferentes para buscar vida marciana, dos de los cuales dieron un resultado negativo, mientras que el tercero dio resultado positivo, si bien se podía explicar en función de la extraña química del polvo que se encuentra en la superficie de Marte. La discusión sobre la vida en Marte se revitalizó tras el anuncio de que un meteorito encontrado en la Tierra, el ALH84001, que podría proceder de Marte,

contenía indicios de actividad biológica. No obstante, parece que la explicación más sencilla de las características del meteorito se basa en la contaminación por material orgánico de la Tierra.

La nave Mars Global Surveyor y los robots de la NASA Spirit y Opportunity, que recientemente han explorado la superficie marciana, no han encontrado evidencias de vida. Sin embargo, sí de que en el pasado se dieron las condiciones para que la hubiera, incluyendo la existencia de aguas poco profundas. Este descubrimiento ha sido elegido por la revista *Science* como descubrimiento del año en 2004 (Kennedy, 2004). La sonda británica Beagle2, preparada expresamente para la detección de vida, se perdió en el momento de posarse sobre la superficie.

Aunque hoy por hoy todos los indicios apuntan a que la Tierra es el único mundo dotado de vida en el Sistema Solar, quedan, sin embargo, algunos cuerpos pendientes de análisis detallado y que podrían revestir interés para la astrobiología: Titán, satélite de Saturno, presenta una interesante atmósfera^{17,18}, y Europa, satélite de Júpiter, podría albergar un océano de agua bajo su superficie helada¹⁹. La existencia de vida en este océano podría ser posible gracias al calor generado por las fuerzas de marea ejercidas por Júpiter. Pero además las mareas podrían dar lugar a actividad volcánica en el fondo del océano, y de aquí se puede extraer un gran paralelismo con las fumarolas volcánicas de los fondos oceánicos terrestres²⁰.

4.2. La búsqueda fuera del Sistema Solar

Unos pocos mensajes directos de la Tierra se dirigen en este momento hacia las estrellas. Dos de ellos están embarcados en sondas lanzadas fuera del Sistema Solar, las Pioneer 10 y 11 y las Voyager 1 y 2. Viajan a unos 30 kilómetros por segundo por lo que tardarán decenas de miles de años en pasar por las cercanías de algún astro. Las naves Pioneer llevan una placa de metal sobre la que se grabó un mensaje pictográfico en el que se representan una mujer y un hombre, la posición del Sol con respecto a varios púlsares y la posición de la Tierra dentro del Sistema Solar. El mensaje de las Voyager es mucho más sofisticado y completo. Está contenido en un disco de oro que incorpora las instrucciones necesarias para su lectura, 118 imágenes de la Tierra y los seres que la habitan (no sólo humanos), casi 90 minutos de música cuidadosamente escogida y saludos en 56 idiomas diferentes, entre los que se cuenta una canción de las ballenas.

El tercero de los mensajes es más inmaterial y se mueve a la máxima velocidad posible: la de la luz. Fue transmitido en noviembre de 1974 desde el radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico como una serie de 1.679 pulsos de radio codificados con 0 y 1 (bits). Este número se escogió porque es el múltiplo de dos números primos sencillos y esto obliga a representar el mensaje en una

¹⁷ Más información sobre la atmósfera de Titán puede encontrarse en: <http://www.markelowitz.com/titan.htm>.

¹⁸ En 2004 la sonda Cassini llegará a las proximidades de Titán y en enero de 2005 la sonda Huygens desprendida de Cassini se internará en la atmósfera de Titán aportando interesantes datos sobre sus condiciones físicas y su composición química.

¹⁹ Más información sobre Europa puede encontrarse en: <http://www.markelowitz.com/europa.htm>.

²⁰ Más información sobre el Sistema Solar y la búsqueda de vida puede encontrarse en el libro: Encrenaz, T., et al., "The Solar System", 3ª edición, Springer, 2003.

cuadrícula de 73×23 espacios. El mensaje también es pictórico, y reproduce de forma bastante esquemática la silueta de un ser humano, la doble hélice del ADN, el radiotelescopio desde el que se envió el mensaje y nuestro sistema planetario, con la Tierra destacada. La señal de radio fue enviada hacia el cúmulo globular Messier 13, adonde llegará dentro de unos 45.000 años. Durante su trayecto, sin embargo, la señal habrá pasado por multitud de otras estrellas más cercanas. Sin embargo, la corta duración del mensaje hará difícil para el receptor la identificación de la fuente.

Además de los mensajes directos, la Tierra está emitiendo de forma continua ondas de radio y televisión. Su señal a unas decenas de años-luz de la Tierra debe ser muy débil, por debajo del ruido cósmico, aunque con una tecnología apropiada debería ser posible detectarlas. Los emisores más potentes, sin embargo, son los radares de alerta temprana, diseñados para detectar misiles intercontinentales en vuelo: el tipo de señal emitida no deja dudas en cuanto a su origen artificial, y son detectables a mucha mayor distancia que las emisiones de radio y televisión.

Lo visto hasta ahora podemos resumirlo como que la búsqueda activa de la vida fuera de la Tierra parece abocada a concentrarse en planetas alrededor de otras estrellas, y que la astrobiología debe proporcionar los *biomarcadores* observables que permitan su identificación en esos otros planetas.

5. La búsqueda activa: la búsqueda de planetas extrasolares

5.1. Hacia dónde mirar y cómo

La física estelar constituye una valiosa herramienta para descartar algunos tipos de estrellas y seleccionar otros. Las estrellas masivas queman su combustible a toda prisa, y al agotarse, estallan de tal forma que en el momento de la explosión su brillo es equiparable al de toda la galaxia en la que se encuentran. Sin duda las estrellas masivas son imprescindibles para la vida; al fin y al cabo, todo el hierro del Universo, incluyendo el que forma parte de nuestro organismo, se creó a partir del hidrógeno durante la evolución de una estrella de gran masa. A pesar de todo, se cree que estas estrellas no dan opción a que se forme un sistema planetario a su alrededor, y mucho menos la vida. Su elevada temperatura y la emisión de radiación ultravioleta lo impiden.

Las estrellas menos masivas (de tipos más tardíos, o estrellas más frías) tienen una vida suficientemente larga para que se pueda formar un sistema planetario y en alguno de ellos se origine la vida, con la restricción de que cuanto mayor sea la masa, menos tiempo tendrá la vida para llegar a la inteligencia. Si se toma la vida en la Tierra como referencia, la inteligencia tardó en desarrollarse varios miles de millones de años, y esto descartaría las estrellas más tempranas, o más calientes, que el tipo F.

Por el otro lado del rango de masas, las estrellas menos masivas tienen una vida muy larga, mucho más que la de nuestro propio Sol aunque, por el contrario, emiten muy poca energía en el espectro visible debido a su baja temperatura superficial. Los planetas de estas estrellas deberían

estar muy cerca de ellas para resultar apropiados para la vida, a no ser que existan organismos capaces de vivir en condiciones de frío extremo.

Estamos interesados, por lo tanto, en estrellas que, aparte de estar cerca de nosotros, se encuentren también en la Secuencia Principal²¹ con masas adecuadas para generar ZCH anchas, y sobre todo que contengan planetas de masa apropiada como para disponer de agua y atmósfera ligadas gravitatoriamente.

Pero antes de continuar debemos plantearnos la siguiente cuestión: ¿qué es un planeta? Necesitamos una definición de planeta para saber qué vamos a buscar realmente.

Al detectar en los últimos diez años muchos pequeños planetas más lejanos que Neptuno y estrellas de tan poca masa que podrían confundirse con planetas, los astrónomos se han visto obligados a replantearse la definición de planeta.

La diferencia por el extremo de mayor masa es importante: una estrella lucha contra el colapso gravitatorio de su materia a través de la energía liberada por la fusión nuclear de su núcleo. Por esta razón, sólo los astros de masa por lo menos igual al 7 u 8% de la del Sol son capaces de mantener unas temperaturas lo suficientemente altas como para convertirse en estrellas (por comparación, el más masivo de los planetas del Sistema Solar, Júpiter, posee menos del 0.1% de la masa del Sol). Se han propuesto distintas definiciones de planeta, algunas basadas en la masa y otras en el origen del cuerpo o su órbita. La Unión Astronómica Internacional puso en marcha un grupo de planetas extrasolares hace unos años y entre sus actividades se encuentra velar por la definición de planeta²². Una definición sencilla sería: “un objeto en órbita alrededor de una estrella lo bastante pequeño para que la fusión del deuterio no pueda desencadenarse” (equivalente a una masa inferior a trece veces la masa de Júpiter). Esta será, por lo tanto, nuestra definición de partida para la búsqueda planetas extrasolares.

Volviendo a la ecuación de Drake del apartado 1, vemos que de los cinco primeros términos dos son conocidos gracias a los actuales medios de observación. La tasa de formación estelar en nuestra galaxia se estima en torno a 20 estrellas por año y la fracción de estrellas capaces de desarrollar ZCH en torno al 10%. Sin embargo, ¿cuántas de estas estrellas desarrollan sistemas planetarios? Esta es la cuestión hacia la cual se orientan la mayoría de los esfuerzos. Los descubrimientos realizados desde 1995 arrojan una estimación del 5%.

²¹ Si colocásemos todas las estrellas en un diagrama de temperatura frente a luminosidad (diagrama de Hertzsprung-Russell) la Secuencia Principal (SP) aparecería como una banda diagonal que va desde la parte superior izquierda a la parte inferior derecha. Una estrella se dice que está en la SP en una etapa de su vida si brilla convirtiendo hidrógeno en helio en su centro. La posición de una estrella en la SP depende de su masa, estando situadas las estrellas más masivas a la izquierda (tipos tempranos) y las menos masivas a la derecha (tipos tardíos). El Sol se halla a medio camino a lo largo de la SP. Las estrellas pasan la mayor parte de su vida en la SP permaneciendo a temperatura y luminosidad aproximadamente constantes, aunque la duración de la estancia en la SP depende de su masa. Para estrellas muy masivas, la fase de SP dura sólo un millón de años, si bien para estrellas menos masivas es comparable a la edad del Universo.

²² Más información en: <http://www.ciw.edu/IAU/div3/wgesp/definition.html>.

Considerando la ecuación de Drake de izquierda a derecha como la secuencia observacional de la búsqueda activa de la vida fuera del Sistema Solar, se puede concluir que en la actualidad *nos encontramos en la fase de la búsqueda y caracterización de planetas extrasolares*.

Las estrellas objetivo de nuestros estudios serán, como ya hemos visto, aquellas de tipo solar, no variables y con una metalicidad importante. Para detectar planetas extrasolares alrededor de estas estrellas se siguen varios caminos que se basan en una multitud de técnicas que utilizan los medios y conocimientos actuales para la detección de planetas extrasolares, tanto desde el espacio como desde la Tierra. Los distintos métodos de observación son eficaces para hallar distintos tipos de planetas. Cada técnica aporta informaciones complementarias y contribuye a nuestra comprensión de la diversidad de características de los sistemas planetarios. Estas técnicas se pueden agrupar según el tipo de efecto observable que produce la presencia de un exoplaneta:

- **Efectos dinámicos sobre la estrella.** Todos estos métodos utilizan el efecto gravitatorio que producen los exoplanetas sobre su estrella y, por tanto, son sensibles a su masa.
- **Efectos fotométricos.** La presencia del planeta deja su impronta en la luz de la estrella (detección indirecta) o se puede registrar directamente la señal del planeta separada de la señal de la estrella (detección directa).
- **Microlente gravitatoria.** La estrella que posee exoplanetas puede actuar como microlente gravitatoria si pasa entre nosotros y una estrella más lejana, aumentando el brillo de esta última estrella. Si existe un exoplaneta, entonces éste actuará también como microlente gravitatoria produciendo un incremento de brillo.
- **Otros efectos.**

Cada uno de estos efectos pueden observarse con diferentes **métodos de observación** que a su vez presentan sus propios **límites de detección**. A continuación se ofrece un resumen de los métodos más importantes y que han aportado resultados hasta la fecha.

	M_{Tierra}	$M_{Júpiter}$
$M_{Júpiter}$	317,990	1,000
$M_{Saturno}$	95,100	0,299
$M_{Neptuno}$	17,300	0,054
M_{Urano}	14,600	0,046
M_{Tierra}	1,000	0,003

Tabla 1. Comparación de masas entre diferentes planetas del Sistema Solar. Estas relaciones son muy utilizadas para cuantificar las masas de los exoplanetas.

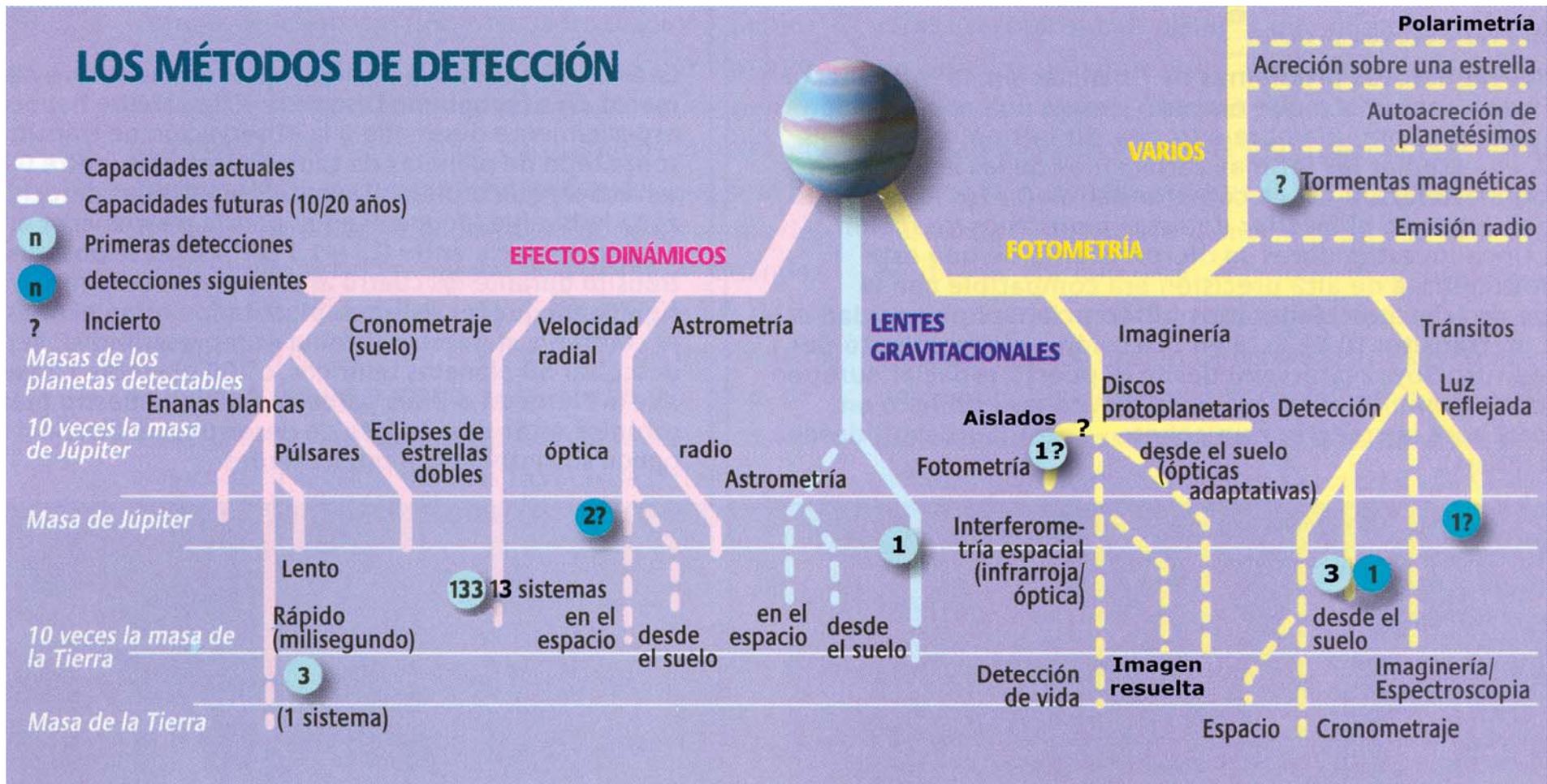


Figura 7. Clasificación de los métodos de detección según Perryman (2000) y extraído de Lissauer (2003). Los resultados observacionales están actualizados hasta noviembre de 2004.

5.2. Efectos dinámicos. Velocidad radial

Descripción: es el más exitoso hasta la fecha en número de planetas descubiertos. Fue propuesto en 1952 por primera vez (Struve, 1952). Está basado en el análisis de la luz emitida por un cuerpo en rotación alrededor de un centro de gravedad. Las líneas del espectro de la estrella se desplazan por efecto Doppler hacia longitudes de onda menor (hacia el azul) cuando se acerca hacia nosotros y hacia longitudes de onda mayores (hacia el rojo) cuando se aleja, sin que haya evidencia de la presencia de otra u otras estrellas en el espectro primario. Analizando el desplazamiento de un gran número de líneas conocidas y bien resueltas se puede medir con precisión la velocidad radial (proyección de la velocidad de la estrella sobre la línea de visión). Los astrónomos restan el movimiento del telescopio con respecto al centro de gravedad del Sistema Solar así como de éste con respecto a la estrella observada, para dejar sólo la velocidad radial de la estrella atraída por sus propios planetas. La medida de estos desplazamientos permite analizar el movimiento de la estrella alrededor del centro de gravedad del sistema estrella-planeta, deducir la masa mínima del planeta y la distancia estrella-planeta.

