Resumen

1.- Introducción

Un *exoplaneta* o *planeta extrasolar* es un objeto, con masas por debajo del límite necesario para que se produzca la fusión termonuclear del deuterio (en la actualidad estimada en unas 13 veces la masa de Júpiter), que orbita estrellas o restos de estrellas distintos de nuestro Sol. En esta introducción, tras esta definición de exoplaneta y de otros conceptos como *Júpiteres calientes* y *Júpiteres muy calientes*, se describen las distintas técnicas existentes para la detección de estos objetos, poniendo especial énfasis a los éxitos, ventajas y desventajas de cada método. De esta forma, se pincela el método de medida de los tiempos de llegada de los pulsos procedentes de los púlsares, que permitió la detección de los primeros exoplanetas en el año 1992 (Wolszcan & Frail 1992). Desafortunadamente, la mayoría de los púlsares carecen de compañeros planetarios (Lorimer, 2001).

El método de las velocidades radiales es hasta la fecha el que ha producido mayor número de detecciones de exoplanetas. Se describen someramente cómo se realizan estas observaciones, y las amplitudes del movimiento de la estrella para objetos con masas distintas. La diversidad de exoplanetas encontrados con este método permite extraer una serie de características comunes de los exoplanetas conocidos o de las estrellas en torno a las que orbitan, tales como la fracción de éstas que poseen planetas (hasta un cierto valor inferior de la masa), la función de masas del objeto secundario, la distribución de las excentricidades, la dependencia de la metalicidad de la estrella con la tenencia de exoplanetas, o la distribución del periodo frente a la masa de estos objetos.

Se describen también en esta introducción otras técnicas de detección de exoplanetas, como las microlentes, la imagen directa, y la astrometría, destacando sus éxitos más recientes. En el año 2004, tanto las microlentes como la imagen directa han tenido sus primeras detecciones confirmadas.

El método de los tránsitos se explica con especial detalle, prestando atención a los parámetros físicos del planeta que son solamente accesibles mediante la combinación de este método con el de las velocidades radiales. Sólo con la curva de luz se pueden medir el cociente entre el radio del planeta R_p y el de la estrella R_s, la inclinación de la órbita i (o bien el parámetro de impacto b), la razón entre el radio de la órbita a y el radio de la estrella, y la densidad de la estrella. Combinando los resultados con las medidas de velocidad radial, se puede determinar además la masa exacta del planeta M_p y su densidad ρ_p. El interés por el conocimiento de estos parámetros ha motivado diversas búsquedas de exoplanetas que produzcan tránsitos. Un estudio de Brown (2001) estima los ritmos esperados de detección tanto de exoplanetas como de falsas alarmas en este tipo de búsquedas fotométricas. Para un proyecto como el STARE en un campo en el plano galáctico, estima que deberían haber 1.4 exoplanetas en tránsito y 7.2 falsas alarmas por cada 10000 estrellas observadas con una precisión mejor que 0.01 magnitudes.

El primer planeta que producía tránsitos se detectó en el 2000 (Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000), si bien su descubrimiento fue realizado con el método de las velocidades radiales (Mazeh et al. 2000). Recibe el nombre de HD 209458b, y es en la actualidad el exoplaneta más estudiado y mejor conocido. Resumimos en una sección las observaciones más emblemáticas de este sistema, y los hallazgos que de estas observaciones se derivaron. De este modo, los estudios realizados por diversos equipos de investigación con el HST (Brown et al. 2001, Charbonneau et al. 2002, Vidal-Madjar et al. 2003, 2004) han permitido conocer los parámetros del planeta y de la estrella con una precisión exquisita, realizar búsquedas de hipotéticos satélites orbitando en torno al planeta así como de posibles anillos, e incluso detectar componentes de la atmósfera. Estos últimos estudios parecen probar que la alta atmósfera de HD 209458b se halla en proceso de evaporación debido a su cercanía a la estrella.

Sin embargo, parece que hay una cierta discrepancia entre el tamaño medido del exoplaneta y el que debería tener de acuerdo con los modelos de formación y evolución de exoplanetas. El radio medido para HD 209458b es entre un 20% y un 30% mayor que el predicho por estos modelos. Dedicamos una sección a abordar este tema, señalando las posibles soluciones al problema que existen en la literatura. Varias de estas soluciones implicarían que, en el caso de encontrar nuevos exoplanetas transitantes, todos deberían mostrar un tamaño mayor al estimado por los modelos, mientras que otras suponen ciertas anomalías en el caso de HD 209458b, como pudieran ser las perturbaciones producidas por un tercer cuerpo en el sistema.

Una técnica para estudiar las atmósferas de estos lejanos planetas, que ya

ha sido utilizada con éxito en el caso de HD 209458b, es la espectroscopía de transmisión. Dedicamos una sección para describir esta técnica y para comparar los dos principales estudios teóricos que se han realizado encaminados a aplicar este método a los exoplanetas en tránsito: los trabajos de Seager & Sasselov (2000) y Brown (2001). Esta técnica la pondremos en aplicación durante el tránsito de Venus del 2004, tal como se describe en el Capítulo 6.

