



EXOPLANETES:

*Infinitats mons similars i diferents al
nostre... o no*

MARIA DALMAU PEDREGOSA

INS PALAMÓS

22/12/2016

TUTORA: MONTSERRAT MARTÍNEZ

AGRAÏMENTS

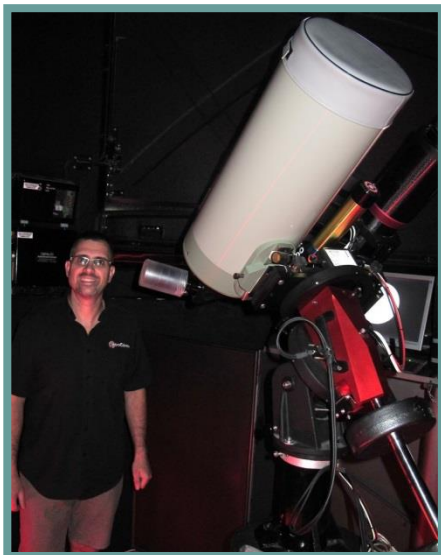
Aquest treball ha sigut possible gràcies a l'ajut i l'assessorament del Sr. Rafael Balaguer, president de l'Associació Astronòmica de Girona (Astrogirona).

Astrogirona compta amb dos observatoris astronòmics preparats amb instrumental de precisió per tal de portar a terme activitats de difusió i de recerca científica. Tots dos són a Llagostera, un al centre i l'altre en un mas proper al poble: Centre Cultural Can Roig i Mas Roig II. Centre d'interpretació de la sostenibilitat, respectivament. Per aquest treball he comptat, només, amb les instal·lacions del Centre Cultural Can Roig.

Moltes gràcies Rafa!

Evidentment la disposició i supervisió de la meva tutora Montserrat Martínez ha sigut imprescindible per dur a terme aquest treball, doncs ha estat disponible en tot moment, fins i tot durant les seves vacances.

Moltes gràcies Montse!



1. INTRODUCCIÓ.....	3
2. HIPÒTESIS I OBJECTIUS	4
3. DEFINICIÓ.....	5
4. ANTECEDENTS HISTÒRICS.....	6
5. TIPUS D'EXOPLANETES	9
5.1. Júpiter ardent	9
5.1.1. Llunes	10
5.2. Súper Terra.....	12
5.3. Neptú ardent	15
5.4. Subterra.....	15
5.5. Terrestre.....	16
6. 51 PEGASI B, EL PRIMER DESCOBRIMENT.....	17
7. MÈTODES DE DETECCIÓ D'EXOPLANETES	19
7.1. Velocitat radial.....	19
7.2. Astrometria	20
7.3. Trànsit	21
7.4. Microlents gravitatòries.....	22
7.5. Pertorbacions en discs circumestelars	22
7.6. Variació en el temps de trànsit (VTT)	23
7.7. Mesura dels polsos de ràdio d'un púlsar.....	23
7.8. Binària eclipsant	24
7.9. Detecció visual directa.....	24
8. POSSIBILITAT D'EXISTÈNCIA DE VIDA HUMANA	25
8.1. Habitabilitat planetària.....	25
8.2. Sistemes estel·lars aptes	25
8.2.1. Tipus espectral.....	26
8.2.2. Una zona d'habitabilitat estable.....	26
8.2.3. Baixa variació estel·lar	27
8.2.4. Alta metal·licitat	27
8.3. Exoplanetes aptes.....	28
8.3.1. Massa	28
8.3.2. Òrbita i rotació	29
8.3.3. Geoquímica	31
8.3.4. Microambients	32

8.4. Sistemes estel·lars alternatius.....	33
8.4.1. Sistemes binaris	33
8.4.2. Sistemes amb nana roja	34
8.5. El veïnatge galàctic	36
9. MÈTODE DEL TRÀNSIT	38
9.1. Profunditat del trànsit.....	38
9.2. Durada del trànsit, inclinació orbital i paràmetre d'impacte	39
9.3. Període de rotació	43
9.4. Forma del trànsit	44
10. PLANIFICACIÓ DE LES OBSERVACIONS	46
10.1. Aspectes previs.....	46
10.1.1. Equipament necessari	46
10.1.2. Resultats esperats	47
10.2. Eines per planificar l'observació.....	47
10.2.1. Conec el planeta que vull observar?	47
10.2.2. Conec la nit que puc observar?	53
11. FOTOMETRIA DIFERENCIAL – TEORIA	55
12. FOTOMETRIA DIFERENCIAL – REDUCCIÓ DE DADES	57
13. PRÀCTIQUES.....	66
13.1. Wasp-2b.....	66
13.1.1. Característiques planetàries	72
13.1.2. Característiques estel·lars.....	74
13.1.3. Habitabilitat planetària.....	74
13.2. TrES-3b	76
13.2.1. Característiques planetàries	81
13.2.2. Característiques estel·lars.....	83
13.2.3. Habitabilitat planetària.....	84
13.3. HD189733 b.....	86
13.3.1. Característiques planetàries	90
13.3.2. Característiques estel·lars.....	91
13.3.3. Habitabilitat planetària.....	91
14. CONCLUSIONS.....	95
15. WEBGRAFIA.....	96

1. INTRODUCCIÓ

L'astronomia ha sigut des de ja fa uns anys una disciplina que m'ha interessat molt. L'estudi del cosmos i altres cossos que constitueixen l'univers, els seus moviments i els fenòmens relacionats a aquests, així com també explorar el que hi ha més enllà dels nostres ulls, sentir la capacitat d'afrontar decepcions, alegries i satisfaccions, són emocions que els que en som uns apassionats sentim.

Al llarg de la història de la humanitat hi ha hagut diferents punts de vista respecte la forma i comportament del planeta on vivim, la Terra. Sorgiren idees que, de mica en mica, foren verificades o no amb l'estudi de l'astronomia fins arribar als coneixements que actualment adquirim. No obstant això, no ha sigut fàcil, han hagut de passar milers d'anys d'estudis.

Des que l'home arribà a la Lluna, crec que les persones començarem a sentir més interès i curiositat per saber què hi ha més enllà dels núvols quotidians, i és que a poc a poc l'home vol anar colonitzant el cosmos, tot i que és clar que encara falten molts anys perquè realment comprenem totalment la complexitat i grandiositat de l'univers, doncs encara existeixen patrons contradictoris que superen la ment humana.

Quan observo als astronautes davant d'una missió espacial (aprofito per recomanar el documental de les grans missions de la NASA del *Discovery Channel*) és increïble la tensió que s'aprecia ja que un simple error, per més petit que sigui, pot arruïnar un apassionant treball d'anys d'estudi i d'investigació. És inevitable, al menys per a mi, no sentir la mateixa emoció quan observo com un projecte astronòmic resulta exitós.

D'aquí unes dècades l'home colonitzarà Mart. Des d'avui, resulta apassionant recordar que l'astronomia és una ciència que ha estat lligada a l'ésser humà des de l'antiguitat. Des que el primer primitiu alçà la seva mirada al cel, totes les civilitzacions han tingut contacte amb aquesta ciència i per això la fa tan especial i intrigant, ja que sempre hi haurà coneixements nous per descobrir, doncs l'home no ha deixat mai de preguntar-se el per què de tanta complexitat i bellesa.

"Som part de l'Univers i l'Univers és part de nosaltres, des del seu origen fins al seu fi."
(Anònim)

Per tots aquests motius esmentats, vaig decidir fer el treball de recerca sobre qualsevol fenomen de l'espai tot i que, inicialment, no disposava dels recursos necessaris per realitzar la investigació. Així que, sent realistes, vaig haver d'abandonar la il·lusió que tenia i inspirar-me en algun altre projecte de recerca que estigués més al meu abast. Però un dia qualsevol, navegant per la xarxa, vaig descobrir l'observatori astronòmic Can Roig de Llagostera i vaig contactar amb el president. En Rafael em va oferir la meravellosa oportunitat de tenir a la meua disposició tot el material que necessités per realitzar la recerca, així com també va ser la primera persona que em va parlar dels exoplanetes i em va recomanar, sens dubte, investigar sobre aquests. Així que, molt emocionada, vaig començar a treballar!

2. HIPÒTESIS I OBJECTIUS

Parteixo de la següent hipòtesi:

Els exoplanetes existeixen i els de tipus terrestre són el més capaços de reunir les qualitats necessàries que els fan aptes per desenvolupar la vida, doncs aquests tenen un període i distància orbitals, així com també una climatologia semblants a les del nostre planeta Terra.

L'objectiu general del meu treball de recerca doncs, és demostrar l'existència dels exoplanetes i fer un estudi sobre la seva possible habitabilitat.

Com a mètode de treball seguiré el mètode científic, fent ús del material necessari com són els telescopis i els programes informàtics específics.

3. DEFINICIÓ

S'anomena exoplaneta o planeta extrasolar a un planeta que orbita al voltant d'una estrella diferent del Sol i que, per tant, no pertany al nostre sistema solar.

Cal destacar que aquest nou concepte es va demostrar científicament l'any 1992, amb el descobriment de diversos planetes de massa terrestre orbitant al voltant del púlsar¹ Lich, localitzat a la constel·lació de Virgo aproximadament a 980 anys llum de la Terra.

No obstant això, no fou fins l'any 1995 que es va demostrar experimentalment l'existència del primer exoplaneta, 51 Pegasi b, pels astrònoms Michel Mayor i Didier Queloz.

¹ Un púlsar és una estrella de neutrons que emet radiació periòdica. Els púlsars tenen un intens camp magnètic que indueix una emissió de radiació electromagnètica a intervals regulars relacionats amb el seu període de rotació.

4. ANTECEDENTS HISTÒRICS

“Infinitos mons similars i diferents al nostre... o no. Una pregunta tan antiga com la humanitat.”

Abans de ser confirmats l'any 1992, els exoplanetes han estat des de fa segles un tema de discussió i especulació.

La qüestió sobre l'existència d'altres mons ja es discutia a l'antiguitat. Les primeres afirmacions de les quals tenim coneixement daten a l'Antiga Grècia.

El filòsof Epicur de Samos (341 - 270 aC) afirmà el següent:

“Hi ha infinitos mons similars i diferents al nostre. Hem de creure que a tots els mons hi ha criatures i plantes, i altres coses que veiem en aquest món.”

Aristòtil (384 – 322 aC) també raonà sobre la hipotètica existència d'altres mons tot i que aquesta possibilitat no està present a la seva concepció geocèntrica.

Dos segles més tard, el filòsof romà Lucreci tornà a subscriure la qüestió de la pluralitat dels mons.

Durant l'Edat Mitjana, en un context poc favorable a noves idees, sonaren defenses de l'existència d'altres planetes:

“Existeixen molts mons o existeix un únic món? Aquesta és una de les més nobles i elevades qüestions plantejades a l'estudi de la naturalesa...”

Així, el teòleg Albert Magne (1193/1206 – 1280) juntament amb el seu deixeble Tomàs d'Aquino (1224/1225 – 1274), no dubtaren en plantejar la rellevància de la qüestió com a objecte d'estudi.

Nicolau Copèrnic (1473 – 1543) amb la seva publicació *De revolutionibus orbium coelestium* (*De les revolucions de les esferes celestes*) va posar fi a la visió geocèntrica del món, un pas necessari però no suficient encara perquè l'home considerés aquelles estrelles llunyanes com mons semblants al nostre.

No obstant això, l'heroi i màrtir dels visionaris de l'exoplanetologia fou el clergue Giordano Bruno (1548 – 1600), el qual, ajusticiat per la Inquisició, afirmà amb gran contundència el que avui intuïm amb certesa: la probable existència de mons infinits, en les seves obres *De l'infinito universo et mundi* (*De l'infinit univers i món*) i *De inmenso e innumerabilibus* (*L'immens i incontable*).

La visió heliocèntrica² del món afirmada per Copèrnic va anar guanyant terreny gràcies al treball basat en observacions com les de Tycho Brahe (1546 – 1601), Johannes Kepler (1571 – 1630) i Galileo Galilei (1564 – 1642).

L'obra de Galileo, *Sidereus Nuncius (Missatger sideral)*, publicada l'any 1610 va mostrar altres mons fora d'aquest en descobrir la presència de muntanyes a la Lluna i l'existència dels satèl·lits de Júpiter. Igualment Kepler, a la seva obra *Dissertatio*, es preguntà sobre l'habitabilitat de la Lluna i els satèl·lits de Júpiter, qüestions negades principalment per l'Església.

El 1644, René Descartes publicà *Principia philosophiae (Principis de la filosofia)* on el filòsof equipara el Sol amb les altres estrelles, obrint així la porta a l'existència d'un nombre infinit de mons.

En aquesta línia va seguir Bovier de Fontenelle (1657 – 1757), el qual l'any 1686 afirmà a la seva obra *Entretiens sur la pluralité des mondes (Conversacions sobre la pluralitat dels mons)* el següent:

“El nostre Sol té planetes que ell il·lumina, per què no hauria de tenir cada estrella fixa al firmament altres que ella mateixa il·luminés?”

Ja des d'un punt de vista observacional, Christiaan Huygens (1629 – 1695) al seu llibre *Cosmotheoros (Observador de les estrelles)* (1698), va fer propis els suggeriments de Fontenelle, basant-se en les analogies físiques entre la Terra i la resta de planetes del Sistema Solar.

Isaac Newton (1642 – 1727) al seu assaig *Escolio General* fent una comparació amb els planetes del Sol, va afirmar:

“I si les estrelles fixes són els centres de sistemes similars, tots ells es construiran d'acord amb un disseny similar.”

Així mateix, va demostrar amb tota seguretat la teoria copernicana mitjançant les Lleis de Gravitació Universal, publicades a la seva obra *Philosophiae naturalis principia mathematica (Principis matemàtics de la filosofia natural)*, la qual va obrir el camí a la teoria nebular proposada per Imanuel Kant (1724 – 1804) a la seva obra *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels (Història general de la naturalesa i teoria del cel)*, que consistia en la formació del Sistema Solar i els seus planetes a partir del col·lapse d'una nebulosa³.

² Model cosmològic segons el qual el Sol és el centre del sistema solar i tots els planetes orbiten al seu voltant.

³ Una nebulosa és una regió del medi interestel·lar format per gas i per pols, fonamentalment per hidrogen, l'element químic més abundant de l'univers, per un 10% d'heli i quantitats molt petites d'altres substàncies. Tenen una importància cosmològica notable perquè són el lloc del qual neixen les estrelles per fenòmens de condensació i agregació de matèria, tot i que cal destacar que també es pot tractar de les restes d'una estrella que ha mort.

Aquest model també va ser afirmat per Pierre Simon de Laplace (1749 – 1827) a la seva obra *Exposition du sistema du monde (Exposició del sistema del món)* (1796) i és fins als nostres dies la base generalment acceptada del model de formació planetària.

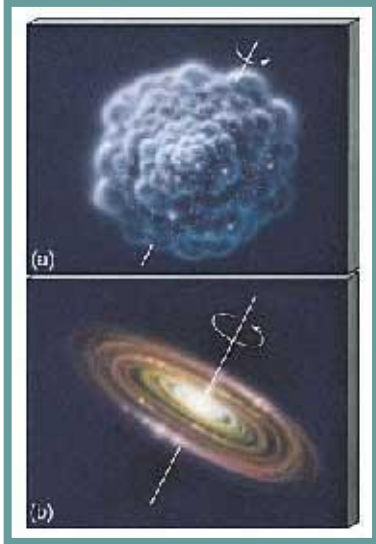


Figura 1. Representació gràfica de la formació planetària.

Font: <http://exoplanetas.es/historia-de-la-exoplanetologia/>

Ja al segle XIX, la comunitat científica i especialment Camille Flammarion (1842 – 1925) amb la seva obra *Astronomie Populaire (Astronomia Popular)*, reforçaren el concepte d'una Via Làctia envoltada d'estrelles que, com el Sol, haurien de tenir planetes en òrbita.

Amb aquests fonaments arribem a principis d'un segle XX on ja el Sol és considerat una estrella normal a la nostra galàxia i per tant no hi ha cap motiu perquè no hi hagi sistemes planetaris similars al nostre.

El problema és detectar-los, doncs la tècnica per fer-ho no està encara desenvolupada.

5. TIPUS D'EXOPLANETES

5.1. JÚPITER ARDENT

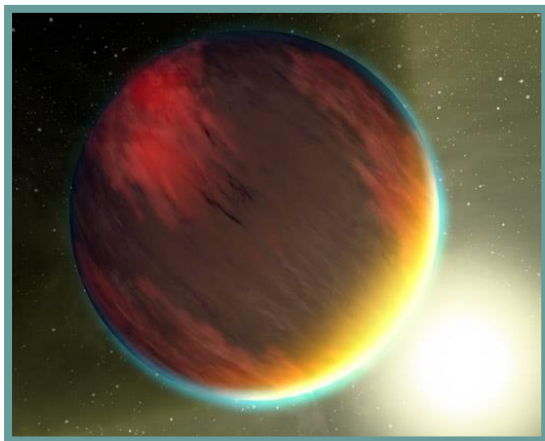


Figura 2. Impressió artística d'un Júpiter ardent.

Font:

http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/multimedia/spitzer-20091020.html

També conegut com a planeta pegasià, degut a que el primer exoplaneta descobert d'aquest tipus va ser 51 Pegasi b, es caracteritza per tenir una massa semblant a la del planeta Júpiter ($1,9 \times 10^{27}$ kg), però a diferència del nostre sistema solar, on Júpiter orbita la voltant del Sol a 5 UA⁴, els planetes del tipus Júpiter ardent orbiten unes 100 vegades més a prop de les seves estrelles mare (al voltant de 0,05 UA). Així doncs està aproximadament vuit vegades més a prop de la seva estrella que Mercuri del Sol (d'aquí l'origen a la nomenclatura "ardent").

Aquests exoplanetes tenen un conjunt de característiques comunes:

1. La possibilitat d'observar un trànsit⁵ davant la seva estrella és major que en planetes en òrbites més llunyanes.
2. A causa de l'alt nivell d'insolació, la seva densitat és menor que la que tindrien en un altre cas.
3. Es pensa que en tots ells es va produir una migració planetària, ja que no hauria hagut material suficient tan a prop de l'estrella perquè es formés un planeta d'aquesta massa.

⁴ UA es tracta de la unitat astronòmica, una unitat de longitud igual a 149.597.870.700 metres, i que equival aproximadament a la distància mitjana entre el planeta Terra i el Sol.

⁵ El trànsit astronòmic és un fenomen durant el qual un astre passa per davant d'un altre més gran, bloquejant la seva visió. Com exemple de trànsit, coneixem l'eclipsi solar on és la Lluna la que cobreix la vista del Sol.

4. Tots tenen òrbites de baixa excentricitat⁶. Aquestes tendeixen a ser circulars per el procés de libració⁷. Això també causa que el planeta sincronitzi la seva rotació amb el període orbital.

5.1.1.Llunes



Figura 3. Representació artística d'un Júpiter ardent amb dues petites llunes. Vegeu la brillantor de l'atmosfera de l'exoplaneta evaporant-se a causa de la seva extrema proximitat a l'estrella.

Font:

https://es.wikipedia.org/wiki/J%C3%BApiter_caliente#/media/File:HotJupiterMoons.jpg

S'ha investigat si aquests planetes podrien tenir llunes tal com passa a Júpiter i Saturn, tot i que l'esfera de Hill⁸ d'aquests mons és molt petita i, per tant, els satèl·lits haurien d'orbitar molt a prop. Però les forces de marea⁹ exercides per l'estrella, que frenen la rotació del planeta, i altres fenòmens farien que les llunes no duressin molt temps abans que les seves òrbites siguin destruïdes. Així doncs, només existirien aquestes llunes en el cas que el planeta Júpiter ardent estigués quan més lluny millor de l'estrella, de manera que els satèl·lits estables d'aquells mons es presentarien com asteroides¹⁰ petits.

⁶ A matemàtiques i geometria l'excentricitat és un paràmetre que determina el grau de desviació d'una secció cònica respecte una circumferència. Així doncs, a astronomia els cossos lligats gravitacionalment entre si descriuen òrbites en forma d'el·lipse.

⁷ S'anomena libració al conjunt de moviments d'oscil·lacions que presenta el disc de la Lluna o d'un altre astre respecte un observador situat a la Terra.

⁸ L'esfera de Hill és l'esfera d'influència gravitacional d'un cos celeste sotmès a la gravetat d'un altre cos de més massa al voltant del qual orbita. Va ser definit per l'astrònom nord-americà George William Hill. També s'anomena l'esfera de Roche perquè independentment també va ser descrita per l'astrònom francès Édouard Roche.

⁹ La força de marea és un efecte secundari de la força de gravetat i és responsable de l'existència de les marees.

¹⁰ Un asteroide és un objecte sòlid compost majoritàriament per roca i metalls i més petit que un planeta (planeta menor)

5.1.2. Quan Júpiter sigui un Júpiter ardent

Es considera que els planetes d'aquest tipus també podrien trobar-se orbitant al voltant d'estrelles com gegants vermelles¹¹.

Evidentment, Júpiter no és un planeta d'aquest tipus... per ara. En un futur, quan el Sol es converteixi en una gegant vermella, Júpiter passarà a orbitar una mica més a prop de la nostra estrella. El Sol augmentarà el seu volum fins a un radi d'uns 150 milions de quilòmetres aproximadament que és just la mida de l'òrbita de la Terra. La distància de Júpiter a la superfície solar no canviarà significativament, però sí la temperatura superficial del planeta a causa de l'augment de la lluminositat solar. Cal destacar que la temperatura que aconseguirà no serà massa elevada comparada amb els estàndards habituals dels Júpiter ardens: tan sols uns seus 600 °C davant els milers de graus que són presents en aquests altres exoplanetes.

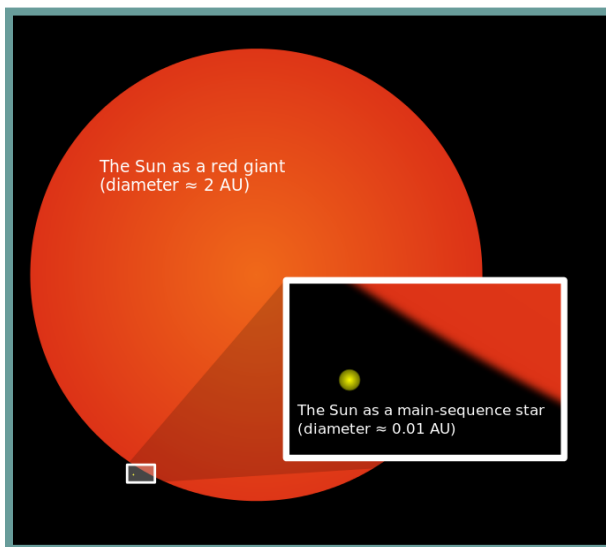


Figura 4. Mida del Sol l'any 2007 en comparació amb la seva mida màxima estimada durant la seva fase de gegant vermella d'aquí uns 5000 milions d'anys.

Font:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_red_giant.svg

¹¹ Una gegant vermella és una estrella gegant d'una massa almenys igual a la del Sol que, després d'haver esgotat l'hidrogen del seu nucli, comencen a consumir, cremant l'hidrogen de l'escorça a l'entorn del nucli ric en heli. Això té com a principal conseqüència l'augment del volum de l'estrella que la fa convertir en un color roig. Cal destacar que en un futur el Sol es convertirà en una estrella d'aquest tipus.

5.2. SÚPER TERRA



Figura 5. Representació artística d'una súper Terra (Gliese 581 c)

Font: <http://pe.tuhistory.com/hoy-en-la-historia/se-descubre-el-primer-planeta-extrasolar-similar-la-tierra>

Una súper Terra és un tipus d'exoplaneta rocós d'una mida entre una i deu vegades la massa de la Terra però menor que planetes gegants com Urà i Neptú. La majoria d'aquests exoplanetes es troben molt a prop de l'estrella que orbiten.. De no haver estat així, és a dir, si aquest planeta de mida significativa es trobés a una distància molt llunyana de la seva estrella, es tractaria d'un planeta gegant gasós (com per exemple, Júpiter) a causa de la poca pèrdua de gas en la seva formació.

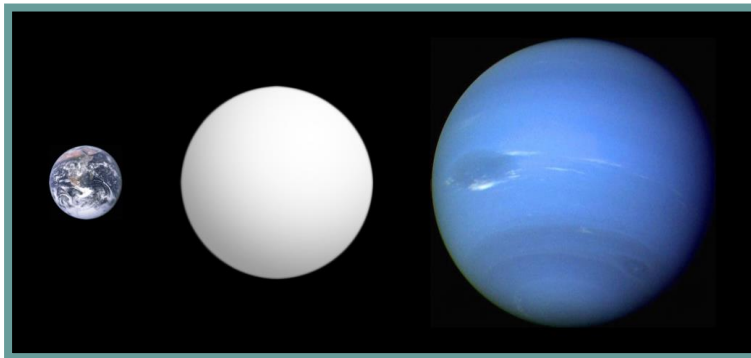


Figura 6. Il·lustració de la mida d'una súper Terra (al centre) comparada amb la Terra (a l'esquerre) i Neptú (a la dreta).

Font: <http://www.bluescire.com/una-supertierra-que-posee-la-atmosfera-de-agua/>

Cal destacar que el terme súper Terra es refereix només a la massa i no implica res sobre les condicions d'habitabilitat que tinguin els planetes en la seva superfície.

Aquests planetes al ser grans tenen una gravetat més elevada, tot i que el 80% tenen una densitat baixa la qual cosa fa que la seva gravetat superficial estigui compresa entre 0,90 i 1,80 vegades la gravetat de la Terra.

La seva gran mida fa que el nucli estigui molt comprimit i això impedeix, en la majoria dels casos, la formació de camps magnètics.

També es caracteritzen per tenir un gran nombre de llunes.

Existeixen tres tipus de súper Terres:

1. Súper Terra rocosa: es tracta d'un planeta completament compost de roca i amb poca quantitat d'aigua.
2. Súper Terra d'aigua: també anomenat món aquàtic, està compost per aigua i no hi ha gaire roca, és a dir, literalment és una bola d'aigua gegant. La seva baixa densitat fa que la gravetat sigui menor que la de la Terra.
3. Ultra Terra: aquest tipus és escàs. Es tracta d'una súper Terra que té una massa superior a deu masses terrestres i no s'ha convertit en un planeta gegant gasós. La gran majoria són aquàtics.

5.2.1. Kepler-452b, la futura Terra?

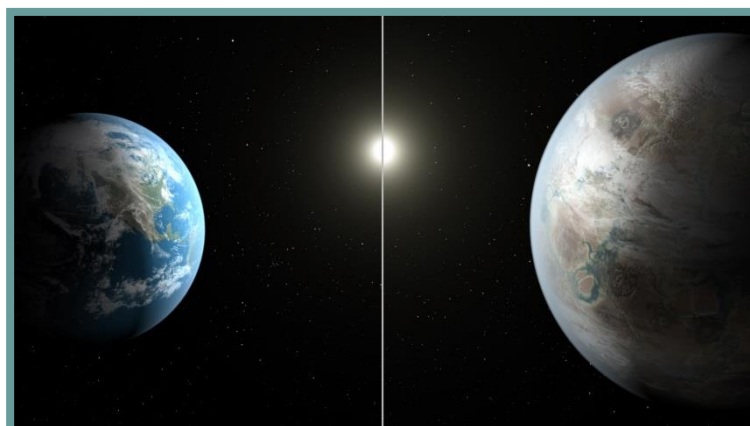


Figura 7. Recreació artística de l'exoplaneta Kepler-452b (a la dreta) en comparació amb la Terra (a l'esquerra).

Font:

http://danielmarin.naukas.com/files/2015/07/452b_comparison_wEarth.jpg

És un exoplaneta del tipus súper Terra que orbita al voltant de l'estrella Kepler-452. Va ser identificat pel telescopi Kepler i confirmat oficialment per la NASA el 23 de Juliol de 2015.

La seva importància sorgeix de la significativa similitud que té amb el nostre planeta Terra i les característiques que l'identifiquen són les següents:

1. Es troba aproximadament a 1400 anys llum¹² de la Terra.
2. Orbita al voltant de la seva estrella a la mateixa distància que la Terra del Sol, el que significa que es troba a la zona d'habitabilitat¹³, però aquesta estrella és 1500 milions d'anys més vella que el Sol, un 4% més gran i un 10% més brillant.
3. El seu període orbital és de 385 dies.
4. El seu radi és major al nostre en un 60% ($1,63 R_{\oplus}$ ¹⁴).
5. La seva massa estimada és de $4,72 M_{\oplus}$ ¹⁵.
6. A causa de la quantitat de radiació rebuda, la temperatura mitjana superficial, assumint una atmosfera similar a la de la Terra, seria de 29,35 °C (uns 22 °C per sobre de la mitjana terrestre).
7. És probable que la seva major atracció gravitatòria (un 77% major que la de la Terra) suposi una atmosfera més densa, la qual podria augmentar considerablement la seva temperatura. S'estima que la temperatura mitjana ideal per la vida vegetal es situa al voltant dels 25 °C i que els planetes amb atmosferes més denses afavoreixen la seva presència.
8. S'assigna un 0,3 a la seva concentració de gasos a l'atmosfera davant els -0,52 de la Terra (-1 s'assigna a planetes amb una atmosfera pràcticament inexistent i +1 als planetes gegants gasosos).

¹² Això significa que per arribar-hi s'hauria de viatjar a l'espai durant 1400 anys i a la velocitat de la llum.

¹³ La distància respecte el centre de la zona habitable de l'exoplaneta és de -0,61 davant el -0,5 terrestres (-1 representa el cantó intern de la zona habitable, 0 és el centre i +1 és el cantó exterior).

¹⁴ Radi de la Terra.

¹⁵ Massa de la Terra.

