

MÈTODES DE DETECCIÓ I ANÀLISI
D'EXOPLANETES

Rubén Soussé Villa
2n de Batxillerat
Tutora: Dolors Romero
IES XXV Olimpíada
13/1/2011



Índex

- Introducció	5
---------------------	---

[Marc Teòric]

1. L'Univers	6
1.1 Les estrelles	6
1.1.1 Vida de les estrelles	7
1.1.2 Classes espectrals	9
1.1.3 Magnitud	9
1.2 Sistemes planetaris: El Sistema Solar	10
1.2.1 Formació	11
1.2.2 Planetes	13
2. Planetes extrasolars	19
2.1 Denominació	19
2.2 Història dels exoplanetes	20
2.3 Mètodes per detectar-los i saber-ne les característiques	26
2.3.1 Oscil·lació Doppler	27
2.3.2 Trànsits	29
2.3.3 Astrometria	33
2.3.4 Observació directa	35
2.3.5 Microlent gravitacional	38
2.3.6 Cronometratge	39
2.3.7 Altres	41
2.4 Missions i projectes actuals i futurs	46
2.4.1 Actuals	46
2.4.2 Futurs.....	50
2.5 Exoplanetes descoberts	52

[Treball de Camp]

3. Observació del trànsit d'un planeta extrasolar	59
3.1 Introducció	60
3.2 Hipòtesi	61
3.3 Material	62
3.4 Observació	62
3.5 Anàlisi de dades	63
3.6 Resultats	64
3.7 Conclusions	65
3.8 Càlcul del radi de l'exoplaneta	66

- Conclusions.....	68
- Glossari	72
- Bibliografia	75
- Annexos	90



Per al meu pare



(Fotografia presa per la sonda espacial Voyager 1 el febrer del 1990. Feta des de 6.000 milions de quilòmetres, és la fotografia més llunyana de la Terra que s'ha fet mai, la qual apareix al centre com un diminut punt blau.)

"Mira ese punto. Eso es aquí. Eso es casa. Eso es nosotros. En él se encuentra todo aquel que amas, todo aquel que conoces, todo aquel del que has oído hablar, cada ser humano que existió, vivió sus vidas. La suma de nuestra alegría y sufrimiento, miles de confiadas religiones, ideologías y doctrinas económicas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de la civilización, cada rey y cada campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, cada esperanzado niño, inventor y explorador, cada maestro de moral, cada político corrupto, cada "superestrella", cada "líder supremo", cada santo y pecador en la historia de nuestra especie vivió ahí – en una mota de polvo suspendida en un rayo de luz del sol. [...]"

Nuestro planeta es una mota solitaria de luz en la gran envolvente oscuridad cósmica. En nuestra oscuridad, en toda esta vastedad, no hay ni un indicio de que la ayuda llegará desde algún otro lugar para salvarnos de nosotros mismos..."

Carl Sagan (comentant la fotografia)

Del llibre "*Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*," Random House, 1994.



AGRAÏMENTS

Per fer aquest treball he tingut la sort de comptar amb la col·laboració de molta gent que m'ha recolzat desinteressadament durant la seva realització, i, fins i tot, en coses que no tenien finalitat en el treball però que m'han ajudat molt a fer-lo i a entendre'l. Així doncs, que menys que anomenar-los encara que sigui una petit gest comparat amb el que molts d'ells han fet.

D'entrada, vull agrair a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell per complir la seva promesa de donar suport a qualsevol soci de l'entitat en els seus projectes, així com als seus membres per divulgar l'astronomia de manera tant desinteressada. Particularment dins de l'agrupació, vull agrair l'especial col·laboració de l'Albert Morral per recolzar-me als inicis del treball i per comprometre's a proporcionar-me una observació pel treball de camp, al Fernando Salado per la utilitat que m'han fet les seves lliçons sobre el funcionament del telescopi, així com al Xavier Puig per fer-me de tutor fora de l'institut, per ser tan altruista a l'hora de treballar per tal que pogués tirar endavant la meva recerca i per aguantar pacientment totes les meves preguntes, dubtes i reunions que li he demanat en el seu temps lliure.

Fora de l'agrupació, primer agrair als professors de l'institut la seva atenció per qualsevol dubte puntual que he tingut i el seu oferiment per resoldre'l. I com no, a la meva tutora de l'institut, Dolors Romero, per oferir-se a portar-me el treball encara que reconegués tenir pocs coneixements d'astronomia i ser conscient de la dificultat que això pot haver comportat per ella a l'hora de fer el seguiment, tot per procurar que jo fes el treball d'aquest camp de la ciència que tant m'agrada i apassiona, i que sense ella no hagués estat possible.

En segon lloc, donar les gràcies a la meva família, tant a ma mare, per permetre'm associar-me a l'agrupació i aguantar els meus continus viatges nocturns a Sabadell, com al meu oncle, per ser tant summament generós a dur-me en cotxe a Barcelona en hores indigeribles sempre que podia i a oferir-se a fer-ho amb tanta entrega.

I per últim lloc, i no per això menys important, gràcies a tu que et molestes a llegir aquest treball fet amb l'ajuda de tots ells.



INTRODUCCIÓ

Mirant el cel nocturn, l'ésser humà s'ha preguntat durant mil·lenis si estem sols a l'Univers, sobre què o qui hi ha allà fora i sobre els llocs que deuen habitar.

Flotant enmig d'aquesta immensitat desoladora, vivim en l'únic planeta que sabem que pot suportar la vida, girant entorn una estrella qualsevol. No obstant, de nit veiem milers de milions d'estrelles com la nostra. Si hi ha algú més, és fàcil pensar que visqui com nosaltres; en llunyans planetes o llunes al voltant d'estrelles semblants al Sol.

Però, hi ha planetes orbitant altres estrelles? La pregunta de si és habitual l'existència de sistemes planetaris en estrelles o, per contra, si és el Sistema Solar un cas aïllat a la nostra galàxia se l'han fet moltes persones al llarg de la història, i sovint no era gaire prudent plantejar-se-la. Tot i això, aquesta pregunta fa molt poc temps que ha començat a resoldre's.

Tan sols fa quasi vint anys que es va descobrir el primer planeta que no girava al voltant del Sol. Avui veiem que en són molts més dels què hi ha al Sistema Solar, i el ritme de descobriments s'accelera, impulsat per l'esperança de trobar-hi en algun d'ells una oportunitat per a la vida. Amb la promesa de llocs totalment diferents als què mai hàgim vist ni imaginat, aquest nou àmbit de la ciència ha revolucionat la comunitat científica, tot i que per ara el màxim que hem vist només són les ombres d'aquests nous móns.

Aquests, juntament amb el meu interès i vocació per l'astronomia, són els principals motius que m'han dut a investigar tot el que engloba l'actual recerca d'exoplanetes, preguntant-me **quins mètodes utilitzen els científics per saber que existeixen els exoplanetes, i quin procediment se segueix a l'hora de trobar-los i analitzar-los.**

Encara que la principal raó que impulsa la recerca d'exoplanetes és trobar-hi vida, en aquest treball m'he concentrat sobretot a saber com es detecten els exoplanetes per la simple raó de descriure la seva existència, i no amb l'objectiu de trobar vida extraterrestre. Per tant, no m'he endinsat pas en els múltiples assumptes biològics que ha comportat el seu estudi.

He intentat que s'entengui el millor possible en cada apartat, per això he destinat el primer capítol a introduir aquells conceptes d'astronomia que s'han d'incloure més endavant en el treball i s'han explicat les paraules en *cursiva* al glossari.



1. L'UNIVERS

Per definició, l'Univers és tot. Així anomenem Univers a tot el continu espai-temps i a tota la matèria-energia que conté i el componen. Al llarg del temps, aquesta matèria-energia ha anat formant *astres* diversos; com les estrelles, galàxies i planetes, a més de tots els cossos que no són astres, com els organismes vius.

L'origen de l'Univers és explicat per la teoria del Big Bang o de la Gran Explosió, que postula que el nostre univers es va originar en la gegantina explosió d'un punt on es concentrava, a densitat i temperatura inconcebiblement altes, tota la matèria i energia que avui coneixem. A la vegada, aquesta explosió va donar inici a l'espai i el temps que governen el cosmos.

A partir d'aquí es van anar conformant les forces conegudes de la física i les partícules elementals, les quals van anar adquirint més complexitat fins a formar els àtoms dels elements més senzills, mentre que l'univers s'anava expandint i refredant gradualment.

Amb aquests àtoms i per llargs processos de condensació és formaren les primeres estrelles i posteriorment les galàxies, arribant a l'univers que avui dia comencem a conèixer.

L'Univers és molt gran i extens, és per això que tots els objectes que veiem fora de la Terra semblen tant petits. Per tant, requerim d'aparells per augmentar la mida de la imatge que rebem d'aquests cossos, sinó la nostra visió de l'Univers es basaria en el que veiem a ull nu. No obstant, no va ser fins el 1609 que Galileu Galilei va apuntar per primer cop un telescopi al cel. De fet, les eines que té l'astronomia no passen d'aquí, doncs és una ciència que s'ha de conformar amb la simple observació i a estudiar a distància, sense tenir gaires oportunitats per experimentar i havent d'abusar de l'especulació.

En aquest capítol es repassaran breument alguns conceptes d'astronomia a tenir en compte a l'hora de parlar sobre els exoplanetes.



fig. 1: Les estrelles tan sols es veuen com petits punts brillants al cel nocturn. A la fotografia, la Via Làctia de perfil.

1.1 LES ESTRELLES

Si algun cop mirem de nit al cel, si és clar i fosc, de ben segur que veurem els estels, punts brillants en la foscor. Durant molt de temps no ens vam imaginar que un d'aquells punts era



molt a prop nostre; el Sol és un estel com els demés, només que ell està molt més pròxim a nosaltres. Així doncs, el que veiem de nit són “Sols” llunyans dispersats per l’espai.

Els estels són estrelles, grans esferes de gas incandescent que irradien energia a l’espai a causa de les reaccions nuclears que tenen lloc en els seus nuclis (fig. 2).

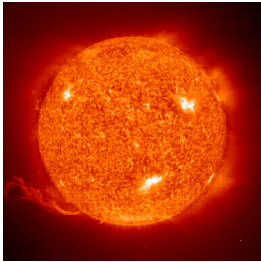


fig. 2: Fotografia del nostre Sol pel satèl·lit SOHO. L’aspecte és semblant al de la majoria d’estrelles.

El gas que les formen és principalment l’hidrogen (H), i les reaccions nuclears són *fusions nuclears* d’àtoms d’aquest element a altíssimes temperatures (de l’ordre d’ $1,5 \cdot 10^7$ K).

L’energia alliberada per aquestes reaccions de fusió és expulsada de l’estrella en forma de radiacions diferents, com les del rang visible; la llum que veiem dels estels.

El fet de que es vegin com petits punts és causat per l’enorme distància que ens separa de cadascuna d’elles. Aquestes distàncies, com la majoria a l’espai, són molt majors que les que utilitzem en el dia a dia, fent que el quilòmetre es quedi molt petit. Per això, s’han establert diverses magnituds de distància per mesurar l’espai que separa els astres a l’Univers. Les més emprades són l’*any llum* i el *parsec* per mesurar distàncies entre estrelles.

1.1.1 VIDA DE LES ESTRELLES

Les estrelles no són immutables com s’ha cregut durant molt de temps, sinó que neixen, evolucionen i moren. Aquestes tres etapes es duen a terme en períodes de temps llarguíssims, a causa d’això difícilment veurem cap canvi en una estrella al llarg de la nostra vida. (vegeu annex 1.1)

Però com s’han format les estrelles? Bé, les estrelles es formen en *nebuloses*, gegantines agrupacions de gas (principalment d’hidrogen) i pols a l’espai (fig. 3). A causa de la condensació d’aquest gas, que pot ser deguda a molts fenòmens diferents, es va formant gradualment una esfera de gas compacte. En augmentar la seva mida, n’augmenta la temperatura, fins a arribar a un punt en què s’inicia la fusió nuclear dels àtoms d’hidrogen que formen el gas. L’esfera comença a emetre energia i, conseqüentment, a brillar; tenim una estrella.



fig. 3: Part de la nebulosa de l’Àguila on s’estan formant estrelles a partir del gas condensat.



A partir d'aquí, l'evolució individual de l'estrella dependrà de l'equilibri de les seves reaccions nuclears internes: mentre les reaccions es duen a terme de manera igual i contínua l'estrella serà estable i no sofrirà canvis, aquest període és anomenat *Seqüència principal*, el qual serà el període més llarg de la vida de l'astre i en el que es troba el Sol (annex 1.3).

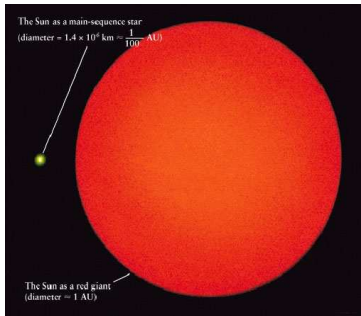


fig. 4: Comparació d'una gegant vermella (en vermell) amb el nostre Sol (en groc).

Però la fusió nuclear que duen a terme té un preu, l'hidrogen es fusiona i passa a ésser Heli (He). Durant la Seqüència Principal l'hidrogen va fusionant-se, però arriba un moment en què aquest s'acaba, acabant-se el combustible de l'estrella. Només queda Heli, fet que produeix un canvi dràstic en la composició química de l'estrella, canviant les reaccions nuclears i començant a fusionar nuclis d'Heli formant així Carboni (C).

Però en fer això l'estrella canvia l'estructura; passa a ésser una *Gegant Vermella* (fig. 4); l'estrella s'infla lentament augmentant notablement la seva grandària i adoptant un color rogenc (d'aquí el nom).

El que passi ara depèn de la massa de l'estrella; Si l'estrella té fins a 9 *Masses solars* ($M_{\odot}$)¹, la majoria de les capes de la gegant vermella es despendran lentament a l'espai i aquestes formaran una *nebulosa planetària*. El nucli de carboni de l'estrella queda sol al mig de la nova nebulosa planetària formada, essent un *nan blanc*, anomenat així per la seva brillantor dèbil i blanca. Si, en canvi, l'estrella té més de 9 $M_{\odot}$, explotarà en una gegantina explosió que s'anomena *supernova*, deixant rere seu un nucli molt dens anomenat *estrella de neutrons*. Aquests cossos poden emetre radiacions pels seus pols magnètics de manera polsant (o sigui, repetidament diverses vegades per segon). Quan casualment un dels seus pols es troba apuntant cap a la Terra, nosaltres podem captar aquestes emissions polsants; aleshores anomenem a aquests cossos "púlsars" (annex 1.1).

Les estrelles estan dispersades per la galàxia unides per la força de la gravetat que hi ha entre elles, però no cal que cadascuna estigui sola i aïllada de la resta, sinó que dues estrelles poden aparellar-se i orbitar, per efecte de la seves pròpies gravitats, una entorn de l'altre a poca distància i mantenir-se en aquest estat indefinidament. Són les anomenades "estrelles

¹ Atribuïnt al nostre Sol una massa de valor 1 ($M_{\odot} = 1$), indiquem les masses de les estrelles relacionant-les amb el Sol, per tant, una estrella amb 9 $M_{\odot}$ tindrà 9 vegades més massa que el Sol (fet que no significa que sigui 9 vegades més gran en volum).



binàries”, les quals formen un sistema de dues estrelles que poden tenir diversos tipus d'òrbites entre elles (annex 1.5), però que a la llunyania semblen una de sola.

El 50% d'estrelles que hi ha a la galàxia formen part de sistemes amb més d'una estrella, així doncs, gran part dels estels que veiem al cel en són més d'un en realitat. Veurem més endavant que l'existència de planetes en aquests sistemes és complicada, en excepció de casos concrets (pàg. 58).

1.1.2 CLASSES ESPECTRALS

L'espectroscòpia s'utilitza per analitzar la llum i altres tipus de radiacions emeses i absorbides pels àtoms. Així doncs, té una gran importància en l'estudi de les estrelles ja que l'única cosa que ens arriba d'elles són les seves radiacions. Les estrelles es poden classificar segons molts criteris, però de les més importants en astronomia és la classificació segons les característiques de les radiacions que ens arriba d'elles, o sigui, segons el seu *espectre*. Aquest proporciona característiques de l'estrella com el color, la temperatura i la composició química.

Actualment, classifiquem les estrelles en 7 classes espectrals denominades per les lletres O, B, A, F, G, K i M (vegeu annex 1.2 per veure les principals característiques de cada classe). A la vegada, cada classe es divideix en 10 subclasses; d'aquesta manera, el Sol pertany a la classe G2.

Alhora, es pot determinar la lluminositat d'una estrella a partir de la seva classe espectral. Aquesta relació es recull en el diagrama Hertzsprung-Russell, el qual també es pot utilitzar per determinar el radi d'una estrella simplement analitzant el seu espectre (annex 1.3).

1.1.3 MAGNITUD

A simple vista podem veure que hi ha estrelles que són més brillants que altres. La magnitud és la mesura de la brillantor, o lluminositat, d'una estrella que veiem en el cel quan observem a ull nu, o sigui, sense cap instrument.

El primer catàleg estel·lar va ser creat per Hiparco de Nicea cap a l'any 150 aC. En ell va catalogar 1080 estrelles, cadascuna amb la seva respectiva posició i brillantor en el firmament. Hiparco va classificar les estrelles en sis categories anomenades “magnituds” segons la seva lluminositat

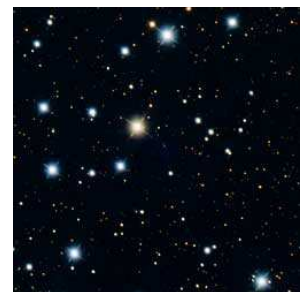


fig. 5: Com es pot veure, no totes les estrelles brillen amb la mateixa intensitat.



en el cel; les estrelles més brillants pertanyien a la primera magnitud (la magnitud més baixa) i les estrelles quasi invisibles a l'ull humà pertanyien a la sisena magnitud (la més alta).

Actualment, la magnitud d'una estrella es determina per processos fotogràfics, però s'ha mantingut l'escala de magnituds creada per Hiparco, tot i que ha estat ampliada i modificada.



fig. 6:
Representació
de magnituds.

Recapitulant, les magnituds són valors numèrics que assignem a cada estrella segons la seva brillantor comparada amb la d'altres estrelles model. Així és, que atribuïm la magnitud 0 (mag = 0) a la brillantor de l'estrella Vega, a la constel·lació de Lyra, i, en comparació, determinem les magnituds de les estrelles restants. Amb l'ús de la fotografia s'ha experimentat que una estrella de magnitud 0 és 100 vegades més brillant que una de magnitud 6, donant a lloc que entre magnituds consecutives hi ha una diferència de brillantor de 2'5 aproximadament².

Gràcies a la gran capacitat dels aparells actuals, s'han arribat a mesurar magnituds per sobre del valor 6, o sigui, estrelles invisibles a simple vista. Tanmateix, s'han inclòs altres astres més brillants que els que tenen magnitud 0, tenint magnituds negatives (annex 1.4).

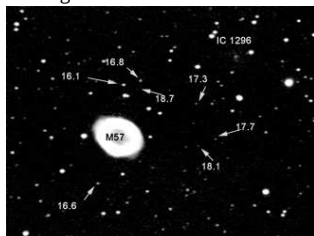


fig. 7: Cada estrella té una magnitud determinada segons la seva brillantor.

L'escala de magnituds és una escala logarítmica que es defineix per l'equació:

$$m = -2.5 \cdot \log(I)$$

On: - "m" és la magnitud de l'estrella.

- "I" és la intensitat lumínica de l'estrella, mesurada en Watts/m².

1.2 SISTEMES PLANETARIS: EL SISTEMA SOLAR

En aquest apartat s'explicarà bàsicament com és el nostre Sistema Solar per tal d'introduir els sistemes planetaris i les seves característiques, les quals es tindran en compte alhora de buscar i analitzar planetes de sistemes extrasolars.

² Per exemple: una estrella de magnitud 0 és 2'5 vegades més brillant que una de magnitud 1, una de magnitud 1 és 2'5 vegades més brillant que una amb magnitud 2, i així successivament.



Un sistema planetari està format per, almenys, una estrella central com a cos principal i objectes que mantenen òrbites entorn seu, entre els quals hi ha d'haver planetes.

1.2.1 FORMACIÓ

La formació d'un sistema planetari va molt lligada a la formació de la seva estrella central. De fet, es formen simultàniament estrella i planetes a la nebulosa d'origen. La teoria que ho descriu s'anomena "Teoria de la nebulosa primitiva", i ja va ser proposada per Immanuel Kant i Pierre Simon Laplace al segle XVIII.

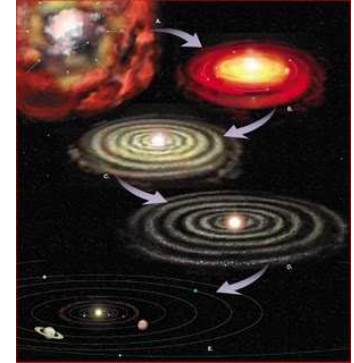


fig. 8: Esquema de la teoria de la nebulosa primitiva.

- Si agafem d'exemple al Sistema Solar, aquesta teoria diu que quan va començar la contracció del gas de la nebulosa fa 5.000 milions d'anys, l'esfera de gas concentrat que donaria lloc a l'estrella tenia un moviment de rotació que va provocar que l'esfera formés un disc pla.

- En aquest disc, al centre dens i calent es va anar formant el Sol, mentre al disc equatorial circumdant es va anar acumulant pols, augmentant la seva densitat mentre gira de forma circular. Aquest disc és l'anomenat disc "d'acreció" o disc "protoplanetari", anomenat així perquè és on es formaran posteriorment els planetes (fig. 9).



fig. 9

- Van haver de passar 100.000 anys per què al centre s'iniciessin reaccions de fusió nuclear; s'havia creat el Sol. Mentrestant, els grans de pols del disc d'acreció es van anar agrupant i formant gradualment cossos compactes cada cop més grans, anomenats *planetesimals* (fig. 10).



fig. 10

- El disc, el qual seguia girant entorn al nou Sol, era un sistema cada cop més aplanat i totalment caòtic, ple de planetesimals i cossos

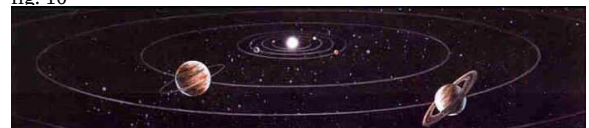


fig. 11

que xocaven entre sí contínuament (fig. 12). En xocar, es fusionaven formant cada cop cossos més grans a la vegada que es netejava el disc de roques, fins arribar a formar planetes³ amb òrbites més o menys circulars (igual que el disc d'acreció) i força separades entre elles. Els planetes, molt més petits que una estrella, mai arribarien a la grandària suficient per encendre's

³ L'Astronomia considera que un astre és un planeta quan té unes dimensions compreses entre uns valors determinats i unes característiques que després es comentaran.



com el Sol (fig. 11). En el nostre Sistema Solar s'han format vuit planetes: Mercuri, Venus, la Terra, Mart, Júpiter, Saturn, Urà i Neptú, cadascun d'ells amb els seus respectius *satèl·lits* girant entorn seu (fig. 13).

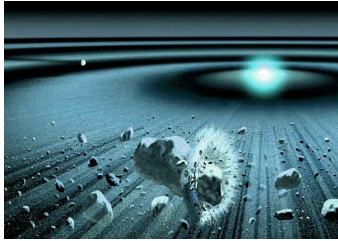


fig. 12: El xoc de planetesimals donarà lloc als planetes entorn una estrella.

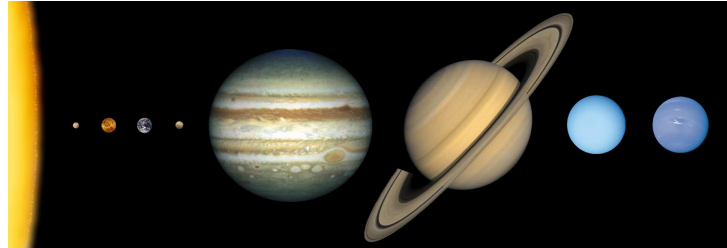


fig. 13: Representació en ordre dels planetes del nostre Sistema Solar.

Ara bé, el Sistema Solar està ple d'incomptables objectes celestes de petites dimensions que no es van agrupar en planetes. Parlem, a més de gas i pols, dels famosos asteroides i cometes que vaguen per l'espai al llarg de les seves excèntriques òrbites al voltant del Sol.

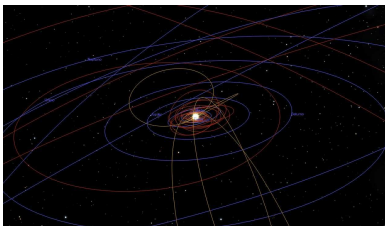


fig. 14: Algunes de les òrbites que segueixen diversos cossos entorn el Sol.

Tots aquests objectes, així com els planetes, els podem veure com a punts en el cel (els més petits quasi invisibles) gràcies a la llum del Sol que ens rebota de la seva superfície, ja que ells per sí sols no emeten llum.

Fins feia poc no és coneixia l'existència d'altres sistemes planetaris a més del Solar. I tot i que s'han trobat exoplanetes, no sabem si el nostre model de sistema planetari és comú a la galàxia o no. Però gràcies a les observacions directes de discs protoplanetaris en altres estrelles, com els discs de les estrelles del Trapezi a la nebulosa d'Orió (annex 1.6), sabem que la teoria de la Nebulosa Primitiva és correcta en les bases, ja que s'han pogut veure altres sistemes planetaris en formació allà a fora amb discs d'acreció que, a més, ens ajuden a comprendre com es va formar el nostre Sistema Solar.

Però concentrem-nos exclusivament en el planetes; Què considerem un planeta? Què caracteritza la seva òrbita? Per què són diferents entre ells? Quins tipus coneixem?



1.2.2 PLANETES

Mercuri, Venus, la Terra, Mart, Júpiter, Saturn, Urà i Neptú han estat els únics exemples que hem tingut durant molt de temps d'una mena de cossos ben especials; els planetes. Gegants esfèrics flotant en l'espai al voltant del Sol, d'especial interès per ser els únics indrets de l'espai on es poden combinar els elements enriquint l'ambient. Alguns poden ser punts de combinació biològica amb la capacitat de desenvolupar vida o amb la possibilitat d'habitar-los nosaltres. Ara bé, molts pocs tenen aquest do; ara per ara, només en coneixem el nostre.



fig. 15: Representació artística de tres planetes.



fig. 16: Representació de Plutó (amb Caronte) i Eris amb el seu satèl·lit a escala amb la Terra (a sota).

Actualment són vuit els planetes del Sistema Solar, però abans del 2006 n'eren nou. Per què Plutó ja no és considerat un planeta? El problema és que es van descobrir cossos en una zona molt exterior del Sistema Solar, anomenada *cinturó de Kuiper* (annex 1.7), que tenen quasi la mida de Plutó, fins que al 2005 es va trobar un astre una mica més gran, Eris. Si Plutó era un planeta, Eris també, i la resta de cossos majors que potser quedaven per descobrir també ho serien.

Tot això va portar a la Unió Astronòmica Internacional (IAU) a redefinir el 24 d'agost del 2006 què era un planeta i què no, posant unes condicions que s'afegien a la definició original de planeta.

Així doncs; Un planeta és un cos celeste *autogravitant* que no ha iniciat la fusió nuclear, per tant, és un cos fred que rep l'energia d'altres astres, com les estrelles. En la convenció del 2006 es va afegir que aquest cos ha de tenir una massa d'entre 10^{19} - 10^{27} Kg perquè la seva gravetat li doni una forma quasi esfèrica i equilibri hidrostàtic, i ha d'haver netejat la seva òrbita de planetesimals.

Així, Plutó, Eris i la resta es van classificar en la nova categoria de "*planetes nans*" al tenir la seva òrbita plena de petits cossos.

La massa és un factor important a l'hora de decidir què és un planeta. Com s'ha comentat, aquesta està entre 10^{19} - 10^{27} Kg. Aquest límit equival a unes 13 masses jupiterines (M_J), i un cos amb una massa superior a $13 M_J$ formalment ja no és considerat un planeta, sinó un altre



astre anomenat *nan marró*^{4 5}. Ara bé, s'han trobat astres que tot i tenir una massa per sota de les 13 M_J són considerades nans marrons, a causa d'haver-se format pel colapse del gas d'una nebulosa, com les estrelles. Els nans marrons emeten molt poca llum, la qual es provocada per la calor interna de l'astre i la seva força gravitatòria.

Característiques orbitals

Una característica dels planetes és que mantenen òrbites al voltant d'estrelles (o altres astres)⁶. L'òrbita dels planetes els duu a donar voltes a l'estrella per l'efecte de la gravetat, moviment anomenat “de translació”, realitzant un gir cada cert temps; el temps que triga un planeta a donar una volta a la seva estrella s'anomena “període orbital” i es simbolitza amb “ T ”.

La duració del període orbital T és directament proporcional a la distància que separa el planeta de l'estrella, segons les lleis de Kepler (annex 1.8). Si l'òrbita del planeta és circular,

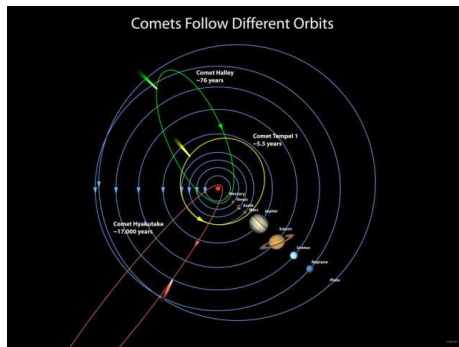


fig. 17: Representació de les òrbites dels vuit planetes del Sistema Solar, la de Plutó i la de tres cometes que orbiten el Sol (groc, verd i vermell), comparant les excentricitats.

la distància no variarà. Ara bé, si no és circular la distància planeta-estrella canviarà al llarg de la translació, i això és el que passa en una òrbita el·líptica. La variació de la forma de l'òrbita respecte a la d'una circumferència perfecta es mesura per l'excentricitat de l'òrbita (ϵ). Quan major és l'excentricitat, més exagerada és l'el·lipse, tot i que en el sistema Solar tots els planetes mantenen òrbites quasi circulars, amb molt poca excentricitat (fig. 17). La distància que separa els

dos punts més allunyats d'una el·lipse entre ells és l'eix major d'aquesta ($2a$), i a l'hora de calcular característiques del planeta s'utilitza el semieix major de l'òrbita (a), que és la distància mitjana que separa l'estrella del planeta al llarg de la seva òrbita. Aquesta, en principi, es mesura en quilòmetres (Km), però és usual utilitzar la Unitat Astronòmica (UA), que és la distància mitjana que separa la Terra del Sol i que equival a 149.597.900.000 metres.

⁴ Els nans marrons tindran molta importància en els sistemes extrasolars ja que també poden tenir planetes orbitant-lo o orbitar ells una estrella com un planeta més.

⁵ Tot i això, hi ha models que hipotitzen que es poden formar planetes de fins a 30 M_J en discs d'acreció.

⁶ Veurem, però, que hi ha planetes que no mantenen òrbites al voltant de cap estrella ni de cap astre, sinó que simplement vaguen per l'espai (pàg. 57).



La UA també s'utilitzarà per a mesurar distàncies en sistemes extrasolars i és molt útil per a comparar-les amb el nostre Sistema Solar.

Les tres lleis de Kepler són molt útils per a calcular amb facilitat alguns dels paràmetres anteriors a partir de les poques dades que puguem obtenir d'un sistema planetari. Tot i això, les característiques d'un planeta i de la seva òrbita requereixen sovint de càlculs més avançats i diversos, tot rau en les dades d'observació de què disposem i en les condicions del sistema planetari.

Tot seguit, hi ha un petit recull d'algunes formules bàsiques que es poden aplicar per calcular certes característiques d'un planeta a partir de la informació que ens donin les observacions⁷:⁸

- Distància del planeta a l'estrella o semieix major de l'òrbita (a):

Per calcular el semieix major de l'òrbita del planeta a l'estrella (a) podem utilitzar la 3a llei de Kepler, la qual relaciona la distància del planeta a l'estrella (a), la massa de l'estrella (M_*)⁹ i el període orbital del planeta (T):

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_*} \cdot a^3 \rightarrow a = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M_*}{4\pi^2} \cdot T^2}$$

On: - "G" és la constant gravitatòria universal, que val "6,67x10⁻¹¹ m³/Kg·s".

- "a" és el semieix major de l'òrbita, o sigui, la distància estrella-planeta.

- "T" és el període orbital del planeta (recordar que és igual al de l'estrella al voltant del CM "T_e") en

- "M_{*}" és la massa de l'estrella.

- Excentricitat de l'òrbita (ϵ):

L'excentricitat (ϵ) de l'òrbita del planeta al voltant de l'estrella es pot determinar a partir de la velocitat radial de l'estrella (v_r) (pàg.28) i la massa del planeta (m), amb la següent expressió:

$$v_r = \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{m \cdot \sin(i)}{(m + M_*)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{1}{(1 - \epsilon^2)^{\frac{1}{2}}}$$

On: - "m" és la massa del planeta.

- "v_r" és la velocitat radial de l'estrella.

- "i" és l'angle d'inclinació de l'eix de

⁷ Altres formules més específiques es poden trobar a l'apartat "trànsits" del següent capítol, a la pàgina 29.

⁸ Convé tenir en compte que, pel que fa a les unitats que utilitzem en les equacions, aquestes seran determinades segons les unitats que utilitzem en la constant de gravitació universal (G). Així doncs, si enlloc de mesurar la massa en kg la volem mesurar en M_J, caldrà, primer, convertir la constant G la qual ja no valdrà "6'67·10⁻¹¹". Així doncs, els astrònoms poden tenir conversions de la G en les unitats que els interessa. Sinó es fa així, s'ha de calcular amb unitats del SI (Sistema Internacional) i després convertir el resultat a les unitats que es vulguin.

⁹ La massa de l'estrella (M) es pot conèixer amb l'ajuda de l'anàlisi del seu espectre electromagnètic.



- Massa del planeta (m):

La massa d'un planeta és el més difícil de calcular, doncs s'empren càlculs més avançats per a obtenir-la.

Encara que, si l'òrbita del planeta no és circular, es pot aïllar la massa del planeta de l'equació anterior si, abans, la menyspreem del denominador de la segona fracció de la fórmula. Dient a terme això, podem calcular-la seguint l'expressió:

$$m \cdot \sin(i) = v_r (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T \cdot M_*^2}{2\pi G} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Un problema és el “ $m \cdot \sin(i)$ ”, que és el producte de

la massa del planeta (m) pel sinus de la inclinació de l'eix de l'òrbita respecte a nosaltres (i).

El problema és que no sempre és possible conèixer el valor d'aquesta inclinació a partir de les observacions. Per consegüent, ens veiem obligats a calcular un mínim valor de la massa del planeta; com que el valor del sinus sempre estarà entre -1 i 1 (“ $-1 \leq \sin(i) \leq 1$ ”), si aïlléssim la suposada massa “ m ” i la inclinació de l'òrbita “ i ”, en dividir la massa entre el “ $\sin i$ ” quedaria igual o augmentaria de valor, per això diem que calculem la mínima massa del planeta. Podem pensar però, que si “ $i = 0$ ”, la massa del planeta seria infinita (en ésser el “ $\sin 0 = 0$ ”, i aleshores “ $m/0 = \infty$ ”), però això només significaria que estem veient el sistema des d'amunt, i, per tant, no podem veure cap moviment horitzontal en l'estrella.

Així, cal recordar que la massa calculada per a certs exoplanetes està expressada en funció de la inclinació de l'eix de la seva òrbita i que, per tant, serà el valor mínim de la massa del planeta.

- Temperatura de la superfície (t):

A part dels efectes de la pròpia atmosfera del planeta i del seu calor intern, la seva temperatura depèn majoritàriament de la temperatura de la seva estrella (t_e), del seu radi (R_e) i de la distància que el separa d'ella (a). Així doncs, la temperatura superficial mitjana d'un exoplaneta es pot calcular amb l'expressió següent:

$$t_p = t_e \cdot \sqrt{\frac{R_e}{2a}}$$

On: - “ t_e ” és la temperatura de l'estrella en graus Kelvin (K°)
 - “ t_p ” és la temperatura de l'exoplaneta en K°.
 - “ R_e ” és el radi de l'estrella en Radis Solars.
 - “ a ” és el semieix major de l'òrbita en UA.



Formació i classes

Els planetes s'han format a partir de la fusió de planetesimals en el disc protoplanetari. Ara bé, no tots els planetes són iguals, sinó que, segons els elements i les forces a què han estat sotmesos, adquireixen unes característiques determinades; a partir d'aquestes característiques hem classificat el nostre veïnat planetari. En el nostre Sistema Solar s'han distingit tres classes de planetes: els planetes rocosos, els gasosos i els nans (que ja hem comentat).

Es veuran els tipus de planetes veïns que tenim per així poder comparar-los amb els exoplanetes descoberts.

Ja hem esmentat els planetes nans, però la resta són:

- Els planetes rocosos, terrestres o interiors tenen la seva òrbita en

l'interior del Sistema Solar, concretament entre el Sol i el cinturó d'asteroides, essent els



fig. 19: Superfície de Mart, un planeta rocós.

quatre primers (fig. 18). Són planetes relativament petits formats per compostos sòlids (roques, sorra i pols) amb una densitat mitjana de 5 g/cm^3 , (permetent-nos poder caminar sobre la seva superfície), una massa de 10^{19} - 10^{24} Kg i una composició basada principalment en ferro, silicats, níquel, silici i magnesi. No tenen gaires satèl·lits ni anells (com els que té Saturn) a causa de la seva reduïda massa, i, si posseeixen

atmosfera, aquesta no és gaire gruixuda. En el nostre Sistema Solar són: Mercuri, Venus, la Terra i Mart.

El fet que posseeixin o no atmosfera depèn de la seva massa, doncs un planeta amb aproximadament la meitat de la massa terrestre no tindrà prou gravetat per retenir gas a la seva superfície (p.e: Mercuri i Mart). En canvi, si és molt gran (com a mínim unes deu vegades major que la Terra), tindrà prou gravetat per retenir els gasos més lleugers, com l'Hidrogen i l'Heli, els quals formaran una gran atmosfera al voltant del planeta passant a ésser un planeta gasós.

- Els planetes gasosos, gegants, o jovians (a causa d'ésser Júpiter el seu màxim representant) es troben més enllà del cinturó d'asteroides (pel qual també s'anomenen exteriors) i són el contrari als rocosos; Són planetes gegantins, amb una densitat mitjana d' 1 g/cm^3 i compostos principalment per elements lleugers com l'hidrogen, l'heli i l'amoniac (NH_3) en estat



fig. 18: Representació de planetes i planetes nans del Sistema Solar.

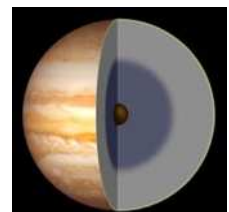


fig. 20: Esquema de l'interior de Júpiter.



gasós, que els hi proporcionen una atmosfera molt gruixuda. Ara bé, les altes pressions i baixes temperatures provoquen que, a l'interior de l'atmosfera, aquests elements vagin presentant-se en estat líquid o sòlid, fins arribar a un petit nucli de roca (fig. 20). Aquests planetes, al contrari dels interiors, posseeixen anells més o menys visibles i multitud de satèl·lits, molts dels quals són asteroides atrapats per la gravetat. En el nostre Sistema Solar són: Júpiter, Saturn, Urà i Neptú.

Avui dia el Sistema Solar és pacífic i està ordenat, els nostres planetes no xoquen ni amb el Sol ni entre sí i els gasosos estan separats dels rocosos. Però aquesta distribució organitzada és un fet que no es repeteix gaire sovint en els nous sistemes descoberts, en els quals els planetes poden estar organitzats de manera molt diferent (fig. 21).

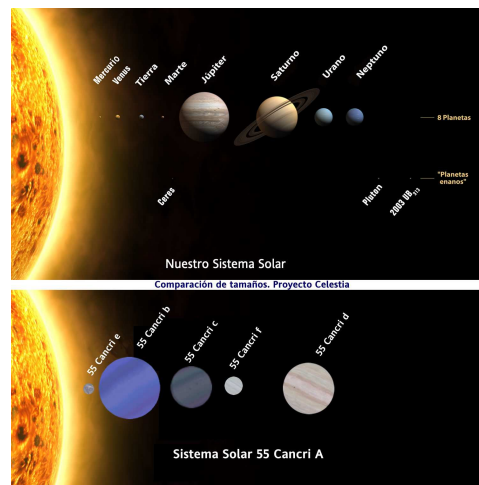


fig. 21: Comparació del perfil del Sistema Solar (a dalt) amb el sistema extrasolar "55 Cancri A".

Fins fa vint anys, aquestes eren les bases d'estudi sobre tots els planetes que, per a nosaltres, existien a l'univers; els del Sistema Solar. Però fa ben poc que aquest camp s'ha obert a l'immensitat. Després d'aquesta introducció als conceptes d'astronomia que utilitzaré i seguiré tractant en els següents capítols, ens endinsem ja en l'àmbit dels planetes extrasolars per a esbrinar com són i, avui dia el més important, com trobar-los.



2. PLANETES EXTRASOLARS

Un planeta extrasolar, o exoplaneta, és un planeta que no pertany al nostre Sistema Solar i, per tant, sol orbitar una altra estrella que no és el Sol.

Hem vist per sobre com és el nostre Sistema Solar, però molts van preguntar-se; és el nostre cas únic a l'univers? Fa molt poc no se sabia si el Sistema Solar era un cas aïllat a la galàxia o si, per contra, els sistemes planetaris eren usuals. Ara comencem a veure que són comuns.

Veient els estels podem imaginar planetes que giren al seu voltant en la foscor, i això és el que ja van fer molts científics abans de cap evidència, com Giordano Bruno o el famós Carl Sagan. I fa poc que hem pogut confirmar la seva intuïció gràcies als descobriments de planetes extrasolars fent servir enginyosos mètodes per a moure'ns en la llum de les estrelles. Però ara descobrim planetes que superen a la seva imaginació i a la de la ciència ficció; L'univers ens sorprèn amb planetes que ningú s'havia atrevit a imaginar, que desafien teories i la idea establerta de com és el cosmos. Per aclarir-ho, cada cop s'inverteixen més diners en complexes i sofisticades missions que ens donen dades i més dades sobre l'univers i els seus abundants móns.

2.1 DENOMINACIÓ

Els exoplanetes se'ls anomena de forma diferent als planetes del Sistema Solar, en els quals s'ha utilitzat els déus grecs i romans. Normalment el nom depèn de l'estrella on ha estat descobert el nou planeta:

Un exoplaneta se l'anomena amb el nom de l'estrella que orbiten seguit d'una lletra de l'alfabet llatí, començant per la "b" i seguint al llarg de l'alfabet en el cas que es descobreixin més exoplanetes en el mateix sistema.

Per exemple, en descobrir un exoplaneta en l'estrella "Gliese 876", aquest s'anomenà "Gliese 876 b". Quan es va descobrir un altre exoplaneta en la mateixa estrella (és un sistema amb més d'un planeta, com el Sistema Solar) es va anomenar "Gliese 876 c", i en seguir-ne descobrint: "Gliese 876 d", "Gliese 876 e", etc. cada vegada agafant la següent lletra de



l'alfabet. Per tant, quan més anterior sigui la lletra d'un exoplaneta significarà que abans s'haurà descobert (p.e: l'exoplaneta "55 Cancri b" es va descobrir abans que "55 Cancri c").

Una altra manera de denominar un exoplaneta és amb el "codi de descobriment", el qual mostra com i quan es va descobrir. Consta de dues lletres que mostren el mètode de descobriment, essent: RV = Velocitat Radial, TR = TRànsits, DI = Imatge Directa, AS = Astrometria, ML = MicroLent gravitacional, TI = cronometratge (en anglès: Timing) i OT= altres (en anglès: OTthers). Seguidament, es posen dos dígitos que indiquen l'any del descobriment.

Així, "51 Pegasi b", que va ser descobert per velocitat radial el 1995, té com a codi de descobriment: RV95.

Per últim, les recents missions han donat noms a molts exoplanetes. Això s'ha dut a terme canviant el nom de l'estrella mare pel nom de la missió que hi ha descobert l'exoplaneta. Així doncs, la missió CoRoT (pàg. 48) canvia el nom d'una estrella on ha descobert un exoplaneta per (per exemple) "CoRoT-7", anomenant així a l'exoplaneta "CoRoT-7 b".¹⁰

2.2 HISTÒRIA DELS EXOPLANETES

Filòsofs i somiadors s'han estat preguntat al llarg de la història sobre què hi ha allà fora. Si el Cosmos esta habitat per algú més, aquests hauran de viure en planetes com nosaltres, planetes llunyans al nostre Sol.

L'existència de planetes fora del Sistema Solar ha estat sempre molt discutida, ja sigui per part de la religió com de la ciència. Què ens ha portat a descobrir-los? La idea que són allà fora, tot i el perill que sovint comportava defensar-la, ha estat més present a la història del que podem pensar. Però, encara que l'existència dels exoplanetes avui ens pugui semblar lògica i normal, els descobriments que l'han confirmada són extremadament recents i actuals.

A continuació, hi ha un recull de les fites més transcendents que han dut a la troballa d'exoplanetes, des de l'antiguitat fins al descobriment del primer planeta extrasolar:



fig. 22: Estàtua de Giordano Bruno

¹⁰ Al l'apartat 2.4, en la descripció d'algunes missions hi ha alguns dels prefixos amb què s'anomenen els descobriments corresponents a la missió descrita.



- Giordano Bruno (1548-1600), filòsof, astrònom, poeta i ex-monjo nascut a Nàpols va ser la primera persona coneguda que va declarar, el 1584, que cada estrella del firmament tenia móns com el nostre girant al seu voltant, i encara abans que l'*heliocentrisme* fos acceptat del tot! Ell estava convençut que totes les estrelles tenien planetes i que en ells hi havia vida. Aquesta, i altres declaracions, van provocar que els seus escrits fossin falsejats, cremats i classificats en la llista de llibres prohibits, i que ell fos empresonat durant 8 anys per la inquisició fins ser cremat viu el 17 de febrer del 1600 al Camp de les Flors de Roma, acusat d'heretgia i blasfèmia per haver afirmat que la Terra no era l'única creada per Déu. Rebutjant encara el catolicisme, es va negar a besar la creu que un monjo li oferí abans de morir per salvar la seva ànima, preferint deixar aquest món com un màrtir.

“[...] Existeixen, doncs, innumerables sols; existeixen infinites terres que giren igualment en torn a aquests sols, de la mateixa manera que veiem aquests set (planetes) girar en torn aquest sol que està a prop nostre. [...]”