Finalmente, se pincelan en la introducción las dos hipótesis principales para explicar la formación de los exoplanetas hasta ahora detectados.

En el momento de comenzar esta tesis, tan sólo HD 209458b producía tránsitos, y ya existía controversia acerca de la explicación para su radio aparentemente grande. Se desconocía si nuevos planetas que transitasen frente a su estrella tendrían su radio incrementado frente a lo predicho por los modelos, o si tendrían un radio "normal", en cuyo caso HD 209458b sería el caso anómalo. Por ello, el objetivo principal de esta tesis fue el descubrimiento de nuevos planetas transitantes, para así poder establecer qué es lo común y qué lo anómalo en este tipo de objetos. Para cumplir con este objetivo (con el instrumento STARE descrito en el Capítulo 2), hubo que superar una serie de obstáculos, como el establecimiento de unas técnicas de seguimiento que permitiesen descartar los falsos positivos (configuraciones estelares que producen señales fotométricas similares a las de un planeta en tránsito). Estas técnicas se describen en el Capítulo 3 y se proporciona una cadena ordenada de pruebas (un protocolo) que ha de superar un candidato para ser confirmado como un exoplaneta transitante. El Capítulo 4 describe una campaña de observación con el instrumento STARE en la constelación de Lyra, y el resultado de las observaciones de seguimiento en los 16 candidatos obtenidos. Uno de los candidatos es el primer exoplaneta descubierto con el método de los tránsitos en torno a una estrella relativamente brillante, TrES-1. Todas las observaciones que condujeron a esta conclusión se describen en el Capítulo 5. Finalmente, la oportunidad de aplicar la técnica de la espectroscopía de transmisión en un planeta cuya atmósfera ha sido atravesada por sondas espaciales vino dada con el tránsito de Venus de 2004. Estas observaciones y sus resultados preliminares se describen en el Capítulo 6.

2.- El instrumento STARE

Este capítulo está dedicado a la descripción del instrumento STARE, un pequeño telescopio de diseño Schmidt con una apertura de 102 mm y una distancia focal efectiva de 296 mm, y del modo en que los datos provenientes de este instrumento son tratados para buscar las señales producidas por exoplanetas en tránsito. El instrumento toma datos (una imagen cada 2 minutos) de

forma semi-automática de grandes regiones del firmamento (6.1×6.1 grados^2) en las que estén contenidas varias decenas de miles de estrellas. Se observa el mismo campo durante largos periodos de más de un mes de observación. Los datos son analizados utilizando la moderna técnica de la sustracción de imágenes (Alard 2000), en la que a una imagen de referencia tomada en buenas condiciones fotométricas se le sustrae cada una de las imágenes (debidamente alineadas y compensadas de posibles cambios en la PSF de las estrellas), y posteriormente se realiza fotometría de apertura en las imágenes residuo que se obtienen tras esta sustracción.

Las curvas de luz de las estrellas que se obtienen poseen aún efectos instrumentales que se corrigen mediante el uso de la técnica de descomposición en valores singulares (SVD, las siglas en inglés de *Singular Value Decomposition*). En este capítulo se describe dicha técnica.

Finalmente, se realiza un modelado de las fuentes de ruido presentes en los datos del instrumento, para evaluar la bondad tanto de la instrumentación como de los algoritmos de análisis de datos utilizados.

Las ventajas de utilizar otros instrumentos similares en distintos emplazamientos se perfilan al final del capítulo, lo que justifica que el instrumento STARE sea en la actualidad un nodo de la red de tres telescopios TrES (Transatlantic Exoplanet Survey). Los otros dos nodos se encuentran en Arizona y California, ambos en los Estados Unidos de América.

3.- Las técnicas de seguimiento

En este capítulo proponemos, estudiamos y revisamos las distintas técnicas que se pueden utilizar para esclarecer la verdadera naturaleza de los objetos que producen señales fotométericas similares a las de un planeta transitante. Existen diversos tipos de sistemas estelares eclipsantes que pueden mimetizar la señal de un exoplaneta. La confirmación última de un exoplaneta se puede realizar tan sólo en unos pocos telescopios en el mundo, por lo que se hace necesario desarrollar otros métodos menos costosos que permitan descartar la mayoría de los candidatos.

En primer lugar se describen las distintas configuraciones estelares que pueden resultar en falsos positivos de una búsqueda fotométrica de exoplanetas mediante el método de los tránsitos. Estos falsos positivos pueden ser sistemas estelares binarios con cocientes de sus radios similares a los provocados por un exoplaneta gigante y una estrella de tipo solar, o bien estar causados por dos estrellas con eclipses rasantes. Una tercera opción es que se traten de sistemas triples (o múltiples), en los que la luz proveniente de una tercera estrella diluye la profundidad de los eclipses de un sistema eclipsante. Esta tercera estrella

puede estar físicamente ligada al sistema binario, o bien estar en la línea de visión del sistema eclipsante.