5.3. NEPTÚ ARDENT

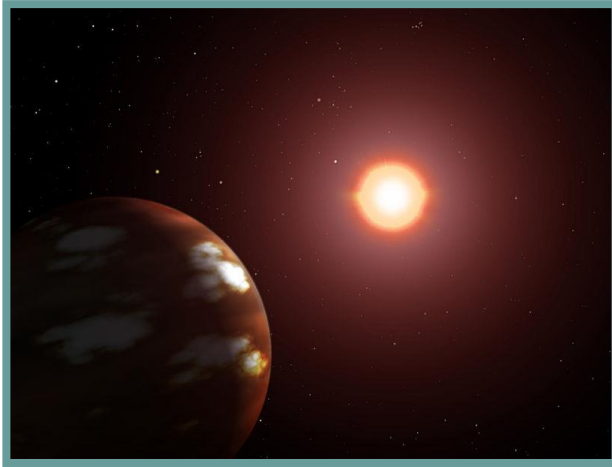


Figura 8. Exemple simulat d'un Neptú ardent (Gliese 436).

Font:

https://ca.wikipedia.org/wiki/Nept%C3%BA_ardent#/media/File:Gliese-436-b.jpg

Un Neptú ardent és un hipotètic planeta extrasolar gegant amb una massa similar a la d'Urà o Neptú i en una òrbita a prop de la seva estrella (normalment, menys d'1 UA = 149.597.870.700 metres), la qual cosa fa que se sobreescalfi fins a altes temperatures.

S'ha detectat una densitat relativament alta en aquest tipus de planetes.

5.4. SUBTERRA

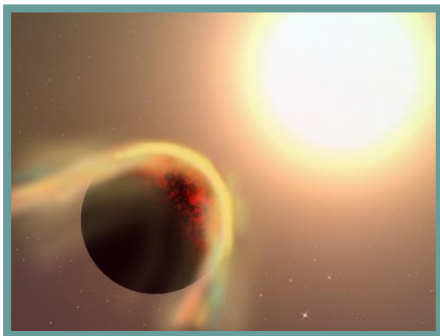


Figura 9. Representació artística d'una Subterra (Kepler-70b).

Font:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Kepler-70b#/media/File:Kepler-70b.png>

És un tipus d'exoplaneta amb una massa inferior a la de la Terra i Venus. Al nostre Sistema Solar trobem dins d'aquesta categoria a Mercuri i Mart.

Aquests exoplanetes són els més difícils de detectar (a excepció dels planetes nans) a causa de les seves baixes masses, les quals produeixen poques senyals de la seva existència amb els mètodes de detecció d'exoplanetes.

La característica principal d'aquests és l'absència d'atmosferes substancials, a causa dels dèbils camps gravitacionals i camps magnètics que permeten que la radiació estel·lar desgasti progressivament les seves atmosferes.

A causa de la seva petita mida és menys probable que hi hagi forces de marea significatives quan orbiten a prop de la seva estrella.

5.5. TERRESTRE

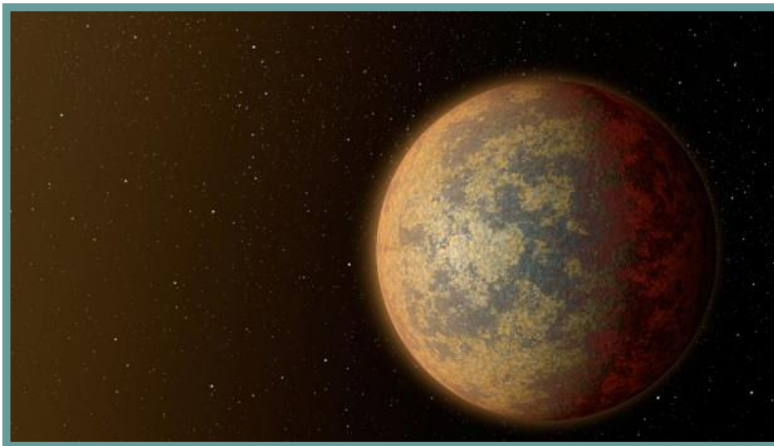


Figura 10. Recreació artística de l'exoplaneta terrestre anomenat 219134b HD.

Font:
<https://hipertextual.com/2015/07/exoplaneta>

També anomenat planeta tel·lúric, és un planeta compost majoritàriament per silicats. Aquests exoplanetes es caracteritzen per ser similars a la Terra i per això tenen aquesta nomenclatura. Aquests difereixen substancialment dels gegants gasosos, els quals no tenen superfície sòlida i estan compostos principalment per hidrogen, heli i aigua en diversos estats.

Els planetes tel·lúrics tenen tots més o menys la mateixa estructura: un nucli metàl·lic, en gran part de ferro, envoltat d'un mantell de silicats.

Els planetes terrestres tenen canyons, cràters, muntanyes i volcans.

6.51 PEGASI B, EL PRIMER DESCOBRIMENT

Es tracta del primer exoplaneta que es va descobrir l'any 1995 pels astrònoms Michel Mayor i Didier Queloz a l'Observatori de Marsella, Provença. Aquest descobriment va marcar un gran avenç per la investigació astronòmica.



Figura 11. Fotografia de Michel Mayor i Didier Queloz.

Font:

http://www.obs-hp.fr/visites/expos/xii_2.jpg

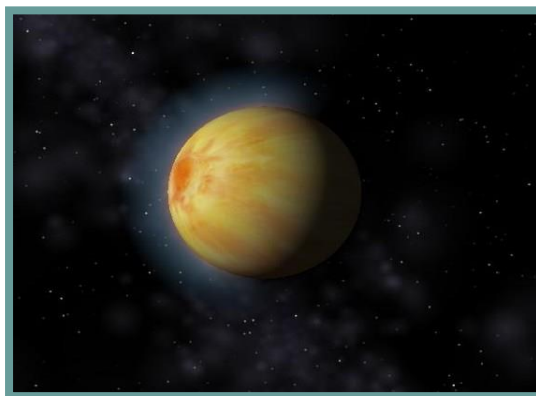


Figura 12. 51 Pegasi b vist amb Celestia, programa de simulació que mostra l'espai en 3D.

Font:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e7/51_Pegasi_b_by_Celestia.jpg

Aquest exoplaneta orbita al voltant de l'estrella 51 Pegasi, lleugerament més massiva que el Sol ($1,06 M_{\odot}$ ¹⁶) i milers de milions d'anys més vella.

Les seves característiques no són semblants a les dels planetes del nostre Sistema Solar. Es tracta d'un exoplaneta més petit que Júpiter però més gran que Saturn. Però el més curiós és que el seu període orbital¹⁷ és de tan sols 4,23 dies, menys d'una vintena part del de Mercuri (que és de 88 dies). Aquest període tant curt condueix a un moviment molt ràpid de l'exoplaneta. Així, 51 Pegasi b es mou a una velocitat a 482.637 km/h, que equival a 134,06583 km/s, mentre que la Terra es desplaça a una velocitat de 107.200 km/h, que equival a 29,78 km/s.

¹⁶ $M_{\odot}$ és la massa solar, que equival a $1,9891 \times 10^{30}$ kg.

¹⁷ El període orbital és el temps que tarda un planeta en orbitar la seva estrella. La Terra, per exemple, té un període orbital de 365 dies.

Inicialment s'especulà amb la possibilitat que aquest planeta fos rocós, a causa de la proximitat amb la seva estrella i, per tant, de la rapidesa en orbitar-la. Però es va descobrir que no es tracta d'un planeta rocós sinó d'un Júpiter ardent i que, per tant, podien existir planetes d'aquest tipus molt pròxims a la seva estrella.

Com a conclusió, cal afegir que 51 Pegasi b es troba a 50 anys llum de la Terra, pel que serà difícil visitar-lo si no trobem formes més efectives i ràpides de viatjar a través de l'espai.

7. MÈTODES DE DETECCIÓ D'EXOPLANETES

Els planetes són fonts de llum molt suaus en comparació amb les seves estrelles. En general, tenen menys d'una milionèsima part de la lluminositat de la seva estrella mare. És molt difícil detectar aquest tipus de font de llum tant baixa i, a més a més, l'estrella mare té una llum enlluernadora que casi ho fa impossible.

Per aquestes raons exposades, els telescopis han fotografiat directament només una desena d'exoplanetes. Això només ha estat possible per planetes especialment grans (com per exemple del tipus Júpiter ardent) i molt diferents de la seva estrella mare..

Actualment la gran majoria dels planetes extrasolars coneguts només han estat detectats a través de mètodes indirectes que es presenten a continuació.

7.1. VELOCITAT RADIAL

Aquest mètode es basa en l'efecte Doppler¹⁸. El planeta, en orbitar al voltant de la seva estrella, exerceix també una força gravitacional sobre aquesta de manera que l'estrella gira al voltant del centre de masses comú del sistema. Les oscil·lacions de l'estrella poden detectar-se mitjançant lleus canvis en les línies espectrals, segons si l'estrella s'apropa a nosaltres o s'allunya.

Aquest mètode ha estat el més exitós en la recerca de nous planetes, tot i que tan sols és eficaç pels planetes gegants més propers a l'estrella principal, de manera que només es pot detectar una petita fracció dels planetes existents.

¹⁸ L'efecte Doppler, anomenat així pel físic austríac Christian Andreas Doppler, consisteix en la variació de la freqüència de qualsevol ona emesa per un objecte en moviment. Un dels exemples més didàctics és l'aproximació d'un tren fent sonar el xiulet. Mentre s'acosta, el so del xiulet es percep més agut i quan s'allunya, el so del xiulet es percep més greu tot i que el xiulet sempre està emetent el mateix to.

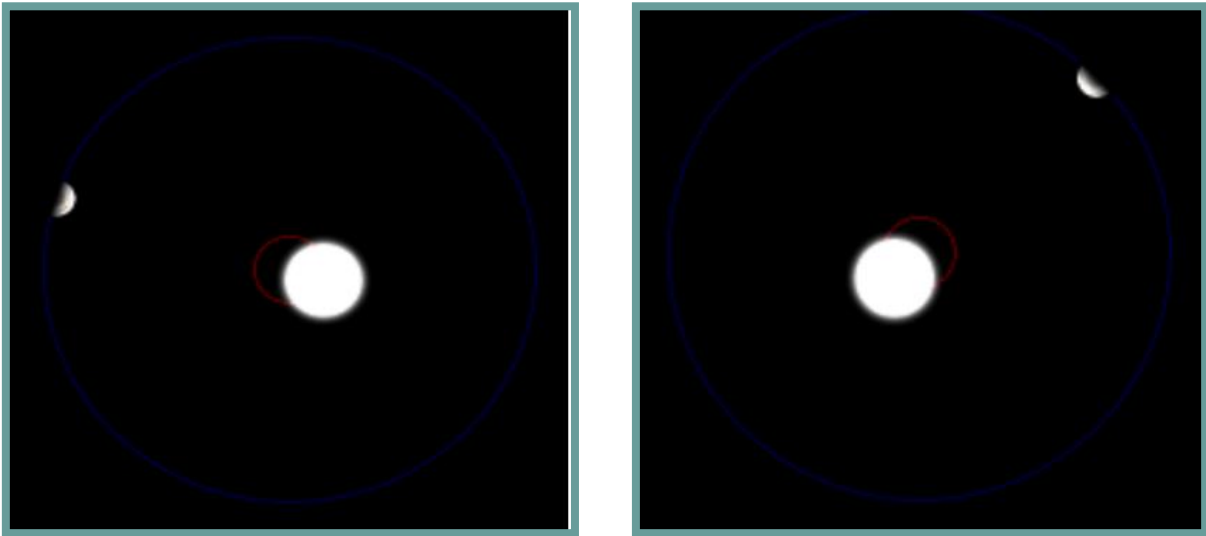


Figura 13. Representació gràfica del mètode de velocitat radial. Observeu com el planeta i l'estrella orbiten al centre de masses comú (cercle vermell).

Font: https://es.wikipedia.org/wiki/Planeta_extrasolar#M.C3.A9todos_de_detecci.C3.B3n

7.2. ASTROMETRIA

Ja que l'estrella orbita al centre de masses comú del sistema, es pot intentar registrar les variacions de posició i l'oscil·lació de l'estrella. Tanmateix, aquestes variacions són tan petites que el mètode no ha estat factible de moment. A més, els planetes han de ser molt massius, tenir un període orbital llarg i les mesures s'han de fer durant anys.

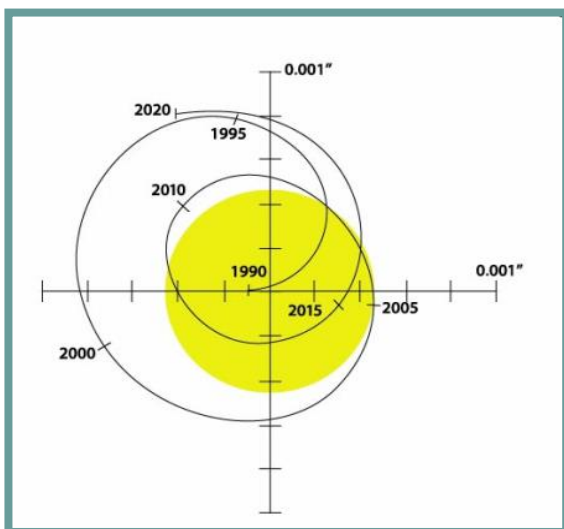


Figura 14. Registre de les variacions de la posició i oscil·lació de l'estrella amb el pas dels anys.

Font:
<https://exoplanetasliada.files.wordpress.com/2014/02/imagen1.png>

7.3. TRÀNSIT

El mètode del trànsit consisteix en observar fotomètricament l'estrella i detectar canvis en la seva magnitud aparent¹⁹ quan un planeta gira al voltant d'ella. Aquest mètode, juntament amb el de la velocitat radial, poden utilitzar-se per caracteritzar millor l'atmosfera d'un planeta. Ambdós són més eficaços amb els planetes gegants més propers a l'estrella principal, per la qual cosa només poden caracteritzar una lleu fracció dels planetes detectats.

Aquest és el mètode que jo utilitzaré per demostrar l'existència d'un exoplaneta en "x" durada de temps.

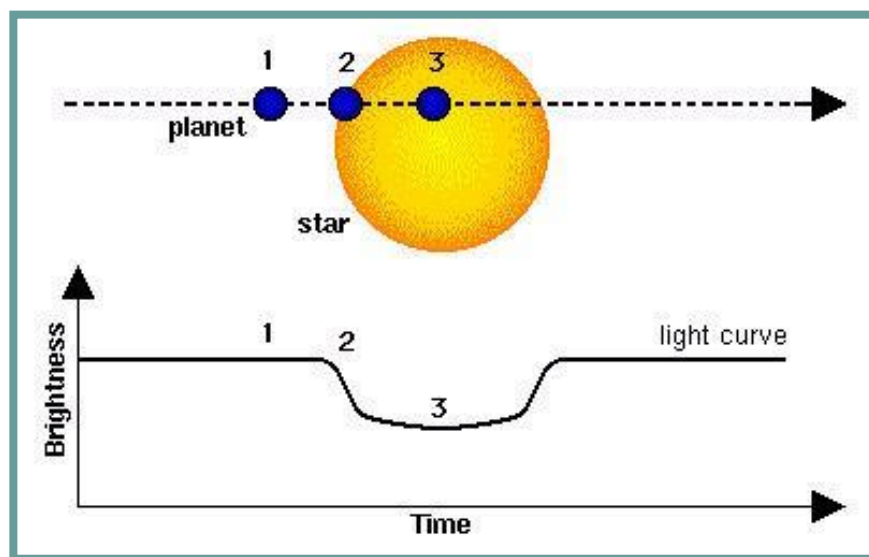


Figura 15. Representació gràfica del mètode del trànsit. Observeu a l'eix vertical la lluminositat de l'estrella i com varia en funció del temps, que és l'eix horitzontal, a causa de l'aparició de l'exoplaneta per davant.

Font: <https://exoplanetasliada.files.wordpress.com/2014/02/transito.jpg>

¹⁹ La magnitud aparent d'un astre és la mesura de la seva lluminositat vista per un observador a la Terra.

7.4. MICROLENTS GRAVITATÒRIES

L'efecte lent gravitacional²⁰ es produeix quan els camps gravitacionals del planeta i de l'estrella actuen per augmentar o focalitzar la llum d'una estrella distant, situada en segon pla. Perquè el mètode funcioni, els tres objectes han d'estar quasi perfectament arreglats. El principal defecte d'aquest mètode és que les possibles deteccions no són repetibles i el planeta descobert hauria de ser estudiat addicionalment per algun dels mètodes anteriors.

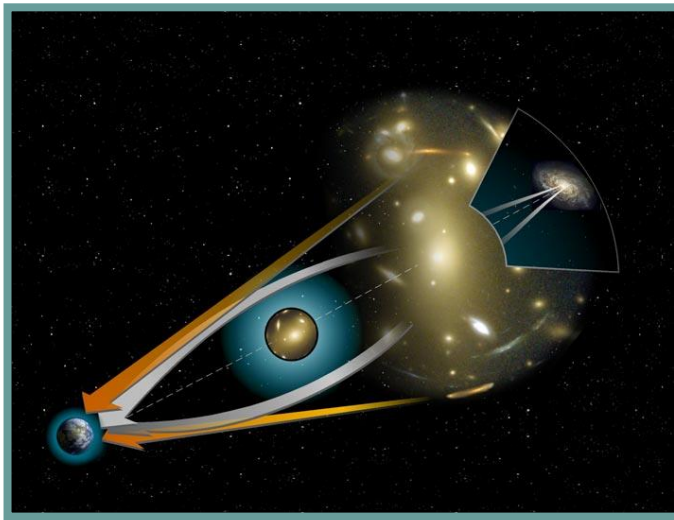


Figura 16. Esquema de les trajectòries de la llum en una lent gravitòria. Les imatges d'objectes distants adquireixen una forma d'arcs envoltant l'objecte massiu del mig.

Font:

https://exoplanetasliada.files.wordpress.com/2014/02/gravitational_lens-full.jpg

7.5. PERTORBACIONS EN DISCS CIRCUMESTELARS

En estrelles joves, amb discs circumestel·lars²¹ de pols al seu voltant, és possible detectar irregularitats en la distribució de material al disc, ocasionades per la interacció gravitatòria amb un planeta.

En estrelles encara més joves la presència d'un exoplaneta gegant en formació seria detectable a partir del buit del material gasós que deixaria al disc d'acreció²².

²⁰ Es parla d'una lent gravitacional quan un objecte massiu (galàxia, cúmul de galàxies) produeix una curvatura local de l'espai-temps, la qual cosa produeix un efecte de deflexió dels raigs lluminosos.

²¹ S'anomena disc circumestel·lar a una estructura material amb forma d'anell situada al voltant d'una estrella. Està constituïda per un gas, pols i objectes rocosos o de gel.

²² Un disc d'acreció és una estructura en forma de disc que es troba al voltant d'un objecte central massiu. El disc alimenta el cos central sent atret per aquest i contribuint al seu augment de massa.

7.6. VARIACIÓ EN EL TEMPS DE TRÀNSIT (VTT)

El mètode VTT és una variació sobre el mètode del trànsit, on els canvis en el trànsit del planeta poden ser utilitzats per detectar-ne un altre.

Aquest nou mètode és potencialment capaç de detectar planetes com la Terra o exollunes.

Els trànsits es presenten quan un planeta es mou davant l'estrella que orbita bloquejant temporalment la llum d'aquesta.

Ara bé, després d'haver descobert un exoplaneta, podem anar més enllà i analitzar el moviment del mateix per descobrir un potencial planeta "ocult" de les observacions. Recordeu que Neptú es va descobrir al notar que les òrbites d'Urà, Saturn i Júpiter no eren les que havien de ser segons les lleis de Kepler i Newton. Amb molta similitud succeeix el mateix en aquest mètode.

Si un objecte es troba en el sistema, tot i que no hagi estat observat, generarà "rastres" que els astrònoms poden detectar. Particularment generarà un efecte gravitacional en el planeta que es pot descobrir.

El mètode VTT compara les desviacions amb les prediccions realitzades per inferir la possible existència d'un nou objecte.

No obstant això, aquest mètode té les seves limitacions en particular perquè requereix la presència ja coneguda d'un exoplaneta en un sistema per inferir la presència d'un altre. Però és atractiva per la possibilitat de descobrir exoplanetes de menor mida i, pot ser, situat dins la zona d'habitabilitat en la qual un exoplaneta pugui tenir atmosfera i aigua líquida.

Si un planeta com la Terra es trobés orbitant al voltant d'un gegant gasós que, a la mateixa vegada, orbités al voltant d'una estrella, la desviació que generaria el planeta menor en el trànsit del major seria de fins un minut.

L'efecte seria suficientment gran per ser detectat fins i tot amb telescopis petits, tot i que posteriorment es requereixi l'ús d'instruments més sofisticats per completar l'estudi i certificar la presència de l'objecte.

7.7. MESURA DELS POLSOS DE RÀDIO D'UN PÚLSAR

Un púlsar emet ones de ràdio molt regularment a mesura que gira. Lleus anomalies en el moment dels seus polsos de ràdio que s'observen poden ser utilitzats per trobar els canvis en el moviment del púlsar causat per la presència de planetes.

7.8. BINÀRIA ECLIPSANT

Si un planeta té una òrbita de gran mida i orbita al voltant de dos membres d'un sistema solar d'estrella doble²³ eclipsant, llavors el planeta es pot detectar a través de petites variacions en el moment dels eclipsis de les estrelles entre si.

7.9. DETECCIÓ VISUAL DIRECTA

Des del principi, obtenir fotografies d'exoplanetes ha estat un dels objectius més desitjats per la investigació exoplanetària. Les fotografies ja siguin de llum visible o infraroges podrien revelar molta més informació sobre un planeta que qualsevol altre tècnica coneguda. No obstant això, aquest mètode és molt més difícil tècnicament que qualsevol de les altres tècniques disponibles. Les raons són diverses però entre les principals es troba la diferència entre la llum de les estrelles i dels planetes. Una estrella és milers de milions de vegades més brillant que qualsevol dels seus hipotètics planetes.

²³ Una estrella doble o binària és un sistema estel·lar compost de dues estrelles que orbiten mútuament al voltant d'un centre de masses comú.

8. POSSIBILITAT D'EXISTÈNCIA DE VIDA HUMANA

8.1. HABITABILITAT PLANETÀRIA

L'habitabilitat planetària és una mesura del potencial que té un cos còsmic per mantenir vida. Es pot aplicar tan a planetes com als satèl·lits naturals dels planetes.

L'únic requisit absolut per la vida és una font d'energia. Per aquest motiu és important determinar una zona d'habitabilitat de diferents estrelles, però aquesta habitabilitat també està determinada pel compliment de molts altres criteris geofísics, geoquímics i astrofísics.

Actualment es desconeix l'existència de vida extraterrestre. Per aquest motiu l'habitabilitat planetària és, en gran part, una extrapolació de les condicions de la Terra i les característiques del Sol i el Sistema Solar que semblen favorables per l'existència de la vida.

Ja s'ha explicat anteriorment que la idea que altres planetes puguin oferir vida humana és molt antiga. A finals del segle XX es van viure dos grans descobriments. Primerament, l'exploració robòtica i l'observació d'altres planetes i satèl·lits del Sistema Solar van proporcionar informació essencial per definir els criteris d'habitabilitat. Finalment el descobriment dels exoplanetes va ser el segon. Es confirmà doncs que el Sol no és l'única estrella que té planetes orbitant al seu voltant i s'estengué una investigació sobre l'habitabilitat més enllà del Sistema Solar.

8.2. SISTEMES ESTEL·LARS APTES

La comprensió de l'habitabilitat planetària comença a les estrelles.

Amb el projecte “*Phoenix*” del SETI²⁴, les científiques Margaret Tumbull i Jill Tarter desenvoluparen l'any 2002 el “*Hab Cat*” (o “*Catàleg de Sistemes Estelars Habitables*”). Els criteris de selecció que van utilitzar proporcionen un bon punt de partida per comprendre per què són necessaris els factors astrofísics perquè un planeta sigui habitable.

²⁴ SETI és l'acrònim de l'anglès *Search for ExtraTerrestrial Intelligence* (Cerca d'intel·ligència extraterrestre).

8.2.1. Tipus espectral

El tipus espectral d'una estrella indica la temperatura de la seva fotosfera²⁵. Actualment es considera que el rang espectral apropiat es situa entre “F baix” o “G” fins a “K mitjà”. Això correspon a unes temperatures de poc més de 7000K fins a 4000K. El Sol, casualment, es troba just en el punt mitjà d'aquests límits i està classificat com estrella G2.

Les estrelles de “classe mitjana”, com aquesta, tenen una sèrie de característiques considerades importants per l'habitabilitat planetària:

1. Viuen almenys uns quants milers de milions d'anys, donant oportunitat a que la vida evolucioni.

2. Emeten la suficient radiació ultraviolada d'alta energia perquè es produeixin fenòmens atmosfèrics importants com la formació d'ozó.

3. Pot existir aigua líquida a la superfície dels planetes que orbiten a una distància que no produeix acoblament de marea.²⁶

Aquestes estrelles no són ni “molt calentes” ni “molt fredes” i viuen prou perquè la vida tingui oportunitat de sorgir. Aquest rang espectral representa entre un 5 i un 10 per cent de les estrelles de la galàxia Via Làctia.

Si les estrelles de tipus K baix i M com les nanes vermelles²⁷ també són aptes per tenir planetes habitables, és potser la qüestió més important de tot el camp de l'habitabilitat planetària, atès que la major part de les estrelles es troben dintre d'aquest rang.

8.2.2 Una zona d'habitabilitat estable

La zona d'habitabilitat (ZH) és l'embolcall teòric que envolta una estrella, dintre del qual qualsevol planeta tindria aigua líquida a la seva superfície.

Després d'una font d'energia, l'aigua líquida es considera l'ingredient més important per la vida, considerant l'essència que és per tots els éssers vius de la Terra.

Una ZH “estable” implica dos factors:

1. El rang d'una ZH no ha de variar molt amb el temps.

²⁵ S'anomena fotosfera a la zona de la qual s'emet pràcticament tota la llum visible del Sol i es considera com la “superfície” solar, la qual vista amb el telescopi, es presenta formada per grànuls brillants que es projecten sobre un fons més fosc.

²⁶ L'acoblament de marea és la causa que la cara d'un objecte astronòmic estigui fixada apuntant a un altre, al com la cara visible de la Lluna està sempre apuntat a la Terra.

²⁷ Una nana vermella és un tipus d'estrella caracteritzada per ser petita i relativament freda.

Totes les estrelles augmenten de lluminositat quan envelleixen i les seves ZH es desplacen naturalment cap a l'exterior, però si això succeeix massa ràpid, els planetes tindrien solament una breu finestra dintre de la ZH i per tant una menor probabilitat de desenvolupar vida.

2. No ha d'existir cap cos massiu com un gegant gasós dintre o relativament a prop de la ZH, interferint en la formació de cossos com la Terra.

8.2.3 Baixa variació estel·lar

Els canvis de lluminositat són comuns en totes les estrelles, però la magnitud d'aquestes fluctuacions cobreix un gran rang. La majoria de les estrelles són relativament estables, però una minoria significativa d'estrelles variables²⁸ experimenta sovint augments sobtats i intensos de lluminositat, i per tant d'energia radiada cap als cossos en òrbita. Aquestes estrelles es consideren males candidates per tenir planetes habitables ja que els canvis en les seves emissions d'energia tindrien un impacte negatiu pels organismes. Com a conseqüència més evident, els éssers vius adaptats a una temperatura particular probablement serien incapaços de sobreviure a un canvi de temperatura massa gran. És més, els augments de lluminositat solen estar acompanyats d'enormes dosis de raigs gamma i raigs X que poden resultar letals.

El Sol, com en gairebé tots els temes relacionats amb l'habitabilitat planetària, és benigne en relació amb aquest perill: la variació entre el màxim i el mínim solar és de tot just un 0,1 per cent al llarg del seu cicle solar d' 11 anys. Hi ha evidència que els petits canvis en la lluminositat del Sol ha tingut efectes negatius en el clima de la Terra dins del temps històric.

Per tant, una estrella no hauria de ser una veritable estrella variable perquè les diferències en la seva lluminositat no afectin l'habitabilitat.

8.2.4 Alta metal·licitat

Encara que el gruix del material de qualsevol estrella és l'hidrogen i l'heli, hi ha una gran variació de la quantitat d'elements pesants que conté. Una gran proporció de metalls en una estrella està correlacionada amb la quantitat de material pesant disponible en el disc protoplanetari²⁹. És a dir, una baixa quantitat de metall disminueix significativament la probabilitat que s'hagi format planetes al voltant d'una estrella, segons la teoria de la nebulosa solar sobre la formació de sistemes planetaris explicada anteriorment. Qualsevol

²⁸ Una estrella variable és una estrella la lluminositat de la qual varia considerablement al llarg del temps.

²⁹ També conegut com a disc circumestel·lar esmentat anteriorment, és un disc de material al voltant d'una estrella jove. S'anomena disc protoplanetari pel fet de produir-s'hi els processos físics que condueixen a la formació de planetes.

planeta que es formi al voltant d'una estrella amb poc metall tindrà probablement molt poca massa, i per tant no serà favorable per la vida. Fins a la nostra data, els estudis espectroscòpics dels sistemes en els quals s'ha trobat un exoplaneta confirmen la relació entre un alt contingut metàl·lic i la formació de planetes.

8.3. EXOPLANETES APTES

La principal suposició sobre els exoplanetes habitables és que han de ser terrestres.

Aquests planetes, que es troben aproximadament dins d'un ordre de magnitud de la massa de la Terra, estan compostos principalment de roques de silicat i no han crescut a partir de les capes gasoses exteriors d'hidrogen i heli que es troben en els gegants gasosos. No s'ha descartat que pugui evolucionar vida en els núvols superiors dels planetes gegants, encara que es considera poc probable atès que no tenen superfície i la seva gravetat és molt gran. Els satèl·lits naturals dels planetes gegants, d'altra banda, són candidats perfectament vàlids pel desenvolupament de la vida.

Quan s'analitza quins ambients tenen major probabilitat de permetre l'existència de vida, se sol fer una distinció entre els organismes unicel·lulars com els eubacteris i arquees, i els organismes complexos com els metazous (animals). Les característiques planetàries llistades a continuació es consideren essencials per la vida, però en tots els casos els impediments a l'habitabilitat han de considerar-se més severos pels organismes pluricel·lulars com les plantes i els animals que per la vida unicel·lular.

