



Universitat Autònoma de Barcelona

Facultat de Ciències

Departament de Física

Treball de Final de Grau en Física

EXOPLANETES I ESTUDI PEL MÈTODE FOTOMÈTRIC DE TRÀNSITS DE TRES-3B I TRES-1B

Autora: Güelfa Garriga Rovira

Codirectors: Rafael Balaguer Rosa i Pere Guerra Serra

Tutor UAB: Carles Domingo Miralles

Curs 2019-2020

Convocatòria: Juliol 2020

Resum

Exoplaneta és la paraula de moda entre els astrònoms actuals i la raó del seu interès no mereix menyspreu. Són cossos celestes que orbiten estrelles fora del sistema solar, així com ho fa la Terra entorn el Sol, aleshores, per similitud, la pregunta directa que es genera és... poden contenir vida? Aquesta és la principal motivació per al seu estudi però no s'acaben aquí. S'han descobert en gran diversitat de sistemes estel·lars i amb característiques ben diferents.

En aquesta tesi ens dedicarem a la definició exacte d'exoplaneta, contemplant el que això implica, i on els podem trobar. Viatjarem en el temps des de la primera descoberta fins al projecte en actiu TESS de la NASA. Parlarem de diferents mètodes de detecció i entrarem en detall en el mètode de trànsits. Finalment, analitzarem el trànsit dels exoplanetes TrES-3b i TrES-1b a través de fotometria diferencial.

Les corbes de magnitud estel·lar experimentals s'ajusten perfectament a la corba d'un trànsit, s'han obtingut uns radis planetaris de $R_{TrES-3b} = (0,136 \pm 0,004) R_{\odot}$ i $R_{TrES-1b} = (0,131 \pm 0,003) R_{\odot}$ i un períodes orbitals de $P_{TrES-3b} = (1,0 \pm 0,3)$ dies i $P_{TrES-1b} = (3,4 \pm 0,4)$ dies, amb unes divergències respecte els valors teòrics on la major es situa en el 23%.

Índex

1	Introducció i objectius	5
2	Context històric i evolució de la recerca	6
2.1	Descobriments i primeres missions	6
2.2	Actualitat	6
3	Exoplanetes. Definicions i sistemes relacionats	7
3.1	Definició	7
3.2	Nomenclatura	7
3.3	Sistemes planetaris	8
4	Mètodes de detecció	9
4.1	Per trànsits	9
4.1.1	Fotometria i dispositius CCD	10
4.1.2	Paràmetres. Fórmules i deducció	12
4.1.3	Variació de temps de trànsit (VTT)	14
4.2	Velocitats radials	14
4.3	Microllents gravitacionals	15
4.4	Imatge directa	15
4.5	Altres mètodes	16
5	Marc pràctic	17
5.1	I Estudi del trànsit del planeta TrES-3b	17
5.1.1	Introducció i objectius	17
5.1.2	Instal·lació i material	17
5.1.3	Metodologia i anàlisi de dades	18
5.1.4	Resultats	19
5.1.5	Conclusió	21
5.2	II Estudi del trànsit de TrES-1b	22
5.2.1	Introducció i objectius	22
5.2.2	Instal·lació i material	22
5.2.3	Metodologia i anàlisi	22
5.2.4	Resultats	23
5.2.5	Conclusió	25
6	Conclusions	26

1 Introducció i objectius

La descoberta d'exoplanetes és un camp relativament recent i actualment en auge. Són "Terres" o "Júpiter" que orbiten estrelles diferents al Sol i són de gran importància per la comunitat científica ja que obren noves portes a la possibilitat de vida extraterrestre. Se n'estudien paràmetres planetaris, orbitals i l'atmosfera, i hi ha diversos projectes d'estudi per a detectar-los, tant terrestres com espacials.