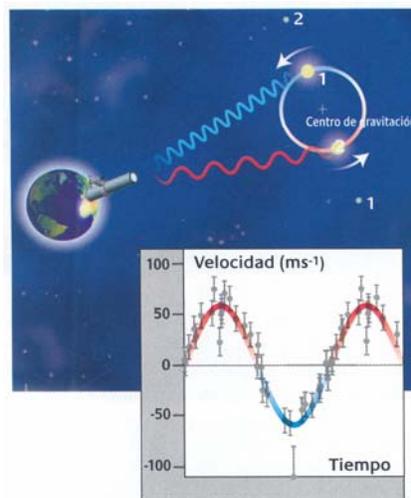


Figura 8. El efecto Doppler es el fundamento del método de las velocidades radiales, la técnica más utilizada por los astrónomos y la más prolífica. Las líneas del espectro electromagnético de la estrella se desplazan hacia las pequeñas longitudes de onda (azul) cuando la estrella se acerca a la Tierra y hacia longitudes de onda mayores (rojo) cuando se aleja. Fuente: gráfico extraído de Lissauer (2003).

Como las medidas precisas de velocidades radiales exigen un importante número de líneas espectrales esta técnica no es adecuada para las estrellas más calientes, que poseen muy pocas firmas espectrales comparadas con estrellas más frías como el Sol. Además, perturban este método fuentes de ruido como la rotación de la estrella y su variabilidad intrínseca (por ejemplo, las manchas estelares). En las medidas de velocidades radiales se presenta otro problema. Aunque esta

técnica es sensible al período y la excentricidad²³ de la órbita del exoplaneta, no hay que olvidar que un dato esencial de todo nuevo planeta es su masa. Ahora bien, esta técnica sólo permite determinar $M \times \sin(i)$ ²⁴ y, por lo tanto, sólo se puede calcular un límite mínimo a la masa del exoplaneta.

Utilizando células de absorción de yodo en espectrógrafos echelle²⁵ de alta resolución (Butler, 1996) se puede obtener una resolución de 3 metros por segundo en las estrellas con espectros estables correspondiendo a desplazamientos Doppler de $10^{-8}\lambda$ (una cienmillonésima de longitud de onda)²⁶. En comparación con nuestro Sistema Solar, la presencia de Júpiter ocasionaría una variación de 12,5 metros por segundo para un período de 11,86 años y el efecto debido a Saturno sería de 2,7 metros por segundo para un período de casi treinta años²⁷. Así, con la precisión actual se pueden detectar planetas como Júpiter alrededor de estrellas de tipo solar, si bien estas detecciones exigen un tiempo de observación muy largo (comparable al período orbital del exoplaneta). Asimismo, planetas como Saturno serán detectables si están muy cerca de su estrella. Pero el hallazgo de planetas de tipo terrestre en órbitas de tipo terrestre está lejos de las capacidades del método de las velocidades radiales. Hay que recurrir a otras técnicas.

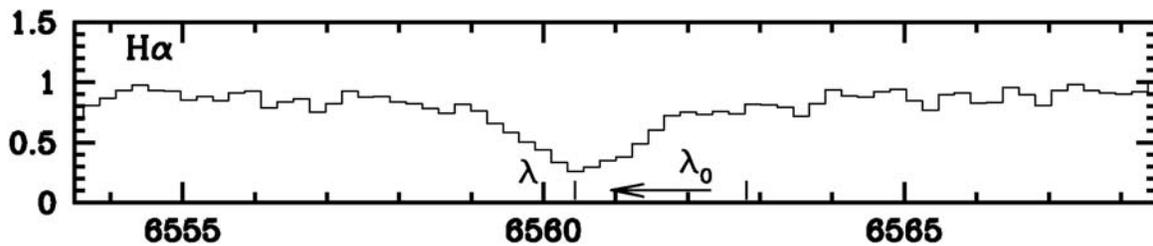


Figura 9. Ejemplo de desplazamiento de una línea espectral en una estrella de tipo solar debido a la velocidad radial. En el eje y se representa la intensidad relativa y en el eje x la longitud de onda. λ_0 es la posición de la línea de hidrógeno alpha desplazada por el movimiento relativo de la Tierra con respecto al movimiento de las estrellas en esa parte de la galaxia. A su vez la estrella en cuestión, denominada Tycho G, posee un movimiento propio hacia el azul debido a que se acerca hacia nosotros, que provoca el desplazamiento de la línea de hidrógeno alpha hasta la posición marcada por λ . La diferencia entre ambas longitudes de onda nos determina la velocidad radial propia de la estrella²⁵.

²³ La excentricidad de una órbita mide su elipticidad. La excentricidad de una circunferencia es nula y la de una parábola es igual a la unidad.

²⁴ La masa del exoplaneta dividida por la de la estrella, que puede determinarse a partir de su tipo espectral, multiplicada por el seno de la inclinación del sistema con respecto al telescopio, siendo la inclinación cero si el eje del sistema coincide con la línea de visión, y que en general se desconoce.

²⁵ Espectrógrafo que utiliza un retículo echelle, para obtener una resolución espectral muy alta o una amplia cobertura de longitudes de onda. Un retículo echelle es una red de difracción con rayas relativamente muy espaciadas. La red produce numerosos espectros superpuestos que deben ser separados antes de que lleguen al detector. La separación es habitualmente conseguida mediante un prisma o grisma (a veces denominado dispersor en cruz), que coloca los espectros clasificados por órdenes uno encima del otro.

²⁶ Más información en: <http://www2.keck.hawaii.edu/news/hires/hires.html>.

²⁷ La velocidad radial viene dada por $v_r = cz$, donde z es el desplazamiento al rojo o al azul determinado por $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda = \Delta\lambda / \lambda$ y c es la velocidad de la luz (299.792,458 kilómetros por segundo). Teniendo en cuenta que la resolución espectral (\mathfrak{R}) de un espectrógrafo viene dada por $\mathfrak{R} = \lambda / \Delta\lambda$, entonces la velocidad radial que puede medirse con un espectrógrafo de resolución \mathfrak{R} es $v_r = c / \mathfrak{R}$.

Las limitaciones de este método provienen del hecho de que los espectrógrafos actuales no son capaces de medir con una precisión menor que 3 metros por segundo aproximadamente impidiendo la detección de planetas de baja masa. Por otro lado, en ocasiones se interpreta el movimiento radial como propio de la estrella, cuando resulta provenir de la pulsación propia de la estrella o incluso de manchas sobre su superficie. Finalmente tenemos la incertidumbre en la determinación de la masa del exoplaneta detectado: el método sólo nos ofrece una masa mínima. Sin embargo, es la técnica más prolífica.

Resultados: hasta el 5 de noviembre de 2004 se había encontrado 133 exoplanetas por el método de la velocidad radial (117 sistemas planetarios de los cuales 13 son múltiples). Orbitan alrededor de estrellas que están consumiendo hidrógeno en la Secuencia Principal. Las masas de la mayoría de estas estrellas son del orden de decenas por ciento de la del Sol (de tipos más tardíos o estrellas más frías que el Sol) y están situadas a una distancia de la Tierra comprendida entre 100 y 200 años-luz. El primer descubrimiento de un exoplaneta de esta clase se remonta a 1995 en el Observatorio francés de Haute-Provence. El planeta en cuestión, en órbita alrededor de la estrella 51 Pegasi, ligeramente menos masiva que el Sol y miles de millones de años más vieja, fue descubierto por Michel Mayor y Didier Queloz (Mayor, 1995). Su masa es por lo menos igual al 45% de la de Júpiter y su período orbital es de 4,23 días, menos de una vigésima parte del período orbital de Mercurio. Otros planetas similares han sido detectados posteriormente. Esto significa que el 1% de las estrellas de tipo solar poseen planetas del tamaño de Júpiter cuyo período orbital no supera la semana. Debido a su gran masa y a su proximidad a la estrella, se les denomina “Júpiteres calientes”.

No todos los planetas detectados son así. Sus masas varían aproximadamente entre quince veces la de la Tierra²⁸ ($0.046M_J$) en el caso del exoplaneta HD160691c hasta el límite permitido por la definición de planeta ($13M_J$). La mayoría están comprendidos entre un tercio y tres veces la masa de Júpiter, pues los planetas más grandes son más raros y los más pequeños más difíciles de detectar debido a las limitaciones técnicas. Hasta el momento, el único planeta cuyo período orbital rebasa el de Júpiter (11,83 años) es el de la estrella 55 Cancri. Recorre su órbita en unos quince años y su masa mínima es cuatro veces mayor que la de Júpiter (Marcy, 2002).

Hay un sistema de planetas de especial interés. Es el que orbita alrededor de la estrella Gliese 876. Con una masa del orden de un tercio de la del Sol, este astro rojo débilmente luminoso es la más pequeña estrella conocida que posee planetas. A sólo 15 años-luz de nosotros, Gliese 876 es también la estrella más próxima para la que se ha detectado un exoplaneta sin ambigüedad. Es una de las estrellas que posee varios planetas y la única estrella para la cual se han puesto

²⁸ Equivalencia entre masas de Júpiter, Tierra y Neptuno respectivamente: $1M_J = 318M_E = 18.5M_{NEP}$.

claramente de manifiesto perturbaciones gravitatorias mutuas²⁹ (Laughlin, 2001; Rivera, 2001). Su curva de velocidad radial indica que está acompañada de por lo menos dos planetas cuyas órbitas están en resonancia³⁰. El más próximo a la estrella es al menos 1,89 veces más masivo que Júpiter y efectúa su revolución en 61 días. El otro, de masa al menos igual a 0,56 veces la de Júpiter, orbita en poco más de 30 días.

De forma opuesta, también es posible encontrar exoplanetas en sistemas múltiples estelares. Es el caso del exoplaneta descubierto orbitando la estrella primaria del sistema triple HD 188753 (Konacki, 2005). El exoplaneta tiene un período orbital de 3,35 días y una masa mínima $1,14 M_{\text{Júpiter}}$. La masa de la estrella primaria tiene 1,06 veces la masa solar. La estrella secundaria, que es una estrella doble, orbita alrededor de la primaria a 12,3 Unidades Astronómicas y una excentricidad 0,50. La masa total de la secundaria es 1,63 masas solares. Tal sistema cercano y masivo habría truncado la formación de un disco alrededor de la primaria hasta 1,3 Unidades Astronómicas. Teniendo en cuenta que uno de los orígenes más aceptados para la formación de Júpiteres calientes es que se forman a unas 2,7 Unidades Astronómicas y luego emigran hacia el interior (Trilling, 1998), hace que el origen de este exoplaneta sea una cuestión abierta.

Recientemente se ha anunciado el descubrimiento del primer planeta de masa similar a Neptuno y el de menor masa detectado por el método de la velocidad radial. Hay que tener en cuenta que si bien existe una limitación técnica que no permite hallar planetas menores que Saturno en estrellas de tipo solar, sí es posible detectar planetas de menores masas si se observan estrellas también de baja masa, es decir, estrellas que son más sensibles a las oscilaciones gravitatorias que las de tipo solar. Sin embargo, esto tiene el inconveniente de que son también estrellas menos brillantes por ser más frías y que la identificación de líneas puede resultar más dificultosa. El próximo mes de diciembre se dará a conocer en el *Astrophysical Journal* el descubrimiento por parte de Butler et al. de un planeta con masa mínima $1,2M_{\text{NEP}}=21M_{\text{E}}$ utilizando el espectrógrafo HIRES del telescopio Keck I en Hawaii. El periodo orbital es de tan solo 2,644 días y la máxima distancia a la estrella es 0,028 UA o 14 radios estelares. La estrella denominada GJ436 de tipo espectral M2.5V es el tercer sistema planetario más próximo a la Tierra.

5.3. Efectos dinámicos. Observación de púlsares

²⁹ Para más información: <http://exoplanets.org/esp/gj876/gj876.shtml>.

³⁰ Se dice que las órbitas de dos objetos están en resonancia cuando se perturban gravitatoriamente de forma periódica, conservando unas relaciones determinadas en los períodos de sus órbitas (estas relaciones no son del todo exactas porque oscilan con el tiempo en torno a valores enteros). En nuestro Sistema Solar se conocen varios ejemplos de resonancias: Neptuno y Plutón tienen una relación de resonancia de 3:2, es decir, que por tres traslaciones de Neptuno alrededor del Sol, Plutón hace 2; las lunas de Júpiter Io, Ganymede y Europa tienen periodos orbitales de 1,77, 3,55 y 7,16 días respectivamente o una relación de resonancia 1:2:4; y varios anillos y lunas de Saturno se encuentran ligados por resonancia. Las resonancias pueden ser constructivas y destructivas, es decir, pueden conservar objetos en una determinada órbita e impedir que pueblen otras. Un ejemplo conocido es la ausencia de asteroides en las resonancias 2:1, 3:1, 5:2 y otras con el período de 11,86 años de Júpiter, así como la presencia de asteroides estables en las resonancias 3:2, 4:3 y 1:1. En esta última podemos encontrar los asteroides denominados "Trojanos" que viajan a 60 grados por delante y detrás de Júpiter pero en su misma órbita. Para más información véase Naeye (2005).

Descripción: los púlsares son estrellas de neutrones que poseen un intenso campo magnético. Debido a que sus ejes de rotación y magnéticos están desacoplados, emiten ondas de radio que para un observador terrestre se manifiestan como pulsaciones periódicas, si la orientación del eje magnético es la correcta. Si poseen planetas, los púlsares girarían alrededor del centro de gravedad del sistema. Al acercarse y alejarse periódicamente de nosotros, sus pulsaciones se verían afectadas por el efecto Doppler. Basta entonces sustraer de la señal el movimiento de la Tierra alrededor del Sol así como su rotación propia, para distinguir sólo las variaciones debidas a la presencia de exoplanetas. El período puede determinarse con gran precisión pues los púlsares estables figuran entre los relojes más precisos. Con la instrumentación actual que puede registrar pulsos con precisión de microsegundos, sería posible detectar incluso asteroides en órbita.

Resultados: se han encontrado tres pequeños planetas, los primeros hallados y los más pequeños exoplanetas conocidos, orbitando alrededor del púlsar PSR1257+12, una estrella de neutrones en rápida rotación cuya masa es aproximadamente igual a 1,4 veces la del Sol, situada entre 2.000 y 3.000 años-luz de la Tierra. Los dos primeros exoplanetas detectados orbitan casi circularmente alrededor del púlsar en pocos meses (Wolszczan, 1992) y fueron descubiertos por el radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico). Sus masas son del orden de unas pocas masas terrestres (en su caso, podemos determinar sus masas; la respuesta de la estrella a los cambios orbitales de los planetas debidos a sus perturbaciones mutuas da una estimación de las masas independientemente de la inclinación de la órbita). Por lo que respecta al tercer planeta, el más cercano al púlsar, la masa mínima es apenas mayor que la de nuestra Luna y su período orbital es inferior al mes (Wolszczan, 2000). También se ha especulado con la existencia de un cuarto exoplaneta o incluso un cometa en este sistema.

En el púlsar PSR B1620-26 también se han detectado exoplanetas. Se trata de un sistema binario formado por un púlsar con un período de 11 milisegundos y una enana blanca. En este mismo sistema se encuentra un exoplaneta de masa 2,5 masas de Júpiter y un período de 100 años (Thorsett, 1999)³¹.

5.4. Efectos dinámicos. Astrometría

Descripción: el método astrométrico busca en el plano del cielo la oscilación que induce el exoplaneta sobre el movimiento de su estrella. Este método es más eficaz para planetas masivos que orbitan alrededor de estrellas relativamente próximas. Lo importante es que ahora no se obtiene el producto $M \times \sin(i)$ sino que se puede calcular la masa del planeta directamente, pues observamos el

³¹ Para más información véase: http://www.astro.psu.edu/users/alex/pulsar_planets.htm.

movimiento de la estrella no en una, sino en dos dimensiones. Este método permite también detectar planetas en órbitas lejanas, ya que la amplitud del movimiento de la estrella es también mayor. También aquí, sin embargo, al ser el período orbital necesariamente más largo, hace falta mucho tiempo de observación, y es necesario una alta resolución espacial en las imágenes.