Como primer método, se describe el análisis cauteloso de la curva de luz original. Este análisis conlleva en primer lugar un estudio de la modulación de la curva de luz fuera de los periodos de eclipse. Los sistemas binarios típicamente producen fuerzas de marea que deforman la estrella primaria. Por consiguiente, la curva de luz fuera del eclipse posee una modulación sinusoidal con un periodo que es la mitad del orbital. Describimos la técnica utilizada para discernir esta señal. En segundo lugar, se estudia la forma del tránsito en detalle. Mediante un ajuste por mínimos cuadrados a una función en la que los parámetros libres son la duración total del eclipse, la de la parte plana de éste, su profundidad, y su punto central, es posible estimar la densidad promedio de la estrella central del sistema. Si esta densidad es muy diferente de la estimada por otros métodos (por ejemplo, la resultante de una estrella de secuencia principal con una temperatura efectiva idéntica a la estrella, y que haya sido medida bien mediante fotometría o mediante espectroscopía), se puede descartar o restar prioridad al candidato.

La medida de la dependencia de la profundidad de los eclipses con el color puede ser indicativa de un sistema estelar triple no resuelto espacialmente. En la sección 3.3, se describen en detalle las variaciones en el color del sistema esperadas, para estrellas de secuencia principal. Estas variaciones, en caso de existir, permiten descartar al candidato. En el caso de que el cambio en color entre el sistema fuera del eclipse y dentro del eclipse no sean detectables, señalamos las distintas restricciones que se pueden poner a un hipotético sistema no resuelto. Se discuten en esta sección dos casos: dos estrellas eclipsantes idénticas con eclipses diluidos por una tercera estrella en la línea de visión (no necesariamente parte del sistema), y dos estrellas eclipsantes en las que el eclipse secundario no es detectado en los datos, también afectadas por la contribución de una tercera estrella. Este segundo caso es harto más complicado de ser detectado mediante esta técnica desde observatorios en tierra, pues los cambios en color son del orden de la milimagnitud.

Si bien los sistemas triples físicamente ligados son complicados de resolver mediante técnicas de alta resolución espacial, la probabilidad de detectar una tercera estrella fortuitamente alineada con el sistema eclipsante es alta cuando se pasa de un telescopio con una PSF de $\sim 15''$ a las modernas técnicas de óptica adaptativa, en la que se pueden alcanzar PSFs mejores que $0.2''$. Proporcionamos una estimación de esta probabilidad, y mostramos un caso de un candidato en la constelación del Cisne, observado con óptica adaptativa en el telescopio de 4.2 m William Herschel (WHT, situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos) en el que se detectaron al menos 4 compañeros del

candidato a una distancia menor de $1''$. Ninguno de ellos puede ser la causa de los eclipses en la estrella principal.

Las medidas de velocidades radiales de la estrella proporcionan la prueba última de que un candidato es en realidad un exoplaneta. Pero también sirven, de forma muy efectiva, para detectar los sistemas estelares eclipsantes, bien mediante observaciones de variaciones en velocidad radial mucho mayores de las esperadas para exoplanetas, o bien mediante la medida de velocidades de rotación de las estrellas que estén sincronizadas con el periodo del compañero. En el caso de que el compañero sea un planeta, los tiempos de sincronización de la estrella son del orden de 10^{13} años, y por lo tanto no debe haber sincronía entre la estrella y el planeta.

Finalmente, proporcionamos un esquema ordenado de las distintas pruebas que ha de ir superando un candidato a exoplaneta para ser finalmente confirmado, o para descartarlo como sistema estelar eclipsante. El orden de este esquema es por esfuerzo y necesidades de telescopio. Este esquema está especificado en el apartado 7 de este resumen.

4.- Resultados en un campo de la constelación Lyra

Se describen en este Capítulo las observaciones realizadas con los telescopios STARE y PSST, de la red TrES, en una campaña efectuada en un campo de la constelación de Lyra. Con el telescopio STARE se observó durante un total de 49 noches, lo que permitió la detección de 16 candidatos a planetas transitantes. Se proporcionan las curvas de luz dobladas de cada uno de estos candidatos, las características de las estrellas y de los eclipses observados, y posteriormente se procede a realizar y analizar las observaciones de seguimiento descritas en el Capítulo anterior. De esta forma, se comienza con un estudio detallado de la curva de luz original, tanto de la variación en los momentos fuera de los eclipses como de la forma de dichos eclipses. Podemos comprobar cómo este estudio es capaz de descartar el origen planetario para 15 de los 16 candidatos.

Para esclarecer la verdadera configuración estelar de cada uno de los candidatos, se realizaron diversas observaciones tanto fotométricas como espectroscópicas de estos objetos. Se describen en este Capítulo, uno por uno, cada uno de los candidatos obtenidos y la configuración estelar más probable dilucidada tras las diversas observaciones realizadas. Destacamos en este resumen, a modo de ejemplo, el caso de T-Lyr0-03679, en el que unas observaciones tomadas en el telescopio IAC-80 del Observatorio del Teide permitieron detectar eclipses profundos en una estrella situada a $7.9''$ del candidato principal. Se muestra cómo, aún en el caso de que el sistema no hubiese sido resuelto en estas observaciones, la información acerca del color del sistema permitiría

haberlo descartado como candidato a exoplaneta transitante.