En aquest escrit però, no només parlarem d'exoplanetes, sinó que haurem de fer una mirada al voltant per situar-nos bé. Parlarem dels germans i germanes dels exoplanetes, de la seva guia en l'espai, les diferents maneres de reconèixer-los i com s'ha fet al llarg del temps. Acabarem amb l'anàlisi de dos trànsits exoplanetaris, obtenint-ne la corba de llum, el radi planetari i el període orbital. Es mostren càlculs on es dona per conegut el radi de l'estrella, aquest es determina per observacions espectroscòpiques, de paral·laxi i comparacions amb estrelles variables però nosaltres ens limitarem a cercar-lo ja que el càlcul queda fora del nostre abast (breu explicació a l'apartat d'annexos).

El catàleg d'exoplanetes de la NASA ens ha proporcionat els paràmetres planetaris, la informació orbital i informació sobre les estrelles orbitades requerida per a l'execució del document. Molt important és també la base de dades de trànsits exoplanetaris de la Societat Astronòmica Txeca ja que conté tot el necessari per a la realització de la part pràctica.

L'objectiu principal de la tesi és entrar en detall en la definició d'exoplaneta, estudiar què comporta i saber si han de tenir unes característiques determinades o si poden anar acompanyats (d'altres planetes o de satèl·lits); saber fins a quin punt és estreta la relació de l'exoplaneta amb l'estrella que orbita, com s'afecten l'un a l'altre; recórrer la història, des del primer descobert fins a l'actualitat; conèixer els sistemes de detecció i quina és la matemàtica emprada; ser capaç de treballar amb dades publicades d'exoplanetes ja coneguts per estudiar-ne les òrbites i finalment, prendre imatges pròpies per estudiar trànsits.

Personalment em proposo testar la meua maduresa científica, des de la recerca de material bibliogràfic fins a la posada en pràctica dels coneixements adquirits; conèixer una sortida laboral; em vaig posar a estudiar física per dos raons principals: la quàntica (gràcies al llibre de la Sònia Fernandez Vidal, *La Porta dels tres panys*) i el cel. Encara no sabia què era l'astronomia però em fascinava mirar les estrelles i encara sóc d'aquelles que quan caminen pel carrer de nit miren amunt. Ara, potser, llegiré més secrets ocults en aquest fons ple de puntets brillants.

Per acabar, vull agrair a l'Albert Gascón la seva generositat, em va proporcionar les eines necessàries per saber que els meus propòsits eren viables. A en Rafael Balaguer i en Pere Guerra, per les oportunitats, el material i l'experiència. I a la meua família, pel suport i els ànims en moments baixos.

2 Context històric i evolució de la recerca

2.1 Descobriment i primeres missions

El primer exoplaneta descobert va ser 51 Pegasi b, descobert per Didier Queloz i el seu director de tesi Michel Mayor al 1995. Aquest va ser el primer planeta orbitant una estrella en seqüència principal fora del sistema solar trobat però dos anys abans, l'astrònom polonès Alexander Wolszczan va detectar anomalies en el període del púlsar PSR B1257+12 gràcies al radiotelescopi d'Arecibo i va demostrar que eren degudes a la presència de dos planetes amb masses unes 4 vegades superiors a la terrestre que orbitaven al seu voltant. Llavors, no es solen considerar els primers exoplanetes descoberts perquè tècnicament, per definició, no són exoplanetes, sinó “planetes de púlsars” (tot i que estan registrats al web de la NASA [11] igualment).

Durant la dècada dels 80, diversos astrònoms van establir uns patrons sobre el reflex de la llum del Sol que tenen els planetes i van observar que aquesta llum “trontolla”. Aquest moviment permet determinar si l'estrella té un planeta (o més) que l'orbita i acabaria sent l'origen del descobriment d'exoplanetes, l'anomenat mètode de velocitat radial.

Va ser aquest trontoll de llum de l'estrella 51 Pegasi el que Queloz va identificar el gener de 1995 amb l'espectrògraf ELODIE de l'Observatori de Haute-Provence, a França, i va atribuir a la conseqüència d'un planeta orbitant. El 6 d'octubre del mateix any van donar la notícia al món i després d'aquell dia i gràcies a la seva tècnica s'han trobat milers d'exoplanetes.