8.3.1.Massa

Els planetes amb poca massa no són bons candidats per l'existència de la vida per les següents dues raons:

1. La seva baixa gravetat fa que conservar l'atmosfera sigui difícil. Les molècules tenen més probabilitat d'arribar a la velocitat d'escapament i perdre's a l'espai quan són bombardejades amb vent solar o per una col·lisió.

Així també, els planetes que no tenen una atmosfera gruixuda manquen del material necessari per a una bioquímica primària, tenen poc aïllament i poca transferència de calor entre la seva superfície (per exemple, Mart, amb la seva fina atmosfera és més freda del que ho seria la Terra a una distància semblant) i menys protecció contra la radiació d'alta freqüència i els meteoroides.

A més, si l'atmosfera és menor de 0,006 atmosferes terrestres, no pot existir aigua en forma líquida per no arribar a la pressió atmosfèrica requerida. El rang de temperatures en el qual l'aigua és líquida és més petit a baixes pressions, en general.

2. Els planetes petits tenen diàmetres petits i, per tant, una proporció superfície/volum més alta que els planetes majors. Aquests cossos tendeixen a perdre ràpidament l'energia que va sobrar després de la seva formació i acaben geològicament morts, mancats de volcans, terratrèmols i activitat tectònica que proporcionen a la superfície materials necessaris per la vida i l'atmosfera. Destaco la tectònica de plaques ja que és essencial, almenys a la Terra, no solament perquè serveix per reciclar minerals i compostos químics importants, sinó perquè també fomenta la biodiversitat creant continents i augmentant la complexitat ambiental i ajuda a crear les cèl·lules convectives necessàries per generar el camp magnètic terrestre.

“Poca massa” és una característica planetària relativa. Es considera que la Terra té poca massa quan es compara amb els gegants gasosos del Sistema Solar, però és, de tots els cossos terrestres, el més gran en diàmetre i massa i també el més dens. És prou gran per retenir una atmosfera amb la seva gravetat i perquè el seu nucli líquid segueixi sent una font de calor, impulsant la diversa geologia de la superfície.

Mart, en contrast, està gairebé mort geològicament i ha perdut gran part de la seva atmosfera. Per tant, és deduïble que el límit de la massa mínima per l'habitabilitat es troba en algun punt entre Mart i la Terra o Venus.

Considero interessant destacar casos excepcionals: la lluna de Júpiter, Ió (més petita que els planetes terrestres) és volcànicament activa per les tensions gravitatòries induïdes per la seva òrbita; Europa, satèl·lit de Júpiter, pot tenir un oceà líquid sota una capa congelada degut també a l'energia creada en la seva òrbita al voltant d'un gegant gasós; la lluna de Saturn, Tità, d'altra banda té una remota possibilitat de ser habitable ja que conserva una gruixuda atmosfera i són possibles les reaccions bioquímiques en el metà líquid de la seva superfície.

Aquests satèl·lits són excepcions però demostren que la massa com a criteri d'habitabilitat no pot considerar-se definitiva.

Finalment, un planeta gran és probable que tingui un gran nucli de ferro. Això permet l'existència d'un camp magnètic que protegeixi al planeta del vent solar, que d'altra banda tendiria a reduir la seva atmosfera i bombardejaria els éssers vius amb partícules ionitzades.

En conclusió, la massa no és l'únic criteri per produir un camp magnètic però és un component significatiu del procés.

8.3.2. Òrbita i rotació

Com en els altres criteris, l'estabilitat és la consideració crítica per determinar l'efecte de les característiques orbitals i rotacionals sobre l'habitabilitat planetària.

Cal destacar l'excentricitat orbital. Els cossos lligats gravitacionalment entre si descriuen òrbites en forma d'el·lipse. L'excentricitat de l'òrbita expressa el grau de desviació de l'òrbita d'un planeta respecte una òrbita perfectament circular.

Així doncs, com més gran és l'excentricitat major és la variació de la temperatura en la superfície d'un planeta. Encara que els essers vius són adaptatius, solament poden suportar certa variació, sobretot si aquesta sobrepassa tan el punt de congelació com el punt d'ebullició del planeta.

Si, per exemple, els oceans de la Terra s'evaporesin i congelessin alternativament, és difícil imaginar com podria haver evolucionat la vida tal com la coneixem.

Com més complex és un organisme, més sensible és a les temperatures.

L'òrbita de la Terra és quasi circular, amb una excentricitat menor de 0,02.

Les dades recollides sobre l'excentricitat orbital dels planetes extrasolars han sorprès a molts investigadors: el 90% té una excentricitat orbital més gran que els planetes del Sistema Solar, sent la mitjana 0,25³⁰.

El moviment del planeta al voltant del seu eix de rotació també ha de complir certs criteris perquè la vida tingui oportunitat d'evolucionar. Una primera suposició és que el planeta ha de tenir estacions moderades. Si hi ha poca o cap inclinació axial³¹ (o obliquïtat) no hi haurà estacions i, per tant, desapareixerà un estimulants principal de la dinàmica de la biosfera. El planeta també seria molt més fred del que seria si tingués una inclinació significativa: quan la radiació més intensa cau sempre dins d'uns pocs graus de l'equador, el clima càlid no pot superar al polar i el clima del planeta acaba dominat pels sistemes climàtics polars, més freds. D'altra banda, si un planeta està radicalment inclinat, les estacions seran extremes i faran més difícil que la biosfera arribi a l'homeòstasi³².

Cal destacar, però, que els estudis mostren que fins i tot les inclinacions més extremes de fins a 85 graus no descarten absolutament la vida³³.

No solament s'ha de considerar la inclinació axial mitjana, sinó també la seva variació en el temps. La inclinació de la Terra varia entre 21,5 i 24,5 graus en 41.000 anys. Una variació més dràstica, o una periodicitat molt més curta, induirien canvis climàtics com variacions en les estacions.

Altres consideracions orbitals són:

³⁰ Dada publicada a la revista *Astrobiology Magazine* el 22 de Juny de 2005.

³¹ En astronomia, l'obliquïtat o inclinació axial és l'angle que formen l'eix de rotació d'un planeta amb la perpendicular al pla de la seva òrbita al voltant del Sol.

³² S'anomena homeòstasi a la tendència a mantenir l'equilibri i l'estabilitat interns en els diferents sistemes biològics.

³³ "Sempre que no ocupin superfícies continentals que sofreixen estacionalment la temperatura més alta." *Planetary Tilt Not a Spouler For Habitation, Penn State* 25 d'Agost de 2003.

1. El planeta ha de girar relativament de pressa perquè el cicle dia-nit no sigui massa llarg. Si un dia dura anys, la temperatura diferencial entre el costat de dia i el costat de nit serà important, i apareixen problemes similars als de l'excentricitat orbital extrema.
2. Els canvis de la direcció de l'eix de rotació no haurien de ser pronunciats.

8.3.3. Geoquímica

La geoquímica és la branca de la geologia i de la química que estudia la composició i el comportament químic de la Terra.

En general s'assumeix que qualsevol vida extraterrestre que pugui existir estarà basada en la mateixa química fonamental que la vida terrestre, ja que els quatre elements primordials per la vida, el carboni, hidrogen, oxigen i nitrogen també són els elements químics reactius més comuns de l'univers. Aquests quatre elements constitueixen el 96% de la biomassa total de la Terra. El carboni té una capacitat d'enllaçar-se amb si mateix i formar estructures variades i intricades, convertint-lo en el material ideal pels complexos mecanismes que formen les cèl·lules vives. L'hidrogen i l'oxigen, en forma d'aigua, componen el solvent en el qual tenen lloc els processos biològics i en el qual es van produir les primeres reaccions que van conduir al sorgiment de la vida.

L'energia alliberada en la formació dels enllaços covalents³⁴ entre el carboni i l'oxigen és el combustible de tots els éssers vius complexos. Aquests quatre elements serveixen per construir aminoàcids³⁵, que són els blocs constitutius de les proteïnes, la substància del teixit viu.

L'abundància a l'espai no sempre té reflex en una abundància en els planetes; per exemple, dels quatre elements vitals, solament l'oxigen existeix en abundància a l'escorça terrestre. Això es pot explicar en part pel fet que molts d'aquests elements, com l'hidrogen i el nitrogen, juntament amb els seus compostos més bàsics com el diòxid de carboni, el monòxid de carboni, el metà, l'amoniac i l'aigua, són gasos a temperatures temperades. A la càlida regió propera al Sol, aquests compostos volàtils no van poder haver jugat un paper significatiu en la formació geològica dels planetes. En canvi, van ser capturats en forma gasosa sota les joves escorces, que en la seva major part estaven formades per compostos rocosos no volàtils com el diòxid de silici. L'alliberament dels compostos volàtils a través dels primers volcans hauria contribuït a la formació de l'atmosfera de planetes.

³⁴ L'enllaç covalent és un tipus d'enllaç químic en què dos àtoms comparteixen un o més parells d'electrons de tal manera que la seva escorça quedi plena.

³⁵ Els aminoàcids són molècules que contenen els grups funcionals amino i carboxil. Els elements bàsics d'aquests són el carboni, l'hidrogen, l'oxigen i el nitrogen.

No obstant això, l'alliberament de gasos volcànics no pot explicar la quantitat d'aigua que hi ha als oceans de la Terra. La gran majoria de l'aigua necessària per la vida va haver de venir del Sistema Solar exterior, lluny del calor solar on va poder romandre sòlida.

Els cometes que van impactar amb la Terra als primers anys del Sistema Solar haurien dipositat vastes quantitats d'aigua, a més dels altres compostos volàtils necessaris per la vida, sobre la jove Terra fent possible l'evolució de la vida.

Per tant, encara que hi ha raons per afirmar que els quatre "elements vitals" estan disponibles en qualsevol lloc, és probable que un sistema habitable també necessiti un subministrament a llarg termini de cossos en òrbita que sembri els planetes interiors. Sense els cometes és possible que la vida que coneixem no existís a la Terra. També existeix la possibilitat que altres elements diferents dels imprescindibles a la Terra siguin els que proporcionin una base bioquímica per la vida a altres llocs.

8.3.4. Microambients

Un altre factor de complicació a la recerca de criteris d'habitabilitat planetària és que, en teoria, només una petita porció d'un planeta habitable pot tenir algun tipus de microorganisme viu (microambients).

Per exemple, un planeta que no pogués suportar vida o una atmosfera a causa de l'energia solar en les condicions del seu entorn, podria ser capaç de fer-ho dins d'una profunda fissura o una fosca cova volcànica. Carl Sagan va estudiar els exemples d'aquest concepte en el mateix Sistema Solar tenint en compte la possibilitat d'organismes que sempre estarien en suspensió a l'aire dins de l'alta atmosfera de Júpiter, tot i que la superfície de Júpiter és inhabitable.

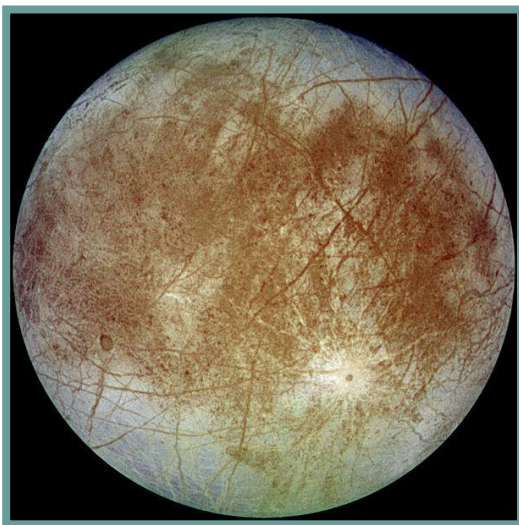


Figura 17. El quart satèl·lit més gran de Júpiter, Europa, es creu que pot tenir alguna espècie de vida sota la seva superfície. Aquest petit "oasi" seria un exemple de microambient.

Font:

<https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Europa-moon.jpg>

8.4. SISTEMES ESTEL·LARS ALTERNATIUS

Per determinar l'habitabilitat de la vida extraterrestre durant molt de temps els astrònoms han centrat la seva atenció a les estrelles semblants al Sol. No obstant això, han començat a explorar la possibilitat que la vida es pugui formar en sistemes molt diferents del Sistema Solar.

8.4.1. Sistemes binaris

Les estimacions suggereixen que el 50% o més dels sistemes estel·lars són sistemes binaris³⁶.

La separació entre les estrelles en un sistema binari se situa entre menys d'una unitat astronòmica (la distància entre la Terra i el Sol) fins a diversos centenars. En aquest últim cas, els efectes gravitatoris seran menyspreables sobre un planeta que orbiti alguna de les estrelles i la seva habitabilitat planetària no es veurà pertorbada tret que l'òrbita sigui molt excèntrica. Malgrat això, quan la separació sigui significativament menor pot ser que una òrbita estable sigui impossible. Si la distància d'un planeta a la seva estrella primària és major que un cinquè de la distància mínima a la qual s'acosta a l'altra estrella, no està garantida l'estabilitat orbital. El sol fet que es puguin formar planetes en sistemes binaris no és gens clar, atès que les forces gravitatòries podrien interferir amb la formació d'aquests.

El treball teòric d'Alan Boss a l'Institut Carnegie ha demostrat que es poden formar gegants gasosos al voltant de sistemes binaris de la mateixa manera que ho fan amb les estrelles solitàries.

Un estudi d'Alfa Centauri, el sistema estel·lar més proper al Sol, suggereix que no cal descartar als sistemes binaris de la recerca de planetes habitables. Centauri A i B, les dues estrelles, estan separades per 11 UA en el seu acostament màxim i ambdues poden tenir zones habitables estables.

Un estudi de l'estabilitat orbital a llarg termini de planetes simulats en aquest sistema, demostra que els planetes situats aproximadament a 3 UA de qualsevol de les estrelles pot romandre estable.

³⁶ Es tracta d'un sistema de dues estrelles lligades físicament per la força gravitatòria i que, per tant, giren al voltant d'un centre de masses comú. Per aquesta raó giren l'una al voltant de l'altra.

8.4.2. Sistemes amb nana roja

Una nana roja és un tipus d'estrella caracteritzada per ser petita i relativament freda, així com per tenir un diàmetre i una massa inferior a un terç del Sol i una temperatura superficial inferior a 3.500K.

Determinar l'habitabilitat d'una nana roja pot ajudar a determinar com de comuna és la vida a l'univers ja que les nanes vermelles constitueixen entre el 70 i el 90 per cent de totes les estrelles de la galàxia. Probablement les nanes marrons³⁷ són més nombroses que les nanes vermelles, però no se solen classificar com estrelles i mai podrien sustentar vida tal com és coneguda, ja que la poca calor que emeten desapareix ràpidament.

Durant molts anys els astrònoms han descartat a les nanes vermelles com una potencial llar per la vida. La seva petita mida (des de 0,1 a 0,6 masses solars) significa que les seves reaccions nuclears es produeixen a un ritme lent i emeten molt poca llum. Qualsevol planeta que orbiti al voltant d'una nana vermella hauria d'estar molt a prop de la seva estrella per arribar a una temperatura de superfície similar a la de la Terra (des de 0,3 UA, just a l'interior de l'òrbita de Mercuri, fins a 0,032 UA depenent de l'estrella). Un món així tindria un any de 6,3 dies. A aquestes distàncies, la gravetat de l'estrella provocaria un acoblament de marea. Així doncs, la cara diürna del planeta apuntaria eternament cap a l'estrella, mentre que la cara nocturna sempre apuntaria en direcció contrària. L'única manera que la potencial vida pogués evitar l'infern o la congelació seria que el planeta tingués una atmosfera prou gruixuda per transferir la calor de l'estrella des de la cara diürna a la nocturna.

Durant molt de temps es va assumir que una atmosfera tan gruixuda evitaria que la llum solar arribés a la superfície, impeding la fotosíntesi. Aquesta idea s'ha suavitzat amb la investigació. Els estudis de Robert Harbele i Manoj Joshi, de l'Ames Research Center de la NASA, a Califòrnia, han demostrat que l'atmosfera d'un planeta (suposant que estigués composta dels gasos d'efecte hivernacle) necessitaria tenir només 100 mb³⁸, el 10% de l'atmosfera de la Terra perquè la calor es transfereixi efectivament fins a la cara nocturna. Això està dintre dels nivells requerits per la fotosíntesi encara que l'aigua seguiria estant congelada a la cara nocturna.

Investigacions posteriors suggereixen que els planetes acoblats orbitalment als sistemes amb nana vermella serien habitables almenys per les plantes superiors.

L'inconvenient de l'acoblament pot desaparèixer si es considera la possibilitat que el planeta tingui un satèl·lit o si s'ha considerat el propi satèl·lit com candidat a l'habitabilitat.

- Si s'estudia l'habitabilitat al planeta, el satèl·lit podria haver produït l'acoblament de la rotació del planeta amb el seu propi moviment al voltant d'aquest, evitant que el planeta

³⁷ Una nana marró és un estel de dimensions reduïdes que es caracteritza per no tenir la suficient massa per iniciar les reaccions termonuclears de fusió d'hidrogen, però produeix una emissió important a l'infraroig.

³⁸ Mil·libar, unitat de pressió.

mostrí sempre la mateixa cara a l'estrella. En el Sistema Solar es troba un exemple a Plutó, que gira sobre si mateix en el mateix període (6,4 dies) que triga el seu satèl·lit Caront a completar una revolució.

- Si s'estudia l'habitabilitat del satèl·lit, es troba que la major part dels satèl·lits del Sistema Solar (inclosa la Lluna) giren mostrant sempre la mateixa cara al planeta i alguns d'ells ho fan en períodes que són aptes per l'habitabilitat. No obstant això, cap satèl·lit del Sistema Solar és suficientment gran com per considerar-se habitable.

De totes formes, la grandària no és l'únic factor que pot fer a una nana roja incompatible amb la vida. En un planeta que orbita al voltant d'una nana roja, la fotosíntesi seria impossible a la cara nocturna ja que mai veuria el sol. En la cara diürna, com el Sol mai sortiria ni es posaria, les zones sota l'ombra d'una muntanya romandrien així per sempre. La fotosíntesi coneguda seria complicada pel fet que una nana roja produeix la major part de la seva radiació a l'infraroig i a la Terra aquest procés depèn de la llum visible. Tot i que hi ha molts ecosistemes terrestres que depenen de la quimiosíntesi³⁹ en lloc de la fotosíntesi i que seria possible en un sistema amb nana roja. Una posició estàtica del Sol elimina la necessitat que les plantes dirigeixin les seves fulles cap a ell, s'hagin d'ocupar dels canvis al patró de sol/ombra, o hagin de canviar durant la nit de la fotosíntesi a l'energia emmagatzemada. En absència d'un cicle dia-nit, incloent-hi la llum feble del matí i la tarda, hi haurà molta més energia disponible a un cert nivell de radiació.

Les nanes marrons són molt més variables i violentes que les anteriors. Sovint estan cobertes de taques solars que poden atenuar la seva llum fins a un 40% durant mesos seguits, mentre que altres vegades emeten flamarades gegants que poden duplicar la seva lluentor en qüestió de minuts. Aquesta variació seria molt nociva per la vida encara que també podria estimular l'evolució augmentant els ritmes de mutació i canviant ràpidament les condicions climàtiques.

Així doncs, les nanes roges tenen un gran avantatge sobre les altres estrelles en termes d'habitabilitat per la vida: viuen molt de temps. La humanitat va trigar 4.500 milions d'anys a aparèixer sobre la Terra i la vida tal com es coneix tindrà condicions adequades durant uns 500 milions d'anys més⁴⁰. Les nanes roges, en canvi, poden viure durant bilions d'anys perquè les seves reaccions nuclears són molt més lentes que les de les estrelles majors, el que significa que la vida podria tenir més temps per evolucionar i sobreviure.

³⁹ La quimiosíntesi és la producció biològica de matèria orgànica a partir de molècules d'un àtom de carboni i altres nutrients, utilitzant l'oxidació de molècules inorgàniques sense comptar amb la llum solar, a diferència de la fotosíntesi.

⁴⁰ Publicació de la Universitat de Washington a l'article "*The end of the world has already begun*" dia 13 de Gener de 2003.

8.5. EL VEÏNATGE GALÀCTIC

Els científics també han considerat la possibilitat que certes zones de les galàxies (zones habitables galàctiques) siguin més adequades per la vida que d'altres. El Sistema Solar, que està situat al Braç d'Orió, a la vora de la galàxia Via Làctia, es considera que està en un punt molt favorable per la vida⁴¹ per les següents raons:

1. No està en un cúmul globular⁴², on la densitat de les estrelles és hostil per la vida donada l'excessiva radiació i pertorbacions gravitatòries.
2. No està a prop d'una font activa de raig gamma.
3. No està a prop del nucli galàctic, on de nou la densitat estel·lar augmenta la quantitat de radiació ionitzant. També es creu que existeix un forat negre supermassiu⁴³ al centre de la galàxia que pot resultar perillós per qualsevol cos proper.
4. L'òrbita circular del Sol al voltant del centre galàctic el manté fora dels braços espirals, on de nou les intenses radiacions i gravetat podrien ser incompatibles amb la vida⁴⁴.

⁴¹ Anotació de Leslie Mullen a “*Galactic Habitable Zones*” Astrobiology Magazine, dia 29 de Maig de 2001.

⁴² S'anomena cúmul globular a un grup esfèric d'estrelles velles que orbiten entorn una galàxia com si fos un satèl·lit.

⁴³ Un forat negre supermassiu és una concentració de matèria d'altíssima densitat, tal que la seva força gravitatòria és tan elevada que la velocitat és superior a la velocitat de la llum. Per tant, res que es trobi a prop seu pot escapar-se'n. Concretament el forat negre supermassiu té una massa de l'ordre de milions de milers de milions de masses solars.

⁴⁴ “*Rare Earth*” (pàg. 26-29).



Figura 18. Imatge del forat negre supermassiu de la galàxia Centaurus A.

Font:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Black_Hole_Outflows_From_Centaurus_A.jpg

En conclusió, el que necessita un sistema apte per la vida és una relativa solitud. Si el Sol estigués immers en una unió de sistemes, la probabilitat d'estar fatalment a prop d'una font de radiació perillosa augmentaria significativament. És més, els veïns propers podrien alterar l'estabilitat de diversos cossos orbitals que podrien causar una catàstrofe si s'endinsen al Sistema Solar intern.

Encara que una unió estel·lar resulta desavantatjosa per l'habitabilitat, també ho és l'aïllament extrem. Una estrella tan rica en metalls com el Sol no s'hauria format a les regions més exteriors de la Via Làctia donada la disminució en l'abundància relativa de metalls i l'absència general de formació d'estrelles. Per tant, una situació "suburbana", com la que gaudeix el Sistema Solar, és preferible al centre de la galàxia o a les zones més allunyades⁴⁵.

⁴⁵ Comentari de Bruce Dorminey a l'article « *Dark Threat* » de la revista *Astronomy* (pàg. 40-45), el Juliol de 2005.

9. MÈTODE DEL TRÀNSIT

Tal com s'ha esmentat anteriorment, el mètode que jo he utilitzat pel descobriment dels exoplanetes és el mètode del trànsit. Recordem que aquest consisteix en observar fotomètricament l'estrella i detectar canvis en la seva magnitud aparent quan un planeta gira al voltant d'ella.

Darrere del mètode del trànsit tan sols hi ha una mica de matemàtiques així com imaginació.

Comprovarem com es dedueixen les fórmules que ens permeten, a partir d'una corba de llum⁴⁶, descobrir la mida del planeta, la distància amb la que orbita la seva estrella i la inclinació amb la que ho fa respecte la nostra posició d'observador.

Començarem explicant la seva formulació bàsica. Aquesta tècnica es basa en el senzill principi que si un planeta passa per davant el disc d'una estrella, bloqueja part de la llum que l'observador normalment rebria. Si de forma periòdica es percep aquesta disminució, es pot afirmar que un objecte opac està orbitant l'estrella.

Un trànsit planetari, mesurat en una corba de llum d'una estrella, queda majoritàriament descrit per tres paràmetres: profunditat, duració i forma.

9.1. PROFUNDITAT DEL TRÀNSIT

La intensitat de la disminució de la lluminositat esperada durant el trànsit, pot inferir-se simplement per la fracció del disc estel·lar cobert pel planeta.

Aquí presentem la primera fórmula:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

On F és el flux mesurat de l'estrella i ΔF és el canvi en el flux observat durant el trànsit. La part dreta és simplement la relació de les àrees dels discs del planeta i estrella.

Aquesta senzilla equació ens ofereix un potent resultat: si un planeta transita la seva estrella, automàticament disposem d'una estimació de la mida del planeta, en termes relatius a la mida de la seva estrella, de la qual prèviament coneixerem el seu radi a partir de l'anàlisi espectral.

Però una vegada detectada una disminució de la lluminositat periòdica en una estrella, és suficient per afirmar que hem detectat el trànsit d'un exoplaneta? No ho és, tan sols podríem

⁴⁶ La corba de llum representa la variació durant un trànsit de la lluminositat d'una estrella.

concloure que es tracta de qualsevol objecte opac. Per determinar doncs si es tracta d'un planeta, és necessari conèixer la seva massa (paràmetre que es troba mitjançant la tècnica de la velocitat radial, RV). La combinació d'ambdues tècniques és molt potent: les mesures de velocitat radial ens informen de la massa del planeta mentre que el mètode del trànsit acota la inclinació orbital.

Coneixent la massa i el radi deduïm la densitat i podem començar a inferir l'estat de la matèria que compon el planeta, és a dir, si ens trobem davant un planeta en estat gasos, sòlid o líquid.

9.2.DURADA DEL TRÀNSIT, INCLINACIÓ ORBITAL I PARÀMETRE D'IMPACTE

Anem a calcular una expressió a partir del període orbital P i de la fracció de l'òrbita del planeta durant la qual el planeta travessa el disc estel·lar.

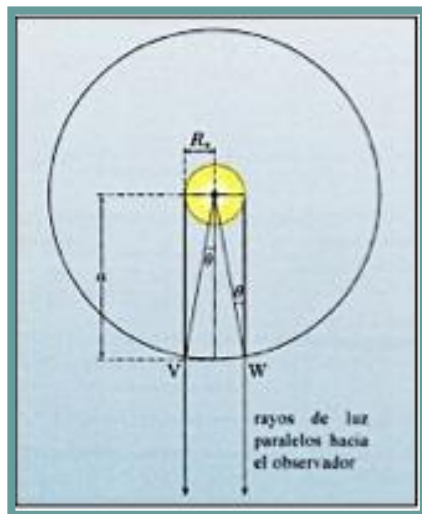


Figura 19.

Font: <http://exoplanetas.es/wp-content/uploads/2013/05/Captura-de-pantalla-2013-08-26-a-las-23.01.09.png>

En aquesta imatge (figura 19.) observem el següent: les línies paral·leles des dels extrems de l'estrella viatgen fins l'observador i intersecten l'òrbita del planeta als punts V i W. Sabent que el radi de l'òrbita a és molt major que el radi de l'estrella R , l'arc entre V i W té quasi la mateixa longitud que la corda V-W, és a dir $2R$.

Per una òrbita circular, la duració del trànsit s'expressa mitjançant la següent fórmula:

$$T \text{ durada} = P \times \frac{\text{longitud de l'arc } VW}{2\pi a} = \frac{P \times 2R}{2\pi a}$$

Simplificant obtenim que:

$$T \text{ durada} = \frac{PR}{\pi a}$$

Observant de nou la figura 19., podem deduir la següent fórmula:

$$\sin \theta = \frac{R}{a}$$

Per tant, aïllem i obtenim el valor de l'angle:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{R}{a}\right)$$

Finalment substituint a la primera equació, obtenim:

$$T \text{ durada} = P \times \frac{2a \sin^{-1}\left(\frac{R}{a}\right)}{2\pi a} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{R}{a}\right)$$

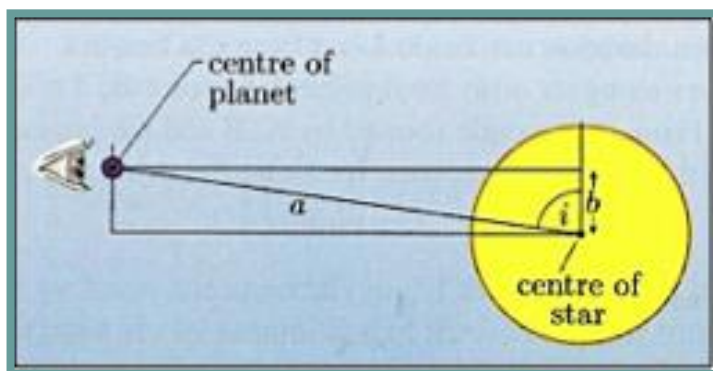


Figura 20. Trigonometria que determina el paràmetre d'impacte, $b = a \cos i$

Font:

<http://exoplanetas.es/metodo-del-transito/>

Aquesta última equació és vàlida quan l'observador està situat exactament al pla de l'òrbita. En cas contrari, estadísticament el més freqüent, existeix un angle entre aquest pla i l'observador que denominem i (figura. 20), així com el paràmetre d'impacte b que veurem més endavant.

És important abans, conèixer les fases d'un trànsit:

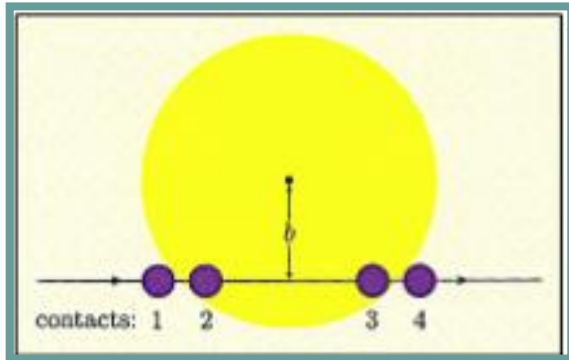


Figura 21. Fases del trànsit.

Font:

<http://exoplanetas.es/metodo-del-transito/>

Un trànsit té quatre contactes com observem a la figura 21. El primer es dona quan l'extrem del planeta coincideix amb l'extrem de l'estrella. El segon, quan just tot el disc del planeta ha entrat al disc de l'estrella. El tercer correspon a l'últim instant quan tot el disc del planeta està dins del disc estel·lar. Finalment, el quart contacte és el moment en el que tot el disc del planeta ha sortit completament del disc de l'estrella.