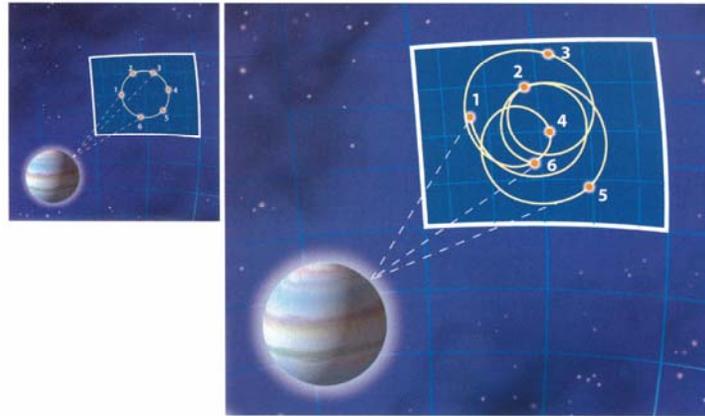


Figura 10. Contrariamente al método de las velocidades radiales en el que se mide la proyección de la velocidad de la estrella sobre la visual, el método astrométrico analiza la velocidad tangencial de la estrella, es decir, su velocidad de desplazamiento sobre el fondo del cielo. Gracias a este desplazamiento en dos dimensiones de la estrella alrededor del centro de gravedad estrella-planeta, los astrónomos determinan la masa exacta del planeta perturbador. El dibujo de la izquierda representa el movimiento de una estrella equivalente al Sol bajo la influencia de un planeta análogo a Júpiter para un observador situado a 10 parsecs³² (32,6 años-luz). El dibujo de la derecha representa lo que vería este observador si observara una copia del Sistema Solar (Sol y 9 planetas). Fuente: gráfico extraído de Lissauer (2003).

Resultados: en las navidades de 2002 se dio a conocer la primera detección astrométrica de dos planetas, ambos en la cercana estrella Gliese 876, previamente descubiertos por el método de velocidad radial. Estas observaciones fueron realizadas por el telescopio espacial Hubble.

5.5. Microlentes gravitatorias. Fotometría

Descripción: las microlentes gravitatorias han sido utilizadas para buscar la distribución de objetos de luminosidad débil en nuestra galaxia. Cuando está bajo la influencia de este fenómeno, la luz de la fuente lejana aumenta regularmente de intensidad durante semanas o meses. Si la estrella que oficia de lente posee planetas, éstos producirán breves destellos de luz si la visual desde la Tierra pasa cerca del planeta. En condiciones favorables, podrían detectarse planetas tan pequeños como nuestra Tierra (el evento duraría sólo unas horas y sería necesario, por lo tanto, la respuesta inmediata de otros telescopios capaces de seguir el evento con suficiente precisión). Pero como en el fenómeno intervienen muchos parámetros, sólo podemos estimar estadísticamente las propiedades de dichos planetas (y de las estrellas alrededor de las cuales orbitan; Peale, 1997).

³² 1 parsec=206.280 UA=3,26 años-luz=30.860.000.000.000 kilómetros.

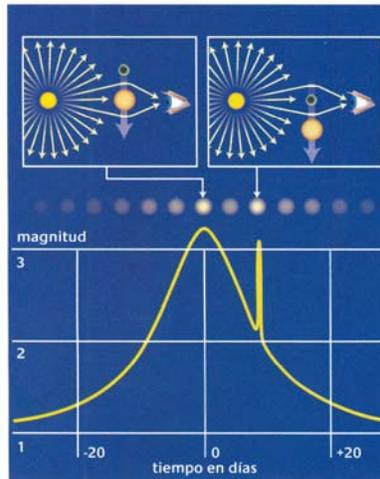


Figura 11. Una estrella que pasa cerca de la visual de un astro más lejano ocasiona un fenómeno de lente que amplifica la luminosidad de este último. Si esta estrella va acompañada de un planeta, éste puede provocar también su propio efecto de lente gravitatoria. Se podría observar entonces un segundo pico de luz muy fino cuya amplitud dependería de la masa del planeta. De la diferencia de tiempo entre ambos picos se deduce la distancia estrella-planeta. Fuente: gráfico extraído de Lissauer (2003).

Resultados: hasta la fecha varios grupos han reportado varios candidatos a exoplanetas detectados por el método de la microlente gravitatoria (véase por ejemplo los resultados de los proyectos OGLE³³ (The Optical Gravitational Lensing Experiment) o MPSP³⁴ (Microlensing Planet Search Project). En abril de 2004, Bond (2004) presenta resultados que indican una primera detección. Se trata de un planeta de 1,5 masas de Júpiter con un radio orbital de 3 UA. Los telescopios utilizados fueron el Telescopio Varsovia en el Observatorio de Las Campanas en Chile, y el telescopio de 60 centímetros del Observatorio de Mt. John en Nueva Zelanda.

5.6. Señal fotométrica. Tránsitos

5.6.1. Tránsitos primarios

Descripción: si la Tierra se encuentra en el mismo plano que el plano orbital del exoplaneta o cerca de él, entonces, visto desde la Tierra, dicho planeta eclipsa periódicamente en cada órbita la luz de su estrella. Se pueden detectar tales tránsitos midiendo cuidadosamente la luminosidad de la estrella. Se los podrá distinguir de otros efectos (como las manchas estelares) por su período y la forma muy cuadrada de su curva de variación luminosa. Aunque sólo algunos planetas son detectables con este método, se pueden observar miles de estrellas al mismo tiempo en el campo de visión de un telescopio, ofreciendo interesantes probabilidades de detección exitosa.

³³ Más información en: <http://sirius.astro.uw.edu.pl/~ogle/>.

³⁴ Más información en: <http://www.nd.edu/~srhie/MPS/>.

Este método tiene además la ventaja de que los descubrimientos pueden confirmarse con el método de las velocidades radiales y que además posee la misma estrategia observacional que el de las microlentes gravitatorias. En la actualidad consta de un gran potencial debido a los adelantos técnicos en detectores, instalaciones robotizadas y procesado de datos. Sin embargo, tiene la desventaja de que es difícil detectar exoplanetas de tipo terrestre desde telescopios situados sobre la superficie terrestre.

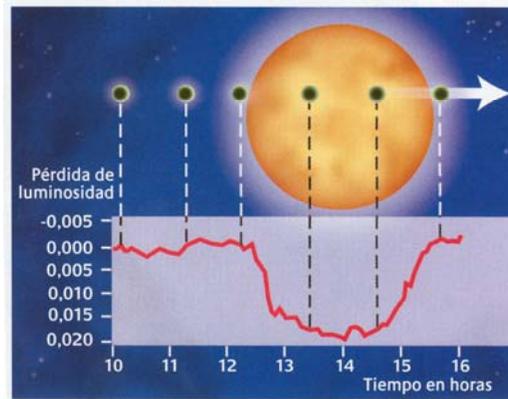


Figura 12. Para ciertos sistemas planetarios, la visual desde la Tierra se encuentra en el plano orbital de los planetas o cerca de él. En cada órbita, el exoplaneta eclipsará su estrella. La detección de este descenso de luminosidad (magnitud³⁵, duración, pendiente de la curva) permitirá incluso analizar la eventual atmósfera del exoplaneta ocultante. Fuente: gráfico extraído de Lissauer (2003).

Resultados: el compañero de la estrella de tipo solar HD209458 fue detectado por la técnica de las velocidades radiales, pero fue observado más tarde en tránsito frente a su estrella (Henry, 2000; Charbonneau, 2000), incluso con medios espectroscópicos (Queloz, 2000). Esta fue la primera vez que se detectó un exoplaneta por el método del tránsito y también la primera vez que se midió con exactitud el tamaño de un exoplaneta. Las observaciones fueron realizadas por el telescopio espacial Hubble. La medida del tránsito puso de manifiesto que el radio del planeta era del orden de 1,35 veces el de Júpiter y su masa 0,65 veces la de Júpiter. El radio y la masa permitieron determinar su densidad: HD209458b está compuesto sobre todo de hidrógeno, el más común y ligero de los elementos del Universo, pero también el principal componente de Júpiter y Saturno.

En 2002 los astrónomos pudieron observar la absorción de sodio en la luz de la estrella durante uno de los tránsitos planetarios sugiriendo la existencia de una atmósfera en el exoplaneta y convirtiéndose en la primera detección de una atmósfera extrasolar (Charbonneau, 2002). Pero aún hubo más. En 2003 se detectó hidrógeno y que la atmósfera estaba evaporándose (Vidal-Madjar, 2003) y en 2004 carbono y oxígeno (Vidal-Madjar, 2004), todo ello con el telescopio espacial Hubble³⁶. Sin embargo, no se han encontrado otras características espectrales por espectroscopía

³⁵ La magnitud en astronomía es una unidad de brillo. Una diferencia de magnitud de 1 equivale a una diferencia de flujo de radiación de 2,512 o de 100 si la diferencia en magnitudes es de 5.

³⁶ Para más información sobre HD209458b visite el sitio web: http://www2.iap.fr/exoplanetes/index_en.html.

directa durante los tránsitos (Moutou, 2001). El exoplaneta HD209458b recibe el nombre de “Osiris”.



Figura 13. Interpretación artística de la evaporación de la atmósfera de Osiris. Fuente: European Space Agency, Alfred Vidal-Madjar (Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, Francia) y NASA.

Pero realmente el primer descubrimiento de un exoplaneta por el método del tránsito se produjo en 2003 (Konacki, 2003) utilizando el Telescopio de Varsovia en el Observatorio de Las Campanas en Chile. Se trataba de la estrella OGLE-TR-56 y la masa del exoplaneta rondaba 0,9 masas de Júpiter en una órbita de tan sólo 0,023 UA. Se estimó un radio de 1,3 veces el radio de Júpiter y se obtuvo la mayor temperatura para un exoplaneta jamás observada hasta la fecha: 1.900 K. Dos nuevos planetas fueron descubiertos en 2004 (Konacki, 2004; Bouchy, 2004), teniendo los tres períodos inferiores a 3 días y confirmando su naturaleza de “Júpiteres muy calientes”. También en 2004 se anunció el cuarto planeta encontrado por el método del tránsito, esta vez desde un telescopio más cercano a nosotros. El telescopio STARE³⁷ en el Observatorio del Teide en Tenerife, miembro de la red TrES (multi-site transiting planet survey), detectaba el exoplaneta TrES-1 (Alonso, 2004). Su masa es de 0,75 masas de Júpiter y se encuentra a 500 años-luz. Esta distancia tan considerable se explica por la estrategia que sigue STARE, es decir, observar un campo de $6,1 \times 6,1$ grados muy poblado de estrellas, situado en el plano galáctico.

5.6.2. Tránsitos secundarios

Descripción: es posible también detectar exoplanetas no sólo registrando el descenso de brillo de la estrella por el tránsito del exoplaneta entre la estrella y la Tierra, sino también por el descenso de brillo como consecuencia de la ocultación del exoplaneta por la estrella (o “tránsito secundario”). Esto se consigue restando a la señal anterior al eclipse (estrella+exoplaneta) la señal del eclipse, con lo cual nos quedamos sólo con la señal de la estrella. No obstante, este método exige que la señal

³⁷ Más información en: <http://www.hao.ucar.edu/public/research/stare/stare.html>.

del exoplaneta esté lo suficientemente contrastada con respecto a la de la estrella. Por esta razón la técnica solo funciona en sistemas jóvenes y en el infrarrojo donde la diferencia de brillo entre la estrella y el exoplaneta es del orden de 400 (en el óptico es típicamente de 10.000).

Una de las ventajas de este método es que es posible aislar fotones provenientes del exoplaneta suponiendo, por lo tanto, una detección directa. Además, también es posible determinar la temperatura, la química de la atmósfera y la órbita del exoplaneta.

Resultados: el 24 de marzo de 2005 se da a conocer la primera detección por el método del tránsito secundario de un exoplaneta. El encargado de realizar tan importante logro fue el telescopio espacial Spitzer³⁸, un telescopio infrarrojo operado por NASA. El Spitzer logró aislar el “calor” procedente de los exoplanetas TrES-1 y HD 209458b, que se encuentran a 787 y 857°C respectivamente³⁹.

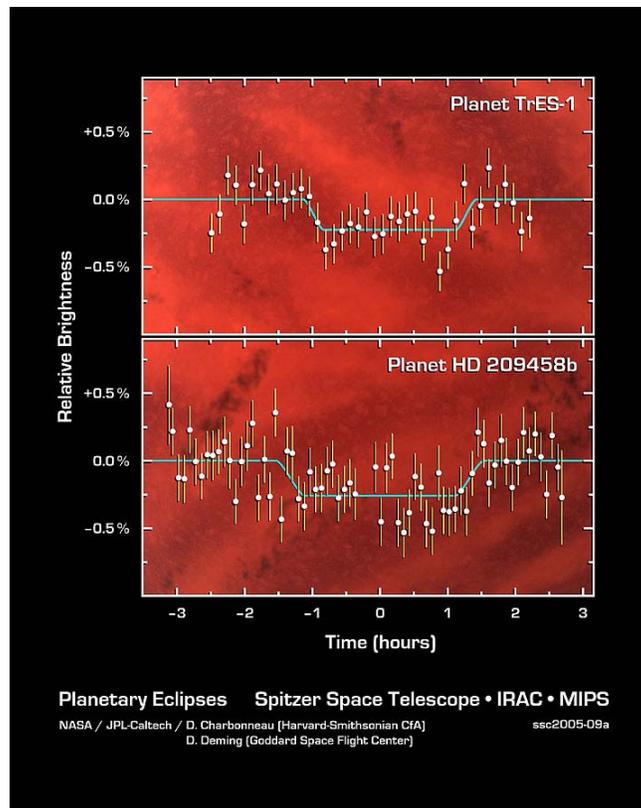


Figura 14. Detección de los exoplanetas TrES-1 y HD 209458b por el método del tránsito secundario. Aunque ya descubiertos previamente por otros métodos, estas dos detecciones suponen la primera observación directa de un exoplaneta.

5.7. Señal fotométrica. Luz reflejada

Descripción: sólo una milmillonésima parte de la luz de la estrella se refleja en planetas semejantes en órbita y tamaño a los de nuestro Sistema Solar, si bien el contraste se reduce a una millonésima

³⁸ Más información en: <http://www.spitzer.caltech.edu/>.

³⁹ La historia completa puede leerse en: <http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2005-09/index.shtml>.

para la radiación infrarroja térmica. Acentúa la dificultad la polarización de la luz a través de la óptica de los telescopios o la variabilidad de la atmósfera terrestre. No obstante, progresos tecnológicos como la óptica adaptativa deberían poder formar imágenes y efectuar estudios espectroscópicos con planetas que orbitan alrededor de estrellas próximas y/o estrellas más brillantes o jóvenes. La técnica consiste en encontrar luz con diferente efecto Doppler al de la luz de la propia estrella.

Resultados: hasta la fecha sólo se ha reportado la posible detección por este método de un exoplaneta ya previamente detectado por el método de la velocidad radial (Collier Cameron, 1999). Este hallazgo se efectuó en La Palma (ver más adelante).

5.8. Señal fotométrica. Óptica adaptativa

Descripción: la calidad de imagen de los telescopios situados en la superficie terrestre está mejorando con el desarrollo de la óptica adaptativa y en el futuro habrá que tomar en consideración la astrometría de alta precisión y la imagen directa. Sin embargo, uno de los problemas que se debe afrontar es la enorme diferencia de brillo entre el exoplaneta y la estrella: la estrella es centenares de millones de veces más brillante que el exoplaneta. Es posible reducir esta diferencia eligiendo una banda determinada del espectro electromagnético y estrellas jóvenes, por ejemplo, porque en el infrarrojo una estrella joven aparecería tan solo 10.000 veces más brillante que el exoplaneta, que radia porque está caliente. Para una revisión de los actuales y futuros proyectos para hacer imagen directa de exoplanetas utilizando óptica adaptativa véase Burrows (2005).

La óptica adaptativa presenta otro problema: los perfiles de brillo estelares presentan anillos de difracción lejos del pico central. Este efecto complica enormemente la cancelación de la luz central por medio de coronógrafos⁴⁰.

Una posibilidad es construir un coronógrafo eficiente para la óptica adaptativa. En la actualidad el proyecto Lyot⁴¹ utilizará un coronógrafo que no sólo es capaz de bloquear la luz central de la estrella sino también algunos discos de difracción. Si el exoplaneta cae en las zonas no bloqueadas aparecerá visible. También resulta una técnica muy interesante para la observación de discos planetarios: cualquier discontinuidad podría ponernos en la pista de la presencia de un exoplaneta.

⁴⁰ Un coronógrafo estelar es un instrumento que bloquea la luz de una estrella brillante con el objetivo de detectar objetos débiles en las proximidades. Para ello se coloca una máscara opaca en el plano focal del telescopio, que impide que un porcentaje alto de la luz de la estrella brillante continúe su recorrido por el interior del instrumento hasta el detector.

⁴¹ Más información en: <http://lyot.org/>.

Resultados: el 30 de abril de 2005 la prensa anuncia la obtención de la primera imagen directa de un exoplaneta. El logro fue conseguido por el sistema de óptica adaptativa NACO⁴² en el telescopio Yepun del Very Large Telescope. Previamente en septiembre de 2004 ya se había adelantado la posibilidad de que el objeto registrado fuera un exoplaneta pero la confirmación no llegó hasta el siguiente año cuando se realizaron nuevas observaciones⁴³.

El exoplaneta se denomina 2M120b y tiene una masa $5 M_{\text{Júpiter}}$. Se encuentra a 55 unidades astronómicas de una estrella de tipo enana marrón que es tan solo 100 veces más brillante que el exoplaneta en el infrarrojo cercano.