Se describen también las observaciones realizadas en el telescopio WHT utilizando la técnica de óptica adaptativa. Dichas observaciones sirvieron para detectar un sistema triple, T-Lyr0-01100.

En total, de los 16 candidatos obtenidos, 6 mostraron ser sistemas estelares binarios, 7 sistemas estelares triples (bien ligados gravitacionalmente o no), 2 casos no resueltos (pero descartado su origen planetario), y un exoplaneta transitante, rebautizado como TrES-1, y que se describe en detalle en el Capítulo siguiente.

Un candidato de la red TrES especialmente arduo de resolver, GSC 01944-02289, se describe en una sección aparte. Todas las observaciones de seguimiento de este candidato parecían indicar la presencia de una enana marrón en tránsito frente a una estrella de tipo F. Sin embargo, un estudio detallado de los bisectores de las líneas espectrales permitió concluir que se trataba de un sistema triple, en el que una estrella de tipo espectral F5 evolucionada diluye los eclipses de un sistema eclipsante binario compuesto por una estrella primaria de tipo G0V y una secundaria de tipo M3V. Hasta la fecha, este candidato ha sido el más complejo de identificar, pues superó todos los pasos previos al último paso del esquema de confirmación de planetas propuesto en el capítulo anterior.

Finalmente, se resume el estado de las observaciones de seguimiento de la red TrES, que ya ha identificado un total de 46 falsos positivos en 9 campos reducidos.

5.- TrES-1: El planeta transitante de una estrella brillante tipo K0V

En este Capítulo se describen las observaciones de seguimiento que condujeron al descubrimiento del primer exoplaneta (y hasta la fecha el único) detectado mediante un proyecto de búsqueda de exoplanetas utilizando imágenes de campo amplio, y denominado TrES-1. Una primera búsqueda en la literatura de los parámetros de la estrella en torno a la que orbita, sugería que se trataba de una estrella de tipo G tardío o K temprano, y el movimiento propio catalogado en los archivos del USNO-B1.0 mostraba que la estrella se encontraba relativamente cerca, a unos 150 pc, pues el movimiento que exhibía era el típico para estrellas de campo de baja masa en la vecindad solar. Los parámetros de la estrella en torno a la que orbita TrES-1 se resumen en la Tabla 5.1. Las observaciones tomadas en distintos filtros desde 3 telescopios diferentes mostraron un tránsito básicamente acromático, descartando de esta forma la mayoría de los sistemas triples discutidos en el Capítulo anterior. Se describen en detalle las observaciones realizadas desde el telescopio IAC-80 en el Observatorio del Teide,

como muestra del tipo de análisis empleado. Los parámetros orbitales y físicos obtenidos para TrES-1 se proporcionan en la Tabla 5.2. Destacamos en este resumen el periodo orbital de 3.030065±0.000008 d, la masa de 0.75±0.07 M_J, y el radio de $1.08^{+0.18}_{-0.04}$ R_J. Este último parámetro está limitado por el desconocimiento del radio de la estrella, pues el cociente entre el radio del planeta y de la estrella (obtenidos a partir de las curvas fotométricas del tránsito) se conocen con mayor precisión: $R_p/R_s=0.130^{+0.009}_{-0.003}$.

Las medidas de velocidad radial de baja señal a ruido llevadas a cabo con los *CfA Digital Speedometers* proporcionaron un límite mínimo a la masa del compañero de la estrella en unas 5 M_J, y la comparación de los espectros con espectros sintéticos permitieron estimar la temperatura efectiva de la estrella en T_{eff}=5250±200 K, la gravedad superficial en log$g$=4.5±0.5, y la velocidad de rotación en $v \sin i \leq 5$ km/s. La metalicidad medida resultó idéntica a la solar, dentro de los márgenes de error. La medida de la baja rotación de la estrella fue de nuevo una señal positiva, pues indicaba que la estrella no había sido acelerada por interacciones de marea con un compañero estelar, y significaba que las medidas de velocidad radial con alta señal a ruido no se verían complicadas por unas líneas espectrales ensanchadas. Un espectro tomado en el telescopio de 1.5 m del Observatorio de Monte Palomar, y que cubría todo el rango espectral visible, permitió clasificar la estrella como K0V.

Se tomaron ocho medidas de velocidad radial, con alta relación señal a ruido, utilizando el espectrógrafo HIRES en el telescopio Keck I. El análisis de la velocidad radial de la estrella resultó en una medida de la masa de TrES-1 en 0.75±0.07 M_J, alcanzando unas precisiones en cada una de las velocidades radiales de 10-15 m/s, y sin indicios de variaciones en los bisectores de las líneas espectrales. Estas medidas proporcionaron la confirmación final del origen planetario de la señal fotométrica de tránsitos detectada con el telescopio STARE.

Al contrario de lo ocurrido con el exoplaneta que transita frente a HD 209458, el radio medido para TrES-1 está bien explicado por los modelos actuales de planetas irradiados, sin la necesidad de fuentes de energía internas al planeta.

Un trabajo posterior (Sozzetti et al. 2004) incrementó la precisión de los parámetros orbitales y físicos, tanto de la estrella como del planeta. Con estos parámetros, TrES-1 es en la actualidad el segundo exoplaneta mejor conocido de los más de 150 descubiertos hasta la fecha.