D'acord amb el que s'ha comentat anteriorment, el paràmetre d'impacte és la distància vertical a la meitat del trànsit del centre del planeta des del centre de l'estrella vista per l'observador (vegeu la figura 20.). Aquesta distància ve donada per la següent fórmula:

$$b = a \cos i$$

d'acord amb la raó trigonomètrica:

$$\cos i = \frac{b}{a}$$

Sent i , l'angle; b , el catet contigu o distància vertical; i a , la hipotenusa.

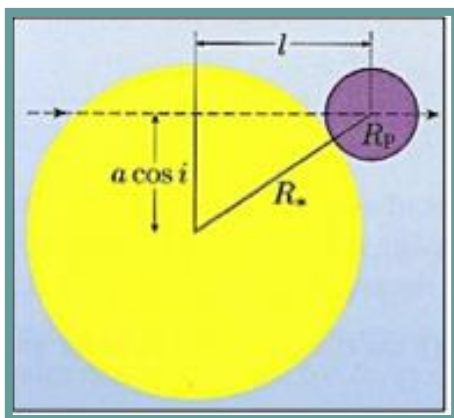


Figura 22.

Font:

<http://exoplanetas.es/metodo-del-transito/>

Observant més detalladament, trobem la geometria implicada durant el moment del quart contacte. D'aquí la importància d'esmentar els quarts contactes prèviament on, recordem, que en aquest cas el disc del planeta ha sortit completament del disc de l'estrella.

El teorema de Pitàgores ens permet expressar l en termes del paràmetre d'impacte b i els radis de l'estrella i el planeta.

Anant pas per pas, comencem pel principi. Recordem el teorema de Pitàgores:

$$a^2 + b^2 = h^2$$

Sent h la hipotenusa i a i b els corresponents catets.

És important esmentar que la fórmula només és apte per als triangles rectangles⁴⁷, com és en aquest cas.

Per tal que la comprensió científica sigui més senzilla, anem a relacionar aquestes tres incògnites amb les que trobem a la figura 22.

- h , la hipotenusa, s'identifica com la suma del radi de l'estrella i del radi del planeta, $R + Rp$.
- a , el catet, s'identifica com a $\cos i$.
- b , l'altre catet, és l .

Així doncs, ja podem substituir-ho:

$$a^2 + b^2 = h^2$$

→

$$(R + Rp)^2 = a^2 \cos^2 i + l^2$$

Finalment aïllem l :

$$l^2 = (R + Rp)^2 - a^2 \cos^2 i \quad \longrightarrow \quad l = \sqrt{(R + Rp)^2 - a^2 \cos^2 i}$$

Així, podem relacionar les dues equacions següents que ja hem vist:

$$l = \sqrt{(R + Rp)^2 - a^2 \cos^2 i}$$

i

$$T_{durada} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{R}{a} \right)$$

⁴⁷ Un triangle rectangle és aquell triangle que sempre té un angle recte, de 90°.

Substituint l'equació de l'esquerra anterior a l'equació de la dreta anterior obtenim l'expressió general de la durada d'un trànsit per un exoplaneta en òrbita circular:

$$T_{durada} = \frac{p}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(R + Rp)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a} \right)$$

I si simplifiquem l'equació, obtenim:

$$T_{durada} = \frac{p}{\pi} \left[\left(\frac{R}{a} \right)^2 - \cos^2 i \right]^{1/2}$$

Amb aquesta fórmula, si coneixem el tipus espectral de l'estrella, podem conèixer el valor de la seva massa M^* i el seu radi R^* . Llavor, obtenint experimentalment el valor de la durada del trànsit T_{durada} i el període p , és possible calcular la inclinació orbital i .

9.3. PERÍODE DE ROTACIÓ

El període orbital de l'exoplaneta es determina observant el trànsit durant diversos cicles. Es requereixen com a mínim tres; dos per establir el paràmetre i un més per confirmar-ho.

Per fer-ho, s'utilitza la següent fórmula:

$$P = \frac{T_{entre\ dues\ observacions}}{n\ cicles}$$

Conegut el període de rotació del planeta, amb la tercera llei de Kepler obtenim el semieix major en funció de les masses i el període orbital:

$$\frac{a^3}{p^2} = \frac{G(M^* + Mp)}{4\pi^2} \longrightarrow a = (G(M^* + Mp))^{1/3} (P/2\pi)^{2/3}$$

Ja que $M_p < M^*$, només disposant del període orbital P i M^* , el semieix major de l'òrbita pot ser deduït:

$$a \approx (GM^* (P/2\pi)^2)^{1/3}$$

9.4. FORMA DEL TRÀNSIT

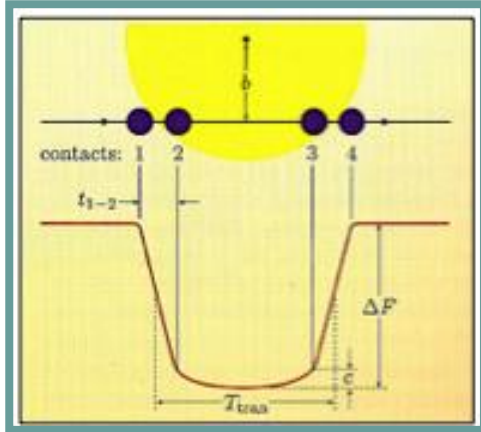


Figura 23. Propietats d'una corba de llum al seu trànsit.

Font:

<http://exoplanetas.es/wp-content/uploads/2013/05/Captura-de-pantalla-2013-08-27-a-las-19.25.31.png>

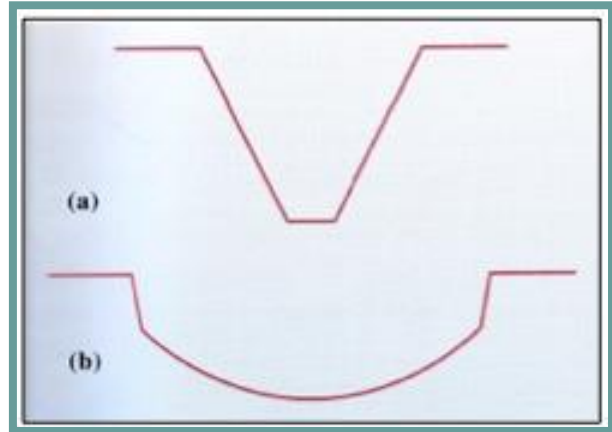


Figura 24. a) corba de llum d'un planeta gran amb paràmetre d'impacte elevat i molt poc enfosquiment a l'extrem; b) corba de llum d'un planeta petit amb reduït paràmetre d'impacte i elevat enfosquiment cap a l'extrem.

Font:

<http://exoplanetas.es/wp-content/uploads/2013/05/Captura-de-pantalla-2013-08-27-a-las-19.25.31.png>

La forma del trànsit, o el que és el mateix la forma de la corba de la llum, ve determinada pels següents factors:

1. La profunditat del trànsit ΔF , mesurada des del nivell fora del trànsit al nivell a meitat del trànsit.
2. La durada del trànsit T_{durada} , T_{dur} , T_{trans} , mesurada entres el primer i el quart contacte. A la vegada depèn de R_p , R^* i i .
3. La durada de l'ingrés t_1-t_2 . Aquest temps depèn del radi del planeta R_p principalment però també de la inclinació orbital i . En funció d'aquesta, tindrem trànsits centrals en els que el planeta es mou a través de l'extrem equatorial de l'estrella i llavors la distància entre el primer i segon contacte és mínima (produeix ingressos curts). En canvi, per valors de i majors, el moviment del planeta a través de l'extrem és un angle normal i llavors la distància i el temps transcorregut són majors (produeix ingressos llargs).

4. Enfosquiment cap a l'extrem. Les estrelles no tenen una lluminositat uniforme a tota la seva superfície sinó que aquesta decreix des del centre fins a l'extrem. Aquest efecte és el responsable de la curvatura de la part del fons de la corba de llum. Aquesta curvatura no és igual de marcada per totes les longituds d'ona, sent les ones més llargues menys sensibles.

10. PLANIFICACIÓ DE LES OBSERVACIONS

10.1. ASPECTES PREVIS

Els planetes extrasolars s'observen? No, generalment no. Els exoplanetes es detecten. Només podem observar-los (referint-nos a la visualització de la seva imatge directa) donats els següents casos:

1. Si viatgem fins ell. Una opció bastant poc probable però no deixa de ser existent.
2. Si disposem de temps d'observació amb telescopis professionals de grans obertures amb instrumentació molt específica per fer-ho. Si el telescopi es troba en òrbita terrestre és molt millor.
3. Si el planeta és jove i per tant calent (la qual cosa implica que brilla per si mateix) i separat de la seva òrbita. Només 35 casos han estat directament observats.

En resum, en aquest treball no podem observar directament els exoplanetes que es descobreixin però si que es podran detectar, com ja he esmentat, a través del mètode del trànsit.

10.1.1. Equipament necessari

Aquest és el material que es recomana utilitzar:

- Telescopi de mitjana obertura, com més gran sigui millor, tot i que s'ha donat casos d'observacions amb telescopis de 5 cm. Amb 20 o 25 cm tenim molts trànsits al nostre abast.
- Muntura motoritzada i controlable amb un ordinador.
- Càmera CCD per registrar la llum de l'estrella, opcionalment equipada amb algun filtre fotomètric.

Jo he utilitzat el següent equipament de l'Observatori Can Roig de Llagostera:

- Telescopi Takahashi Mewlon 200mm d'obertura.
- Muntura equatorial Gemini G42.
- Càmera CCD QHY9.
- Les fotografies es fan amb un filtre IDAS, per minimitzar els efectes de la contaminació lumínica.
- Petit telescopi d'autoguiat LUNÁTICO EZG amb una càmera CCD QHY5.
- El software de control del telescopi es diu THE SKY6.
- Programa per fer les fotografies Maxim DL.

10.1.2. Resultats esperats

Fa anys que es registren trànsits d'exoplanetes amb telescopis d'aficionats amb molt bons resultats⁴⁸. Segons la profunditat del trànsit serem capaços de detectar exoplanetes, però en qualsevol cas disposem d'una llarga llista d'objectius.

Tinguem en compte que els primers trànsits es detectaren amb instruments d'una obertura petita⁴⁹. Per tant, si vols, pots. Trobaràs trànsits més o menys profunds, amb més o menys dispersió i error de mesura però el trànsit es manifestarà.

10.2. EINES PER PLANIFICAR L'OBSERVACIÓ

10.2.1. Conec el planeta que vull observar?

Si hem escollit un exoplaneta que, pel motiu que sigui, ens interessa observar, necessitem saber quan estarà visible. Això depèn de dues circumstàncies:

1. Que l'estrella sigui visible des de la nostra latitud en la determinada època de l'any.

Per saber-ho, el calendari d'observació ens proporciona l'eina *Object Visibility – Starobs*. Indicant als camps corresponents les coordenades geogràfiques de la nostra posició i les coordenades de l'objecte a estudiar, el programa produeix el gràfic que podeu veure a continuació mitjançant un exemple que presentaré.

Exemple: Jo visc a Palamós i m'agradaria observar des de casa meua, amb els materials necessaris esmentats anteriorment, l'exoplaneta Wasp-2b.

El primer que haig de fer és connectar-me a la pàgina web que he citat prèviament (*Object Visibility – Starobs*) i m'apareix la següent pàgina:

⁴⁸ Vegeu com exemple els resultats recollits a la pàgina *ETD (Exoplanet Transit Database)*.

⁴⁹ Fou el cas del telescopi STARE i nombrosos projectes de recerca com SuperWASP que tenen objectius de fins a 8 cm d'obertura.

Home > Astronomy > Object Visibility

Object Visibility - STARALT

Staralt is a program that shows the observability of objects in various ways: either you can plot altitude against time for a particular night (Staralt), or plot the path of your objects across the sky for a particular night (Startrack), or plot how altitude changes over a year (Starobs), or get a table with the best observing date for each object (Starmult). For further information, click on the "help" button at the bottom of the page.

Mode	Starobs
Night	11 August 2016 or date when the local night starts. Staralt, Startrack only.
Observatory	Roque de los Muchachos Observatory (La Palma, Spain) You can select one above or specify your own site below following this format: Longitude (°East) Latitude (°) [Altitude (metres)] [UTC offset (hours)]. Ex: 289.2767 -30.2283 2725 -4. 3.08 41.51 6 -2
Coordinates	Formats can be any of these: [name] hh mm ss tdd mm ss : [name] hh:mm:ss tdd:mm:ss : [name] ddd.ddd dd.ddd [name] must be a single word with no dots, avoid using single numbers. Every entry must be in the same format, do not use different formats with different entries. We recommend a maximum of 100 targets per submission. [Zb] 20:30:54.3645, +10:01:57.326 Alternatively, you can upload a file with coordinates. You can use the same format as in the TCS catalog . Target names must be single words with no dots. Examinar...
Options	Moon distance Included on plot. Moon coordinates at ~02:00 UT. Staralt only. 10°, X=5.8 Min. elevation (or max. airmass X). Starobs, Starmult only. Gif-HTML Output format
Submit	Retrieve Help
ING telescope limits	WHT: 89.8° < Altitude < 12° (plot). Targets with +28:57:40>Dec>+28:33:40 won't be accessible when transiting the zenithal blind spot (~0.2° size). INT: 90° < Altitude < 33° (20° if lower shutter raised), -8h < HA < +6, +90°>Dec>+30° 09' 30" (HA-Dec plot - lower shutter raised; lowest altitude-Dec plot).
More	These are other useful resources for planning observations: iObserve , astronomy tools , JSkyCalc , obstools .

Figura 25.

Font: <http://catserver.ing.iac.es/staralt/>

A continuació haig de comprovar que la pestanya *Mode* indiqui l'opció *Starobs* i introduir les coordenades del meu lloc d'observació així com de l'objecte que vull observar (que és en aquest cas Wasp-2b).

És molt important escriure les dades d'acord amb el format que es demana.

En el cas de la meua localitat, Palamós, les coordenades que haig d'introduir a l'apartat *Observatory* són, tal com es veu a la figura 25., les següents:

3.08 41.51 6 -2

- 3.08: longitud est.
- 41.51: latitud nord.
- 6: alçada en metres sobre el nivell del mar.

- -2: utc (Temps Universal Coordinat).

Aquesta informació la podeu trobar molt fàcilment a la xarxa.

Seguidament a l'apartat *Coordinates* hem d'indicar les coordenades de l'objecte que volem observar. En el meu cas, he buscat les coordenades de l'exoplaneta Wasp-2b i són les següents:

[2b] 20:30:53.3645, +10:01:57.326

Un cop finalitzada aquesta operació només cal que fem *click* a la casella *Retrieve* i ens apareixerà el gràfic que comentava anteriorment:

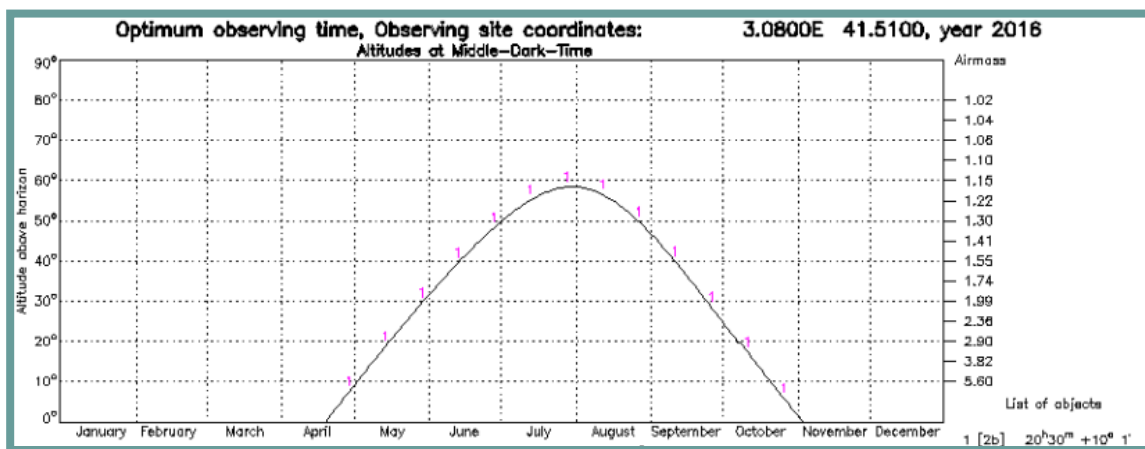


Figura 26.

Font: <http://catserver.ing.iac.es/staralt/index.php>

Quina informació podem extreure d'aquest gràfic? Doncs és molt senzill, els mesos més aptes per observar aquest exoplaneta són, principalment, juliol i agost. Durant ambdós mesos, vist des de la nostra posició exacta, l'estrella a la qual orbita l'exoplaneta Wasp-2b arriba a la seva màxima altura. Cal tenir una dada important que és l'altura que assoleix l'estrella. És a dir, a menys altura menys atmosfera i per tant menys és la qualitat d'observació.

Sense haver-ho previst, l'exemple que he presentat mostra una altura considerable de l'estrella i per tant no hi hauria cap problema a l'observació. Però ens podem trobar casos d'exoplanetes, el gràfic anterior dels quals no mostri una altura de la corba suficientment alta per poder realitzar l'observació.

2. Que l'exoplaneta realitzi un trànsit.

Un cop coneixem l'època de l'any on passarà l'exoplaneta que volem detectar, anem a determinar la data exacta on comença i acaba el trànsit. Per fer-ho utilitzarem la següent eina: *ETD – Exoplanet Transit Database*



Figura 27.

Font: <http://var.astro.cz/ETD>.

Les instruccions són les següents:

1. Accedeix a la pàgina ETD.

(<http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php>)

2. Assegura't que les coordenades del teu lloc d'observació són les correctes:

Figura 28.

Font: <http://var.astro.cz/ETD>.

De nou, en el cas de la meua localitat aquestes són les coordenades. Cal tenir en compte que s'ha d'inscriure el número aproximat sense xifres decimals.

3. A continuació fem *click* a la casella *submit* i ens apareix la següent pàgina:

ETD - Exoplanet Transit Database
http://var.astro.cz/ETD

Observers community | How to contribute to ETD | Model-fit your data | Transit predictions | KEPLER Transit predictions | KEPLER Candidates

Your ELONGITUDE (in deg): 0° - 360°
Your LATITUDE (in deg): 90° - 0° - -90°

Available predictions: (UT evening date)
2016-08- 28, 29, 30, 31.
2016-09- 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28.

User defined time span: From: Till:

Transits predictions for ELONGITUDE: 3° and LATITUDE: 41°

OBJECT	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)	D (min)	V (MAG)	DEPTH (MAG)	Elements Coords
WASP-57 b	18:17 38°,SW	30.08. 19:26 27°,SW	20:35 15°,W	138.24	13.04	0.0137	35058.5491+2.83091856"E RA: 14 55 16.84 DE: -02 03 27.5
WASP-103 b	18:45 47°,SW	30.08. 20:03 39°,SW	21:21 27°,SW	155.58	12.1	0.0129	36459.59957+0.925542"E RA: 16 37 15.37 DE: + 07 11 00.07
WASP-74 b	19:12 39°,SE	30.08. 20:21 46°,SE	21:30 49°,S	137.52	9.7	0.0104	36506.6918+2.13775"E RA: 20 18 10 DE: -01 04 32.6
Qatar-1 b	20:57 66°,N	30.08. 21:45 66°,N	22:34 64°,N	96.7	12.84	0.0204	35518.4102+1.4200246"E RA: 20 13 32 DE: +65 00 43
WASP-6 b	20:48 11°,SE	30.08. 22:06 21°,SE	23:24 27°,S	156.4	11.9	0.0236	34996.43267+3.361006"E RA: 23 12 37.75 DE: -22 40 26.1
TrES-2 b	21:45 72°,NW	30.08. 22:30 65°,NW	23:15 58°,NW	90	11.41	0.0169	33957.6358+2.47061322"E RA: 19 07 14 DE: +49 18 59
Kepler-5 b	20:16 81°,NE	30.08. 22:33 74°,W	0:51 50°,NW	275	13.9	0.0078	34955.90122+3.54846"E RA: 19 37 37.7 DE: +44 02 6.2
HAT-P-11 b	21:27 82°,NW	30.08. 22:36 72°,NW	23:45 60°,NW	138	9.59	0.0043	34605.89132+4.8878045"E RA: 19 50 50.14 DE: +48 04 49.1

What's new: | Archive

ETD - Exoplanet...
4.180 Me gusta

Me gusta esta página

Sé el primero de tus amigos en indicar que te gusta esto.

ETD - Exoplanet Transit Database
17 de diciembre de 2014

Dear observers, Exoplanet Transit Database is back on-line!
You can use all its features as usually. Sorry for long shutdown.
<http://var2.astro.cz/ETD>
Ver traducción

Current statistics:
(30. 8. 2016)

of objects: 295
of transits: 6430

DQ	# of transits
1	1453
2	1025
3	2494
4	756
5	693

Figura 29.

Font: <http://var.astro.cz/ETD>.

Trobem un llistat d'exoplanetes amb totes les seves característiques així com els dies que es poden observar (a la part superior).

4. El següent pas és seleccionar l'exoplaneta que ens interessa a nosaltres.

Exemple: D'acord amb la figura 28., selecciono com exemple l'exoplaneta WASP-57 b avui dia 30 d'Agost de 2016. Apareix la imatge següent:

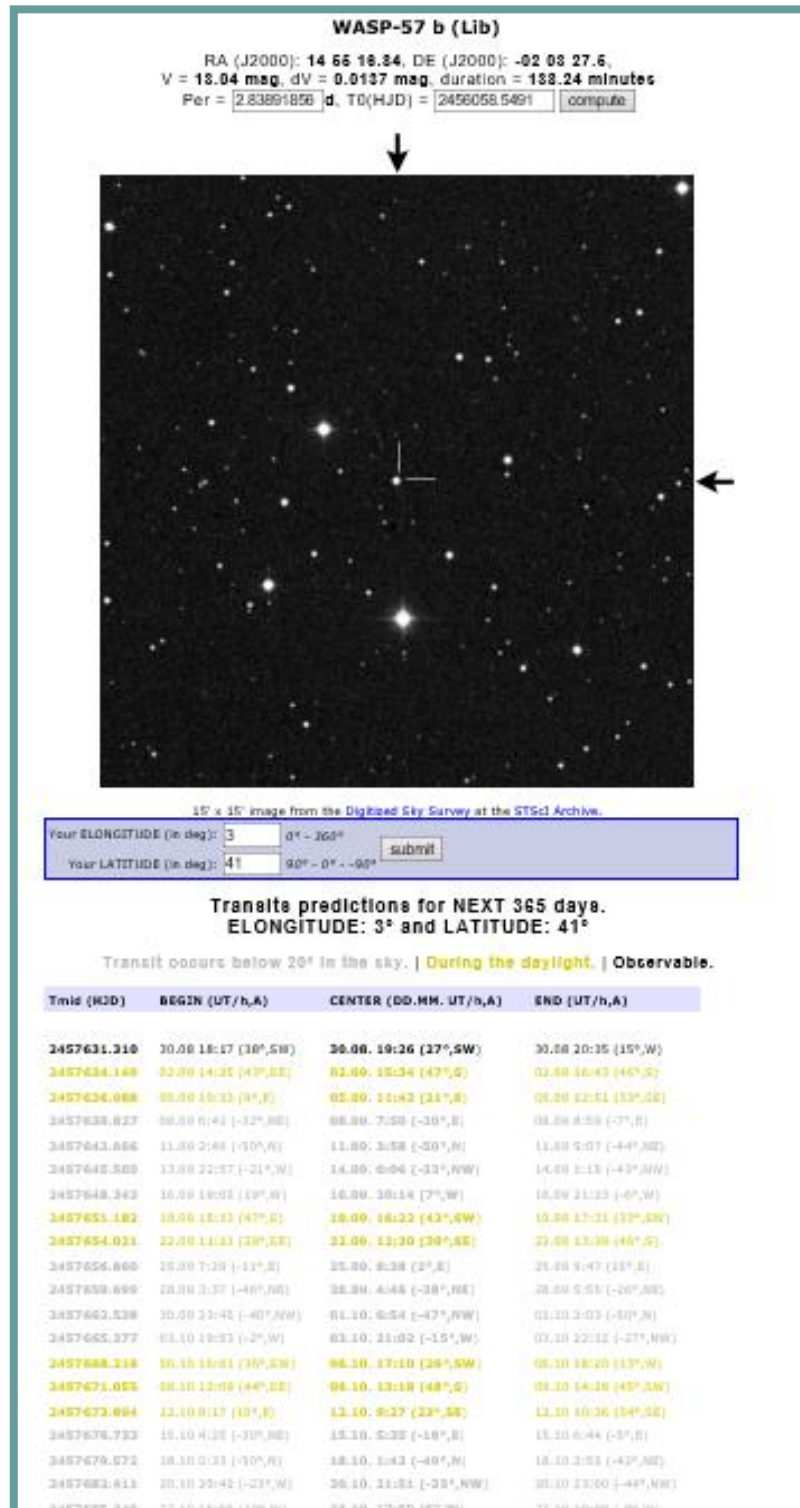


Figura 30.

Font: <http://var.astro.cz/ETD>.

Observem la imatge de l'espai amb la senyalització d'una estrella en concret. Aquesta estrella és la que orbita l'exoplaneta que nosaltres hem seleccionat prèviament. I és aquesta imatge la que hem d'observar a la pantalla del nostre ordinador quan fem la foto a través del telescopi.

Vegeu més a baix i observeu també els trànsits de l'objecte a la seva estrella des del dia de la consulta (avui) fins 6 mesos després. Els trànsits observables, perquè succeeixen durant la nit, són aquells pintats amb negre. Amb gris els que tenen lloc per sota l'horitzó i amb groc per sobre l'horitzó.

Transits predictions for NEXT 365 days. ELONGITUDE: 3° and LATITUDE: 41°			
Transit occurs below 20° in the sky. During the daylight. Observable.			
Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2457631.310	30.08 18:17 (38°,SW)	30.08. 19:26 (27°,SW)	30.08 20:35 (15°,W)
2457634.149	02.09 14:25 (43°,SE)	02.09. 15:34 (47°,S)	02.09 16:43 (46°,S)
2457636.988	05.09 10:33 (9°,E)	05.09. 11:42 (21°,E)	05.09 12:51 (33°,SE)
2457639.827	08.09 6:41 (-32°,NE)	08.09. 7:50 (-20°,E)	08.09 8:59 (-7°,E)
2457642.666	11.09 2:49 (-50°,N)	11.09. 3:58 (-50°,N)	11.09 5:07 (-44°,NE)

Figura 31.

Font: <http://var.astro.cz/ETD>.

Així doncs, obtenim per cada trànsit tres dades importants: el Temps Julià, dia i hora en Temps Universal pel començament, temps mitjà, i final del trànsit així com l'altura sobre l'horitzó que assoleix l'objecte observat.

10.2.2. Conec la nit que puc observar?

Si no tenim cap preferència exoplanetària però sí volem observar en un dia determinat, aquesta és l'opció que hem d'escollir per detectar l'exoplaneta.

Aquest cas és molt més senzill que l'anterior i és el que jo utilitzaré.

L'única cosa que hem de fer és connectar-nos de nou a la pàgina de l'ETD la qual ens indicarà quins exoplanetes transiten en una data concreta segons el teu lloc d'observació, com ja hem vist a la figura 29.

És recomanable esbrinar si durant la nit que volem observar hi ha Lluna, la seva lluminositat i si estarà a prop del nostre objecte. Els exoplanetes amb estrelles més brillants es poden

observar en nits amb Lluna però si aquesta està massa a prop redueix el contrast entre el fons del cel i l'estrella, empitjorant els resultats.

Un cop més, la web *Object Visibility* però aquest cop seleccionant *Staralt* a la pestanya que diu *Mode*, ens permet predir la posició i altura de les estrelles i de la lluna per cada hora de la nit.

11. FOTOMETRIA DIFERENCIAL – TEORIA

Per calcular les corbes de llum de les estrelles que tenen planetes extrasolars, hem d'utilitzar la fotometria que és una tècnica que permet mesurar la intensitat lumínica que emet l'estrella en una determinada longitud d'ona. Gràcies a aquesta tècnica és possible establir l'índex de color de les estrelles, a partir de la qual obtenim el seu tipus espectral, temperatura, mesura i distància.

La fotometria doncs, mesura el flux d'energia que és el mateix que la magnitud aparent que ve donada per la següent fórmula:

$$m = -2,5 \log(I_a)$$

On m representa la magnitud aparent de l'estrella i I_a la lluminositat percebuda.

No obstant això, el flux que ens arriba d'una estrella no és el que realment és sinó que es troba alterat per l'atmosfera que el dispersa, disminuint la seva intensitat de forma diferent per cada longitud d'ona. Aquest fenomen es coneix com extinció atmosfèrica.

Introduint aquests efectes a l'equació anterior, tenim que:

$$m_{\lambda Obs} = m_{\lambda} + K_{\lambda} X_z + C$$

On $m_{\lambda Obs}$ és la magnitud aparent mesurada per un observador en una longitud d'ona λ ; m_{λ} és la magnitud aparent real de l'objecte mesurada fora de l'atmosfera a través de detectors ideals; K_{λ} és el coeficient d'extinció atmosfèrica en la longitud d'ona λ ; X_z és la massa d'aire present en un angle zenital z i C és la constant instrumental donada per l'equip involucrat en el procés de mesurament.

Coneguts aquests paràmetres és possible aïllar m_{λ} del terme i obtenir el següent:

$$m_{\lambda} = m_{\lambda Obs} - K_{\lambda} X_z - C \rightarrow m_{\lambda} = -2,5 \log(I_{obs}) - K_{\lambda} X_z - C$$

On m_{λ} és la magnitud aparent efectiva de l'estrella; I_{obs} és la intensitat lumínica mesurada a partir de la fotografia feta; K_{λ} és el coeficient d'extinció atmosfèrica; X_z és la massa d'aire present en un angle zenital z i C és la constant instrumental específica.

No obstant això, a les fotografies generalment a més a més de l'objecte que estem estudiant hi sol haver altres estrelles respecte les quals és possible determinar els canvis en la brillantor que presenta el nostre objecte. En això es basa la fotometria diferencial.