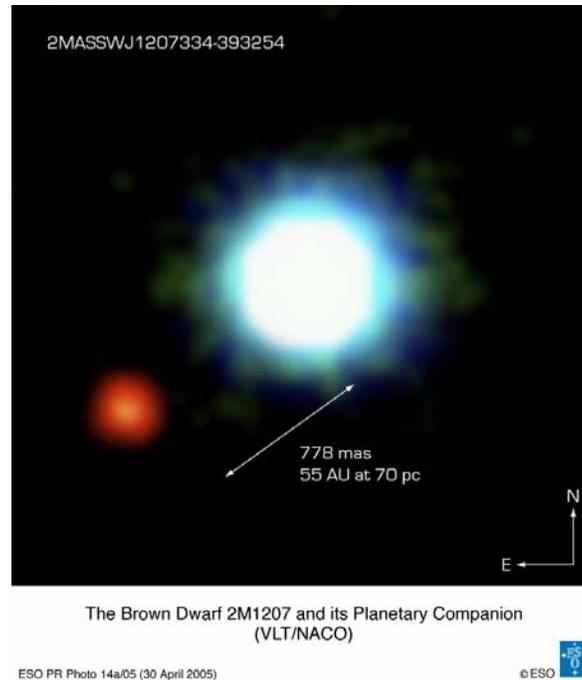


Figura 15. Primera imagen directa de un exoplaneta. Fue obtenida con un sistema de óptica adaptativa en uno de los mayores telescopios del mundo, el VLT.

5.9. Señal fotométrica. Imagen directa. Búsqueda de objetos de masa planetaria aislados

Descripción: desde el descubrimiento de las enanas marrones⁴⁴ tanto aisladas como en cúmulos estelares jóvenes, muchas cuestiones quedan por resolver. Una muy importante es la masa mínima para la formación de objetos de muy baja masa en ambientes aislados, lo cual representaría la parte final de la Función Inicial de Masas (FIM) para este tipo de objetos (o número de objetos producidos por rango de masas). El límite superior de masa para considerar un objeto un planeta es de 13 masas de Júpiter, que es también el límite por debajo del cual la fusión de deuterio no es posible. Sin embargo, búsquedas fotométricas y espectroscópicas recientes sugieren que el límite

⁴² Más información en: <http://www.eso.org/instruments/naco/>.

⁴³ La nota de prensa completa puede leerse en <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2005/pr-12-05-p2.html>.

⁴⁴ Objetos incapaces de fusionar hidrógeno de forma estable en su interior y con masas comprendidas entre 72 y 13 masas de Júpiter.

podría estar por debajo de las 13 masas de Júpiter y de hecho se han encontrado objetos de masas comprendidas entre 5 y 10 masas de Júpiter en cúmulos jóvenes en Orión que cubren todo el rango espectral L.

Si objetos de masas planetarias pueden encontrarse aislados también se podría pensar que es posible encontrar “planetas” aislados. No obstante, esto violaría la definición que hemos tomado como referencia en el apartado 5.1 pues necesitamos una estrella alrededor de la cual gire. Planeta o no, la búsqueda de objetos aislados de masa planetaria puede aportar luz al conocimiento de los procesos de formación de semejantes objetos.

Las búsquedas se efectúan por comparación de colores en el infrarrojo cercano debido a que son objetos muy fríos.

Resultados: la primera detección de un objeto de este tipo se produjo precisamente en La Palma (ver más abajo).

6. La búsqueda de exoplanetas desde La Palma

El Observatorio del Roque de los Muchachos se subió al tren de la carrera por la búsqueda de la vida hace ya varios años. Sin embargo, se puede distinguir claramente un doble papel hasta la fecha: la utilización de variadas y novedosas técnicas haciendo uso de la versatilidad de las instalaciones y el descubrimiento masivo de exoplanetas (a partir de 2004). A continuación resumiremos los proyectos más relevantes e indicaremos los hitos observacionales más importantes.

6.1. EXPORT

En 1998 el equipo EXPORT (EXoPlanetary Observational Research Team) obtuvo tiempo en los telescopios de los observatorios canarios a través de un programa de tiempo internacional⁴⁵. El programa se titulaba “Planetary Systems: their formation and properties” (los sistemas planetarios: su formación y propiedades). El proyecto se basaba en el estudio de la formación y evolución de sistemas planetarios, la búsqueda de características espectrales en los tránsitos planetarios de las estrellas tau Bootis y 51 Pegasi como consecuencia de la evaporación de la atmósfera exoplanetaria y la búsqueda de exoplanetas por los métodos del tránsito y microlentes gravitatorias. Para ello se utilizaron los siguientes telescopios e instrumentos: William Herschel+UES⁴⁶, Isaac Newton+IDS⁴⁷, Nordic Optical+Turpol⁴⁸ y Jacobus Kapteyn+CCD⁴⁹. Para la búsqueda de exoplanetas por el método del tránsito se observaron tres cúmulos abiertos bien

⁴⁵ International Time Programme o ITP. Este tipo de programas reciben el 5% del tiempo de observación todos los años en los telescopios canarios de acuerdo con el Acuerdo Internacional en Materia de Astrofísica firmado en 1979.

⁴⁶ Más información sobre UES en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/ues/index.html>.

⁴⁷ Más información sobre IDS en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/ids/index.html>.

⁴⁸ Más información sobre Turpol en: <http://www.not.iac.es/instruments/turpol/>.

⁴⁹ Más información sobre la cámara CCD del telescopio Jacobus Kapteyn en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/telescopes/jkt/index.html>.

poblados de estrellas con el telescopio Jacobus Kapteyn. Se obtuvieron cientos de imágenes de las mismas regiones de cada cúmulo y se monitorizaron aproximadamente 1.000 estrellas. No se encontró ningún evento relevante⁵⁰.



Figura 16. Izquierda: telescopio Jacobus Kapteyn en funcionamiento. Fuente: Nik Szymanek. Derecha: imagen obtenida por el telescopio Jacobus Kapteyn del cúmulo abierto Messier 103 o NGC 581. En objetos de este tipo se desarrolló el programa EXPORT. Fuente: Thomas Hardy School.

6.2. TEP

El proyecto TEP (Transits of Extrasolar Planets) tenía como objetivo obtener una gran secuencial temporal fotométrica de estrellas candidatas a albergar planetas extrasolares y que pudieran detectarse por el método del tránsito. Se obtuvieron 17.176 puntos fotométricos de la estrella CM Draconis con varios telescopios en el mundo, entre ellos el Jacobus Kapteyn y el Isaac Newton durante tres años. Sin embargo, a pesar de registrarse varios candidatos a tránsitos, ninguno fue confirmado como tal (Deeg, 1998).



Figura 17. Telescopio Isaac Newton en funcionamiento. La cámara para imagen directa en el foco primario (Wide Field Camera) es claramente visible. Fuente: Nik Szymanek.

⁵⁰ Para más información véase: <http://laeff.esa.es/EXPORT/>.

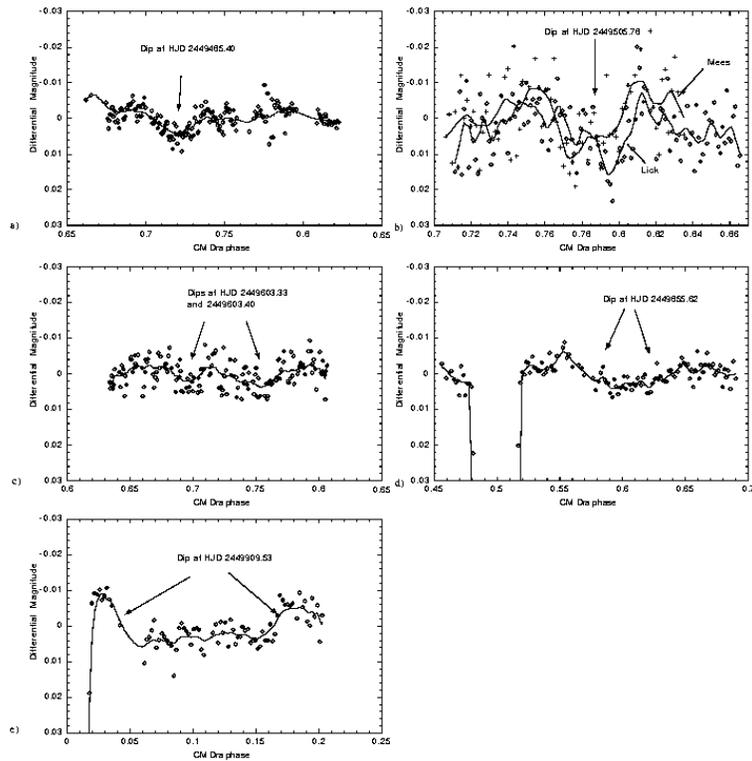


Figura 18. Cinco candidatos a tránsitos en la campaña de CM Draconis. Ninguno de ellos pudo ser confirmado como un auténtico tránsito planetario. Fuente: gráfico extraído de Deeg (1998).

6.3. La búsqueda de luz reflejada en un planeta extrasolar

El espectrógrafo de alta resolución echelle UES del telescopio de 4.2 metros de diámetro William Herschel fue utilizado a finales de los años 90 para encontrar luz reflejada por el exoplaneta que orbita alrededor de tau Bootis, detectado previamente por el método de la velocidad radial. Se reportó la probable detección y, por consiguiente, la primera detección directa de un exoplaneta en el año 1999 (Collier Cameron, 1999), al que se llamó “Milenio”. No obstante, no ha podido detectarse de nuevo el “reflejo” del exoplaneta hasta la fecha, y por consiguiente, se atribuye tal reflejo a un posible efecto instrumental.



Figura 19. Izquierda: espectrógrafo UES instalado en uno de los focos Nasmyth del telescopio William Herschel. Fuente: ING. Derecha: impresión artística del planeta Milenio. Fuente: Hardy.

6.4. Búsqueda de tránsitos con la WFC del INT

En 1999 y 2000 se utilizó la Wide Field Camera (WFC) del Telescopio Isaac Newton para detectar tránsitos planetarios en tres cúmulos abiertos de alta metalicidad. Se obtuvieron datos fotométricos de más de 121.000 estrellas. Los resultados se publicaron entre abril de 2003 y junio de 2005 y los resultados fueron: cúmulo NGC 6819 (11 candidatos; Street et al., 2003), cúmulo NGC 6940 (18 candidatos; Hood et al., 2005) y cúmulo NGC 7789 (24 candidatos; Bramich et al., 2005), todos a la espera de la determinación de la masa por el método de la velocidad radial. El radio mínimo de exoplaneta detectado fue de $1.5 R_{\text{Júpiter}}$.

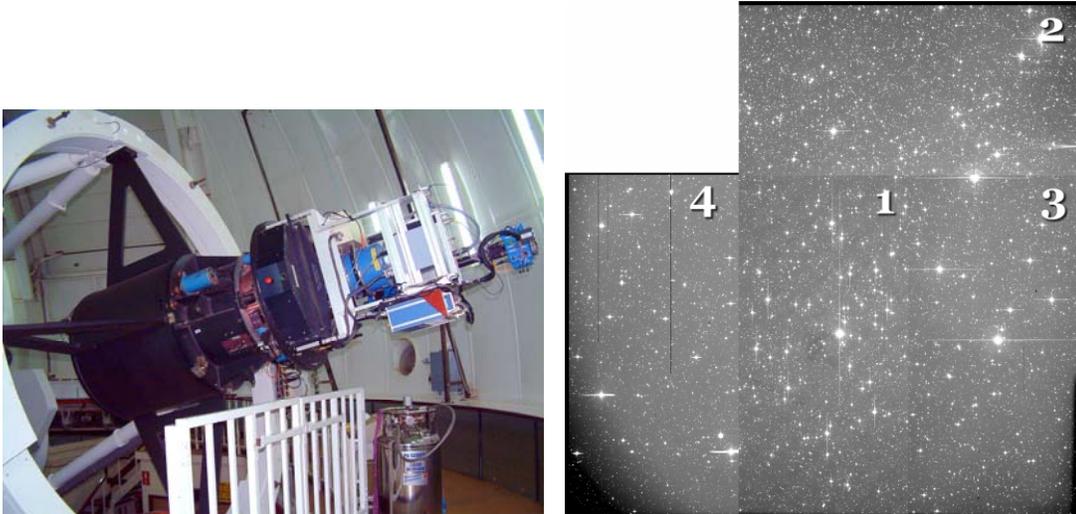


Figura 20. Izquierda: La Wide Field Camera en el foco primario del Telescopio Isaac Newton. Derecha: Uno de los cúmulos estelares observados.

6.5. Detección de planetas aislados

En octubre de 2000 se dio a conocer en la revista *Science* (Zapatero, 2000) el descubrimiento de al menos tres planetas extrasolares aislados con el telescopio Isaac Newton de masas comprendidas entre 5 y 15 masas de Júpiter y temperaturas en torno a los 1.500 grados centígrados, aunque con el tiempo irán enfriándose hasta alcanzar una temperatura comprendida entre 0 y 100 grados centígrados, sin que desarrollen una superficie rocosa.

El descubrimiento de estos exoplanetas supuso un desafío para la teoría. Estos cuerpos parecen demasiado numerosos y jóvenes para haberse formado en discos protoplanetarios y haber sido expulsados después como resultado de las colisiones entre las estrellas que poseen esos discos. Podrían, en cambio, haber surgido directamente de la fragmentación y el colapso de las nubes de gas, un proceso que quizá ocurra en tan sólo unos pocos millones de años.

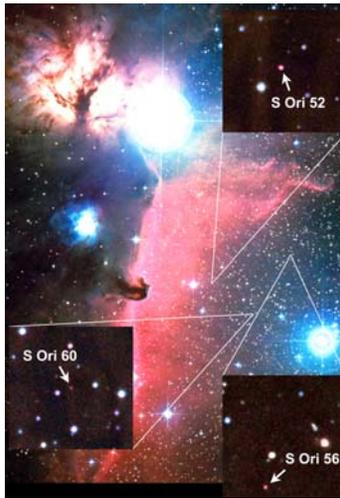


Figura 21. Los primeros objetos aislados fueron encontrados en el cúmulo σ Orionis, en la constelación de Orión. En la imagen pueden verse varios. Fuente: Instituto de Astrofísica de Canarias.

En 2002 se dio a conocer la detección del objeto extrasolar de menor masa jamás observado (Zapatero Osorio, 2002). Se trata de un objeto denominado S Ori 70 de masa comprendida en 1,5 y 5,5 masas de Júpiter y temperatura en torno a los 1.100 K⁵¹. Se encuentra situado a unos 440 parsecs y su radio es 1,6 veces el radio de Júpiter. S Ori 70 es un objeto aislado y podría pertenecer al cúmulo estelar joven abierto σ Orionis (Martín y Zapatero, 2003), sugiriendo la posibilidad de que se podrían formar planetas aislados en el proceso de formación de cúmulos estelares. No obstante, la discusión continúa pues otros autores indican que podría tratarse de una estrella enana marrón muy fría de campo.

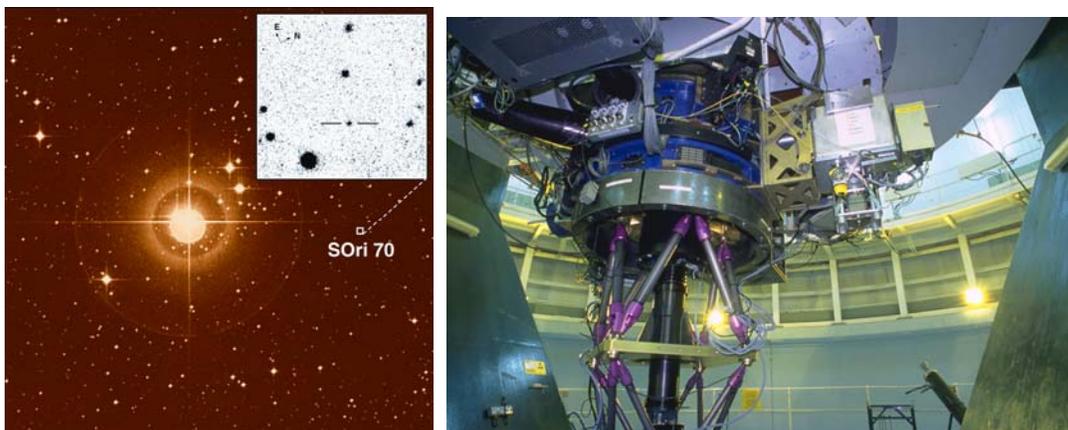


Figura 22. Izquierda: imagen de la región en torno a la estrella σ Orionis. Se indica la presencia de S Ori 70 y arriba a la derecha se muestra una imagen del mismo objeto realizada por la cámara infrarroja INGRID⁵² instalada en el telescopio William Herschel. Fuente: extraído de Zapatero Osorio (2002). Derecha: la cámara INGRID (arriba a la derecha) instalada en unos los focos auxiliares del foco Cassegrain del telescopio William Herschel. Fuente: Rainer Girnstein.

⁵¹ Más información en: <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/Martin5-20-02.html>.

⁵² Más información sobre INGRID en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/ingrid/index.html>.

6.5. Búsqueda por el método de la microlente gravitatoria

El telescopio Jacobus Kapteyn fue utilizado en el año 2000 para la búsqueda de exoplanetas por el método fotométrico de la microlente gravitatoria en coordinación con el proyecto OGLE. Sin embargo, no se obtuvieron resultados relevantes (Tsapras, 2000).