Giordano Bruno,
Sobre el infinito Universo y los Mundos (traducció d'Àngel J. Cappelletti):
Diàleg tercer, p. 58.
(vegeu context en castellà a l'annex 2.1)

- No va ésser fins el 1855 quan W. S. Jacob, del “Madras Observatory” a la Índia colonial anglesa, va detectar que l'estrella binària (pàg. 9) 70 Ophiuchi, situada a la constel·lació del Serpentari a 16,6 anys llum de la Terra, es movia de forma estranya, registrant anomalies en el seu moviment. Segons ell, era molt probable que aquestes irregularitats fossin causades per la presència d'un cos planetari lligat al sistema binari. Tal hipòtesi va ser enfortida per l'astrònom americà T. J. J. See, qui va alertar de l'existència d'un cos fosc en el sistema l'any 1899. Poc després, però, un altre astrònom americà, Forest Ray Moulton, va publicar un article on demostrava la inestabilitat que tindria el sistema binari si el planeta realment existís. A causa d'això, el presumpte descobriment va ser qualificat d'erroni.
- Ara bé, aquella va ser de les primeres alertes que hi va haver sobre l'existència d'exoplanetes en altres estrelles. D'ençà d'aquell fals descobriment, i amb la polèmica ja servida, les presumpes troballes de planetes fora del Sistema Solar es repetiran al llarg de la història fins ben bé finals del segle XX.



- Peter Van de Kamp (1901–1995), astrònom holandès i nord-americà, va publicar el 1963 els resultats d'una observació realitzada entre el 1938 i 1962 de l'Estrella de Barnard (HIP 87937). L'estrella és coneguda per ser la segona més pròxima al Sol i pel seu ràpid moviment a través de l'espai, moviment que l'aproxima a nosaltres a 106,8 km per segon. Van de Kamp va detectar petites pertorbacions en l'estrella, fet del qual va culpar a un planeta que l'orbitava; era la primera vegada que es publicaven dades consistents sobre l'existència d'un exoplaneta i la controvèrsia no es va fer esperar. Van de Kamp va anar modificant les conclusions fins que el 1982 va concloure que, de fet, eren dos planetes de 0,7 i 0,5 vegades la grandària de Júpiter amb períodes orbitals de 12 i 20 anys respectivament. Però la comunitat científica va rebutjar el seu presumpte descobriment donat que cap altre astrònom havia aconseguit detectar les pertorbacions de les que parlava Van de Kamp. Encara avui dia no s'han tret conclusions sobre l'existència d'aquest sistema planetari i es creu que les pertorbacions detectades pel científic holandès van ser causades per una neteja de la lent del telescopi que utilitzava.



fig. 23: Peter Van de Kamp

- Com no podria ser d'altra manera, és necessari citar un dels més famosos divulgadors científics de l'actualitat en aquesta temàtica; l'astrònom i exobiòleg estatunidenc Carl Sagan (1934-1996) que, principalment a través del seu famós llibre "*Cosmos*" (1980) i de la seva sèrie documental "*Cosmos: Un viatge personal*" (1980), ja va pronosticar l'existència de planetes extrasolars. Divulgant la més que probable existència de planetes en altres estrelles i preparant al món per a estudiar-los, Sagan va fundar el 1980 la Societat Planetària (organització internacional amb seu a EEUU) i va inventar la "enciclopèdia galàctica" per a registrar tots els planetes de la Via Làctia que es



fig. 24: Carl Sagan en el seu programa "Cosmos".

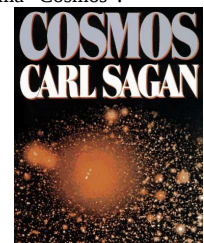


fig. 25: Portada del seu llibre.



descobriessin¹¹. Carl Sagan va poder veure complerts els seus pronòstics un any abans de morir, en ésser descobert el primer exoplaneta el 1995. Aquest descobriment també va realçar les seves esperances de trobar, algun dia, vida extraterrestre.

- Als anys 80 es va conscienciar una mica més a la comunitat científica entorn a l'existència d'exoplanetes gràcies al descobriment del Dr. Bradford A. Smith de la Universitat d'Arizona i del Dr. Richard J. Terrile del "Jet Propulsion Laboratory" que, el 1987, van fer observacions en infraroig de la estrella Beta Pictoris, a 58,68 anys llum de nosaltres a la constel·lació de Pictor (Pintor). En ella hi van descobrir quelcom sorprenent aleshores; l'estrella tenia al seu voltant un enorme disc de gas i pols, amb radi d'unes 1000 UA, molt semblant a un disc protoplanetari. Aquest descobriment va donar l'evidència de que, igual com se suposa que va passar al Sistema Solar, a altres estrelles també s'hi formen discs protoplanetaris i, per tant, hi ha possibilitat de que s'hi formin planetes.

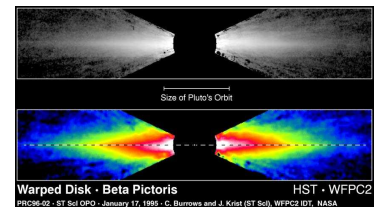


fig. 26: Fotografia del disc de Beta Pictoris.

- També, el juliol del 1988, Bruce Campbell, Gordon Walker i Stephenson Yang, equip canadenc, van identificar presumptament un planeta orbitant l'estrella Gamma Cephei A (component A del sistema binari de Gamma Cephei), en la constel·lació de Cefeu i a 51 anys llum de nosaltres. El planeta es va detectar per pertorbacions en l'estrella (pàg. 27) i va ser confirmat per un altre equip el 1989, però el 1992 es va retirar el presumpte descobriment degut a la falta de qualitat en la informació. No va ser fins l'abril del 2002 que es va confirmar la seva existència; anomenat Gamma Cephei Ab, es tracta d'un planeta amb 1.59 M_J (gasós), amb una òrbita una mica major que la de Mart i un període de 2.47 anys.

- El primer descobriment d'un planeta extrasolar a l'Univers va arribar el 1992, quan Aleksander Wolszczan (astrònom polonès) i Dale A. Frail



fig. 27: Aleksander Wolszczan i Dale A. Frail

¹¹ De fet, es pot trobar ja a la web la enciclopèdia galàctica fundada per Sagan que recull tots els planetes descoberts fins la data a "<http://www.planetary.org/exoplanets/list.php>".



(radioastrònom canadenc), utilitzant el gegantí radiotelescopi d'Arecibo, van aplicar el mètode de cronometratge (pàg. 39) a les emissions del púlsar (pàg. 8 i annex 1.1) “PSR B1257+12” a 1630 anys llum. En ell van trobar indicis de la presència de planetes orbitant-lo, concloent finalment que el púlsar tenia dos planetes de 4,3 y 2,8 masses terrestres allunyats del púlsar a menys distància que nosaltres del Sol. El descobriment va causar molta impressió als astrònoms ja que no s'esperaven trobar planetes en un púlsar, i, tot i la claredat de les proves, no va acabar de convèncer a tothom per altres suposicions fallides amb el púlsar “PSR 1829-10”. Avui dia l'existència d'aquest sistema planetari està plenament provada. A més s'ha descobert un tercer planeta en el sistema i, fins i tot, s'especula la presència d'un cinturó d'asteroides.

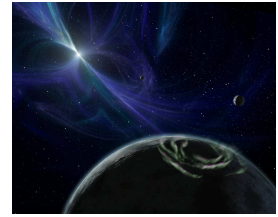


fig. 28: Representació del planeta de Wolszczan i Frail.

- Al Març del 1993, els astrònoms Donald Backer, Stephen Thorsett i Steinn Sigurdsson van afirmar l'existència d'un exoplaneta al cúmul globular M4, a 12.399'4 anys llum de nosaltres. El suposat planeta orbitava un sistema binari una mica peculiar denominat “PSR B1620-26”, ja que està format per un púlsar i un nan blanc, identificats com “PSR B1620-26 A” i “PSR B1620-26 B” (o també “WD B1620-26”) respectivament. Després de moltes discussions entre els entesos de la matèria, al planeta “PSR B1620-26 b” o “PSR B1620-26 c” (encara no s'ha aclarit el nom del tot) se li va atribuir una massa similar a la de Júpiter i una òrbita de més de 10 UA amb una excentricitat d'entre 0'3 i 0'5, tot i que també s'especulava que fos una estrella orbitant el sistema a molta més distància. Finalment el descobriment va quedar anul·lat, i no va ser fins al Juliol del 2003 quan Sigurdsson i el seu equip van confirmar l'existència de l'exoplaneta, atorgant-li una nova massa de 2'5 vegades la de Júpiter i una òrbita de 23 UA. A més, actualment el planeta és conegut per ésser el més vell descobert fins ara, amb una edat de 12.700 milions d'anys que supera el doble de l'edat de la Terra. D'això que se l'hagi batejat de manera no oficial com a “Matusalem” (annex 2.2).
- D'altra banda, el primer exoplaneta que orbitava una estrella normal va descobrir-se el 1995. Va ser famós pel fet d'orbitar una estrella molt similar al Sol i per la peculiaritat



del planeta en sí. Els seus descobridors van ser els suïssos Michael Mayor i Didier Queloz, de l'observatori de Ginebra, a Suïssa. El 25 d'Octubre del 1995 van anunciar oficialment que havien descobert un planeta orbitant l'estrella "51 Pegasi", a la constel·lació del Pegàs i distanciada 45 anys llum



fig. 29: Michael Mayor i Didier Queloz

de nosaltres, anomenat "51 Pegasi b" o "Belerofonte". Descobert gràcies al mètode de la velocitat radial (pàg. 27), van calcular que tenia una massa d'entre 0,5 i 2 M_J . Però la seva peculiaritat ve donada per la proximitat a la seva estrella mare, la qual és de 0,05 UA¹², que li dona una temperatura superficial de 1300K, un període orbital de 4,23 dies i una velocitat de 482000 Km/h (aquest tipus d'exoplanetes s'anomenen Júpiter Calents (pàg. 56). Tres mesos més tard, Geoffrey W. Marcy i R. Paul Butler, astrònoms nord-americans, van confirmar el descobriment (acte que Mayor i Queloz van agrair) i, descobrint dos nous planetes en dues altres estrelles, van assentar definitivament l'existència de planetes extrasolars a l'Univers.



fig. 30: Comparació del Sistema 51 Pegasi amb el Sistema Solar.

Des d'aleshores l'astronomia va obrir les seves fronteres immensament, augmentant el ritme de descobriments fins avui amb missions i projectes cada cop més sofisticats (els quals comentarem més endavant) omplint l'Univers de planetes. Molts són com el planeta "51 Pegasi b", ja que són més fàcils de detectar que altres més petits i distants. Tot i això, gràcies als avenços tecnològics, la varietat d'exoplanetes descoberts augmenta de manera considerable, mostrant-nos llocs estranys i hostils on ningú hauria sospitat.

Com a mostra d'exemple, el nombre d'exoplanetes durant la realització d'aquest treball ha augmentat considerablement, passant d'haver-hi 461 exoplanetes descoberts el 19 de juny del 2010 (a les 20h), a haver-hi 519 el dia 10 de gener del 2011 (a les 16h).

¹² Cal tenir en compte que Mercuri, el planeta més pròxim al Sol, es troba entre 0,3 i 0,4 UA del Sol.



2.3 MÈTODES PER DETECTAR-LOS I SABER-NE LES CARACTERÍSTIQUES

Si mirem una estrella ja sigui a ull nu, amb prismàtics o amb telescopi, sempre veurem solament un punt brillant; l'estrella està massa lluny com per a poder veure-la més detalladament. Com som capaços, doncs, de saber si hi ha un planeta prop seu? És un problema, ja que un planeta no irradia llum pròpia sinó la que li rebota de l'estrella, i aquesta normalment és massa dèbil i el planeta massa petit per veure'l des de lluny.

Per aquest fet, els mètodes que els científics han ideat al llarg dels anys per a trobar-los es separen en dos grups principals:

- Mètodes de detecció indirecta: Són la majoria dels mètodes i els més emprats, ja que aprofiten les petites pertorbacions que l'exoplaneta provoca a la seva estrella en orbitar-la, com oscil·lacions, disminucions de la brillantor, etc. A aquest grup pertanyen: la velocitat radial, els trànsits, l'astrometria, la microlent gravitacional i el cronometratge.
- Mètodes de detecció directa: Es basa en descobrir l'exoplaneta sense la necessitat que aquest afecti a qualsevol altre astre o a la seva llum. Per aquest motiu són minoritaris i requereixen d'instrumental força avançat. Per ara només comprèn l'observació directa.

També es poden classificar segons si utilitzen efectes dinàmics, fotometria o lents gravitacionals com podem veure en l'esquema de la figura 31.

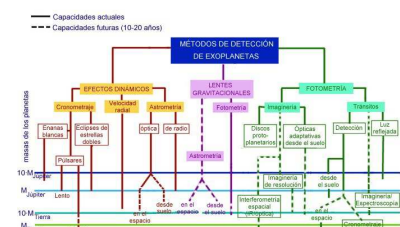


fig. 31: Esquema amb els diferents mètodes.

Amb aquestes tècniques es poden obtenir un mínim de dades del sistema extrasolar observats. A partir d'aquestes dades

inicials i per mitjà de càlculs podem obtenir-ne d'altres que no podem veure però que ens poden interessar. Tot i això, aquesta tasca no sempre és fàcil, doncs, com s'ha comentat, la inclinació de la òrbita no sempre es pot conèixer i això sovint ens impedeix saber, per exemple, la massa real de l'exoplaneta (pàg. 16). En certs casos certa informació pot ser difícil de calcular i sent impossible d'aconseguir per vies matemàtiques. La complexitat d'alguns càlculs i la seva diversitat impedeixen poder definir un procediment estàndard a seguir per a saber com és exactament un sistema extrasolar. A més, tot això està molt lligat al mètode que s'utilitzi, doncs cada mètode té els seus avantatges i inconvenients ja que permetrà saber certes coses per observació i no d'altres. Els astrònoms han de ser hàbils per



adaptar-se a treballar amb les dades de les que disposen i en les condicions en què es trobin. Per això, una estratègia força útil actualment és combinar diversos mètodes per a disposar de més dades inicials.

No obstant, a mesura que es fan avenços els mètodes emprats es tornen més sofisticats i precisos, tractant d'aprofitar qualsevol pista, per petita que sigui, per tal de trobar un planeta amagat en un punt de llum. Aquests últims mètodes s'expliquen en l'apartat "Altres".

2.3.1 OSCIL·LACIÓ DOPPLER

També anomenat "Velocitat radial" o espectroscòpia Doppler, és el mètode més emprat actualment a l'hora de buscar exoplanetes a causa de la seva eficàcia en aquest àmbit. El primer exoplaneta trobat amb aquest mètode va ser "51 Pegasi b", descobert pels astrònoms suïssos Michel G.E. Mayor i Didier Queloz el 1995, essent el primer planeta extrasolar descobert en una estrella semblant al Sol. Fins avui, s'han descobert més de 400 exoplanetes utilitzant aquest mètode.

Tendim a pensar que una estrella és un cos totalment immòbil a l'espai, però no és ben bé així; una estrella està sotmesa a multitud de forces gravitatòries que li provoquen moviments. D'aquestes forces moltes són dèbils, com les forces de les altres distants estrelles, però d'altres poden arribar a causar-li majors perturbacions: un planeta que sigui suficientment massiu i pròxim a l'estrella provocarà en ella una petita oscil·lació periòdica. Aquesta oscil·lació anirà d'acord amb el període de translació del planeta entorn l'estrella, per tant, l'oscil·lació es repetirà a cada volta del planeta. Aquesta petita perturbació pot estar

causada perquè el sistema planetari es desplaça al voltant d'un centre de masses comú entre planeta i estrella per equilibri de forces (fig. 32), o per la petita atracció que pot provocar el planeta en l'estrella quan estan alineats amb la nostra línia de visió (fig. 33). En

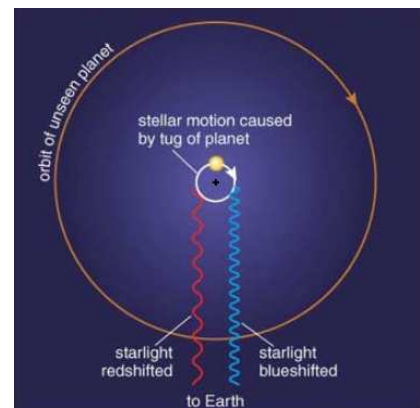


fig. 32: Com mostra la figura, l'estrella seguirà una petita òrbita entorn un centre de masses (òrbita de color blanc) que té en comú amb el planeta que l'orbita (òrbita de color marró). L'espectre de la llum que emeti l'estrella cap a la Terra es desplaçarà cap al vermell o blau segons el seu moviment entorn el centre de masses.

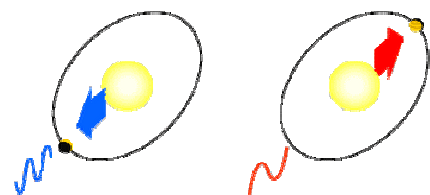


fig. 33: L'estrella també sofrirà un moviment quan ell i l'exoplaneta s'alineïn amb la Terra, moment en què l'exoplaneta l'atraurà, variant la velocitat de l'estrella.

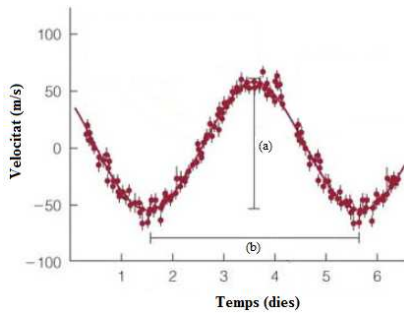


fig. 34: Gràfica de la variació de la velocitat de l'estrella en el temps. La (a) ens donarà la distància al centre de masses i la (b) el període (T).

ambdós casos la pertorbació la detectem gràcies a l'efecte Doppler. Aquest provocarà que quan l'estrella s'allunyi de nosaltres el seu espectre es desplaci cap al vermell i que en apropar-se ho faci cap al blau. Això és conseqüència de la disminució o l'augment de la longitud d'ona " λ " de la llum que emet l'estrella a causa de la variació de la seva velocitat, fet que també provocarà canvis en la seva freqüència " f ". Aquests són majors quant més massiu i més a prop estigui l'exoplaneta de l'estrella, doncs és on té més influència la seva gravetat. En aquesta posició normalment els exoplanetes són gegants gasosos.

Mesurant els canvis en l'espectre que rebem de l'estrella podem saber el període orbital del planeta, doncs el temps que triga l'espectre de l'estrella a fer una oscil·lació completa (passar del blau al vermell i tornar de nou al blau, per exemple) (fig. 35) serà el temps que triga el planeta a orbitar l'estrella, ja que l'oscil·lació d'aquesta i el moviment del planeta van sincronitzades. Així és que la variació dels valors de la freqüència f és relacionen amb la velocitat radial (v_r) de l'estrella en la següent expressió:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v_r}{c}$$

On: - " f " és la freqüència en Hertz (Hz).
 - " v_r " és la velocitat radial de l'estrella mesurada en m/s.
 - " c " la velocitat de la llum (que equival a 299.792.458 m/s $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s).

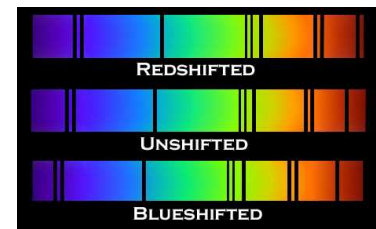


fig. 35: La desalineació del espectres en diferents sentits de l'estrella.

En definitiva, la mesura de la variació de la freqüència de l'espectre de l'estrella ens haurà donat el període orbital T del planeta i, seguint l'anterior fórmula, la velocitat radial de l'estrella v_r .

Amb aquestes dades inicials és poden realitzar diversos càlculs per saber més coses de l'exoplaneta, com la massa a partir de la velocitat radial. Alguns es poden fer amb fórmules de la pàg. 15-16, d'altres, però, necessiten de matemàtiques més avançades i precises.

En fet que hi hagi més d'un planeta en una mateixa estrella pot afectar a l'oscil·lació Doppler sempre que dos o més plantes siguin suficientment massius i propers a l'estrella per provocar



oscil·lacions alhora, doncs els planetes petits no provoquen grans oscil·lacions¹³. La combinació dels planetes afectarà a l'oscil·lació Doppler de l'espectre de l'estrella donant a lloc a que aquesta oscil·li en varies direccions i de manera força irregular. Aquests casos són més difícils d'analitzar.

Recapitulant, els principals avantatges i inconvenients que té l'oscil·lació Doppler a l'hora de detectar i analitzar sistemes planetaris són:

Avantatges:

- No requereix de la cerca específica del planeta, sinó que només observant l'estrella durant un temps ja és possible detectar alguna variació en el seu espectre.
- Té un ampli ventall d'inclinacions de l'eix de l'òrbita del sistema on es puguin detectar oscil·lacions en l'espectre de l'estrella, ja que mentre no s'acosti als 0° respecte a nosaltres veurem algun moviment horitzontal en l'estrella.

Inconvenients:

- Han d'ésser planetes grans i pròxims a l'estrella perquè li provoquin alteracions detectables pels aparells, per tant, el mètode només pot detectar una part dels planetes existents.

2.3.2 TRÀNSITS

O també anomenat "mètode fotomètric", és el segon amb el qual s'han trobat més exoplanetes i actualment és molt utilitzat per la seva relativa senzillesa.

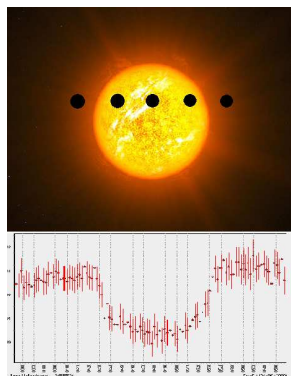


fig. 36: Decaiguda de la llum mentre passa l'exoplaneta.

La llum que ens arriba d'una estrella és més o menys constant al llarg del temps, per tant, si mesurem la quantitat de llum que rebem d'ella per *fotometria* veurem que els valors no varien gaire. Ara bé, quan un planeta extrasolar que està orbitant l'estrella que observem passa entre nosaltres i l'estrella, el planeta bloqueja part de la llum d'aquesta i, per tant, la brillantor de l'estrella s'atenuarà un temps per a després retornar a la normalitat; és com un petitíssim eclipsi en un

¹³ La Terra, per exemple, provoca una variació de velocitat en el Sol d'1 m/s, com la d'una persona caminant.



Sol molt llunyà. Aquest pas del planeta per davant de l'estrella s'anomena “trànsit” i quan més gran sigui el planeta major serà l'efecte que provoqui. Per exemple, Júpiter produiria una decaiguda de l'1% en la brillantor del Sol si observéssim el seu trànsit des d'un altre sistema.

Aquesta decaiguda de la quantitat de fotons queda registrada per fotometria en una corba de llum (gràfic fig. 37) i gràcies a ella podem calcular diverses característiques

de l'exoplaneta, com el seu radi, característica només calculable amb aquest mètode. Per això, detectar que la brillantor d'una estrella decau regularment i que aquest fenomen dura sempre el mateix temps és un bon senyal, i això és el que busquen nombroses missions espacials avui en dia.

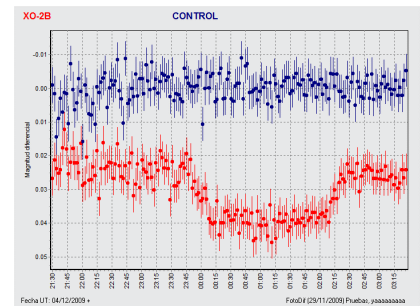


fig. 37: Comparació entre una corba de llum sense variacions (blava) i una amb el pas d'un exoplaneta (vermell).

El primer exoplaneta que es va descobrir transitant la seva estrella va ser “HD 209458b” o “Osiris”¹⁴, el 1999. Però Osiris és pioner en molts camps; descobert originalment per velocitat radial, va ser el primer exoplaneta al què se li van observar trànsits, però també és el primer al que se li detecta atmosfera, la qual és molt interessant per als científics ja que és la primera descoberta a ésser d'hidrogen que es vaporitza a causa de les altes temperatures, i el primer exoplaneta al que, recentment, se li detecta Oxigen i Carboni.

El procediment per caracteritzar un exoplaneta a partir de l'estudi dels seus trànsits és força concret. S'hi poden realitzar els següents càlculs:

Com que requerim que l'exoplaneta passi per davant de l'estrella, l'eix de la seva òrbita ha d'estar inclinat aproximadament 90° respecte de la línia de visió que uneix la terra i el sistema. Partint de l'espectre de l'estrella, podem adjudicar-li a aquesta una massa (M_E) i un radi (R_E) aproximats.

- Període orbital (T):

Per a poder calcular el període orbital (T) del planeta cal fer almenys dues observacions del seu trànsit per veure quan triga a donar tota una volta a l'estrella.

¹⁴ Aquest nom encara no ha estat reconegut oficialment per la Unió Astronòmica Internacional (IAU).



Ara bé, s'ha de tenir en compte que el període que calculem pot ser un múltiple del real, doncs el planeta pot haver donat més d'una volta a l'estrella entre les dues observacions que realitzem. Per això, s'han de comprovar les dades obtingudes a la bibliografia ja existent de l'exoplaneta estudiat o observant-ne encara més trànsits. A més, cal recordar de fer correccions heliocèntriques entre les dues observacions, ja que la distància que ens separa de l'exoplaneta haurà canviat degut al moviment de la Terra entorn el Sol i, fins i tot, al desplaçament del Sol per la galàxia, dades que s'han de tenir en compte.

- Radi del planeta (R_p):

Un avantatge que ens donen els trànsits d'exoplanetes és que amb la profunditat del trànsit en la corba de llum (caiguda de magnitud) es pot estimar el radi del planeta (R_p), ja que la profunditat del trànsit n'és proporcional. D'aquesta manera, la relació entre el radi del planeta i el radi de l'estrella (R_p/R_E) l'obtindrem a partir de la variació de la intensitat (brillantor) de llum que ens arriba de l'estrella al llarg de l'observació, i equivaldrà a:

$$R_p/R_E = \rho = \left(1 - 10^{-\Delta m/2.5}\right)^{1/2}$$

- " Δm " és la variació de brillantor (magnitud) de l'estrella durant el trànsit o caiguda de magnitud en la corba de llum.

Com hem vist, les característiques de la majoria d'exoplanetes s'expressen en funció de les corresponents a Júpiter (massa, radi, etc.), ja que és un exemple proper que coneixem prou bé com per a fer-lo servir de punt de comparació. Així doncs, per expressar el radi d'un planeta extrasolar (o el de qualsevol altre astre) en funció del de Júpiter usarem la relació entre radis següent:

$$R_p/R_J = R_p/R_E \cdot R_E/R_S \cdot \frac{1.390.000}{142.984}$$

- " R_J " és el radi de Júpiter, el valor del qual és 142.984 Km (al final de l'equació al denominador).
- " R_S " és el radi del Sol que equival a 1.390.000 Km (al final de l'equació al numerador).

Pel que fa al radi solar (R_S), aquest tindrà valor 1 a l'equació si s'escriu el radi de l'estrella (R_E) en radis solars.

- Inclinatoria de l'òrbita (i):

La inclinació de l'eix de l'òrbita del sistema - respecte la nostra línia de visió - es pot calcular per dues vies diferents, depenent de la qualitat de les observacions:

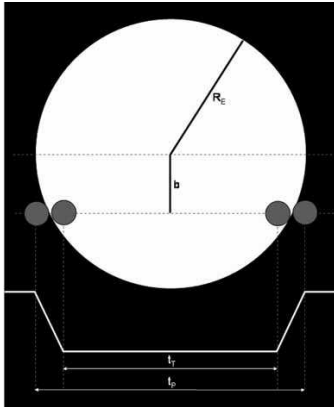


fig. 38: Esquema d'un trànsit. A sota es veu com el temps planeta (t_P) és el temps de trànsit contant la progressiva decaiguda inicial de la llum, i com el temps de trànsit (t_T) no té en compte aquesta decaiguda. El paràmetre d'impacte "b" és la separació del trànsit del planeta respecte al centre de l'estrella.

Si la qualitat de la fotometria utilitzada és suficientment bona, a partir de la corba de llum (fig. 37), es pot conèixer observacionalment el paràmetre d'impacte de l'exoplaneta en l'estrella (b) mesurat en graus (fig. 38). Aquest, juntament amb la distància planeta-estrella (a) i el radi de l'estrella (R_E), ens poden servir per aïllar el cosinus de la inclinació de l'eix de l'òrbita "cos(i)" mitjançant la següent expressió:

$$b = \frac{a}{R_E} \cdot \cos(i)$$

Ara bé, si la fotometria no ens permet

veure el paràmetre d'impacte (fet més que habitual), tan sols a partir de la informació de la corba de llum es pot calcular el cosinus de la inclinació de l'eix de l'òrbita. Ara bé, s'ha de tenir

en compte el període (T) de l'exoplaneta, la relació entre el seu radi i el de l'estrella (ρ), els temps " t_T " (temps de trànsit de l'exoplaneta) i el temps " t_P ", (anomenat "temps planeta") (fig. 38). Aquestes dades es tenen en compte en la següent expressió:

$$\cos(i) = \sqrt{\frac{(1+\rho)^2 \sin^2\left(\pi \frac{t_T}{T}\right) - (1-\rho)^2 \sin^2\left(\pi \frac{t_P}{T}\right)}{(1-\rho)^2 \cos^2\left(\pi \frac{t_P}{T}\right) - (1+\rho)^2 \cos^2\left(\pi \frac{t_T}{T}\right)}}$$

Com que els trànsits ens donen de primera mà el radi de l'exoplaneta però no la massa, és útil combinar-lo amb el mètode de la velocitat radial, el qual ens pot donar la massa però no el radi. Amb la massa i el radi podem calcular la densitat del planeta, dada molt important per a determinar la seva composició, si és rocós o gasós i, amb això, si és apte per a la vida.

Avantatges:

- En ésser un fenomen visual i relativament senzill, no és necessari un equip molt avançat per observar trànsits. Ara bé, sí que es necessita un bon equip per obtenir dades dèbils i precises d'exoplanetes petits.
- És l'únic mètode que ens dóna el radi del planeta.
- Només s'ha d'observar l'estrella i mesurar la seva lluminositat (procés no molt complicat), no cal buscar específicament l'exoplaneta.

Inconvenients:



- Només és apte per a una petita quantitat de sistemes: aquells que tinguin la inclinació de l'eix de l'òrbita adequada perquè puguem veure l'exoplaneta passar per davant de l'estrella. Del contrari, l'exoplaneta passarà per fora del diàmetre de l'estrella.
- És important que els períodes orbitals dels planetes siguin curts, ja que és molt més fàcil descobrir i estudiar trànsits que es repeteixin cada pocs dies que trànsits que succeeixin cada certs mesos o anys.

2.3.3 ASTROMETRIA

L'astrometria és el tercer mètode més utilitzat avui en dia per detectar possibles sistemes extrasolars.

Com s'ha vist en l'oscil·lació Doppler (pàg. 27), un planeta suficientment gran pot causar un moviment oscil·latori a l'estrella a la qual orbita. Amb el mètode de la velocitat radial aquestes oscil·lacions s'analitzen en els canvis que sofreix l'espectre de l'estrella en qüestió.

Però aquest moviment també es pot manifestar en un desplaçament directament observable de l'estrella en el cel. Així, si un sistema té una inclinació de l'eix d'inclinació de l'òrbita de 0° respecte a nosaltres, no registrariem cap desplaçament en l'espectre de l'estrella (doncs no la veuríem moure's endavant i endarrere), però sí que es podria veure l'estrella descrivint petits cercles en el cel a conseqüència d'orbitar el centre de masses comú amb el planeta (fig. 39 i 40).

L'astrometria aprofita aquests moviments i mesura directament les petites variacions de posició de l'estrella sobre el fons estrellat al llarg del temps, desplaçaments que mesurarem en graus ($^\circ$), minuts ($'$), segons ($''$) i els seus submúltiples, a causa que el que nosaltres detectem és una variació de l'angle que determina la posició de

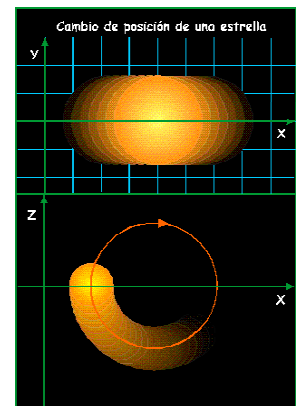


fig. 39: Moviments que pot sofrir una estrella en el cel per la presència d'un exoplaneta.

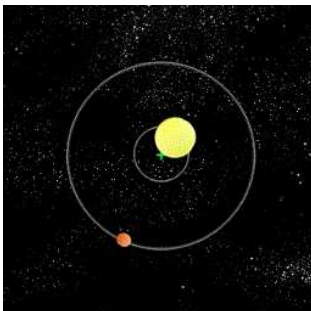


fig. 40: Òrbita d'una estrella entorn el centre de masses d'un sistema.

l'astre en el firmament. Per exemple; si observéssim el Sol des d'uns 15 anys llum de distància veuríem que la seva posició variaria descrivint un petit cercle de $0^\circ 0' 0.002''$ (dues mil·lèsimes de segon d'arc), i si només existís la Terra al Sistema Solar, el Sol descriuria un cercle molt més petit, d'uns $0^\circ 0' 0.000\,001''$ (una milionèsima de segon d'arc), essent pràcticament imperceptible ni pels millors instruments que arriben a una percepció de dues



centmilionèsimes de segon d'arc ($0^{\circ} 0' 0'' 000002''$).

Tot i que la primera notícia d'un exoplaneta utilitzant aquest mètode va ser la de l'estrella 70 Ophiuchi per W. S. Jacob el 1855 (pàg 21), que va utilitzar l'astrometria per descobrir les anomalies en el moviment de l'estrella binària, el primer descobiment d'un exoplaneta mitjançant càlculs astromètrics es va produir el 1996, quan George Gatewood va trobar diversos planetes orbitant l'estrella "Lalande 21185", sistema que el científic portava estudiant força temps i que ja tenia un bon historial de possibles descobriments de planetes, no obstant el seu descobriment encara no està del tot clar per la comunitat científica. En canvi, però, el primer exoplaneta descobert per astrometria que s'ha confirmat del tot és "VB 10b", descobert el maig del 2009 des del Palomar Observatory.

Amb l'astrometria s'obtenen de bon principi el període orbital de l'estrella que, recordem, serà el mateix que el del planeta, i que mesurarem pel que triga l'estrella a repetir el seu moviment oscil·latori en el cel. De manera similar, es pot mesurar el radi de la trajectòria entorn al centre de masses del sistema planetari. Partint d'aquestes dades, es poden calcular més característiques de l'exoplaneta que orbita l'estrella i li provoca aquests moviments.

Els sistemes planetaris més fàcilment detectables amb aquest mètode són aquells amb un planeta massiu i proper a l'estrella, ja que, igual que passa en la resta de mètodes, aquests són els que causen més pertorbacions a l'estrella.

Avantatges:

- Només cal observar l'estrella i no cal buscar expressament el planeta.
- Hi ha un ampli ventall de valors per la inclinació de l'eix de l'òrbita del sistema planetari que ens produiran un moviment detectable de l'estrella en el cel.

Inconvenients:

- Requereix una gran precisió per part de l'instrumental per a poder detectar les febles oscil·lacions de l'estrella observada. Això comença a ser possible gràcies als nous interferòmetres construïts o llençats a l'espai (apartat 2.4).
- És més fàcil detectar un exoplaneta massiu i proper a l'estrella mare que li causi grans pertorbacions, que no exoplanetes allunyats de l'estrella o petits. Per tant, el mètode



només pot trobar una part dels exoplanetes existents (igual que en oscil·lació Doppler o en trànsits).

2.3.4 OBSERVACIÓ DIRECTA

Tot i que haguem vist fotografies espectaculars que il·lustren exòtics planetes on s'hi veu la seva superfície i atmosfera, cal insistir en què aquestes no són de cap manera reals com es podria arribar a pensar. És més, després d'haver-les vist, les fotografies reals poden decepcionar ja que no són ni de bon tros tan espectaculars, artísticament parlant. Tot i això, aquest mètode es tracta d'un vertader triomf en la recerca d'exoplanetes.

Com el nom indica, el mètode tracta d'observar directament l'exoplaneta, fotografiant-lo i aconseguint informació directa d'aquest i no a partir dels efectes que té sobre l'estrella. Per això se'l classifica com a mètode directe.

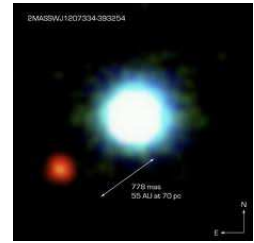


fig. 41: "2M1207b", primer exoplaneta fotografiat de la història.

Com s'ha comentat, un exoplaneta no es pot veure directament a causa de l'enorme intensitat de llum que emet l'estrella, la qual, si observem el sistema des de lluny, fa que es perdi qualsevol llum que provingui del planeta.

Aleshores com aconseguim fotografiar-lo? Doncs es poden seguir principalment dos mètodes per aconseguir-ho:

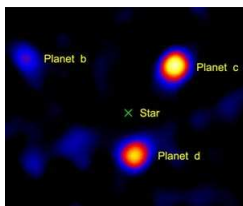


fig. 42: Fotografia de tres exoplanetes en infraroig.

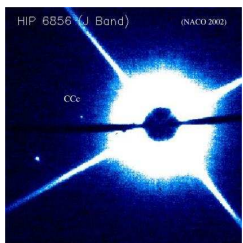


fig. 43: Exoplanetes fotografiats tapant l'estrella amb un coronògraf

- **Fer fotografies en infraroig:** en el rang visible, l'estrella és milions de vegades més brillant que el planeta, fet que en dificulta l'obtenció d'imatges. En canvi, en l'infraroig l'estrella passa a ser "només" uns quants milers de vegades més brillant, i això es compleix sobretot quan el planeta és jove i calent, ja que aleshores emet una mica de llum infraroja.

- **Tapant la llum de l'estrella:** bloquejant la llum de l'estrella podem aconseguir discernir la tènue llum de l'exoplaneta. L'estrella es pot tapar de dues maneres:

1) Físicament, utilitzant un *coronògraf* col·locat al telescopi, aconseguint així emascarar l'estrella i disminuir la seva brillantor. Els coronògrafs poden tenir forma esfèrica, de creu o altres formes molt més variades i especialitzades. El seu principal problema és la relativa baixa resolució



de les imatges obtingudes.

2) Per interferometria d'anul·lació¹⁵, tècnica desenvolupada recentment que es basa a combinar la llum de dos o més telescopis per aconseguir que, utilitzant les propietats ondulatòries de la llum, s'anul·li la brillantor de l'estrella central, deixant intacta la llum que ve del planeta per així poder-la analitzar, aconseguint una bona resolució d'imatge.

El primer exoplaneta que la humanitat va veure directament va ser "2M1207b", planeta que orbita el nan marró "2M1207". El planeta té una massa de 4 M_J i un radi d'1,5 R_J . Va ser descobert per un equip d'astrònoms Americans i Europeus al "ESO Paranal Observatory" (Xile) el Juny del 2004, encara que es va haver d'esperar un temps per ser del tot confirmat.

Tot i que la llum de l'estrella camufla la dèbil llum del planeta, aquest descobriment es va fer gràcies a dos fets principals:

- El planeta orbita un nan marró que, com s'ha vist, la llum que emet es crea a causa de la força gravitatòria i la calor, essent molt menor que la que emet una estrella normal, fet que ajuda a que no tapi tanta llum procedent del planeta.
- "2M1207 b" només té 8 milions d'anys d'edat¹⁶. En conseqüència encara és un planeta força incandescent, amb una temperatura superficial rondant els 1000 °C (deu vegades major que la de Júpiter), provocant que el planeta emeti radiacions en infraroig.

Així doncs, aquest sistema va resultar reunir les característiques adequades perquè es pogués observar el planeta amb relativa facilitat, però, com és de suposar, pocs sistemes són com aquest. Per tant, l'observació directa d'un exoplaneta és un mètode que requereix d'aparells summament precisos i tractaments molt elaborats.

La dificultat d'obtenir imatges d'un exoplaneta es demostra matemàticament amb la següent expressió, la qual relaciona la lluminositat del planeta (L) amb el seu radi (R) i diversos

$$\frac{L}{L_*} = p(\lambda, \alpha) \cdot \left(\frac{R}{a} \right)^2$$

paràmetres orbitals; com el semieix major de l'òrbita (a) i la funció $p(\lambda, \alpha)$ que inclou efectes de la inclinació orbital, de la dispersió de la llum en l'atmosfera del planeta i " α " que és

l'angle que formen estrella i planeta amb l'observador. D'aquesta expressió és pot deduir que

¹⁵ La interferometria d'anul·lació forma part de l'anomenada interferometria òptica, recentment desenvolupada i avui dia utilitzada en astronomia per mesurar distàncies i angles amb precisió. A més, és capaç de practicar espectroscòpia i s'usa força en l'estudi d'estrelles.

¹⁶ Tenint en compte que la Terra té 4.600 milions d'anys d'edat, "2M1207 b" (amb 8 milions d'anys) es pot considerar un planeta relativament jove astronòmicament parlant.



quan més petit sigui el planeta i més allunyat es trobi de l'estrella, menor serà la seva lluminositat. Tanmateix, la lluminositat del planeta comparada amb la lluminositat de l'estrella (L/L_*) és molt petita, fet que explica perquè és difícil obtenir imatges de planetes extrasolars, a conseqüència de l'escassa llum que ens arriba d'ells.

La presa de fotografies d'un exoplaneta ens dona la possibilitat d'aconseguir informació directament del planeta i molt més abundantment, ja que ens permet practicar espectroscòpia amb la llum que ens arriba directament del planeta, podent aconseguir informació sobre la seva composició i temperatura. Tanmateix, si es practica fotometria en la llum del planeta podem esbrinar la seva mida, o sigui, el seu radi.

Depenent de la fotografia, es poden deduir d'ella aspectes de l'òrbita com el període o la distància del planeta a l'estrella.

Avantatges:

- Si podem veure un planeta extrasolar directament, la seva llum ens dona una àmplia ventall d'informació sobre la seva composició i si pot allotjar vida.
- Fotografiar-lo significa eliminar qualsevol dubte sobre l'existència d'un exoplaneta, per tant, que ja en siguin 12 els fotografiats confirma indubtablement la seva existència i la presència d'exoplanetes en el cosmos.

Inconvenients:

- És necessari material molt potent, precís i tractaments força elaborats per a poder obtenir imatges clares i reveladores.
- Actualment només es pot utilitzar en pocs sistemes planetaris; en aquells que reuneixin les característiques adequades per permetre'ns veure l'exoplaneta amb la tecnologia de la que disposem avui dia. Per exemple, és avantatjós que l'exoplaneta emeti radiació pròpia (com és el cas de "2M1207 b") i que l'estrella mare sigui el menys lluminosa possible. Tot i això, les tècniques i aparells es desenvolupen ràpidament per a poder discernir planetes en més tipus de sistemes extrasolars (apartat 2.4).



2.3.5 MICROLENT GRAVITACIONAL

Per entendre aquest mètode s'ha de tenir en compte un aspecte de la relativitat general d'Albert Einstein del 1916:

Com sabem, la llum és una ona que es desplaça en línia recta a través de l'espai. Però la relativitat general postula, entre moltes altres coses, que la trajectòria d'un feix de llum es veu modificada en trobar-se amb un cos suficientment massiu a l'espai, com és una estrella o un planeta. L'efecte gravitatori d'aquesta massa corba la direcció del raig de llum com mostra la figura 44.

Aquest efecte provoca que els cossos massius a l'espai de vegades actuïn com lents; deformant la llum que passa prop d'ells de manera semblant a com ho fa una lupa amb la llum que la travessa. Aquest efecte s'anomena "lent gravitacional", degut a que utilitza la força de la gravetat per provocar aquest efecte de lent. Però, segons la magnitud de deformació de la llum es separen en dues classes:

- Macrolents gravitacionals: produïdes per aquells astres amb més de $100 M_{\odot}$. Són provocades per estrelles molt massives o galàxies.
- Microlents gravitacionals: produïdes per astres amb menys de $100 M_{\odot}$ que, degut a la seva massa relativament petita, provoquen menys atracció gravitatòria desviant molt menys la llum. Són provocades per estrelles o planetes.

Per això s'anomena mètode de la "microlent gravitacional".

Basant-se en aquest fenomen, aquest mètode aprofita la curvatura que provoca un exoplaneta en la llum d'una estrella que tingui darrere seu,

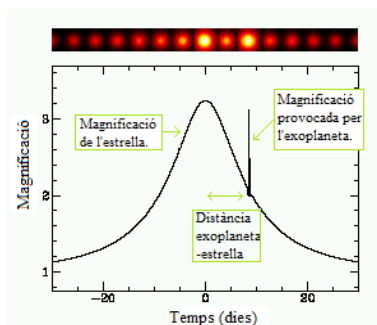


fig. 46: Model de la corba de llum d'una estrella afectada per la microlent gravitacional d'un exoplaneta.

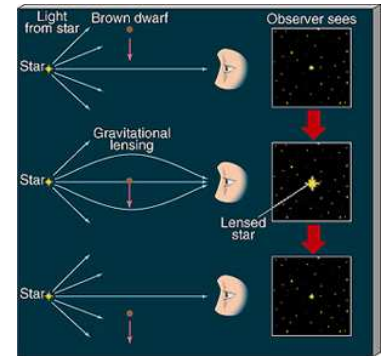


fig. 44: Esquema que mostra concentració dels raigs de llum que ens arriben d'una estrella per la microlent gravitacional.

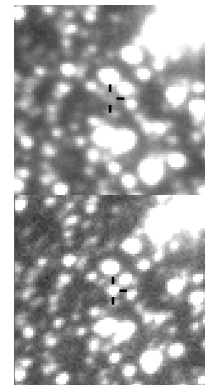


fig. 45: Magnificació d'una estrella per una microlent.

potser molt distanciada d'ell. Quan s'alineen el planeta i l'estrella amb la nostra línia de visió, l'exoplaneta actua com una lent per la llum de l'estrella, provocant que, enlloc de disminuir la brillantor de l'estrella, es produeixi un augment momentani de la intensitat de la llum que en rebem (fig. 45). Aquest efecte es registra en la corba fotomètrica de la llum de l'estrella amb l'aparició de petits pics sobtats quan l'exoplaneta i l'estrella s'alineen adequadament (fig. 46).



El Dr. Bohdan Paczynski de la Universitat de Princeton i el seu alumne, Shude Mao, van proposar pionerament de fer servir aquest mètode, fins aleshores utilitzat en altres àmbits astronòmics, per detectar exoplanetes. Així, el primer exoplaneta detectat per aquest mitjà va ser “OGLE235-MOA53 b” l’any 2004, amb una massa de $2.6 M_J$ i un semieix major de l’òrbita de 5.1 UA a la seva estrella “OGLE235-MOA53”, distanciada de nosaltres 5200 pc .