El descobriment dels exoplanetes va ser el resultat d'una dura competició entre suïssos i nord-americans. Van guanyar els suïssos però uns mesos més tard, l'equip del nordamericà Geoffrey Marcy va anunciar el descobriment de dos nous planetes (també per velocitats radials).

Amb l'objectiu d'aprofundir en aquest camp, s'han llançat diverses sondes espacials perquè recullin informació interestel·lar. Així, no només tenim dades recopilades des de la Terra, sinó des de l'espai exterior on s'evita l'atmosfera terrestre i les turbulències que genera per mirar de detectar més planetes i les seves característiques. Les missions COROT (2006-2014) i Kepler (2009-2018), de l'ESA i la NASA respectivament, van posar en òrbita satèl·lits amb sensors fotomètrics tipus CCD extremadament sensibles per a detectar planetes amb el mètode de trànsits.

2.2 Actualitat

Hi ha un total de 4.164 exoplanetes confirmats en 3.085 sistemes planetaris i 5.220 candidats segons el catàleg oficial de la NASA a data de 10 de juny de 2020 [11]. La gran majoria han estat detectats gràcies al mètode de trànsits, amb un 76,2%, i l'altre mètode amb major èxit és el de velocitats radials, amb un 19,2%. La missió espacial actual és la TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), llançada l'abril del 2018 per la NASA i dirigida pel MIT (Massachusetts Institute of Technology) i el Centre per Astrofísica Harvard-Smithsonian. Està programada per passar-se dos anys monitoritzant més de 200.000 estrelles per detectar disminucions temporals de brillantor provocades pels trànsits planetaris i és capaç d'identificar planetes de totes les mides.

3 Exoplanetes. Definicions i sistemes relacionats

3.1 Definició

L'etimologia de la paraula "planeta" s'origina en el grec $\pi\lambda\alpha\nu\tau\epsilon\zeta\ \alpha\sigma\tau\epsilon\rho\epsilon\zeta$ (planetes asteres) que vol dir estrelles errants, és a dir, que van d'un cantó a l'altre sense tenir una posició fixe a diferència del fons estrellat, i ho van acabar simplificant a "planetes". El prefix "exo" també ve del grec $\epsilon\chi\omega$ que significa "fora de". "Exoplaneta" és una abreviació de "planeta exosolar", per tant, planeta fora del Sol. Els definim doncs, com planetes que orbiten entorn estrelles fora del sistema solar.

El 2003, un Grup de Treball sobre planetes extrasolars de la Unió Astronòmica Internacional (UAI)ⁱ, va fer una declaració de posició sobre la definició d'un planeta (i d'aquí va diferenciar altres cossos), però no es va arribar a acceptar tot i que ha estat àmpliament utilitzada per astrònoms en les seves publicacions a revistes acadèmiques. En aquesta declaració [2] afirmaven el següent:

Són planetes els objectes amb masses reals per sota dels límits de la massa per a la fusió termonuclear del deuteri (calculat actualment a 13 vegades la massa de Júpiter, M_J , per a objectes amb tanta abundància isotòpica com el Sol), que orbiten estrelles o restes estel·lars (no importa com es van formar). A partir d'aquí, la definició d'exoplaneta: la massa i la grandària mínima requerida perquè un objecte extrasolar sigui considerat planeta ha de ser la mateixa que la utilitzada en el sistema solar. Si un objecte d'aquesta característica flota lliurement en cúmuls estel·lars joves s'anomenarà subnana marró. Nana marró serà quan superi la massa real per a la fusió termonuclear del deuteri, sense importar com es va formar o on es trobi. Les subnanes marrons es diferencien dels planetes interestel·lars perquè es pensa que es van formar de manera silimar a les estrelles, però aquests darrers també tenen massa inferior a $13M_J$ i no estan lligats a cap estrella (pot ser que en fossin ejectats o que mai hi hagin estat).