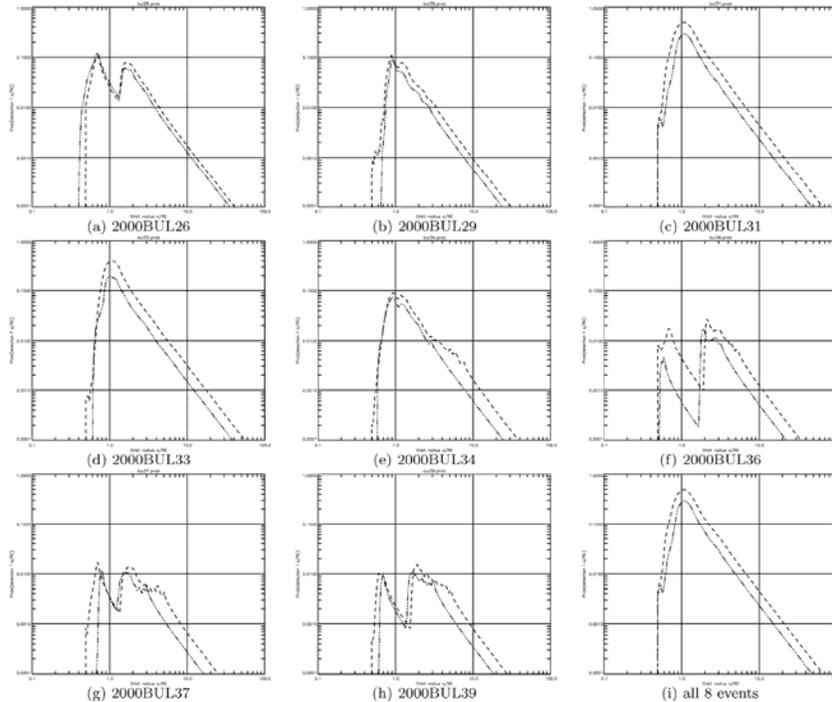


Figura 23. Varios de los eventos seguidos en el telescopio Jacobus Kapteyn. Sólo dos mostraban una probabilidad de detección del 20 al 30%. Fuente: extraído de Tsapras (2000).

6.6. El SARG Exo Planets Search

El SARG Exo Planets Search⁵³ es una búsqueda de exoplanetas por el método de la velocidad radial realizada con el espectrógrafo echelle SARG⁵⁴ situado en uno de los focos Nasmyth del telescopio nacional italiano Galileo (TNG) de 3.6 metros de diámetro. Para aumentar la precisión de las medidas de las velocidades radiales se utiliza una célula de absorción de yodo colocada antes de la entrada a la rendija del espectrógrafo y después del derrotador, en la parte colimada del haz de luz.

⁵³ Más información en: http://www.pd.astro.it/new_sites/ESP/index.htm.

⁵⁴ Más información sobre SARG en: <http://www.tng.iac.es/instruments/sarg/sarg.html>.



Figura 24. El Spettrografo Alta Risoluzione Galileo (SARG) se encuentra en el foco Nasmyth B del telescopio italiano Nazionale Galileo (TNG). Entre sus características se encuentra una alta resolución espectral (resolución máxima $\mathfrak{R} \sim 150.000$) y alta eficiencia (pico en torno a 13%). Fuente: TNG.

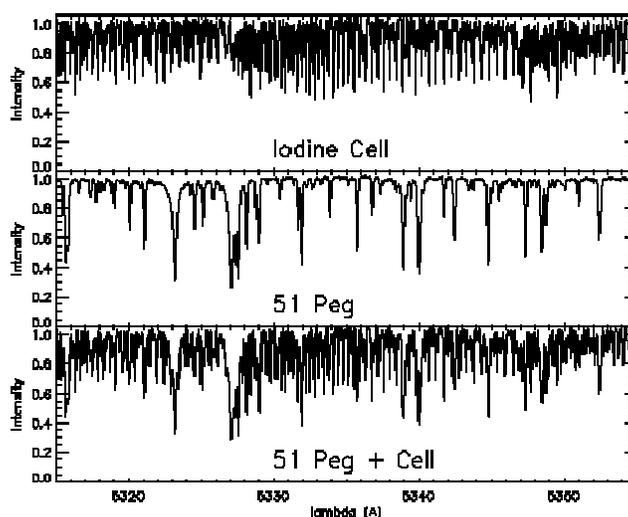


Figura 25. La técnica consiste en superponer el espectro de absorción del yodo sobre el espectro del objeto que estamos observando. Debido a la situación de la célula en el espectrógrafo, las líneas de referencia de yodo no muestran desplazamiento frente a posibles flexiones del instrumento, ofreciendo pues un rango de líneas muy estable. Además, produce una gran cantidad de líneas en el rango espectral de las observaciones y con perfiles apropiados para el trabajo de alta resolución. El panel superior muestra el espectro de la célula de yodo, en el centro el de la estrella 51 Peg y debajo la suma de ambos tal como se observa en el espectrógrafo. La resolución alcanzable es de 5 metros por segundo aproximadamente. El yodo se mantiene a una temperatura constante de 61 grados centígrados (temperatura de sublimación de 46 grados centígrados). Fuente: TNG.

En el año 2003 se anunció el descubrimiento de un exoplaneta utilizando esta configuración instrumental (Desidera, 2003). El planeta en cuestión orbita alrededor de la estrella b del sistema binario HD219542 y fue encontrado en el transcurso de un programa en busca de exoplanetas en sistemas estelares binarios. Sin embargo, resultó ser una falsa alarma (Desidera, 2004).

6.7. PLANETPOL

Aunque el método de la velocidad radial ha sido el más prolífico hasta la fecha, sin embargo, debido a la incertidumbre en el conocimiento de la inclinación del sistema, no permite determinar la masa del exoplaneta directamente. Además no ofrece información sobre su

composición química. La observación directa utilizando, o bien interferometría, o bien espectroscopía de alta resolución, intenta solucionar este problema. Sin embargo, los avances técnicos actuales en ambos métodos de observación, no permiten la detección de ningún exoplaneta todavía.

PLANETPOL⁵⁵ (Hough, 2003) es un instrumento que mide el grado de polarización⁵⁶ de la luz hasta una sensibilidad de una parte entre un millón. Su objetivo es detectar directamente la luz reflejada y polarizada por los exoplanetas, ofreciendo también información sobre su atmósfera, temperatura y radio.

Cuando la luz se refleja en la atmósfera o superficie de un planeta parte es reflejada y parte es refractada. La luz reflejada, al igual que la refractada, sufre un cambio de polarización con respecto a la luz incidente. Esto obviamente depende de la longitud de onda, la composición química y el estado físico del exoplaneta. En cambio, la luz estelar presenta poca polarización.

PLANETPOL mide el grado de polarización en la luz estelar con el objetivo de encontrar una variación periódica en el grado de polarización que siga el movimiento correspondiente al exoplaneta. La señal polarizada del exoplaneta tiene un contraste mayor con respecto a la estelar en relación con otros métodos directos, como el espectroscópico. Este contraste puede ser aún mayor si el grado de polarización de la luz de la propia estrella es mínimo, es decir, por ejemplo, si tiene pocas manchas estelares (que provocan polarización por medio del efecto Zeeman).

PLANETPOL tuvo su bautizo de observación en el foco Cassegrain del telescopio William Herschel el 22 de abril de 2004. Desde entonces ha disfrutado de varias noches de observación en los que ha podido recoger una cantidad importante de datos. Sus objetos han sido estrellas que se sabe tienen exoplanetas por el método radial. Todavía no han sido publicados los datos.

⁵⁵ Más información en: http://www.ing.iac.es/PR/wht_info/whtplanetpol.html.

⁵⁶ La luz es una onda electromagnética con una dirección de propagación determinada. Si en un plano perpendicular a la dirección de propagación la luz está confinada en una línea recta (o la onda de la luz está confinada en un plano determinado a medida que se propaga) entonces se dice que la luz está polarizada lineal. Si lo hace en una circunferencia (desfase de 90 grados entre picos y valles) entonces se dice que está polarizada circular. Finalmente, la combinación de ambos comportamientos produce polarización elíptica. El grado de polarización de la luz depende de los fenómenos presentes en la fuente, pero también de los medios que atraviesa (reflexiones y refracciones). Por ejemplo, dependiendo del medio y del ángulo de incidencia, un rayo de luz antes de una reflexión puede tener polarización nula y después podría estar completamente polarizado lineal. La detección de exoplanetas por polarimetría aprovecha este fenómeno para aumentar el contraste de la señal de un exoplaneta con respecto a su estrella.



Figura 26. PLANETPOL montado en el foco Cassegrain del telescopio William Herschel y equipo de observadores. Fuente: Javier Méndez.

6.8. SuperWASP

SuperWASP (Wide-Angle Survey Patrol)⁵⁷ es una nueva instalación cuyas características técnicas le permiten cubrir un gran campo de visión con detectores CCD al mismo tiempo que monitorizar un gran número de objetos brillantes debido a su operación robotizada. Estas características hacen que SuperWASP pueda detectar eventos transitorios en el cielo, como tránsitos de planetas extrasolares, contrapartidas ópticas a los estallidos de rayos gamma (GRB) y asteroides cercanos a la Tierra (en rápido movimiento).

La historia de SuperWASP se remonta a 1996. En el Grupo de Telescopios Isaac Newton un astrónomo llamado Don Pollacco desarrolla una cámara cometaria (CoCAM) para observar el cometa Hyakutake utilizando una CCD de 1.280×2.220 píxeles y un campo de visión de 30×40 minutos de arco.

Con ocasión de la visita del cometa Hale-Bopp en 1997 se construye una nueva cámara, CoCAM2⁵⁸. Esta vez hacía uso de un objetivo Pentax de 180 milímetros a f2,8. Utilizaba un detector de 2.048×2.048 píxeles y un campo de visión de 10×10 grados. El instrumento produce fotometría de precisión. El resultado es que se ofrecen en Internet imágenes diarias del cometa desde enero a abril de 1997. El 16 de abril de 1997 CoCAM2 descubre la cola de sodio en el cometa Hale-Bopp⁵⁹. Se considera el resultado de astrofísica observacional más barato y de mayor relevancia jamás publicado (Cremonese, 1997).

⁵⁷ Más información en: <http://www.superwasp.org/>.

⁵⁸ Más información en: <http://www.ing.iac.es/PR/HB/CoCAM.html>.

⁵⁹ La nota de prensa puede leerse en: http://www.ing.iac.es/PR/press/Press_Release_ING497.html.



Figura 27. CoCAM2 instalada en el edificio del telescopio Isaac Newton, fuera de la cúpula. Fuente: Javier Méndez.

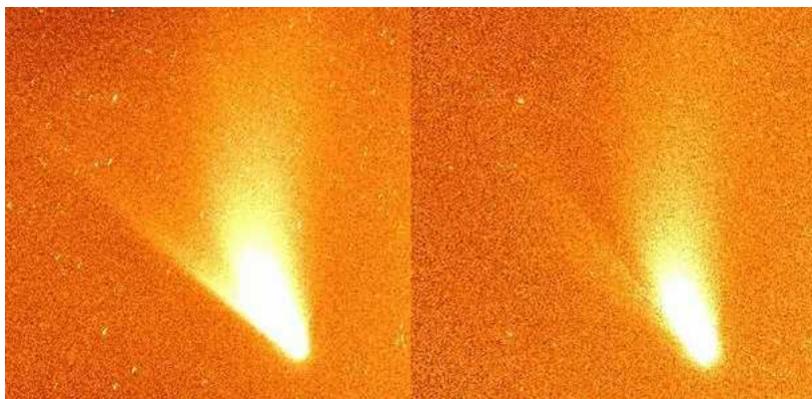


Figura 28. Imágenes del descubrimiento de la cola de sodio en el cometa Hale-Bopp el 16 de abril de 1997. La cola de sodio es la cola recta de la imagen de la izquierda no visible en la imagen de la derecha (Cremonese, 1997).

La siguiente generación es WASP0, un prototipo de cámara desarrollado por la Queen's University Belfast y St. Andrews University del Reino Unido. Utiliza un detector Apogee de 2.048x2.048 píxeles y 14 bits. Se opera tres meses en La Palma y seis en Grecia. WASP0 consigue detectar el exoplaneta HD209458b por el método del tránsito, previamente descubierto por el método de la velocidad radial y redescubierto en tránsito.

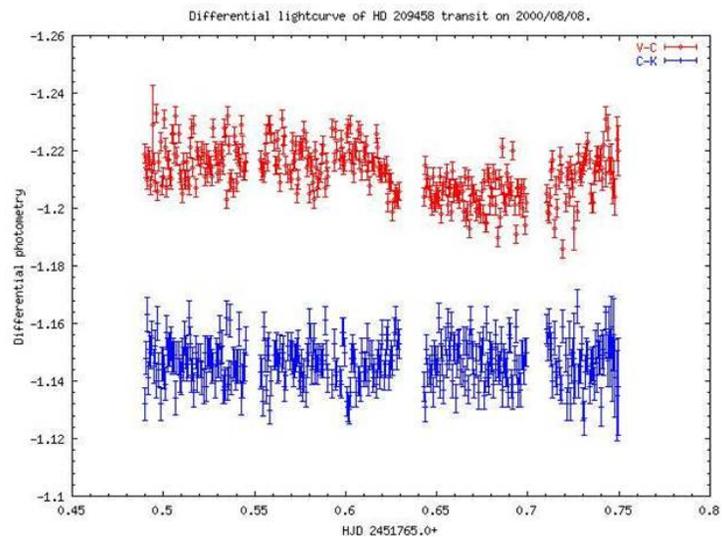


Figura 29. Tránsito del exoplaneta HD209458b observado por WASP0. Fuente: Don Pollacco.

A continuación se decide desarrollar SuperWASP entre las universidades de Queen's Belfast, Cambridge, Keele, Leicester, Open, St. Andrews y el Grupo de Telescopios Isaac Newton y el Instituto de Astrofísica de Canarias.

SuperWASP se compone de 8 cámaras, cada una consistiendo en un objetivo Canon a f1.8 y 200 milímetros, y un detector CCD e2v42 de 2.048×2.048 píxeles termoeléctricamente refrigerado y de 16 bits. El tamaño angular de los píxeles es de 14 segundos de arco con lo que cada cámara cubre unos 7,8×7,8 grados. La resolución fotométrica es menor que el 1% para estrellas más brillantes que la magnitud 13 en una exposición de 30 segundos (tiempo de integración típico). Esta resolución es la necesaria para el método de los tránsitos. SuperWASP detecta objetos con una señal 3 veces sobre el ruido de fondo hasta magnitud 16,5 en una integración de 30 segundos. Con la configuración completa de 8 cámaras montadas en una montura ecuatorial (500 grados cuadrados en el cielo por exposición; 300 grados cuadrados para cinco cámaras), SuperWASP puede cubrir todo el cielo accesible una noche con 67 apuntados, y todo el cielo visible desde el instrumento en 40 minutos tan sólo.

El instrumento fue inaugurado el 16 de abril de 2004⁶⁰ al cumplirse el aniversario del descubrimiento de la cola de sodio, y está ya operativo, aunque con 5 cámaras y sin operación robótica. Se espera que este invierno alcance la máxima operatividad.

⁶⁰ Información sobre la inauguración puede encontrarse en: <http://www.ing.iac.es/PR/newsletter/news8/ins3.html>.



Figura 30. Izquierda: vista actual de las cámaras y la montura de SuperWASP. Fuente: Jens Moser. Derecha: vista externa de la instalación (pequeño edificio en el centro de la imagen). Fuente: SuperWASP.



Figura 31. Izquierda: una de las primeras imágenes de SuperWASP: el cometa NEAT con tan solo dos CCDs. Fuente: Don Pollacco. Derecha: momento de la inauguración remota desde el edificio Mayantigo en Santa Cruz de La Palma. Fuente: Javier Méndez.

SuperWASP monitorizará un gran número de estrellas con magnitudes comprendidas entre 7 y 13. A partir de los descubrimientos recientes de exoplanetas, sabemos que aproximadamente el 1% de las estrellas de tipo solar tienen “Júpiteres calientes”, es decir, planetas del orden del tamaño de Júpiter orbitan muy cerca de sus estrellas en tan sólo días o semanas. No obstante, hasta ahora sólo conocemos límites inferiores de masa. Si las inclinaciones de las órbitas están distribuidas de forma aleatoria entonces aproximadamente el 10% de los sistemas deberían tener una inclinación de aproximadamente 90 grados y, por lo tanto, serían favorables para observar un tránsito planetario. Por otro lado, planetas del tamaño de Júpiter ó 0,1 veces el diámetro del Sol, deberían provocar una caída de brillo del 1%. Se espera que SuperWASP sea capaz, por lo tanto, de detectar 50 nuevos planetas extrasolares por año.

Cada cámara tomará 1.000 imágenes por noche, es decir, unos 40 Gigabytes de datos por noche para cinco cámaras o unos 10 Terabytes de datos por año. Es posible que algunas alertas automáticamente sean enviadas al telescopio robótico de 2 metros de diámetro Liverpool, situado tan sólo unos metros más abajo en la misma colina (ver más adelante).

Cada 36 segundos SuperWASP habrá originado unas 50.000 medidas de brillo que formarán parte de una base de datos que tendrá unos 50 millones de nuevos registros cada noche.