La curvatura de la llum dependrà de la distància que separa el planeta de l’estrella (fig. 46) i de la massa de l’exoplaneta. De l’observació obtenim la relació entre la massa de l’exoplaneta que actua de lent i la massa de l’estrella que té darrere i que ha emès la llum, podent aconseguir la massa d’aquesta estrella a partir del seu espectre. Tanmateix, aquests càlculs resulten més complexos a mesura que intervenen més factors en la microlent.

Avantatges:

- Pot detectar planetes petits i situats a la zona habitable (pàg. 53).
- No requereix de la qualitat dels telescopis espacials, doncs les observacions s’acostumen a realitzar amb telescopis terrestres i els primers resultats es poden obtenir amb telescopis no gaire grans. Per tant, es un mètode força econòmic.

Inconvenients:

- El temps per a poder detectar l’augment de llum és molt curt, ja que l’exoplaneta i l’estrella han d’estar perfectament alineats perquè es produeixi l’efecte correctament, fet que no passa sempre.
- Només es produeix un cop, per tant, per obtenir més característiques de l’exoplaneta s’ha de combinar la microlent gravitacional amb altres mètodes.
- Funciona millor amb planetes massius que corbin la llum el més possible i que estiguin situats en un rang de distàncies determinades de la seva estrella.
- Requereix de l’observació de moltes estrelles durant molt de temps per aconseguir que un exoplaneta s’alineï amb una estrella i aconseguir resultats.

2.3.6 CRONOMETRATGE

Com s’ha vist anteriorment, a l’Univers hi ha astres que emeten radiacions periòdicament. Els púlsars (pàg. 8 o annex 1.1) en són els més usuals i els quals, recordem, són estrelles de neutrons que a causa del seu intens camp magnètic emeten “flaixos” de radiació cada un



període de temps molt precís (periòdiques). Aquestes emissions poden incloure molts tipus diferents de radiació, però les més fàcilment detectables són les ones de ràdio.

El cronometratge o “timing” utilitza el temps que hi ha entre flaix i flaix de radiació per

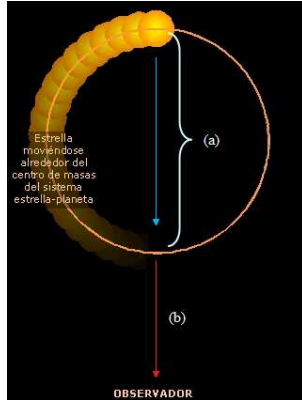


fig. 47: Si un púlsar orbita un centre de masses com en la figura, la distància (a) que ha de recórrer la llum fa que aquesta es retardi respecte la posició (b).

descobrir exoplanetes orbitant el púlsar. El cas és que la presència d'un exoplaneta prop del púlsar pot modificar-ne la precisa periodicitat de les seves emissions, causant que es repeteixin de manera irregular. Això és a causa que les estrebades gravitatòries dels planetes fan oscil·lar el púlsar (com passa en l'oscil·lació Doppler), provocant que les seves emissions arribin retardades o avançades a causa de la variació de la distància que ens separa d'ells (fig. 47).

En alguns casos, aquestes irregularitats són mesurables gràcies als *radiotelescopis* que, cronometrant-les, són capaços de calcular característiques de l'exoplaneta que les provoca.

Els primers exoplanetes que es van trobar mitjançant aquest mètode orbitaven el púlsar “PSR B1257+12”. Van ser descoberts el 1992 per Aleksander Wolszczan i Dale Frail, essent els dos primers planetes descoberts fora del Sistema Solar (pàg. 23), i ho van fer mesurant les irregularitats de les emissions del púlsar al qual orbiten.

El fet que sigui un mètode força senzill pel que respecta a material i tècniques a emprar fa que pugui ser utilitzat per telescopis no massa complexos. El problema radica en què només es pot fer servir en aquells astres que emeten radiacions perfectament periòdiques i mesurables, els quals no són massa abundants.

Amb el “timing” es pot determinar la massa, el període i el semieix major de l'òrbita de l'exoplaneta que provoca les irregularitats. Tanmateix, en alguns casos fins i tot es pot aconseguir l'excentricitat i la inclinació de la seva òrbita.

Ara bé, la comunitat científica està força d'acord en un fet: els exoplanetes que es trobin mitjançant aquest mètode difícilment seran aptes per a la vida. Això és degut a que el planeta

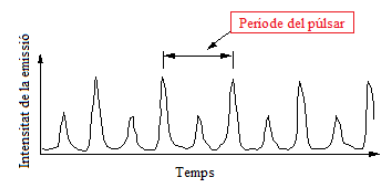


fig. 48: Esquema idíl·lic de les emissions periòdiques d'un púlsar. Aquesta regularitat es pot veure trasbalsada per un exoplaneta.



que gira prop d'un púlsar rep gran quantitat de radiació, i si bé aquestes són inofensives des d'una posició allunyada (com la nostra), a les proximitats del púlsar aquestes són letals, destruint qualsevol forma de vida existent al planeta o directament impedit que es formi.

Avantatges:

- És un mètode senzill i econòmic a l'hora d'utilitzar-lo amb qualsevol font d'emissions pulsants.
- Es poden arribar a detectar planetes de massa semblant a la Terra.

Inconvenients:

- Només es pot aplicar a aquells astres que emetin radiacions periòdiques i mesurables mitjançant la tecnologia de què disposem.
- Els planetes que es trobin amb aquest mètode tenen molt poques possibilitats de tenir vida a causa de la intensa radiació a la què estan exposats.

2.3.7 ALTRES MÈTODES:

Els mètodes anomenats fins ara són els més utilitzats i els què millors resultats donen. Ara bé, els astrònoms busquen qualsevol indicatiu, per petit que sigui, per trobar un planeta extrasolar. Així és que existeixen altres mètodes secundaris, la majoria sorgits dels recents avanços tecnològics que han dut a la millora de la precisió dels instruments, que basen el seu funcionament en tècniques i fenòmens molt més concrets i discrets que els ja anomenats.

- Variació del temps de trànsits (TTV):

Un cop hem descobert un exoplaneta per trànsits, a aquest se li pot aplicar el mètode de TTV. El mètode de la Variació del temps de trànsit ("Transit Timing Variation" o TTV) basa el seu funcionament en la precisa mesura del temps que triga a repetir-se un trànsit d'un exoplaneta. Coneixent bé aquest temps, podem detectar si aquest sofreix alguna variació en cada trànsit. Aquestes variacions poden ser la prova de la presència d'un altre planeta a les proximitats que genera atracció gravitatòria sobre l'exoplaneta que transita per davant l'estrella. Això es tradueix en la corba de llum en una variació de la posició d'aquesta respecta a altres ja registrades (fig. 49).

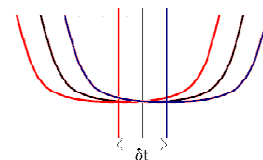


fig. 49: Esquema que representa la VTT en una corba de llum. Es pot veure com les corbes dels trànsits del mateix exoplaneta són iguals però es troben desplaçades.



El mètode va ser iniciat per un equip d'astrònoms Alemanys, Búlgars i Polonesos liderats pel Dr Gracjan Maciejewski del Jena University, a Alemanya, els quals van observar diversos trànsits de l'exoplaneta WASP-3b, un gegant gasós de $2 M_J$ que es troba a 700 anys llum de nosaltres a la constel·lació de Lyra, descobert el 2007 pel projecte SuperWASP. L'equip va detectar variacions en la regularitat del trànsit del planeta, variacions que apuntaven a la presència d'un altre exoplaneta d'unes 15 masses terrestres (com Urà), que va ser anomenat WASP-3c i del qual es va poder establir el període en 3'75 dies i la distància a l'estrella en 0,0507 UA.

El mètode TTV, pel fet de ser extremadament sensible, pot detectar exoplanetes que s'aproximin a la mida de la Terra. Tot i això, aquest mètode només es pot aplicar als sistemes dels quals en coneguem els trànsits amb precisió, pel que requereix d'instrumental molt precís. I no només això, a més, les variacions del temps de trànsit poden ser produïdes per multitud de fenòmens diferents; com la gravetat d'altres estrelles, moviments peculiars dels sistema, deformacions de l'estrella o del planeta, etc. Conjunt de casos que, en part, fan decaure la viabilitat del mètode de TTV ¹⁷.

- Variació de la durada de trànsits (TDV):

El mètode de la Variació de durada dels trànsits ("Transit Duration Variation" o TDV) funciona de la mateixa manera que el TTV, però enlloc de mesurar el temps que triga a repetir-se un trànsit, mesura el temps de durada d'aquest, intentant detectar irregularitats en les durada de cada trànsit de l'exoplaneta, o sigui, si varia el temps que el planeta triga a passar per davant de l'estrella cada cop que hi passa.

Aquestes irregularitats poden ser causades per la gravetat d'un altre exoplaneta igual que en el TTV, i també té els mateixos problemes de viabilitat que aquest per culpa de la quantitat de causes diferents que poden provocar les variacions de temps.

És també útil per detectar planetes de la mida de la Terra. L'única diferència que té amb el TTV és que en aquest varia la posició de la corba de llum en el gràfic i, en canvi, en el TDV es busca la variació de l'amplada de la corba de llum.

¹⁷ De fet, l'exoplaneta WASP-3c resta a la llista d'exoplanetes que encara estan per confirmar.



- Binàries eclipsants:

En els sistemes d'estrelles binàries (pàg. 9), l'existència d'exoplanetes era, fins fa poc, molt discutida, doncs l'estabilitat del sistema no seria la mateixa que amb una sola estrella. Ara bé, tot i això s'han trobat exoplanetes en sistemes binaris. Per descobrir exoplanetes en aquests sistemes es poden emprar principalment tres mètodes: els trànsits, les microlents gravitacionals i les variacions en el temps de binàries eclipsants.

Aquest últim mètode es basa en aprofitar que un sistema binari amb dues estrelles orbitant un centre de masses comú tingui la inclinació adequada per a poder-lo veure de costat, o sigui, veuríem com les dues estrelles es mouen lateralment anant d'un costat a l'altre en una línia.

D'aquesta manera, hi haurà vegades que les dues estrelles es taparan l'una a l'altra, és a dir, s'eclipsaran entre elles, fenomen pel què s'anomena a les estrelles binàries eclipsants.

Doncs bé, aquests eclipsis entre les dues estrelles del sistema tenen un efecte en la quantitat de llum que rebem d'elles, disminuint-ne la quantitat durant els eclipsis. Aquests seran moments de referència del sistema que transcorreran periòdicament, com les pulsacions dels púlsars. La variació d'aquest període en el què les estrelles s'eclipsen pot mostrar la presència d'un exoplaneta en el sistema que exerceix gravetat sobre les estrelles, desviant el centre de masses i, per tant, provocant que els eclipsis s'avancin o es retardin respecte el previst.

Aquest és un dels pocs mètodes que empra la peculiaritat de les binàries eclipsants per a detectar exoplanetes, però no acaba d'ésser del tot fiable pel mateix que el TTV i el TDV, a més, els exoplanetes detectables han d'ésser planetes gegants força massius.

- Llum reflectida per les fases orbitals d'exoplanetes:



fig. 50: Les diverses fases orbitals d'un exoplaneta reflecteixen diferents quantitats de llum.

Podem veure que la Lluna té fases; Lluna plena, quart creixent, quart decreixent, etc. Aquestes són causades per la posició de la Lluna respecte al Sol, que provoca que ens arribi més o menys llum de la superfície del nostre satèl·lit. Per tant, no en rebem sempre la mateixa quantitat de llum. Això també es veu en Mercuri i Venus, dels quals en podem observar les fases mentre orbiten el Sol.

El mateix passa amb els exoplanetes mentre giren entorn una estrella. Encara que no puguem veure la seva fase, l'interès està en la quantitat de llum que rebem en cada una d'elles, doncs en unes rebotarà més llum de l'exoplaneta que en altres.



Així doncs, un exoplaneta es pot detectar a partir de la variació de la quantitat total de llum que rebem del sistema estrella-planeta en conjunt. Si mesurem per fotometria, la llum augmentarà a mesura que el planeta gira entorn l'estrella deixant més part de la seva superfície il·luminada, i, contràriament, s'anirà tapant a mesura que el planeta torni a donar la volta un cop ha passat l'estrella (fig. 50). A més, la llum total disminuirà una mica quan el planeta passi per darrere l'estrella (en el cas que això succeeixi des del nostre punt de vista).

Però les variacions de llum seran molt petites, diminutes comparades amb la llum total que en rebem. En tractar-se de mesures fotomètriques tant precises, el mètode funciona millor:

- En sistemes on l'exoplaneta és un gegant gasós molt proper a l'estrella, de manera que la variació de la llum sigui el més alta possible.
- En estrelles sense gaire variabilitat i amb una certa estabilitat, ja que les irregularitats registrades poden ser causades per canvis en l'estrella. Per això, les estrelles més velles i que girin més lentament són les més adequades, al contrari de les més joves i ràpides.

La corba de llum que es realitza es pot arribar a utilitzar per descobrir característiques de l'atmosfera del planeta. Cal destacar, però, que es necessiten moltes observacions per realitzar un descobriment amb una mínima viabilitat, a més d'aparells molt precisos que es troben, normalment, a bord de telescopis espacials.

- Polarització de la llum:

Originalment, les estrelles emeten llum que no està *polaritzada*. Aquesta es pot polaritzar en rebotar a un planeta per l'efecte que l'atmosfera i la superfície del planeta tenen sobre ella.

Nosaltres podem rebre aquesta llum polaritzada que ha rebotat al planeta "camuflada" entremig de tota la llum no polaritzada de l'estrella. Per conseqüent, analitzant tota la llum rebuda del sistema estrella-planeta, en podrem distingir la polaritzada de la que no ho està pas (la de l'estrella).

En altres paraules; podem detectar exoplanetes buscant llum polaritzada en imatges del sistema planetari observat, que en el cas que se'n trobés, seria una prova de que el sistema alberga un exoplaneta que ha polaritzat part de la llum de l'estrella amb la seva atmosfera. A més, aquesta llum ens donarà informació sobre la composició del planeta, doncs les propietats de la polarització de la llum variaran en funció dels elements que formin la seva atmosfera i la superfície. S'especula que aquestes polaritzacions seran semblants a les realitzades pels



planetes del nostre Sistema Solar amb la llum del Sol. Els tres instruments principals que actualment empen aquest mètode són el ZIMPOL i el CHEOPS, al VLT (Very Large Telescope), i el PlanetPol al WHT (William Herschel Telescope) (apartat 2.4).

D'altra banda, s'ha de tenir en compte que detectar aquesta llum no-polaritzada (la qual és milions de vegades més tènue que la llum "natural" de l'estrella) necessita d'instruments extremadament precisos. De manera que aquest mètode és més útil en sistemes amb planetes grans i propers a l'estrella, que rebotin tanta llum com sigui possible.

- Estructures dels discs d'acreció

Un estrella jove sol estar rodejada d'un disc d'acreció de pols i gas. Allà és on es pensa que es formen els planetes, per tant, solament confirmant la presència d'aquest disc ja és una prova de pes per afirmar que en aquell sistema hi ha, o hi haurà, planetes.

Tot i això, que l'exoplaneta ja s'hagi format o no és una altra qüestió. D'aquesta manera es pot utilitzar l'estructura d'aquests discs per a provar-hi l'actual presència d'un cos planetari.

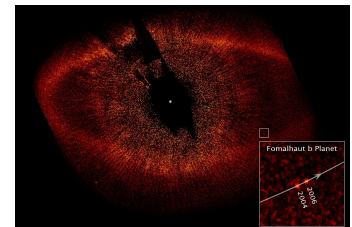


fig. 51: "Fomalhaut b" va ser el primer exoplaneta fotografiat en rang visible. Es va descobrir en el disc d'acreció de l'estrella "Fomalhaut" mitjançant un detallat anàlisi d'aquest. L'exoplaneta es pot veure a la part inferior dreta de la fotografia.

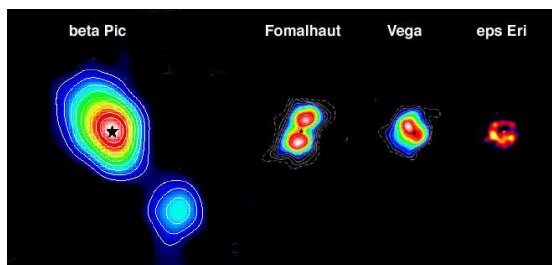


fig. 52: Diferents discs protoplanetaris fotografiats en infraroig.

Són tècniques generalment basades en anàlisis espectroscòpics dels discs o en fotografies preses normalment en infraroig a causa que el disc protoplanetari absorbeix llum de l'estrella i emet dèbils radiacions en aquest rang.

Un exoplaneta present en un disc d'acreció provocarà en aquest una sèrie de deformacions en l'estructura normal que hauria de tenir el disc. Així doncs, el disc es susceptible de tenir planetes si presenta:

- Zones buides (sense pols ni gas); regions que haurien estat presumptament "escombrades" per la formació d'un planeta orbitant al llarg de la zona.
- Una estructura no asimètrica; els exoplanetes presents en el disc afecten en el seu equilibri gravitatori distorsionant la seva delicada estructura, com per exemple trencant la seva simetria.

Aquestes deformacions poden ser percebudes en anàlisis específics o simplement visibles en les fotografies que es faci del disc.



2.4 MISSIONS I PROJECTES ACTUALS I FUTURS:

Com s'ha vist, tots els mètodes comentats estan fortament lligats a la tecnologia, la qual es concentra a millorar els telescopis i instruments d'observació per fer-los cada cop més potents i precisos. En els últims anys, això ho ha fet posant diversos telescopis espacials en òrbita a la Terra per obtenir dades sense les turbulències que presenta l'atmosfera, fet que no devalua pas els immensos i sofisticats telescopis de superfície (terrestres) darrerament construïts.

Les principals agències que lideren aquests projectes són la nord-americana **NASA** (National Aeronautics and Space Administration), la **ESA** ("European Space Agency" o Agència Espacial Europea) i l'**ESO** ("European Southern Observatory" o Observatori Austral Europeu).

Tot seguit es pretén fer un recull dels principals instruments i telescopis en els que la majoria dels projectes estan dedicats a la recerca d'exoplanetes. S'hi inclouen els que estan avui dia en funcionament, o bé, està previst que ho estiguin en un futur relativament proper.



fig. 53:
Logotips de
la NASA,
l'ESA i
l'ESO.

2.4.1 ACTUALS

Telescopis de superfície:

- **Keck Interferometer:** projecte de la NASA que consta de dos telescopis de 10m de diàmetre cada un, separats per 85m de distància, construïts a 1450m d'alçada sobre l'inactiu volcà de Mauna Kea, a l'illa de Hawaii. Combinant la llum dels dos telescopis, l'objectiu principal és estudiar els núvols de gas i pols (discs protoplanetaris) de les estrelles joves en sistemes planetaris en formació (apartat 1.2), a més de poder detectar "Júpiter calents"¹⁸ i practicar astrometria amb precisió. En alguns casos treballa conjuntament amb l'observatori **Lick**, situat al mont Hamilton, a Califòrnia.
- **Very Large Telescope array (VLT):** projecte de l'ESO que compta amb quatre telescopis de 8,2m de diàmetre i quatre telescopis auxiliars mòbils d'1,8m, que fan d'ell el telescopi òptic més avançat en l'actualitat. Té multitud d'objectius diversos, entre ells el



fig. 54: Observatori Keck.



fig. 55: VLT.

¹⁸ Els Júpiter calents són planetes gasosos extremadament propers a la seva estrella mare (pàg. 56).



descobriments d'exoplanetes, essent l'autor de la primera fotografia d'un planeta extrasolar, 2M1207b, de des de la muntanya de "Cerro Paranal", a Xile.

- **Observatori de La Silla:** Instal·lació de l'ESO a La Silla, a 600 km al nord de Santiago de Chile, que consta de diversos telescopis que tenen multitud d'objectius diferents. Entre ells està la cerca d'exoplanetes per velocitat radial, que amb el potent espectrògraf HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher) ha proporcionat multitud de descobriments per la oscil·lació Doppler, com el famós planeta Gliese 581g (annex 2.2).

- **MEarth:** Petit projecte que consta de vuit telescopis robotitzats de 40cm cadascun. Situat al F. L. Whipple Observatory, sobre el mont Hopkins, a Arizona, dedica els seus esforços a la recerca de trànsits d'exoplanetes per davant les seves estrelles amb l'objectiu de trobar planetes dins la zona habitable¹⁹.



fig. 56: Telescopis del projecte MEarth.

- **Trans-atlantic Exoplanet Survey (TrES):** Projecte amb tres telescopis de 10cm situats a l'observatori de Tenerife (Illes Canàries, Espanya), al "Lowell Observatory" (Arizona) i al mont Palomar (Califòrnia). Dedicat als trànsits d'exoplanetes, té una bona reputació pels descobriments dels que ha alertat a la comunitat científica i que posteriorment han estat confirmats per telescopis majors. Els seus descobriments són bautitzats amb el prefix "TrES-" (p.e: TrES-1, TrES-2, etc.).

- **SuperWASP (Wide Angle Search for Planets):** Essent el projecte més important del Regne Unit, els dos observatoris dels que consta escruten el cel d'ambdós hemisferis (nord i sud) durant tot l'any en busca de trànsits de planetes extrasolars. Un observatori es situa a la illa de La Palma (Canàries) i l'altre al "South African Astronomical Observatory" (sud de Sud-àfrica), i cadascun d'ells consta d'una estructura amb vuit càmeres de gran angular que registren la lluminositat de milions d'estrelles simultàniament. Els planetes descoberts per aquest projecte s'anomenen amb el prefix "WASP-" (p.e: WASP-10b).



fig. 57: Un dels telescopis del projecte SuperWasp.

- Altres: **William Herschel Telescope (WHT)**, **Gemini telescope (GPI)**, **XO Telescope**, **Lick Observatory**, **Hungarian Automated Telescope Network (HAT)** (dedicat als trànsits d'exoplanetes), **Subaru telescope (Ciao)** (dedicat a la presa directa d'imatges d'exoplanetes amb coronògraf), **Probing Lensing Anomalies NETwork (PLANET)** (projecte destinat a detectar microlents gravitacionals), **Palomar Testbed Interferometer (PTI)** (ja fora de

¹⁹ Zona que comprén les distàncies a l'estrella entre les quals, degut a la temperatura, un planeta pot tenir aigua líquida a la seva superfície. (pàg. 53)



funcionament, es dedicava a la astrometria, realitzant mesures astromètriques d'estrelles en busca de planetes extrasolars).

Telescopis espacials:

- **CoRoT (Convection Rotation and Planetary Transits):** Pionera missió de la ESA (Agència

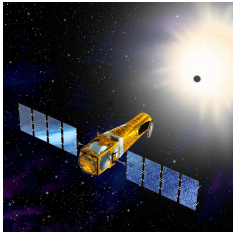


fig. 58: Representació del telescopi CoRoT.

Espacial Europea) llançada el 27 de Desembre del 2006 que consta d'un telescopi de 30cm de diàmetre amb dues càmeres, una d'elles amb quatre CCDs. Com que per aquells moments des de terra només s'havien pogut descobrir planetes gegants de gas, CoRoT va ser llançat amb la principal missió de detectar exoplanetes pel mètode dels trànsits sense les perturbacions de l'atmosfera, posant especial èmfasi en el descobriment

de planetes rocosos semblants a la Terra. En altres camps, també estudia terratrèmols en les estrelles que ens donen informació sobre la seva massa i composició. Liderat per CNES (French National Space Agency), CoRoT va descobrir el seu primer exoplaneta a mitjans del 2007, i des d'aleshores n'ha descobert molts més en les 120.000 estrelles que es troben en la franja del cel que estudia. Els planetes descoberts per CoRoT porten el prefix "CoRoT-" (p.e: CoRoT-2b, CoRoT-17b...).

- **Kepler:** Missió de la NASA que pretén ser el successor de CoRoT. Llançat el 6 de Maig del



fig. 59
Representació del telescopi Kepler.

2009 proveït d'un mirall d'1,4m de diàmetre, un fotòmetre de 0,95m i un detector de 95 megapíxels, Kepler manté la missió d'avaluar l'abundància d'exoplanetes rocosos semblants a la Terra o majors i esbrinar si estan o no prop de les zones habitables en una àmplia varietat d'estrelles diferents. A més, però, aquest objectiu s'estén a caracteritzar les òrbites d'aquests planetes, a analitzar amb deteniment els "Júpiter calents", a estudiar la formació de planetes en sistemes amb més d'una estrella (p.e. binaris), a descobrir més exoplanetes amb l'ús de mètodes secundaris (pàg. 41) en sistemes amb algun planeta ja descobert i a analitzar les propietats de les estrelles que formen sistemes planetaris. En resum, Kepler avaluarà els tipus de sistemes planetaris existents al voltant d'estrelles diferents al nostre Sol, sobretot en nanes vermelles (estrelles tipus M). Per detectar exoplanetes, pren fotografies d'una àmplia zona del cel (amb més de 100.000 estrelles) cada 30 minuts. Des de terra, ordinadors faran el seguiment de la lluminositat al llarg del temps de les estrelles



fotografies, detectant si alguna d'elles sofreix alguna atenuació. A més, també serà capaç d'utilitzar l'astrometria en la detecció d'altres móns.

- **Spitzer Space Telescope:** Considerat la versió infraroja del telescopi espacial Hubble, aquest telescopi de la NASA va ser llançat l'Agost del 2003. Proveït d'un mirall de 0,85m i criogènicament refredat, es centra en l'observació en infraroig de discs protoplanetaris en altres estrelles per a determinar la freqüència en la que aquests es troben i la seva naturalesa, emprant tant imatges com espectroscòpia per analitzar la seva estructura i composició.



fig. 60: Representació del telescopi infraroig Spitzer.

- **Telescopi Espacial Hubble:** Sens dubte la missió més exitosa de la NASA, la qual ha pogut fer un petit forat en la seva atapeïda llista d'objectius en nombrosos camps de l'astronomia

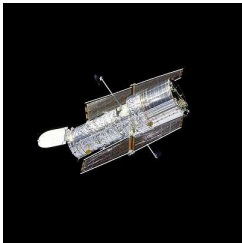


fig. 61: Fotografia del telescopi espacial Hubble.

per a la recerca d'exoplanetes. Tot i que el telescopi no va ésser dissenyat per a la causa, ja que quan es va llençar el 24 d'Abril del 1990 no es coneixia pas l'existència d'exoplanetes, el Hubble ha estat capaç de realitzar observacions que han ajudat molt en alguns casos. No és el millor caçador de planetes extrasolars, però amb el seu mirall de 2,4m ha contribuït amb els telescopis de superfície per a detectar-ne dotzenes per mitjà de trànsits, espectroscòpia Doppler, microlents gravitacionals i observació directa, essent l'autor de la primera fotografia en rang visible d'un exoplaneta en un disc protoplanetari (fig. 51).

- **Extrasolar Planet Observations and Characterization (EPOCh):** Originari de la missió de la NASA "Deep Impact" que va impactar contra un cometa per analitzar la seva composició, l'EPOCh és l'equipament d'aquella missió llançada el Juny del 2005 reutilitzat per a la detecció de trànsits i oscil·lacions Doppler provocades per exoplanetes distants. A més, també serà capaç d'estudiar la llum reflectida per les seves superfícies.

- Altres: **EPOXI** (Missió de la NASA successora de l'EPOCh), **Microvariability and Oscillations of Stars (MOST)** (La primera missió espacial de Canadà essent un dels seus objectius rebre la llum reflectida per "Júpiter calents"), **Telescopi Espacial Herschel**, **Wide Field Infrared Explorer (WIRE)**, **Eddington** (Fotòmetre d'alta precisió de la ESA que va ser cancel·lat el Novembre del 2003 degut a retallades en el pressupost).



fig. 62: Representació del satèl·lit Herschel.



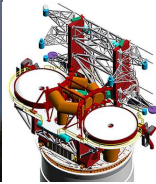
2.4.2 FUTURS:

Telescopis de superfície:

- **Large Binocular Telescope Interferometer (LBTI):** Instrument instal·lat el 2008 al Large



fig. 63: Observatori del LBT (esquerra) i disseny del telescopi (dreta).



Binocular Telescope (LBT) situat al mont Graham, a Arizona. El telescopi, encara en construcció, constarà de dos miralls de 8,4m en la mateixa estructura. El LBTI estudiarà els discs protoplanetaris d'altres estrelles i permetrà prendre imatges d'alta resolució, sobretot en infraroig, d'exoplanetes gegants i

de galàxies distants amb 10 vegades més resolució que el Hubble. Està previst que entri en funcionament a principis del 2011.

- **European Extremely Large Telescope (E-ELT):** Immensa construcció de l'agència ESO,

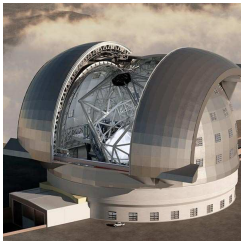


fig. 64: Concepció del E-ELT

el major telescopi que s'haurà construït mai es situarà prop del observatori Paranal, al Cerro Armazones, Xile. Revolucionarà la nostra manera de veure l'univers amb el seu enorme mirall de 42 metres de diàmetre, format per quasi 1000 miralls hexagonals d'1,4m capaços de compensar les turbulències atmosfèriques, i proveïnt un camp de visió de deu vegades l'espai que ocupa la lluna plena. Tindrà nombrosos objectius, com estudiar galàxies, l'expansió de l'univers o altres àmbits de la cosmologia. En exoplanetes, a més d'emprar els mètodes ja anomenats, serà capaç de realitzar-ne imatges d'alta resolució per poder analitzar la composició de l'atmosfera, així com estudiar discs protoplanetaris. I el més revolucionari en l'àmbit dels planetes extrasolars serà la possibilitat de detectar planetes de les dimensions de la Terra.

Actualment en període de disseny, l'inici de la seva construcció està previst pel 2011 i l'inici d'operacions pel començament de la següent dècada.

Telescopis espacials:

- **Space Interferometry Mission (SIM Lite):** També anomenat SIM PlanetQuest, és un interferòmetre de dos miralls de la NASA actualment en construcció i previst de ser llançat durant la pròxima dècada. Treballarà en rang visible i tindrà molts objectius en diversos àmbits de l'astronomia, un dels més importants dels quals serà l'estudi d'exoplanetes a partir de les pertorbacions que aquests provoquin en les seves estrelles. Es centrarà sobretot en la detecció

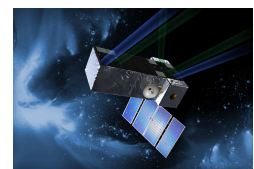


fig.65: Representació de l'interferòmetre SIM Lite.



d'exoplanetes semblants a la Terra i de planetes rocosos. A més, buscarà planetes de les dimensions de Neptú, estudiarà la formació dels “Júpiter calents” i l'estructura i evolució de sistemes planetaris joves, tenint una alta capacitat per a analitzar les característiques de les estrelles (massa, lluminositat i edat) i la distància que ens separa d'elles.

- **Terrestrial Planet Finder (TPF):** Ambicioses missions de la NASA per trobar altres “Terres”. Una serà un coronògraf (TPF-Coronagraph), una sola nau, que es concentrarà a obtenir imatges d'exoplanetes semblants a la Terra en rang visible per caracteritzar les seves dimensions i composició. L'altra serà un interferòmetre (TPF-Interferometer) format per cinc naus espacials en formacions estratègiques que, observant en infraroig, analitzaran la mida, composició i temperatura dels nous planetes. Amb la capacitat de valorar directament les característiques clau i amb la precisió necessària per identificar-hi la vida, buscaran planetes habitables en més de 200 estrelles. El TPF-C està pensat d'ésser llançat cap al 2016 i el TPF-I cap al 2020.

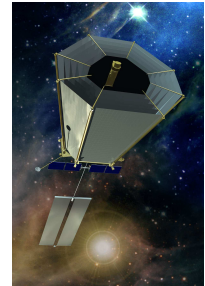
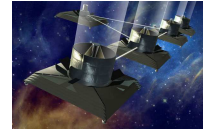


fig. 66: Representació del TPF-C a dalt i del TPF-I a baix.

- **Darwin:** Missió de la ESA prevista per ser llançada després del 2014. Costarà de quatre o cinc naus espacials, tres o quatre de les quals proveïdes de telescopis de 3-4m, amb la missió de trobar planetes semblants a la Terra, caracteritzar-ne la seva atmosfera per espectroscòpia en busca de vida i fer fotografies de planetes extrasolars en alta resolució. La missió va ser bautitzada en honor al naturalista britànic Charles Darwin.

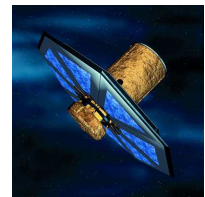


fig. 67: Representació d'un dels components del projecte Darwin.

- **Gaia:** Prevista de ser llançada el 2012, aquesta nau de la ESA té com a principal missió realitzar el major i més precís mapa tridimensional d'estrelles en la nostra galàxia mai fet mesurant per astrometria el seu moviment al voltant del centre de la Via Làctia. La seva precisió astromètrica i la possibilitat de practicar fotometria durant l'observació de cada estrella fan que sigui apte per detectar nous exoplanetes i analitzar les seves òrbites amb precisió.

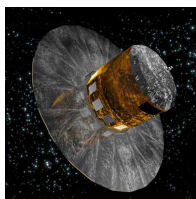


fig. 68: Representació del projecte Gaia.

- **James Webb Space Telescope (JWST):** Pensat per ser el successor del Hubble, aquesta missió de la NASA observarà principalment en infraroig amb un mirall de 6,5m. Tindrà nombrosos objectius diversos, però en l'àmbit dels exoplanetes serà capaç de prendre imatges infraroges de gegants gasosos per determinar la seva edat i massa a

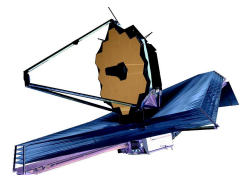


fig. 69: Disseny del JWST.



partir del seu espectre, i estudiarà els sistemes planetaris en formació per analitzar la seva composició. El llançament es durà a terme cap el 2014.

• Altres: **New Worlds Mission**, **Advanced Technology Large Aperture Space Telescope (ATLAST)**, **Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)**, **Wide Field Infrared Survey Telescope (WFIRST)**, **The Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)**.

2.5 EXOPLANETES DESCOBERTS

Quina aparença té un exoplaneta? Com deuen ser? Són preguntes que molts de nosaltres ens haurem fet alguna vegada en veure una pel·lícula de ciència ficció, en sentir o llegir una notícia d'un nou exoplaneta descobert o, potser, mentre us llegiu aquest treball.

Són ja cents els exoplanetes trobats orbitant altres estrelles, i tot i que la informació que en tenim és força limitada, amb ella els astrònoms han pogut especular sobre les composicions, masses i dimensions d'aquests planetes. La majoria són gegants gasosos, i quant més calents millor, en ésser més fàcils de detectar.

Tanmateix, alguns d'ells són semblants als que hi ha al Sistema Solar. Aquests es poden separar en dos grups principals:

ANÀLEGS ALS PLANETES JOVIANS:

O exoplanetes jupiterians, són aquells exoplanetes als que se'ls calcula un període orbital major a aproximadament 10 dies, una excentricitat per sota 0,2 i una massa mínima ($m \cdot \sin i$) que s'aproximi a les dels planetes jovians (Júpiter, Saturn o Neptú).

Amb aquestes dades es pot suposar que aquests exoplanetes són com els planetes gasosos del nostre Sistema Solar i que, per tant, responen a la teoria de formació planetària acceptada avui

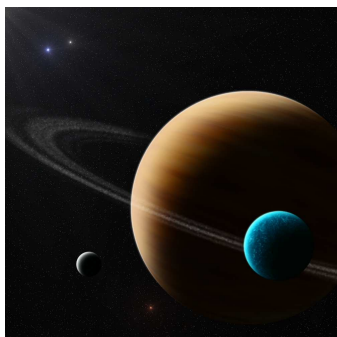


fig. 70: Concepció artística d'un exoplaneta gasós amb exollunes, en les quals hi ha esperances de trobar-hi vida a causa de la seva estabilitat.

dia; podent explicar la seva existència a partir d'un disc protoplanetari.

Dins de la categoria d'exoplanetes jupiterians, segons si la massa s'aproxima a un planeta o a un altre, encara és possible diferenciar-hi tres subcategories més: Exoplanetes jupiterians (la mateixa massa que Júpiter), saturnians i neptunians.

Els astrònoms afirmen que és molt probable que, com passa amb els planetes jovians del nostre Sistema Solar, aquests exoplanetes gasosos estiguin envoltats de nombrosos satèl·lits que els orbitin,



ja siguin asteroides o llunes.

Aquestes llunes que deuen orbitar els exoplanetes són anomenades “exollunes”, i han obert un nou camp d'estudi dins el dels exoplanetes. La majoria són detectables amb els mètodes secundaris anomenats en el capítol anterior, tot i que encara no s'ha provat oficialment l'existència de cap. Hi ha moltes esperances de trobar vida en les exollunes, doncs presenten més estabilitat que molts dels exoplanetes descoberts.

ANÀLEGS ALS PLANETES ROCOSOS:

Són exoplanetes que tenen una massa no superior a la desena part de la massa de Júpiter ($0,1 M_J$). Això normalment assegura que no són planetes gasosos sinó rocosos, formats pels mateixos materials que els planetes interiors del Sistema Solar.

Són molt difícils de trobar a causa de la seva petita massa i dimensions, de manera que no causen grans perturbacions en la seva estrella.



fig. 71: Representació artística d'exoplaneta rocós.

• Exoplanetes terrestres:

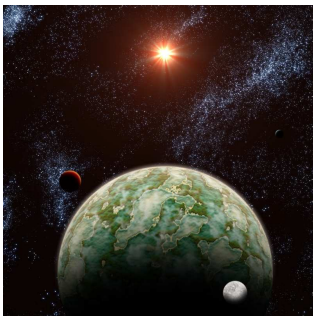


fig. 72: Representació artística d'un exoplaneta terrestre.

La cerca de vida fora del Sistema Solar actualment es basa en trobar llocs el més semblants possibles a la Terra, on sabem que es reunirien els requisits ambientals bàsics per a la vida tal i com la coneixem.

La Terra és un planeta tel·lúric (format per silicats) que es troba en l'òrbita justa i al voltant de l'estrella adequada perquè es desenvolupi vida. El fet de trobar un exoplaneta com la Terra ens

dóna moltes possibilitats de què en ell també s'hi trobi vida. Per això, els exoplanetes rocosos són molt buscats actualment, per tal de trobar-ne algun que s'assembli mínimament al nostre planeta. Per què això sigui possible, l'exoplaneta rocós i el seu ambient han de reunir unes característiques determinades:

- L'estrella ha de ser estable i comptar amb una vida llarga per tal de donar temps a l'evolució de la vida. Aquestes són principalment les de tipus espectral G, K i F.
- Zona habitable: és la regió al voltant d'una estrella on podria haver-hi aigua líquida sobre la superfície d'un planeta, fet que permetria que es desenvolupés la vida. Aquesta zona depèn del tipus d'estrella que orbita el planeta; Si l'estrella és molt



brillant la zona habitable estarà molt allunyada d'ella, i si és molt dèbil es trobarà molt pròxima a l'estrella. Cap d'aquestes dues és idíl·lica per l'evolució biològica, doncs les estrelles molt brillants evolucionen molt ràpidament, traient estabilitat al clima del planeta. En canvi, les poc brillants exigeixen als planetes d'estar molt pròximes a elles per situar-se a la zona habitable. La Terra es troba quasi al bell mig de la zona habitable del Sistema Solar, la qual es troba entre 0.95 UA y 1.15 UA del Sol (la Terra està a 1 UA).

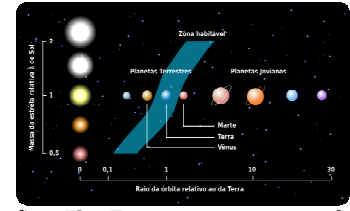


fig. 73: Esquema que mostra la situació de la zona habitable al nostre Sistema Solar i com aquesta varia segons el tipus d'estrella.

- El planeta terrestre ha de tenir una òrbita estable, o sigui, sense una excentricitat ni inclinació altes, i amb un grau baix de perill d'impactes de cometes i meteorits.

Avui dia es coneixen molt pocs exoplanetes situats a la zona habitable amb la capacitat d'allotjar vida.

L'estudi d'aquests requisits en exoplanetes és objecte d'estudi per l'astrobiologia, també anomenada exobiologia.

Ara bé, s'han descobert molts exoplanetes que no tenen res a veure amb el tòpic de planeta que tenim en ment, essent diferents als planetes del nostre Sistema Solar. Poden ser gegants o diminuts, ser molt calents o estar totalment gelats, etc. Passa el mateix amb les seves òrbites, les quals poden arribar a diferenciar-se molt de les estables òrbites planetàries circulars.

En conjunt, aquests rars exoplanetes ens han demostrat que no és impossible que la realitat superi la ficció, i han convertit el nostre Sistema Solar en un dels més normals i corrents de l'univers, a més d'un dels més pacífics.

A continuació s'anomenen algunes de les classes d'exoplanetes rars que s'han trobat i les seves irregularitats més importants. (vegeu casos particulars a l'annex 2.2)

ÒRBITES ECCÈNTRIQUES:

Al Sistema Solar, les òrbites dels planetes són més o menys circulars i estables (amb excentricitat $\epsilon=0$). En gran part, aquest fet ha estat el responsable de l'aparició de la vida a la Terra, ja que, en no acostar-se ni allunyar-se constantment del Sol, ha pogut evitar els canvis bruscs de temperatura.



Ara bé, no tots els exoplanetes són tan estables com els nostres, sinó que molts d'ells tenen òrbites semblants a les dels cometes. Un planeta es considera que té una òrbita excèntrica

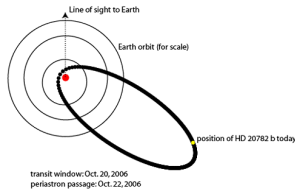


fig. 74: Il·lustració de l'òrbita de "HD 20782" comparada amb la de Mercuri, Venus i la Terra.

quan aquesta posseeix una excentricitat superior a 0,2. No obstant, aquest és el cas de quasi la meitat dels descoberts fins avui, amb excentricitats de 0,25 o superiors.

Aquests descobriments han dut als científics a replantejar-se seriosament la teoria actual de formació de sistemes planetaris, ja que, en teoria els planetes haurien de girar circularment com ho feia el disc protoplanetari (pàg. 11). S'han atribuït diverses causes a

aquest fet, com els xocs entre planetes, fortes atraccions d'altres planetes majors dins el mateix sistema, o que certes forces durant la formació dels planetes els duguin a òrbites excèntriques enlloc de circulars com es creia fins ara. Això porta a preguntar-se si els planetes amb òrbites excèntriques són els inusuals o, en canvi, ho són els que tenen òrbites circulars. És un fet a tenir en compte, doncs els canvis bruscs de temperatura d'aquests exoplanetes fan molt difícil l'existència de vida en ells, donant poca estabilitat al clima.

Els exoplanetes que són semblants a Júpiter però que tenen una òrbita molt excèntrica són denominats col·loquialment com a "Júpiters excèntrics".

Els rècords d'excentricitat fins ara se'ls emporten els exoplanetes "HD 80606b" i "HD 20782 b" amb excentricitats de 0,93 i 0,97 respectivament (recordem que $\epsilon=1$ és ja una paràbola).

ÒRBITES RETRÒGRADES:

Al Sistema Solar, tots els planetes orbiten el Sol en el mateix sentit, com si el sistema fos un CD. Es pensava que així succeïa en tots els sistemes planetaris: que els planetes girarien tots en el mateix sentit en què ho fa l'estrella a la qual orbiten a causa d'haver-se format en el mateix disc protoplanetari, el qual girava igual que l'estrella durant la seva formació.

Ara bé, el projecte WASP amb altres telescopis de l'ESO van estudiar 27 exoplanetes i van descobrir que sis d'ells giraven en direccions diferents a la de la seva estrella, fins i tot en direcció oposada.



fig. 75: Representació dels sis exoplanetes retrògrads descoberts.



Aquest fet ha estat el que més ha amenaçat la teoria de formació planetària actual, doncs aquesta no accepta la possibilitat que els planetes i la estrella girin en sentits oposats.

El descobriment s'ha intentat explicar a partir de les forces que exercirien altres exoplanetes o estrelles sobre un exoplaneta al llarg de milers de milions d'anys, les quals li podrien canviar l'òrbita tornant-la inclinada i allargada on el planeta sofriria forces de fricció cada cop que s'aproximés a la seva estrella, fet que podria acabar provocant-li un canvi de direcció a causa de la pèrdua d'energia que això suposaria al llarg del temps. El primer exoplaneta retrògrad descobert va ser WASP-7b, amb una inclinació de 149° respecte a l'horitzontal.

JÚPITERS CALENTS:

És la classe d'exoplanetes més famosa a causa de la seva peculiaritat.

Com el seu nom indica, són exoplanetes tan grans o majors que Júpiter, però distanciats a menys de 0,5 UA de la seva estrella. Per això s'anomenen "calents", en conseqüència a les altes temperatures que assolien les seves superfícies a causa d'aquesta proximitat a l'estrella.



fig. 76: Concepció artística d'un Júpiter calent.

Així doncs, són exoplanetes gasosos gegants que, en canvi, posseeixen òrbites molt petites (de 0,1 UA de mitjana) i poc excèntriques. Tenen períodes menors a 10 dies i una massa mínima superior a $0,1 M_J$.

Aquests Júpiter calents han representat un gran desafiament per a la teoria de la nebulosa primitiva, essent també les víctimes de les òrbites retrògrades explicades anteriorment.

El seu cas s'ha pogut explicar culpant al disc protoplanetari d'arrossegat a l'exoplaneta al llarg d'una òrbita en espiral cap a la l'estrella, aproximant-lo a ella. La ràpida rotació de la jove estrella salvaria a l'exoplaneta de xocar-hi, a causa de les forces de marea que aquest hi provocaria per la gravetat. Aquesta ampliació de la teoria va ser publicada per Douglas N.C.



fig. 77: Representació artística de "Wasp-12b", un exoplaneta ctònic.

Lin, Peter Bodenheimer, i Derek C. Wilson, i una de les seves implicacions és que en els sistemes amb Júpiter calents és difícil la presència de planetes terrestres, doncs aquests haurien estat expulsats del sistema o haurien xocat amb l'exoplaneta gasós al llarg de la seva lenta caiguda cap a l'estrella.