L'agost del 2006 en una assemblea general de la UAI es va formalitzar la definició de planeta i aquesta seria la mateixa per un exoplaneta, amb la diferència que orbita una estrella que no és el Sol [1]. Diu el següent:

Un planeta és un cos celeste que (a) està en òrbita al voltant del Sol, (b) té suficient massa perquè la seva pròpia gravetat superi les forces de cos rígid de manera que adquireixi un equilibri hidroestàtic (forma pràcticament esfèrica), i (c) ha netejat el veïnatge de la seva òrbita.

3.2 Nomenclatura

La manera com s'atribueixen els noms als planetes exosolars és anàloga al sistema utilitzat per les estrelles binàries, l'única diferència és que s'utilitzen lletres minúscules pels planetes enlloc de les majúscules que són per les estrelles. Es col·loca la minúscula just després del nom de l'estrella a la que orbita, començant per la *b* a partir del primer planeta descobert (per exemple 51 Pegasi b), es salta la *a* per no confondre'ns amb l'estrella primària. Llavors, el següent planeta descobert, si aquest sistema

ⁱLa Unió Astronòmica Internacional és l'autoritat en matèria de noms d'estels, planetes, i altres objectes celestes, i fenòmens, així com dels estàndards en astronomia.

té més d'un planeta, s'anomena amb la següent lletra de l'abecedari. Si dos planetes es decobreixen al mateix temps, es dóna preferència a la proximitat a l'estrella per anomenar-los, és a dir, el més proper s'enduria la *b* i el més llunyà la *c*.

Si el planeta orbita un sistema binari, associem una lletra majúscula a l'estrella seguida per la lletra minúscula del planeta. Per exemple 16 Cygni Bb és una planeta que orbita dins el sistema binari 16 Cygni a l'estrella 16 Cygni B. Tot i això, si el planeta orbita l'estrella principal, se sol ometre la lletra majúscula, tant si les estrelles secundàries van ser descobertes abans o després del planeta i tant si estan relativament lluny o a prop.

Diversos planetes han rebut noms no oficials comparables amb els del sistema solar, com ara: Osiris (HD 209458 b), Bel·lerofont (51 Pegasi b) i Matusalem (PSR B1620-26 b). La UAI de moment però, no considera assignar oficialment noms d'aquest tipus perquè no seria pràctic.

3.3 Sistemes planetaris

Bé doncs, els exoplanetes pel fet d'orbitar una estrella ja formen un sistema planetari però podem preguntar-nos si també existeixen altres elements en aquests sistemes (més planetes, satèl·lits, asteroides...). Anem a veure els primers sistemes diferents que es van descobrir.

- El PSR B1257+12 va ser el primer sistema planetari extrasolar descobert i l'estrella central és un púlsar.
- PSR B1620-26 és un sistema exoplanetari entorn un sistema estel·lar múltiple (binari).
- HD 10180 és el sistema planetari extrasolar amb el major nombre de planetes descoberts (7 planetes i possiblement fins a 9).
- Gliese 876 té com a estrella central una nana vermella.
- HD 69830 conté tres planetes de la grandària de Neptú i un cinturó d'asteroides anomenat la pedra de roseta dels sistemes planetaris.
- 2M1207 té com a estrella central una nana marró i és el primer amb el qual s'aconsegueix una imatge directa d'exoplaneta.
- Cha 110913 és el primer planeta extrasolar amb llunes al seu voltant.

Avui dia es coneixen alguns planetes de púlsars però no se sap del cert si tenen les mateixes característiques que els que orbiten estrelles estàndards. Els de púlsars poden ser residus de planetes gegants gasosos que no han estat del tot destruïts quan l'estrella massiva central va morir generant una supernova i també la residual estrella de neutrons. Una altra hipòtesi és que aquests hagin estat formats en una segona onada de formació planetària poc després de l'explosió de la supernova. En canvi, la formació planetària està atribuïda al col·lapse d'una nebulosa en un disc de gas i pols prima. Una protoestrella es forma al centre, envoltada d'un disc protoplanetari rotant i a poc a poc les partícules de pols van acumulant massa per formar cossos cada cop més grans.