6.9. El espectrógrafo echelle FIES del Telescopio Óptico Nórdico

El FIES (Fiber Echelle Spectrograph)⁶¹ es un espectrógrafo echelle de alta resolución $\mathfrak{R}=60.000$ que es alimentado desde el foco Cassegrain del Telescopio Óptico Nórdico (NOT) por fibra óptica. La posibilidad de utilizar una fibra óptica le confiere a este instrumento dos características: se puede situar en un lugar estable que evite las flexiones del instrumento y, en segundo lugar, puede estar disponible todas las noches. Estas dos características convierten a FIES en un instrumento potencialmente interesante para la búsqueda de exoplanetas por el método radial. FIES vio su primera luz en el telescopio NOT en noviembre de 2003. Existen planes para la construcción de un pequeño habitáculo en el exterior del edificio para colocarlo permanentemente, dotándolo de una mayor estabilidad. Sin embargo, en la actualidad no hay ningún programa para la búsqueda de planetas extrasolares.

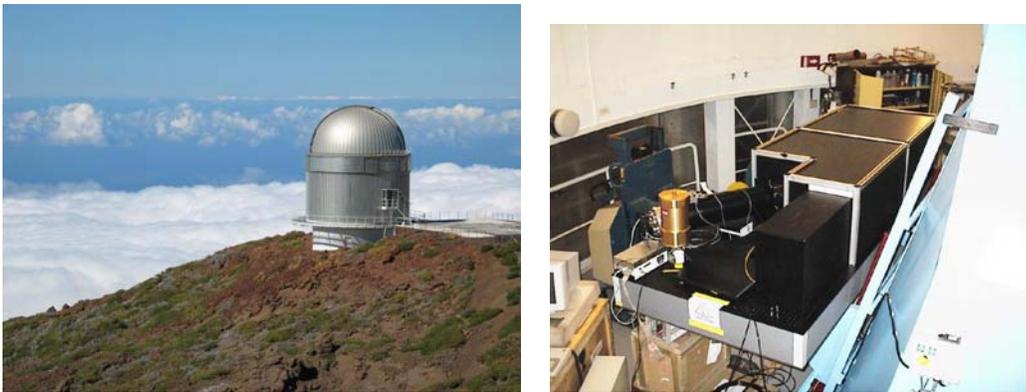


Figura 32. Izquierda: Telescopio Óptico Nórdico (NOT). Derecha: espectrógrafo FIES en su actual ubicación dentro de la cúpula. Fuente: NOT (ambas fotografías).

El NOT dispone de otro espectrógrafo de alta resolución, SOFIN⁶². SOFIN (SOviet FINish Spectrograph) es también un espectrógrafo echelle de alta resolución, pero en este caso la entrada del espectrógrafo es una rendija. Puede utilizar varias cámaras. La de mayor longitud focal le confiere una resolución $\mathfrak{R}=180.000$. Sin embargo, la flexión del instrumento cuando el telescopio está en movimiento le hacen inadecuado para la medición de velocidades radiales (SOFIN está situado en el foco Cassegrain).

⁶¹ Más información en: <http://bigcat.phys.au.dk/~srf/FIES/>.

⁶² Más información en: <http://cc.oulu.fi/~ilyin/sofin/sofin/sofin.html>.

6.10. Imagen directa con óptica adaptativa en el telescopio William Herschel

El sistema de óptica adaptativa del telescopio William Herschel, NAOMI⁶³, corrige las aberraciones introducidas por la turbulencia atmosférica en las imágenes ofreciendo resoluciones de 0,2 a 0,3 segundos de arco en el rango óptico de longitudes de onda y del límite de difracción del telescopio, 0,15 segundos de arco, en el infrarrojo cercano. En esta última configuración NAOMI utiliza la cámara INGRID, la cámara infrarroja del ING. Varios programas hacen uso de la configuración NAOMI+INGRID para obtener imágenes directas de objetos subestelares (enanas marrones y exoplanetas gigantes) alrededor de estrellas jóvenes de la vecindad solar (a menos de 50 parsecs) y aislados.

El principal problema con que se enfrenta la detección directa de exoplanetas es el enorme contraste de brillo entre la estrella y el exoplaneta. Por ejemplo, si hubiera un planeta como Júpiter alrededor de la estrella más cercana, Próxima Centauri, éste tendría una magnitud de 21,8 y estaría a 3,9 segundos de arco de la estrella. Sin embargo, todavía a esa distancia y en sistemas limitados por difracción (óptica adaptativa) en telescopios de 4 metros de diámetro, habría un halo de luz proveniente de la estrella 10.000 veces más débil que la parte central de la estrella, y Júpiter sería 50.000 menos brillante que la estrella central, es decir, no sería detectable⁶⁴. Hay una forma de evitar algo este problema.

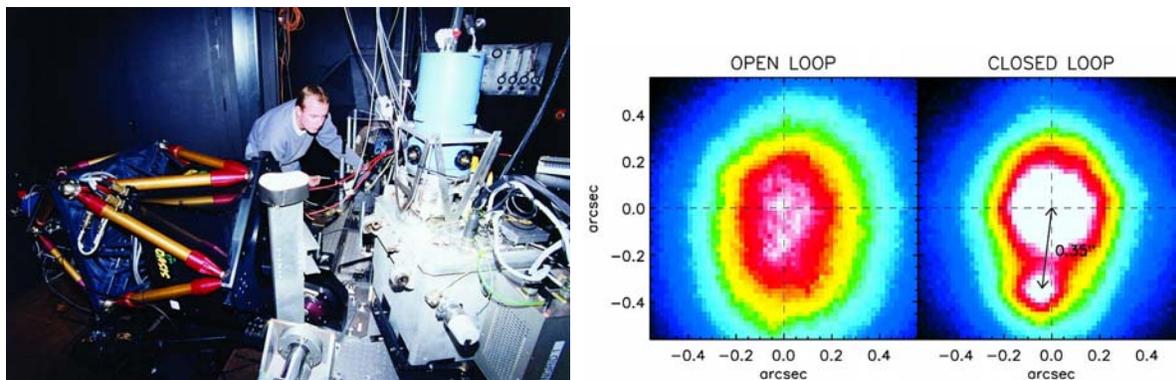


Figura 33. Izquierda: instrumentos de óptica adaptativa en el laboratorio GRACE situado en uno de los focos Nasmyth del telescopio William Herschel. A la izquierda es visible OASIS⁶⁵, un espectrógrafo de área⁶⁶ optimizado para óptica adaptativa, y a la derecha INGRID. Fuente: Javier Méndez. Derecha: imagen de un sistema estelar binario obtenida por OASIS. A la izquierda sin corrección de óptica adaptativa, a la derecha con corrección. Fuente: OASIS team.

⁶³ Más información en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/naomi/index.html>.

⁶⁴ Ver http://www.exoplanet.de/direktsuche/direct_detection.html para una discusión más pormenorizada.

⁶⁵ Más información en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/oasis/index.html>.

⁶⁶ Un espectrógrafo de área es un instrumento que secciona su campo de visión en elementos individuales prácticamente contiguos de los cuales obtiene un espectro electromagnético.



Figura 34. Prueba del sistema de estrella artificial efectuada el 5 de abril de 2004 como parte de los preparativos para el sistema GLAS⁶⁷. GLAS permitirá la observación con óptica adaptativa en el 100% del cielo accesible desde el telescopio William Herschel. Fuente: Javier Méndez.

Los objetos subestelares son considerablemente más luminosos durante sus primeras etapas evolutivas con lo cual la diferencia de brillo del exoplaneta con respecto a su estrella, en especial si se trata de estrellas de tipo tardío o frías. Sin embargo, y a pesar de utilizar instrumentos de óptica adaptativa, sólo es posible detectar exoplanetas a distancias de la estrella principal mayores que 10 UA para una estrella situada a 82 años-luz, y con masa mínima 1 masa de Júpiter (para estrellas menores de 10 millones de años) y 5 masas de Júpiter (para edades menores de 100 millones de años). A pesar de la distancia a la estrella, una detección en este rango de distancias podría esclarecer el proceso de formación de exoplanetas gigantes aislados o ligados.

Hasta la fecha no se ha reportado la detección de ningún exoplaneta con este sistema.

Este tipo de observaciones forman parte del programa JOVIAN⁶⁸ del Instituto de Astrofísica de Canarias que tiene como objetivo la detección, estudio y caracterización de exoplanetas gigantes, enanas marrones y estrellas de baja masa.



Figura 35. Logotipo del programa JOVIAN. Fuente: Instituto de Astrofísica de Canarias.

⁶⁷ Más información en: http://www.ing.iac.es/About-ING/Strategy/glas_web_announcement.htm.

⁶⁸ Más información en: <http://www.iac.es/project/jovian/index.html>.

El sistema NAOMI+INGRID también ofrece la posibilidad de utilizar un coronógrafo denominado OSCA⁶⁹. Este instrumento bloquea la luz de un objeto brillante en el campo de visión con la finalidad de estudiar sus cercanías (reduce el contraste con respecto a la estrella central). No obstante, el rendimiento de este instrumento es limitado debido a las dificultades para bloquear la imagen de una estrella brillante producida por un sistema limitado por difracción. Aunque OSCA dispone de máscaras de hasta 0,2 segundos de arco en diámetro, no bloquea la luz eficientemente a partir de las máscaras de diámetro 1 segundo de arco.

6.11. RoboNet y el Telescopio Liverpool

El telescopio Liverpool (LT)⁷⁰ es un telescopio robotizado de 2 metros de diámetro. Forma parte de una red de telescopios de iguales características en Australia y Hawái denominada RoboNet-1.0⁷¹. Los telescopios robotizados tienen la ventaja de poder reaccionar rápidamente a fenómenos transitorios celestes al prescindir de la intervención humana. Si a esto añadimos el hecho de que los telescopios de RoboNet-1.0 se encuentran en el hemisferio norte y sur y en longitudes tales que pueden realizar monitorizaciones prácticamente continuas de 24 horas, si el tiempo meteorológico lo permite, podemos llegar a la conclusión de que son ideales para el registro de curvas de luz de fenómenos transitorios que se produzcan en casi cualquier parte del cielo. Por ello, uno de los objetivos científicos de esta red es la observación de fenómenos de microlentes gravitatorias, detectados primeramente por OGLE-III en Chile. El seguimiento por parte de RoboNet-1.0 permitirá detectar y medir las anomalías causadas por la presencia de uno o varios exoplanetas. Teniendo en cuenta la calidad del cielo, el diámetro de los telescopios y la sensibilidad de los detectores utilizados, se espera que se lleguen a detectar exoplanetas con masas similares a la terrestre y entre 1 y 5 UA de sus estrellas⁷². RoboNet-1.0 se encuentra ya en funcionamiento.



Figura 36. Telescopio Liverpool. Fuente: Astrophysics Research Institute, Liverpool JMU.

⁶⁹ Más información en: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/osca/index.html>.

⁷⁰ Más información en: <http://telescope.livjm.ac.uk/index.html>.

⁷¹ Más información en: <http://www.astro.livjm.ac.uk/RoboNet/>.

⁷² Más información en: <http://www.pparc.ac.uk/Nw/Robonet.asp>.



Figura 37. Situación de los telescopios de RoboNet-1.0. Fuente: Astrophysics Research Institute, Liverpool JMU.

6.12. SETI óptico con MAGIC

La escucha en el rango óptico del espectro electromagnético tiene un especial atractivo. Una civilización podría intentar comunicarse con nosotros mediante el uso del láser⁷³. El láser tiene más potencia que el máser, opera en el rango óptico donde tiene más ancho de banda (se puede transmitir más información), la atmósfera es transparente y los pulsos son de nanosegundos (menos contaminación de fondo). El telescopio MAGIC⁷⁴ es el mayor colector óptico jamás construido, de resolución temporal un nanosegundo y sus fotómetros son lo suficientemente sensibles como para detectar pulsos de decenas de luminosidades solares proveniente de una estrella a 100 parsecs (o de menor potencia desde estrellas más cercanas). MAGIC posee un campo de visión de unos 10 grados cuadrados y puede monitorizar de 10 a 100 estrellas simultáneamente en busca de pulsos de nanosegundos. Los pulsos deben ser de magnitud 6 o más brillantes, y si se utiliza el diámetro de la Tierra como línea base, puede calcular el movimiento orbital del planeta emisor midiendo el retraso en la llegada de los pulsos (Eichler, 2001). En la actualidad este programa se realiza al mismo tiempo que el telescopio opera realizando otros programas.



Figura 38. Telescopio MAGIC. Fuente: Nik Szymanek.

⁷³ El láser es un haz de radiación monocromática (misma longitud de onda) y coherente (todas las ondas están en fase). La radiación se produce cuando los electrones excitados de un átomo o molécula son estimulados a emitir radiación por el paso de un fotón próximo. El nuevo fotón es emitido en fase (es decir, de forma coherente) con el fotón que pasó, con la misma longitud de onda y en igual dirección. Cuando se producen muchos fotones de ese tipo se genera un haz de radiación muy intenso y paralelo. El equivalente en microondas del láser es el máser.

⁷⁴ Más información en: <http://wwwmagic.mppmu.mpg.de/>.

Tipo de civilización	$P_{utilizada}(W)$	$R_{detección}(pc)$
KI	10^{11}	2
KII	10^{26}	63×10^6
KIII	10^{37}	20×10^{12}

Tabla 2. Potencias utilizadas en vatios y distancias de detección en parsecs siguiendo los criterios de civilización de Kardashev que se basan en la fuente de energía disponible: KI (empleando toda la energía de su planeta), KII (empleando toda la energía de su estrella) y KIII (empleando toda la energía de su galaxia).

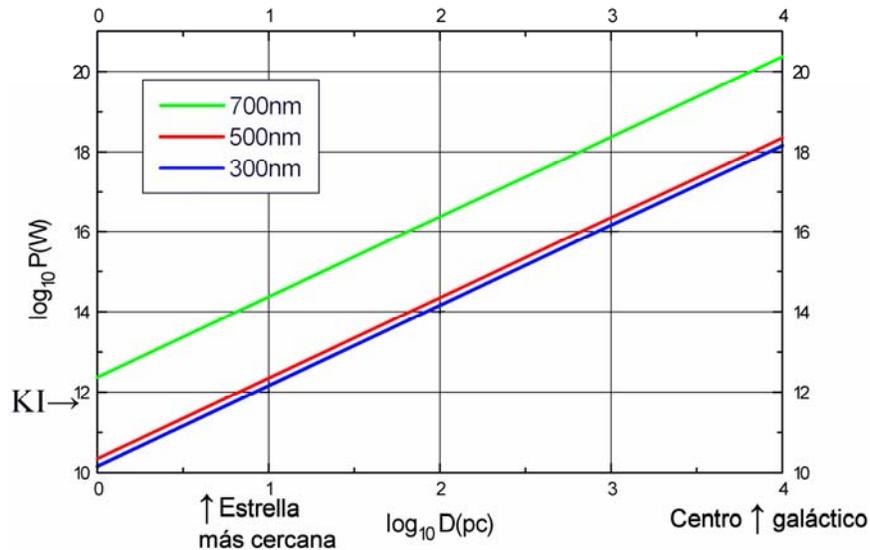


Figura 39. Distancia de detección en parsecs versus potencia en vatios del láser utilizada para láseres de distinta longitud de onda en nanómetros. Una civilización de tipo KI situada a la distancia de la estrella más cercana podría estar comunicándose con nosotros utilizando láseres de 500 ó 300 nanómetros. Fuente: extraído de Armada (2004).

7. El futuro en el Observatorio del Roque de Los Muchachos

7.1. El Gran Telescopio de Canarias

El Gran Telescopio de Canarias (GTC)⁷⁵ es un telescopio de espejo primario segmentado de diámetro equivalente 10,4 metros que entrará en funcionamiento en 2006. El GTC será el mayor telescopio del mundo de su clase y operará tanto en el rango óptico como en el infrarrojo.

En el diseño conceptual del GTC⁷⁶, en la sección de los programas científicos principales, aparece un apartado dedicado a los planetas extrasolares y fuentes estelares débiles para los cuales se requiere “...una gran superficie colectora para la detección de objetos débiles y alta resolución espacial, óptica adaptativa en el infrarrojo cercano, excelente calidad de imagen que permita la utilización de coronógrafos [...], y alta resolución espectral para medir velocidades radiales de unos pocos metros por segundo a varias unidades astronómicas”.

⁷⁵ Más información en: <http://www.gtc.iac.es>.

⁷⁶ “Gran Telescopio Canarias. Conceptual Design”, 1997. Una copia de este documento puede encontrarse en Internet en la dirección: <http://www.gtc.iac.es/documentos/gen/stma/0012g1aa.zip>.

Se espera que el GTC participe en los programas de búsqueda en el infrarrojo de objetos débiles cercanos a estrellas en nuestra vecindad solar o aislados por el método de imagen directa combinado con óptica adaptativa, tal y como en la actualidad se hace con el telescopio William Herschel. Sin embargo, la posibilidad de disponer de un espejo primario casi 7 veces mayor aumenta las posibilidades de detección de cuerpos pequeños. El instrumento de óptica adaptativa del GTC, FRIDA, se encuentra en la actualidad en la fase de diseño conceptual.