Presentamos un análisis preliminar de unas observaciones que hemos realizado utilizando la cámara ACS/HRC con un grisma a bordo del telescopio espacial HST. Estas observaciones permitirán reducir aún más la incertidumbre en los parámetros tanto de la estrella como del planeta. A pesar de que la estrella es unas 40 veces menos brillante que HD 209458, estimamos que

con esta configuración instrumental podemos alcanzar una precisión tan sólo un factor 2.2 peor que la obtenida en HD 209458 con el espectrógrafo STIS a bordo de HST (Brown et al. 2001). Este primer análisis muestra una estructura cerca del centro del tránsito que interpretamos preferentemente como causada por una mancha en la superficie de la estrella que es ocultada al pasar TrES-1 por delante de ella. Un estudio de las curvas de luz originales del telescopio STARE de las estrellas de TrES-1 y de varias estrellas cercanas parece mostrar una mayor dispersión de los datos en la estrella de TrES-1, lo que es consistente con la presencia de actividad magnética en esta estrella. Hay también indicaciones de actividad en la estrella a partir del indicador de Ca II (Sozzetti et al. 2004).

En un rango espectral diferente, hemos buscado el eclipse secundario de TrES-1, producido cuando éste pasa por detrás de su estrella. Para ello, hemos utilizado el detector IRAC a bordo del telescopio espacial infrarrojo Spitzer durante 5.6 horas, realizando observaciones en las bandas centradas en 4.5 y 8 μm. La detección del secundario en ambas bandas (Charbonneau et al. 2005) constituye la primera detección directa de emisión térmica proveniente de estos objetos[1]. Esta detección ha permitido medir la temperatura efectiva del planeta en T_{eff}=1060±50 K, y, si se supone que la emisión se produce de forma isotrópica, el albedo se estima en A=0.31±0.14. La medida de la hora en la que ocurre el centro del secundario permite restringir la excentricidad de la órbita a básicamente 0 (i.e. órbita circular), a no ser que la línea de los nodos esté alienada con nuestra línea de visión.

6.- Soñando con el futuro: El tránsito de Venus de 2004

En un experimento sin precedentes, el tránsito de Venus del 8 de Junio de 2004 proporcionó una oportunidad ideal para poner a prueba la técnica denominada espectroscopía de transmisión, descrita en la Introducción. La atmósfera de Venus está mejor estudiada y conocida que la de los lejanos exoplanetas, y en el 2004 Venus pasaba por delante del Sol (visto desde la Tierra) por vez primera desde 1882. En este Capítulo se describen las observaciones realizadas en la Vacuum Tower Telescope (VTT) situada en el Observatorio del Teide, que permitieron detectar líneas de absorción del $^{12}CO_2$ y $^{13}CO_2$ mediante esta técnica.

Se comienza con una recopilación del conocimiento existente en la parte de la atmósfera de Venus de la que la espectroscopía de transmisión nos puede

[1] Junto con la detección anunciada simultáneamente de emisión térmica en 24 micras de HD 209458b (Deming et al. 2005).

proporcionar información. Esta parte es la mesosfera de Venus, situada entre los aproximadamente 65 y 100 km de altura sobre la superficie. Casualmente, es una región en que la única información acerca de las velocidades de los vientos en estas alturas proviene de unas pocas sondas que penetraron en la atmósfera; por lo tanto, esta información está muy sesgada, consistiendo en datos para una única latitud y longitud, en un momento determinado. En esta región se espera que cambie el régimen de vientos, del flujo zonal retrógrado que se observa en las capas de nubes (a unos 60-65 km de altura), al régimen subsolar-antisolar detectado a alturas superiores a unos 120 km. Se estimaba que las líneas de absorción en tránsito del CO_2 muestrearían este rango de alturas. Las observaciones se planearon para medir desplazamientos Doppler en estas líneas, proporcionando así datos acerca de los vientos en un amplio rango de latitudes (moviendo la rendija del espectrógrafo) y alturas (distintas líneas muestrearían diferentes alturas en el rango de 65-100 km).

Se realizaron observaciones con el Polarímetro Infrarrojo TIP, utilizando óptica adaptativa siempre que fuese posible (después de la primera hora de adquisición de datos, cuando Venus estaba a una altura suficiente sobre el horizonte), en tres bandas centradas en 1.5969, 1.5979 y 1.6129 μm. Describimos detalladamente el proceso de calibración de las imágenes, al que se ha prestado especial atención, debido a la presencia de franjas de interferencia en las imágenes, y al amplio rango de intensidades muestreado (desde el centro del limbo de Venus, en el que la señal era de varios centenares de ADUs, hasta el disco solar, con señales de decenas de miles de ADUs); una mera división por una imagen de campo uniforme tomada moviendo el telescopio no fue suficiente, y describimos el proceso con el que mejores resultados obtuvimos para la eliminación de las franjas interferenciales.