Ara bé, si el Júpiter calent no aconsegueix establir-se en una òrbita estable



propera a l'estrella cau cap aquesta xocant-hi i destruint-se. Si estableix una òrbita en la que només la seva atmosfera és absorbida per l'estrella, deixant tan sols el seu petit nucli de roca, és anomenat "exoplaneta ctònic". La vida dels exoplanetes en aquesta situació és curta per aquells que tenen períodes menors a 2-3 dies.

SUPER-TERRES:

S'anomena "Super-Terra" a un exoplaneta d'entre 1 i 10 masses terrestres que reuneixi algunes característiques semblants a la Terra; com el fet de ser rocós, contenir certs elements o ser geològicament actiu. Tant es pot tractar d'un exoplaneta completament terrestre com



fig. 78: Representació d'una Super-Terra vista des d'una de les seves llunes.

d'un envoltat completament per un oceà d'aigua, sempre que tingui un nucli rocós²⁰.

Una característica comuna en tots ells és que es troben força pròxims a la seva estrella, doncs les seves considerables dimensions constituïrien un planeta gasós (i no terrestre) en cas de trobar-se en una òrbita allunyada de l'estrella on no haurien perdut tant gas durant la seva formació. Tot i això, l'interès està en l'alta possibilitat que hi ha de trobar petites atmosferes (com la terrestre) en aquest tipus d'exoplanetes.

Aleksander Wolszczan i Dale A. Frail van descobrir les dues primeres "Super-Terres" al voltant del púlsar "PSR B1257+12" (pàg. 23) amb 2,8 i 4,3 masses terrestres, però com que aleshores no tenien aquesta classificació, es considera que la primera "Super-Terra" reconeguda va ser "Gliese 876 d", descoberta per l'equip d'Eugenio Rivera el 2005.

El 29 de setembre de 2010, durant la realització d'aquest treball, es va publicar la notícia del descobriment d'una "Super-Terra" situada en plena zona habitable de l'estrella "Gliese 581". L'exoplaneta, anomenat "Gliese 581g" (perquè el sistema té ja sis planetes descoberts), té el major potencial per allotjar vida trobat fins ara en un exoplaneta, pel qual ha revolucionat a la comunitat científica i ha tingut un gran pes a la premsa. (annex 2.2)

PLANETES INTERESTEL·LARS:

A principis de segle, es van descobrir sis objectes flotant lliurement a la nebulosa d'Orió. Els cossos, detectats per observació directa i per anàlisis en infraroig, tenen menys massa que una

²⁰ Aquest és el cas d'Europa, satèl·lit de Júpiter, on s'especula que hi ha un oceà d'aigua que envolta el satèl·lit sota la gruixuda capa de gel que compona la seva superfície, tot això al voltant d'un nucli de roca.



estrella, aproximant-se a la massa d'un gegant gasós, i actualment una temperatura superficial de 2700°C aproximadament. No obstant, no orbiten cap estrella ni cap astre semblant, vagant així sense rumb pel medi interestel·lar.

Aquest descobriment ha seguit alimentant el dubte entorn la formació planetària, especulant dos possibles orígens per a l'existència d'aquests vagabunds: O bé s'han format en un sistema planetari del que han estat expulsats a causa d'una estrebada gravitatòria per part d'un altre planeta més gran o d'una estrella, o són cossos que s'han format com les estrelles, en núvols de gas i pols en una nebulosa, però que no han arribat mai a encendre's. En aquest últim cas, no es tractaria de planetes, sinó de nanes marrons poc massives. Encara no s'ha trobat resposta clara al cas.



fig. 79: Representació d'un exoplaneta interestel·lar a la nebulosa d'Orió.

SISTEMES BINÀRIS



fig. 80: Concepció artística del cel diürn des d'una exolluna d'un exoplaneta gasós en un sistema binari.

L'existència d'exoplanetes en sistemes binaris és complicada, doncs la seva formació no es pot dur a terme en un disc protoplanetari normal en haver-hi dues estrelles centrals. Sempre pot passar que a un sistema planetari se li incorpori una segona estrella més tard, formant un sistema binari, però això causa que la majoria dels planetes siguin expulsats del sistema o engolits per les estrelles.

Amb tot, un exoplaneta pot existir en un sistema binari en dues circumstàncies:

- Que les dues estrelles girin molt properes l'una de l'altra i que l'exoplaneta les orbiti a molta distància, anomenada òrbita “tipus-P”.
- Que les dues estrelles del sistema estiguin molt separades i que l'exoplaneta n'orbiti una d'elles a molt poca distància, anomenada òrbita “tipus-S”.

(vegeu annex 1.5)



TREBALL DE CAMP

3. OBSERVACIÓ DEL TRÀNSIT D'UN PLANETA EXTRASOLAR



3.1 Introducció

Tal i com ens demostren els projectes TrES, SuperWASP i MEarth (pàg. 47): Avui dia, registrar trànsits d'exoplanetes està a l'abast de molts astrònoms aficionats. No és necessari un telescopi amb gran angular ni un equipament molt voluminós, ja que disposar d'un telescopi ben dotat i d'una càmera CCD amb certs filtres és suficient en la majoria de casos. Per tant, la detecció d'exoplanetes està a la mà d'astrònoms amateurs que escruten el cel des d'observatoris d'agrupacions privades o des dels seus telescopis particulars.

Com a treball de camp per poder-me posar mínimament a la pell d'aquelles persones que es dediquen a buscar exoplanetes, vaig dur a terme l'observació i el tractament d'imatges d'un trànsit d'un exoplaneta.

Això em va ser possible a l'observatori de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell (AAS), gràcies als quals vaig tenir l'oportunitat de participar activament en una observació d'aquest tipus.

El treball de camp consta principalment de dues parts: Realitzar l'observació per obtenir les dades (imatges) del trànsit, i tractar-les per al seu anàlisi fotomètric. D'aquesta manera s'obté la corba de llum del trànsit i les dades numèriques, amb les que es poden calcular característiques del planeta extrasolar.

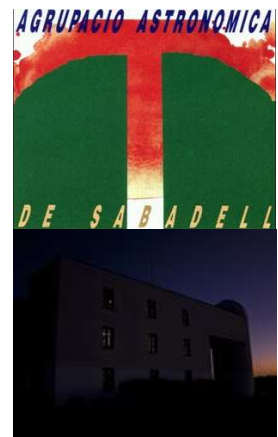


fig. 81: Logo i seu de l'AAS.

En el meu cas, el procés que aquí exposo no va estar absent de dificultats ni complicacions, doncs, tot i demanar l'observació al juny, no la vaig poder realitzar fins al novembre a causa de les contínues frustracions pels núvols de les poques oportunitats d'observar que tenia. I val la pena dir que, vivint a Barcelona, haver-me de traslladar a Sabadell per observar, tractar les imatges i demés em va complicar una mica la feina.

Finalment, l'única observació d'un trànsit que havíem pogut començar amb relatiu bon temps es va esguerrar perquè van passar uns quants núvols per davant de l'estrella mentre fèiem les fotografies, espatllant-nos la recollida de dades. Havíem fet l'observació, però ens trobàvem sense dades vàlides i com que les avançades dates no ens donaven temps per esperar una altra oportunitat d'observació, per fer el tractament d'imatges a l'ordinador vam utilitzar imatges d'un altre trànsit fetes anteriorment. Convé destacar que havien estat presses per astrònoms de



la mateixa agrupació i en el mateix observatori on nosaltres havíem realitzat la nostra observació, de manera que no hi havia canvis pel que respecta a material i localització.

Així doncs, el trànsit el vam registrar a l'estrella HD189733, a la constel·lació de la Guineu, el dia 5 de novembre del 2010, entre les 19:27h i 21:17h de la tarda, amb una duració total de 109,6 minuts.

En canvi, el tractament d'imatges es va fer amb fotografies d'un trànsit a l'estrella "WASP-10", preses el 2007.

Gràcies a l'AAS vaig poder participar en tot el procediment que es segueix en la detecció del trànsit d'un exoplaneta, fet que em va ajudar molt a entendre millor el mètode dels trànsits explicat en aquest treball i com treballen dia a dia en aquest camp els astrònoms professionals i amateurs.

3.2 HIPÒTESI

El mètode dels trànsits, com s'ha comentat, basa el seu funcionament en la hipòtesi que un exoplaneta que passi per davant la seva estrella bloquejarà part de la seva llum i, per tant, la llum total que ens arriba de l'estrella disminuirà mentre passi l'exoplaneta, provocant la variació corresponent en la magnitud de l'estrella.

Així doncs, si aquesta hipòtesi és certa, si en mesurar contínuament la lluminositat d'una estrella hi detectem una davallada en la seva brillantor i una posterior recuperació d'aquesta, es pot afirmar que aquella estrella té un planeta girant al seu voltant que s'ha interposat entre nosaltres i l'estrella, bloquejant temporalment part de la seva llum i provocant la decaiguda lumínica que hem registrat.

La decaiguda de la llum provocarà, corresponentment, un canvi en el valor de la magnitud de l'estrella, ja que aquest valor està lligat al nivell de brillantor de l'astre i les dues (brillantor i magnitud) canviaran conjuntament. D'aquesta manera, la fotometria determina la variació de magnitud d'un astre com a mitjà per a quantificar la seva brillantor.



3.3 MATERIAL

- **Telescopi** de l'observatori de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell de 0,5m.

- **Càmera CCD** (annex 3.1) SBIG (Santa Barbara Instruments Group, USA). Model: ST8XME (xip de 1.530x1020 pixels; 13,8x9,2 mm).

- **Filtre vermell (R).**

- **Programa FotoDif¹.**

Característiques del telescopi:

- 0,5 m d'obertura (diàmetre).
- Focus Newton de 2 m de distància focal.
- Focus Cassegrain-Relay de 7,8 m de distància focal.
- Mirall primari d'Astro-Sitall.
- Muntura equatorial informatitzada.
- Enfocadors automàtics.



fig. 82: Observatori.

3.4 OBSERVACIÓ

L'observació del trànsit d'un planeta extrasolar ens serveix per recollir les dades amb les que treballarem. L'observació consisteix en fer fotografies de l'estrella cada cert temps de manera continuada mentre dura el trànsit. El procediment que vam seguir va ser el següent:

- S'inicia el telescopi a través de l'ordinador de la sala de control de l'observatori i s'executen els programes que necessitem per fer les fotografies.

- Un cop iniciada la CCD i el seu ordinador, a través d'aquest hem de refredar-la gradualment fins que la CCD arribi a una temperatura d'aproximadament -15°C .

- Es realitzen les imatges de correcció, anomenades "flats" i "darks" (s'han de tenir en compte els darks dels flats) (annex 3.2), guardant-los en una carpeta per a després corregir les fotografies amb elles.

- Apuntem l'astre amb el telescopi, que en el nostre cas era l'estrella HD189733, i col·loquem la cúpula adequadament. Cal fer la identificació del camp, o sigui, de la resta d'estrelles que rodegen la nostra, per tal de comprovar que no hi ha hagut cap error en la identificació de l'estrella per part del programa de l'ordinador.

- S'activa el filtre vermell (filtre R) de la càmera CCD, ja que, per fer fotometria, el telescopi és molt més sensible a la llum de l'estrella amb el filtre vermell que amb altres.



fig. 83: Sala de control de l'observatori.

¹ Creat per Julio Castellano i descarregable des del web www.astrosurf.com/cometas/extrasolares/fotodif/fotodif.htm.



- Un cop apuntada l'estrella i amb el seguiment² del telescopi activat, es comencen a fer fotografies de l'estrella amb la CCD. En la nostra observació vam realitzar una fotografia cada 20 segons, amb una durada de 3 segons cadascuna, entre les 19:17h i les 21:27h, deixant així uns marges d'uns deu minuts abans i després del temps de trànsit.
- A mesura que es van anar realitzant les imatges es va haver d'anar girant la cúpula de l'observatori per a que no tapés la visió del telescopi. Les fotografies es van anar guardant en una carpeta de l'ordinador on quedaven en ordre a mesura que s'anaven fent.
- Es van fer fotografies fins haver passat uns deu minuts després de les 21:17h. Un cop passat aquest temps vam poder plegar. Ja s'havia fet la recollida de dades i el següent pas era fer el tractament de les fotografies que s'havien pres aquella nit.

3.5 ANÀLISI DE DADES

Tot i que les fotografies de l'observació no van sortir bé pel pas d'un núvol, vam utilitzar unes altres que s'havien pres anteriorment per practicar el tractament d'imatges.

Es tractava de 425 fotografies a analitzar, a les quals se'ls va aplicar els "darks" i "flats" fets abans de l'observació (l'observació antiga) amb el programa de tractament d'imatges *AstroArt*. Aquestes fotografies s'analitzen fotomètricament amb un altre programa anomenat "Foto-Dif", que el que fa és analitzar cada fotografia definint el valor de la magnitud (brillantor) de l'estrella que hi marquem a partir de la intensitat del seu senyal lumínic registrat a cada fotografia. (vegeu procediment pas a pas amb el FotoDif a l'annex 3.4)

El programa ens permet escollir algunes estrelles com a referència juntament amb l'estrella que volem estudiar (fig. 84). Aquestes estrelles secundàries seran utilitzades per establir una magnitud de referència per a cada intensitat de llum registrada en cada fotografia. Així, el Foto-Dif ens analitzarà l'estrella del trànsit atribuint a cada una de les seves intensitats lumíniques en cada fotografia (perquè la intensitat variarà durant el trànsit) una magnitud determinada a partir de les magnituds de referència que hem escollit en les altres estrelles.

A la pràctica, la feina consisteix en marcar la nostra estrella a la primera fotografia de les que vam fer perquè el programa la recordi en la resta d'imatges (en groc) i introduir també les

² El telescopi té un precís sistema de seguiment que consisteix en un motor que fa moure el telescopi d'acord amb el cel (amb la mateixa velocitat i direcció) i d'aquesta manera no es perd l'estrella, apuntant-la tota l'estona.



magnituds d'algunes estrelles que l'envolten a la fotografia perquè serveixin de referència (en blau). S'ha de tenir en compte d'indicar les magnituds d'estrelles més i menys brillants que la nostra estrella, així com no escollir estrelles que variïn la seva lluminositat al llarg del temps com a estrella de referència per al programa.

D'aquesta manera, el programa inicia un procés en el qual va calculant el valor de la magnitud de l'estrella que ens interessa en cada fotografia, donant el valor numèric de la variació de la seva magnitud respecte a la inicial degut al trànsit de l'exoplaneta.

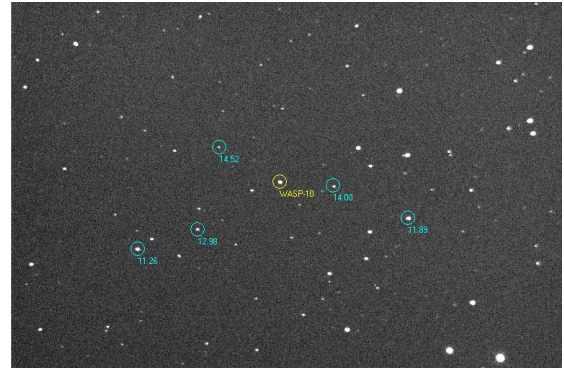


fig. 84: Selecció d'estrelles del FotoDif. En ella es marca l'estrella del trànsit que es vol estudiar (en groc) i s'escullen les estrelles de referència per al programa introduint les seves magnituds (en blau).

3.6 RESULTATS

Les dades que ens dona finalment el programa es recullen a la llista mostrada a l'annex 3.3. En aquesta ens dona el valor de la variació de magnitud de l'estrella "WASP-10" en cada fotografia juntament amb el moment en què s'ha pres la imatge, com es mostra en el següent fragment de la llista:

NUM.	DATA MPC	DATA JULIANA	Diferència de magnitud
----	-----	-----	-----
0	20070725,8	2454307,341	-0,004
1	20070725,8	2454307,341	-0,001
2	20070725,8	2454307,342	-0,008

...

Com que les fotografies a l'observació s'han fet de manera contínua i seguida, es registra com l'estrella brilla menys en les fotografies fetes mentre passa l'exoplaneta per davant, donant a lloc que el programa Foto-Dif hi doni valors de magnitud més alts³. L'interès està en que el Foto-Dif ens dona els valors numèrics d'aquesta decaiguda de magnitud per poder-la quantificar, utilitzar-la per calcular paràmetres de l'exoplaneta i expressar-la en una corba de llum que mostri la variació de magnitud de l'estrella al llarg del temps (fig. 85).

³ Recordem que l'escala de magnituds és una escala inversa, per tant, una magnitud major significarà menor brillantor. En canvi, quan menor és la magnitud més brilla l'astre.



Aquesta que ens la proporciona el mateix Foto-Dif a partir de les dades de la llista a ens mostra clarament una davallada temporal de la brillantor de l'estrella WASP-10 durant l'observació.

Amb les dades de la corba s'obtenen els següents valors:

- La variació de magnitud en la base de la corba de llum, o sigui, el promig dels valors de magnitud normals de l'estrella, és de 0,015 magnituds.
- La variació de magnitud en el fons de corba, que és la mitjana dels valors que es troben en la davallada de brillantor, és de $-0,017$ magnituds.

En resum, la corba de llum ens indica que l'estrella a sofert una variació total de magnitud de 0,032 magnituds.

3.7 CONCLUSIONS

Basant-nos en els resultats que hem obtingut, podem afirmar que la davallada de magnitud ha estat ocasionada pel trànsit d'un exoplaneta. La peculiar davallada i seguida recuperació de la magnitud de l'estrella ens donen evidències que ha estat realment un exoplaneta el que les ha produïdes, doncs és lògic que l'exoplaneta passant per davant l'estrella provoqui aquesta corba amb una decaiguda suau al interposar-se gradualment davant l'estrella i en sortir-ne també gradualment a mesura que l'orbita (fig. 86).

Ara bé, igualment es podria tractar d'algun objecte que ha passat entre la estrella i nosaltres (com una roca o una taca solar de l'estrella) i que ha produït un efecte semblant al d'un trànsit. Com que això és perfectament possible, per a concloure definitivament que és un exoplaneta transitant el que ha produït la davallada de brillantor de l'estrella és necessari fer més observacions seguint el mateix procediment per tal d'intentar registrar un altre trànsit del mateix exoplaneta, obtenint

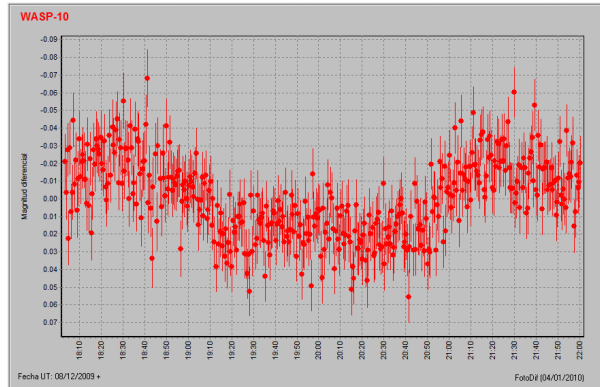


fig. 85: Corba de llum que ens dona el FotoDif del trànsit de l'exoplaneta. L'eix Y indica el valor de la variació de la magnitud de l'estrella de forma invertida i l'eix X el temps mesurat en hores o en data juliana (en aquest cas en hores).

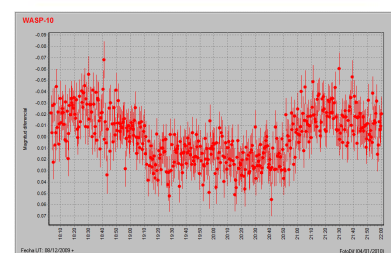
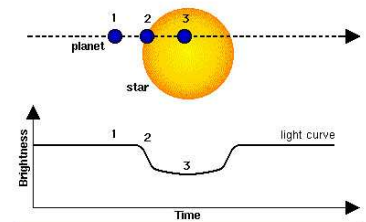


fig. 86: Comparació de la corba de llum obtinguda (a sota) amb una representació del model de corba que provoquen els exoplanetes (a dalt).



una altra corba de llum amb característiques semblants a la que ja tenim. A més, cal destacar que el descobriment d'un nou exoplaneta no és oficial fins que no se'n tenen com a mínim tres trànsits seguits registrats.

En el nostre cas sabem que es tracta d'un exoplaneta perquè ja està registrat, així com les dates i els horaris dels seus trànsits.

3.8 CÀLCUL DEL RADI DE L'EXOPLANETA

Amb les dades que obtenim tant de la corba de llum com de la llista, ens veiem en condicions de calcular el radi de l'exoplaneta "WASP-10b" que ha causat el trànsit. En el nostre cas només podem calcular el seu radi, doncs per calcular el semieix major de la òrbita (a), el paràmetre d'impacte (b) o la inclinació de la òrbita (i) (pàg. 14 i 32) necessitem el període de translació de l'exoplaneta (T), i per saber-lo hauríem d'observar com a mínim dos trànsits seguits.

Així doncs, d'antuvi cal buscar les característiques que necessitem de l'estrella "WASP-10" a una base de dades, que les obtenen per mitjà de l'estudi de l'espectre de l'estrella i per altres vies de mesura. En el nostre cas només necessitem el seu radi (R_E), el qual és $0,813 R_S$ (o sigui, que WASP-10 té 0,813 vegades la mida del Sol).

Per calcular el radi de l'exoplaneta utilitzarem l'equació que ens relaciona els radis de l'exoplaneta i de l'estrella a partir de la caiguda de magnitud que l'exoplaneta provoca a l'estrella durant el trànsit (Δm).

$$\frac{R_p}{R_E} = \rho = (1 - 10^{-\Delta m / 2,5})^{\frac{1}{2}} \rightarrow \frac{R_p}{R_E} = (1 - 10^{-0,032 / 2,5})^{\frac{1}{2}} \approx 0,17042 \rightarrow$$

$$\rightarrow R_p \approx 0,17042 \cdot R_E \approx 0,17042 \cdot 0,813 \rightarrow R_p \approx 0,1385 R_S$$

Ara sabem que el nostre exoplaneta té 0,1385 vegades la mida del Sol. Però, per acabar, transformarem aquest valor de radis solars a radis jupiterins ($R_S - R_J$), utilitzant l'expressió de la pàgina 31.



$$\boxed{\frac{R_p}{R_J} = \frac{R_p}{R_E} \cdot \frac{R_E}{R_S} \cdot \frac{1.390.000}{142.984}} \rightarrow \frac{R_p}{R_J} = \frac{R_p}{\cancel{0,813}} \cdot \frac{\cancel{0,813}}{1} \cdot \frac{1.390.000}{142.984} \rightarrow$$

$$\frac{R_p}{R_J} \simeq \frac{0,1385}{1} \cdot \frac{1.390.000}{142.984} \rightarrow \frac{R_p}{R_J} \simeq 1,348 \rightarrow \boxed{R_p \simeq 1,348 R_J}$$

A partir dels resultats, segons els nostres càlculs s'ha observat un exoplaneta 1,348 vegades més gran que Júpiter.



CONCLUSIONS

Al llarg del treball s'han anat explicant diversos conceptes d'astronomia relacionats amb l'existència de planetes a l'Univers i, posteriorment, amb l'estudi dels planetes extrasolars. D'aquesta manera, he intentat seguir una línia de concreció començant per aclarir què són i on s'originen els planetes explicant aquells conceptes relacionats amb els sistemes planetaris, la seva formació i el lloc que ocupen en el Cosmos. En la segona part del treball, concretant ja en els exoplanetes, s'ha contemplat el paper que ha tingut la idea de la seva existència al llarg de la història i els descobriments que han dut a confirmar-la. S'han vist i explicat els diferents mètodes que s'utilitzen avui en dia a l'hora de buscar planetes en òrbita a altres estrelles, el qual era un dels objectius principals del treball, fent un repàs dels principals projectes que els utilitzen i dels principals tipus d'exoplanetes descoberts gràcies a ells.

La primera part del treball ens ha servit per veure que la formació de planetes en altres estrelles no és un procés inusual ni tant complex com podríem imaginar. Podem creure, doncs, que la presència de planetes en la nostra galàxia és força alta, ja que l'abundància de discs protoplanetaris rodejant estrelles joves mostra que la formació planetària és un procés força habitual en la formació estel·lar. El fet que s'hagin observat molts discs protoplanetaris recolzen aquesta afirmació, igual com també van recolzar les teories que afirmaven l'existència de planetes en altres estrelles abans de descobrir el primer exoplaneta, fet que potser ajudà al seu descobriment.

Tot i això, la carrera per descobrir el primer exoplaneta no ha estat fàcil per aquells que l'han seguida en certs trams de la història, doncs, com ha acostumat a passar, la religió ha posat moltes traves al llarg del camí. Penso que l'egocentrisme de l'ésser humà sovint és el què més retarda els descobriments científics, i d'això en són bons testimonis els exoplanetes, la història dels quals ha estat marcada per aquesta ideologia. Ara bé, val la pena dir que la pressió que va exercir la comunitat científica sobre aquells que es van atrevir a proposar el descobriment d'un planeta extrasolar no es diferencia tant de la censura religiosa. Tot i que no es cremaven els heretges, moltes carreres professionals van quedar marcades per aquells falsos descobriments que desafiarien les teories científiques de l'època en cas de ser confirmats.



És gràcies a la tecnologia que ha estat possible fer un pas endavant en l'immensitat i descobrir que l'Univers vessa exoplanetes per tots cantons, doncs, com hem vist, els avenços tecnològics aplicats a l'astronomia són els responsables d'haver trencat amb qualsevol dubte sobre l'existència d'exoplanetes i els que avui segueixen proporcionant-nos nous descobriments cada pocs dies.

Ara bé, la tecnologia d'avui dia encara no és suficientment avançada com per obtenir dades d'alta exactitud. Ara per ara, ens hem de conformar amb els resultats que obtenim mitjançant els mètodes actuals, resultats que, com hem vist al llarg del treball, sofreixen les limitacions tecnològiques dels mètodes emprats per aconseguir-los en forma d'una pèrdua substancial de precisió i qualitat, la qual impedeix fer millors aproximacions a l'hora de calcular informació sobre un exoplaneta. Opino que l'escassetat de recursos que encara té aquesta branca de l'astronomia és causada, principalment, pel poc temps que té de vida i per la dificultat de la seva cerca, fets que en certa manera encara fan valorar més els seus enormes avenços en els pocs anys que ha estat en funcionament. Dient això, és pot deduir que aquesta ciència té un èxitós futur per endavant, ja que només ha d'esperar uns quants anys més d'avenços perquè la tecnologia s'adapti a les seves necessitats. I dic això últim perquè de l'estudi dels projectes actuals que es dediquen a buscar exoplanetes he pogut concloure que els instruments emprats en aquesta cerca estan molt poc especialitzats per a la causa, normalment aprofitant instal·lacions que també s'utilitzen per altres camps d'estudi astronòmic. Si bé això és molt usual en la resta d'àmbits d'astronomia, després de veure les dificultats a les que s'enfronta la detecció d'exoplanetes penso que aquesta per avançar adequadament requereix d'instrumental molt més especialitzat que el que està utilitzant, i així poder buscar exoplanetes més eficientment a través dels mètodes descrits, eliminant tant com sigui possible les limitacions instrumentals. Això es nota molt en els resultats obtinguts amb els mètodes secundaris (TTV, TDV, polarització de la llum, fases orbitals, etc.), els quals reflecteixen clarament aquesta deficiència tecnològica i que, en la meua opinió, s'haurien de desenvolupar encara més per, com a mínim, aconseguir més viabilitat en les dades obtingudes.

Això està molt lligat al fet que els instruments emprats millorin ràpidament, i serà aquesta millora la que permetrà que en un futur mètodes de detecció que avui són secundaris passin a ser fiables mètodes de primera línia per trobar aquells exoplanetes que mai podrem detectar amb l'ús dels mètodes "primaris" (Oscil·lació Doppler, trànsits, etc.), ja que aquests no poden



detectar tots els tipus d'exoplanetes existents perquè depenen bastant de la situació del sistema planetari observat. No cal dir que aquesta millora instrumental també comportarà, sens dubte, un millor anàlisi dels exoplanetes descoberts, segurament arribant a fer extraordinaris avenços en la caracterització de la seva composició sense la necessitat d'haver-nos de desplaçar fins al planeta per analitzar-lo de primera mà, meta molt llunyana encara. Tot i això, crec que cap mètode arribarà mai a ser capaç d'analitzar un exoplaneta de manera completa i satisfactòria per molta millora instrumental que hi hagi, doncs des del meu punt de vista les limitacions imposades per les enormes distàncies i dificultats de les observacions que hem vist impediran de poder saber amb plena seguretat i sense la necessitat de trepitjar la seva superfície si, per exemple, un exoplaneta té vida o no.

Tot i això, segur que els exoplanetes que coneixem són pocs en comparació amb els que queden per descobrir, i de ben segur que hi haurà més d'una alerta d'haver trobat un d'ells amb capacitat per allotjar vida, com ha passat amb l'exoplaneta "Gliese 581g" descobert mentre feia el treball. És molt probable, penso, que aquest tipus de notícies es repeteixin sovint en els pròxims anys, doncs els exoplanetes signifiquen l'única esperança per a l'existència de vida extraterrestre i els ànims amb els continus descobriments estan molt alts.

L'altre objectiu del treball era entendre el procediment que se segueix a l'hora de buscar un exoplaneta. Per assimilar-ho he dut a terme el treball de camp (la tercera part), el qual ha consistit en la detecció d'un planeta extrasolar registrant el seu trànsit per davant la seva estrella des de l'observatori de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell. En aquesta segona part del treball, he pogut prendre part en l'observació del trànsit utilitzant el telescopi de l'agrupació astronòmica, aprenent una mica més sobre el seu funcionament i sobre les tècniques d'observació emprades. Seguidament, a la mateixa agrupació m'han ensenyat a dur a terme el tractament de les imatges preses durant l'observació, instruint-me sobre el funcionament dels programes a fer servir i veient els passos a seguir, així com el perquè de cada un d'ells. Finalment, vaig poder repetir el seu tractament complet a casa pel meu compte amb èxit. En últim lloc i per acabar, també vaig poder realitzar els càlculs sobre el radi de l'exoplaneta observat partint de la corba de llum que vam registrar, obtenint-ne els resultats esperats.



En el treball de camp me n'he adonat de les dificultats que poden afectar als estudis astronòmics, ja sigui per errors tècnics del telescopi, pel temps (en el meu cas el més habitual) o per l'espera que hi ha per observar un trànsit d'un exoplaneta, podent-te obligar a observar durant la matinada. El mateix passa amb el tractament d'imatges, doncs tot i ser força senzill en el meu cas, dur-lo a terme sol hem va costar bastants esforços. Això m'ha ajudat a valorar encara més la feina dels astrònoms que duen a terme projectes molt més complicats que el meu, així com deteccions d'exoplanetes per altres mètodes més complexos que els trànsits.

D'altra banda, però, que els astrònoms que es dediquen avui dia a buscar exoplanetes no necessiten estar totalment especialitzats en aquesta branca, doncs, com ja s'ha comentat, s'utilitzen instruments i tècniques que són comunes amb altres àmbits de l'astronomia. Això ho vaig notar en seguir els procediments de l'observació i l'anàlisi de dades, els quals eren molt semblants als utilitzats en altres tipus d'estudis astronòmics. Això reforça més la meua conclusió que, per obtenir cada cop resultats més exactes i variats, la ciència de la cerca d'exoplanetes requerirà progressivament de més especialització per part de l'instrumental i, perquè no, de les persones que s'hi dediquin.

Ara bé, crec que aquesta especialització s'anirà produint automàticament a mesura que passin els anys, doncs les ànsies que la comunitat científica i la societat tenen per la descoberta de nous exoplanetes assegurarà la continuïtat de l'expansió que ha sofert aquesta branca des de que es va descobrir el primer planeta extrasolar i que, per desgràcia, no sofreixen altres camps de l'astronomia també de gran interès, potser pel simple fet de no causar tant impacte mediàtic.

Tanmateix, penso que el més important que m'ha aportat el treball és una opinió sobre aquest tema. Quan vaig apuntar "exoplanetes" com a possible tema pel treball de recerca, no en tenia ni idea de tot el que aquella paraula comportava: segles d'especulacions i falsos descobriments, molta gent que hi havia arriscat la carrera, tècniques que han dut als instruments al límit de les seves capacitats, projectes caríssims destinats a trobar-los i centenars de nous descobriments que ens han mostrat una cara fins ara desconeguda del Cosmos. I això sense acabar d'endinsar-me del tot en el tema. Vés a saber quantes paraules, simples com "exoplaneta", deuen aportar el mateix si ens paréssim a saber que signifiquen.

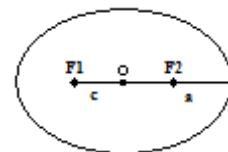


GLOSSARI

(Per ordre alfabètic)

- **Any llum (a.l.) (p.7):** Unitat de longitud astronòmica que correspon a la distància recorreguda per la llum a la velocitat constant de 300.000 km/s en un any. Equival a $9,46 \cdot 10^{12}$ km = 0,3066 pc (parsec). S'empren també els submúltiples “dia llum”, “hora llum” (h.l.), “minut llum” (m.l.) i “segon llum” (s.l.).
- **Astre (p.6):** Cos celeste de forma determinable, aïllat en el cosmos i que es mou d'acord amb determinades lleis.
- **Autogravitant (p.13):** Un objecte autogravitant té la seva estructura modelada pel seu propi camp de gravetat (exemple: el Sol, la Terra; contraexemple: tu)
- **Cinturó de Kuiper (p.13):** Regió situada més enllà de l'òrbita de Neptú, a una distància d'entre 30 i 100 UA del Sol, l'existència de la qual va ser proposada per Gerard Kuiper el 1950 per a explicar els cometes de curt període. Actualment s'estima que en aquesta regió hi ha uns 35.000 petits objectes de gel amb diàmetres de més de 100 Km. Aquesta teoria ha rebut molt recolzament per part de proves observacionals i s'especula que Plutó i algunes llunes dels planetes gasosos provenen d'aquest cinturó.
- **Coronògraf (p.35):** Aparell òptic que permet l'estudi de la corona solar i de les protuberàncies a plena llum del Sol.
- **Efecte Doppler (p.28):** Fenomen descrit per Christian J. Doppler al segle XIX. La llum, el so, i altres fenòmens són ones que es transmeten ondulant. La freqüència d'aquests fenòmens (el nombre d'ondulacions per segon).
- **Espectre (p.9):** és un conjunt de radiacions electromagnètiques posades de manifest de manera que siguin visibles, com recollides en una pantalla, registrades de manera gràfica o informàtica. Per exemple, l'espectre de la llum blanca és el conjunt de colors que coneixem posats de manifest (projectats) amb un prisma o algun altre estri sobre una pantalla.
- **Estrella de neutrons (p.8):** és el residu del nucli d'una estrella molt més massiva que el Sol després d'explotar com a supernova. Està conformada principalment de neutrons, causant que sigui extremadament densa i petita (uns 15 km de diàmetre) amb un camp gravitacional molt intens. Poden girar a diverses revolucions per segon, provocant que el seu camp magnètic emeti radiacions periòdiques pels pols de l'estrella de neutrons. Si un dels pols apunta a la Terra, en podem rebre les radiacions polsants; aleshores anomenem “púlsar” a l'estrella de neutrons.
- **Excentricitat (ϵ) (p.14):** L'excentricitat d'una el·lipse, per exemple, és la divisió de la seva distància focal (c) entre el seu semieix major (a).

$$\epsilon = c / a$$



En la circumferència; “ $\epsilon = 0$ ” (Ja que no hi ha distància focal i per tant queda: $\epsilon = 0/a = 0$).

En l'el·lipse tindrà un valor comprès entre 0 i 1; “ $0 < \epsilon < 1$ ”.

Si l'excentricitat és ú ($\epsilon = 1$) tindrem una paràbola i si es major que ú ($\epsilon > 1$) es tractarà d'una hipèrbola.

Així doncs l'excentricitat és el valor (sense unitat) que ens determinarà quant es desvia una òrbita d'ésser perfectament circular ($\epsilon = 0$).

- **Fotometria (p.29):** és la ciència que, com el seu nom indica, es dedica a mesurar la brillantor o la quantitat de llum, fet que en astronomia és molt útil. En el cas dels astres, això ho fa mesurant la variació de magnitud de la font de llum.



- **Freqüència (f) (p.28):** En un moviment periòdic, és el nombre de cicles complets que es realitzen en un segon, o sigui, cicles per segon.
- **Fusió nuclear (p.7):** és una reacció nuclear que és basa en la unió dels nuclis de dos àtoms formant-ne un de més pesat, fet que emet molta energia.
- **Gegant Vermella (p.8):** Fase final de la vida d'una estrella en la que el desequilibri de forces causat pels canvis en les reaccions de fusió provoquen que aquesta s'infla i adopti un color vermellós.
- **Heliocentrisme (p.21):** Teoria que situa el Sol en el centre de l'Univers i la Terra amb la resta de planetes del Sistema Solar girant al seu voltant, al contrari del geocentrisme que situa la Terra al centre amb tot l'univers orbitant-la.
- **Massa solar (p.8):** Abreviat s'indica " $M_{\odot}$ ", és una unitat de massa que equival a $1,989 \cdot 10^{30}$ Kg, la massa del nostre Sol. S'utilitza per mesurar la massa d'altres astres.
- **Massa jupiterina (p.13):** Abreviat s'indica " M_J " i és basa en el mateix que la massa solar però agafant de model la massa de Júpiter, la qual és: $1 M_J = 1,9 \cdot 10^{27}$ Kg. S'utilitza molt en la mesura de la massa dels planetes extrasolars.
- **Nan blanc (p.8):** Restes del nucli d'una estrella que tenia una massa similar a la del Sol format per Heli, Carboni i Oxigen. El seu petit radi li donen una altíssima densitat, fet que provoca que segueixi brillant tènueament fins apagar-se del tot, essent aleshores un nan negre sense energia.
- **Nan marró (p.14):** Estrella que s'ha format pel col·lapse gravitatori de núvols de gas però que no té suficient massa (per sota de les $0,08 M_{\odot}$) per a desencadenar les reaccions de fusió de les estrelles normals. Tot i això, es creu que irradia una llum dèbil a causa de la conversió d'energia gravitatòria en calor. Està entre un planeta i una estrella, és un esglaó intermig.
- **Nebulosa (p.7):** Núvol de gas a l'espai més o menys condensat constituït principalment per Hidrogen que pot ser molt extens. És el lloc de naixement de les estrelles.
- **Nebulosa planetària (p.8):** Cúmulo de gas format per la mort d'una estrella amb massa similar a la solar i constituït pels materials expulsats d'aquesta.
- **Parsec (pc) (p.7):** Unitat de longitud astronòmica corresponent a la distància a la què una UA (pàg. 14) ocupa en el cel un segment d'un segon d'arc (1"). Equival a $3,2558 \text{ a.l.} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ km}$.
- **Planeta nan (p.13):** En la convenció del 2006 és va decidir que un planeta nan, a diferència d'un planeta, no havia netejat la seva òrbita de planetesimals ni d'altres objectes i que aquesta era la principal diferència.
- **Planetesimal (p.11):** Són cossos petits formats per matèria condensada en el disc protoplanetari que, segons la teoria, la seva gradual agrupació va donar lloc als planetes actuals. Molts cometes actuals són considerats planetesimals pel fet d'haver sobreviscut a la formació planetària i no haver participat en la formació de cap planeta.
- **Polarització (p.44):** Fa referència a la inclinació de les ones que constitueixen una radiació electromagnètica. El fet que una radiació (com la llum) estigui polaritzada indica que totes les seves ones tenen una inclinació determinada.
- **Radiotelescopis (p.40):** Telescopis que, enlloc de captar les radiacions electromagnètiques de la llum, estan dissenyats per captar les ones de ràdio que emeten molts astres de l'Univers (com els púlsars). Per això, no consten de tubs i lents com els telescopis als què estem habituats, sinó d'antenes parabòliques.
- **Satèl·lit (p.12):** Generalment un satèl·lit és qualsevol cos que orbita un altre més massiu, ara bé, els satèl·lits naturals són aquells astres que orbiten els planetes i que són menors que aquests.



- **Seqüència principal (p.8):** Període de temps en el qual una estrella duu a terme la fusió de l'Hidrogen en el seu nucli, essent la major part de la vida de l'astre. El Sol hi estarà 10.000 milions d'anys.
- **Supernova (p.8):** Mort en una colossal explosió d'una estrella amb varies masses solars a causa del col·lapse gravitatori del seu nucli provocant que les capes exteriors de l'estrella rebotin contra aquest i siguin expulsades a gran velocitat alliberant així el material de l'estrella a l'espai.
- **Velocitat radial (v_r) (p.15 i p.28):** és la velocitat d'un cos respecte a una línia, com la nostra línia visual des de la Terra.



BIBLIOGRAFÍA

[Marc Teòric]

- 1. L'Univers

- VIQUIPÈDIA. *Univers* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<<http://ca.wikipedia.org/wiki/Univers>> [Consulta: 24/6/2010, 22:14h]
- VIQUIPÈDIA. *Inflación cósmica* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Inflaci%C3%B3n_c%C3%B3smica> [Consulta: 25/6/2010, 16:55h]
- RIGUTTI, Adriana i altres. *Atlas ilustrado del cielo: un viaje entre estrellas y planetas para conocer el Universo*. Madrid: Susaeta Ediciones, S.A. Traducció de Rosa Solá Maset, pàg. 226-227.
- BATTANER, Eduardo. *Introducción a la Astrofísica*. Madrid: Alianza Editorial, S.A. 1999.

• Les estrelles

- RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 189...
- MARTÍNEZ, Vicent J. i altres. *Astronomía fonamental*. València: Publicacions de la Universitat de València, 2001. Col. Educació.Materials. Pàg. 160-161.
- BATTANER, Eduardo. *Op. Cit.* Pàg. 36
- AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE SABADELL. *Iniciació, astrofísica i cosmologia* [En línia]. Sabadell.
<http://www.astrosabadell.org/html/es/iniciacion_es.htm#> [Consulta: 24/7/2010, 16:44h]

• Classes espectrals

- RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 196 i 197.
- MARTÍNEZ, Vicent J. i altres. *Op. Cit.* Pàg. 156..
- M. DOU, J. i D. MASJUAN, M. *Química 1, batxillerat*. Barcelona: Ed. Casals, S.A., 2007. Pàg. 119, 120 i 139.
- ARMENTER de MONASTERIO, Federico. *Panorama del Universo*. Barcelona: Aymá, S.L., Editores, 1955. Col. Biblioteca "Panoramas de la cultura" 2. Pàg. 274 i 275.

• Sistemes planetaris: El Sistema Solar

- MARTÍNEZ, Vicent J. i altres. *Op. Cit.* Pàg. 94.
- RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 184 i 185.