El límite de difracción de un telescopio, o límite máximo de resolución, viene dado en radianes por: $\theta=1,22\lambda/D$, siendo λ la longitud de onda y D el diámetro del espejo primario del telescopio considerado éste circular. Teniendo en cuenta que 1 radián=206.265 segundos de arco y que en la práctica se considera que para resolver dos objetos celestes es necesario $2\times\theta$, entonces el poder de resolución del telescopio William Herschel sería 0,26 segundos de arco en la banda K (22.000 angstroms). Este poder de resolución permitiría separar un exoplaneta de su estrella que estuviera situado a 7,5 UA de ésta y a una distancia de nosotros de 25 parsecs. El GTC, sin embargo, para la misma banda, tendría un poder de resolución de 0,11 segundos de arco, que a la misma distancia que antes significaría poder distinguir un planeta a una distancia de 2,75 UA. Sería necesario, sin embargo, disponer de un coronógrafo eficiente para aumentar el contraste del exoplaneta con respecto a su estrella.

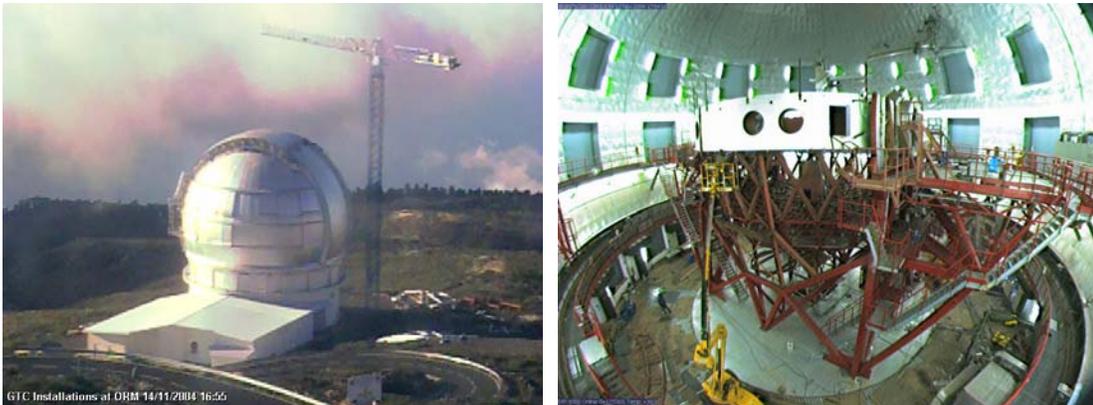


Figura 40. Izquierda: vista exterior del GTC. Derecha: estado de la construcción del telescopio en el interior de la cúpula. Ambas imágenes han sido capturadas de las páginas web⁷⁷ del GTC el 14 de noviembre de 2004.

7.2. El telescopio Euro 50

En la actualidad hay varios proyectos para construir telescopios extremadamente grandes de 20 a 100 metros de diámetro. En concreto, La Palma es un candidato importante para albergar el proyecto Euro 50⁷⁸, un telescopio de 50 metros de diámetro, en el Observatorio del Roque de Los Muchachos. Todavía no se ha tomado ninguna decisión definitiva sobre la ubicación final.

⁷⁷ Pueden encontrarse en: http://www.gtc.iac.es/Webcam_s.asp.

⁷⁸ Más información en: <http://www.astro.lu.se/~torben/euro50/>.

El objetivo primordial en la actualidad es la búsqueda de planetas de tipo terrestre, objetos que deben ser más frecuentes que los de tipo Júpiter de acuerdo con la función de masas observada⁷⁹. Más aún si tienen los parámetros físicos adecuados para albergar vida y se encuentran en la zona de habitabilidad correspondiente. Un telescopio como el Euro 50 podría ofrecer varios candidatos.

El diámetro de Euro 50 le hace un telescopio muy atractivo para continuar la búsqueda de exoplanetas por el método de la velocidad radial en estrellas débiles e incrementar así la muestra de exoplanetas de una manera extraordinaria (en un factor 100 o mayor).

De particular interés son aquellas estrellas frías de la vecindad solar, de menor brillo, pero con mayor facilidad para mostrar un movimiento radial si existe un exoplaneta en el sistema, debido a su baja masa y a su mayor ciclo vital, y por lo tanto, con mayor probabilidad de que la vida se desarrolle en un exoplaneta con las características adecuadas. Con los actuales telescopios, sólo un pequeño número de estrellas menos masivas que el Sol son accesibles para la búsqueda de exoplanetas. Con Euro 50 el número podría incrementarse en un factor 25, aumentando la probabilidad de detectar planetas de tipo terrestre en cantidades interesantes (no olvidemos, no obstante, que la zona de habitabilidad en estrellas frías es más estrecha). Para ello Euro 50 deberá contar con un espectrógrafo de alta resolución y gran estabilidad que ofrezca una definición en la posición de las líneas espectrales de 5×10^{-6} nanómetros o mejor para obtener unos pocos metros por segundo en las velocidades radiales.

Euro 50 también tendrá un papel importante en el seguimiento de tránsitos planetarios reportados por otros telescopios que realizan búsquedas masivas. Un sistema de óptica adaptativa y la instrumentación correspondiente pueden permitir al Euro 50 obtener curvas de luz de gran precisión fotométrica (0,005 magnitudes). Esta característica junto con una apropiada resolución temporal y espectroscopía de la estrella permitirían determinar incluso la densidad del exoplaneta. Para ello, no obstante, es necesario contar paralelamente con surveys para la detección masiva de tránsitos planetarios.

Como se ha demostrado recientemente (Charbonneau, 2002), estos tránsitos podrían revelar la presencia de atmósferas o incluso satélites en torno a los exoplanetas. Un instrumento de alta resolución espectral y un telescopio que ofrece una alta relación señal/ruido como el Euro 50 podría permitir la observación de la composición de atmósferas exoplanetarias.

También sería posible en la parte infrarroja del espectro donde el contraste del planeta con su estrella es mayor, distinguir líneas espectrales reflejadas por el planeta y de esta manera detectarlo, conocer su albedo y algo sobre su composición química.

Es importante utilizar el enorme diámetro del espejo primario para obtener imágenes directas de exoplanetas. Euro 50 es un telescopio con un espejo primario segmentado con diámetro

⁷⁹ El número de exoplanetas de una masa M se comporta como $M^{-1/3}$ (Marcy y Butler, 2000).

equivalente de 50 metros. Su poder de resolución para un sistema de óptica adaptativa que le permita alcanzar el límite de difracción en la banda K sería 0,022 segundos de arco, que a 25 parsecs significaría ver un exoplaneta a tan solo 0,55 UA de su estrella, es decir, que podría estar en la zona de habitabilidad de una estrella de tipo solar. Sin embargo, en la práctica estos números no son realistas: nos encontramos con dos grandes problemas: 1) los perfiles de brillo proporcionados por un sistema de óptica adaptativa presentan residuos que en la práctica impiden la detección de objetos en torno al límite de difracción; 2) la gran diferencia en brillo entre el planeta y su estrella impiden su detección.

Un planeta es visible porque refleja la luz y porque emite radiación infrarroja debido a su temperatura. El contraste de brillo entre un planeta y su estrella depende, por lo tanto, de la distancia a la estrella y de la longitud de onda. Cuanto más cerca, más radiación infrarroja emite pero es más difícil de separar por imagen directa. Cuanto más lejos, más fácil de separar pero la radiación reflejada está ahora en el óptico y es menos intensa. Entre los 20.000 y 30.000 angstroms se produce la transición entre un efecto y otro.

A partir de modelos, sabemos que exoplanetas a una distancia de 1 UA y en el óptico hasta 10.000 angstroms, la diferencia en brillo con respecto a la estrella es 10^{-10} . A la misma distancia pero hasta 50.000 angstroms, la emisión térmica domina sobre la luz reflejada. La relación entre luz reflejada y emisión térmica, depende, aparte de la distancia, del tamaño del planeta, de su atmósfera y su historia de formación. Si tenemos en cuenta que para una estrella de tipo solar la zona de habitabilidad podría extenderse hasta 5 UA, entonces se podrían detectar exoplanetas de interés hasta una separación máxima de 0,5 arcosegundos de su estrella (cálculos para una estrella situada a 10 parsecs de nosotros). A 10.000 angstroms, un planeta de tipo terrestre presentaría un factor de contraste en brillo de 10^{-8} . El sistema de óptica adaptativa de Euro 50 debería ser capaz de hacer imagen directa de este planeta de tipo terrestre que hemos puesto de ejemplo. Además, se ha sugerido que la óptica adaptativa en combinación con coronografía y espectroscopía de área podría dar buenos resultados.

La importancia del estudio de discos planetarios radica en su relación con la formación de planetas. Su observación, por lo tanto, puede ofrecer luz sobre los procesos que desembocan en la formación y en qué tipo de estrellas pueden albergar exoplanetas. Desde el descubrimiento del primer disco de gas y polvo en torno a una estrella, Beta Pictoris, al comienzo de los años 80, se ha realizado una importante contribución al estudio de estos discos. A través de la realización de imágenes, espectroscopía y polarimetría de alta resolución espacial (la estrella central permite la observación con óptica adaptativa con cierta facilidad) es posible conocer la estructura de los discos planetarios y su transición hacia la formación de exoplanetas. Además, con alta resolución espacial y espectral, se podría también estudiar los movimientos del material en el disco y la posible

presencia de objetos protoplanetarios que originan “huecos” en el disco. Las observaciones en el infrarrojo, donde el Euro 50 tendrá una alta eficiencia, serán de gran importancia.



Figura 41. Izquierda: imagen simulada del telescopio Euro 50 en el Observatorio del Roque de Los Muchachos. Derecha: comparación de tamaños entre el telescopio Euro 50 y un Boeing 747. Fuente: ambas Euro 50.

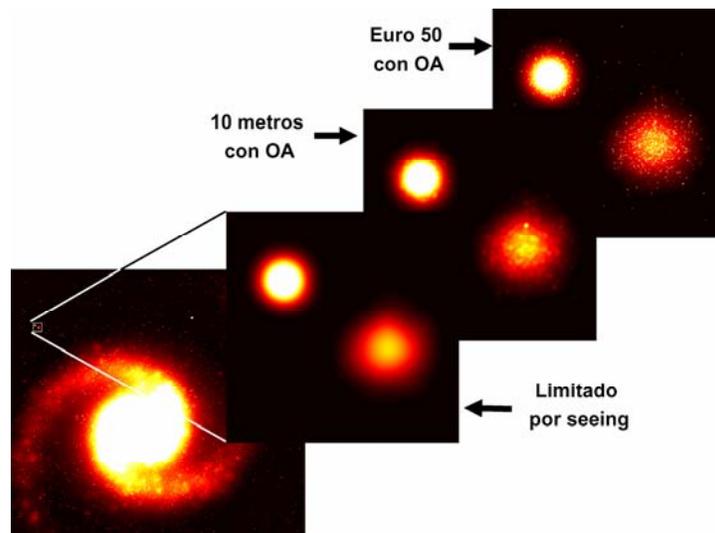


Figura 42. Simulación que muestra el poder resolutivo del Euro 50 con óptica adaptativa (OA). El seeing es el efecto de degradación de la resolución espacial de las imágenes provocado por la atmósfera terrestre. Fuente: Euro 50.

8. La búsqueda futura

¿Qué nos depara el futuro? Está claro que los descubrimientos de exoplanetas por medio de la técnica de las velocidades radiales seguirán acumulándose en los próximos años. Al aumentar la precisión, se detectarán planetas más pequeños y aquellos que posean grandes períodos se irán descubriendo a medida que se acumule el tiempo de toma de datos. Entre ellos deberá haber planetas semejantes a Júpiter en masa y distancia a su estrella.

En la superficie de la Tierra seguirán construyéndose grandes telescopios⁸⁰ que ampliarán la muestra de planetas extrasolares. Entre ellos se encuentra el Euro 50 o el OWL, un telescopio de

⁸⁰ Ver por ejemplo: <http://nineplanets.org/bigeyes.html> para un resumen de los proyectos actuales y futuros.

100 metros de diámetro en fase de diseño. También cabe destacar el comienzo de la operación regular de los interferómetros de los telescopios Keck⁸¹, VLT⁸² y LBT⁸³.

Asimismo entrará en funcionamiento el proyecto ALMA⁸⁴, una red de 64 antenas de 12 metros de diámetro cada una para la observación en el rango submilimétrico y milimétrico del espectro electromagnético que se construirá a 5.000 metros de altura en el desierto de Atacama (Chile). Su construcción comenzó en 2003 y prevé la finalización en 2012 aunque la operación científica comenzará en 2007. En total, las antenas cubren un área de 14 kilómetros de lado a lado. ALMA podrá descubrir nuevos exoplanetas por el método astrométrico, pero incluso podría obtener imágenes directas, siempre, claro, en el rango submilimétrico y milimétrico.

La obtención de imágenes directas es el gran reto. Aunque las misiones espaciales son caras, su uso es inevitable porque hay ciertos objetivos que no pueden alcanzarse desde el suelo terrestre. La acción de la atmósfera limita la precisión fotométrica a aproximadamente el 0,1%, lo cual significa que aunque tránsitos de planetas similares a Júpiter puedan observarse desde la superficie terrestre, no cabe decir lo mismo de los tránsitos ocasionados por planetas del tamaño de la Tierra.

En la actualidad los telescopios espaciales SIRT⁸⁵ y Hubble⁸⁶ siguen aportando interesantes resultados. Por ejemplo, recientemente ambos telescopios han observado por primera vez discos planetarios alrededor de estrellas⁸⁷ de tipo solar que se sabía contenían exoplanetas. El telescopio espacial de nueva generación, James Webb Space Telescope (JWST o NGST en sus orígenes)⁸⁸, cuyo lanzamiento está previsto para el año 2011, hará una importante contribución al estudio de atmósferas exoplanetarias por el método del tránsito y al descubrimiento de nuevos exoplanetas por el método de la velocidad radial en estrellas que pueden verse perturbadas dinámicamente por planetas de tipo terrestre.

La NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) están elaborando conjuntamente misiones para obtener imágenes de planetas telúricos antes de 2020. Están actualmente en fase de desarrollo dos misiones espaciales de búsqueda de planetas extrasolares por el método de los tránsitos fotométricos. El satélite francés Corot (con participación europea) y el estadounidense Kepler serán lanzados respectivamente en 2005 y 2007. Estos instrumentos podrían encontrar planetas de tamaño terrestre, en particular Kepler. Kepler observará 100.000 estrellas y tendrá una duración mínima de

⁸¹ Más información sobre el programa de búsqueda de exoplanetas con los telescopios Keck (dos telescopios de 10 metros situados en Hawaii) y la utilización de interferometría en: http://planetquest.jpl.nasa.gov/Keck/keck_index.html.

⁸² Más información sobre el interferómetro del telescopio VLT, formado por cuatro telescopios de 8 metros, situado en Chile: <http://www.eso.org/projects/vlti/>.

⁸³ El LBT es un telescopio con dos telescopios de 8,4 metros de diámetro en la misma montura y separados por 14,4 metros de centro a centro. El área colectora total es como de un telescopio de 11,8 metros de diámetro aunque en modo interferométrico puede alcanzar el límite de difracción de un telescopio de 22,8 metros (0,02 segundos de arco). Más información en: <http://medusa.as.arizona.edu/lbto/>.

⁸⁴ Más información en: <http://www.eso.org/projects/alma/>.

⁸⁵ Más información en: <http://www.spitzer.caltech.edu/>.

⁸⁶ Más información en: <http://hubble.nasa.gov/>.

⁸⁷ Más información en: <http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2004-22/release.shtml>.

⁸⁸ Más información en: <http://www.jwst.nasa.gov/>.

cuatro años. Será capaz de detectar tránsitos planetarios de exoplanetas con radios entre 0,8 y 1,3 radios terrestres que orbiten alrededor de estrellas parecidas al Sol, en la zona de habitabilidad. Si no se observa ningún tránsito durante los cuatro años que durará la misión, ello significará que los sistemas planetarios como el nuestro son raros. Al contrario, si nuestro sistema es representativo, Kepler debería descubrir 50 planetas telúricos, o 100 planetas 1,2 veces mayores que la Tierra, en órbitas parecidas a la de nuestro planeta.

Corot es una misión francesa con participación de la ESA. Utiliza un telescopio de 27 centímetros y será lanzado en 2005. Su objetivo es realizar observaciones de 20 a 30 estrellas a largo plazo con gran precisión fotométrica. Esto le permitirá detectar tránsitos planetarios si estas estrellas poseen exoplanetas.

Corot y Kepler servirán de preparación para otros programas que les sucederán de 2009 a 2020: Darwin y GAIA en Europa y Space Interferometry Mission (SIM), Terrestrial Planet Finder (TPF), Planet Imager (PI) y Life Finder (LF) en Estados Unidos.

Eddington⁸⁹ es una misión que tenía previsto su lanzamiento en 2008 aunque en la actualidad ha sido retirada del programa científico de la ESA. Es la primera vez que ESA cancela una misión científica debido a problemas presupuestarios.