Com hem vist, existeix un planeta orbitant un sistema binari d'estrelles però no és l'únic, i de fet, existeixen també en sistemes terciaris i quàdruples i no hi ha cap raó per la qual no puguin existir en sistemes quíntuples o successius. Quan observem dues o més estrelles properes aparentment parlem d'un sistema múltiple òptic però si estan lligades gravitacionalment llavors parlem d'un sistema múltiple físic o sistema estel·lar múltiple. En aquests casos, cada estrella orbita al voltant del centre de massa del sistema però tot sovint pot passar que dues estrelles formin un sistema binari (giren entorn el centre de massa d'elles dues) i llavors orbitin al voltant d'una altra estrella o d'un altre sistema binari. Es poden construir diversos sistemes seguint aquest procediment i ho anomenem configuració jeràrquica. Dins aquestes configuracions s'afegeixen els planetes, orbitant una de les estrelles del sistema, o un sistema binari, o un de terciari, etc. Hi ha però un altre cas en què el sistema estel·lar no pot ser resolt pel problema dels dos cossos (com en el cas de les configuracions jeràrquiques) i ha de resoldre's pel problema dels n -cossos. S'anomena configuració trapèzia i les estrelles tenen òrbites amb interaccions fortes inestables exhibint un comportament caòtic.

De la mateixa manera, l'existència de llunes al voltant d'aquests planetes podria ser clarament viable. El millor exemple és el nostre propi sistema solar, on la gran quantitat de satèl·lits naturals que orbiten els nostres planetes (alguns molt diferents entre ells) reflecteix una alta probabilitat de trobar-los en altres indrets. Fins al moment no se n'ha confirmat cap però la missió Kepler va proposar uns candidats al apreciar uns petits "esquitxos" durant la disminució de lluentor de l'estrella degut al trànsit (veure apartat 4.1).

Keiichi Wada, professor de la Universitat de Kagoshima i investigador de nuclis galàctics actius (objectes lluminosos energitzats per forats negres), es va preguntar si planetes podien ser formats al voltant de forats negres supermassius i conseqüentment orbitar-los. Va construir un grup de treball i van aplicar els models actuals de formació planetària al violent entorn dels forats negres per veure si seria viable. Els resultats [12] afirmen que sí que seria possible però amb algunes diferències als planetes que orbiten estrelles. Donada l'enorme massa i força gravitatòria dels forats negres supermassius, tenen la capacitat de deformar l'espai-temps del seu voltant, el que seria un gran problema pel naixement de nous móns, però segons Wada, els planetes no sentirien aquestes deformacions (com ara la dilatació del temps) ja que es crearien molt lluny d'aquests cossos, a distàncies entre els 10 i 30 anys llum, on els efectes de la relativitat serien insignificats. A més a més, la quantitat de pols que gira al voltant del forat negre és enorme, cosa que significa que la massa d'aquests planetes seria molt i molt gran i hi podria haver fins a 10.000 planetes al voltant d'un sol forat negre supermassiu.

4 Mètodes de detecció

4.1 Per trànsits

Aquest mètode el desenvoluparem més que els següents ja que és amb el que s'ha fet la part pràctica i també perquè és un dels principals i amb el qual hi ha hagut un major nombre d'exoplanetes detectats.

El trànsit és el fenomen pel qual un astre passa per la línia de visió entre un altre astre i l'observador.

Si l'astre més proper és aparentment més petit que el llunyà s'anomena trànsit, si el més proper és aparentment més gran llavors l'anomenem ocultació. En ambdós casos hi ha una variació de la lluminositat rebuda, de la magnitud aparent. En la detecció d'exoplanetes es registra la lluminositat d'una estrella i si s'observa una disminució del flux periòdica vol dir que hi ha un objecte orbitant-la. Podem distingir 4 contactes del trànsit segons com veiem la circumferència del planeta respecte la de l'estrella. Detallat en la Figura 2 de l'apartat 4.1.2.

En les estrelles succeeix l'enfosquiment vers el limbe, és a dir, el fenomen òptic pel qual la intensitat en les vores de la circumferència estel·lar és aparentment menor que en el centre. D'aquesta manera, en l'ingrés i la sortida del trànsit, la brillantor de l'estrella és menor que en el mig del trànsit i llavors, a l'hora de la parametrització de la corba de llum, s'ha de corregir aquest enfosquiment introduint els coeficients corresponents per cada estrella en particular.