La diferència entre les magnituds de dos estrelles presents a la mateixa imatge es pot expressar de la següent manera:

$$\Delta m_{\lambda obs} = m_{1\lambda obs} - m_{2\lambda obs}$$

Substituint a l'equació prèvia:

$$\Delta m_{\lambda obs} = (m_{1\lambda} + K_{1\lambda}X_{1\lambda} + C_1) - (m_{2\lambda} + K_{2\lambda}X_{2\lambda} + C_2)$$

Com els dos objectes es troben dins la mateixa fotografia, el coeficient d'extinció atmosfèrica $K_{sublambda}$, la massa d'aire X_z , i la constant instrumental C , són iguals per ambdues magnituds aparents. D'aquesta manera l'expressió anterior es redueix a:

$$\Delta m_{\lambda} = m_{1\lambda} - m_{2\lambda}$$

Aplicant a l'equació $m_{\lambda} = -2,5 \log(I_{obs}) - K_{\lambda}X_z - C$ que hem vist anteriorment, obtenim que:

$$m_{1\lambda} - m_{2\lambda} = [-2,5 \log(I_{a1}) - 2,5 \log(I_{a2})] \quad m_1 - m_2 = -2,5 \log\left(\frac{I_{a1}}{I_{a2}}\right)$$

Aquesta última expressió se la coneix com l'equació de Pogson.

Amt tot això hem demostrat teòricament el següent:

1. La fotometria diferencial no precisa condicions climàtiques perfectes com les anomenades “nits fotomètriques”.

2. Tampoc precisa conèixer la constant instrumental C ni el coeficient d'extinció ja que les variacions mesurades a la intensitat del flux lluminós d'una estrella són mesurades respecte un altre objecte present a la fotografia i que, per tant, està igual d'afectat per els mateixos efectes.

Així es justifica l'elecció d'aquest mètode com el més adequat per obtenir les corbes de llum de les estrelles que són orbitades per exoplanetes.

12. FOTOMETRIA DIFERENCIAL — REDUCCIÓ DE DADES

Per la reducció de dades, és a dir, per realitzar la fotometria diferencial a partir de les series fotogràfiques preses de cada objecte, he utilitzat el programa C-munipack.⁵⁰ Aquesta eina ha estat utilitzada per realitzar la fotometria de diversos treballs científics⁵¹, de tal manera que es considera tècnicament vàlida.

La forma més senzilla d'explicar el seu funcionament és mitjançant un exemple d'una pràctica que ja he fet⁵². Es tracta, concretament, de la primera observació realitzada de la qual vaig obtenir molts bons resultats.

El primer que vaig fer va ser, com ja s'ha esmentat anteriorment, buscar a la pàgina de l'ETD quins exoplanetes podia detectar segons les coordenades de la meua localitat i data.

Vaig interessar-me per l'exoplaneta anomenat Wasp-2b així que el vaig seleccionar i em va aparèixer la imatge de l'estrella a l'espai, a la qual orbitava aquest planeta.

Desafortunadament amb l'equip que dispo no tinc les eines necessàries per realitzar la fotometria així que vaig haver de recórrer al gran equip de l'Observatori Can Roig de Llagostera, que amb molta amabilitat em van deixar. Ells disposen de programes informàtics, telescopis i càmeres de molt alta qualitat que sí que em van permetre realitzar aquest projecte adequadament.

Un cop vaig escollir l'exoplaneta i conèixer la seva estrella, vaig introduir les coordenades d'aquesta al programa informàtic encarregat de fotografiar l'espai a través de les càmeres i telescopis i vaig començar a fer les fotografies de l'estrella. Aquest procés l'única cosa que requereix és molta paciència ja que s'ha d'estar fotografiant durant un temps previ al trànsit del planeta, durant el trànsit i durant el final d'aquest, corresponent a les diferents fases del trànsit explicades anteriorment.

El més aconsellable és realitzar quantes més fotografies millor, ja que els resultats obtinguts seran més precisos. Sincerament, la primera pràctica que vaig fer, a causa de la meua manca d'experiència i problemes tècnics només vaig aconseguir fer 16 fotografies la qual cosa va impedir obtenir un resultat precís. No obstant això, la gràfica final va mostrar una corba de llum considerable.

A la següent pràctica ja vaig aprendre dels meus errors anteriors i vaig poder realitzar més fotografies, concretament 115.

⁵⁰ C-Munipack és un programa de desenvolupament de llenguatge C del software realitzat per David Motlen l'any 2007.

⁵¹ El trobem a Nogami, D. l'any 2000, Kato T el 2003, Kato T el 2004, Oizumi S el 2007, Hornoch K el 2008, Pribulla T el 2008, Halevin I. El 2009, Claret el 2010, Krejcova T. el 2010, Shafter A.W el 2011.

⁵² Pràctica feta el dia 08/08/2016 a l'Observatori Can Roig de Llagostera.

Un cop vaig tenir guardades al meu ordinador les fotografies, el pas següent va ser obtenir l'aplicació esmentada anteriorment, C-Munipack.

Per explicar el seu funcionament s'ha de seguir els passos següents:

1. En primer lloc afegim les imatges a un nou projecte.

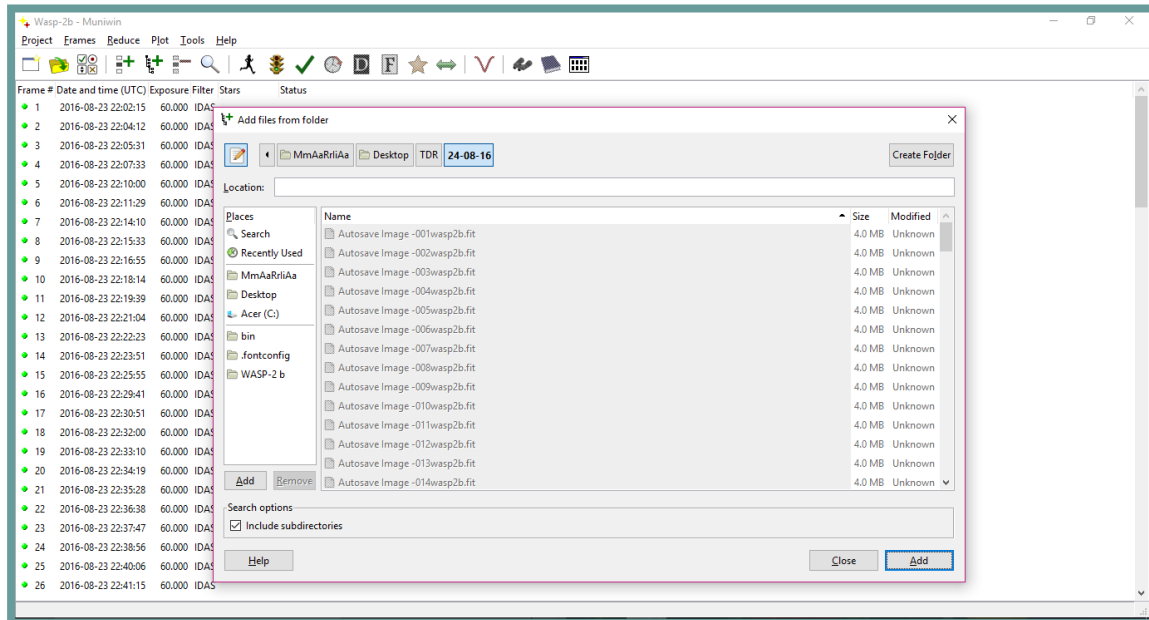


Figura 32.

Font: Programa Muniwin.

2. A continuació, el programa converteix totes les imatges i les emmagatzema en un arxiu temporal, guardant així les originals.

3. Posteriorment seleccionant la casella *express reduction*, el programa realitza el procés de conversió, calibratge, detecció d'estrelles, mesura de la intensitat d'aquestes i finalment aparella totes les estrelles de les fotografies que hem afegit.

És una eina molt útil ja que es fa tot en un pas: conversió, calibratge, fotometria i aparellament.

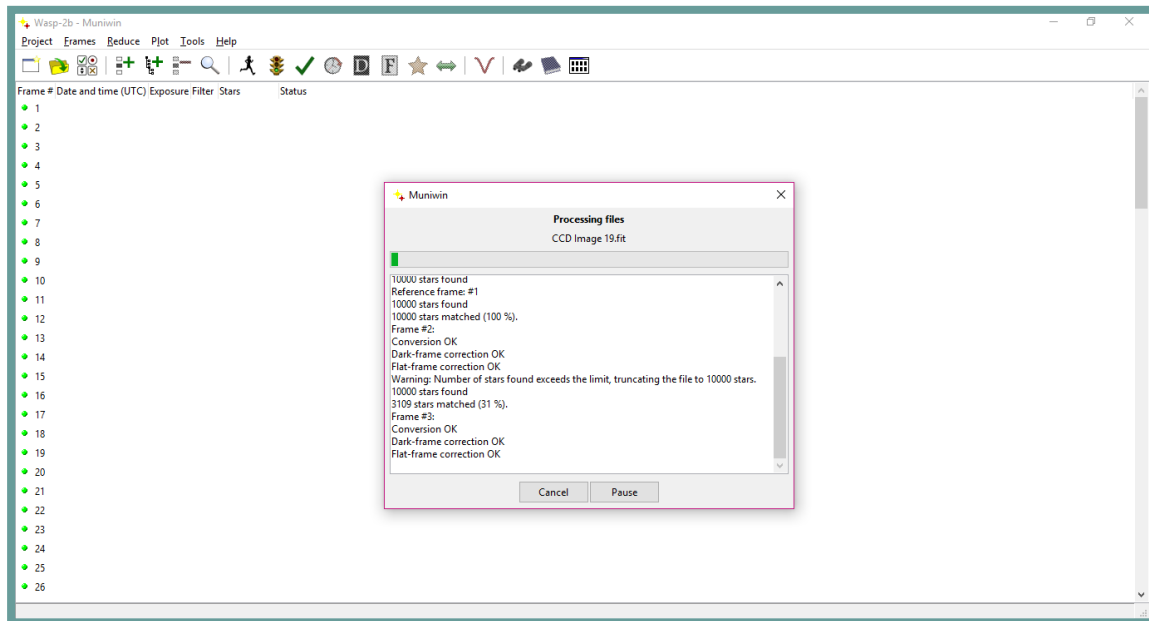


Figura 33. Procés de reducció.

Font: Programa Muniwin.

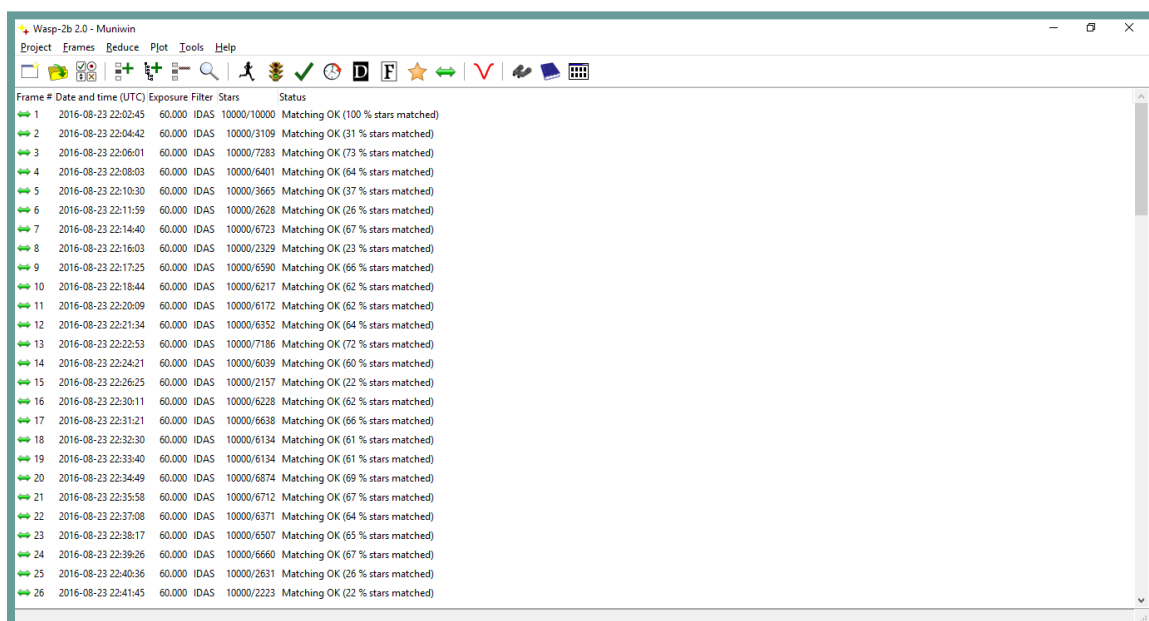


Figura 34. Procés de reducció finalitzat.

Font: Programa Muniwin.

4. Seguidament seleccionem la casella *Find variables* i el programa ens assenyala automàticament les estrelles, la intensitat lumínica de les quals ha variat (d'aquí la nomenclatura d'estrella variable), així com una estrella de comparació que necessitem indicar posteriorment. Nosaltres hem de seleccionar la nostra estrella.

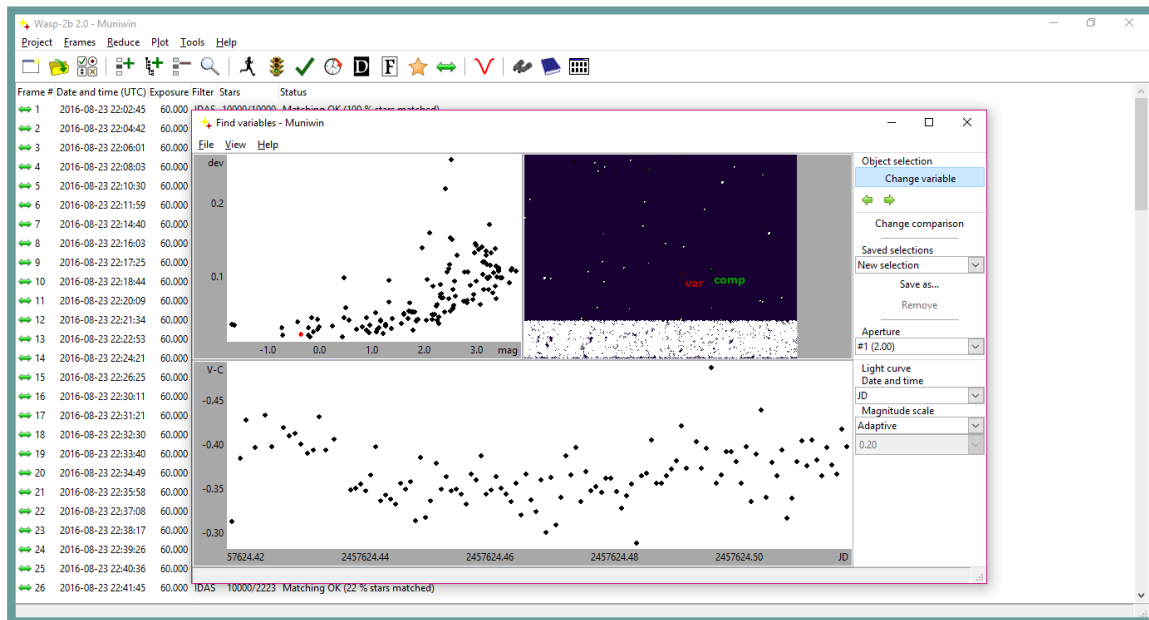


Figura 35. Selecció de la nostre estrella i una de comparació.

Font: Programa Muniwin.

5. Finalment seleccionem la casella *Plot light curve* al menú i omplim els camps necessaris.

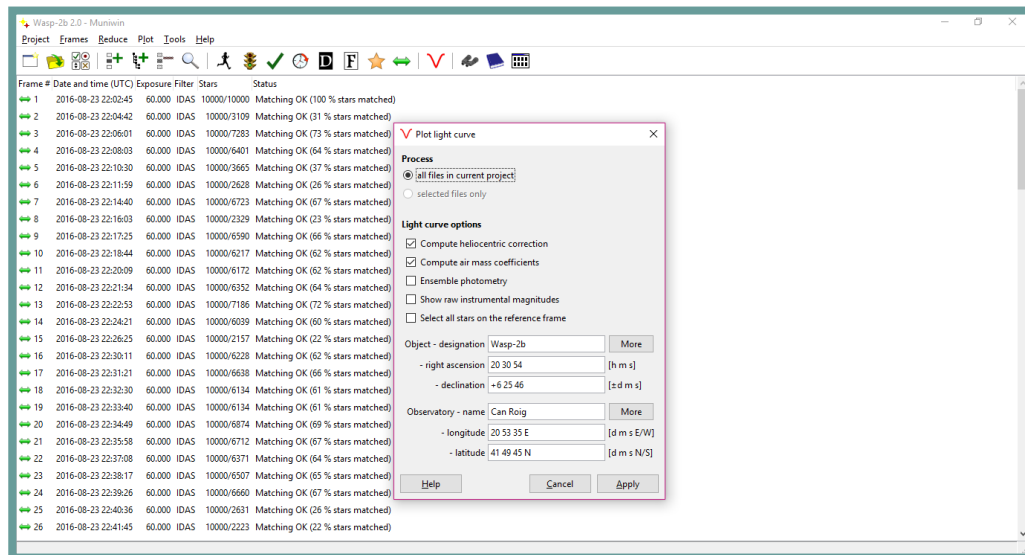


Figura 36. Introducció de les coordenades de l'exoplaneta i del lloc d'observació.

Font: Programa Muniwin.

6. Seleccionant *Apply*, ens apareix la fotografia de l'espai amb la nostra estrella variable indicada amb color vermell, una de comparació indicada amb color verd i dues *check* que em de seleccionar nosaltres prèviament. Aquestes dues últimes es tracta d'estrelles que no són variables.

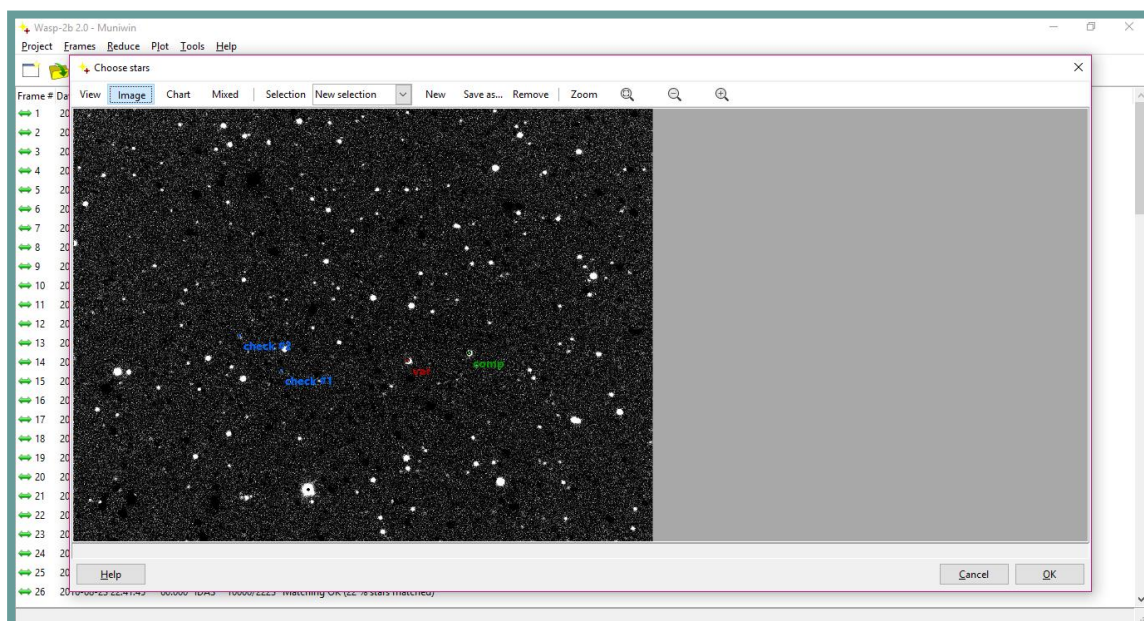


Figura 37.

Font: Programa Muniwin.

7. Per finalitzar el procés, seleccionem la casella *Ok* i ens apareixerà el gràfic de la corba de llum de l'estrella. Amb aquest gràfic, demostrarem l'existència de l'exoplaneta.

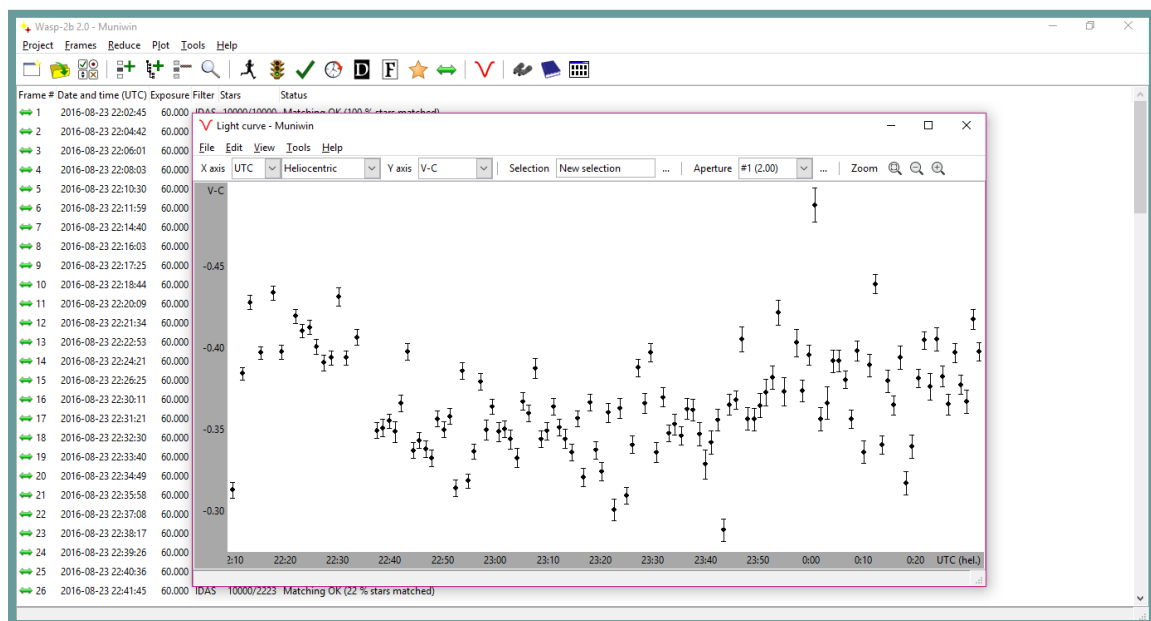


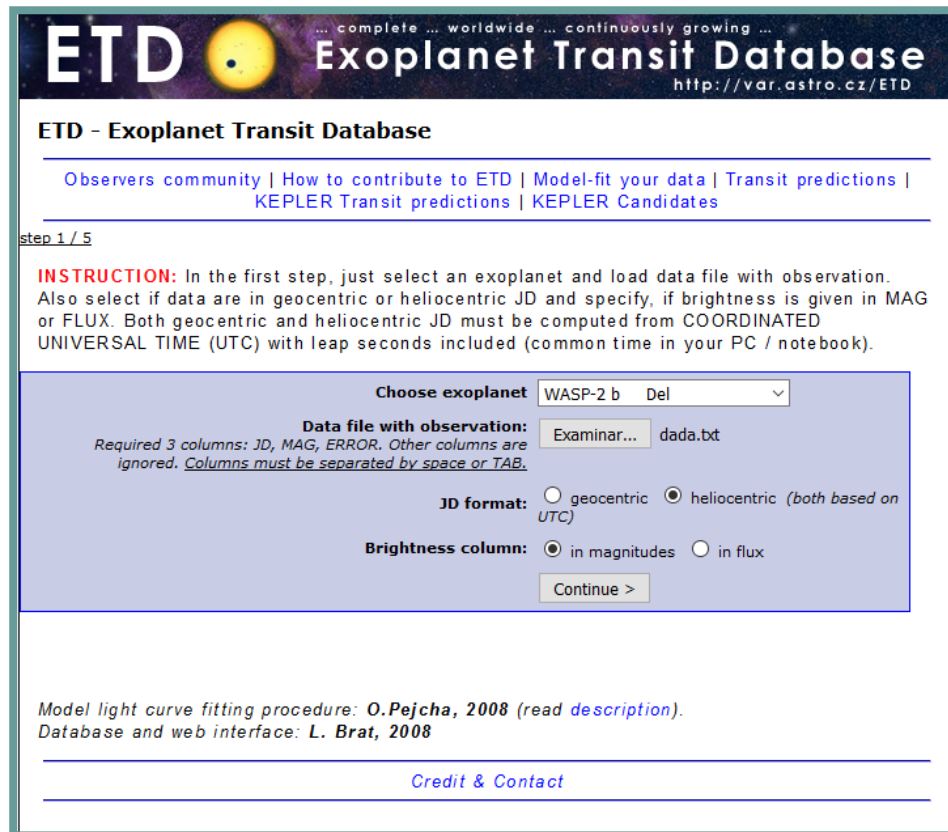
Figura 38. Gràfic del trànsit finalitzat. Observeu a l'eix horitzontal *x* el temps en el format *hh:mm* i a l'eix vertical *y* la lluminositat de l'estrella.

Font: Programa Muniwin.

Aquí es podria finalitzar la demostració de l'exoplaneta, però a mi m'agradaria anar més enllà. Un cop guardada la imatge en format *.txt*, la penjaré a la pàgina que ja hem utilitzat anteriorment *ETD*, on podré fer un anàlisi molt més detallat i extreure'n moltes característiques de l'estrella i de l'exoplaneta observats.

Els passos a seguir són els següents:

1. Ens situem a l'inici de la pàgina i seleccionem la casella *Model-fit your data*. Escollim l'exoplaneta que hem observat (*Choose exoplanet*), afegim la imatge del gràfic del trànsit, seleccionem el format *heliocèntric* i fem *click* a *Continue*.



ETD ... complete ... worldwide ... continuously growing ...
Exoplanet Transit Database
<http://var.astro.cz/ETD>

ETD - Exoplanet Transit Database

[Observers community](#) | [How to contribute to ETD](#) | [Model-fit your data](#) | [Transit predictions](#) | [KEPLER Transit predictions](#) | [KEPLER Candidates](#)

step 1 / 5

INSTRUCTION: In the first step, just select an exoplanet and load data file with observation. Also select if data are in geocentric or heliocentric JD and specify, if brightness is given in MAG or FLUX. Both geocentric and heliocentric JD must be computed from COORDINATED UNIVERSAL TIME (UTC) with leap seconds included (common time in your PC / notebook).

Choose exoplanet WASP-2 b Del

Data file with observation: Examiner... dada.txt
Required 3 columns: JD, MAG, ERROR. Other columns are ignored. Columns must be separated by space or TAB.

JD format: ☐ geocentric ☒ heliocentric (both based on UTC)

Brightness column: ☒ in magnitudes ☐ in flux

Continue >

Model light curve fitting procedure: O. Pejcha, 2008 (read [description](#)).
Database and web interface: L. Brat, 2008

[Credit & Contact](#)

Figura 39. Introducció de les dades.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/index.php>

2. La següent pestanya que ens apareix ja ens mostra el nostre gràfic i tan sols hem de seleccionar la casella *Compute* per seguir endavant.

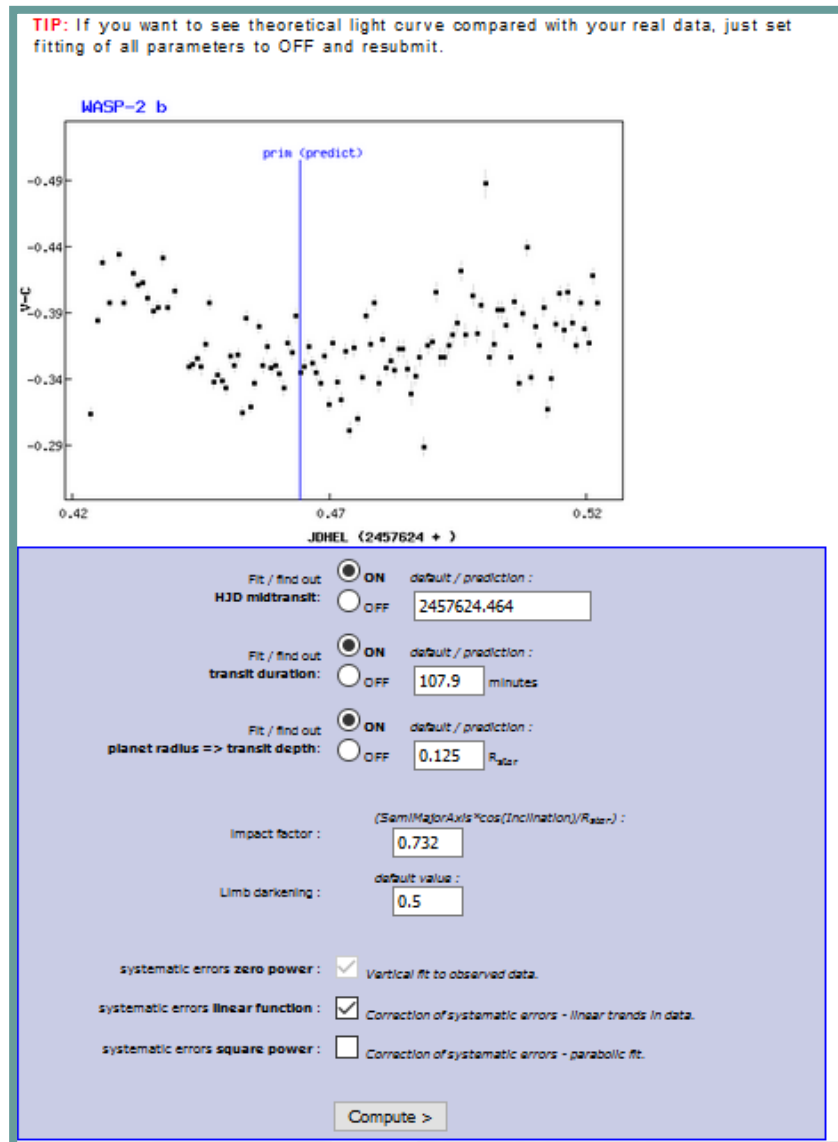


Figura 40.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/index.php>

3. Finalment, ens apareix el nostre gràfic del trànsit de l'exoplaneta seguit d'una corba blava que assenyalava més concretament el trànsit. Observeu com disminueix i augmenta la lluminositat de l'estrella. L'eix vertical y, representa la lluminositat de l'estrella i l'eix horitzontal x, el temps (en minuts).