Darwin⁹⁰ será capaz de obtener imágenes de planetas terrestres en la zona de habitabilidad de su estrella. Utilizará una flotilla de 6 telescopios, cada uno con un diámetro de 1,5 metros, y su lanzamiento está previsto para 2014. Utilizará la técnica de la interferometría en el infrarrojo⁹¹.

La misión SIM⁹² de la NASA será la primera misión espacial que utilizará un interferómetro óptico como instrumento principal. Diseñado específicamente para obtener medidas muy precisas de la posición de las estrellas, uno de sus principales objetivos científicos será la búsqueda de planetas extrasolares tan pequeños como la Tierra en órbitas alrededor de estrellas cercanas. SIM combinará la luz de dos grupos de cuatro telescopios de 30 centímetros de diámetro situados en una botavara de 10 metros de longitud, equivalente a la resolución de un espejo de casi 10 metros de diámetro. Esto le permitirá realizar astrometría de gran precisión, capaz de detectar las perturbaciones gravitatorias provocadas por pequeños planetas (por ejemplo, planetas de masa terrestre a unos 30 años-luz). Se espera su lanzamiento en 2009.

⁸⁹ Más información en: <http://www.rssd.esa.int/Eddington/>.

⁹⁰ Más información en: <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=28>.

⁹¹ Obtener una imagen directa de un planeta de masa terrestre (que sólo brilla por reflexión de la luz proveniente de la estrella) en órbita alrededor de una estrella presenta una gran complejidad debido a la enorme diferencia de brillos. La técnica que se utilizará en varias misiones espaciales para solventar este problema es la *interferometría anulante óptica o infrarroja*. Esencialmente esta técnica consiste en combinar la luz recogida por varios telescopios para actuar como uno solo, pero de mayor diámetro. Es posible cancelar la luz proveniente de la estrella en el centro del campo de visión haciendo interferir convenientemente las señales recogidas por los telescopios individuales (coincidiendo picos y valles se logra cancelar la luz estelar). De esta manera, nos quedaríamos solo con la señal proveniente del planeta, que no se cancela.

⁹² Más información en: http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/sim_index.html.

El TPF⁹³ tiene previsto su entrada en funcionamiento entre 2012 y 2015, y su misión es completar un censo completo de planetas hasta una masa terrestre alrededor de estrellas a 50 años-luz a la redonda. Trabaja con los resultados obtenidos por SIM, obteniendo datos sobre el tamaño, temperatura, localización y detección de biomarcadores en las atmósferas de planetas de tipo terrestre situados en la zona de habitabilidad. Su diseño final todavía está en planificación. Una opción sería varios pequeños telescopios para utilizar interferometría en el infrarrojo o un gran telescopio 3 ó 4 veces mayor que el telescopio espacial Hubble para coronografía en el visible. Este último diseño exigiría un pulido del espejo primario 10 veces más preciso que el del telescopio Hubble. Con el objeto de ahorrar costes, la NASA y ESA están estudiando la posibilidad de unir los proyectos Darwin y TPF.

Como preparación para el TPF, la NASA está estudiando la posibilidad de construir una misión consistente en un telescopio de 1,8 metros de diámetro denominado Eclipse, equipado con un sistema de corrección de imperfecciones ópticas y coronografía. Podría detectar planetas de masa similar a Júpiter y su lanzamiento está previsto para 2009. Por su parte, la ESA junto con el European Southern Observatory (ESO), prepara un experimento de interferometría llamado GENIE (Absil, 2002) para su utilización en el VLT en 2006.

El TPF arrojará varios candidatos de planetas para albergar vida que las misiones de la NASA PI y LF⁹⁴ analizarán. El PI dispondrá de varios telescopios con la potencia de un telescopio de 360 kilómetros y la misión LF consistirá en varios telescopios que producirán espectros de alta resolución de atmósferas exoplanetarias que permitirán el estudio en detalle de biomarcadores y su evolución temporal. Ambos telescopios serán lanzados al espacio más allá del año 2020.

Mientras tanto la precisión astrométrica desde la superficie terrestre irá mejorando a medida que se vayan construyendo interferómetros, por no hablar de los futuros satélites astrométricos como GAIA⁹⁵, de los que se espera una precisión todavía mayor. No obstante, como la astrometría es más sensible a los planetas alejados de su estrella, harán falta años de observación para registrar una órbita completa. GAIA será lanzado por la ESA en 2011.

Gracias a los avances tecnológicos esperados para los próximos años, es de esperar que averigüemos si la presencia de planetas es común y que determinemos la distribución de tamaños, masas, períodos orbitales, densidades, colores y composiciones atmosféricas. Podría ser que nuestro Sistema Solar, al igual que nuestro propio planeta, no fuera tan especial. Y se podría incluso especular con un eventual descubrimiento de la vida.

Aunque las propiedades fundamentales de los futuros descubrimientos ya pueden predecirse, no cabe decir lo mismo de sus peculiaridades. Las teorías de formación planetaria más en boga están destinadas a explicar las propiedades de los sistemas planetarios observados, pero las

⁹³ Más información en: http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.html.

⁹⁴ Más información en: http://planetquest.jpl.nasa.gov/science/finding_life.html.

⁹⁵ Más información en: <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=26>.

incertidumbres sobre las condiciones iniciales, la complejidad de la formación física y química de la estrella y del planeta excluyen toda modelización detallada. La extrapolación de las distribuciones observadas es inconcebible si los procesos que las crean no se conocen con exactitud.

La exploración del Sistema Solar en búsqueda de formas de vida pasadas o presentes continuará. Cabe destacar la misión de la NASA JIMO⁹⁶, prevista para más allá del año 2015. Esta misión explorará los satélites de Júpiter Ganymede, Callisto y finalmente Europa, una luna helada que podría albergar un océano bajo su superficie (¿posible hábitat para seres extremófilos?).

9. Conclusiones

1. Aunque los métodos de detección actuales sesgan la población de exoplanetas, sin embargo nos ha mostrado un zoológico un tanto desconcertante: la mayoría son *planetas gaseosos gigantes y calientes*. ¿Somos nosotros los raros? Es necesario un mayor conocimiento de los procesos que llevan a la formación de los sistemas planetarios. Los exoplanetas descubiertos hasta la fecha se pueden clasificar como “Júpiteres calientes” (planetas gigantes orbitando su estrella de uno a cinco días), y como “planetas excéntricos” (grandes colosos de gas que pasan las zonas de habitabilidad en órbitas muy excéntricas). Es posible que tal distribución de exoplanetas esté relacionado con la activa y, a veces, violenta formación y evolución de los sistemas planetarios: los gigantes gaseosos se forman a distancias considerables de su estrella pero su interacción con el propio disco estelar donde se forman puede acercarlos a la estrella (“Júpiteres calientes”), despedirlos a grandes distancias (“planetas aislados”) o sobrevivir en órbitas muy excéntricas (“planetas excéntricos”). A los procesos descritos se les suele denominar “migración planetaria”. Recientemente se ha propuesto que la clave para la estabilización de las órbitas en la zona de habitabilidad puede estar en el proceso combinado de migración planetaria y captura por resonancia. El descubrimiento de exoplanetas gaseosos en órbitas como la del planeta Júpiter en nuestro Sistema Solar en los próximos años podría ponernos en la pista de la existencia de planetas en órbitas resonantes en esos otros sistemas planetarios, y, quizás, dentro de su correspondiente zona de habitabilidad.
2. Las estrellas con *mayor metalicidad* tienden a tener *mayor número de planetas*. Esto es bueno (Fischer y Valenti, 2003).
3. El límite de masas para distinguir entre planeta y estrella, actualmente establecido en $10 M_{\text{Júpiter}}$, debe ser revisado pues recientemente un estudio (Laird, et al., 2005) ha demostrado que tras una recalibración dinámica algunos planetas masivos pueden ser estrellas. Por otro

⁹⁶ Más información en: <http://www.jpl.nasa.gov/jimo/>.

lado, la masa mínima registrada hasta la fecha corresponde a $7.5 M_{\text{Tierra}}$ ⁹⁷, en el dominio de las masas neptunianas.



Figura 43. Portada de la revista Nature el 20 de enero de 2005. El límite superior de masas para establecer que un cuerpo celeste es un planeta a revisión.

4. La carrera por la búsqueda activa de vida fuera del Sistema Solar ya ha comenzado y el Observatorio del Roque de Los Muchachos juega y jugará un *papel importante*.
5. En los próximos años (antes de 2015 según la programación actual de las misiones espaciales) se darán los primeros pasos para la detección de planetas tipo terrestre en zonas de habitabilidad de estrellas cercanas. *Se daría un paso importante en el esclarecimiento de los valores de la ecuación de Drake.*
6. Ya se diseñan las misiones para esclarecer el quinto término de la ecuación de Drake: discusión sobre los instrumentos más adecuados para la detección de *biomarcadores*. En 15 ó 20 años se podría descubrir vida en exoplanetas cercanos. No obstante, si no se obtienen resultados positivos entonces cabe la (un poco aburrida) posibilidad de que la vida sea más casual de lo que pensamos.

10. Agradecimientos

La motivación para preparar el presente artículo surgió en el seno del grupo de actividades para la divulgación de OPTICON⁹⁸. Este grupo propuso la inclusión de la presentación de este trabajo en el programa de la Semana Europea de la Ciencia y la Tecnología 2004, celebrada en La Palma del 8 al 14 de noviembre. Agradezco a los organizadores de ambas actividades la invitación personal que me realizaron.

⁹⁷ La nota de prensa puede ser leída en <http://www2.keck.hawaii.edu/news/science/gl876/050613.html>.

⁹⁸ Más información en: <http://www.astro-opticon.org/>.

Actuaron como revisores de este artículo José Antonio Fernández Arozena, Sonia Petisco Martínez y Manuel Poggio Capote. Agradezco a todos ellos sus interesantes sugerencias y exactas correcciones.

11. Más información

Para más información sobre la búsqueda de la vida en el Universo y para una discusión más detallada de los temas expuestos en el presente artículo se recomienda la consulta de los siguientes textos y páginas web:

- Vázquez Abeledo, Manuel y Martín Guerrero de Escalante, Eduardo, 1999, “La Búsqueda de vida extraterrestre”, Ed. McGraw-Hill/Interamericana.
- Galadí, David y Gutiérrez Cabello, Jordi, 2000, “Astronomía General. Teoría y Práctica”, Ed. Omega.
- Lissauer, J. J., 2003, “Planetas habitables”, *Mundo Científico*, **242**, 38.
- Shiga, D., 2004, “Imaging Exoplanets”, *Sky & Telescope*, **107**, 44.
- Shostak, S., 2004, “Listening for a whisper”, *Astronomy*, septiembre 2004.
- Beaulieu, J.-P. et al., 2004, “Extrapolar planets: today and tomorrow”, proceedings de una reunión celebrada en el Institut d’Astrophysique de Paris del 30 de junio al 4 de Julio de 2003. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 321*.
- Semana Europea de la Ciencia y la Tecnología, La Palma 2004, dedicada a la astrobiología: <http://www.iac.es/semanaciencia04/>.
- XVI Canary Islands Winter School of Astrophysics “Extrasolar planets”:
<http://www.iac.es/winschool2004/info.html>.
- Ames Research Center: <http://astrobiology.arc.nasa.gov/>.
- Astrobiology magazine: <http://www.astrobio.net/>.
- Astrobiology curriculum: <http://astrobio.terc.edu/>.
- Astrobiology.com: <http://www.astrobiology.com/>.
- Astrobiology: the scientific search for life in the Universe:
<http://learning.berkeley.edu/astrobiology/>.
- Extrasolar planets por Canadian Content:
http://www.canadiancontent.net/dir/Top/Science/Astronomy/Extrasolar_Planets/.
- La enciclopedia de los planetas extrasolares actualizada por Jean Schneider (Observatorio de Meudon, París): <http://www.obspm.fr/encycl/es-encycl.html>.
- California & Carnegie Planet Search: <http://exoplanets.org/>.
- NASA Origins: <http://origins.jpl.nasa.gov/index1.html>.
- Páginas web de Mark Elowitz: <http://www.markelowitz.com/exobiology.htm>.

- ESA Space Science:
http://www.esa.int/esaSC/SEMYZF9YFDD_index_0.html#subhead8.
- Ecuación de Drake interactiva: <http://www.astronomy.com/asy/objects/mm/asy-20020708-02459-orig-lg.swf>.

12. Referencias

- Absil, O., et al., 2002, en Combes, F. Y Barret, D., SF2A-2002 : Semaine de l'Astrophysique Francaise, EDP-Sciences (Editions de Physique), 151.
- Alonso, R., et al., 2004, *Astrophysical Journal Letters*, **613**, 153.
- Alvarez, L. W., et al., 1980, *Science*, **208**, 1095.
- Armada Tella, A., 2004, 14th IS CRA Course, Erice 2004.
- Bramich, D. M. et al., 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **359**, 1096.
- Bond, I., A., 2004, *Astrophysical Journal Letters*, **606**, 155.
- Bouchy, F., et la., 2004, *Astronomy And Astrophysics Letters*, **421**, 13.
- Butler, R. P., et al., 1996, *Publications of The Astronomical Society of The Pacific*, **108**, 500.
- Burrows, A., *Nature*, **433**, 261.
- Charbonneau, D., 2000, *Astrophysical Journal Letters*, **529**, 45.
- Charbonneau, D., et al., 2002, *Astrophysical Journal*, **568**, 377.
- Cocconi, G. y Morrison, P., 1959, *Nature*, **184**, 844.
- Collier Cameron, A., et al., 1999, *Nature*, **402**, 751.
- Cremonese, G., et al., 1997, *Astrophysical Journal Letters*, **490**, 199.
- Deeg, H. J., et al., 1998, *Astronomy and Astrophysics*, **338**, 479.
- Desidera, 2003, *Astronomy and Astrophysics*, **405**, 207.
- Desidera, S., 2004, *Astronomy and Astrophysics Letters*, **420**, 27.
- Eichler, D., et al., 2001, astro-ph 0111081.
- Farley, K., et al., 1998, *Science*, **280**, 1250.
- Fischer, D. A., Valenti, J. A., 2003, *ASP Conference Series*, **294**, 117.
- Frogel, J. y Gould, A., 1998, *Astrophysical Journal Letters*, **499**, 219.
- Henry, et al., 2000, *Astrophysical Journal Letters*, **529**, 41.
- Hood, B., et al., 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **360**, 791.
- Hough, J. H., et al., 2003, *SPIE Proceedings*, **4843**, 517.
- Kennedy, D., 2004, *Science*, **306**, 2001.
- Konacki, M., et al., 2003, *Nature*, **421**, 507.
- Konacki, M., et al., 2004, *Astrophysical Journal Letters*, **609**, 37.
- Konacki, M., 2005, *Nature*, **436**, 230.
- Laird, M. C., et al., 2005, *Nature*, **433**, 286.

Laughlin, G., Chambers, J., E., 2001, *Astrophysical Journal Letters*, **551**, 109.

Leicht, E., y Vasisht, G., 1998, *New Astronomy*, **3**, 51.

Lissauer, J. J., 2003, *Mundo Científico*, **242**, 38.

Marcy, G. W., Butler, R. P., 2000, *Publications of The Astronomical Society of The Pacific*, **112**, 137.

Marcy, et al., 2002, *Astrophysical Journal*, **581**, 1375.

Mayor, M., Queloz, D., 1995, *Nature*, **378**, 355.

Moutou, C., et al., 2001, *Astronomy and Astrophysics*, **371**, 260.

Naeye, R., 2004, *Sky & Telescope*, **109**, 44.

Peale, S. J., 1997, *Icarus*, **127**, 269.

Perryman, M., 2000, *Rep. Prog. Phys.*, **63**, 1209.

Pollacco, D., Skillen, I., Méndez, J., 2004, *ING Newsletter*, **8**, 18.

Queloz, D., et al., 2000, *Astronomy and Astrophysics Letters*, **359**, 13.

Rivera, E. J., Lissauer, J. J., 2001, *Astrophysical Journal*, **558**, 392.

Ruiz-Lapuente, P., Comeron, F., Méndez, J., Canal, R., Smartt, S., J., Filippenko, A., V., Kurucz, R., L., Chornock, R., Foley, R., J., Stanishev, V., Ibata, R., 2004, *Nature*, **431**, 1069.

Sagan, C., et al., 1993, *Nature*, **365**, 715.

Street, R. A., et al., 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **340**, 1287.

Struve, O., 1952, *The Observatory*, **72**, 199.

Thorsett, S., Arzoumanian, Z., Camilo, F., Lyne, A., 1999, *Astrophysical Journal*, **523**, 763.

Trilling, D. E., et al., 1998, *Astrophysical Journal*, **500**, 428.

Tsapras, Y., Horne, K., Batcheldor, D., Sorensen, P., Méndez Alvarez, J., González Serrano, I., Wooder, N., Quaintrell, H., 2002, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **337**, 41.

Vidal-Madjar, A., et al., 2004, *Astrophysical Journal Letters*, **604**, 69.

Wolszczan, A., Frail, D., 1992, *Nature*, **255**, 145.

Wolszczan, A., et al., 2000, *Astrophysical Journal*, **528**, 907.

Vidal-Madjar, A., et al., 2003, *Nature*, **422**, 143.

Zapatero Osorio, M. R., et al., 2000, *Science*, **290**, 103.