Dividiendo la señal en la posición del limbo de Venus entre la señal 11 pixeles ($\sim 3.8''$) alejados del limbo en la dirección del disco solar, se detectan líneas de absorción en la atmósfera del planeta. Promediando varios centenares de exposiciones de 1 s de integración se obtienen espectros de transmisión en los que se detectan claramente líneas de absorción de $^{12}CO_2$ y $^{13}CO_2$. Sin embargo, la relación señal a ruido de los datos no es suficiente como para intentar una medida del desplazamiento Doppler con la precisión requerida (del orden de 10 m/s), en parte por los problemas con las franjas de interferencia. Finalmente, se promedian los espectros en función de la latitud en la región con las líneas de transmisión detectadas más claramente. Aparentemente, se observan diferencias en las profundidades de las líneas entre las regiones a bajas y altas latitudes venusianas. El trabajo futuro irá dirigido a estudiar el origen de esta dependencia, no descartándose un origen instrumental.

Estas observaciones demuestran la utilidad de este método para detectar

componentes en las atmósferas de los exoplanetas transitantes, con todas las aplicaciones que estas detecciones conllevan para comprender mejor el origen de estos objetos, y, en el futuro, para potencialmente estudiar las atmósferas de planetas similares a nuestra Tierra.

7.- Conclusiones y trabajo futuro

El campo de la investigación en exoplanetas ha evolucionado a una velocidad asombrosa desde el primer descubrimiento de un exoplaneta alrededor de una estrella de tipo solar, 51 Peg (Mayor & Queloz 1995). Entre las diversas técnicas de detección, el método de los tránsitos constituye la herramienta más potente para medir parámetros físicos de estos intrigantes Júpiteres calientes. Combinado con las medidas de la velocidad radial de la estrella huésped, nos puede proporcionar la densidad del planeta, que acarrea pistas acerca de su historia de formación. El descubrimiento en los próximos años de nuevos planetas en tránsito por proyectos diversos, tanto desde tierra como desde el espacio, aumentará nuestro conocimiento acerca de estos objetos. Estamos comenzando a ser capaces de realizar "planetología comparada", y nuevas perspectivas acerca de la distribución de masas real de estos objetos surgirán en el futuro cercano. Algunos autores han comparado la situación actual con el estado del conocimiento de la evolución estelar justo antes de que el primer diagrama H-R fuese construido. Con más de 150 planetas descubiertos hasta la fecha, nos aproximamos a la situación en la que los estudios estadísticos de estos objetos comienzan a ser significativos.

7.1.- *Conclusiones en el campo de exoplanetas.*

Las conclusiones del presente trabajo se resumen en los siguientes puntos:

- Hemos descubierto el primer planeta transitante detectado mediante un telescopio de campo amplio (STARE), TrES-1. Orbita a una estrella del tipo K0V moderadamente activa, que no muestra restos de Litio hasta los niveles detectables. Las medidas de la masa, de 0.76 ± 0.05 M_J, y del radio, de $1.04^{+0.08}_{-0.05}$ R_J, hacen que este planeta sea el segundo mejor conocido en términos de precisión en sus parámetros físicos. Al contrario de lo que sucede con el exoplaneta mejor estudiado en la actualidad, HD 209458b, el radio de TrES-1 se explica adecuadamente con los modelos de evolución de planetas bajo una intensa radiación de la estrella huésped. No se necesita una fuente adicional de energía en el planeta. Un trabajo reciente (Charbonneau et al. 2005) nos permitió detectar el eclipse secundario, lo que constituye la primera observación de emisión térmica procedente de

un exoplaneta, en 4.5 y 8 μm. Con esta detección, se estima que la temperatura efectiva del planeta es de T_{eff}=1060±50 K, y la excentricidad ha de ser básicamente nula ($e \cos w$=0.0030±0.0019).

- Se ha realizado un análisis detallado de las distintas técnicas de seguimiento que se requieren para confirmar o descartar un candidato a planeta transitante, y se ha propuesto un esquema ordenado de pruebas, que van desde las más económicas en términos de esfuerzo y medios necesarios hasta las más costosas. Este esquema consiste en realizar:

  - Una interpretación cuidadosa de la curva de luz: buscar modulaciones en las partes fuera de eclipse, y ajustar la forma del tránsito.
  - Velocidades radiales con baja señal a ruido, para detectar los sistemas eclipsantes estelares.
  - Fotometría multicolor de los tránsitos, encaminada a detectar sistemas estelares triples.
  - Imagenes con muy alta resolución espacial, para tratar de resolver los sitemas estelares triples (bien jerárquicos o bien no ligados).
  - Velocidades radiales con alta señal a ruido y un análisis de los bisectores de las líneas, para finalmente medir el movimiento de la estrella huésped, y de esta forma inferir la masa del planeta.

- Se ha analizado en detalle un campo de la red TrES en la constelación de Lyra, prestando una atención especial a las observaciones de seguimiento de los 16 objetos que se identificaron como candidatos a planetas transitantes. Estas observaciones dieron lugar a la detección de 6 sistemas estelares binarios, 7 sistemas triples no resueltos en las imágenes de STARE, 2 casos no resueltos y del planeta transitante TrES-1.