• Els Planetes

- VIQUIPÈDIA. *Planet* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<<http://es.wikipedia.org/wiki/Planeta>> [Consulta: 14/7/2010, 11:06h]
- WORKING GROUP ON EXTRASOLAR PLANETS (WGESP) OF THE INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION. *Position statement on the definition of a "Planet"* [En línia]. 28 de Febrer del 2003.
<<http://www.dtm.ciw.edu/boss/definition.html>> [Consulta: 14/7/2010, 11:15h]



- VIQUIPÈDIA. *Unidades de longitud* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://es.wikipedia.org/wiki/Unidades_de_longitud> [Consulta: 17/10/2010, 1:15h]
- INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION (IAU). *IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes* [En línia]. Prague: Press Releases, 24 August 2006. <http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603/> [Consulta: 14/7/2010, 11:37h]
- RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 234.
- MARTÍNEZ, Vicent J. i altres. *Astronomia fonamental*. València: Publicacions de la Universitat de València, 2001. Col. Educació. Materials. Pàg. 91-92.
- GUTIÉRREZ MAROTO, Jorge. *La densidad de los planetas del sistema solar*. [En línia]. Cacabelos: Instituto de Tecnologías educativas, I.E.S. Bergidum Flavium; Artículos de divulgación, 2010. <http://centros4.pntic.mec.es/ies.bergidum.flavium/pdf_art_div/Densidad.pdf> [Consulta: 7/11/2010, 16:15h]
- KEPLER INTERACTIVE. *Kepler exoplanet transit hunt*. NASA Ames Research Center, 27 d'Abril del 2010. <<http://kepler.nasa.gov/multimedia/Interactives/keplerFlashAdvDiscovery/fl ash.cfm>> [Consulta: 5/12/2010, 20:37h]
- CHRISTOPH MORDASINI, YANN ALIBERT i WILLY BENZ. *Giant Planet Formation by Core Accretion* [En línia]. Cornell University Library, 30 d'octubre del 2007. <<http://arxiv.org/abs/0710.5667v1>> [Consulta: 28/12/2010, 20:16h]

- 2. Planetes extrasolars

- EXOPLANETAS. *Exoplanetas - Que son los exoplanetas?* [En línia]. 2009. <http://www.exoplanetas.com.ar/1_4_QUE-SON-LOS-EXOPLANETAS-.html> [Consulta: 1/8/2010, 17:55h]

• Denominació

- THE PLANETARY SOCIETY. *Exoplanet Catalog Glossary* [En línia]. The Planetary Society, 2005. <<http://www.planetary.org/exoplanets/glossary.php>> [Consulta: 12/12/2010, 19:22h]

• Història dels exoplanetes

- VIQUIPÈDIA. *Giordano Bruno* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://es.wikipedia.org/wiki/Giordano_Bruno> [Consulta: 6/8/2010, 18:12h]
- MARSH, Stephen. *En busca de otros planetas más allá de nuestro Sistema Solar*. Discovery Channel. 2004.
- VIQUIPÈDIA. *Barnard's Star* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Barnard's_Star> [Consulta: 7/8/2010, 12:12h]
- NASA. *Planet quest, exoplanet exploration. History*. [En línia]. USA: Nasa, Jet propulsion laboratory, California Institute of Technology, 2010. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/science/science_index.cfm> [Consulta: 7/8/2010, 14:07h]



- VIQUIPÈDIA. *Estrella de Barnard* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella_de_Barnard> [Consulta: 7/8/2010, 14:33h]
- GEORGE H. BELL. *The Search for the Extrasolar Planets: A Brief History of the Search, the Findings and the Future Implications* [En línia]. Versió revisada l'Abril del 2001. EEUU: Arizona State University, 1997.
<<http://www.public.asu.edu/~sciref/exoplnt.htm#>> [Consulta: 23/8/2010, 18:58h]
- ESO. NOTAS DE PRENSA. *Exoplaneta capturado en plena marcha* [En línia]. Espanya: ESO Comunicados de Prensa, 2010.
<<http://www.eso.org/public/spain/news/eso1024/>> [Consulta: 23/8/2010, 19:09h]
- VIQUIPÈDIA. *Gamma Cephei Ab* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Gamma_Cephei_Ab> [Consulta: 24/7/2010, 12:30h]
- VIQUIPÈDIA. *PSR B1257+12* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/PSR_B1257%2B12> [Consulta: 24/7/2010, 13:26h]
- VIQUIPÈDIA. *Aleksander Wolszczan* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Aleksander_Wolszczan> [Consulta: 24/7/2010, 14:05h]
- VIQUIPÈDIA. *Planeta extrasolar* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://ca.wikipedia.org/wiki/Planeta_extrasolar> [Consulta: 24/7/2010, 14:08h]
- VIQUIPÈDIA. *Cosmos* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Cosmos:_un_viaje_personal> [Consulta: 24/9/2010, 14:01h]
- JESÚS MARTÍNEZ FRIAS. *La sociedad planetaria en España* [En línia]. Espanya: Tierra, 2009. <<http://tierra.rediris.es/merge/tps-spain/>> [Consulta: 24/9/2010, 14:07h]
- VIQUIPÈDIA. *HD 209458 b* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://es.wikipedia.org/wiki/HD_209458_b> [Consulta: 9/10/2010, 11:22h]
- NASA'S ASTROBIOLOGY MAGAZINE. *Dying Planet Leaks Carbon-Oxygen* [En línia]. USA: NASA, 2004.
<http://www.nasa.gov/vision/universe/newworlds/Osiris_leaks.html> [Consulta: 9/10/2010, 11:27h]
- VIQUIPÈDIA. *70 Ophiuchi* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://en.wikipedia.org/wiki/70_Ophiuchi#cite_note-8> [Consulta: 9/10/2010, 12:58h]
- VIQUIPÈDIA. *Thomas Jefferson Jackson See* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Jefferson_Jackson_See> [Consulta: 9/10/2010, 13:00h]
- VIQUIPÈDIA. *Forest Ray Moulton* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Forest_Ray_Moulton> [Consulta: 9/10/2010, 13:05h]
- WINGMAKERS.CO.NZ. *PSR B1620-26 B* [En línia].
<<http://www.wingmakers.co.nz/universe/extrasolar/PSR%20B1620-26.html>> [Consulta: 28/10/2010, 0:15h]



- VIQUIPÈDIA. *PSR B1620-26 b* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Methuselah_\(planet\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Methuselah_(planet))> [Consulta: 27/10/2010, 0:19h]

• **Mètodes per detectar-los i saber-ne les característiques:**

- JEAN SCHNEIDER. *La enciclopedia de los planetas extrasolares* [En línia]. París: CNRS/LUTH - Observatorio de Paris, traduït per Juan Cabrera, 2010. <<http://exoplanet.eu/papers/macp-detection-methods.pdf>> [Consulta: 25/9/2010, 17:23h]
- VIQUIPÈDIA. *Doppler spectroscopy* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy> [Consulta: 3/10/2010, 18:03h]
- SALVÀ I TOMÀS, Antoni. *EXOPLANETES* [En línia]. Illes Balears: IES Felanitx (departament de física i química), 2006. <http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm> [Consulta: 9/10/2010, 11:05h]
- J. MARÍN; N. PFEIFFER; A. TRAVESSET. *Física 2 batxillerat*. Barcelona: Editorial Casals, 2009, pàg. 6.
- VIQUIPÈDIA. *Lalande 21185* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lalande_21185> [Consulta: 26/10/2010, 23:58h]
- ESO. SCIENCE RELEASE. *Is This Speck of Light an Exoplanet?* [En línia]. [S.l]: ESO Press Releases, 10 Setembre 2004. <<http://www.eso.org/public/news/eso0428/>> [Consulta: 7/11/2010, 20:38h]
- MOA (MICROLENSING OBSERVATIONS IN ASTROPHYSICS). *Extrasolar Planets* [En línia]. [S.l]: Solar Terrestrial Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2010. <http://www.phys.canterbury.ac.nz/moa/extrasolar_planets.html> [Consulta: 10/11/2010, 0:04h]
- NASA. *Cosmic Magnifying Glass: Distant Star Reveals Planet*. [En línia]. USA: Nasa, Jet propulsion laboratory, California Institute of Technology, 15 Abril 2004. <<http://www.jpl.nasa.gov/releases/2004/103.cfm>> [Consulta: 10/11/2010, 0:07h]
- COOPER, Keith. *Planet found tugging on transits* [En línia]. UK: Astronomy now online, 9 de Juliol del 2010. <<http://www.astronomynow.com/news/n1007/09exo/>> [Consulta: 20/11/2010, 18:02h]
- M. KIPPING, David. *The Search for Exomoons* [En línia]. Londres: Homepages, 19 de Novembre del 2008. <<http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucapdki/Kipping%20-%20Exomoons%20Review.pdf>> [Consulta: 20/11/2010, 18:37h]
- R. DOYLE, Laurance. *Timing Detection of Eclipsing Binary Planets and Transiting Extrasolar Moons* [En línia]. SETI Institute i Instituto de Astrofísica de Canarias, 2007. <<http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.150.1341>> [Consulta: 21/11/2010, 23:07h]
- M. JENKINS, Jon; R. DOYLE, Laurance. *Detecting reflected light from close-in extrasolar giant planets with the Kepler photometer*. [En línia]. U.S.A.: The Astrophysical Journal, The American Astronomical Society, 20 de Setembre del



2003. <<http://iopscience.iop.org/0004637X/595/1/429/pdf/56774.web.pdf>> [Consulta: 25/11/2010, 13:52h]
- C. ALFONSO, TH. HENNING i altres. *Giant Transiting Planets Observations GITPO* [En línia]. Proceedings of the International Astronomical Union 1, 2005, pàg. 79-82
<<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?aid=430821>> [Consulta: 1/12/2010, 17:50h]
- H. M. SCHMID, J.-L. BEUZIT i altres. *Search and investigation of extra-solar planets with polarimetry* [En línia]. Proceedings of the International Astronomical Union 1, 2005, pàg. 165-170.
<<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?aid=430847>> [Consulta: 1/12/2010, 17:53h]
- JOSÉ MANUEL GARCÍA ESTEVEZ. *Interferometría: Una nueva ventana al universo*. [En línia]. Astroseti.org: Divulgación científica, Webs, 2010.
<<http://astroseti.org/noticias>> [Consulta: 11/12/2010, 18:51h]
- MARK WYATT. 3. *Extrasolar planets* [En línia]. University of Cambridge, Institute of Astronomy, 2009, pàg. 54-55.
<http://www.ast.cam.ac.uk/~wyatt/lecture3_extrasolarplanets.pdf> [Consulta: 11/12/2010, 18:58h]
- DIEGO DÍAZ FIDALGO. *Keck: Búsqueda astrométrica de planetas* [En línia]. Astroseti.org: Divulgación científica, Webs, 2010.
<<http://astroseti.org/articulo/3334/keck-busqueda-astrometrica-de-planetas>> [Consulta: 12/12/2010, 18:08h]
- THE PLANETARY SOCIETY. *Notable Exoplanets* [En línia]. The Planetary Society, 2005. <<http://www.eso.org/public/news/eso1035/>> [Consulta: 20/12/2010, 17:03h]

• Missions i projectes actuals i futurs

- ESO. *Telescopes and Instrumentation* [En línia]. [S.l]: ESO for the Public, 5 de desembre 2010. <<http://www.eso.org/public/teles-instr.html>> [Consulta: 5/12/2010, 12:24h]
- NASA. *Exoplanet missions* [En línia]. USA: Nasa Jet propulsion laboratory, California Institute of Technology. Planet Quest, exoplanet exploration.
<http://planetquest.jpl.nasa.gov/missions/missions_index.cfm#> [Consulta: 5/12/2010, 12:36h]
- NExScI. *Palomar Testbed Interferometer* [En línia]. USA: NASA Exoplanet Science Institute, California Institute of Technology.
<<http://nexsci.caltech.edu/missions/Palomar/>> [Consulta: 5/12/2010, 13:14h]
- SUBARU TELESCOPE. *CIAO* [En línia]. Japó: National Astronomical Observatory of Japan, 2010.
<<http://www.naoj.org/Introduction/instrument/CIAO.html>> [Consulta: 5/12/2010, 13:28h]
- ZACH BERTA. *MEarth: looking for transiting habitable super-Earths around small stars* [En línia]. National Science Foundation.
<<https://www.cfa.harvard.edu/~zberta/mearth/>> [Consulta: 5/12/2010, 14:08h]
- ROI ALONSO, TIMOTHY M. BROWN i altres. *TrES-1: The transiting planet of a bright K0 V star* [En línia]. The Astrophysical Journal, 1 d'octubre del 2004.



- <http://iopscience.iop.org/1538-4357/613/2/L153/pdf/1538-4357_613_2_L153.pdf> [Consulta: 5/12/2010, 14:31h]
- STEFAN HOLMES. *SuperWASP, Wide Angle Search for Planets* [En línia]. 20 de maig del 2010. <<http://www.superwasp.org/index.html>> [Consulta: 5/12/2010, 14:54h]
- ESA. *COROT overview* [En línia]. European Space Agency, 8 Març del 2007. <http://www.esa.int/esaSC/120372_index_0_m.html> [Consulta: 5/12/2010, 18:46h]
- KEPLER. *About the mission* [En línia]. NASA Ames Research Center, 14 de Novembre del 2010. <<http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>> [Consulta: 5/12/2010, 20:40h]
- SSC. *SPITZER el telescopio espacial, el sitio en español* [En línia]. NASA, California Institute of Technology, 2000. <<http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/index.shtml>> [Consulta: 7/12/2010, 20:42h]
- STScI. *Hubble Site* [En línia]. NASA, 2010. <<http://hubblesite.org/>> [Consulta: 7/12/2010, 22:12h]
- NASA. *EPOCH* [En línia]. USA: Nasa Jet propulsion laboratory, California Institute of Technology. Planet Quest, exoplanet exploration. <<http://planetquest.jpl.nasa.gov/missions/epochMission.cfm>> [Consulta: 8/12/2010, 13:46h]
- *About LBTI* [En línia]. Universitat d'Arizona, NASA. <http://shiloh.as.arizona.edu/~McMahon/LBTI_new/about%20LBTI.html> [Consulta: 8/12/2010, 14:15h]
- NASA. *An instrument for ground-based planet searches* [En línia]. USA: Nasa Jet propulsion laboratory, California Institute of Technology. Planet Quest, exoplanet exploration. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/lbti/lbti_index.cfm> [Consulta: 8/12/2010, 14:18h]
- SVEN PIPER. *Space Interferometry Mission* [En línia]. [S.l.] Extrasolar-planets.com, 6 de Setembre del 2009. <<http://www.extrasolar-planets.com/exoplanets/sim.html>> [Consulta: 9/12/2010, 17:33h]
- SVEN PIPER. *Darwin Mission* [En línia]. [S.l.] Extrasolar-planets.com, 5 de Setembre del 2009. <<http://www.extrasolarplanets.com/exoplanets/darwin.html>> [Consulta: 11/12/2010, 12:46h]
- NASA. *Terrestrial Planet Finder* [En línia]. USA: Nasa Jet propulsion laboratory, California Institute of Technology. Planet Quest, exoplanet exploration. <http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm> [Consulta: 11/12/2010, 13:32h]
- JONATHAN P. GARDNER. *The James Webb Space Telescope* [En línia]. NASA, USA.gov. <<http://www.jwst.nasa.gov/index.html>> [Consulta: 11/12/2010, 13:50h]
- ESA Science & Technology. *Gaia* [En línia]. ESA Science Programme, 11 de Desembre 2010. <<http://sci.esa.int/sciencee/www/area/index.cfm?fareaid=26>> [Consulta: 11/12/2010, 14:15h]
- VIQUIPÈDIA. *Lick Observatory* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lick_Observatory> [Consulta: 30/12/2010, 21:14h]

**• Exoplanetes descoberts**

- THE PLANETARY SOCIETY. *Notable Exoplanets* [En línia]. The Planetary Society, 2005. <<http://www.eso.org/public/news/eso1035/>> [Consulta: 20/12/2010, 17:06h]
- ANTHONY R. CURTIS. *Neptunians Beyond the Solar System* [En línia]. Space Today Online, 2009. <<http://www.spacetoday.org/DeepSpace/Stars/Planets/NeptunianExoplanet.html>> [Consulta: 23/12/2010, 12:13h].
- LUIS A. SALDARRIAGA B. *¿Qué es la zona habitable?* [En línia]. Exobiología y ciencias planetarias, la búsqueda de vida en el Universo, 12 de Juny del 2008. <http://exobiologia.8m.com/Articulos/Zona_habitable.html> [Consulta: 23/12/2010, 14:36h]
- EXOPLANETAS. *Exoplanetas retrógrados* [En línia]. 2009. <http://www.exoplanetas.com.ar/1_11_Exoplanetas-retr-grados-.html> [Consulta: 23/12/2010, 1:59h]
- ASTRONOMY. *Orbits of some exoplanets turn planetary theory upside down* [En línia]. Astronomy News, Astronomy Outreach foundation, 13 d'abril del 2010. <<http://www.astronomy.com/en/sitecore/content/Home/News-Observing/News/2010/04/Orbits%20of%20some%20exoplanets%20turn%20planetary%20theory%20upside%20down.aspx>> [Consulta: 23/12/2010, 2:03h]
- G. HÉBRARD, A. LECAVALIER DES ÉTANGS i altres. *Evaporation rate of hot Jupiters and formation of Chthonian planets* [En línia]. París, França: Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, 15 de decembre del 2003. <http://fr.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0312/0312384.pdf> [Consulta: 24/12/2010, 21:26h]
- VIQUIPÈDIA. *Planeta ctònic* [En línia]. Wikimedia Foundation, 18 de juny del 2010. <http://ca.wikipedia.org/wiki/Planeta_ct%C3%B2nic> [Consulta: 24/12/2010, 21:27h]
- EXOPLANETAS. *Super Tierras, que son?* [En línia]. 2009. <http://www.exoplanetas.com.ar/1_12_SUPER-TIERRAS-QUE-SON-.html> [Consulta: 24/12/2010, 21:32h]
- DIANA VALENCIA, DIMITAR D. SASSELOV i RICHARD J. O'CONNELL. *Radius and structure models of the first Super-Earth planet* [En línia]. U.S.A.: The Astrophysical Journal, The American Astronomical Society, 10 de febrer del 2007. <http://iopscience.iop.org/0004-637X/656/1/545/pdf/0004637X_656_1_545.pdf> [Consulta: 25/12/2010, 0:42h]
- CHARLES Q. CHOI. *Out There: A Strange Zoo of Other Worlds* [En línia]. Space.com, TechMediaNetwork, 14 de febrer del 2010. <<http://www.space.com/scienceastronomy/extrasolar-planet-types-100214.html>> [Consulta: 25/12/2010, 12:43h]
- ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY. *Free-floating planets confirmed* [En línia]. SpaceRef Interactive, 4 d'abril del 2001. <<http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=4346>>



- M. TRISTÀN, Rosa. “El primer planeta “potencialmente habitable” fuera del Sistema Solar”. *El Mundo*. Madrid, 30 setembre 2010. Pàg. 40.
- JORGE IANISZEWSKI R. *Exoplanera Gliese 581g es poco habitable* [En línia]. Xile: Círculo Astronómico, planetas extrasolares III, noticias, 2010. <<http://www.circuloastronomico.cl/planetas/extrasol3.html>> [Consulta: 25/12/2010, 13:16h]
- J. J. FORTNEY, M. S. MARLEY i J. W. BARNES. *Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits* [En línia]. The Astrophysical Journal, 17 d'abril del 2007. <http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0612/0612671v3.pdf> [Consulta: 25/12/2010, 17:53h]
- ELISA V. QUINTANA, JACK J. LISSAUER. *Terrestrial Planet Formation in Binary Star Systems* [En línia]. Cornell University Library, 23 de març del 2007. <<http://arxiv.org/abs/0705.3444v1>> [Consulta: 26/12/2010, 13:16h]
- VÍCTOR R. RUIZ. *Se encuentran planetas flotando libremente en el espacio*. [En línia]. Espanya: Infoastro.com, 26 de març del 2000. <<http://www.infoastro.com/200003/26planetas.html>> [Consulta: 30/12/2010, 18:32h]

- 3. Treball de Camp

- JULIO CASTELLANO. *Fotometría diferencial y curvas fotométricas con Foto-Dif* [En línia]. Astrosurf, 2010. <<http://cometas.fotografiaastronomica.com/extrasolares/fotodif/fotodif.htm>> [Consulta: 14/12/2010, 17:05h]
- AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE SABADELL. *Observatori de Sabadell* [En línia]. Sabadell, 2010. <<http://www.astrosabadell.org/html/ca/observatorisab.htm>> [Consulta: 14/12/2010, 17:08h]
- AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE SABADELL. *Efemérides de tránsitos exoplanetarios para el año 2010* [En línia]. Sabadell, 2010. <http://www.astrosabadell.org/php/pdf/en/observacion_exoplanetas.pdf> [Consulta: 17/12/2010, 18:55h]

- Glossari

- astre: *Enciclopèdia Catalana*. [En línia]. Enciclopèdia Catalana, SAU, 2010. <<http://ec.grec.net/lexicx.jsp?GECART=0013628>> [Consulta: 25/6/2010, 14:49h]
- fusió nuclear: VIQUIPÈDIA. *Fusió nuclear* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://ca.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3_nuclear> [Consulta: 24/7/2010, 13:13h]
- nebulosa: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 233.
- Any llum: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 229.
- Parsec: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 234.
- Seqüència principal: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 200.
- Massa solar: BATTANER, Eduardo. *Op. Cit.* Pàg. 182.
- nebulosa planetària: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 233.
- nan blanc: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 231.
- supernova: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 234.
- estrella de neutrons: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 203.



AGRUPACIÓ ASTRONÒMICA DE SABADELL. *Iniciació, astrofísica i cosmologia* [En línia]. Sabadell.

<http://www.astrosabadell.org/html/es/iniciacion_es.htm#> [Consulta: 24/7/2010, 16:44h]

· espectre: M. DOU, J. i D. MASJUAN, M. *Química 1, batxillerat*. Barcelona: Ed. Casals, S.A., 2007. Pàg. 120.

· planetesimal: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 234.

VIQUIPÈDIA. *Planetesimal* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.

<<http://es.wikipedia.org/wiki/Planetesimal>> [Consulta: 24/7/2010, 17:20h]

· satèl·lit: VIQUIPÈDIA. *Satèl·lit artificial* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Sat%C3%A9lite_artificial> [Consulta: 25/7/2010, 17:38h]

· Cinturó de Kuiper: MARTÍNEZ, Vicent J. i altres. *Astronomia fonamental*. València: Publicacions de la Universitat de València, 2001. Col. Educació.Materials. Pàg. 131.

· Autogravitant: VENTANAS ABIERTAS AL UNIVERSO. *Glosario* [En línia]. París: l'Observatoire de Paris. <<http://media4.obspm.fr/public/VAU/glossaire/glossaire.html>> [Consulta: 25/7/2010, 18:09h]

· Planeta nan: VIQUIPÈDIA. *Planet* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.

<<http://es.wikipedia.org/wiki/Planeta>> [Consulta: 25/7/2010, 18:35h]

· M_J: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 171.

· Nan marró: RIGUTTI, Adriana i altres. *Op. Cit.* Pàg. 231.

· Efecte Doppler: J. MARÍN; N. PFEIFFER; A. TRAVESSET. *Op. Cit.* Pàg. 43.

· Excentricitat: COLERA, José; OLIVEIRA, M^a José; GARCÍA, Rosario. *Matemàtiques 1r batxillerat*. Barcelona: Ed. Barcanova, SA., 2008, pàg. 198.

· Coronògraf: DICCIONARI.CAT. *Coronògraf* [En línia]. Grup Enciclopèdia Catalana.

<<http://www.diccionari.cat/lexicx.jsp?GECART=0036236>> [Consulta: 27/11/2010, 13:23h]

- **Annexos**

- VIQUIPÈDIA. *Lleis de Kepler* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.

<http://ca.wikipedia.org/wiki/Lleis_de_Kepler> [Consulta: 26/12/2010, 22:30h]

- VIQUIPÈDIA. *Cinturó de Kuiper* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <

http://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_de_Kuiper> [Consulta: 27/12/2010, 17:48h]

- WIKILINGUA. *Annex:Dades dels planetes del Sistema Solar* [En línia].

Viquipèdia, Wikimedia Foundation, 2010.

<http://www.wikilingua.net/ca/articles/d/a/t/Anexo~Datos_de_los_planetas_del_Sistema_Solar_936f.html#cite_note-retro-2> [Consulta: 28/12/2010, 1:44h]

- VIQUIPÈDIA. *Parsec* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010.

<<http://ca.wikipedia.org/wiki/Parsec>> [Consulta: 28/12/2010, 1:54h]

- MIKE WALL. *First Alien Planet From Another Galaxy Discovered* [En línia].

Space.com, TechMediaNetwork, 18 de novembre del 2010.

<<http://www.space.com/scienceastronomy/alien-planet-from-another-galaxy-discovered-101118.html>> [Consulta: 29/12/2010, 1:43h]

- ROBERT ROY BRITT. *Astronomers See Evidence for Youngest Planet* [En línia].

Space.com, TechMediaNetwork, 27 de març del 2004.

<http://www.space.com/scienceastronomy/youngest_planet_040527.html>

[Consulta: 29/12/2010, 12:41h]



- ROBERT ROY BRITT. *Primeval Planet: Oldest Known World Conjures Prospect of Ancient Life* [En línia]. Space.com, TechMediaNetwork, 10 de juliol del 2003. <http://www.space.com/scienceastronomy/oldest_planet_030710-1.html> [Consulta: 29/12/2010, 13:01h]
- VIQUIPÈDIA. *Fomalhaut b* [En línia]. Wikimedia Foundation, 2010. <http://en.wikipedia.org/wiki/Fomalhaut_b> [Consulta: 29/12/2010, 13:55h]
- CLARA MOSKOWITZ. *Top 5 Most Extreme Exoplanets* [En línia]. Wired Science, Condé Nast Digital, 21 de juny del 2009. <<http://www.wired.com/wiredscience/2009/01/top-exoplanets/>> [Consulta: 29/12/2010, 14:19h]
- GUILLERMO TORRES, FRANÇOIS FRESSIN i altres. *Modeling Kepler transit light curves as false positives: rejection of blend scenarios for Kepler-9, and validation of Kepler-9d, a super-earth-size planet in a multiple system.* [En línia]. Astrophysical Journal, apareixerà a la revista l'1 de juny del 2011. <<http://exoplanet.eu/papers/Kepler-9-d.pdf>> [Consulta: 29/12/2010, 16:03h]
- IVAN GÜIXENS. *Un exoplaneta muy excéntrico: HD 80606-b* [En línia]. Blogspot, 18 d'abril del 2010. <<http://yplanetsmundos.blogspot.com/2010/04/un-planeta-muy-excentrico-hd-80606-b.html>> [Consulta: 29/12/2010, 16:44h]
- MIKE MATESSA. *Extrasolar Planets* [En línia]. U.S.A: www.matessa.org. <<http://www.matessa.org/~mike/planets.html>> [Consulta: 30/12/2010, 21:49h]
- PUIG, Xavier. *Tècniques avançades d'observació (curs)*. Sabadell: Programa de formació, Agrupació Astronòmica de Sabadell, 2010.

- Imatges

• Treball:

(Portada realitzada per l'autor)

- fig.1: <http://apod.nasa.gov/apod/ap071020.html> [Consulta: 3/1/11, 17:49h]
- fig.2: http://www.aerospaceguide.net/solar_system/sun.html [Consulta: 3/1/11, 18:04h]
- fig.3: <http://elfofista.blogspot.com/2008/07/huevos-de-estrellas-en-la-nebulosa-del.html> [Consulta: 3/1/11, 18:08h]
- fig.4: http://www.astrobio.net/index.php?option=com_retrospection&task=detail&id=3198 [Consulta: 3/1/11, 18:01h]
- fig.5: <http://astrorawson.com.ar/Articulos/magnitudes-estelares.html> [Consulta: 3/1/11, 18:25h]
- fig.6: http://2.bp.blogspot.com/_CEG70KUEtRw/Sgbflk9Po3I/AAAAAAAAAQ8/JC82l7o3pPU/s1600-h/03-Escala+dibujo+magnitud+estelar.jpg [Consulta: 25/12/2010, 19:18h]
- fig.7: <http://web.mac.com/georgedh/AstronomySite/St-237A%20DeepSkyNebula.html> [Consulta: 25/12/2010, 14:51h]
- fig.8: <http://imaginorium.blogspot.com/2007/07/la-formaci-del-sistema-solar.html> [Consulta: 28/12/2010, 0:53h]
- fig.9, 10 i 12: <http://www.xtec.es/~rmolins1/solar/cat/sistema.htm> [Consulta: 28/12/2010, 0:57h]
- fig.11: <http://www.deepfly.org/TheNeighborhood/DebrisDisks4.html> [Consulta: 30/12/2010, 18:37h]
- fig.13: http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=178 [Consulta: 3/1/11, 22:23h]



- fig.14: (fotografia del programa “Celestia”)
- fig.15: (Creada per l'autor)
- fig.16: <http://www.wissenschaft-online.de/artikel/876905> [Consulta: 4/1/11, 1:42h]
- fig.17: http://deepimpact.umd.edu/gallery/comet_orbits.html [Consulta: 4/1/11, 1:14h]
- fig.18: http://new.taringa.net/posts/info/3169042/Los-Planetas_-informacion_-documentales-y-enlaces-educativos.html [Consulta: 4/1/11, 2:18h]
- fig.19: <http://divulgacionbiologica.blogspot.com/2010/08/asi-sera-la-vida-en-marte.html> [Consulta: 4/1/11, 1:59h]
- fig.20: http://www.wingmakers.co.nz/universe/solar_system/Jupiter.html [Consulta: 4/1/11, 2:10h]
- fig.21: <http://usias.blogspot.com/> [Consulta: 3/1/11, 22:11h]
- fig.22: Bruno03 - <http://www.giordano-bruno-gesellschaft.de/> [Consulta: 4/1/11, 2:22h]
- fig.23: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/V/vanderKamp.html> [Consulta: 4/1/11, 13:00h]
- fig.24: <http://www.solcomhouse.com/carlsagan.htm> [Consulta: 4/1/11, 16:23h]
- fig.25: <http://www.erbzine.com/mag13/1384.html> [Consulta: 4/1/11, 16:26h]
- fig.26: <http://www.physics.unlv.edu/~jeffery/astro/starevol/starevol.html> [Consulta: 4/1/11, 16:33h]
- fig.27:
<http://wiadomosci.gazeta.pl/Wiadomosci/55,80708,5623161.html?back=/Wiadomosci/1,80708,5776265,polacy_o_wolszczanie_pisarz_poeta_polityk_.html> ;
<<http://www.aoc.nrao.edu/~dfrail/>> [Consulta: 4/1/11, 16:45h]
- fig.28:
<http://www.nasaimages.org/luna/servlet/detail/nasaNAS~12~12~64331~168831:Extreme-Planets> [Consulta: 4/1/11, 16:44h]
- fig.29: http://www.esa.int/esaSC/SEM13T1VED_index_0_iv.html [Consulta: 24/7/2010, 14:40h]
- fig.30: <http://www.exoplaneten.de/51peg/spanish.html> [Consulta: 4/1/11, 17:17h]
- fig.31: http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 5/10/2010, 23:56h]
- fig.32:
http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/images_exoplanets/big/stardoppler.jpg [Consulta: 4/1/11, 23:33h]
- fig.33: <http://steves-astrocorner.blogspot.com/2009/03/exoplanets-how-do-we-find-these-itty.html> [Consulta: 4/1/11, 23:03h]
- fig.34: <http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/exoplanets.php> [Consulta: 4/1/11, 22:58h]
- fig.35: <http://snews.bnl.gov/popsci/spectroscope.html> [Consulta: 4/1/11, 23:07h]
- fig.36: <<http://bloggers.diariodeavisos.com/imprescindiblesercurioso/?x=entry:entry100413-155434%3Bcomments:1>> ; <<http://www.espacioprofundo.com.ar/foros/about15912.html>> [Consulta: 5/1/11, 2:54h]
- fig.37:
<http://www.asociacionhubble.org/portal/index.php/foro/viewtopic.php?f=24&t=36954&view=previous> [Consulta: 5/1/11, 2:20h]
- fig.38: http://www.astrosabadell.org/html/pdf/en/008_exoplanetes_2009.pdf [Consulta: 5/1/11, 2:58h]
- fig.39: http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 5/1/11, 14:32h]



- fig.40: http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 5/1/11, 14:31h]
- fig.41: http://planetquest.jpl.nasa.gov/news/extraPlanet_image.html [Consulta: 27/12/2010, 2:01h]
- fig.42: <http://cienciayficcin-lokacomotumadre.blogspot.com/2010/04/tres-nuevos-planetas-descubiertos-con.html> [Consulta: 25/12/2010, 21:51h]
- fig.43: http://media4.obspm.fr/exoplanets/pages_exopl-methodes/intro.html [consulta: 29/12/2010, 0:27h]
- fig.44: <http://www.maclester.edu/astronomy/courses/physics50/spring2002.html> [Consulta: 5/1/11, 15:27h]
- fig.45: http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 5/1/11, 15:31h]
- fig.46: <http://astronomyonline.org/Exoplanets/ProfessionalDetection.asp> [Consulta: 5/1/11, 19:10h]
- fig.47: http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 5/1/11, 19:50h]
- fig.48: <http://cass.ucsd.edu/public/tutorial/SN.html> [Consulta: 5/1/11, 20:31h]
- fig.49: <http://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucapdki/exomoons.html> [Consulta: 5/1/11, 20:42h]
- fig.50: http://unigalactic.com/index.php?option=com_content&Itemid=16&lang=en&view=archive [Consulta: 19:25h]
- fig. 51: http://www.nasa.gov/images/content/289899main_fomalhaut_actual_HI.jpg [Consulta:25/12/2010, 21:05h]
- fig. 52: <http://astro.berkeley.edu/~kalas/disksite/pages/bpic850.html> [Consulta: 6/1/11, 1:27h]
- fig. 53: <<http://vaultnews.wordpress.com/>> ; <<http://www.mariscope.cl/es/index.php?id=estacion>> ; <<http://www.jenam2010.org/>> [Consulta: 6/1/11, 1:43h]
- fig. 54: <http://www.ifa.hawaii.edu/images/aerial-tour/kecks.html> [Consulta: 8/1/11, 0:53h]
- fig. 55: http://gallery.hd.org/_exhibits/natural-science/_more2007/_more02/VLT-the-Very-Large-Telescope-interior-and-exterior-sited-on-flattened-mountain-top-at-Cerro-Paranal-Chile-1-AJHD.jpg [Consulta: 25/12/2010, 21:45h]
- fig. 56: https://www.cfa.harvard.edu/~zberta/mearth/mearth_flats.jpg [Consulta: 25/12/2010, 21:46h]
- fig. 57: <http://www.superwasp.org/images/8cams.jpg> [Consulta: 25/12/2010, 21:48h]
- fig. 58: http://smc.cnes.fr/COROT/GP_mission.htm [Consulta: 25/12/2010, 21:34h]
- fig. 59: <http://kepler.nasa.gov/multimedia/Images/graphics/?ImageID=25> [Consulta: 25/12/2010, 21:33h]
- fig. 60: http://www.spitzer.caltech.edu/images/3075-SIRTF_ir_2-Infrared-View-of-Spitzer [Consulta: 25/12/2010, 21:38h]
- fig. 61: <http://hubblesite.org/gallery/spacecraft/03/> [Consulta: 25/12/2010, 21:29h]
- fig. 62: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=46968> [Consulta: 25/12/2010, 21:57h]
- fig. 63: <<http://astronomicamentis.blogosfere.it/2010/04/large-binocular-telescope-rendendo-visibile-linvisibile.html>> ; <<http://www.virginia.edu/insideuva/2002/15/index.html>> [Consulta: 25/12/2010, 22:06h]
- fig. 64: <http://www.lomasdelmundo.com/e-elt-el-telescopio-mas-grande-del-mundo/> [Consulta: 8/1/11, 1:15h]
- fig. 65: <http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIM/multimedia/multimediaImages/> [Consulta: 25/12/2010, 22:16h]



- fig. 66: <http://planetquest.jpl.nasa.gov/images/TPF_I2-600.jpg> ;
<http://planetquest.jpl.nasa.gov/images/TPF_C2_m-1200.jpg> [Consulta: 25/12/2010, 22:12h]
- fig. 67: <http://www.esa.int/esammg/mmg.pl?b=b&keyword=Darwin&single=y&start=2&size=b> [Consulta: 25/12/2010, 22:21h]
- fig. 68: http://www.esa.int/esaSC/120377_index_1_m.html#subhead5 [Consulta: 25/12/2010, 22:23h]
- fig. 69: http://www.jwst.nasa.gov/images2/jwst_whiteback.jpg [Consulta: 25/12/2010, 21:36h]
- fig. 70: (Creada per l'autor)
- fig. 71 (Planeta "Mustafar" de Star Wars): <http://lanibin.millahibrahim.net/?paged=2> [Consulta: 24/12/2010, 19:23h]
- fig. 72: (Creada per l'autor)
- fig. 73: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zona_habitavel-pt.svg [Consulta: 7/8/2010, 13:34h]
- fig. 74: <http://oklo.org/2006/04/> [Consulta: 8/1/11, 13:18h]
- fig. 75: <http://www.astronomy.com/en/sitecore/content/Home/News-Observing/News/2010/04/Orbits%20of%20some%20exoplanets%20turn%20planetary%20theory%20upside%20down.aspx> [Consulta: 24/12/2010, 1:53h]
- fig. 76: <http://www.universetoday.com/37308/biggest-exoplanet-yet-orbits-the-wrong-way/exoplanet02/> [Consulta: 8/1/11, 13:27h]
- fig. 77: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2010/15/image/a/format/web/> [Consulta: 9/1/11, 8:37h]
- fig. 78: <http://www.space-art.co.uk/en/artwork/exoplanets/gliese-581c.html> [Consulta: 8/1/11, 14:10h]
- fig. 79: (Creada per l'autor)
- fig. 80: <http://physicsworld.com/cws/article/news/22672> [Consulta: 8/1/11, 15:21h]
- fig. 86: <http://www.cornellcollege.edu/physics/courses/phy312/Student-Projects/Extra-Solar-Planets/Extra-Solar-Planets.html> [Consulta: 9/1/11, 1:34h]

• Annexos:

- fig. 1 (annexos) - http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/5720859/Videos-de-Supernovas--y-Gigantes-Rojas--Info_.html [Consulta: 26/12/2010, 11:56h]
- fig. 2 (annexos) - <http://iamgaurav.blog.co.in/2010/11/29/353/> [Consulta: 26/12/2010, 12:06h]
- fig. 5 (annexos) - <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/B/Binary+Star> [Consulta: 26/12/2010, 12:36h]
- fig. 7 (annexos) - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Triple-star_sunset.jpg [Consulta: 26/12/2010, 12:32h]
- fig. 8 (annexos) - <http://www.sciencenewsforkids.org/articles/20070516/Feature1.asp> [Consulta: 26/12/2010, 13:18h]
- fig. 9 (annexos) - <http://www.xtec.es/recursos/astronom/hst/orions.htm> [Consulta: 27/12/2010, 14:41h]
- fig. 10 (annexos) - http://www.xtec.es/recursos/astronom/hst/HST6_prop_gallery_r.jpg [Consulta: 27/12/2010, 14:42h]



- fig. 11 (annexos) – <http://cnls.lanl.gov/~petersen/header.html> [Consulta: 27/12/2010, 14:44h]
- fig. 12 (annexos) – <http://paginadelsaber.blogspot.com/2010/07/cinturon-de-kuiper.html> [consulta: 27/12/2010, 15:17h]
- fig. 13 (annexos) – http://www.firstscience.com/home/perspectives/editorials/thank-goodness-pluto-s-dead-and-buried-page-2-1_30425.html [Consulta: 27/12/2010, 17:44h]
- fig. 14 (annexos) – <http://palabradelibertad.blogspot.com/2010/10/cientificos-cristianos-predicacion.html> [Consulta: 26/12/2010, 22:53h]
- fig. 15 (annexos) – http://ast.wikipedia.org/wiki/Lleis_de_Kepler [Consulta: 26/12/2010, 23:03h]
- fig. 16 (annexos) – <http://www.batiburrillo.net/2010/11/19/descubierto-el-primer-planeta-extra-galactico.htm> [Consulta: 29/12/2010, 17:42h]
- fig. 17 (annexos) – http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_366.html [Consulta: 29/12/2010, 17:39h]
- fig. 18 (annexos) – <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/889405> [Consulta: 29/12/2010, 18:28h]
- fig. 19 (annexos) – http://www.nasa.gov/images/content/289899main_fomalhaut_actual_HI.jpg [Consulta: 25/12/2010, 21:05h]
- fig. 20 (annexos) – http://www.nasa.gov/images/content/289899main_fomalhaut_actual_HI.jpg [Consulta: 25/12/2010, 21:05h]
- fig. 21 (annexos) – <http://jumk.de/astronomie/exoplanets/sweeps-10.shtml> [Consulta: 29/12/2010, 18:33h]
- fig. 22 (annexos) – <http://solar-flux.forumandco.com/t304-confirmation-of-ct-cha-b> [Consulta: 29/12/2010, 17:26h]
- fig. 23 (annexos) – <http://apod.nasa.gov/apod/ap090923.html> [Consulta: 29/12/2010, 18:35h]
- fig. 24 (annexos) – <http://www.astro.cz/data/images/news/2009/09/09/6a00d8341bf67c53ef011168465b94970c-500wi.jpg> [Consulta: 29/12/2010, 16:06h]
- fig. 25 (annexos) – http://lh3.ggpht.com/_jmxWuUk80AE/S8s6CODPoOI/AAAAAAAAAEQ/s-WyfagZbsc/s1600-h/HD_80606b_Orbit_Comparation_%28PlanetQuest%29_es%5B6%5D.png [Consulta: 29/12/2010, 16:40h]
- fig. 26 (annexos) – <http://oklo.org/2006/04/> [Consulta: 29/12/2010, 17:54h]
- fig. 27 (annexos) – <http://www.astroyciencia.com/2009/04/23/descubrimiento-del-planeta-gliese-581-e/> [Consulta: 29/12/2010, 18:58h]
- fig. 28 (annexos) – http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gliese_581_-_2010.jpg [Consulta: 29/12/2010, 18:50h]
- fig. 29 (annexos) – http://es.wikipedia.org/wiki/Gliese_581#Selsis [Consulta: 30/12/2010, 16:20h]
- fig. 30 (annexos) – <http://www.circuloastronomico.cl/planetas/extrasol3.html> [Consulta: 30/12/2010, 16:20h]
- fig. 31 (annexos) – <http://www.iill.net/gliese-581-g> [Consulta: 30/12/2010, 16:28h]



- fig. 32 (annexos) - <<http://lasp.colorado.edu/~bagenal/1010/SESSIONS/11.Formation.html>>
; <<http://bloggers.diariodeavisos.com/imprescindiblesercurioso/?x=entry:entry100602-183710>> [Consulta: 30/12/2010, 20:57h]
- fig. 33 (annexos) - <http://tribes.tribe.net/astronomyastrophysics/photos/0ece5aa8-15ec-4d2b-8236-d17bf1fd53d8> [Consulta: 30/12/2010, 21:57h]
- fig. 34 (annexos) - http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 23/12/2010, 13:02h]
- fig. 35 (annexos) - http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 23/12/2010, 12:56h]
- fig. 36 (annexos) - http://www.mallorcaweb.net/exoplanetes/index_cat.htm [Consulta: 23/12/2010, 12:56h]
- fig. 37 (annexos) - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CCD.jpg> [Consulta: 2/01/2011, 2:42h]
- fig. 38 (annexos) - LAIA CASAQUIMELA, *La observació astronòmica* (presentació en Power Point), grup de joves de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell.



ANNEXOS



ÍNDEX

(Annexos)

- Annex I

1.1	92
1.2	93
1.3	94
1.4	94
1.5	95
1.6	95
1.7	96
1.8	97
1.9	98
1.10	99
1.11	99

- Annex II

2.1	100
2.2	101
2.3	107
2.4	107
2.5	108
2.6	109
2.7	109
2.8	110

- Annex III

3.1	118
3.2	120
3.3	121
3.4	126

- Annex IV

4.1	131
-----------	-----



ANNEX I

(L'Univers)

1.1 Vida de les estrelles i púlsars.

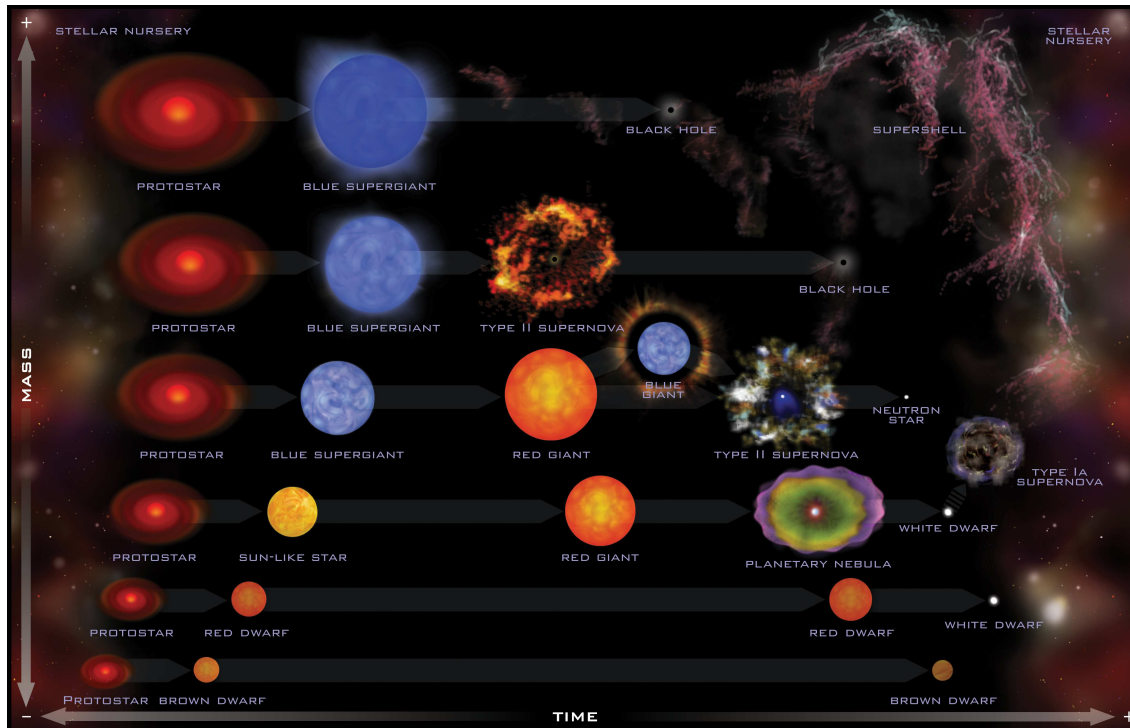


fig. 1: Gràfic representatiu de la vida de les estrelles al llarg del temps segons la seva massa.

En aquest diagrama es pot veure amb claredat com canvia la vida de les estrelles segons la seva massa inicial.

La protoestrella és la nebulosa inicial que, condensada, donarà lloc a l'estrella (d'aquí el nom de protoestrella). Segons la massa, l'estrella tindrà un final diferent; és en el quart cas (començant per baix) en el que l'estrella acabarà essent una estrella de neutrons ("Neutron star"), podent ser un púlsar. El púlsar emetrà els seus feixos lumínics de forma polsant, amb una periodicitat molt exacta i precisa. Seran objecte d'ús per al mètode del "cronometratge" a l'hora de detectar exoplanetes que els orbitin.

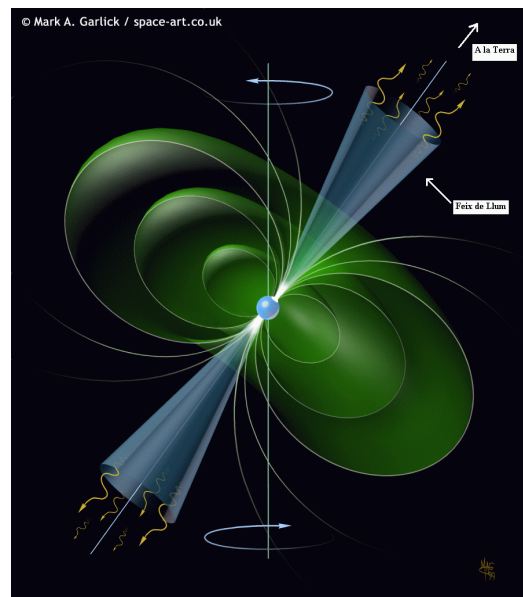


fig. 2: Representació artística d'un púlsar. Les corbes verdes representen el seu camp magnètic, entre que les bandes blaves els feixos lumínics. Un púlsar només es coneix com a tal quan una d'aquestes bandes es troba dirigida cap a la Terra, podent-la veure.



1.2 Classes espectrals de les estrelles.

Classe	Color i intensitat	Mida en relació al Sol.	Composició Química	Temperatura superficial (K ¹)
O	Blaves	Enormes i molt lluminoses.	Heli ionitzat i altres àtoms també ionitzats.	Entre 40.000 i 20.000K.
B	Blanc-blavoses	Gegants	Àtoms metàl·lics molt ionitzats i Hidrogen, poc Heli.	Entre 20.000 i 10.000K.
A	Blanques	Normals	Principalment Hidrogen i poc Calci ionitzat.	Entre 10.000 i 7.000K.
F	Blanc-groguenques	Normals	Hidrogen abundant, calci ionitzat i poc calci neutre.	Entre 7.000 i 6.000K.
G	Groques	Gegants, normals i nanes segons la temperatura.	Poc hidrogen i emergeixen els metalls neutres.	Entre 6.000K (nanes) i 4.800K (gegants).
K	Groc-ataronjades.	Gegants, normals i nanes segons la temperatura.	Màxim nivell de calci neutre i metalls, gens d'hidrogen.	Entre 4.800K (nanes) i 3.400K (gegants).
M	Roges	Gegants, normals i nanes segons la temperatura.	És abundant l'òxid de titani (TiO) i metalls neutres.	Entre 3.400K (nanes) i 2.000K (gegants)

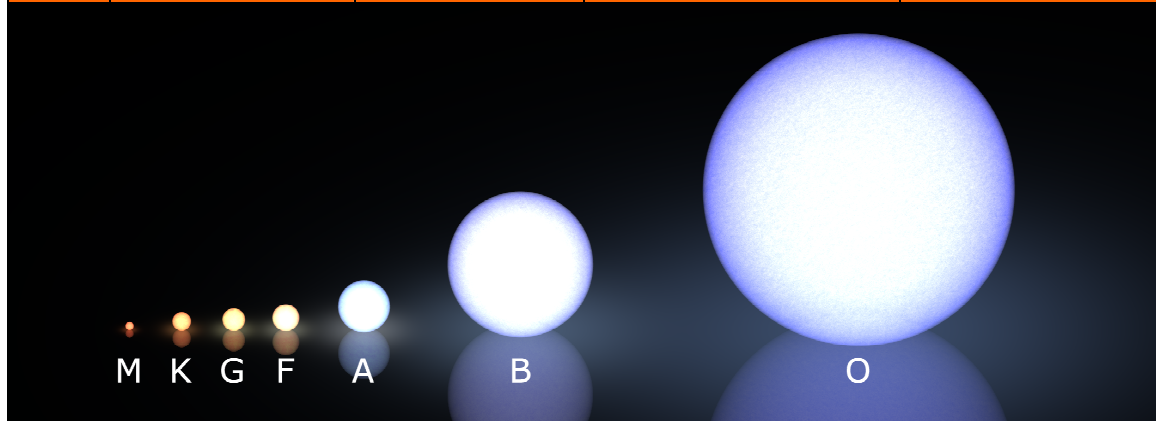


fig. 2: Principals classes espectrals de les estrelles amb algunes de les seves aproximades característiques. A sota, impressió artística de l'estrella tipus de cada classe espectral.