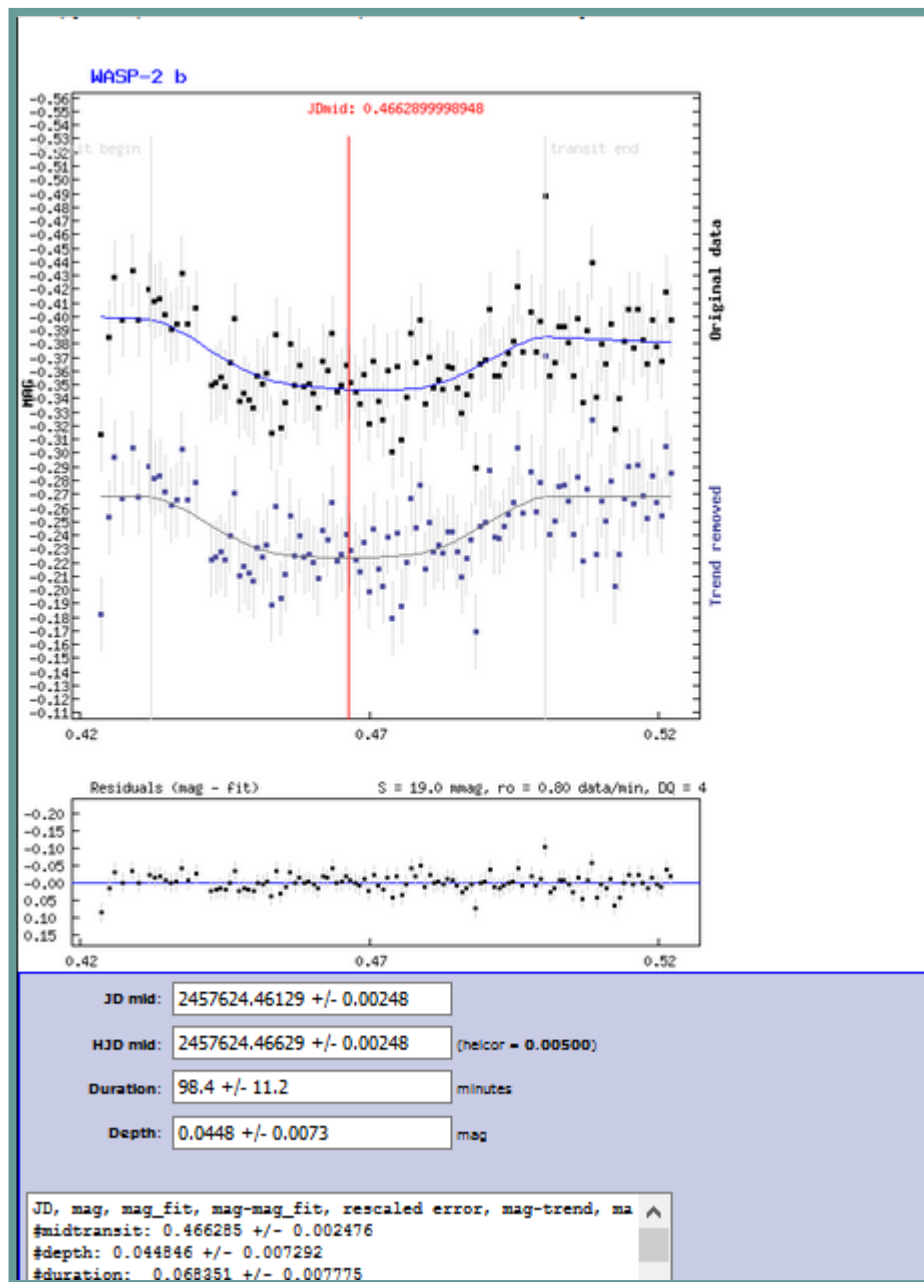


Figura 41. Corba de llum resultant. La que ocupa la posició superior és la original i la inferior és la corba havent-se eliminat els errors sistemàtics.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/index.php>

13. PRÀCTIQUES

A continuació presento les pràctiques que he realitzat a l'Observatori Can Roig a Llagostera.

13.1. WASP-2B

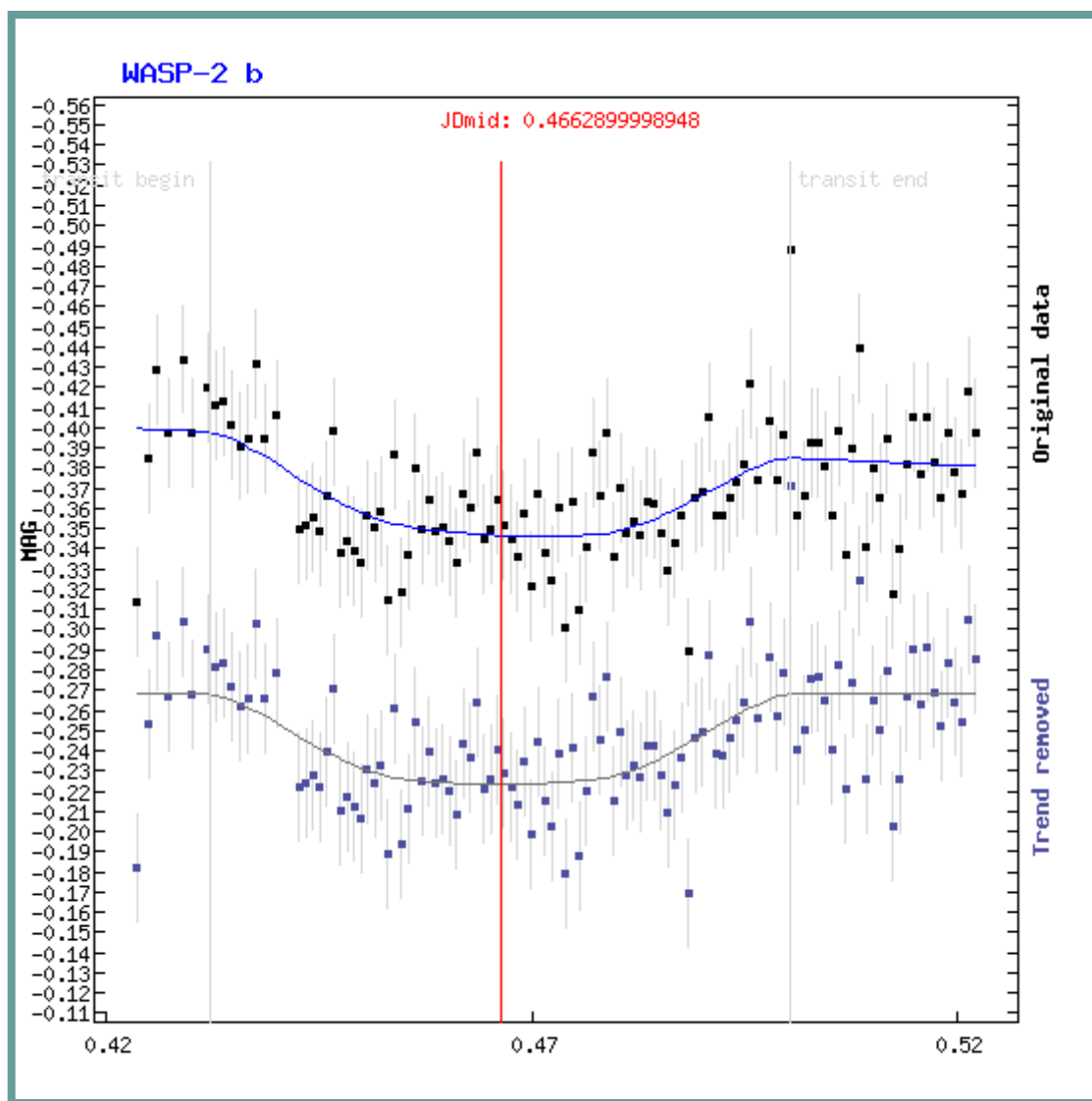


Figura 42. Trànsit de l'exoplaneta Wasp-2b.

Font: http://var2.astro.cz/ETD/transit_FIT_plotter.php?id=1472809155&hvezda=WASP-2%20b&Cp=2457624.4643907&JDmid=0.466289998948&D=98.4&Depth=0.0448

Aquestes són les dades que obtenim del gràfic:

JD mid:	2457624.46129 +/- 0.00248	
HJD mid:	2457624.46629 +/- 0.00248	(helcor = 0.00500)
Duration:	98.4 +/- 11.2	minutes
Depth:	0.0448 +/- 0.0073	mag

Figura 43.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Com es pot observar a la figura 43., a partir del gràfic coneixem el punt mínim de llum de l'estrella (*HJD mid*: 2457624.46629 +/- 0,00248, que en unitats heliocèntriques són 0,4662899998948 com es pot observar al gràfic de la figura 42.).

També coneixem la durada del trànsit (*Duration*: 98.4 +/- 11.2 minuts) així com la profunditat del trànsit (*Depth*: 0.0448 +/- 0.0073 mag).

Aquestes dues últimes dades són les més importants, en el cas del meu treball, per obtenir informació del planeta i estrella que veurem més endavant.

Les següents dades són les més importants ja que a partir d'aquestes es forma el gràfic del trànsit de l'exoplaneta:

```
#depth: 0.044846 +/- 0.007292
#duration: 0.068351 +/- 0.007775

0.423590 -0.313360 -0.399414 0.086054 0.026773 0.086054 0.000000
0.424950 -0.384580 -0.399160 0.014580 0.026773 0.014580 0.000000
0.425860 -0.428230 -0.398990 -0.029240 0.026773 -0.029240 0.000000
0.427270 -0.397220 -0.398726 0.001506 0.026773 0.001506 0.000000
0.428970 -0.433950 -0.398409 -0.035541 0.026773 -0.035541 0.000000
0.430000 -0.397840 -0.398216 0.000376 0.026773 0.000376 0.000000
0.431870 -0.419650 -0.397866 -0.021784 0.026773 -0.021784 0.000000
0.432830 -0.410760 -0.397296 -0.013464 0.026773 -0.013073 0.000391
0.433780 -0.412920 -0.396089 -0.016831 0.026773 -0.015411 0.001421
0.434690 -0.401100 -0.394580 -0.006520 0.026773 -0.003761 0.002759
0.435670 -0.391060 -0.392667 0.001607 0.026773 0.006096 0.004489
0.436660 -0.394260 -0.390500 -0.003760 0.026773 0.002711 0.006471
0.437570 -0.431520 -0.388347 -0.043173 0.026773 -0.034719 0.008454
```

0.438590 -0.394150 -0.385794 -0.008356 0.026773 0.002460 0.010817
0.440030 -0.406650 -0.382019 -0.024631 0.026773 -0.010309 0.014322
0.442640 -0.349710 -0.374982 0.025272 0.026773 0.046143 0.020871
0.443450 -0.351300 -0.372817 0.021517 0.026773 0.044402 0.022884
0.444250 -0.355450 -0.370713 0.015263 0.026773 0.040102 0.024839
0.445060 -0.348820 -0.368631 0.019811 0.026773 0.046581 0.026770
0.445860 -0.366310 -0.366634 0.000324 0.026773 0.028941 0.028617
0.446660 -0.397920 -0.364709 -0.033211 0.026773 -0.002818 0.030392
0.447470 -0.337510 -0.362845 0.025335 0.026773 0.057440 0.032105
0.448270 -0.343440 -0.361098 0.017658 0.026773 0.051361 0.033703
0.449070 -0.338510 -0.359454 0.020944 0.026773 0.056141 0.035197
0.449880 -0.332930 -0.357904 0.024974 0.026773 0.061570 0.036596
0.450670 -0.356920 -0.356512 -0.000408 0.026773 0.037432 0.037840
0.451480 -0.350310 -0.355217 0.004907 0.026773 0.043891 0.038983
0.452280 -0.358390 -0.354078 -0.004312 0.026773 0.035661 0.039973
0.453080 -0.314330 -0.353089 0.038759 0.026773 0.079571 0.040812
0.453890 -0.386370 -0.352256 -0.034114 0.026773 0.007380 0.041494
0.454690 -0.318770 -0.351631 0.032861 0.026773 0.074830 0.041969
0.455490 -0.336750 -0.351088 0.014338 0.026773 0.056701 0.042363
0.456300 -0.379660 -0.350525 -0.029135 0.026773 0.013640 0.042774
0.457100 -0.349980 -0.350024 0.000044 0.026773 0.043170 0.043126
0.457910 -0.364520 -0.349560 -0.014960 0.026773 0.028479 0.043438
0.458710 -0.348810 -0.349140 0.000330 0.026773 0.044039 0.043709
0.459520 -0.350600 -0.348748 -0.001852 0.026773 0.042098 0.043949
0.460310 -0.344250 -0.348397 0.004147 0.026773 0.048300 0.044153
0.461110 -0.332860 -0.348070 0.015210 0.026773 0.059540 0.044330
0.461920 -0.367580 -0.347768 -0.019812 0.026773 0.024669 0.044481
0.462720 -0.360320 -0.347496 -0.012824 0.026773 0.031779 0.044604
0.463530 -0.387870 -0.347246 -0.040624 0.026773 0.004078 0.044702
0.464330 -0.344430 -0.347025 0.002595 0.026773 0.047368 0.044774
0.465130 -0.349370 -0.346828 -0.002542 0.026773 0.042279 0.044821
0.465940 -0.364150 -0.346654 -0.017496 0.026773 0.027347 0.044844
0.466740 -0.351560 -0.346506 -0.005054 0.026773 0.039788 0.044842
0.467550 -0.344640 -0.346381 0.001741 0.026773 0.046556 0.044816
0.468350 -0.336440 -0.346282 0.009842 0.026773 0.054607 0.044765
0.469150 -0.357070 -0.346207 -0.010863 0.026773 0.033827 0.044690
0.469960 -0.320970 -0.346158 0.025188 0.026773 0.069776 0.044588
0.470750 -0.366910 -0.346134 -0.020776 0.026773 0.023688 0.044464
0.471550 -0.337580 -0.346137 0.008557 0.026773 0.052869 0.044311
0.472360 -0.324490 -0.346169 0.021679 0.026773 0.065807 0.044129
0.473160 -0.360660 -0.346229 -0.014431 0.026773 0.029488 0.043918

0.473970 -0.301140 -0.346322 0.045182 0.026773 0.088856 0.043674
 0.474770 -0.363380 -0.346449 -0.016931 0.026773 0.026467 0.043398
 0.475570 -0.309710 -0.346613 0.036903 0.026773 0.079987 0.043084
 0.476380 -0.341090 -0.346824 0.005734 0.026773 0.048456 0.042721
 0.477180 -0.388070 -0.347090 -0.040980 0.026773 0.001326 0.042306
 0.477980 -0.366340 -0.347324 -0.019016 0.026773 0.022907 0.041923
 0.478790 -0.397550 -0.347684 -0.049866 0.026773 -0.008455 0.041412
 0.479590 -0.336360 -0.348231 0.011871 0.026773 0.052586 0.040715
 0.480400 -0.370080 -0.348950 -0.021130 0.026773 0.018714 0.039844
 0.481190 -0.348000 -0.349798 0.001798 0.026773 0.040647 0.038849
 0.481990 -0.353510 -0.350794 -0.002716 0.026773 0.034987 0.037703
 0.482800 -0.346710 -0.351934 0.005224 0.026773 0.041636 0.036412
 0.483600 -0.362900 -0.353181 -0.009719 0.026773 0.025296 0.035015
 0.484400 -0.362370 -0.354539 -0.007831 0.026773 0.025677 0.033507
 0.485210 -0.347440 -0.356019 0.008579 0.026773 0.040455 0.031876
 0.486010 -0.329000 -0.357573 0.028573 0.026773 0.058746 0.030173
 0.486820 -0.342400 -0.359229 0.016829 0.026773 0.045194 0.028365
 0.487620 -0.356190 -0.360935 0.004745 0.026773 0.031255 0.026509
 0.488420 -0.288780 -0.362700 0.073920 0.026773 0.098515 0.024595
 0.489230 -0.365500 -0.364533 -0.000967 0.026773 0.021644 0.022611
 0.490020 -0.368360 -0.366353 -0.002007 0.026773 0.018636 0.020643
 0.490830 -0.405540 -0.368237 -0.037303 0.026773 -0.018695 0.018608
 0.491630 -0.356700 -0.370101 0.013401 0.026773 0.029995 0.016594
 0.492440 -0.356460 -0.371975 0.015515 0.026773 0.030084 0.014568
 0.493240 -0.365060 -0.373797 0.008737 0.026773 0.021334 0.012597
 0.494040 -0.373100 -0.375572 0.002472 0.026773 0.013145 0.010672
 0.494850 -0.382070 -0.377302 -0.004768 0.026773 0.004023 0.008791
 0.495650 -0.422060 -0.378922 -0.043138 0.026773 -0.036116 0.007022
 0.496460 -0.373570 -0.380450 0.006880 0.026773 0.012222 0.005342
 0.498070 -0.403300 -0.383036 -0.020264 0.026773 -0.017809 0.002455
 0.498870 -0.373990 -0.384025 0.010035 0.026773 0.011352 0.001317
 0.499670 -0.396030 -0.384742 -0.011288 0.026773 -0.010838 0.000450
 0.500480 -0.487740 -0.385041 -0.102699 0.026773 -0.102699 0.000000
 0.501270 -0.356790 -0.384893 0.028103 0.026773 0.028103 0.000000
 0.502070 -0.366510 -0.384743 0.018233 0.026773 0.018233 0.000000
 0.502880 -0.392230 -0.384592 -0.007638 0.026773 -0.007638 0.000000
 0.503680 -0.392420 -0.384442 -0.007978 0.026773 -0.007978 0.000000
 0.504490 -0.380870 -0.384291 0.003421 0.026773 0.003421 0.000000
 0.505290 -0.356810 -0.384141 0.027331 0.026773 0.027331 0.000000
 0.506100 -0.398500 -0.383990 -0.014510 0.026773 -0.014510 0.000000
 0.506900 -0.336520 -0.383841 0.047321 0.026773 0.047321 0.000000

0.507700 -0.389640 -0.383691 -0.005949 0.026773 -0.005949 0.000000
0.508510 -0.439320 -0.383540 -0.055780 0.026773 -0.055780 0.000000
0.509310 -0.340890 -0.383390 0.042500 0.026773 0.042500 0.000000
0.510120 -0.379880 -0.383239 0.003359 0.026773 0.003359 0.000000
0.510920 -0.365250 -0.383089 0.017839 0.026773 0.017839 0.000000
0.511730 -0.394470 -0.382938 -0.011532 0.026773 -0.011532 0.000000
0.512520 -0.317390 -0.382790 0.065400 0.026773 0.065400 0.000000
0.513320 -0.339920 -0.382640 0.042720 0.026773 0.042720 0.000000
0.514130 -0.381560 -0.382489 0.000929 0.026773 0.000929 0.000000
0.514930 -0.404850 -0.382339 -0.022511 0.026773 -0.022511 0.000000
0.515740 -0.376610 -0.382188 0.005578 0.026773 0.005578 0.000000
0.516540 -0.405410 -0.382038 -0.023372 0.026773 -0.023372 0.000000
0.517350 -0.382770 -0.381887 -0.000883 0.026773 -0.000883 0.000000
0.518150 -0.365610 -0.381737 0.016127 0.026773 0.016127 0.000000
0.518960 -0.397260 -0.381586 -0.015674 0.026773 -0.015674 0.000000
0.519760 -0.377660 -0.381436 0.003776 0.026773 0.003776 0.000000
0.520560 -0.367560 -0.381287 0.013727 0.026773 0.013727 0.000000
0.521370 -0.417800 -0.381136 -0.036664 0.026773 -0.036664 0.000000
0.522160 -0.397810 -0.380988 -0.016822 0.026773 -0.016822 0.000000

A continuació anem al punt que més m'interessa i un dels més importants: verificar si les dades esmentades anteriorment són correctes. Doncs no em serveix de res obtenir el gràfic del trànsit d'un exoplaneta, si després les dades que obtinc de la seva durada i profunditat (entre altres) no coincideixen amb les que trobem a les pàgines oficials.

Fit / find out ☒ ON default / prediction :
HJD midtransit: ☐ OFF 2457624.464

Fit / find out ☒ ON default / prediction :
transit duration: ☐ OFF 107.9 minutes

Fit / find out ☒ ON default / prediction :
planet radius => transit depth: ☐ OFF 0.125 R_{star}

impact factor : (SemiMajorAxis*cos(Inclination)/ R_{star}) :
 0.732

Limb darkening : default value :
 0.5

Figura 44.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Aquesta última figura mostra, de nou, les dades que ja hem vist anteriorment a més a més de noves incorporacions (*Impact factor*, *Limb Darkening*) i opcions gràfiques.

La dada que a mi m'interessa més és la profunditat del trànsit del gràfic que he realitzat (*transit depth*) que equival al radi de l'exoplaneta que hem detectat (*planet radius*) així com, és aquesta dada la que vull comprovar que és correcta amb la que trobem a l'arxiu d'exoplanetes de la NASA.⁵³

Per una banda, calculo el radi de l'exoplaneta segons el meu gràfic que és $0,125 R_{star}$ (Figura 44.). És a dir, equival a 0,125 vegades el radi de l'estrella que orbita, Wasp-2. Ara hem de buscar a la pàgina oficial el radi d'aquesta estrella, que és $627.521,4 \text{ km}^{54}$. Finalment calculo el radi del planeta segons el meu gràfic, que és $78.440,175 \text{ km}$.

Segons l'arxiu d'exoplanetes de la NASA, el radi d'aquest exoplaneta és $1,071 +0,080 / -0,083 R_{júpiter}$ que es troba entre $69.072,068 \text{ km}$ i $80.467,561 \text{ km}$.

La dada que obtinc del meu gràfic recordem que és $78.440,175 \text{ km}$ i podem comprovar que efectivament es troba dins els marge de la dada que ofereix la pàgina oficial.

Així que el meu gràfic és correcte.

⁵³ <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>.

⁵⁴ Es tracta d'un valor aproximat, doncs el real és $0,84 +0,062 / -0,065 R_{sol}$.

13.1.1. Característiques planetàries

Wasp-2b és un exoplaneta que orbita l'estrella Wasp-2 a la constel·lació Delphinus.

Les característiques que el defineixen són les següents:

- La seva massa és de 0,915 MJúpiter⁵⁵ ($1,737585 \times 10^{27}$)
- El seu radi és de 1,071 RJúpiter.
- Té una densitat de $0,92 \text{ g/cm}^3$.
- La temperatura en ell és de $1304 \pm 54 \text{ K}$.
- Té una gravetat de $1,92 \text{ gTerra}^{56}$.
- El seu període orbital és de tan sols 2 dies.
- La seva inclinació és de $87 \pm 3^\circ$.
- Orbita la seva estrella a una distància de 0,03 UA.

Amb tota aquesta informació podem deduir molt fàcilment que es tracta d'un exoplaneta del tipus Júpiter ardent a causa de la seva gran massa, sobre tot, i també perquè orbita la seva estrella a molt poca distància.

Observeu les següents fotografies realitzades amb el programa informàtic de la NASA *NASA's Eyes*, que tot i a oferir una visualització hipotètica de l'espai, és una eina molt útil per poder arribar a l'aficionat i que es pugui fer una idea del que estem estudiant.

⁵⁵ MJúpiter és $1,899 \times 10^{27} \text{ kg}$.

⁵⁶ La gravetat a la Terra és de 9.80665 m/s^2

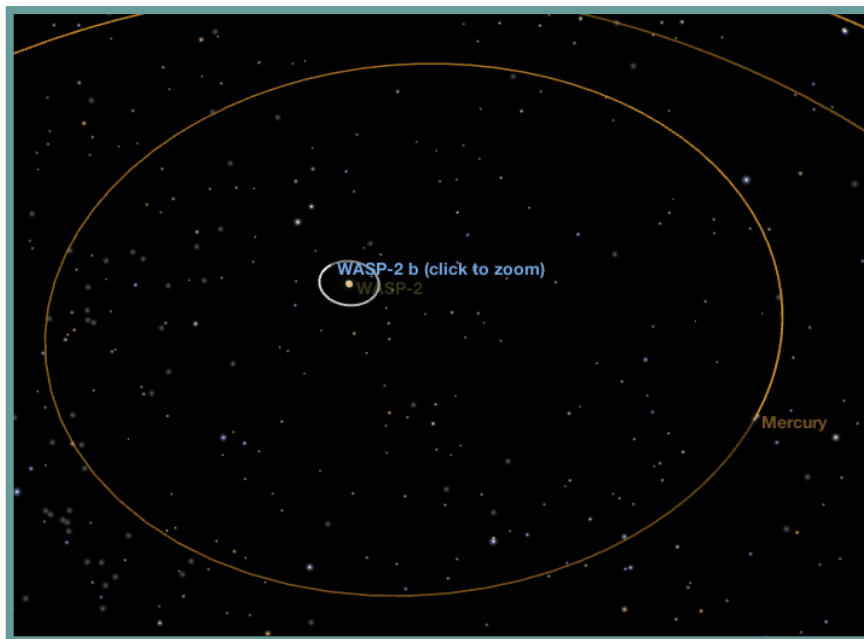


Figura 45. Comparació del Sistema de Wasp-2 amb el nostre Sistema Solar. Observeu la poca distància orbital de l'exoplaneta amb comparació amb la de Mercuri.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

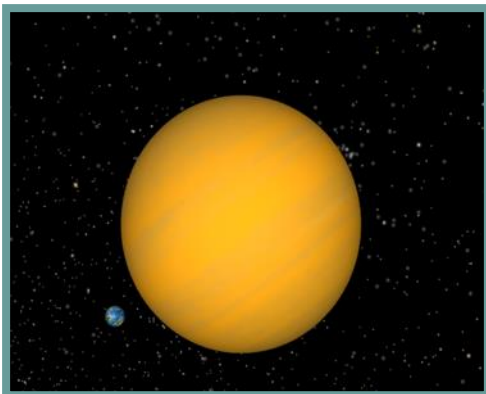


Figura 46. Comparació de l'exoplaneta Wasp-2b (a la dreta) amb la Terra (a l'esquerra).

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

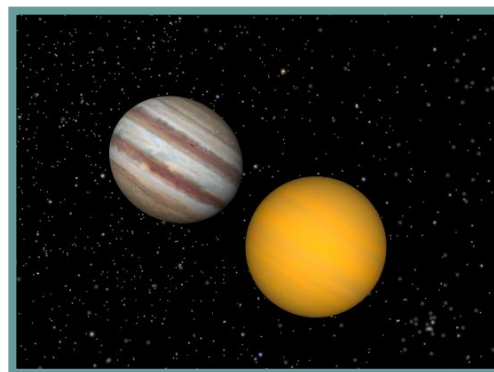


Figura 47. Comparació de l'exoplaneta (a la dreta) amb Júpiter (a l'esquerra).

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.1.2. Característiques estel·lars

Wasp-2 és una estrella de magnitud aparent +11.88. Tingueu en compte que és una estrella molt apagada, doncs quant més brillant és un objecte, menor és el seu valor de magnitud (és a dir, la relació inversa). El Sol, com exemple, té una magnitud aparent de -27 i, per tant, és molt més brillant.

Les característiques que la defineixen són les següents:

- Es tracta d'una nana taronja de tipus espectral K i lluminositat de classe V. Aquesta classe d'estrelles són lleugerament més fredes que el Sol però, igual que ell, obtenen la seva energia per la fusió d'hidrogen. Així com tenen al seu interior metalls i òxid de tità.
- La seva temperatura, 5200 ± 200 K, és aproximadament 600 K inferior a la solar.
- El seu diàmetre correspon a un 83% del que té el Sol i la seva massa equival al 84% de la massa solar.
- Es troba a 541 anys llum de la Terra.
- Té una metal·licitat de 0.1 ± 0.2 .

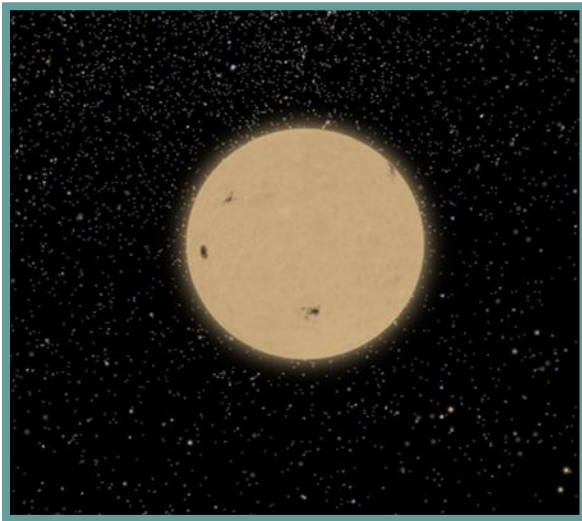


Figura 48. Representació gràfica de l'estrella Wasp-2. Observeu la seva poca brillantor esmentada anteriorment així com el color taronjós.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.1.3. Habitabilitat planetària

Si tornem a donar un cop d'ull a la teoria, recordarem una sèrie de pautes que fan possible l'existència de vida humana, tal com la coneixem nosaltres.

Pel que fa a l'estrella, Wasp-2, trobem que és del tipus espectral K i la seva temperatura és de 5200 ± 200 K. Com que el rang espectral considerat apropiat per la vida es troba entre 7000K

i 4000K, aquesta estrella hi és situada. A més a més, es troba estable a la seqüència principal⁵⁷ durant un llarg període, comprès entre 15.000 i 30.000 milions d'anys, major que els 10.000 milions d'anys que estarà el Sol. De manera que té una baixa variació estel·lar. Així com també, emet menys radiació ultraviolada (la qual pot afectar a l'ADN i, per tant, obstaculitzar l'aparició de vida) que les estrelles de tipus-G, com el Sol. Com a últim apunt, és una estrella amb una metal·licitat considerable i per tant afavoreix l'existència de planetes al seu voltant.