- El tránsito de Venus en el 2004 nos ha permitido detectar por primera vez trazas de $^{12}CO_2$ y $^{13}CO_2$ en la atmósfera del planeta mediante el uso de la técnica de espectroscopía de tránsito. El trabajo futuro irá encaminado a interpretar los espectros de transmisión obtenidos, y la aparente dependencia de las profundidades de las líneas en función de la latitud venusiana muestreada.

7.2.- *Conclusiones en el campo de variabilidad estelar.*

Se han realizado varios estudios en el campo de variabilidad estelar utilizando los datos de STARE. Se encuentran resumidos en los dos apéndices de la tesis. Las principales conclusiones que se extraen de estos estudios son:

- Las curvas de luz de STARE (o de cualquiera de los telescopios de TrES) poseen la precisión suficiente como para realizar estudios serios de variabilidad estelar.

- Se ha estudiado en detalle la curva de luz de STARE de la estrella tipo $\delta\tilde{\text{S}}$cuti V1821 Cygni, detectando 4 frecuencias de pulsación evidentes. Una de las frecuencias no había sido detectada en estudios anteriores de la estrella. Otras 3 frecuencias cercanas al nivel de ruido podrían servir para explicar la aparente variabilidad de la amplitud de la frecuencia principal de pulsación f_1. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que f_1 sea intrinsecamente variable en amplitud, y que las 3 frecuencias cercanas detectadas sean un artefacto de la herramienta utilizada para el análisis de las frecuencias.

- Se han proporcionado frecuencias, amplitudes y fases para 5 nuevos pulsadores descubiertos en la constelación del Cisne, como resultado colateral a la investigaciń de V1821 Cygni.

- Un total de 38 estrellas variables han sido descubiertas con STARE en campos potenciales de la misión espacial COROT, como resultado de una colaboración con este proyecto. Algunas son demasiado débiles como para ser observadas con las CCDs de sismología de COROT, o bien están demasiado lejos de los objetos principales; aún así 18 estrellas han sido identificadas como potenciales objetivos secundarios para las CCDs de sismología de COROT. La mayoría son estrellas del tipo δ Sct, si bien también se han descubierto variables γ Dor y binarias eclipsantes.

7.3.- *Trabajo futuro*

Un análisis preliminar de las observaciones de TrES-1 utilizando HST/ACS resulta en una determinación de los parámetros del planeta que están dentro de las barras de error proporcionadas en este trabajo. El estudio detallado de la forma de la entrada y salida del tránsito en estos datos permitirá buscar anillos en TrES-1. La medida precisa de los tiempos en los que ocurren los tránsitos, y los residuos del ajuste del tránsito serán utilizados para buscar hipotéticos satélites de tamaño del orden de la Tierra en torno a TrES-1.

Se necesita más trabajo para interpretar las observaciones llevadas a cabo durante el tránsito de Venus de 2004. Especialmente, para tratar de comprender o interpretar el origen de la aparente dependencia de la profundidad de las líneas de transmisión con la latitud. En particular, una medida de los cocientes entre las anchuras equivalentes de dos líneas claras de $^{12}CO_2/^{13}CO_2$ puede

proporcionar pistas acerca de las temperaturas en las alturas en las que dichas líneas se vuelven opacas a los rayos solares tangenciales.

Aunque muchos de los candidatos de la red TrES se descartan como sistemas eclipsantes binarios (o triples), hay bastante información valiosa acerca de los tamaños de las estrellas eclipsantes con una componente de tipo M. Algunos de los miembros de la colaboración TrES están trabajando en obtener los parámetros físicos y orbitales de estos sistemas binarios. Como un primer resultado, se ha encontrado en uno de los campos de TrES en la constelación de Hércules el cuarto sistema binario eclipsante descubierto hasta ahora compuesto por dos estrellas de tipo M (Creevey et al. 2005).

Y, finalmente, la red TrES seguirá en marcha durante al menos tres años más, rastreando el cielo nocturno a la caza de nuevos exoplanetas transitantes.

Cuando se haya detectado un número significante de candidatos a planetas transitantes, tendrá sentido realizar un estudio detallado acerca del ritmo de detección de falsos positivos, conociendo la naturaleza de cada uno de éstos. Un estudio de este tipo podría servir para establecer si el ritmo de detección de los exoplanetas transitantes concuerda con el ritmo de detección de los exoplanetas detectados hasta ahora con la técnica de las velocidades radiales.

8.- Apéndice A: Estudios de δ Scuties con los datos de STARE

En este primer Apéndice, se estudia la curva de luz de una estrella del tipo δ Scuti (V1821 Cygni), obtenida con el telescopio STARE en un campo de la constelación del Cisne. Algunos estudios en la literatura demostraban que la estrella pulsaba de forma multiperiódica, y habían indicios de variaciones en la amplitud de uno de los modos de pulsación. La curva de luz del telescopio STARE sirve para confirmar esta variabilidad en amplitud, investigar acerca de su origen (causada por frecuencias de pulsación cercanas vs. variaciones intrínsecas del modo) y para detectar frecuencias de pulsación que no habían sido observadas en los trabajos de otros autores. Con esto, se demuestra cómo los datos de un telescopio de pequeña apertura (STARE) son capaces de competir con los datos tomados por telescopios bastante más grandes.