¹ La relació entre la temperatura en graus Kelvin (T/K) i la temperatura en graus Celius (t/°C) és: $T/K = t/^{\circ}C + 273$



1.3 Diagrama “Hertzsprung-Russell” (H-R).

Aquest diagrama va ser desenvolupat per Ejnar Hertzsprung i Henry Norris Russell el 1905. Principalment relaciona la temperatura de les estrelles amb la seva lluminositat. Més tard, es va descobrir que aquest diagrama també es pot utilitzar per relacionar la lluminositat d'una estrella amb la seva mida (el seu radi).

Juntament amb les classes espectrals, ens serveix per determinar la majoria de característiques d'una estrella tan sols analitzant la seva llum.

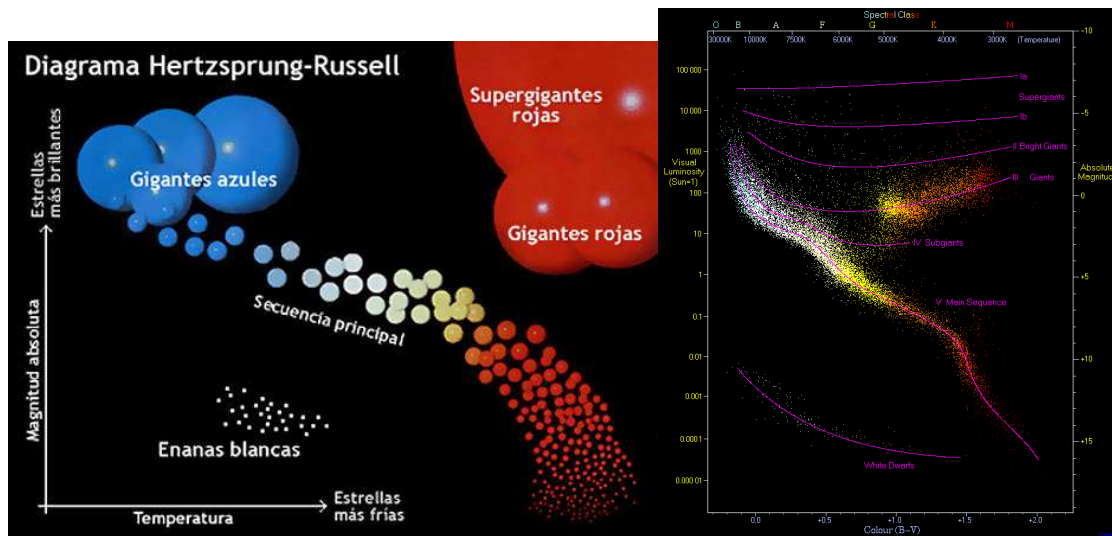


fig. 3: Diagrama Hertzsprung-Russell simplificat (esquerra) i desenvolupat (dreta). Cal remarcar la seqüència principal de la vida de les estrelles, indicada al centre del diagrama de l'esquerra. Aquí és on es troba el Sol.

1.4 Magnituds.

El valor de la magnitud dels astres que veiem al cel augmenta a mesura que l'astre es menys brillant, i disminueix a mesura que brilla més, arribant a valors negatius per als astres que tenen una brillantor molt gran (com la Lluna plena o el Sol).

El límit visible per a la vista humana és la magnitud 6, però aquesta augmenta per als telescopis, sobretot per als espacials.

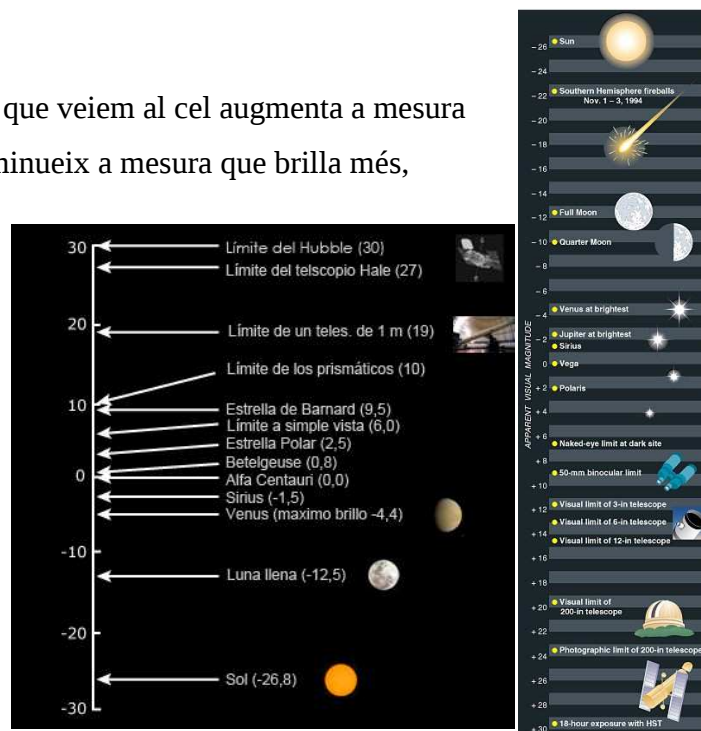


fig. 4: Escales de magnituds per a diversos astres del cel.



1.5 Estrelles binàries.

Dues estrelles poden estar juntes a l'espai, orbitant-se una a l'altra com la Terra i la Lluna.

Ara bé, aquestes òrbites poden ser de diferents tipus segons la massa de cada un dels components del sistema binari.

A les figures 5, 6 i 7 es veuen representades molt gràficament els tres tipus d'òrbites més freqüents en estrelles binàries.

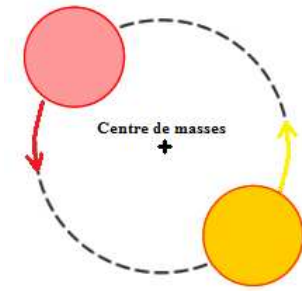


fig. 5: Òrbita de dues estrelles binàries de massa semblant entorn a un centre de masses comú.

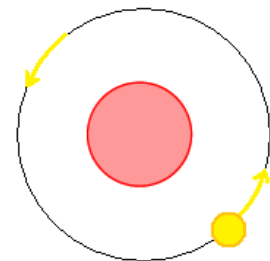


fig. 6: Una estrella orbita l'altra. En aquest cas hi ha molta diferència de masses.

Aquestes òrbites són un punt a tenir en compte alhora de suposar si hi ha exoplanetes en aquests sistemes binaris o no, doncs les estrelles, en posseir una massa elevada, causen moltes perturbacions gravitatòries que fan difícil la formació de planetes o que aquests tinguin una òrbita estable. El més habitual és que els planetes existents en aquests sistemes orbitin les dues estrelles binàries. No obstant, també és possible que l'exoplaneta orbiti una de les dues estrelles mentre l'altra gira entorn el sistema en una òrbita allunyada, de manera que no afecti massa al planeta (fig. 8).

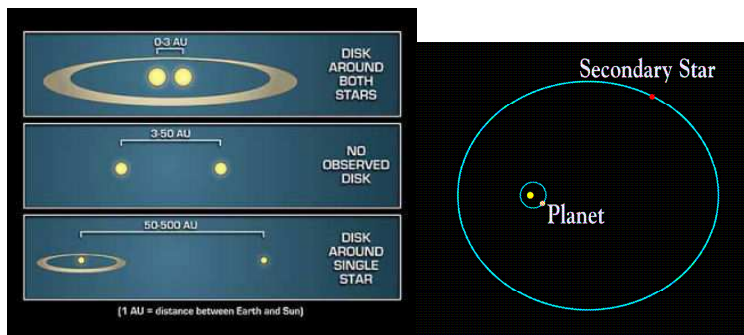


fig. 8: Casos en què es pot formar un disc protoplanetari (franja marró) en un sistema binari i possible òrbita d'un exoplaneta en un sistema binari (dreta).

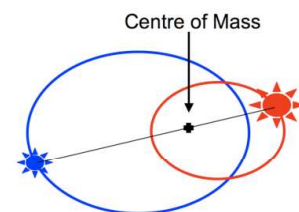


fig. 7: Dues estrelles amb poca diferència de massa orbiten un centre de masses comú seguint òrbites el·líptiques.

1.6 Fotografies de discs protoplanetaris.

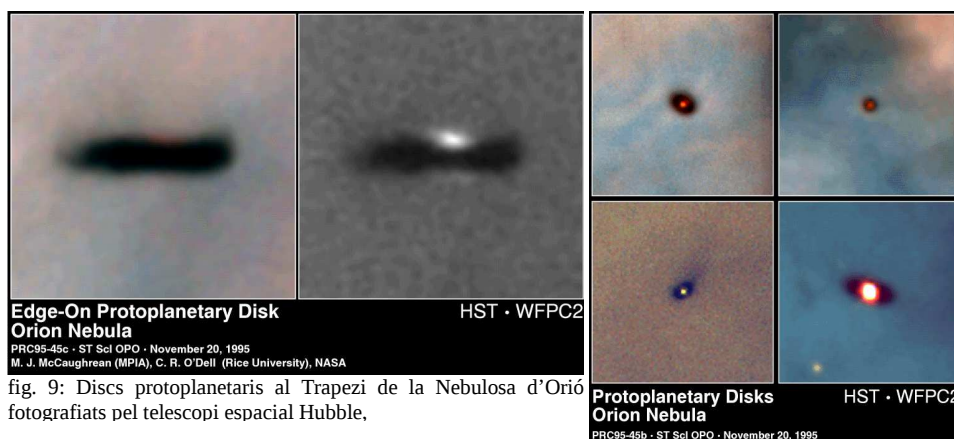


fig. 9: Discs protoplanetaris al Trapezi de la Nebulosa d'Oríó fotografiats pel telescopi espacial Hubble,

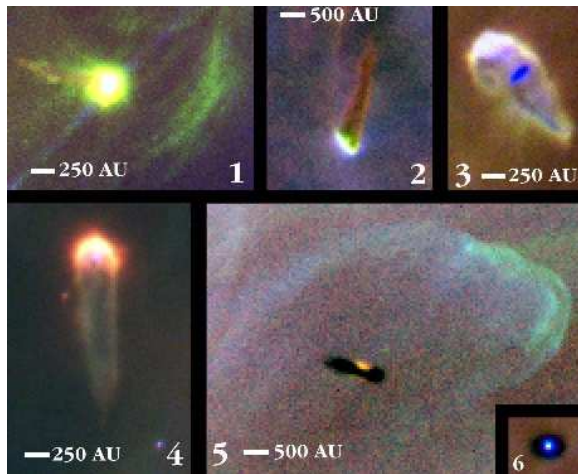


fig. 10: Altres discs protoplanetaris també del Trapezi de la Nebulosa d'Orió. Es pot apreciar com els quatre primers estan deformats a causa d'estar-se evaporant per la influència d'estrelles més grans properes.

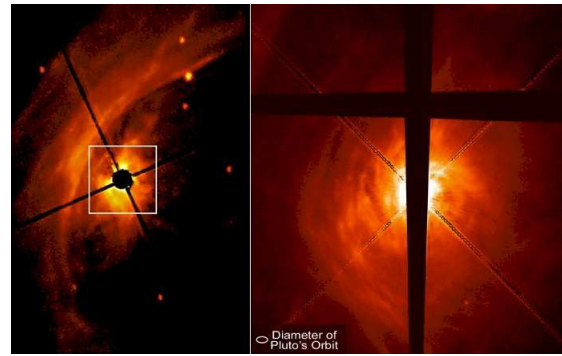


fig. 11: Discs protoplanetaris rodejant l'estrella "AB Aurigae" fotografiats en rang visible pel Hubble. Fets amb l'ajut d'un coronògraf (creu fosca central) per bloquejar la llum de l'estrella.

1.7 Cinturó de Kuiper.

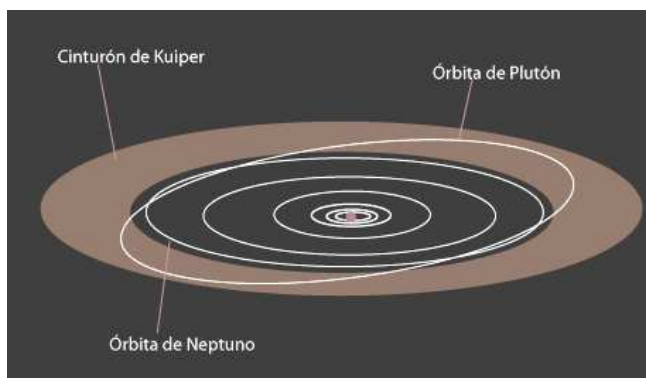


fig. 12: Representació de la regió del Sistema Solar on presumptament es troba el cinturó de Kuiper (franja clara).

Als anys seixanta, Gerard Kuiper, astrònom holandès, va preveure l'existència d'una regió exterior del Sistema Solar on suposadament es trobaven milers de petits cossos orbitant el Sol. Trenta anys després es va confirmar la seva existència observacionalment.

El cinturó de Kuiper es troba en la zona



fig. 13: Dimensions de diversos cossos descoberts en el cinturó de Kuiper comparades amb la Terra (a sota). Cal destacar la mida superior d'Eris respecte a la de Plutó.

compresa entre les 30 i les 100 UA del Sol. Els cossos que s'hi han descobert fins ara posseeixen entre 100 i 1000 km de diàmetre.

Plutó pertany a aquest cinturó, al igual que molts altres cossos trobats recentment de dimensions semblants (fig. 13).



1.8 Lleis de Kepler.

Johannes Kepler va néixer a Alemanya el 1571. Astrònom i matemàtic, va viure en un temps en que no hi havia diferència entre astronomia i astrologia. Va buscar durant tota la vida un model geomètric que expliqués amb precisió l'estructura del Sistema Solar, però mai va aconseguir que li quadressin les observacions amb la seva teoria. Obsessionat en que els planetes havien de tenir òrbites circulars (per ser la forma perfecta), finalment va haver de rebutjar el cercle perquè no la teoria no encaixava amb les observacions de Tycho Brahe (astrònom contemporani).



fig. 14: Retrat de Johannes Kepler.

Aleshores, va pensar: "Si els planetes són llocs imperfectes, perquè no deuen ser-ho les òrbites de les mateixes?". Va abandonar el cercle, símbol de la perfecció, i va introduir l'el·lipse en la seva teoria; les observacions encaixaven perfectament amb els seus models. Aquesta idea va revolucionar el futur de l'astronomia dràsticament, trobant un model matemàtic que explicava el moviment dels astres.

D'aquí van sorgir les tres lleis de Kepler:

• **1ª Llei:** *Els planetes descriuen òrbites el·líptiques entorn el Sol, on aquest ocupa un dels focus de l'el·lipse.*

• **2ª Llei:** *El vector que uneix el Sol amb un planeta "escombra" àrees iguals en temps iguals.*

En conseqüència, el planeta es mou més ràpidament quan s'aproxima al Sol i més lentament quan la seva òrbita el porta lluny d'ell.

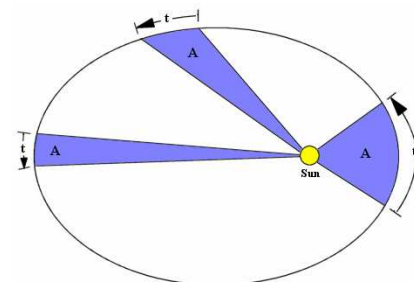


fig. 15: Representació de les dues primeres lleis de Kepler. "A" és l'àrea que escombra el vector que uneix el Sol i el planeta, i "t" el temps transcorregut en el seu moviment.

• **3ª Llei:** Publicada més tard que les dues anteriors, relaciona matemàticament el tamany de la òrbita d'un planeta i la velocitat mitjana a la que aquest viatja al voltant del Sol. Aquesta llei confirmava la vella creença de Kepler d'una força en el Sol que dirigeix els planetes, la qual seria major per als planetes interiors que pels exteriors. Matemàticament, Kepler va trobar que **el quadrat del període d'un planeta és proporcional al cub del semieix major de la seva òrbita.**



Més tard, Newton va descobrir que aquesta força era la gravetat. Si s'introdueix la gravetat a la tercera llei de Kepler ens resulta l'equació següent:

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{ct.}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_s} \cdot a^3$$

on “ T ” és el període del planeta, “ G ” la constant de gravitació universal ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$), “ M_s ” la massa del Sol i “ a ” el semieix major de la òrbita.

En conseqüència, quan més lluny estigui un planeta de la seva estrella més trigarà a donar-hi tota una volta (un període major), i quan més proper va la volta serà més ràpida, això és el que passa amb els Júpiter calents (pàg. 56 del treball de recerca).

1.9 Dades dels planetes del Sistema Solar.

		<u>Mercuri</u>	<u>Venus</u>	<u>Terra</u>	<u>Mart</u>	<u>Júpiter</u>	<u>Saturn</u>	<u>Urà</u>	<u>Neptú</u>
Distància mitja al Sol	km	57.909.175	108.208.930	149.597.870	227.936.640	778.412.010	1.426.725.400	2.870.972.200	4.498.252.900
	UA	0,3871	0,7233	1	1,5236	5,2033	9,5371	19,1912	30,0689
Radi mig	km	2.439,64	6.051,59	6.378,15	3.397,00	71.492,68	60.267,14	25.557,25	24.766,36
	R _T	0,3825	0,9488	1	0,532	11,209	9,449	4,007	3,883
Massa	kg	$3,302 \times 10^{23}$	$4,8690 \times 10^{24}$	$5,9742 \times 10^{24}$	$6,4191 \times 10^{23}$	$1,8987 \times 10^{27}$	$5,6851 \times 10^{26}$	$8,6849 \times 10^{25}$	$1,0244 \times 10^{26}$
	M _T	0,055	0,815	1	0,107	318	95	14	17
Densitat	g/cm ³	5,43	5,24	5,515	3,940	1,33	0,697	1,29	1,76
Gravetat eqüatorial	m/s ²	3,70	8,87	9,81	3,71	23,12	8,96	8,69	11,00
Període de rotació	dies	58,646225	-243,0187	0,99726968	1,02595675	0,41354	0,44401	-0,71833	0,67125
Període orbital	anys	0,2408	0,6151	1	1,8808	11,8626	29,447	84,0168	164,7913
Velocitat orbital mitjana	km/s	47,8725	35,0214	29,7859	24,1309	13,0697	9,6724	6,8352	5,4778
Excentricitat		0,2056	0,0067	0,0167	0,0934	0,0483	0,0541	0,0471	0,0086
Inclinació	G	7,00487	3,39471	0,00005	1,85061	1,30530	2,48446	0,76986	1,76917
Inclinació axial	G	0,0	177,3	23,45	25,19	3,12	26,73	97,86	29,58
Temperatura mitja en superfície	C	166,85	456,85	14,85 / 19,85	-87,15 / -5,15	-121,15	-139,15	-197,15	-220,15
Composició de l'atmosfera.		He Na ⁺ P ⁺	CO ₂ N ₂	N ₂ O ₂	CO ₂ N ₂ Ar	H ₂ He	H ₂ He	H ₂ He CH ₄	H ₂ He CH ₄
Nombre de llunes conegudes		0	0	1	2	63	60	27	13
Anells		No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí

Les unitats de temps negatives són degudes a òrbites retrògrades dels planetes.



1.10 Unitats astronòmiques.

Tot seguit s'adjunta una taula que relaciona les principals unitats de mesura de longitud astronòmiques que surten en el treball:

Unitat	<u>Parsec (pc)</u>	<u>Any llum</u>	<u>UA</u>	<u>Metre</u>
<u>Parsec (pc)</u>	1	3,26	206.265	$3,09 \cdot 10^{16}$
<u>Any llum</u>	0,307	1	63.241	$9,46 \cdot 10^{15}$
<u>UA</u>	$4,85 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	1	$1,50 \cdot 10^{11}$
<u>Metre</u>	$3,24 \cdot 10^{-17}$	$1,06 \cdot 10^{-16}$	$6,68 \cdot 10^{-12}$	1

I les unitats de massa:

- M. Terrestre (M_T) = $6 \cdot 10^{24}$ kg
- M. Jupiteriana (M_J) = $2 \cdot 10^{27}$ kg
- M. Solar (M_S) = $2 \cdot 10^{30}$ kg

1.11 Presència de discs protoplanetaris en estrelles pròximes.

	<i>Tipus espectral</i>	<i>Massa (M_S)</i>	<i>Edat (M.a.)</i>	<i>Lluminositat (L_S)</i>	<i>Distància (pc)</i>	<i>Ocupat pel disc (UA)</i>
<i>Fomalhaut</i>	A3	2,3	200	18	7,7	130-160
<i>Vega</i>	A0	2,2	455	37	7,8	86-200
<i>Denebola</i>	A3	2,3	50	17	11	20-100
<i>Iota Centauri</i>	A2	2,5	350	26	18	6-100
<i>Beta Pictoris</i>	A5	2,0	12	13	19	6-800
<i>Zeta Leporis</i>	A2	2,0	230	15	22	2-4, 4-8
<i>Gamma Ophiuchi</i>	A0	2,3	180	31	29	13-520
<i>HR 8799</i>	A5	1,5	60	5	39	75-170



ANNEX II

(Planetes extrasolars)

2.1 Fragment de “Sobre el infinito Universo y los Mundos” de Giordano

Bruno.

[...]

ELPINO– Existen, pues, innumerables soles; existen infinitas tierras que giran igualmente en torno a dichos soles, del mismo modo que vemos a estos siete (planetas) girar en torno a este sol que está cerca de nosotros.

FILOTEO– Así es.

ELPINO– ¿Cómo es, entonces, que en torno a esas luminarias, que serían los soles, no vemos girar esas otras luminarias, que serían las tierras, sino que, fuera de aquellos, no podemos captar movimiento alguno, y todos los demás cuerpos celestes (con excepción de aquellos que se llaman cometas) se ven siempre en la misma situación y distancia?

FILOTEO– La razón es porque nosotros vemos los soles, que son los más grandes, más aún, los máximos cuerpos, pero no vemos las tierras, las cuales, por el hecho de ser cuerpos mucho más pequeños, son invisibles; como tampoco es absurdo que existan todavía otras tierras que dan vuelta alrededor de este sol y no son visibles para nosotros, ya sea por su mayor distancia o por su menor tamaño o por no tener mucha superficie acuática o aun por no tener vuelta hacia nosotros y opuesta al sol dicha superficie, con la cual, como un espejo cristalino que recibe los rayos luminosos, se tornaría visible.

[...]

ELPINO– ¿Afirmáis, por tanto, que si los astros que están más allá de Saturno son verdaderamente inmóviles, como aparecen, vienen a ser innumerables soles o fuegos, más o menos visibles para nosotros, en torno a los cuales giran las tierras cercanas a ellos que nosotros no vemos?

FILOTEO– Eso habría que decir, teniendo en cuenta que todas las tierras son dignas de regirse por la misma norma y todos los soles también.

ELPINO– ¿Pretendéis con eso que todos aquellos sean soles?

FILOTEO– No, porque no sé si todos ellos o la mayor parte son inmóviles o si algunos giran en torno a los otros, porque no hay quien los haya observado, y además no resulta fácil hacerlo, así como no se nota fácilmente el movimiento y progreso de una cosa lejana, la cual, al cabo de mucho tiempo, no se ve con facilidad que ha cambiado de lugar, como sucede al observar las naves situadas en alta mar.

Pero, sea como se quiera, siendo el universo infinito, es preciso al fin que existan varios soles, porque es imposible que el calor y la luz de uno solo pueda difundirse por la inmensidad, como pudo imaginar Epicuro, si es verdad lo que otros refieren. Por tanto, se requiere también que haya otros innumerables soles, muchos de los cuales son visibles para nosotros bajo la forma de un pequeño cuerpo. Y así parecerá menor el astro que es mucho mayor que el que parece ser el más grande de todos.

ELPINO– Todo esto debe ser tenido, por lo menos, como posible y razonable.

FILOTEO– En torno a aquellos pueden girar tierras de mayor y de menor volumen que ésta.

[...]

BURQUIO– Llegad, pues, rápido a la conclusión.

FRACASTORIO– [...] De manera que no hay un solo mundo, una sola tierra, un solo sol, sino tantos mundos cuantas lámparas brillantes vemos en torno a nosotros, las cuales están en un único cielo, lugar y ambiente, tanto como este mundo, en el cual nos hallamos nosotros, está en un único ambiente, lugar y cielo. De modo que el cielo, el aire infinito e inmenso, aunque sea parte del universo infinito, no es, sin embargo, un mundo ni una parte de los mundos sino seno, receptáculo y campo en que aquellos están, se mueven, viven, se nutren y llevan a cabo sus transformaciones, producen, alimentan, vuelven a alimentar y mantienen a sus habitantes y



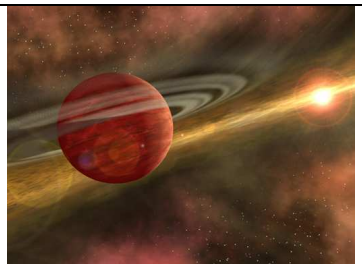
animales, y con ciertas disposiciones y órdenes sirven de ministros de la naturaleza superior, cambiando el rostro de un solo ente en innumerables sujetos. De modo que cada uno de estos mundos es un medio hacia el cual todas sus partes concurren y donde se reúnen todas las cosas semejantes [...]

BURQUIO— ¿Así, pues, los otros mundos están habitados como éste?

FRACASTORIO— Si no así y de mejor modo, por lo menos igualmente, porque es imposible que un espíritu racional y un tanto despierto pueda imaginar que carezcan de parecidos y mejores habitantes innumerables mundos que se revelan tan magníficos o más que éste, los cuales o son soles o no reciben menos que el sol los divinísimos y fecundos rayos que tanto nos revelan la felicidad de su propio sujeto y fuente como hacen, dichosos a los circunstantes que participan de tal fuerza difundida. Son, pues, infinitos los innumerables y principales miembros del universo, que tienen igual rostro, aspecto, prerrogativas, fuerzas y efectos. [...]"

Giordano Bruno,
Sobre el infinito Universo y los Mundos (traducció d'Àngel J. Cappelletti):
Diàleg tercer, p. 58-69

2.2 Rècords i casos excepcionals.

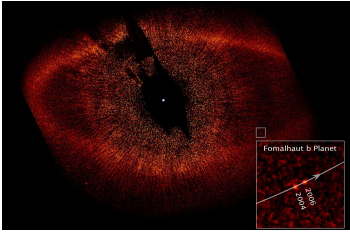
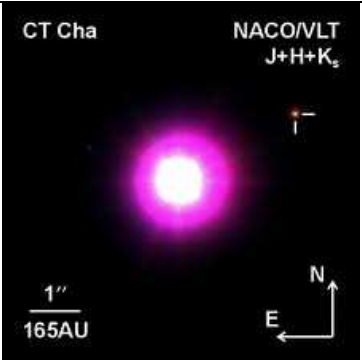
 fig. 16: Representació artística de "HIP 13044".	El passat 18 de novembre del 2010, un grup d'astrònoms del "Max-Planck-Institut für Astronomie" (MPIA), a Alemanya, va confirmar que l'origen extragalàctic de l'exoplaneta "HIP 13044b", o sigui, provinent d'una altra galàxia que no és la Via Làctia. Suposadament, la seva estrella "HIP 13044" provenia d'una galàxia nana satèl·lit a la Via Làctia, la qual va ser engolida per la nostra galàxia. Segons les hipòtesis, és molt probable que el planeta es formés a l'altra galàxia satèl·lit, incorporant-se a la nostra fa uns 6 - 9 mil milions d'anys. L'exoplaneta té un període de 16,2 dies, una massa mínima d'1,25 M_J i un semieix major de 0,116 UA.
 fig. 17: Representació artística de l'exoplaneta present en el disc d'acreció de l'estrella "Coku Tau 4".	L'exoplaneta més jove descobert fins avui va ser trobat el 2004 pel telescopi Spitzer de la NASA. Les observacions en infraroig van trobar un enorme forat en el disc protoplanetari que rodeja l'estrella "Coku Tau 4", a 420 a.l. de distància. El forat, suposadament produït per la presència d'un



	exoplaneta, té 10 vegades la mida de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol. A l'estrella se li ha determinat una edat d'1 milió d'anys, per tant, l'exoplaneta ha de tenir, com a màxim, aquesta edat².
 fig. 18: Representació artística de l'exoplaneta Matusalén orbitant el seu sistema binari.	<u>L'exoplaneta més vell</u> orbita el sistema binari "PSR B1620-26" format per un púlsar i un nan blanc. Posseeix 2,5 M_J, un període d'uns 100 anys i un semieix major semblant al d'Urà. La seva situació també el converteix en l'exoplaneta més llunyà descobert, ja que es troba al nucli del cúmul globular M4, a 7.200 a.l. de distància. A partir d'estudis del nan blanc i el púlsar, se li ha determinat una edat de 12.700 milions d'anys². Això significa que es va formar quan l'Univers tenia tan sols 1000 milions d'anys d'edat. S'especula que l'exoplaneta es va formar en una estrella com el Sol, i aquest sistema planetari va ser capturat per la gravetat d'un púlsar formant un sistema binari estrella-púlsar. Quan l'estrella es va convertir en gegant vermell i, posteriorment, en nan blanc, van formar el sistema que veiem avui, amb l'exoplaneta orbitant-lo. Es conegut amb el nom de "Matusalèn".

² Cal tenir en compte que la Terra té 4.500 milions d'anys d'edat.



 fig. 19: Representació artística de “Formalhaut b”.  Fig. 20: Imatge del Hubble del disc d'acreció de l'estrella “Formalhaut”, on es pot veure el seu planeta.	L'exoplaneta amb més període és “Formalhaut b”, el primer planeta extrasolar fotografiat en rang visible. Trobat en el disc protoplanetari de l'estrella “Formalhaut”, a 25 a.l. de distància, té el període més llarg conegut per un planeta de 872 anys³. La seva massa oscil·la entre 0,5 i 3 M_J, la seva mida és semblant a la de Júpiter i el seu semieix major orbital és de 115 UA.
 fig. 21: Representació artística de “SWEEPS-10” en òrbita.	L'exoplaneta amb menys període és “SWEEPS-10”, donant una volta a la seva estrella, “SWEEPS J175902.00–291323.7”, cada 10 hores. La causa d'aquest període tan baix és fonamentalment deguda a la poca distància que el separa de la seva estrella; 1,2 milions de quilòmetres (0,008 UA), tan sols tres vegades la distància de la Terra a la Lluna. A aquesta distància, necessita una massa (1,6 M_J) ben compacta per a no ser esmicolat per la força de la gravetat de l'estrella.
 fig. 22: Imatge real de l'estrella “CT Cha” amb l'exoplaneta a dalt a la dreta.	L'exoplaneta més gran és “CT Cha b”, amb 2,2 R_J, equivalent a 5.403 Terres essent el major descobert fins ara. La seva massa és de 17 M_J i orbita l'estrella jove denominada “CT Cha” (de “CT Chamaeleontis”), a la constel·lació del Camaleó i a aproximadament 500 a.l. de distància. El seu semieix major és de 440 UA i s'especula la seva naturalesa de nan marró.

³ El període de Neptú és de 164 anys.

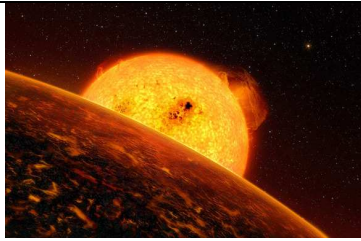


fig. 23: Representació artística de Corot-7b.



fig. 24: Impressió artística de la mida de Corot-7b respecte la Terra i la Luna.

El títol d'**exoplaneta més petit** actualment se l'estan disputant l'exoplaneta "CoRoT-7b" amb $0,15 R_J$ (i $0,0151 M_J$) i el recent i controvertit exoplaneta "Kepler-9 d" amb $0,147 R_J$ (i $0,022 M_J$ ⁴). El fet que hi hagin diverses versions sobre el radi de "Corot-7b" i que les dades de l'exoplaneta "Kepler-9b" per ara no estiguin del tot confirmades fan que no s'acabi de decidir quin dels dos és més petit. Tot i això la diferència no és gaire important, i els dos tenen una massa similar a la terrestre, amb $1,68 R_T$ i $1,64 R_T$ respectivament, classificant-se com a "Super-Terres".



fig. 25: Gràfic on es mostra l'òrbita de "HD 80606 b" comparada amb les òrbites de la Terra, Venus i Mercuri al voltant del Sol.

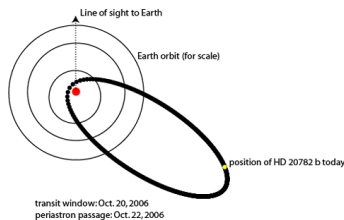


fig. 26: Gràfic de comparació de l'òrbita de "HD 20782 b" amb la de la Terra.

Novament, els recents descobriments fan que el títol d'**exoplaneta amb més excentricitat** estigui discutit entre els exoplanetes "HD 80606 b" i "HD 20782 b", amb excentricitats de 0,93 i 0,97 respectivament⁵. Amb tot, les temperatures a ambdues superfícies varien més de 1000°C des del punt més allunyat de la seva estrella fins el més proper.

⁴ No confirmada.

⁵ Dades extretes de l'Enciclopèdia dels exoplanetes (<http://exoplanet.eu/>), tot i que hi ha fonts que divergeixen sobre l'excentricitat de l'exoplaneta "HD 20782 b", donant-li un valor de 0,92.



fig. 27: Representació artística del sistema planetari, amb “Gliese 581 e” en primer terme.

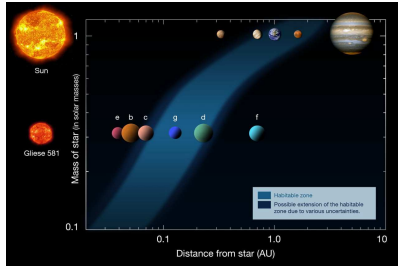


fig. 28: Comparació del sistema “Gliese 581” amb el Sistema Solar.

El curiós sistema “Gliese 581”:

A 20,5 a.l., l'estrella “Gliese 581” (també denominada “Wolf 562” o “HIP 74995”, i abreviat “GJ 581”) és un nan roig del tipus M3 al que se li han trobat ni més ni menys que sis exoplanetes, essent el segon sistema amb més planetes després de “HD 10180”, amb set. D'aquests sis exoplanetes (dels quals dos no estan confirmats), un és el menys massiu trobat fins ara (e) i tres altres tenen possibilitats d'allotjar vida (d, c i g), convertint-se en els primers descoberts amb aquesta capacitat.

<u>om</u>	<i>Massa</i> (M_T)	<i>Semieix major</i> (UA)	<i>Període orbital</i> (dies)	<i>Excentricitat</i>	<i>Any del</i> <i>Descobriment</i>
<u>e</u>	≥ 1.7	0,03	3,14942 (± 0.00045)	0	2009
<u>b</u>	$\geq 15,65$	0,041	5,36874 (± 0.00019)	0	2005
<u>c</u>	≥ 5.6	0,07	12,9292 (± 0.0047)	0,17 (± 0.07)	2007
<u>g</u>	≥ 3.1	0,14601 (± 0.00014)	36,652 (± 0.052)	-	2010
<u>d</u>	≥ 5.6	0,22	66,8 (± 0.14)	0,38 (± 0.09)	2007
<u>f</u>	≥ 7.0	0,758 (± 0.015)	433 (± 13)	-	2010

- “Gliese 581 e”: Té el títol d'exoplaneta menys massiu descobert fins ara, amb una massa mínima d'1,7 M_T i unes dimensions semblants a les de la Terra. Tot i això, la proximitat a la seva estrella (0,03 UA) i el fet d'estar fora de la zona habitable de “Gliese 581” fan que disminueixin les seves probabilitats d'allotjar vida, doncs la temperatura de la seva superfície deu superar els 100°C dificultant així l'existència d'atmosfera i la presència d'aigua líquida.



- **“Gliese 581 g”**: El seu descobriment, el 29 de setembre del 2010 per l'instrument HIRES de l'observatori Keck, va significar un

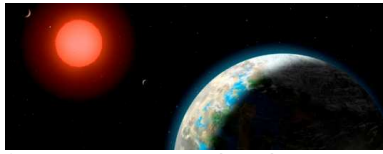


fig. 30: Representació artística de la superfície de “Gliese 581g”.

impacte mundial en tractar-se del primer exoplaneta trobat al bell mig de la zona habitable d'una estrella, entre els altres exoplanetes “Gl 581d” i “Gl 581c”, el descobriment dels quals també va tenir ressò. Fins avui, és l'exoplaneta descobert amb més potencial habitable, doncs la seva massa d'entre 3,1 i 4,3 M_T li permet mantenir una superfície rocosa amb una atmosfera i la seva temperatura de -31 a -12°C fan

que hi pugui haver aigua líquida a la superfície (considerant la pressió atmosfèrica major que la terrestre). En aquests aspectes és el més semblant a la Terra que s'ha detectat.

Tot i això, no totes les seves condicions són ideals; el seu període de quasi 37 dies i la proximitat a la seva estrella fan possible que el planeta tingui una òrbita sincrònica, o sigui, que mostri sempre la mateixa cara a la seva estrella (com passa amb la Lluna).

Això provocaria que mig planeta estigués molt calent i l'altre molt fred, essent la regió entre les dues la part més habitable. A més, cal remarcar que la seva estrella no és com el Sol, sinó un nan roig que emet la majoria de la seva llum en rang vermell-infraroig, que són radiacions més dèbils que les de rang visible que emet el nostre Sol. Aquests dos aspectes fan que la possible vida a “Gliese 581g” no sigui com la terrestre.

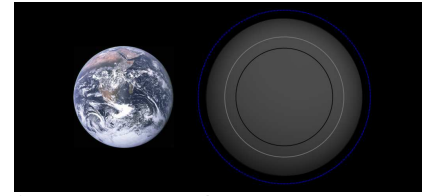


fig. 29: Representació de “Gl 581 e” comparat amb la Terra.

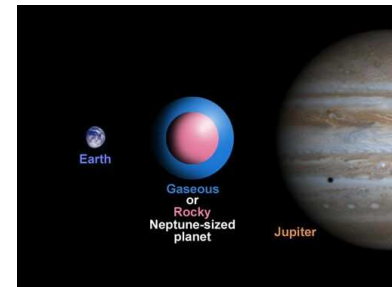


fig. 31: Comparació de la possible mida de “Gl 581 g” amb la Terra i Júpiter. La seva part blava és la mida màxima que se li calcula i amb la qual seria gasós, amb la rosa seria rocós.



2.3 Comparació de diversos sistemes extrasolars amb el Sistema Solar.

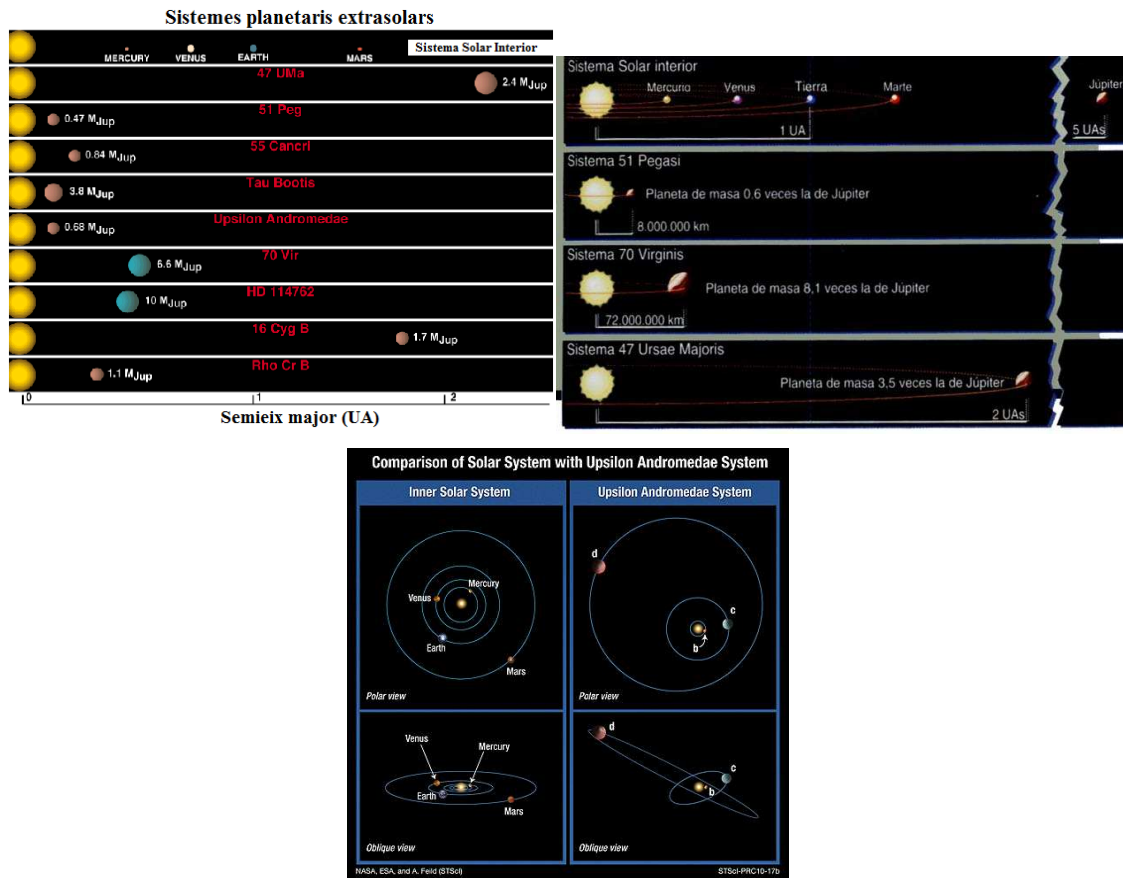


fig. 32: Comparació entre diversos sistemes planetaris extrasolars i el Sistema Solar interior. Cal remarcar l'abundància d'exoplanetes descoberts propers a l'estrella, en ser els més fàcils de detectar, fent que gran part dels nous sistemes extrasolars tinguin els seus planetes no més lluny de la seva estrella que l'òrbita de la Terra.

2.4 Simulador de gravetat.

A la següent adreça web es pot trobar un simulador de gravetat que ens permet construir el nostre propi sistema planetari de forma senzilla, però mostrant de manera dinàmica el suposat comportament que tindrien els planetes dins de sistemes planetaris diferents al Sistema Solar, amb la presència d'exoplanetes més grans, amb dues estrelles, etc.

<<http://www.alienearths.org/online/starandplanetformation/planetfamilies.php>>



2.5 Nombre d'exoplanetes descoberts per part de diferents projectes⁶:

Localització	Observatori	Instrument	Nº d'exoplanetes detectats
Xile	La Silla	Coralie	32
		CES	2
		FEROS	1
		HARPS	1
	LCO	CCD Camera	2 (trànsits), 1 (microlents)
		MIKE	1 (confirmació del descobriment per microlents)
	Paranal	FLAMES-UVES	2 (confirmació del descobriment per microlents)
		VLT	
Hawaii	Keck	HIRES	26
Califòrnia	Lick	Hamilton	21
	Palomar	Sleuth	
	Wilson	AFOE	
Austràlia	AAO	UCLES	13
	MSO	MACHO	9 (trànsits)
França	OHP	Elodie	12
Arizona	Whipple	AFOE	5 (AFOE traslladat al "Mt. Wilson observatory Fall" el 2004)
Texas	McDonald	Coude	3
		HRS	1
Espanya	ORM	SARG	1
Japó	AOO	HIDES	1
Colorado	NCAR	STARE	1 (trànsits)
Illes Canàries	ORM	SuperWASP	(trànsits)
Antàrtida	AASSTO	Vulcan	(trànsits)
Espai	HST	STIS	1 (oxigen i carboni a l'atmosfera)
	MOST		
	COROT		(llançat el 2005)
	TPF		(llançat el 2005)

Font: <http://www.matessa.org/~mike/planets.html>

⁶ La taula no està del tot completa pel que fa a projectes ni al nombre d'exoplanetes a causa que no està actualitzada als últims descobriments i nous projectes.



2.6 Dimensions dels exoplanetes segons la seva composició.

Partint de models teòrics, es pot arribar a especular sobre la mida que tindrà un exoplaneta tan sols sabent la seva composició. A continuació es mostra un senzill gràfic amb les mides que tindrien exoplanetes formats pels elements indicats a sota de les seves figures. La figura groga de darrere pretén representar el Sol a escala.