Aquesta estrella, doncs, ofereix les condicions necessàries per proporcionar vida.

Pel que fa a l'exoplaneta, Wasp-2b, les notícies no són tan bones. Principalment perquè la suposició sobre els exoplanetes habitables és que són Terrestres i aquest és un Júpiter ardent.

Un altre factor important a considerar és la poca distància orbital a la que orbita de la seva estrella i, per tant, un període orbital de tan sols 2 dies. Això, evidentment, provoca la presència d'unes temperatures elevadíssimes i insuportables pels éssers vius.

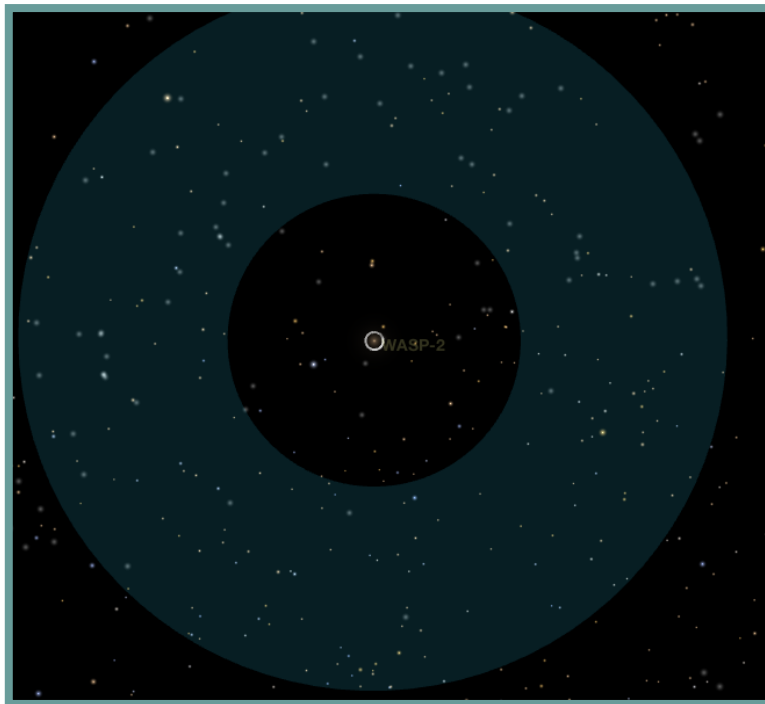


Figura 49. Zona d'habitabilitat (cercle blau) de l'estrella Wasp-2. Observeu que l'òrbita de l'exoplaneta es troba fora d'aquesta i molt pròxima a la seva estrella.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

Aquestes són les principals raons que neguen l'habitabilitat en aquest exoplaneta. No obstant això, altres factors com l'elevada inclinació del planeta ($87 \pm 3^\circ$) fan que les estacions siguin molt extremes i que la biosfera no pugui arribar a mantenir l'equilibri i l'estabilitat interna als diferents sistemes biològics.

⁵⁷ S'anomena seqüència principal a la regió del diagrama de Hertzsprung-Russell on es troba la major part de les estrelles. Aquest diagrama mostra la temperatura de les estrelles en funció de la seva lluminositat, des de les més fredes fins les més calentes.

13.2. TRES-3B

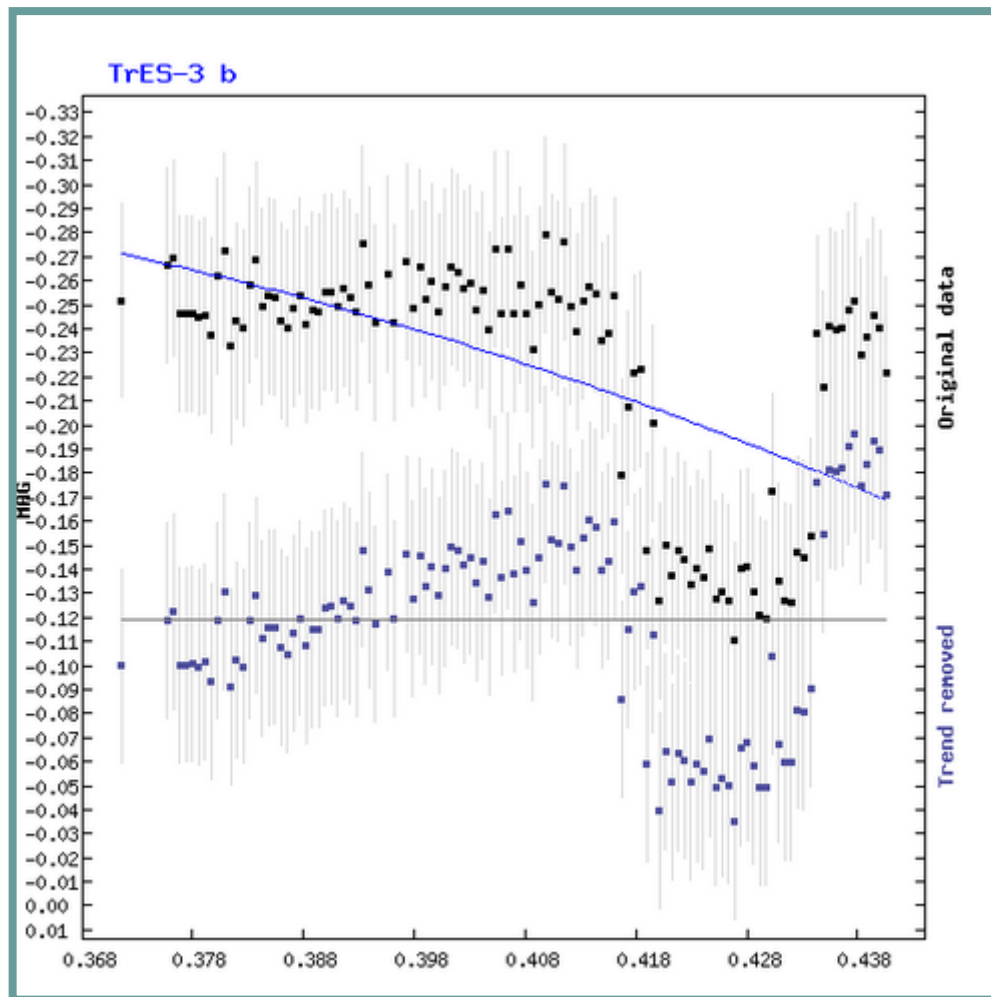


Figura 50. Trànsit de l'exoplaneta TrES-3b.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Desafortunadament, amb aquest gràfic vaig tenir un problema al format i la pàgina web no me'l va acceptar així que vaig canviar el format i el resultat és el gràfic que veieu a la figura 50. A causa d'això, els punts es veuen barrejats així que incorporo una nova imatge del trànsit abans de realitzar la correcció on ho podeu veure millor.

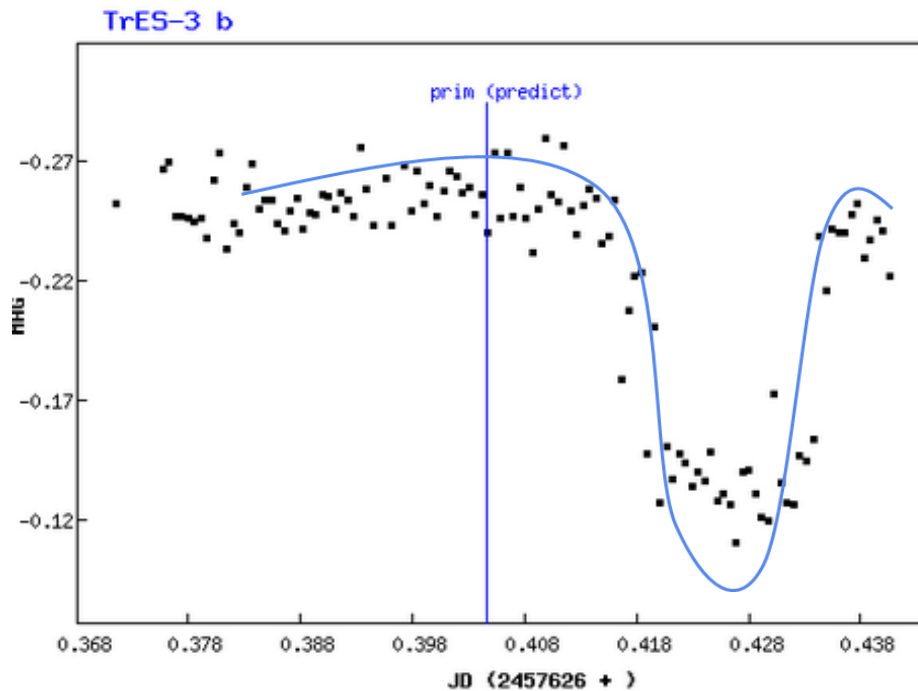


Figura 51. Trànsit de l'exoplaneta TrES-3b abans de realitzar la correcció. Observeu que el gràfic és el mateix que el de la figura 50.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Les dades que obtenim del gràfic són les següents:

JD mid:	2457626.43573 +/- 11.83100	
HJD mid:	2457626.43687 +/- 11.83100	(helcor = 0.00114)
Duration:	193.0 +/- 44254.2	minutes
Depth:	0.0015 +/- 1.2178	mag

Figura 52.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Les dades que constitueixen el gràfic són les següents:

```

JD, mag, mag_fit, mag-mag_fit, rescaled error, mag-trend, mag_fit-trend
#midtransit: 0.436868 +/- 11.831000
#depth: 0.001486 +/- 1.217836
#duration: 0.134040 +/- 30.732060

0.371610 -0.251960 -0.223103 -0.028857 0.049890 -0.027634 0.001223
0.375720 -0.266560 -0.223057 -0.043503 0.049890 -0.042234 0.001269
0.376290 -0.269700 -0.223051 -0.046649 0.049890 -0.045374 0.001274
0.376870 -0.246680 -0.223046 -0.023634 0.049890 -0.022354 0.001280
0.377440 -0.246560 -0.223040 -0.023520 0.049890 -0.022234 0.001285
0.378000 -0.246230 -0.223035 -0.023195 0.049890 -0.021904 0.001290
0.378570 -0.244510 -0.223030 -0.021480 0.049890 -0.020184 0.001295
0.379140 -0.245610 -0.223026 -0.022584 0.049890 -0.021284 0.001300
0.379700 -0.237320 -0.223021 -0.014299 0.049890 -0.012994 0.001304
0.380270 -0.261880 -0.223016 -0.038864 0.049890 -0.037554 0.001309
0.380850 -0.272850 -0.223012 -0.049838 0.049890 -0.048524 0.001314
0.381420 -0.233110 -0.223008 -0.010102 0.049890 -0.008784 0.001318
0.381980 -0.243450 -0.223003 -0.020447 0.049890 -0.019124 0.001322
0.382550 -0.240090 -0.222999 -0.017091 0.049890 -0.015764 0.001326
0.383120 -0.258450 -0.222995 -0.035455 0.049890 -0.034124 0.001330
0.383680 -0.268510 -0.222991 -0.045519 0.049890 -0.044184 0.001334
0.384250 -0.249420 -0.222987 -0.026433 0.049890 -0.025094 0.001338
0.384830 -0.253660 -0.222983 -0.030677 0.049890 -0.029334 0.001342
0.385400 -0.253200 -0.222980 -0.030220 0.049890 -0.028874 0.001346
0.385960 -0.243680 -0.222976 -0.020704 0.049890 -0.019354 0.001349
0.386530 -0.240410 -0.222973 -0.017437 0.049890 -0.016084 0.001353
0.387100 -0.248780 -0.222969 -0.025811 0.049890 -0.024454 0.001356
0.387670 -0.254160 -0.222966 -0.031194 0.049890 -0.029834 0.001360
0.388230 -0.241660 -0.222962 -0.018698 0.049890 -0.017334 0.001363
0.388810 -0.247900 -0.222959 -0.024941 0.049890 -0.023574 0.001367
0.389380 -0.247350 -0.222956 -0.024394 0.049890 -0.023024 0.001370
0.389950 -0.255590 -0.222953 -0.032637 0.049890 -0.031264 0.001373
0.390510 -0.255180 -0.222949 -0.032231 0.049890 -0.030854 0.001376
0.391080 -0.249710 -0.222946 -0.026764 0.049890 -0.025384 0.001379
0.391650 -0.256520 -0.222943 -0.033577 0.049890 -0.032194 0.001382
0.392210 -0.253340 -0.222941 -0.030399 0.049890 -0.029014 0.001385
0.392780 -0.246990 -0.222938 -0.024052 0.049890 -0.022664 0.001388

```


0.393360 -0.275340 -0.222935 -0.052405 0.049890 -0.051014 0.001391
0.393930 -0.258030 -0.222932 -0.035098 0.049890 -0.033704 0.001393
0.394490 -0.242840 -0.222929 -0.019911 0.049890 -0.018514 0.001396
0.395630 -0.262900 -0.222924 -0.039976 0.049890 -0.038574 0.001401
0.396200 -0.242530 -0.222922 -0.019608 0.049890 -0.018204 0.001404
0.397330 -0.267870 -0.222917 -0.044953 0.049890 -0.043544 0.001409
0.397910 -0.248730 -0.222914 -0.025816 0.049890 -0.024404 0.001411
0.398480 -0.265700 -0.222912 -0.042788 0.049890 -0.041374 0.001414
0.399040 -0.252360 -0.222910 -0.029450 0.049890 -0.028034 0.001416
0.399610 -0.259600 -0.222907 -0.036693 0.049890 -0.035274 0.001418
0.400190 -0.246960 -0.222905 -0.024055 0.049890 -0.022634 0.001420
0.400760 -0.257470 -0.222903 -0.034567 0.049890 -0.033144 0.001423
0.401320 -0.265570 -0.222901 -0.042669 0.049890 -0.041244 0.001425
0.401890 -0.263360 -0.222899 -0.040461 0.049890 -0.039034 0.001427
0.402460 -0.256530 -0.222897 -0.033633 0.049890 -0.032204 0.001429
0.403020 -0.259070 -0.222895 -0.036175 0.049890 -0.034744 0.001431
0.403590 -0.247760 -0.222893 -0.024867 0.049890 -0.023434 0.001433
0.404170 -0.255780 -0.222891 -0.032889 0.049890 -0.031454 0.001435
0.404740 -0.239830 -0.222889 -0.016941 0.049890 -0.015504 0.001437
0.405300 -0.273530 -0.222887 -0.050643 0.049890 -0.049204 0.001438
0.405870 -0.246030 -0.222885 -0.023145 0.049890 -0.021704 0.001440
0.406440 -0.272940 -0.222884 -0.050056 0.049890 -0.048614 0.001442
0.407010 -0.246480 -0.222882 -0.023598 0.049890 -0.022154 0.001444
0.407570 -0.258530 -0.222880 -0.035650 0.049890 -0.034204 0.001445
0.408150 -0.246130 -0.222879 -0.023251 0.049890 -0.021804 0.001447
0.408720 -0.231510 -0.222877 -0.008633 0.049890 -0.007184 0.001448
0.409290 -0.249790 -0.222875 -0.026915 0.049890 -0.025464 0.001450
0.409850 -0.278970 -0.222874 -0.056096 0.049890 -0.054644 0.001452
0.410420 -0.255480 -0.222872 -0.032608 0.049890 -0.031154 0.001453
0.410990 -0.252690 -0.222871 -0.029819 0.049890 -0.028364 0.001455
0.411550 -0.276120 -0.222870 -0.053250 0.049890 -0.051794 0.001456
0.412130 -0.249210 -0.222868 -0.026342 0.049890 -0.024884 0.001457
0.412700 -0.238960 -0.222867 -0.016093 0.049890 -0.014634 0.001459
0.413270 -0.251470 -0.222866 -0.028604 0.049890 -0.027144 0.001460
0.413830 -0.257870 -0.222864 -0.035006 0.049890 -0.033544 0.001461
0.414400 -0.254280 -0.222863 -0.031417 0.049890 -0.029954 0.001462
0.414970 -0.235150 -0.222862 -0.012288 0.049890 -0.010824 0.001464
0.415540 -0.238040 -0.222861 -0.015179 0.049890 -0.013714 0.001465
0.416100 -0.253680 -0.222860 -0.030820 0.049890 -0.029354 0.001466
0.416680 -0.178820 -0.222858 0.044038 0.049890 0.045506 0.001467
0.417250 -0.207190 -0.222857 0.015667 0.049890 0.017136 0.001468

0.417820 -0.221410 -0.222856 0.001446 0.049890 0.002916 0.001469
0.418380 -0.223150 -0.222855 -0.000295 0.049890 0.001176 0.001470
0.418950 -0.147870 -0.222854 0.074984 0.049890 0.076456 0.001471
0.419520 -0.200630 -0.222853 0.022223 0.049890 0.023696 0.001472
0.420080 -0.127060 -0.222852 0.095792 0.049890 0.097266 0.001473
0.420660 -0.150350 -0.222852 0.072502 0.049890 0.073976 0.001474
0.421230 -0.137040 -0.222851 0.085811 0.049890 0.087286 0.001475
0.421800 -0.147700 -0.222850 0.075150 0.049890 0.076626 0.001476
0.422360 -0.143930 -0.222849 0.078919 0.049890 0.080396 0.001476
0.422930 -0.134000 -0.222848 0.088848 0.049890 0.090326 0.001477
0.423500 -0.140200 -0.222848 0.082648 0.049890 0.084126 0.001478
0.424070 -0.136420 -0.222847 0.086427 0.049890 0.087906 0.001479
0.424630 -0.148630 -0.222846 0.074216 0.049890 0.075696 0.001479
0.425210 -0.127960 -0.222846 0.094886 0.049890 0.096366 0.001480
0.425780 -0.130690 -0.222845 0.092155 0.049890 0.093636 0.001480
0.426350 -0.126570 -0.222844 0.096274 0.049890 0.097756 0.001481
0.426910 -0.110820 -0.222844 0.112024 0.049890 0.113506 0.001482
0.427480 -0.140260 -0.222843 0.082583 0.049890 0.084066 0.001482
0.428050 -0.141070 -0.222843 0.081773 0.049890 0.083256 0.001483
0.428610 -0.130740 -0.222843 0.092103 0.049890 0.093586 0.001483
0.429190 -0.120700 -0.222842 0.102142 0.049890 0.103626 0.001483
0.429760 -0.119580 -0.222842 0.103262 0.049890 0.104746 0.001484
0.430330 -0.172800 -0.222841 0.050041 0.049890 0.051526 0.001484
0.430890 -0.135300 -0.222841 0.087541 0.049890 0.089026 0.001485
0.431460 -0.126830 -0.222841 0.096011 0.049890 0.097496 0.001485
0.432030 -0.126280 -0.222840 0.096560 0.049890 0.098046 0.001485
0.432590 -0.146720 -0.222840 0.076120 0.049890 0.077606 0.001485
0.433160 -0.144870 -0.222840 0.077970 0.049890 0.079456 0.001486
0.433740 -0.153490 -0.222840 0.069350 0.049890 0.070836 0.001486
0.434310 -0.238380 -0.222840 -0.015540 0.049890 -0.014054 0.001486
0.434870 -0.215410 -0.222840 0.007430 0.049890 0.008916 0.001486
0.435440 -0.241480 -0.222839 -0.018641 0.049890 -0.017154 0.001486
0.436010 -0.239630 -0.222839 -0.016791 0.049890 -0.015304 0.001486
0.436580 -0.240080 -0.222839 -0.017241 0.049890 -0.015754 0.001486
0.437140 -0.247690 -0.222839 -0.024851 0.049890 -0.023364 0.001486
0.437720 -0.251810 -0.222839 -0.028971 0.049890 -0.027484 0.001486
0.438290 -0.229320 -0.222839 -0.006481 0.049890 -0.004994 0.001486
0.438860 -0.236790 -0.222840 -0.013950 0.049890 -0.012464 0.001486
0.439420 -0.245320 -0.222840 -0.022480 0.049890 -0.020994 0.001486
0.439990 -0.240670 -0.222840 -0.017830 0.049890 -0.016344 0.001486
0.440560 -0.221360 -0.222840 0.001480 0.049890 0.002966 0.001486

A continuació anem a verificar, com en el cas anterior i en totes les pràctiques, els valors que he obtingut a partir del trànsit en comparació amb els que proporcionen les pàgines oficials.

Fit / find out	☒ ON	default / prediction :	
HJD midtransit:	☐ OFF		2457626.405
Fit / find out	☒ ON	default / prediction :	
transit duration:	☐ OFF		77.4 minutes
Fit / find out	☒ ON	default / prediction :	
planet radius => transit depth:	☐ OFF		0.164 R_{star}
impact factor :		$(SemiMajorAxis * \cos(Inclination)) / R_{star}$:	0.8277
Limb darkening :		default value :	0.5

Figura 53.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Segons les dades registrades a *The Extrasolar Planet Encyclopaedia*, el radi d'aquest exoplaneta ha de ser de $1,305 \pm 0,09 / -0,09$ RJúpiter. Aquest interval correspon a 84.941,865 km i 97.525,845 km

El radi del planeta que he calculat a partir de les dades del meu gràfic és de 89.678,5128 km, dada que s'ajusta a l'interval proporcionat per la pàgina oficial.

Per tant, el meu gràfic és correcte.

13.2.1. Característiques planetàries

TrES-3b és un exoplaneta que orbita l'estrella TrES-3 a la constel·lació d'Hèrcules.

Les seves característiques principals són les següents:

- Té una massa de $1,92 \pm 0,23$ MJúpiter, observeu que quasi duplica la massa de Júpiter.
- El seu radi és de 89.678,5128 km aproximadament.
- Té una densitat de 1172 kg/m^3 .
- La seva gravetat és de $2,7 \text{ gTerra}$.

- El seu període orbital és de $1,30619 \pm 0,00005$ dies, que en aproximació es redueix a tan sols 1 dia.
- Trobem una inclinació planetària de $82,15^\circ \pm 0,21^\circ$.
- Orbita a una distància de 0,02 UA de la seva estrella.

Amb aquesta informació extreta del meu gràfic i de les fonts oficials, obtenim la principal conclusió que és el tipus d'exoplaneta del qual estem parlant. Es tracta, doncs, d'un Júpiter ardent. Observeu, de nou, la seva gran massa que quasi duplica la massa de Júpiter i, sobretot, la petita distància a la que orbita la seva estrella (0,02 UA).

Vegeu les següents imatges per observar aquestes característiques tan extremes.

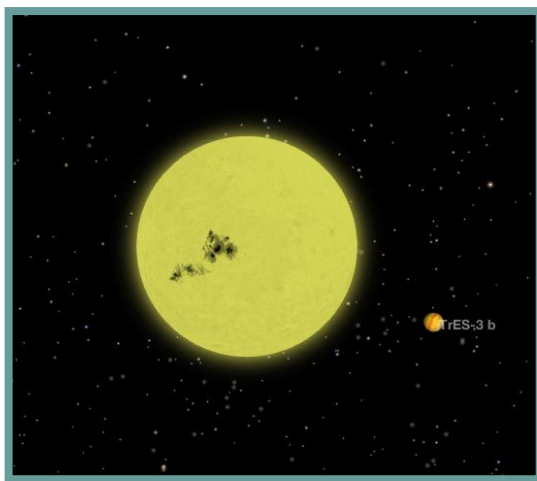


Figura 54. Distància orbital de l'exoplaneta TrES-3b (0,02 UA).

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

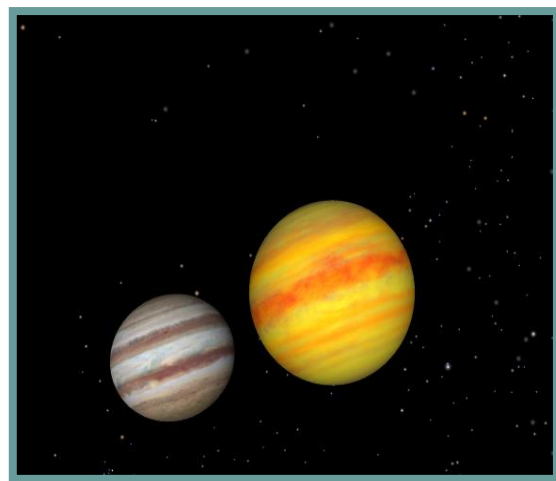


Figura 55. Comparació del planeta Júpiter (a l'esquerre) amb l'exoplaneta tres-3b (a la dreta).

Font: Aplicació *NASA's Eyes*

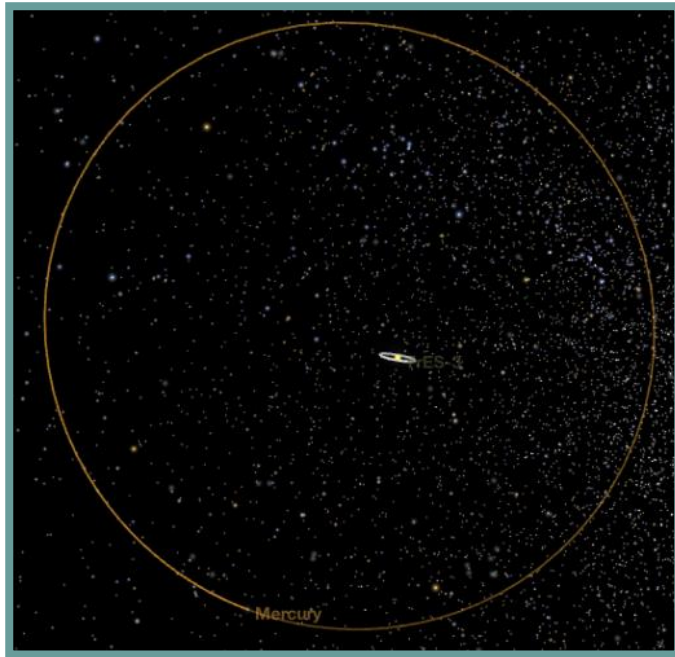


Figura 56. Comparació de l'òrbita del planeta Mercuri del nostre Sistema Solar (cercle groc) amb l'òrbita de l'exoplaneta TrES-3b (cercle blanc).

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.2.2. Característiques estel·lars

Wasp-2 és una estrella de magnitud aparent +12,4. Recordeu la magnitud aparent de l'anterior (Wasp-2, +11,88) on l'estrella s'observava amb poca lluminositat i el mateix succeeix amb aquesta ja que la magnitud és molt similar.

Les característiques principals que la defineixen són les següents:

- Es del tipus espectral G, exactament el mateix tipus d'estrella que és el Sol amb calci, heli, hidrogen i metalls. Aquestes tenen un color superficial groguenc.
- La seva temperatura és de $5720,0 \pm 0,027$ K semblant a la del Sol, que és de 5778 K.
- Té una massa de $0,924 \pm 0,04$ MSol.
- Es troba situada a 744 anys llum de la Terra.
- Té una metal·licitat de $-0,19 \pm 0,08$.

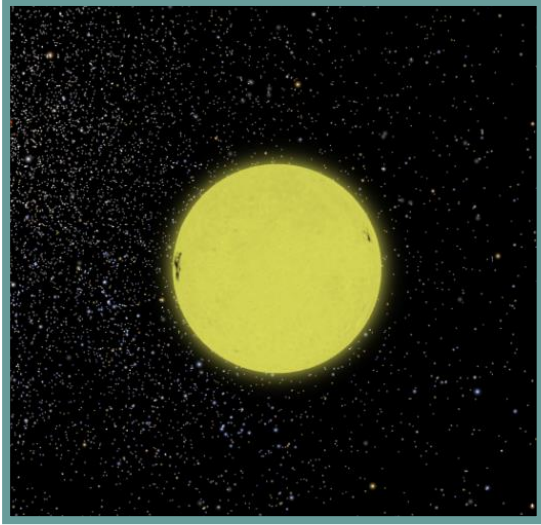


Figura 57. Estrella TrES-3.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.2.3. Habitabilitat planetària

Si a l'exoplaneta Wasp-2b la vida era inexistent, en aquest planeta encara ho és més. Doncs comprova la gran proximitat a la que es troba a la seva estrella, per tant un planeta amb un grau d'insolació immensa, així com el tipus d'exoplaneta que estem tractant (Júpiter ardent) on l'habitabilitat en ell és negada.

No obstant això, l'estrella presenta unes característiques molt favorables pel desenvolupament de vida en un planeta adient. Com he esmentat anteriorment, és molt similar al nostre Sol ja que pertany al mateix tipus espectral tot i que té una baixa metal·licitat i, aquest últim apunt, nega la possibilitat que es formin planetes al seu voltant i que, per tant, puguin ser habitables.