Se comienza resumiendo las observaciones previas de esta estrella, realizadas en los trabajos de Delgado et al. (1984) y Zhou, Liu & Du (2001). El segundo trabajo es el resultado de unas observaciones más intensivas que el primero, consistiendo en 21 noches de observación. Los dos grupos de observaciones no proporcionan las mismas frecuencias, y el segundo trabajo fuerza un ajuste de los datos de Delgado et al. a las frecuencias obtenidas en la campaña de 21 noches de observación; de esta forma, concluyen que el modo principal de pulsación es variable en amplitud. Esta introducción finaliza con un breve

repaso del tema de las variaciones en amplitud y fase de otras estrellas del mismo tipo en la literatura.

A continuación se describen los datos obtenidos con el telescopio STARE en la constelación del Cisne, durante dos campañas de observación en 2001 y 2002. Un análisis mediante el uso del programa Period98 (Sperl 1998, el mismo programa que el utilizado en el trabajo de Zhou et al.) de la curva de luz combinada de las dos campañas sirve para detectar cuatro frecuencias de la estrella con una amplitud mayor que 4 veces el promedio del ruido en una ventana de una anchura de 5 c/d centrada en cada una de las frecuencias. De estas cuatro frecuencias, una (f_3) no fue observada en los estudios anteriores, y otra (f_4) está publicada en el trabajo de Delgado et al., pero resultó indetectable en el trabajo de Zhou et al. Se evalúa seguidamente la hipótesis de la variación en amplitud de la frecuencia f_1, concluyendo que existen variaciones tanto en amplitud como en fase de esta frecuencia. Para descartar el origen instrumental de estas variaciones, jugamos con la ventaja de que hay varias estrellas con pulsaciones en el mismo rango de frecuencias y amplitudes en las imágenes de STARE; proporcionamos las frecuencias, amplitudes y fases de 5 de estas estrellas, para las cuales no existen trabajos publicados, por desconocerse su naturaleza variable. Una de estas 5 estrellas parece mostrar también variaciones en amplitud y fase.

Una vez confirmada esta variación en la amplitud y la fase de f_1, realizamos un estudio más detallado, encaminado a discernir, entre dos posibles orígenes, la causa de esta varición: intrínseca al modo, o causada por interferencias con frecuencias cercanas de baja amplitud. Para ello, se describe la forma en la que se elimina la contribución de las frecuencias f_2, f_3 y f_4 de la curva de luz, para descartar posibles efectos de interferencia con estos modos. En esta nueva curva de luz, se realiza un ajuste de la amplitud y la fase de la frecuencia f_1 en bloques de 10 días de duración. De esta forma, se obtiene la Figura 8.5, en la que se distingue un cambio en amplitud de unas 4 mmags y un posible cambio en la fase que no ocurre en el momento de mínima amplitud. Esto apunta hacia que el origen de las variaciones de f_1 no puede estar causado por la interferencia de dos frecuencias cercanas. Sin embargo, podemos reproducir los cambios en amplitud y fase de f_1 si consideramos 3 frecuencias adicionales cercanas a f_1 y que se encuentran próximas al nivel de ruido en el espectro. Desgraciadamente, no se puede distinguir con estas herramientas si el origen de estas frecuencias cercanas es intrínseco a la estrella o un resultado de utilizar el análisis de Fourier en señales que son variables con el tiempo. El haber detectado la frecuencia f_4 próxima al nivel de ruido, mientras que en el trabajo de Delgado et al. se veía claramente, y en el de Zhou et al. pasó inadvertida nos hace sospechar que este modo también posee importantes variaciones en amplitud.

9.- Apéndice B: Observaciones de STARE para COROT

Este último Apéndice resume la detección de nuevas estrellas variables en campos potenciales de la misión espacial COROT, utilizando el telescopio STARE. Algunas de estas estrellas variables podrían ser observadas como objetos secundarios en las cámaras de astrosismología de COROT, en sus campañas de observación continuadas de 150 d de duración. La misión COROT tiene previsto su lanzamiento en Junio de 2006.

Se describe someramente la misión COROT, y la motivación para el uso de STARE como instrumento para detectar nuevas estrellas variables accesibles a la misión. De esta forma, se realizaron campañas apuntando tanto al centro como al anticentro galáctico, resultando en 38 estrellas variables detectadas en el anticentro, de las cuales 11 cumplen todas las condiciones para ser observadas como objetivos secundarios de la misión, 18 son más débiles que el límite de magnitud V<9.5 impuesto para que un objeto sea observado en las cámaras de astrosismología, y 9 están demasiado alejadas de potenciales objetivos primarios de COROT.

Las observaciones hacia el centro galáctico permitieron detectar 7 estrellas variables con brillo V<9.5, y otras 7 más débiles que este valor. De las 7 estrellas variables brillantes, 3 fueron descubiertas en estas observaciones, así como 6 de las 7 estrellas débiles.

CÓDIGOS DE LA UNESCO:

- **21302: Astronomía óptica: Telescopios**
- **21407: Planetología: Planetas**
- **21403: Planetología: Atmósfera planetaria**