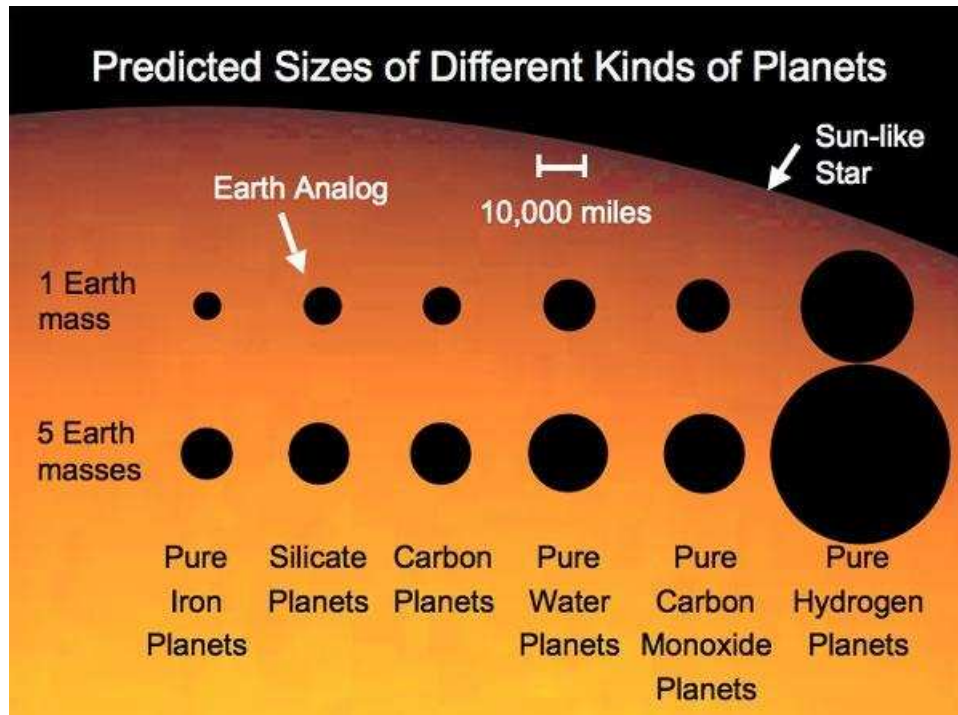


fig. 33

2.7 Gràfics dels tipus d'exoplanetes descoberts:

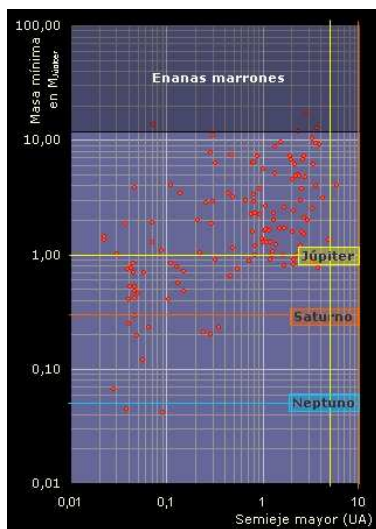


fig. 34: Situació i massa d'algunes de les nanes marrons descobertes en comparació als principals planetes jovians segons la seva massa mínima i distància a l'estrella (semieix major).

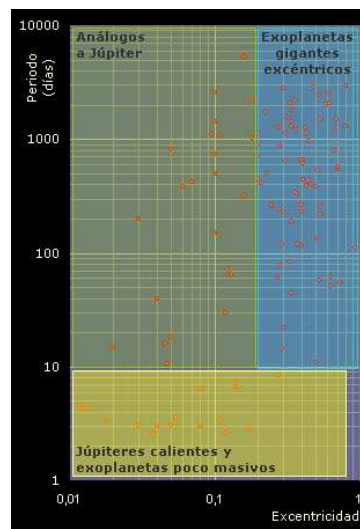


fig. 35: Classificació dels exoplanetes jupiterians, Júpiteres calents i posseïdors d'òrbites excèntriques segons el seu període i excentricitat.

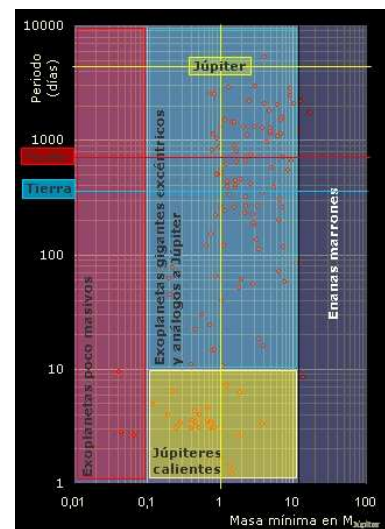


fig.36: Classificació de la majoria dels tipus d'exoplanetes descoberts en comparació amb Júpiter, Mart i la Terra, segons el seu període i massa mínima.

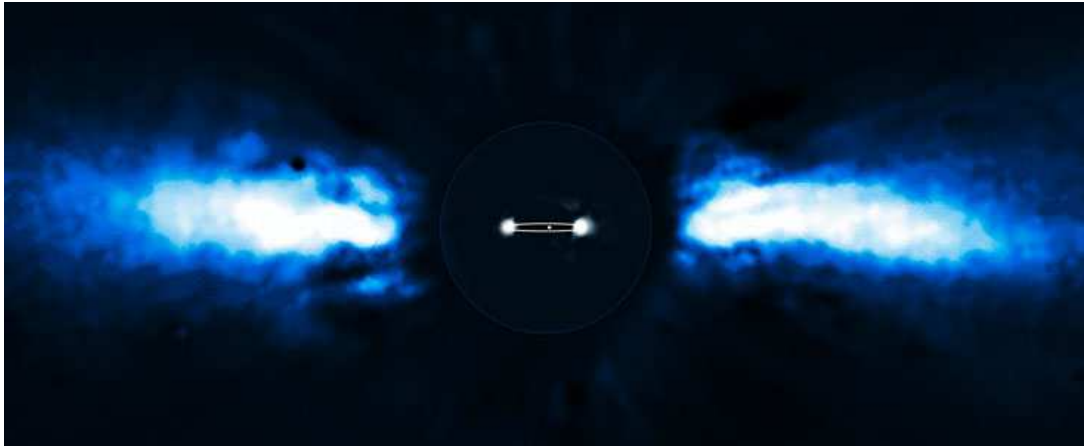


2.8 Articles i notícies d'interès.

eso1024es — Comunicado científico

Exoplaneta capturado en plena marcha

10 junio 2010



Por primera vez, los astrónomos han sido capaces de seguir directamente el movimiento de un exoplaneta desplazándose desde un lugar a otro de su estrella anfitriona. El planeta posee la órbita más corta conocida hasta ahora de exoplanetas fotografiados directamente, con una distancia a su estrella similar a la que existe entre Saturno y el Sol. Los científicos creen que se puede haber formado de manera similar a los planetas gigantes del Sistema Solar. Debido a que la estrella es muy joven, el descubrimiento prueba que los planetas gaseosos pueden formarse al interior de discos en sólo unos pocos millones de años, un breve tiempo en términos cósmicos.

Con una edad de tan sólo 12 millones de años, menos de tres milésimas partes de la edad del Sol, Beta Pictoris es un 75% más masiva que nuestro astro. Se encuentra a unos 60 años-luz de distancia en la constelación de Pictor (el Pintor) y es uno de los ejemplos más conocidos de una estrella rodeada por un disco de escombros y polvo. Observaciones anteriores mostraron un pliegue en el disco, un disco secundario inclinado y cometas cayendo hacia la estrella. **“Esas fueron señales indirectas pero reveladoras que sugieren fuertemente la presencia de un planeta masivo, y nuestras nuevas observaciones prueban definitivamente esto”,** dice la líder del grupo Anne-Marie Lagrange. **“Debido a que la estrella es tan joven, nuestros resultados prueban que los planetas gigantes pueden formarse en discos en períodos de tiempo tan cortos como unos pocos millones de años”.**

Observaciones recientes han mostrado que los discos alrededor de estrellas jóvenes se dispersan en unos pocos millones de años y que la formación de planetas gigantes debe ocurrir más rápido de lo que antes se pensaba. Beta Pictoris es ahora una prueba clara de que esto es realmente posible.

El equipo usó el instrumento NAOS-CONICA (o NACO) instalado en uno de los telescopios de 8,2 metros del Very Large Telescope (VLT) de ESO, para estudiar los alrededores inmediatos de Beta Pictoris en 2003, 2008 y 2009. En 2003 fue observada una débil fuente dentro del disco, pero era imposible excluir la remota probabilidad de que se tratase de una estrella ubicada en segundo plano. En nuevas imágenes captadas en 2008 y en la primavera de 2009 ¡la fuente había desaparecido! Las observaciones más recientes, realizadas durante el otoño de 2009, revelaron al objeto al otro lado del disco después de haberse escondido durante un tiempo ya sea atrás o delante de la estrella (en cuyo caso está escondido en el brillo de la estrella). Ello confirmó que la fuente era efectivamente un exoplaneta y que estaba orbitando a su estrella anfitriona. También permitió dimensionar el tamaño de su órbita alrededor de la estrella. [...]

<<http://www.eso.org/public/spain/news/eso1024/>> [Consultat el 3/1/2011]



01-06-2009

Científicos crean un nuevo método para encontrar océanos en exoplanetas

Un grupo de científicos de los Estados Unidos han creado un nuevo método por medio del cual esperan descubrir océanos en los llamados “exoplanetas” (que se encuentran fuera de nuestro Sistema Solar)



Un grupo de científicos de los Estados Unidos han creado un nuevo método por medio del cual esperan descubrir océanos en los llamados “exoplanetas” (que se encuentran fuera de nuestro Sistema Solar).

El método que analiza como cambian de color los planetas debido a su rotación, podría también ayudar a descubrir la existencia de vida extraterrestre.

En la actualidad los científicos utilizan diversos procedimientos para la detección de agua en exoplanetas, siendo uno de los más utilizados la espectroscopia. Con esta se logra revelar las características de absorción de las longitudes de onda de una molécula de agua. En otros casos los científicos se fijan en la apariencia de las nubes o el destello de luz brillante que se produce en una superficie reflectante (como puede ser un océano), aunque esta última se ha utilizado para descubrir otros líquidos, como el metano existente en la luna Titán de Saturno. Pero ahora Nick Cowan de la Universidad de Washington y otros científicos, incluyendo a miembros del equipo de la misión EXPOXI de la NASA, han diseñado un método complementario por medio del cual esperan aumentar las posibilidades de encontrar océanos en los exoplanetas y, por consiguiente, la posibilidad de la existencia de vida en ellos.

Para dar con este nuevo método los científicos utilizaron los datos aportados por el proyecto Deep Impact, aquella sonda espacial enviada por la NASA en el año 2005 con el objeto de estudiar la composición de un cometa que orbitaba alrededor del Sol. Pero una vez finalizada esta misión, la sonda ha seguido enviando nueva información relacionada con otro cometa. Durante esta nueva misión de la sonda, los científicos han analizado imágenes de alta resolución de La Tierra, tomadas desde una distancia de decenas de millones de kilómetros como si se tratara de un exoplaneta.

Las imágenes muestran a nuestro planeta con un tono gris, con un poco de azul producto de la dispersión de Rayleigh de la luz del Sol en la atmósfera. Claro que cuando el cielo no presenta nubes, el promedio de color de La Tierra cambia con la rotación de la misma: Al momento de estar los continentes a la vista, el color cambia hacia el color rojo del espectro; mientras cuando es el mar el que esta a la vista, el color azul es el que predomina. Son estos cambios de color los que deberían revelar la existencia de océanos en los exoplanetas. Claro que para lograr notar estos cambios en planetas que se encuentran a distancias tan grandes, se requieren de telescopios de mayor tamaño, por lo que el grupo de científicos tienen sus esperanzas puestas en lo que sería el sucesor del telescopio espacial Hubble, denominado ATLAST por sus siglas en inglés (Advanced Technology Large-Aperture Space Telescope).

<<http://ve.globedia.com/cientifico-crean-metodo-oceano-exoplaneta>> [Consulta: 3/1/11]

**AMB EL TELESCOPI JAMES WEBB****L'activitat volcànica serà aviat detectable en exoplanetes**

Foto: WADE HENNING

MADRID, 8 (EUROPA PRESS) -

Els volcans mostren l'impressionant poder de la naturalesa com pocs altres esdeveniments. A començament d'aquest any, les cendres d'un volcà d'Islàndia van interrompre el transport aeri a la major part del nord d'Europa. Tot i això, aquesta recent erupció empal·lideix al costat de la fúria de la lluna de Júpiter Io, el cos més volcànic del nostre sistema solar.

Ara que els astrònoms estan descobrint mons rocallosos orbitant al voltant d'estrelles distants, s'estan plantejant la següent pregunta lògica: Alguns d'aquests mons tenen volcans? I si és així, podem detectar-los? El treball dels teòrics del Centre Harvard-Smithsonian d'Astrofísica suggereix que la resposta a això últim és un "sí".

"Vostè tindria alguna cosa verdaderament transcendental, una erupció que va llançar una gran quantitat de gasos a l'atmosfera", ha dit l'astrònom del Smithsonian, Lisa Kaltenegger. "El futur telescopi espacial James Webb podria detectar una erupció entre 10 a 100 vegades la mida del Pinatubo en les estrelles més pròximes", ha afegit.

Els astrònoms estan a dècades de distància de ser capaços d'obtenir imatges de la superfície d'exoplanetes. Tot i això, en alguns casos han estat capaços de detectar atmosferes d'exoplanetes gegants de gas. Una erupció emet fums i gasos diferents; l'activitat volcànica en un exoplaneta rocallós podria deixar una firma atmosfèrica.

Per examinar que els gasos volcànics podrien ser detectables, Kaltenegger i els seus col·legues de Harvard, Henning Wade i Dimitar Sasselov, van desenvolupar un model d'erupcions en un exoplaneta semblant a la Terra basat en la Terra avui dia. Ells van trobar que el diòxid de sofre procedents d'una gran erupció explosiva és potencialment mesurable.

Detectar una erupció volcànica en un exoplaneta ens mostrarà les similituds o diferències entre els mons rocallosos, explica aquest investigador.

Per buscar diòxid de sofre, els astrònoms haurien d'utilitzar una tècnica coneguda com el eclipsi secundari, que requereix que l'exoplaneta per creuar darrere de la seva estrella vista des de la Terra. En recollir la llum de l'estrella i el planeta, a continuació, restant la llum de l'estrella (mentre que el planeta està ocult), els astrònoms es queden amb el senyal del planeta sol. Poden buscar el senyal per detectar-hi senyals de molècules químiques en particular.

A causa de la seva proximitat, una Terra hipotètica o súper-Terra orbitant Alpha Centauri oferiria un millor escenari per a una estrella semblant al sol. Qualsevol planeta com la Terra llevat 30 anys llum de distància podria mostrar signes d'activitat volcànica feble quan s'estudiï amb el James Webb

<<http://www.europapress.cat/internacional/noticia-lactivitat-volcanica-sera-aviat-detectable-exoplanetes-20100908110528.html>> [Consulta: 3/1/11]



26/Nov/05

Vórtice óptico: Se intenta la observación directa de los planetas extrasolares.

Un nuevo dispositivo óptico podría permitir que los astrónomos observen los planetas extrasolares directamente, sin el brillo molesto de su estrella central. Haría esto "anulando" la luz de la estrella, aprovechando su condición de onda, y permitiendo que la luz reflejada del planeta cercano a esta sea observada por los detectores ubicados en el espacio.

Casi diez años atrás, la presencia de planetas orbitando estrellas que no fueran nuestro Sol fue deducida por primera vez gracias a la muy pequeña distorsión en el espectro de luz de la estrella causado por la lucha mutua entre la estrella y su satélite. Desde ese momento, más de 100 planetas extrasolares han sido detectados de esta manera. En otros casos el descubrimiento fue posible a causa de la leve disminución en la radiación de la estrella provocada por el tránsito del planeta por delante de la estrella.

Muchos astrónomos preferirían, de cualquier manera, observar directamente el planeta, una cosa muy difícil de lograr. Observar el planeta cercano a su brillante estrella ha sido comparado con intentar distinguir, a una distancia de cien metros, la luz de un fósforo sostenida frente al foco de un automóvil.

El enfoque utilizado por Grover Swartzlander y sus colegas de la Universidad de Arizona, es eliminar la luz de la estrella al enviarla a través de una máscara especial de forma helicoidal, un tipo de lentes cuya geometría recuerda la de una escalera espiral volteada de lado.

El proceso funciona de la siguiente manera: la luz que atraviesa la parte central, más gruesa, de la máscara ve reducida su velocidad. Gracias a la forma graduada del vidrio, se crea un "vórtice óptico" y la luz que llega a los ejes de la máscara es, de hecho, eliminada de la imagen. Se la anula, como si una máscara opaca hubiera sido ubicada frente a la imagen de la estrella, pero sin afectar el pasaje de la luz del planeta cercano. La idea de un vórtice óptico existe desde hace varios años, pero nunca antes había sido aplicada a la astronomía. En las pruebas de laboratorio de la máscara del vórtice óptico, la luz de las estrellas simuladas se vio reducida en un factor de 100 a 1000, mientras que la luz del "planeta" cercano no se veía afectada (ver imagen arriba).

Los investigadores conectaron su dispositivo a un telescopio ubicado en el Monte Lemon, en las afueras de Tucson, Arizona, y tomaron fotografías de Saturno y sus anillos para demostrar la facilidad con la que se puede integrar la máscara a los sistemas de imágenes telescópicas. Esta es, de acuerdo a Swartzlander (520-626-3723, grovers@optics.arizona.edu), una técnica más práctica que la de simplemente intentar cubrir la imagen de la estrella, tal como se hace con los graficadores de corona (coronagraphs), dispositivos utilizados para observar la corona de un sol, por medio del enmascaramiento del disco solar.

Los vórtices ópticos podrían tener éxito como parte del proyecto "Buscador Terrestre de Planetas" (Terrestrial Planet Finder, o TPF por sus siglas en inglés), un telescopio orbital propuesto para ser desarrollado durante la década que viene y diseñado para fotografiar exoplanetas.

Fuente: The American Institute of Physics Bulletin of Physics News # 755, Phillip F. Schewe, Ben Stein, and Davide Castelvecchi.
Traducido por Laura Nuñez.

<<http://axxon.com.ar/not/156/c-1560323.htm>> [Consulta: 3/1/11]



01 de Diciembre, 2010

Primer Análisis de Atmósfera de un Súper-Tierra



La atmósfera alrededor de un exoplaneta súper-Tierra ha sido analizada por primera vez por un equipo internacional de astrónomos que empleó el Very Large Telescope de ESO. El planeta, que es conocido como GJ 1214b, fue estudiado mientras pasaba frente a su estrella anfitriona, y algo de la luz estelar pasó a través de la atmósfera del planeta. Ahora sabemos que la atmósfera es ya sea básicamente agua en forma de vapor o está dominada por gruesas nubes o brumas. Los resultados aparecerán en la edición del 2 de Diciembre de 2010 de la revista *Nature*.

El planeta GJ 1214b fue descubierto en 2009 empleando el instrumento HARPS en el telescopio de 3,6 metros de ESO en Chile (eso0950). Los hallazgos iniciales sugerían que este planeta tenía una atmósfera, lo que ahora ha sido confirmado y estudiado en detalle por un equipo internacional de astrónomos, dirigido por Jacob Bean (**Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics**), empleando el instrumento FORS en el **Very Large Telescope** de ESO.

“Esta es el primer súper-Tierra cuya atmósfera ha sido analizada. Hemos alcanzado un verdadero hito en el camino hacia la caracterización de estos mundos,” dijo Bean.

GJ 1214b tiene un radio de unas 2,6 veces el de la Tierra y es unas 6,5 veces más masivo, poniéndolo derechamente en la clase de los exoplanetas conocidos como súper-Tierras. Su estrella anfitriona se ubica a unos 40 años-luz de la Tierra en la constelación de **Ophiuchus** (el Levantador de la Serpiente). Es una estrella tenue, pero también es pequeña, lo que significa que el tamaño del planeta es grande comparado al disco estelar, haciéndolo relativamente fácil de estudiar. El planeta viaja a través del disco de su estrella anfitriona una vez cada 38 horas mientras orbita a una distancia de sólo dos millones de kilómetros: alrededor de setenta veces más cerca que la órbita de la Tierra al Sol.

Para estudiar la atmósfera, el equipo observó la luz que venía de la estrella mientras el planeta pasaba frente a ella. Durante estos tránsitos, algo de la luz estelar pasa a través de la atmósfera del planeta y, dependiendo de la composición química y del clima en el planeta, específicas longitudes de onda de luz son absorbidas. El equipo luego comparó estas precisas nuevas mediciones con lo que hubieran esperado ver para varias posibles composiciones atmosféricas.

Antes de las nuevas observaciones, los astrónomos habían sugerido tres atmósferas posibles para GJ1214b. La primera era la fascinante posibilidad de que el planeta estuviera envuelto por agua, lo cual, dada la cercana proximidad a la estrella, sería en la forma de vapor. La segunda posibilidad era



que éste fuera un mundo rocoso con una atmósfera consistente principalmente de hidrógeno, pero con altas nubes o brumas oscureciendo la vista. La tercera opción era que este exoplaneta fuera como un mini-Neptuno, con un pequeño centro rocoso y una profunda atmósfera rica en hidrógeno.

Las nuevas mediciones no muestran signos reveladores de hidrógeno y, consiguientemente, eliminan la tercera opción. Por lo tanto, la atmósfera es ya sea rica en vapor, o está cubierta por nubes o brumas, similares a aquellas vistas en las atmósferas de Venus y Titanio en nuestro Sistema Solar, las que ocultan la firma del hidrógeno.

“A pesar de que aún no podemos decir exactamente de qué está hecha esa atmósfera, es un apasionante paso adelante el ser capaz de achicar las opciones de un mundo tan distante a dos, ya sea llena de vapor o brumosa,” dice Bean. “Ahora se necesita observaciones de seguimiento en luz infrarroja a mayor longitud de onda para determinar cuál de estas atmósferas existe en GJ 1214b.”

<http://eso.cl/publicos/noticia_2010dic01.php> [consulta: 3/1/11]

ASTRONOMÍA | En la constelación Libra

Descubierto el primer planeta 'potencialmente habitable' fuera del Sistema Solar



Rosa M. Tristán | Madrid

Actualizado **domingo 03/10/2010 17:48 horas**

Un equipo de astrónomos de la Institución Carnegie y la Universidad de California han descubierto un nuevo planeta fuera del Sistema Solar que tiene un tamaño similar a la Tierra y que se encuentra en una zona que podría ser habitable. Se trata del **Gliese 581g, y está a unos 20 años luz**, según se publica en la revista 'Astrophysical Journal'.

El Gliese 581g, según los astrónomos, se encuentra a una distancia de su estrella que le permite tener **una temperatura adecuada** para que haya agua líquida en su superficie, o a escasa profundidad.

Entre sus características, destacan que su temperatura está **entre menos 31° y menos 12° centígrados**, tiene gravedad, su periodo orbital es de poco más de 36 días, su masa es entre 3,1 y 4,3 masas terrestres y, además, la atracción de la estrella Gliese 581 hace que siempre tenga una cara con luz y otra oscura y fría. Por ello, apuntan que el área más probable de tener vida sería la que se encuentra más cerca del límite entre el día y la noche.



Con éste, ya son **seis los planetas que se mueven, con órbitas casi circulares**, en torno a esta estrella (una enana roja) y de ellos tres son 'supertierras', es decir, similares al nuestro, aunque sólo el 'g' podría tener organismos vivos, gracias a su situación. El trabajo apunta que en la Vía Lácta podría haber muchos más planetas habitables de lo que se piensa.

Para detectar el exoplaneta los científicos utilizaron la técnica de la velocidad radial de la estrella, que consiste en detectar pequeños movimientos en la estrella causados por la gravedad de los planetas. Se sirvieron del instrumento HIRE del Observatorio Keck de Hawaii, donde recogieron datos durante 11 años. La precisión del HIRES es de 1,6 metros por segundo.

Desde 1995, los astrónomos han detectado 490 planetas fuera del Sistema Solar. La mayoría son muy grandes y muy calientes, dado que se encuentran demasiado cerca de sus estrellas, por lo que no se consideran habitable.

Sin embargo, con las mejoras en los instrumentos y los telescopios, se están empezando a encontrar **planetas más pequeños y más alejados** de sus fuentes de energía. Y se está detectando que planetas similares al nuestro podrían abundar en el Universo.

<<http://www.elmundo.es/elmundo/2010/09/29/ciencia/1285784486.html>> [Consulta: 3/1/11]

ASTRONOMÍA | Desde el observatorio de La Silla

El gemelo de nuestro Sistema Solar

Hasta siete planetas orbitan una estrella similar al Sol

ELMUNDO.es | Madrid

Actualizado **miércoles 25/08/2010 18:37 horas**

A 127 años luz de la Tierra, en la constelación austral de Hydrus, un equipo de astrónomos del Observatorio Europeo

Austral (ESO) ha descubierto el sistema planetario más parecido al Sistema Solar jamás visto.

"Hemos hallado lo que probablemente sea el sistema con **el mayor número de planetas** descubierto hasta ahora (fuera del nuestro)", dijo el investigador Christophe Lovis.

Los científicos, desde el observatorio La Silla, detectaron que cinco planetas orbitan en torno a **HD 10180**, una estrella similar al Sol.

Además, hallaron evidencia de la existencia de **otros dos planetas** en ese sistema cósmico. "Uno sería un planeta similar a Saturno, y el otro sería el exoplaneta con **la menor masa conocida** para este tipo de cuerpos celestes", dice Lovis.

El equipo de astrónomos además encontró pruebas de que las distancias de los planetas a su estrella **siguen un patrón regular**, lo que también se observa en el Sistema Solar.

"Este descubrimiento resalta el hecho de que ahora estamos entrando en una **nueva era de la investigación** de exoplanetas: el estudio de sistemas planetarios complejos y no sólo planetas individuales", comentó Lovis.

Un sistema único

El equipo de astrónomos empleó el espectrógrafo HARPS, instalado en el telescopio de 3,6 metros de ESO en La Silla (Chile) para un estudio de seis años de duración de la estrella similar al Sol HD 10180.

Gracias a **190 mediciones realizadas**, los científicos detectaron movimientos hacia adelante y atrás de HD 10180, originados por las atracciones gravitacionales provenientes de los planetas.

El sistema de planetas que orbita a HD 10180 **es único en varios aspectos**, según los investigadores. Primero, con al menos cinco planetas similares a Neptuno ubicados dentro de una distancia equivalente a la órbita de Marte, este sistema es más poblado que nuestro Sistema Solar en su región interior y tiene muchos planetas más masivos ahí.

Por otra parte, el sistema probablemente **no tiene un gigante de gas** similar a Júpiter. Además, todos los planetas parecen tener órbitas casi circulares, explicó ESO.



Recreación del sistema planetario similar al Sistema Solar. | ESO



Hasta el momento, los astrónomos saben de **15 sistemas con al menos tres planetas**. El último en detentar el récord fue 55 Cancri, que contiene cinco planetas, siendo dos de ellos planetas gigantes. "Los sistemas de planetas de masas bajas como el que rodea a HD 10180 parecen ser muy comunes, pero **la historia de su formación** sigue siendo un rompecabezas", dice Lovis.

<<http://www.elmundo.es/elmundo/2010/08/24/ciencia/1282666171.html>> [Consulta: 3/1/11]



ANNEX III

(Treball de camp)

3.1 Fotometria amb camera CCD.

Per fer les fotografies, al treball de camp s'ha utilitzat una camera CCD: *Charge Coupled Device* (dispositiu de càrrega acoblada).

Aquestes càmeres són un instrument electrònic el funcionament de les quals es fonamenta en sensors de càrrega acoblada que porten incorporats.

Per a generar les imatges (fotografies), les càmeres CCD necessiten un temps d'exposició durant el qual aniran captant llum. Aquest temps d'exposició variarà segons el què volem observar, ja que hi ha objectes del cel que necessiten més captació de llum que altres, com per exemple els objectes més dèbils.

Per aquesta raó, les càmeres CCD no es poden utilitzar per fotografiar fenòmens que durin menys que el temps d'exposició que hem d'utilitzar per veure'ls. En canvi, aquest inconvenient es pot utilitzar amb altres finalitats útils, com per fer mesures de brillantor o posició d'astres a partir de la quantitat de llum que en rebem.

La part més important d'aquestes cameres és el sensor CCD, que és el que els hi dona el nom. Al ser il·luminat, aquest tipus de sensor crea un senyal electrònic per mitjà de l'efecte fotoelèctric, passant d'un senyal lumínic a un senyal elèctric.

Aquest senyal creat a partir de la llum que arriba al sensor és un flux d'electrons, els quals s'emmagatzemen dins d'una mena de pous electrònics del sensor, essent una informació llegible pels ordinadors.

A la vegada, el sensor CCD està dividit en píxels, la longitud dels costats dels quals determina la geometria i la mida del sensor. Quants més píxels tingui el sensor, més resolució tindran la imatges obtingudes. També cal tenir en compte que la quantitat de llum que incideixi en el sensor serà proporcional a la quantitat d'electrons despresos, o sigui, quanta més llum més senyal elèctric. La unitat de mesura d'aquest senyal s'anomena "ADU" (Analogic to Digital Unit).

La càmera també compta amb un conjunt de dispositius electrònics de refrigeració, ja que la calor generada per la pròpia càmera és radiació i, per tant, és captada pel sensor igual que

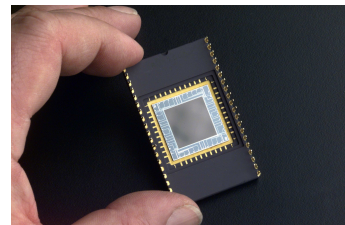


fig. 37: Sensor CCD



passa amb la llum. Aquest efecte crea senyal elèctric anomenat soroll i malmet el sensor, en conseqüència, amb la CCD es treballa a temperatures d'entre -5°C i -20°C per intentar que la càmera emeti el mínim de calor possible. Tot i així, sempre hi ha senyal tèrmic que s'ha d'eliminar mitjançant imatges de correcció (“dark frame”).

Finalment, el sistema llegeix el senyal elèctric creat en cada píxel a partir de la llum que hi ha incidit i el transmet a l'ordinador, on es crea la imatge.

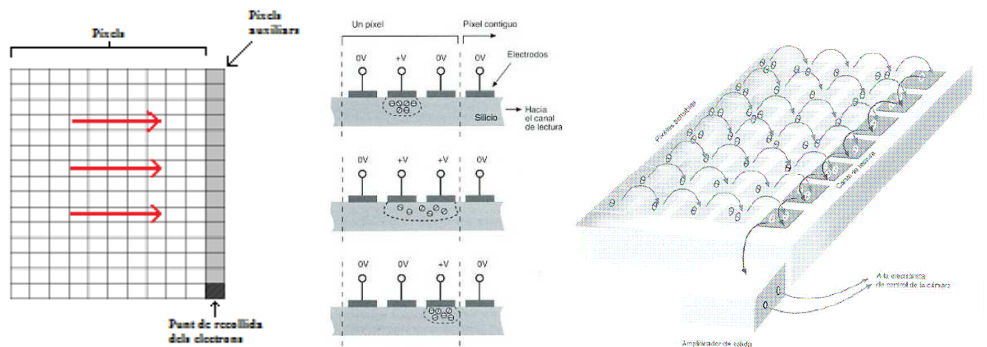


fig. 38: La recollida dels electrons es du a terme com mostren els dibuixos: els píxels acumulen els electrons despresos per la llum en “pous electrònics” individuals i després els electrons passen per ordre fins els píxels auxiliars, que recullen els pertanyents a cada fila i els acumulen al punt de recollida per construir la imatge.

Amb la càmera és usual utilitzar filtres monocromàtics, que el que fan és seleccionar els tipus de fotons que arriben a la càmera, deixant passar només els que pertanyen al rang visible de l'espectre. D'aquesta manera, s'aconsegueix estudiar un astre a partir de la seva informació física, tot i que això comporta que la imatge sigui en blanc i negre. No obstant, hi ha càmeres CCD preparades per fer fotografies en color atribuint els tres colors bàsics (RGB) a grups de tres píxels que treballen unitàriament, o es pot aconseguir una fotografia en color amb una CCD normal posant-hi un filtre de color, prenent diverses fotografies amb colors diferents.

Ara bé, els circuits del sensor CCD no són perfectes, i no tots els fotons que hi incideixen són transferits a senyal elèctric, sinó que existeix una pèrdua de llum més o menys elevada segons l'energia dels fotons, o sigui, de la seva longitud d'ona. Això comporta que per a certs colors, la càmera sofrirà més o menys pèrdues. En el cas de la CCD, sofreix moltes més pèrdues de llum amb el color blau que amb els colors verd i vermell. Això s'anomena “eficiència quàntica” o sensibilitat.



3.2 Flats i Darks.

El sensor CCD no és un sistema electrònic perfecte, sinó que acumula una sèrie d'errors durant la presa d'imatges. Aquests errors són deguts, majoritàriament, a píxels del sensor malmesos o amb defectes i a causes tèrmiques del sistema.

Hi ha diversos defectes (o “sorolls”) diferents que poden sorgir en la presa d'imatges amb CCD, però en la fotometria del trànsit de l'exoplaneta els que hem corregit han estat:

Defectes - Correcció:

- Soroll tèrmic - Imatges “*Dark Frame*”.
- Sensibilitat diferencial píxels - Imatges “*Flat Field*”.

Imatges “*Dark Frame*”:

Són imatges realitzades amb l'obturador de la càmera tancat per detectar el corrent degut a la temperatura, i així eliminar el soroll tèrmic i de lectura de la càmera

Recordem que abans de fotografiar, s'ha de refredar la càmera CCD fins a una temperatura d'entre -5°C i -20°C per evitar que el propi sistema de la càmera emeti calor, el qual serà detectat pel sensor igual que la llum. No obstant, mai s'aconseguia que el calor que despenia la càmera fos nul, i per aquesta raó s'utilitzaven les imatges de correcció “*Dark Frame*”. A més, també corregeix qualsevol emissió de radiació d'algun píxel concret.

S'han de prendre entre 5 i 30 fotografies amb l'obturador del telescopi tancat i tots els llums de l'observatori apagats (en el cas de l'observatori de Sabadell també cal tancar els llums de la cabina per tal d'evitar la “llum paràsit”), aconseguint així que tota la llum captada pel sensor sigui causada pel calor del sistema.

A més, caldrà fer dues sèries de fotografies: Uns “darks” per aplicar a les imatges de l'astre que prendrem, i uns altres per aplicar-los als “flats”. D'aquesta manera, l'exposició de les imatges “dark frame” seran dues: la mateixa exposició que les imatges de l'astre que vulguem prendre, i la mateixa exposició que els “flats”.

Imatges “*Flat Field*”:

Imatges preses amb una il·luminació uniforme a tot el sensor per a igualar la resposta de tots els seus píxels.



Es prenen en conseqüència de possibles defectes que puguin tenir alguns píxels del sensor, els quals no respondrien com cal a la incidència de llum, creant petites irregularitats en la imatge. S'han de prendre entre 5 i 20 imatges per a cada filtre emprat. Són imatges d'exposició curta (entre 5 i 10 segons) amb la cúpula il·luminada amb llum uniforme.

El pretractament de les imatges:

El pretractament consisteix a aplicar els “*dark frames*” i els “*flat fields*” a les imatges que haguem obtingut de l'observació (en el nostre cas, les imatges de l'estrella).

Es pot utilitzar el programa *AstroArt*, amb el qual l'ordre d'aplicació és el següent:

- En primer lloc s'han d'aplicar a les imatges astronòmiques els “*dark frames*” del mateix temps d'exposició que aquestes. :
- En segon lloc, als “*flat fields*” se'ls apliquen els “*dark frames*” que tenen el mateix temps d'exposició. Aquesta aplicació s'ha de fer per als flats de cada filtre emprat.

Posteriorment, s'aplicaran aquests flats corregits a les imatges astronòmiques, obtenint finalment una imatge neta d'errors propis del sistema.

3.3 Llista de promitjos de les dades numèriques obtingudes durant l'observació.

NUM.	DATA MPC	DATA JULIANA	Diferència de magnitud
----	-----	-----	-----
0	20070725,8	2454307,341	-0,004
1	20070725,8	2454307,341	-0,001
2	20070725,8	2454307,342	-0,008
3	20070725,8	2454307,344	0,001
4	20070725,8	2454307,344	-0,018
5	20070725,8	2454307,345	-0,023
6	20070725,8	2454307,345	-0,015
7	20070725,8	2454307,346	0,004
8	20070725,8	2454307,347	-0,007
9	20070725,8	2454307,347	-0,014
10	20070725,8	2454307,348	-0,011
11	20070725,8	2454307,348	-0,011
12	20070725,8	2454307,349	0,002
13	20070725,8	2454307,349	0,001
14	20070725,8	2454307,35	-0,008



15	20070725,9	2454307,35	-0,005
16	20070725,9	2454307,351	0,006
17	20070725,9	2454307,351	0,004
18	20070725,9	2454307,352	-0,01
19	20070725,9	2454307,352	-0,015
20	20070725,9	2454307,353	-0,013
21	20070725,9	2454307,353	-0,01
22	20070725,9	2454307,354	-0,012
23	20070725,9	2454307,354	-0,006
24	20070725,9	2454307,355	-0,014
25	20070725,9	2454307,355	-0,012
26	20070725,9	2454307,357	-0,013
27	20070725,9	2454307,357	0,004
28	20070725,9	2454307,358	-0,008
29	20070725,9	2454307,359	-0,002
30	20070725,9	2454307,359	-0,001
31	20070725,9	2454307,36	-0,001
32	20070725,9	2454307,36	0,002
33	20070725,9	2454307,361	0,002
34	20070725,9	2454307,361	-0,002
35	20070725,9	2454307,362	-0,013
36	20070725,9	2454307,362	0
37	20070725,9	2454307,364	-0,013
38	20070725,9	2454307,365	0,011
39	20070725,9	2454307,366	0,008
40	20070725,9	2454307,367	-0,001
41	20070725,9	2454307,367	0,015
42	20070725,9	2454307,368	0,006
43	20070725,9	2454307,368	0,002
44	20070725,9	2454307,369	0,021
45	20070725,9	2454307,369	0
46	20070725,9	2454307,37	0,006
47	20070725,9	2454307,37	0,004
48	20070725,9	2454307,371	0,01
49	20070725,9	2454307,371	0,012
50	20070725,9	2454307,372	0,013
51	20070725,9	2454307,372	0,021
52	20070725,9	2454307,373	0,02
53	20070725,9	2454307,373	0,02
54	20070725,9	2454307,374	0,013
55	20070725,9	2454307,374	0,014
56	20070725,9	2454307,375	0,015
57	20070725,9	2454307,375	-0,003



58	20070725,9	2454307,376	0,008
59	20070725,9	2454307,377	0,022
60	20070725,9	2454307,377	0,007
61	20070725,9	2454307,378	0,025
62	20070725,9	2454307,378	0,011
63	20070725,9	2454307,379	0,036
64	20070725,9	2454307,379	0,022
65	20070725,9	2454307,38	0,023
66	20070725,9	2454307,38	0,029
67	20070725,9	2454307,381	0,007
68	20070725,9	2454307,381	0,02
69	20070725,9	2454307,382	0,024
70	20070725,9	2454307,382	0,016
71	20070725,9	2454307,383	0,018
72	20070725,9	2454307,383	0,019
73	20070725,9	2454307,384	0,011
74	20070725,9	2454307,384	0,012
75	20070725,9	2454307,385	0,024
76	20070725,9	2454307,385	0,017
77	20070725,9	2454307,386	0,03
78	20070725,9	2454307,387	0,019
79	20070725,9	2454307,387	0,022
80	20070725,9	2454307,388	0,017
81	20070725,9	2454307,388	0,023
82	20070725,9	2454307,389	0,011
83	20070725,9	2454307,389	0,018
84	20070725,9	2454307,39	0,015
85	20070725,9	2454307,39	0
86	20070725,9	2454307,391	0,023
87	20070725,9	2454307,391	0,014
88	20070725,9	2454307,392	0,008
89	20070725,9	2454307,392	0,016
90	20070725,9	2454307,393	0,016
91	20070725,9	2454307,393	0,005
92	20070725,9	2454307,394	0,019
93	20070725,9	2454307,395	0,017
94	20070725,9	2454307,396	0,002
95	20070725,9	2454307,396	0,006
96	20070725,9	2454307,397	-0,007
97	20070725,9	2454307,398	0,006
98	20070725,9	2454307,398	0,005
99	20070725,9	2454307,399	0
100	20070725,9	2454307,399	0,003



101	20070725,9	2454307,4	0,02
102	20070725,9	2454307,4	0,01
103	20070725,9	2454307,401	0,009
104	20070725,9	2454307,401	0,001
105	20070725,9	2454307,402	-0,008
106	20070725,9	2454307,402	0,012
107	20070725,9	2454307,403	0,004
108	20070725,9	2454307,403	0,002
109	20070725,9	2454307,404	0
110	20070725,9	2454307,404	-0,001
111	20070725,9	2454307,405	0,005
112	20070725,9	2454307,405	-0,017
113	20070725,9	2454307,406	-0,003
114	20070725,9	2454307,407	0,003
115	20070725,9	2454307,407	-0,008
116	20070725,9	2454307,408	0,004
117	20070725,9	2454307,408	-0,006
118	20070725,9	2454307,409	-0,01
119	20070725,9	2454307,409	0,006
120	20070725,9	2454307,41	-0,007
121	20070725,9	2454307,41	-0,012
122	20070725,9	2454307,411	0,001
123	20070725,9	2454307,411	-0,003
124	20070725,9	2454307,412	-0,002
125	20070725,9	2454307,412	-0,022
126	20070725,9	2454307,413	0
127	20070725,9	2454307,413	-0,01
128	20070725,9	2454307,414	0,006
129	20070725,9	2454307,414	0
130	20070725,9	2454307,415	-0,002
131	20070725,9	2454307,415	-0,001
132	20070725,9	2454307,416	-0,015
133	20070725,9	2454307,417	-0,01
134	20070725,9	2454307,417	0
135	20070725,9	2454307,418	-0,021
136	20070725,9	2454307,418	-0,007
137	20070725,9	2454307,419	-0,01
138	20070725,9	2454307,419	-0,002
139	20070725,9	2454307,42	-0,019
140	20070725,9	2454307,42	-0,002
141	20070725,9	2454307,421	0
142	20070725,9	2454307,421	0,001
143	20070725,9	2454307,422	-0,007



144	20070725,9	2454307,422	-0,001
145	20070725,9	2454307,423	-0,004
146	20070725,9	2454307,424	-0,009
147	20070725,9	2454307,424	-0,007
148	20070725,9	2454307,425	-0,005
149	20070725,9	2454307,425	-0,003
150	20070725,9	2454307,427	-0,008
151	20070725,9	2454307,427	0,007
152	20070725,9	2454307,428	-0,005
153	20070725,9	2454307,428	-0,01
154	20070725,9	2454307,429	-0,002
155	20070725,9	2454307,429	0,006
156	20070725,9	2454307,43	-0,018
157	20070725,9	2454307,43	0,003
158	20070725,9	2454307,431	-0,012
159	20070725,9	2454307,431	-0,008
160	20070725,9	2454307,432	-0,016
161	20070725,9	2454307,432	-0,014
162	20070725,9	2454307,433	-0,004
163	20070725,9	2454307,433	-0,008
164	20070725,9	2454307,434	-0,017
165	20070725,9	2454307,434	-0,017
166	20070725,9	2454307,435	-0,015
167	20070725,9	2454307,436	-0,009
168	20070725,9	2454307,436	-0,014
169	20070725,9	2454307,437	0,001
170	20070725,9	2454307,437	-0,024
171	20070725,9	2454307,438	-0,009
172	20070725,9	2454307,44	-0,009
173	20070725,9	2454307,44	-0,008
174	20070725,9	2454307,441	-0,004
175	20070725,9	2454307,441	-0,02
176	20070725,9	2454307,442	-0,012
177	20070725,9	2454307,442	-0,016
178	20070725,9	2454307,443	-0,008
179	20070725,9	2454307,443	-0,012
180	20070725,9	2454307,444	-0,01
181	20070725,9	2454307,445	-0,015
182	20070725,9	2454307,445	-0,001
183	20070725,9	2454307,446	-0,016
184	20070725,9	2454307,447	-0,009
185	20070725,9	2454307,447	-0,005
186	20070725,9	2454307,448	-0,005



187	20070725,9	2454307,448	-0,01
188	20070725,9	2454307,449	-0,008
189	20070725,9	2454307,45	-0,014
190	20070726	2454307,45	-0,004
191	20070726	2454307,451	-0,007
192	20070726	2454307,451	-0,003
193	20070726	2454307,452	-0,006
194	20070726	2454307,452	-0,004
195	20070726	2454307,453	-0,013
196	20070726	2454307,453	-0,004
197	20070726	2454307,454	-0,013
198	20070726	2454307,455	-0,008
199	20070726	2454307,456	-0,008

3.4 Procediment amb Foto-Dif:

Per a fer el tractament de les imatges, hem utilitzat el programa Foto-Dif, el qual ens mesura la variació de magnitud de l'estrella "WASP-10b" en cada fotografia que s'ha fet durant el trànsit.

L'objectiu d'aquest tractament és obtenir finalment un recull de les dades de la brillantor de l'estrella per tal de construir una corba de llum que ens permeti averiguar característiques de l'exoplaneta.

A l'ordinador, un cop s'han aplicat les imatges de correcció (flats i darks) a les fotografies de l'estrella, el tractament per a obtenir les dades del trànsit es segueix de la següent manera:

1) Executem el FotoDif i ens apareixerà la següent finestra en la que no és necessari marcar cap dada determinada, només clicar "Aceptar".



fig. 39: Icona del FotoDif.

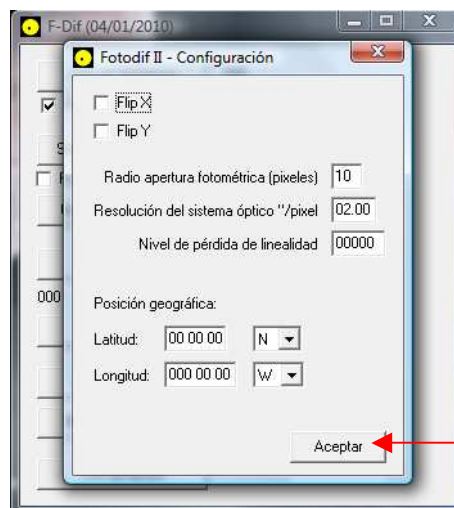


fig. 40



2) Ens sortirà el menú del FotoDif com en la figura 38. D'antuvi s'ha de clicar "Lista de imágenes" per escollir les fotografies preses pel telescopi durant l'observació.

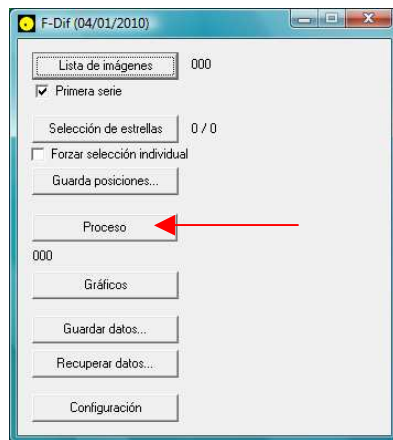


fig. 41

3) Ens apareixerà una finestra de navegació per a buscar les fotografies que volem tractar. Anem a la carpeta on les tinguem guardades (fig. 42) i les seleccionem, clicant "Obre" (fig. 43)

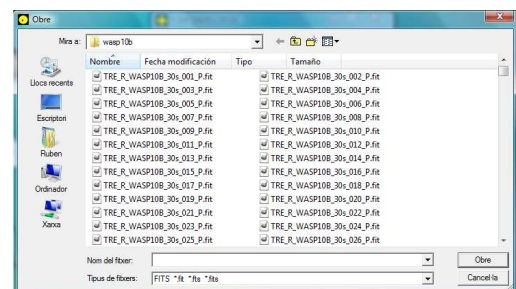


fig. 42

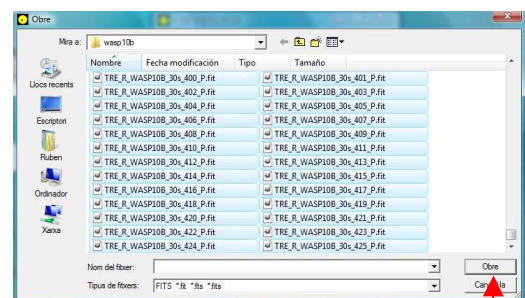


fig. 43

4) Tornarem al FotoDif on ens sortirà una finestra per introduir les coordenades de l'objecte que volem analitzar (fig. 44). En el nostre no les determinarem pas, així que clicarem "Aceptar".