Ja és deduïble que l'exoplaneta no es trobarà a la zona d'habitabilitat, com podeu veure a continuació:

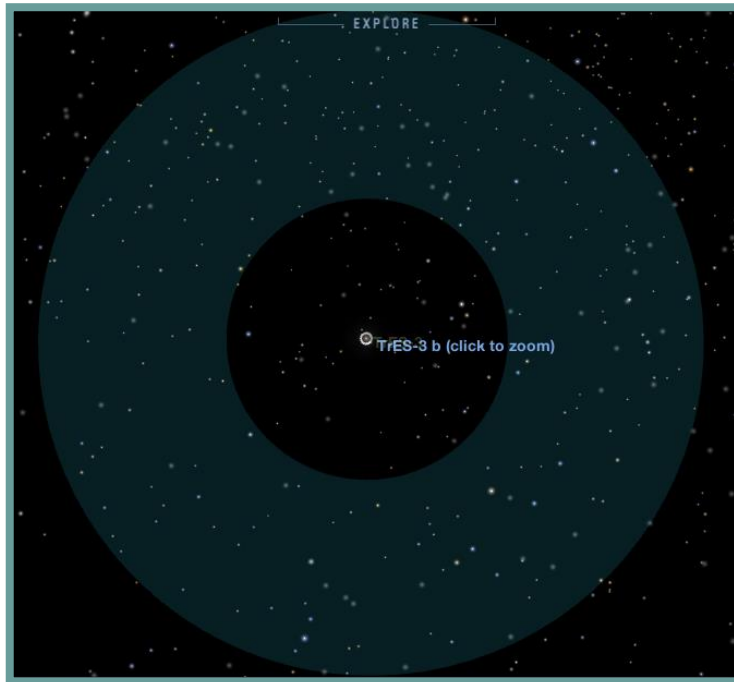


Figura 58. Zona d'habitabilitat a l'estrella TrES-3b. Observeu com l'exoplaneta no forma part d'aquesta zona.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.3. HD189733 B

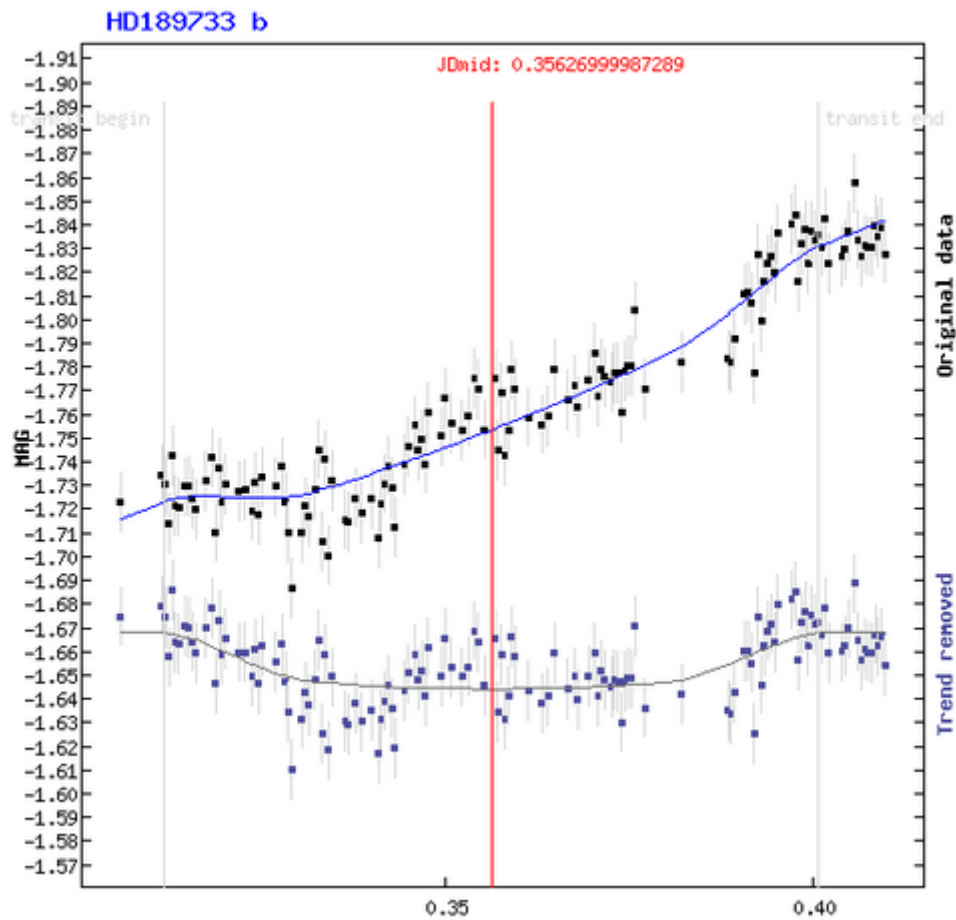


Figura 59. Trànsit de l'exoplaneta HD189733 b. Observeu el trànsit inferior que és el corregit (*Trend removed*).

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

JD mid:	2457638.35279 +/- 0.00264	
HJD mid:	2457638.35627 +/- 0.00264	(helcor = 0.00348)
Duration:	128.1 +/- 8.9	minutes
Depth:	0.0236 +/- 0.0037	mag

Figura 60. Dades del gràfic.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

Les dades que formen el gràfic són les següents:

```

JD, mag, mag_fit, mag-mag_fit, rescaled error, mag-trend, mag_fit-trend
#midtransit: 0.356273 +/- 0.002636
#depth: 0.023614 +/- 0.003701
#duration: 0.088952 +/- 0.006201
0.305840 -1.723130 -1.716152 -0.006978 0.012360 -0.006978 0.000000
0.311470 -1.734480 -1.722956 -0.011524 0.012360 -0.011524 0.000000
0.311920 -1.730200 -1.723486 -0.006714 0.012360 -0.006700 0.000014
0.312370 -1.713750 -1.723895 0.010145 0.012360 0.010294 0.000149
0.312820 -1.742540 -1.724226 -0.018314 0.012360 -0.017952 0.000362
0.313280 -1.721320 -1.724505 0.003185 0.012360 0.003824 0.000639
0.313730 -1.721090 -1.724731 0.003641 0.012360 0.004598 0.000957
0.314630 -1.729510 -1.725066 -0.004444 0.012360 -0.002734 0.001709
0.315080 -1.729600 -1.725185 -0.004415 0.012360 -0.002280 0.002134
0.315530 -1.724270 -1.725276 0.001006 0.012360 0.003593 0.002587
0.315990 -1.720060 -1.725344 0.005284 0.012360 0.008359 0.003076
0.317350 -1.732330 -1.725418 -0.006912 0.012360 -0.002267 0.004645
0.318250 -1.741640 -1.725388 -0.016252 0.012360 -0.010489 0.005763
0.318700 -1.710500 -1.725355 0.014855 0.012360 0.021195 0.006340
0.319150 -1.737320 -1.725313 -0.012007 0.012360 -0.005081 0.006926
0.319610 -1.723260 -1.725261 0.002001 0.012360 0.009535 0.007534
0.320060 -1.730760 -1.725205 -0.005555 0.012360 0.002579 0.008134
0.321860 -1.727350 -1.724954 -0.002396 0.012360 0.008164 0.010561
0.322770 -1.728440 -1.724832 -0.003608 0.012360 0.008174 0.011782
0.323680 -1.719520 -1.724732 0.005212 0.012360 0.018194 0.012982
0.324130 -1.731540 -1.724694 -0.006846 0.012360 0.006718 0.013564
0.324580 -1.717680 -1.724665 0.006985 0.012360 0.021122 0.014137
0.325030 -1.733800 -1.724647 -0.009153 0.012360 0.005546 0.014698
0.326840 -1.729550 -1.724722 -0.004828 0.012360 0.011983 0.016812
0.327740 -1.737890 -1.724870 -0.013020 0.012360 0.004731 0.017752
0.328190 -1.722770 -1.724978 0.002208 0.012360 0.020395 0.018187
0.328640 -1.710200 -1.725113 0.014913 0.012360 0.033509 0.018596
0.329100 -1.686830 -1.725281 0.038451 0.012360 0.057435 0.018984
0.330450 -1.709810 -1.725992 0.016182 0.012360 0.036087 0.019905
0.330900 -1.721190 -1.726328 0.005138 0.012360 0.025251 0.020113
0.331360 -1.716730 -1.726730 0.010000 0.012360 0.030267 0.020266
0.332270 -1.728330 -1.727498 -0.000832 0.012360 0.019766 0.020599
0.332720 -1.745270 -1.727894 -0.017376 0.012360 0.003370 0.020746
0.333170 -1.706570 -1.728300 0.021730 0.012360 0.042614 0.020885
0.333620 -1.740800 -1.728712 -0.012088 0.012360 0.008928 0.021016
0.334070 -1.700610 -1.729130 0.028520 0.012360 0.049662 0.021142
0.334520 -1.732160 -1.729554 -0.002606 0.012360 0.018656 0.021262
0.336330 -1.715690 -1.731307 0.015617 0.012360 0.037314 0.021696
0.336780 -1.714910 -1.731754 0.016844 0.012360 0.038637 0.021794
0.337680 -1.724800 -1.732657 0.007857 0.012360 0.029835 0.021978
0.338590 -1.718220 -1.733585 0.015365 0.012360 0.037515 0.022151
0.339950 -1.724540 -1.734994 0.010454 0.012360 0.032839 0.022385
0.340850 -1.707520 -1.735940 0.028420 0.012360 0.050947 0.022527
0.341310 -1.722350 -1.736428 0.014078 0.012360 0.036673 0.022595
0.341760 -1.730940 -1.736908 0.005968 0.012360 0.028627 0.022659
0.342210 -1.738420 -1.737390 -0.001030 0.012360 0.021691 0.022721
0.342660 -1.729010 -1.737875 0.008865 0.012360 0.031644 0.022780
0.343110 -1.712510 -1.738362 0.025852 0.012360 0.048688 0.022837
0.344470 -1.738660 -1.739847 0.001187 0.012360 0.024182 0.022995
0.344920 -1.746340 -1.740343 -0.005997 0.012360 0.017046 0.023043
0.345830 -1.755230 -1.741353 -0.013877 0.012360 0.009256 0.023133
0.346280 -1.745150 -1.741855 -0.003295 0.012360 0.019880 0.023175
0.346730 -1.749610 -1.742359 -0.007251 0.012360 0.015964 0.023214

```

0.347190 -1.739250 -1.742877 0.003627 0.012360 0.026880 0.023253
 0.347640 -1.760760 -1.743385 -0.017375 0.012360 0.005914 0.023288
 0.349440 -1.750650 -1.745438 -0.005212 0.012360 0.018199 0.023411
 0.349890 -1.767140 -1.745955 -0.021185 0.012360 0.002253 0.023438
 0.350800 -1.756090 -1.747008 -0.009082 0.012360 0.014403 0.023485
 0.352160 -1.753500 -1.748595 -0.004905 0.012360 0.018637 0.023541
 0.353060 -1.759050 -1.749655 -0.009395 0.012360 0.014174 0.023570
 0.353970 -1.775270 -1.750733 -0.024537 0.012360 -0.000946 0.023591
 0.354420 -1.770930 -1.751269 -0.019661 0.012360 0.003938 0.023599
 0.355320 -1.753650 -1.752346 -0.001304 0.012360 0.022306 0.023610
 0.356680 -1.774860 -1.753986 -0.020874 0.012360 0.002740 0.023613
 0.357130 -1.744860 -1.754533 0.009673 0.012360 0.033284 0.023611
 0.357580 -1.769330 -1.755081 -0.014249 0.012360 0.009358 0.023607
 0.358040 -1.742450 -1.755643 0.013193 0.012360 0.036794 0.023601
 0.358490 -1.753470 -1.756194 0.002724 0.012360 0.026318 0.023593
 0.358940 -1.778670 -1.756748 -0.021922 0.012360 0.001661 0.023584
 0.359400 -1.770980 -1.757315 -0.013665 0.012360 0.009907 0.023572
 0.361200 -1.758880 -1.759554 0.000674 0.012360 0.024183 0.023509
 0.363020 -1.755800 -1.761846 0.006046 0.012360 0.029463 0.023417
 0.363920 -1.759460 -1.762991 0.003531 0.012360 0.026891 0.023360
 0.364820 -1.779180 -1.764143 -0.015037 0.012360 0.008258 0.023295
 0.366630 -1.765920 -1.766485 0.000565 0.012360 0.023706 0.023141
 0.367530 -1.772150 -1.767661 -0.004489 0.012360 0.018564 0.023053
 0.367980 -1.762920 -1.768252 0.005332 0.012360 0.028338 0.023005
 0.369350 -1.774750 -1.770066 -0.004684 0.012360 0.018164 0.022847
 0.370250 -1.785660 -1.771269 -0.014391 0.012360 0.008341 0.022732
 0.370700 -1.767860 -1.771874 0.004014 0.012360 0.026685 0.022671
 0.371150 -1.778850 -1.772482 -0.006368 0.012360 0.016239 0.022607
 0.371610 -1.775700 -1.773105 -0.002595 0.012360 0.019945 0.022540
 0.372510 -1.773770 -1.774334 0.000564 0.012360 0.022963 0.022399
 0.372960 -1.777580 -1.774952 -0.002628 0.012360 0.019697 0.022325
 0.373410 -1.777260 -1.775573 -0.001687 0.012360 0.020561 0.022248
 0.373870 -1.760720 -1.776210 0.015490 0.012360 0.037657 0.022166
 0.374330 -1.778320 -1.776851 -0.001469 0.012360 0.020613 0.022081
 0.374780 -1.780550 -1.777482 -0.003068 0.012360 0.018927 0.021995
 0.375230 -1.780650 -1.778115 -0.002535 0.012360 0.019370 0.021905
 0.375680 -1.803700 -1.778752 -0.024948 0.012360 -0.003136 0.021812
 0.377030 -1.770540 -1.780686 0.010146 0.012360 0.031656 0.021510
 0.382010 -1.782160 -1.788265 0.006105 0.012360 0.026055 0.019950
 0.388340 -1.783210 -1.802203 0.018993 0.012360 0.032656 0.013663
 0.388790 -1.782050 -1.803328 0.021278 0.012360 0.034360 0.013082
 0.389240 -1.791580 -1.804461 0.012881 0.012360 0.025374 0.012493
 0.390600 -1.810920 -1.807920 -0.003000 0.012360 0.007678 0.010678
 0.391050 -1.811440 -1.809071 -0.002369 0.012360 0.007701 0.010070
 0.391510 -1.806980 -1.810249 0.003269 0.012360 0.012717 0.009449
 0.391960 -1.777500 -1.811400 0.033900 0.012360 0.042741 0.008841
 0.392420 -1.827690 -1.812574 -0.015116 0.012360 -0.006893 0.008223
 0.392870 -1.799540 -1.813719 0.014179 0.012360 0.021801 0.007622
 0.393320 -1.816250 -1.814858 -0.001392 0.012360 0.005635 0.007027
 0.393770 -1.823370 -1.815990 -0.007380 0.012360 -0.000941 0.006439
 0.394220 -1.826980 -1.817112 -0.009868 0.012360 -0.004007 0.005861
 0.394670 -1.819710 -1.818224 -0.001486 0.012360 0.003807 0.005293
 0.395120 -1.836300 -1.819323 -0.016977 0.012360 -0.012239 0.004738
 0.397020 -1.840340 -1.823773 -0.016567 0.012360 -0.013983 0.002584
 0.397470 -1.844030 -1.824770 -0.019260 0.012360 -0.017129 0.002131
 0.397940 -1.815990 -1.825781 0.009791 0.012360 0.011479 0.001688
 0.398390 -1.832240 -1.826717 -0.005523 0.012360 -0.004227 0.001296
 0.398840 -1.837700 -1.827617 -0.010083 0.012360 -0.009143 0.000939
 0.399290 -1.823930 -1.828477 0.004547 0.012360 0.005171 0.000623
 0.399740 -1.837460 -1.829290 -0.008170 0.012360 -0.007815 0.000355
 0.400190 -1.833830 -1.830045 -0.003785 0.012360 -0.003641 0.000144
 0.400640 -1.835530 -1.830721 -0.004809 0.012360 -0.004797 0.000012
 0.401100 -1.830770 -1.831289 0.000519 0.012360 0.000519 0.000000

```

0.401550 -1.842580 -1.831832 -0.010748 0.012360 -0.010748 0.000000
0.402000 -1.823750 -1.832376 0.008626 0.012360 0.008626 0.000000
0.403810 -1.826550 -1.834564 0.008014 0.012360 0.008014 0.000000
0.404270 -1.829520 -1.835120 0.005600 0.012360 0.005600 0.000000
0.404720 -1.837490 -1.835664 -0.001826 0.012360 -0.001826 0.000000
0.405620 -1.857500 -1.836752 -0.020748 0.012360 -0.020748 0.000000
0.406070 -1.833820 -1.837296 0.003476 0.012360 0.003476 0.000000
0.406520 -1.826410 -1.837839 0.011429 0.012360 0.011429 0.000000
0.406970 -1.831530 -1.838383 0.006853 0.012360 0.006853 0.000000
0.407430 -1.830820 -1.838939 0.008119 0.012360 0.008119 0.000000
0.407880 -1.830840 -1.839483 0.008643 0.012360 0.008643 0.000000
0.408330 -1.839510 -1.840027 0.000517 0.012360 0.000517 0.000000
0.408780 -1.834900 -1.840571 0.005671 0.012360 0.005671 0.000000
0.409240 -1.839200 -1.841127 0.001927 0.012360 0.001927 0.000000
0.409690 -1.827780 -1.841671 0.013891 0.012360 0.013891 0.000000

```

Comprovem els nostres resultats amb les dades de *The Extrasolar Planet Encyclopedia*.

Les dades oficials afirmen que el radi de l'exoplaneta ha de ser $1,138 \pm 0,077$ RJúpiter, que equival a l'interval 74.175,571 km i 84.941,865 km.

Segons el meu gràfic, el radi de l'exoplaneta és 0,148 Restrella. He buscat el radi de l'estrella a la pàgina oficial i és 571.169,7 km.

Finalment faig l'operació i el resultat que obtinc del radi de l'exoplaneta segons el meu gràfic és de 84.533,1156 km, que s'aproxima molt a 84.941,865 km, que és la dada oficial.

D'aquesta manera verifico el meu gràfic.

Fit / find out ☒ ON default / prediction :
HJD midtransit: ☐ OFF 2457638.356

Fit / find out ☒ ON default / prediction :
transit duration: ☐ OFF 109.6 minutes

Fit / find out ☒ ON default / prediction :
planet radius => transit depth: ☐ OFF 0.148 R_{star}

impact factor : (SemiMajorAxis*cos(Inclination)/ R_{star}) :
0.680

Limb darkening : default value :
0.5

Figura 61.

Font: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

13.3.1. Característiques planetàries

Aquesta és una de les pràctiques que més m'interessa comentar, ja que he obtingut uns resultats increïbles.

Primerament, es tracta d'un tipus d'exoplaneta desconegut actualment segons la pàgina oficial de la NASA. No obstant això, la seva massa és de $1,142 \pm 0,02516$ MJúpiter, la qual cosa permet fer una suposició que es tracta d'un gegant gasós, tal com ho fa la NASA. Però no com qualsevol altre, com veurem més endavant.

Les seves característiques generals són les següents:

- El seu radi és de 84.533,1156 km.
- La seva temperatura és d'aproximadament 973 K.
- El seu període orbital és de 2 dies.
- Té una inclinació de $85,51 \pm 0,05^\circ$.
- La distància orbital és d' 1 UA.

Observeu les següents fotografies per comprendre millor les característiques de l'exoplaneta.

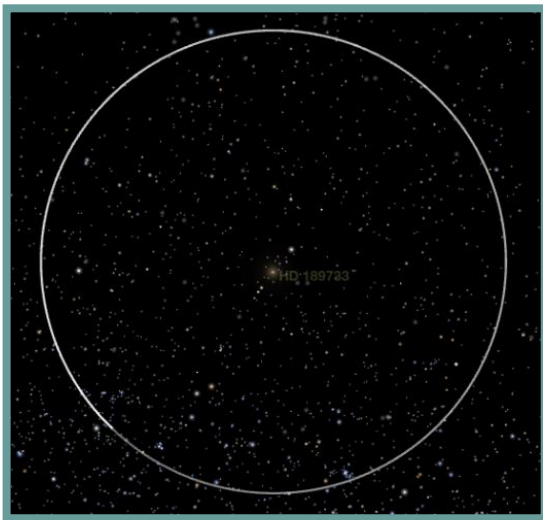


Figura 62. Òrbita de l'exoplaneta HD 189733 b.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

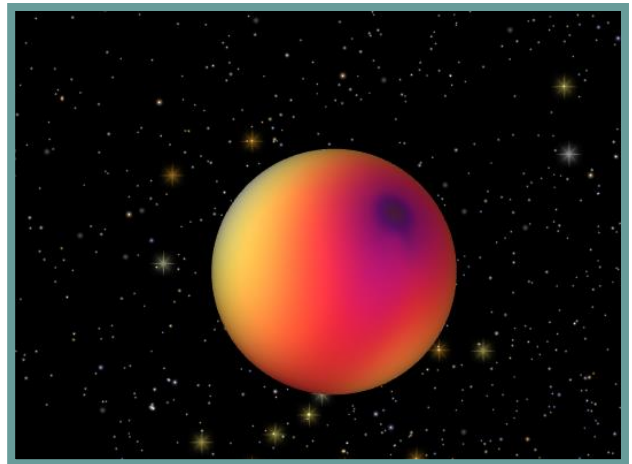


Figura 63. Mapa tèrmic de la superfície de l'exoplaneta HD 189733 b, creat gràcies al telescopi espacial Spitzer de la NASA. El mapa mostra la variació de la temperatura. Les temperatures més elevades estan representades amb els colors més clars i brillants.

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.3.2. Característiques estel·lars

Localitzada a la constel·lació Vulpecula, HD 189733 és una estrella de magnitud aparent +7,67. En comparació amb les altres estrelles que hem vist anteriorment, aquesta és més lluminosa.

Les característiques generals que la defineixen són les següents:

- És una nana taronja de tipus espectral K i, per tant, tindrà una temperatura elevada, concretament $4.875,0 \pm 43,0$ K.
- La seva massa és de $0,8 \pm 0,4$ MSol.
- Es troba a 63 anys llum de la Terra.
- La seva metal·licitat és de $-0,03 \pm 0,04$.

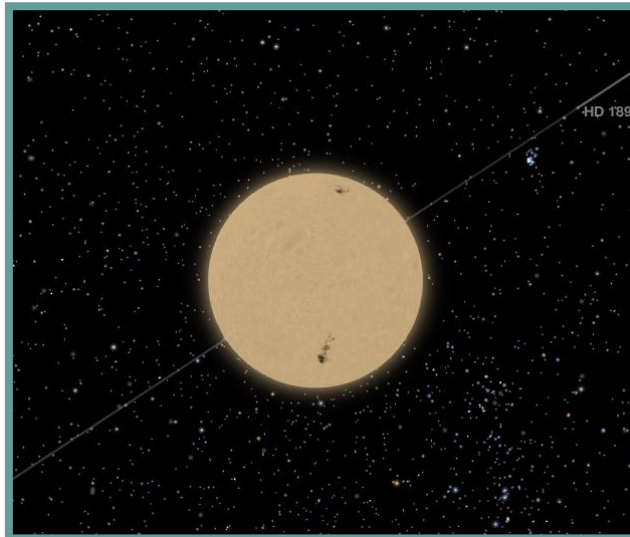


Figura 64. HD 189733. Observeu el color taronjós propi de les nanes taronges

Font: Aplicació *NASA's Eyes*.

13.3.3. Habitabilitat planetària

A diferència de les dues pràctiques anteriors, ens trobem davant d'un exoplaneta amb unes característiques molt més riques, la més important de les quals és la següent:

S'ha confirmat l'existència de molècules de H_2O (aigua)^{58 59}, CO_2 ⁶⁰ (diòxid de carboni), CH_4 (metà)⁶¹, Na (sodi)⁶², H (hidrogen)⁶³ i C (carboni)⁶⁴.

El planeta ja va ser descobert l'any 2005 en reduir-se la llum de la seva estrella un 3% quan passava l'exoplaneta per davant seva. Però el que es va detectar gràcies al telescopi Spitzer durant l'observació de l'estrella, va ser que té una llum lleugerament més dèbil que la del Sol. Es va notar que la seva llum es reduïa a dos bandes de raigs infrarojos. Va ser llavors quan es va observar que l'atmosfera exterior de l'exoplaneta, quan aquest es desplaçava davant de la seva estrella, absorbia molt poca radiació infraroja. L'aigua és l'única molècula que pot explicar aquest comportament i, a més a més, no es tracta de poca quantitat sinó que la molècula d'aigua és el compost dominant de tota l'atmosfera⁶⁵.

No obstant això, la presència de vapor d'aigua no implica necessàriament l'existència de vida. Segons les dades obtingudes, HD 189733 b és un món que està molt lluny de ser habitable, doncs:

- No és un planeta rocós com la Terra, sinó que és un gegant gasós.
- És molt gran, la qual cosa fa que l'eclipsi duri 109 minuts.
- La temperatura atmosfèrica és d'aproximadament 700 °C o superior i la gran quantitat de vapor d'aigua present a l'atmosfera no pot condensar-se per precipitar com a pluja o formar núvols. La temperatura hauria de ser aproximadament 5 vegades més freda per que el vapor d'aigua pogués convertir-se en pluja o núvols.
- El planeta està tan sòlidament atret per la gravetat de la seva estrella que el mateix hemisferi està sempre davant seva, de manera que només es calenta un costat. És probable que això generi uns vents ferotges que bufarien des del costat diürn fins al costat nocturn.

Pel que fa al descobriment de les molècules orgàniques, científics del *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), de la NASA, han detectat metà a l'atmosfera del planeta. Segons Agustín Sánchez Lavega, expert en atmosferes planetàries de l'agència espacial d'EEUU, "*La molècula de gas metà sota les circumstàncies adequades pot significar un punt clau a la*

⁵⁸<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.461.3274C>

⁵⁹<http://web.archive.org/web/20090609144150/http://www.astro-web.es/2008/02/12/por-primera-vez-se-encuentra-molecula-organica-en-mundo-alienigena/>

⁵⁹<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.461.3274C>

⁶⁰<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.461.3274C>

⁶¹<http://adsabs.harvard.edu/abs/2015arXiv150305581W>

⁶²<http://arxiv.org/abs/1301.6030>

⁶³<http://arxiv.org/abs/1504.07655>

⁶⁵ A l'estudi del planeta van intervenir diferents investigadors tant de l'Agència Espacial Europea (ESA), com de la Universitat de Harvard (EEUU), i d'entitats científiques de països com França, Taiwan o el Regne Unit.

química prebiòtica”⁶⁶ és a dir les reaccions considerades necessàries per formar vida tal com la coneixem a la Terra.

Considero interessant destacar un article de la revista *Nature*⁶⁷ (referent al descobriment del gas metà) on Sara Seager del MIT a Cambridge, afirma que *“Això és sorprenent, sabent que HD 189733 b orbita molt a prop de la seva estrella mare – tan sols a un 10% de la distància que Mercuri ho fa del Sol amb temperatures atmosfèriques d’aproximadament 700 graus Celsius – quan la temperatura és tan alta, la forma predominant del carboni hauria de ser el monòxid de carboni, i no el metà.”*

Els autors suggereixen que algun procés químic actualment incompès podria ser el responsable, ja sigui concentrant el metà a les parts més fredes de l’atmosfera, o generant directament metà extra.

És la primera vegada que s’observa la presència de molècules orgàniques en un planeta extrasolar. El descobriment es va realitzar mitjançant instruments del telescopi Hubble i va ser publicat a la revista *Nature* el Març de 2008; l’article, a més a més, confirma la presència d’aigua.

Tot i que l’exoplaneta és molt calent com per fer possible el desenvolupament de vida semblant a la que existeix a la Terra, aquesta observació prova que es pot realitzar l’espectroscopia⁶⁸ en un exoplaneta més fred, potencialment habitable i de la mida de la Terra.



Figura 65. Recreació artística de l’exoplaneta HD 189733 b.

Font:

<http://www.elmundo.es/elmundo/2013/07/11/ciencia/1373551523.html/>

⁶⁶ <http://www.lanacion.com.ar/997407-primera-molecula-organica-de-otro-planeta>

⁶⁷ http://www.newscientist.com/article/dn13303?feedId=online-news_rss20

⁶⁸ L’espectroscopia és un procés que divideix la llum en els components i revela les característiques que distingeixen als diferents elements químics.

Observeu la figura 65. L'exoplaneta és de color blau, semblant a la Terra, però això no és degut als grans oceans, sinó al gas que constitueix la seva atmosfera. A més de moltes substàncies esmentades anteriorment, trobem una barreja de partícules entre les quals apareix el silicat, que és el que dispersa aquesta llum blava.

14. CONCLUSIONS

La investigació del exoplanetes m'ha portat a verificar la meua hipòtesi de treball: els exoplanetes existeixen, tot i que contràriament al que vaig plantejar no necessàriament els de tipus terrestre han de ser els únics aptes per desenvolupar vida, doncs el tercer exoplaneta que he estudiat (HD189733 b) té unes característiques molt semblants a les de la Terra malgrat no ser un planeta terrestre i que, per tant, el converteixen en un exoplaneta potencialment habitable.

La realització d'aquest treball m'ha portat a una reflexió personal: *la Terra és el bressol de la Humanitat, però estarà el futur de l'home en un altre Terra?* El nostre planeta està destinat a destruir-se, ja sigui per la natural evolució de l'Univers, per certes actuacions destructives de la humanitat... Així doncs, la continuïtat de la humanitat dependrà de l'habitabilitat exoplanetària que només serà possible a través de la investigació. Per aquest motiu, considero de vital importància l'estudi dels exoplanetes.

15. WEBGRAFIA

Les pàgines web s'han consultat durant els mesos de Juliol i Agost del 2016.

- Història de l'exoplanetologia
<http://exoplanetas.es/historia-de-la-exoplanetologia/>
- Júpiter ardent
https://es.wikipedia.org/wiki/J%C3%BApiter_caliente#Caracter.C3.ADsticas
- Quan Júpiter sigui un Júpiter ardent
<http://danielmarin.naukas.com/2012/07/13/cuando-jupiter-sea-un-jupiter-caliente/>
- Superterra, la primera descoberta
https://es.wikipedia.org/wiki/Supertierra#La_primera_supertierra_descubierta
- Superterra
http://es.alderapedia.wikia.com/wiki/Clase:_Supertierra
- Kepler-452b
<https://es.wikipedia.org/wiki/Kepler-452b>
- Neptú ardent
https://ca.wikipedia.org/wiki/Nept%C3%BA_ardent
- Subterra
<https://es.wikipedia.org/wiki/Subtierra>
- 51 Pegasi-b
<https://es.wikipedia.org/wiki/Dimidio>
<http://www.batanga.com/curiosidades/9088/conoce-a-51-pegasi-b-el-primer-exoplaneta-descubierto-por-el-ser-humano>
- Mètodes de detecció de planetes extrasolars
https://ca.wikipedia.org/wiki/Planeta_extrasolar#M.C3.A8todes_de_detecci.C3.B3
<http://exoplanetas.es> (Ampliació del coneixement del mètode del trànsit)
- Habitabilitat exoplanetària
https://es.wikipedia.org/wiki/Habitabilidad_planetaria#Sistemas_estelares_aptos
- Geoquímica
<https://ca.wikipedia.org/wiki/Geoqu%C3%ADmica>
- Anàlisi i construcció dels gràfics
<http://var2.astro.cz/ETD>