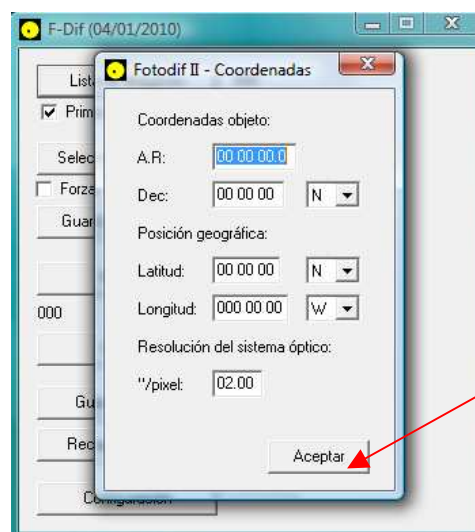


fig. 44



5) Tornarem al menú inicial de FotoDif on es podrà veure com al costat de “Lista de imágenes” ha canviat el número de 000 a 424, indicant que actualment hi ha aquest nombre de fotografies seleccionades.

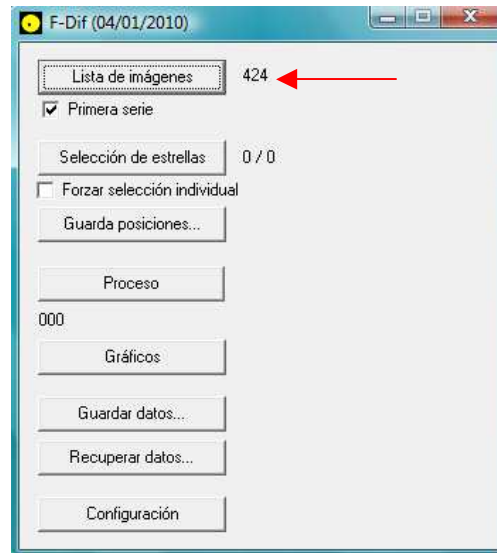


fig. 45

A continuació clicarem “Selección de estrellas” per tal de seleccionar l’estrella que volem mesurar en totes les fotografies (WASP-10) i les estrelles de referència per al programa.

6) Ens sortirà una finestra amb la primera fotografia de la sèrie (fig. 46). Les estrelles es seleccionaran clicant sobre elles. En fer això s’obrirà una petita finestra que ens donarà a escollir entre “Variable” o “Calibració”. Les estrelles que seleccionem com a variables seran les estrelles que volem analitzar en totes les fotografies (en el nostre cas només és una, la del trànsit). En canvi, les estrelles de calibració seran els estrelles de referència per al programa i a les quals haurem d’atribuir la magnitud corresponent⁷.

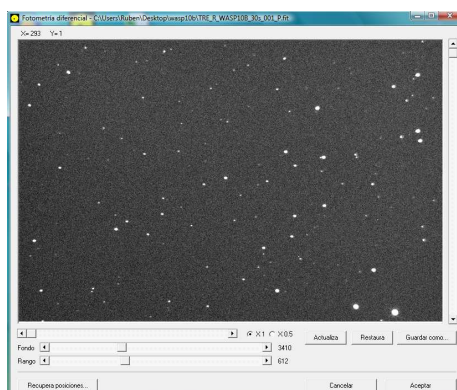


fig. 46

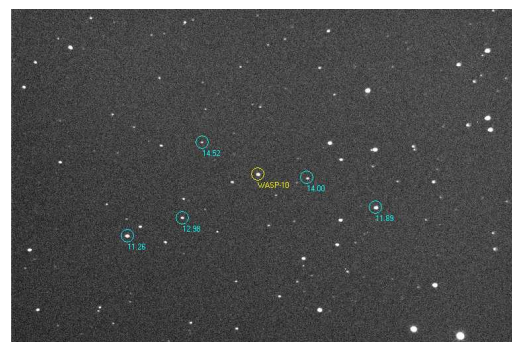


fig. 47: Finestra amb les estrelles ja seleccionades. En ella apareix l’estrella “WASP-10” (la variable) en groc i les estrelles de calibració en blau, amb la corresponent magnitud a sota.

⁷ La magnitud de les estrelles les podem obtenir del catàleg estel·lar “ALADIN”, a la xarxa, al web “<http://aladin.u-strasbg.fr/>”.



Un cop acabem de seleccionar les estrelles, clicarem “Aceptar” a la part inferior de la finestra.

7) De nou al menú del FotoDif, veurem que al costat de “Selección de estrellas” han canviat els números de “0/0” a “5/1”, indicant que tenim 5 estrelles seleccionades de les quals una és variable (fig. 48).

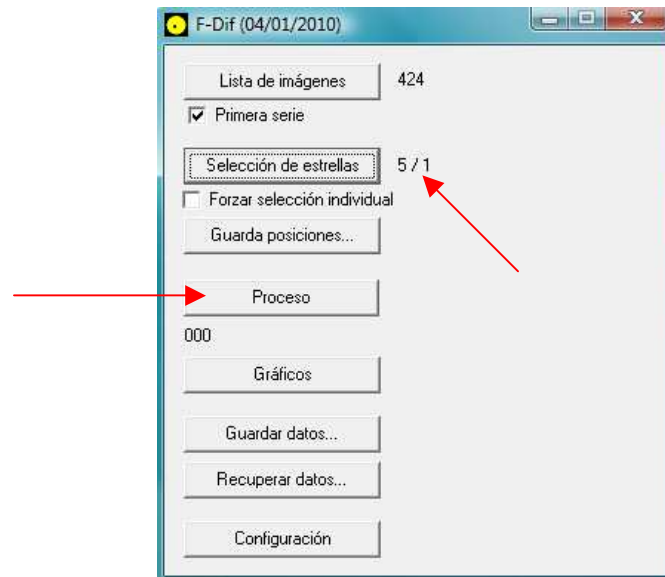


fig. 48

Tot seguit clicarem “Proceso” per tal que el programa processi les fotografies seleccionades, donant-nos el valor de la magnitud de l'estrella del trànsit indicada al pas num. 6.

El programa començarà a processar les imatges i quan acabi ens sortirà una petita finestra com la de la figura 49, donant-nos el llistat d'imatges processades.

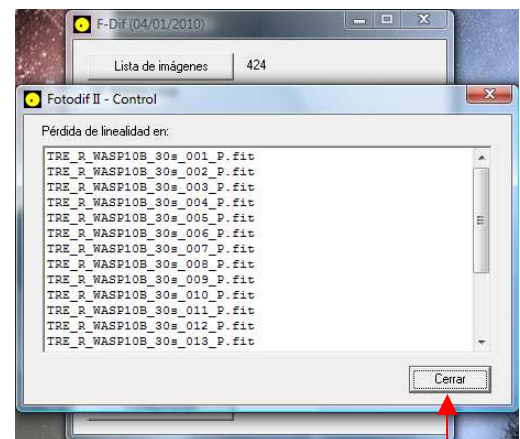


fig. 49

8) Clicant “Cerrar” en la finestra de la figura 49 tornarem al menú del FotoDif, on veurem que a sota de “Proceso” posarà “Finalizado”, indicant que ja s’han processat les imatges. Amb les dades, el programa ens pot construir la corba de llum del trànsit (fig. 51), que obtindrem clicant “Gráficos”.

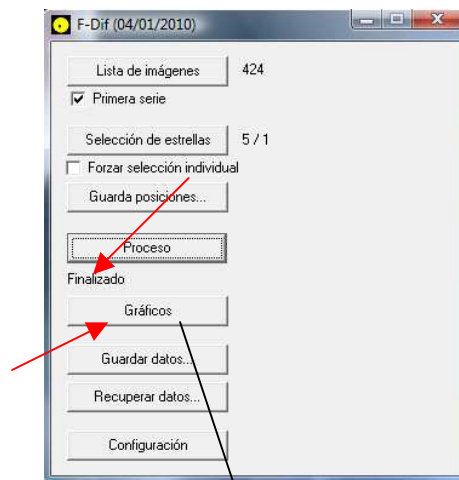


fig. 50

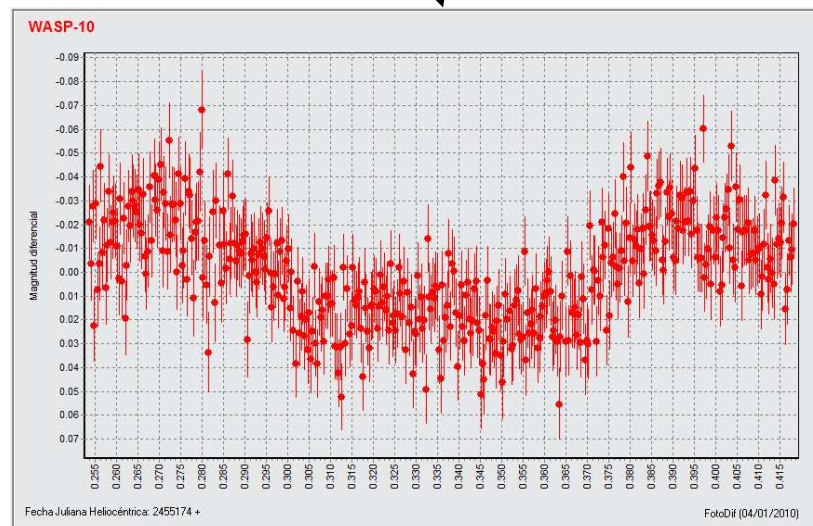


fig. 51: El gràfic té com a eix d'abscisses el transcurs del temps (en data Juliana o hores), i com a eix d'ordenades la diferència de magnitud de l'estrella invertida.

Es pot apreciar en la corba de llum la davallada de brillantor que sofreix l'astre i la posterior recuperació, característiques del trànsit d'un exoplaneta.



ANNEX IV

4.1 Llista d'exoplanetes descoberts:

Font: <http://exoplanet.eu/catalog-all.php>

Actualització: **11 de gener del 2011**

Noms dels exoplanetes ordenats per ordre alfabètic:

EXOPLANETA	MASSA (M_J)	RADI (R_J)	PERÍODE (dies)	SEMIEIX (UA)	EXC.	INCL. (deg.)	DESCOBR. (any)
11 UMi b	10,5		516,22	1,54	0,08		2009
14 And b	4,8		185,84	0,83	0		2008
14 Her b	4,64		1773,4	2,77	0,369		2002
16 Cyg B b	1,68		799,5	1,68	0,689		1996
18 Del b	10,3		993,3	2,6	0,08		2008
1RXS1609 b	8	1,7		330			2008
24 Sex b	1,99		452,8	1,333	0,09		2010
24 Sex c	0,86		883	2,08	0,29		2010
2M J044144 b	7,5			15			2010
2M1207 b	4			46			2004
30 Ari B b	9,88		335,1	0,995	0,289		2009
4 Uma b	7,1		269,3	0,87	0,432		2007
42 Dra b	3,88		479,1	1,19	0,38		2009
47 Uma b	2,53		1078	2,1	0,032		1996
47 Uma c	0,54		2391	3,6	0,098		2001
47 Uma d	1,64		14002	11,6	0,16		2010
51 Peg b	0,468		4,23077	0,052	0	79	1995
55 Cnc b	0,824		14,651262	0,115	0,0159		1996
55 Cnc c	0,169		44,3446	0,24	0,053		2002
55 Cnc d	3,835		5218	5,77	0,025		2002
55 Cnc e	0,024		2,81705	0,038	0,07		2004
55 Cnc f	0,144		260,7	0,785	0,0002		2007
6 Lyn b	2,4		899	2,2	0,134		2008
61 Vir b	0,016		4,215	0,050201	0,12		2009
61 Vir c	0,0573		38,021	0,2175	0,14		2009
61 Vir d	0,072		123,01	0,476	0,35		2009
70 Vir b	6,6		116,67	0,48	0,43		1996
81 Cet b	5,3		952,7	2,5	0,206		2008
91 Aqr b	2,9		182	0,3			2003
AB Pic b	13,5			275			2005
BD-082823 b	0,045		5,6	0,056	0,15		2009
BD-082823 c	0,33		237,6	0,68	0,19		2009
BD-10 3166 b	0,48		3,487	0,046	0,05		2000
BD-17 63 b	5,1		655,6	1,34	0,54		2008
BD14 4559 b	1,47		268,94	0,777	0,29		2009



BD20 2457 b	21,42		379,63	1,45	0,15		2009
BD20 2457 c	12,47		621,99	2,01	0,18		2009
beta Pic b	8		6000	12			2008
CoRoT-1 b	1,03	1,49	1,5089557	0,0254	0	85,1	2007
CoRoT-10 b	2,75	0,97	13,2406	0,1055	0,53	88,55	2010
CoRoT-11 b	2,33	1,43	2,99433	0,0436	0	83,17	2010
CoRoT-12 b	0,917	1,44	2,828042	0,04016	0,07	85,48	2010
CoRoT-13 b	1,308	0,885	4,03519	0,051	0	88,02	2010
CoRoT-14 b	7,6	1,09	1,51214	0,027	0	79,6	2010
CoRoT-16 b	0,5	0,813	5,3534208			85,82	2010
CoRoT-17 b	2,45	1,47	3,768125			77,47	2010
CoRoT-2 b	3,31	1,465	1,7429964	0,0281	0	87,84	2007
CoRoT-3 b	21,66	1,01	4,2568	0,057	0	85,9	2008
CoRoT-4 b	0,72	1,19	9,20205	0,09	0	90	2008
CoRoT-5 b	0,467	1,388	4,0378962	0,04947	0,09	85,83	2008
CoRoT-6 b	2,96	1,166	8,886593	0,0855	0,1	89,07	2009
CoRoT-7 b	0,0151	0,15	0,853585	0,0172	0	80,1	2009
CoRoT-7 c	0,0264		3,698	0,046	0		2009
CoRoT-8 b	0,22	0,57	6,21229	0,063	0	88,4	2010
CoRoT-9 b	0,84	1,05	95,2738	0,407	0,11	89,9	2010
CT Cha b	17	2,2		440			2008
DP Leo b	6,05		10230	8,19	0,39		2009
eps Eridani b	1,55		2502	3,39	0,702	30,1	2000
eps Tau b	7,6		594,9	1,93	0,151		2007
Fomalhaut b	3		320000	115	0,11		2008
gamma 1 Leo b	8,78		428,5	1,19	0,144		2009
gamma Cephei b	1,6		902,9	2,044	0,115		2003
GJ 1214 b	0,02	0,245	1,58040482	0,014	0,27	88,8	2009
GJ 176 b	0,0265		8,7836	0,066	0		2007
GJ 3021 b	3,37		133,71	0,49	0,511		2000
GJ 317 b	1,2		692,9	0,95	0,193		2007
GJ 433 b	0,019		7				2009
GJ 436 b	0,0737	0,365	2,6438986	0,02887	0,15	85,8	2004
GJ 667C b	0,018		7				2009
GJ 674 b	0,037		4,6938	0,039	0,2		2007
GJ 676A b	4,9		1056,8	1,82	0,326		2009
GJ 832 b	0,64		3416	3,4	0,12		2008
Gj 849 b	0,82		1890	2,35	0,06		2006
Gl 179 b	0,82		2288	2,41	0,21		2010
Gl 581 b	0,0492		5,36874	0,041	0		2005
Gl 581 c	0,01686		12,9292	0,07	0,17		2007
Gl 581 d	0,02231		66,8	0,22	0,38		2007
Gl 581 e	0,006104		3,14942	0,03	0		2009
Gl 649 b	0,328		598,3	1,135	0,3		2009
Gl 785 b	0,068		74,39	0,319	0,3		2010
Gl 86 b	4,01		15,766	0,11	0,046		2000
Gliese 876 b	2,2756		61,1166	0,208317	0,0324	48,93	2000



Gliese 876 c	0,7142		30,0881	0,12959	0,25591	48,07	2000
Gliese 876 d	0,021		1,93778	0,02080665	0,207	50	2005
Gliese 876 e	0,046		124,26	0,3343	0,055	59,5	2010
GQ Lup b	21,5	1,8		103			2005
GSC 06214-00210 b	13,5			320			2010
HAT-P-1 b	0,524	1,217	4,4652934	0,05535	0,067	86,28	2006
HAT-P-11 b	0,081	0,452	4,887804	0,053	0,198	88,5	2009
HAT-P-12 b	0,211	0,959	3,2130598	0,0384	0		2009
HAT-P-13 b	0,85	1,28	2,916293	0,0426	0,0142	83,3	2009
HAT-P-13 c	14,5		448,2	1,186	0,666		2009
HAT-P-14 b	2,2	1,2	4,627657	0,0594	0,095	83,2	2010
HAT-P-15 b	1,946	1,072	10,863502	0,0964	0,19	89,1	2010
HAT-P-16 b	4,193	1,289	2,77596	0,0413	0,036	86,6	2010
HAT-P-17 b	0,53	1,01	10,338523	0,0882	0,346	89,2	2010
HAT-P-17 c	1,4		1798	2,75	0,1		2010
HAT-P-18 b	0,197	0,995	5,508023	0,0559	0,084	88,8	2010
HAT-P-19 b	0,292	1,132	4,008778	0,0466	0,067	88,2	2010
HAT-P-2 b	8,74	1,19	5,6334729	0,0674	0,5171	86,72	2007
HAT-P-20 b	7,246	0,867	2,875317	0,0361	0,015	86,8	2010
HAT-P-21 b	4,063	1,024	4,124461	0,0494	0,228	87,2	2010
HAT-P-22 b	2,147	1,08	3,21222	0,0414	0,016	86,9	2010
HAT-P-23 b	2,09	1,368	1,212884	0,0232	0,106	85,1	2010
HAT-P-24 b	0,685	1,242	3,35524	0,0465	0,067	88,6	2010
HAT-P-25 b	0,567	1,19	3,652836	0,0466	0,032	87,6	2010
HAT-P-26 b	0,059	0,565	4,234516	0,0479	0,124	88,6	2010
HAT-P-3 b	0,599	0,89	2,899703	0,03894	0	87,24	2007
HAT-P-4 b	0,68	1,27	3,0565114	0,0446	0	89,67	2007
HAT-P-5 b	1,06	1,26	2,788491	0,04075	0	86,75	2007
HAT-P-6 b	1,057	1,33	3,852985	0,05235	0	85,51	2007
HAT-P-7 b	1,8	1,421	2,2047298	0,0379	0	84,1	2008
HAT-P-8 b	1,52	1,5	3,07632	0,0487	0	87,8	2008
HAT-P-9 b	0,78	1,4	3,922814	0,053	0	86,5	2008
HD 100777 b	1,16		383,7	1,03	0,36		2007
HD 10180 c	0,041217		5,75979	0,0641	0,045		2010
HD 10180 d	0,03696945		16,3579	0,1286	0,088		2010
HD 10180 e	0,07897304		49,745	0,2699	0,026		2010
HD 10180 f	0,07519743		122,76	0,4929	0,135		2010
HD 10180 g	0,06733159		601,2	1,422	0,19		2010
HD 10180 h	0,202624		2222	3,4	0,08		2010
HD 101930 b	0,3		70,46	0,302	0,11		2005
HD 102117 b	0,172		20,67	0,1532	0,106		2004
HD 102195 b	0,45		4,113775	0,049	0		2005
HD 102272 b	5,9		127,58	0,614	0,05		2008
HD 102272 c	2,6		520	1,57	0,68		2008
HD 102956 b	0,96		6,495	0,081	0,048		2010
HD 103197 b	0,098		47,84	0,249	0		2009
HD 104067 b	0,16		55,8				2009



HD 104985 b	6,3		198,2	0,78	0,03		2003
HD 106252 b	7,56		1600	2,7	0,47		2002
HD 10647 b	0,93		1003	2,03	0,1		2003
HD 10697 b	6,38		1076,4	2,16	0,1	69	2000
HD 107148 b	0,21		48,056	0,269	0,05		2006
HD 108147 b	0,261		10,8985	0,102	0,53		2002
HD 108874 b	1,36		395,4	1,051	0,07		2003
HD 108874 c	1,018		1605,8	2,68	0,25		2005
HD 109246 b	0,77		68,27	0,33	0,12		2010
HD 109749 b	0,28		5,24	0,0635	0,01		2005
HD 110014 b	11,09		835,477	2,14	0,462		2009
HD 111232 b	6,8		1143	1,97	0,2		2004
HD 113538 b	0,27		263,3	0,71	0,61		2010
HD 113538 c	0,71		1657	2,43	0,32		2010
HD 114386 b	1,24		937	1,65	0,23		2003
HD 114729 b	0,84		1135	2,08	0,32		2002
HD 114762 b	11,68		83,8881	0,363	0,3359		1989
HD 114783 b	1		501	1,2	0,1		2001
HD 11506 b	3,44		1270	2,43	0,22		2007
HD 11506 c	0,82		170,46	0,639	0,42		2009
HD 117207 b	2,06		2627,08	3,78	0,16		2004
HD 117618 b	0,178		25,827	0,176	0,42		2004
HD 118203 b	2,13		6,1335	0,07	0,309		2005
HD 11964 b	0,622		1945	3,16	0,041		2005
HD 11964 c	0,079		37,91	0,229	0,3		2005
HD 11977 b	6,54		711	1,93	0,4		2005
HD 121504 b	1,22		63,33	0,33	0,03		2003
HD 122430 b	3,71		344,95	1,02	0,68		2003
HD 125595 b	0,045		9,67				2009
HD 125612 b	3		502	1,37	0,46		2007
HD 125612 c	0,058		4,1547	0,05	0,27		2009
HD 125612 d	7,2		3008	4,2	0,28		2009
HD 12661 b	2,3		263,6	0,83	0,377		2000
HD 12661 c	1,57		1708	2,56	0,031		2002
HD 126614 b	0,38		1244	2,35	0,41		2010
HD 128311 b	2,18		448,6	1,099	0,25		2002
HD 128311 c	3,21		919	1,76	0,17		2005
HD 129445 b	1,6		1840	2,9	0,7		2010
HD 130322 b	1,02		10,72	0,088	0,044	76	1999
HD 131664 b	18,15		1951	3,17	0,638		2008
HD 13189 b	14		471,6	1,85	0,27		2005
HD 132406 b	5,61		974	1,98	0,34		2007
HD 134987 b	1,59		258,19	0,81	0,233		1999
HD 134987 c	0,82		5000	5,8	0,12		2009
HD 136418 b	2		464,3	1,32	0,255		2010
HD 13931 b	1,88		4218	5,15	0,02		2010
HD 139357 b	9,76		1125,7	2,36	0,1		2009



HD 141937 b	9,7		653,22	1,52	0,41		2002
HD 142 b	1,03		339	1	0,37		2001
HD 142022 A b	5,1		1928	3,03	0,53		2005
HD 142415 b	1,62		386,3	1,05	0,5		2003
HD 143361 b	3,12		1057	2	0,15		2008
HD 145377 b	5,76		103,95	0,45	0,307		2008
HD 145457 b	2,9		176,3	0,76	0,112		2010
HD 1461 b	0,0239		5,7727	0,063438	0,14		2009
HD 147018 b	2,12		44,236	0,2388	0,4686		2009
HD 147018 c	6,56		1008	1,922	0,133		2009
HD 147513 b	1,21		528,4	1,32	0,26		2003
HD 148156 b	0,85		1010	2,45	0,52		2009
HD 148427 b	0,96		331,5	0,93	0,16		2009
HD 149026 b	0,356	0,61	2,8758887	0,04288	0	85,3	2005
HD 149143 b	1,36		4,088	0,052	0		2005
HD 149382 b	15,5		2,391	0,0256	0	39	2009
HD 152079 b	3		2097	3,2	0,6		2010
HD 153950 b	2,73		499,4	1,28	0,34		2008
HD 154345 b	0,947		3340	4,19	0,044	50	2006
HD 154672 b	5,02		163,91	0,6	0,61		2008
HD 154857 b	1,8		409	1,2	0,47		2004
HD 155358 b	0,89		195	0,628	0,112		2007
HD 155358 c	0,504		530,3	1,224	0,176		2007
HD 156411 b	0,74		842,2	1,88	0,22		2009
HD 156668 b	0,0131		4,646	0,05	0		2010
HD 156846 b	10,45		359,51	0,99	0,8472		2007
HD 159868 b	1,7		986	2	0,69		2007
HD 16141 b	0,215		75,82	0,35	0,28		2000
HD 16175 b	4,4		990	2,1	0,59		2007
HD 162020 b	14,4		8,428198	0,074	0,277		2002
HD 16417 b	0,069		17,24	0,14	0,2		2009
HD 164604 b	2,7		606,4	1,13	0,24		2010
HD 164922 b	0,36		1155	2,11	0,05		2006
HD 167042 b	1,6		416,1	1,3	0,03		2007
HD 16760 b	14,3		465,1	1,13	0,067		2009
HD 168443 b	8,02		58,11289	0,3	0,5286		1998
HD 168443 c	18,1		1765,8	2,91	0,2125		2001
HD 168746 b	0,23		6,403	0,065	0,081		2002
HD 1690 b	6,1		533	1,3	0,64		2010
HD 169830 b	2,88		225,62	0,81	0,31		2000
HD 169830 c	4,04		2102	3,6	0,33		2003
HD 170469 b	0,67		1145	2,24	0,11		2007
HD 17092 b	4,6		359,9	1,29	0,166		2007
HD 171028 b	1,98		550	1,32	0,59		2007
HD 171238 b	2,6		1523	2,54	0,4		2009
HD 17156 b	3,191	1,095	21,2163979	0,1623	0,6768	86,49	2007
HD 173416 b	2,7		323,6	1,16	0,21		2009



HD 175167 b	7,8		1290	2,4	0,54		2010
HD 175541 b	0,61		297,3	1,03	0,33		2007
HD 176051 b	1,5		1016	1,76	0		2010
HD 177830 b	1,49		406,6	1,2218	0,0009		1999
HD 177830 c	0,15		110,9	0,5137	0,3495		2010
HD 178911 B b	6,292		71,487	0,32	0,1243		2001
HD 179079 b	0,08		14,476	0,11	0,115		2009
HD 179949 b	0,95		3,0925	0,045	0,022		2000
HD 180902 b	1,6		479	1,39	0,09		2010
HD 181342 b	3,3		663	1,78	0,177		2010
HD 181433 b	0,0238		9,3743	0,08	0,396		2008
HD 181433 c	0,64		962	1,76	0,28		2008
HD 181433 d	0,54		2172	3	0,48		2008
HD 181720 b	0,37		956	1,78	0,26		2009
HD 183263 b	3,67		626,5	1,51	0,357		2004
HD 183263 c	3,82		2950	4,25	0,253		2008
HD 185269 b	0,94		6,838	0,077	0,3		2006
HD 187085 b	0,75		986	2,05	0,47		2006
HD 187123 b	0,52		3,0965828	0,0426	0,01		1998
HD 187123 c	1,99		3810	4,89	0,252		1998
HD 188015 b	1,26		456,46	1,19	0,15		2004
HD 189733 b	1,15	1,151	2,2185733	0,03142	0	85,76	2005
HD 190360 b	1,502		2891	3,92	0,36		2003
HD 190360 c	0,057		17,1	0,128	0,01		2005
HD 190647 b	1,9		1038,1	2,07	0,18		2007
HD 190984 b	3,1		4885	5,5	0,57		2009
HD 192263 b	0,72		24,348	0,15	0		1999
HD 192699 b	2,5		351,5	1,16	0,149		2007
HD 195019 b	3,7		18,20163	0,1388	0,014		1998
HD 196050 b	2,83		1316,24	2,47	0,21		2002
HD 196885 b	2,58		1333	2,37	0,462		2007
HD 19994 b	1,68		535,7	1,42	0,3		2003
HD 200964 b	1,85		613,8	1,601	0,04		2010
HD 200964 c	0,9		825	1,95	0,181		2010
HD 202206 b	17,4		255,87	0,83	0,435		2002
HD 202206 c	2,44		1383,4	2,55	0,267		2004
HD 20367 b	1,07		500	1,25	0,23		2002
HD 2039 b	4,9		1183	2,2	0,67		2002
HD 204313 b	4,05		1931	3,082	0,131		2009
HD 205739 b	1,37		279,8	0,896	0,27		2008
HD 206610 b	2,2		610	1,68	0,229		2010
HD 20782 b	1,9		591,9	1,381	0,97		2006
HD 208487 b	0,413		129,8	0,51	0,21		2004
HD 20868 b	1,99		380,85	0,947	0,75		2008
HD 209458 b	0,714	1,38	3,52474859	0,04747	0,014	86,59	1999
HD 210277 b	1,23		442,1	1,1	0,472		1998
HD 210702 b	2		341,1	1,17	0,152		2007



HD 212301 b	0,45		2,245715	0,036	0		2005
HD 212771 b	2,3		373,3	1,22	0,111		2010
HD 213240 b	4,5		951	2,03	0,45		2001
HD 215497 b	0,02		3,93404	0,047	0,16		2009
HD 215497 c	0,33		567,94	1,282	0,49		2009
HD 216435 b	1,26		1311	2,56	0,07		2002
HD 216437 b	1,82		1256	2,32	0,29		2002
HD 216770 b	0,65		118,45	0,46	0,37		2003
HD 217107 b	1,33		7,12689	0,073	0,132		1998
HD 217107 c	2,49		4210	5,27	0,517		1998
HD 217786 b	13		1319	2,38	0,4		2010
HD 218566 b	0,21		225,7	0,6873	0,3		2010
HD 219828 b	0,066		3,8335	0,052	0		2007
HD 221287 b	3,09		456,1	1,25	0,08		2007
HD 222582 b	7,75		572,38	1,35	0,725		1999
HD 224693 b	0,71		26,73	0,233	0,05		2006
HD 23079 b	2,5		626	1,5	0,02		2001
HD 23127 b	1,5		1214	2,4	0,44		2007
HD 231701 b	1,08		141,6	0,53	0,1		2007
HD 23596 b	8,1		1565	2,88	0,292		2002
HD 240210 b	6,9		501,75	1,33	0,15		2009
HD 25171 b	0,95		1845	3,02	0,08		2010
HD 2638 b	0,48		3,4442	0,044	0		2005
HD 27442 b	1,35		415,2	1,16	0,058		2000
HD 27894 b	0,62		17,991	0,122	0,049		2005
HD 28185 b	5,7		383	1,03	0,07		2001
HD 28254 b	1,16		1116	2,15	0,81		2009
HD 290327 b	2,54		2443	3,43	0,08		2009
HD 30177 b	7,7		1620	2,6	0,22		2002
HD 30562 b	1,29		1157	2,3	0,76		2009
HD 31253 b	0,5		466	1,26	0,3		2010
HD 32518 b	3,04		157,54	0,59	0,01		2009
HD 330075 b	0,62		3,38773	0,039	0		2004
HD 33283 b	0,33		18,179	0,168	0,48		2006
HD 33564 b	9,1		388	1,1	0,34		2005
HD 34445 b	0,79		1049	2,07	0,27		2004
HD 3651 b	0,2		62,23	0,284	0,63	83	2003
HD 37124 b	0,675		154,378	0,53364	0,054		1999
HD 37124 c	0,652		885,5	1,71	0,125		2005
HD 37124 d	0,696		1862	2,807	0,16		2003
HD 37605 b	2,84		55,23	0,26	0,737		2004
HD 38529 b	0,78		14,3104	0,131	0,248		2000
HD 38529 c	17,7		2134,76	3,695	0,36	48,3	2002
HD 38801 b	10,7		696,3	1,7	0		2010
HD 39091 b	10,3		2049	3,28	0,61		2001
HD 40307 b	0,0132		4,3115	0,047	0		2008
HD 40307 c	0,0216		9,62	0,081	0		2008



HD 40307 d	0,0288		20,46	0,134	0		2008
HD 40979 b	3,28		263,1	0,83	0,25		2002
HD 41004 A b	2,54		963	1,64	0,39		2004
HD 41004 B b	18,4		1,3283	0,0177	0,081		2004
HD 4113 b	1,56		526,62	1,28	0,903		2007
HD 4203 b	2,07		431,88	1,164	0,519		2001
HD 4208 b	0,8		829	1,7	0,04		2001
HD 4308 b	0,0405		15,609	0,118	0,27		2005
HD 4313 b	2,3		356	1,19	0,041		2010
HD 43197 b	0,6		327,8	0,92	0,83		2009
HD 43691 b	2,49		36,96	0,24	0,14		2007
HD 44219 b	0,58		472,3	1,19	0,61		2009
HD 45350 b	1,79		890,76	1,92	0,778		2004
HD 45364 b	0,1872		226,93	0,6813	0,1684		2009
HD 45364 c	0,6579		342,85	0,8972	0,0974		2009
HD 45652 b	0,47		43,6	0,23	0,38		2008
HD 46375 b	0,249		3,024	0,041	0,04		2000
HD 47186 b	0,07167		4,0845	0,05	0,038		2008
HD 47186 c	0,35061		1353,6	2,395	0,249		2008
HD 47536 b	5		430	1,61	0,2		2003
HD 47536 c	7		2500				2007
HD 48265 b	1,16		700	1,51	0,18		2008
HD 49674 b	0,115		4,9437	0,058	0,23		2002
HD 50499 b	1,71		2482,7	3,86	0,23		2005
HD 50554 b	5,16		1293	2,41	0,5		2002
HD 52265 b	1,05		119,6	0,5	0,35		2000
HD 5319 b	1,94		675	1,75	0,12		2007
HD 5388 b	1,96		777	1,76	0,4		2009
HD 59686 b	5,25		303	0,911			2003
HD 60532 b	3,15		201,83	0,77	0,278	20	2008
HD 60532 c	7,46		607,06	1,58	0,038	20	2008
HD 62509 b	2,9		589,64	1,69	0,02		2006
HD 63454 b	0,38		2,817822	0,036	0		2005
HD 63765 b	0,69		356				2009
HD 6434 b	0,39		21,998	0,14	0,17		2000
HD 65216 b	1,21		613,1	1,37	0,41		2003
HD 66428 b	2,82		1973	3,18	0,465		2006
HD 6718 b	1,56		2496	3,56	0,1		2009
HD 68988 b	1,9		6,276	0,071	0,14		2001
HD 69830 b	0,033		8,667	0,0785	0,1	13	2006
HD 69830 c	0,038		31,56	0,186	0,13	13	2006
HD 69830 d	0,058		197	0,63	0,07	13	2006
HD 70573 b	6,1		851,8	1,76	0,4		2007
HD 70642 b	2		2231	3,3	0,1		2003
HD 72659 b	3,15		3658	4,74	0,22		2002
HD 73256 b	1,87		2,54858	0,037	0,029		2003
HD 73267 b	3,06		1260	2,198	0,256		2008



HD 73526 b	2,9		188,3	0,66	0,19		2002
HD 73526 c	2,5		377,8	1,05	0,14		2006
HD 73534 b	1,15		1800	3,15	0,046		2009
HD 74156 b	1,88		51,65	0,294	0,64		2003
HD 74156 c	8,03		2476	3,4	0,43		2003
HD 75289 b	0,42		3,5098	0,046	0,024		1999
HD 75898 b	2,51		418,2	1,19	0,1		2007
HD 76700 b	0,197		3,971	0,049	0		2002
HD 7924 b	0,029		5,3978	0,057	0,17		2009
HD 80606 b	3,94	0,921	111,43637	0,449	0,93366	89,285	2003
HD 81040 b	6,86		1001,7	1,94	0,526		2005
HD 81688 b	2,7		184,02	0,81	0		2008
HD 82943 b	1,75		441,2	1,19	0,219		2003
HD 82943 c	2,01		219	0,746	0,359		2003
HD 83443 b	0,4		2,985625	0,0406	0,008		2002
HD 8535 b	0,68		1313	2,45	0,15		2009
HD 85390 b	0,132		788	1,52	0,41		2009
HD 8574 b	2,11		227,55	0,77	0,288		2003
HD 86081 b	1,5		2,1375	0,039	0,008		2006
HD 86226 b	1,5		1534	2,6	0,73		2010
HD 86264 b	7		1475	2,86	0,7		2009
HD 8673 b	14,2		1634	3,02	0,723		2010
HD 87883 b	1,78		2754	3,6	0,53		2009
HD 88133 b	0,22		3,416	0,047	0,133		2004
HD 89307 b	1,78		2157	3,27	0,241		2004
HD 89744 b	7,2		256	0,88	0,7	54	2000
HD 90156 b	0,057		49,77	0,25	0,31		2009
HD 92788 b	3,86		325,81	0,97	0,334	8	2000
HD 93083 b	0,37		143,58	0,477	0,14		2005
HD 9446 b	0,7		30,052	0,189	0,2		2010
HD 9446 c	1,82		192,9	0,654	0,06		2010
HD 95089 b	1,2		507	1,51	0,157		2010
HD 9578 b	0,62		494				2009
HD 96167 b	0,68		498,9	1,3	0,71		2009
HD 97658 b	0,026		9,494	0,0831	0		2010
HD 99109 b	0,502		439,3	1,105	0,09		2006
HD 99492 b	0,109		17,0431	0,1232	0,254		2004
HD 99492 c	0,36		4970	5,4	0,106		2010
HIP 12961 b	0,35		57,435	0,25	0,166		2009
HIP 13044 b	1,25		16,2	0,116	0,25		2010
HIP 14810 b	3,88		6,673855	0,0692	0,1427		2006
HIP 14810 c	1,28		147,73	0,545	0,164		2006
HIP 14810 d	0,57		962	1,89	0,173		2009
HIP 5158 b	1,42		345,72	0,89	0,52		2009
HIP 57050 b	0,298		41,397	0,163506	0,314		2010
HIP 70849 b	5		3000				2009
HIP 75458 b	8,82		510,702	1,275	0,713		2002



HIP 79431 b	2,1		111,7	0,36	0,29		2010
HR 810 b	2,26		320,1	0,925	0,161		1999
HR 8799 b	7	1,1	170000	68	0,4		2008
HR 8799 c	10	1,3	69000	38	0,4		2008
HR 8799 d	10	1,2	36500	24	0,4		2008
HR 8799 e	9		18000	14,5			2010
HW Vir b	19,2		5767	5,3			2008
HW Vir c	8,5		3321	3,62			2008
kappa CrB b	1,8		1191	2,7	0,19		2007
Kepler-10 b	0,0143	0,127	0,837495	0,01684	0	84,4	2011
Kepler-4 b	0,077	0,357	3,21346	0,0456	0	89,76	2010
Kepler-5 b	2,114	1,431	3,54846	0,05064	0	86,3	2010
Kepler-6 b	0,669	1,323	3,23423	0,04567	0	86,8	2010
Kepler-7 b	0,433	1,478	4,885525	0,06224	0	86,5	2010
Kepler-8 b	0,603	1,419	3,52254	0,0483	0	84,07	2010
Kepler-9 b	0,252	0,842	19,243158	0,14		88,55	2010
Kepler-9 c	0,171	0,823	38,90861	0,225		88,12	2010
Kepler-9 d	0,022	0,147	1,592851	0,0273			2010
KOI-428 b	2,2	1,17	6,87349	0,08	0	89,7	2010
ksi Aql b	2,8		136,75	0,68	0		2008
Lupus-TR-3 b	0,81	0,89	3,91405	0,0464	0	88,3	2007
MOA-2007-BLG-192-L b	0,01			0,66			2008
MOA-2007-BLG-400-L b	0,9			0,85			2008
MOA-2008-BLG-310-L b	0,23			1,25			2009
MOA-2009-BLG-319 b	0,157			2			2010
mu Ara b	1,676		643,25	1,5	0,128		2000
mu Ara c	0,03321		9,6386	0,09094	0,172		2004
mu Ara d	0,5219		310,55	0,921	0,0666		2004
mu Ara e	1,814		4205,8	5,235	0,0985		2006
NGC 2423 3 b	10,6		714,3	2,1	0,21		2007
NGC 4349 No 127 b	19,8		677,8	2,38	0,19		2007
NN Ser (ab) c	6,91		5660	5,38	0		2010
NN Ser (ab) d	2,28		2830	3,39	0,2		2009
nu Oph b	22,3		536	1,8	0,13		2004
nu Oph c	24,5		3169	5,88	0,18		2010
OGLE-05-071L b	3,5		3600	3,6			2005
OGLE-05-169L b	0,04		3300	2,8			2005
OGLE-05-390L b	0,017		3500	2,1			2005
OGLE-06-109L b	0,727		1790	2,3		64	2008
OGLE-06-109L c	0,271		4931	4,5	0,15	64	2008
OGLE-2007-BLG-368L b	0,0694			3,3			2008
OGLE-TR-10 b	0,68	1,72	3,10129	0,04162	0	84,5	2004
OGLE-TR-111 b	0,54	1,077	4,01451	0,047	0	88,1	2004
OGLE-TR-113 b	1,24	1,11	1,4324772	0,0229	0	89,4	2004
OGLE-TR-132 b	1,17	1,23	1,689868	0,0306	0	83,4	2004
OGLE-TR-182 b	1,06	1,47	3,9791	0,051	0	85,7	2007
OGLE-TR-211 b	0,75	1,26	3,67724	0,051	0	87,2	2007



OGLE-TR-56 b	1,3	1,2	1,211909	0,0225	0	78,8	2002
OGLE2-TR-L9 b	4,34	1,614	2,4855335	0,0308		79,8	2007
OGLE235-MOA53 b	2,6			5,1			2004
PSR 1257 12 b	7,00E-05		25,262	0,19	0		1992
PSR 1257 12 c	0,013		66,5419	0,36	0,0186	53	1992
PSR 1257 12 d	0,012		98,2114	0,46	0,0252	47	1992
PSR B1620-26 b	2,5		36525	23			1994
Qatar-1 b	1,09	1,164	1,420033	0,02343	0	83,47	2010
rho CrB b	1,04		39,645	0,22	0,028		1997
SWEEPS-04	3,8	0,81	4,2	0,055		87	2006
SWEEPS-11	9,7	1,13	1,796	0,03		84	2006
tau Boo b	3,9		3,3135	0,046	0,018		1996
tau Gem b	18,1		305				2004
TrES-1	0,761	1,099	3,0300722	0,0393	0	88,4	2004
TrES-2	1,253	1,169	2,470614	0,03556	0	83,62	2006
TrES-3	1,91	1,305	1,30618608	0,0226	0	82,15	2007
TrES-4	0,877	1,81	3,553945	0,05091	0	82,86	2007
ups And b	0,69		4,617136	0,059	0,013	30	1996
ups And c	14,57		237,7	0,861	0,24	16,7	1999
ups And d	10,19		1302,61	2,55	0,274	13,5	1999
ups And e	1,059		3848,86	5,2456	0,00536		2010
UScoCTIO 108 b	14			670			2007
V391 Peg b	3,2		1170	1,7	0		2007
WASP-1 b	0,86	1,484	2,5199449	0,0382	0	88,65	2006
WASP-10 b	3,06	1,08	3,0927616	0,0371	0,057	86,8	2008
WASP-11/HAT-P-10 b	0,46	1,045	3,722469	0,0439	0	88,5	2008
WASP-12 b	1,41	1,79	1,091435	0,0229	0,017	83,1	2008
WASP-13 b	0,46	1,21	4,35298	0,0527	0	86,9	2008
WASP-14 b	7,725	1,259	2,2437704	0,037	0,0903	84,79	2008
WASP-15 b	0,542	1,428	3,7520656	0,0499	0	85,5	2008
WASP-16 b	0,855	1,008	3,1186009	0,0421	0	85,22	2009
WASP-17 b	0,49	1,74	3,7354417	0,051	0,129	87,8	2009
WASP-18 b	10,43	1,165	0,9414518	0,02047	0,0088	86	2009
WASP-19 b	1,15	1,31	0,7888399	0,0164	0,02	80,8	2009
WASP-2 b	0,847	1,079	2,1522254	0,03138	0	84,73	2006
WASP-21 b	0,3	1,07	4,322482	0,052	0	88,75	2010
WASP-22 b	0,56	1,12	3,53269	0,0468	0,023	89,2	2010
WASP-23 b	0,87	0,96	2,94				2010
WASP-24 b	1,032	1,104	2,3412083	0,0359	0	83,64	2010
WASP-25 b	0,58	1,26	3,76483	0,0474	0	87,7	2010
WASP-26 b	1,02	1,32	2,7566	0,04	0	82,5	2010
WASP-28 b	0,91	1,12	3,408821	0,0455	0,046	89,1	2010
WASP-29 b	0,244	0,792	3,922727	0,0457	0,03	88,8	2010
WASP-3 b	2,06	1,454	1,846837	0,0313	0	85,06	2007
WASP-31 b	0,478	1,537	3,405909	0,04657	0	84,54	2010
WASP-32 b	3,6	1,18	2,71865	0,0394	0,018	85,3	2010
WASP-33 b	4,1	1,497	1,2198669	0,02555		87,67	2010



WASP-34 b	0,59	1,22	4,3176782	0,0524	0,038	85,2	2010
WASP-36 b	2,4	1,4	1,5				2010
WASP-37 b	1,696	1,136	3,577471	0,04339	0	88,78	2010
WASP-38 b	2,712	1,079	6,871815	0,07551	0,0321	88,69	2010
WASP-4 b	1,1215	1,416	1,3382282	0,023	0	89,35	2007
WASP-41 b	0,92	1,21	3,052394	0,04	0	87,3	2010
WASP-5 b	1,637	1,171	1,6284246	0,02729	0	85,8	2007
WASP-6 b	0,503	1,224	3,361006	0,0421	0,054	88,47	2008
WASP-7 b	0,96	1,33	4,9546416	0,0617	0	87,03	2008
WASP-8 b	2,244	1,038	8,158715	0,0801	0,31	88,55	2008
XO-1 b	0,9	1,184	3,9415128	0,0488	0	89,31	2006
XO-2 b	0,57	0,973	2,615838	0,0369	0	88,58	2007
XO-3 b	11,79	1,217	3,1915239	0,0454	0,26	84,2	2007
XO-4 b	1,72	1,34	4,12502	0,0555	0	88,7	2008
XO-5 b	1,077	1,089	4,1877539	0,0487	0	86,8	2008