Aquest mètode presenta un parell de desavantatges. Els 3 cossos han d'estar alineats, la probabilitat de veure un trànsit des de la Terra és baixa però es pot calcular segons la fórmula següent:

$$P_{\text{trans}} = \frac{R_e + R_{\text{pl}}}{a} \quad (1)$$

on R_e i R_{pl} són el radi de l'estrella i del planeta respectivament i a és el semieix major de l'òrbita del planeta. Si l'estrella és més gran la probabilitat augmenta (ja que per lògica serà més fàcil poder-la veure) i si el semieix major augmenta (major excentricitat) la probabilitat disminueix ja que el planeta tardarà més en transitar l'estrella i hi haurà menys probabilitats que el trànsit sigui visible des del nostre pla orbital.

L'altre desavantatge és l'alta taxa de falses deteccions. Al 2012 el percentatge de falses deteccions fetes per la missió Kepler arribava al 40%, per això, sempre que hi hagi un sol trànsit detectat en una estrella (no un trànsit periòdic) cal confirmar que es tracta d'un exoplaneta amb algun altre mètode de detecció. Una font de falses deteccions per exemple són les taques estel·lars, ja que són zones més fredes de la superfície que causen una disminució de la brillantor temporalment.

Això sí, presenta uns grans avantatges. Es pot determinar el radi del planeta directament, i junt amb el mètode de velocitats radials, en podem extreure la densitat. També és possible estudiar l'atmosfera del planeta mitjançant la comparació de les mesures espectroscòpiques de l'estrella abans i durant el trànsit. Quan el planeta passa per davant l'estrella, la llum de l'estrella travessa l'atmosfera del planeta i pot comportar algun canvi en l'espectre fent possible detectar elements presents en l'atmosfera del planeta. A més a més, gràcies al trànsit secundari (quan el planeta passa per darrere l'estrella) es pot mesurar la radiació del planeta i ajuda a determinar l'excentricitat de la seva òrbita. Si restem la intensitat lluminosa de l'estrella durant el segon trànsit a la intensitat que té abans del primer trànsit, només ens quedarà el senyal causat pel planeta i serà possible determinar-ne la temperatura.

4.1.1 Fotometria i dispositius CCD

La fotometria és la tècnica que utilitza l'astronomia per mesurar el flux o la intensitat de radiació electromagnètica que emeten els diferents astres. Actualment la més emprada és la fotometria CCD

ja que és més ràpida, econòmica i permet que es puguin seguir i estudiar gran quantitat d'estrelles diferents en una mateixa imatge. Consisteix en col·locar un dispositiu de càrrega acoblada (CCD) al telescopi com a receptor i quantificador de quantitat de llum rebuda, aquest dóna les mesures en format digital (unitats ADUⁱⁱ). Hi ha establert un sistema fotomètric per tal de determinar la lluentor dels diferents astres, conté un conjunt d'estrelles i filtres fotogràfics com a estàndard per a comparar amb el que observem. El més conegut és l'UBVRI on cada sigla correspon al color de llum estel·lar que filtra: ultraviolada, blava (banda B), verda (banda V), vermell (banda R) i infraroig. Les modernes tècniques en la fabricació, com el xip CCD, han permès ampliar filtres que se situen més cap a l'infraroig i que augmenti la sensibilitat de tal manera que la sonda Kepler pot arribar a detectar planetes de la mida de la Terra.

El sensor CCD és un conjunt de cel·les fotovoltàiques que registren una imatge. La capacitat de resolució té a veure amb el nombre d'aquestes cel·les i s'expressa en píxels; com més píxels, major nitidesa en relació amb el tamany. Quan incideix llum sobre la cèl·lula, a través de l'efecte fotoelèctric, produeix una quantitat d'electrons proporcional al nombre de fotons que ha rebut. La sensibilitat del detector depèn de la seva eficiència quàntica, és a dir, de la quantitat de fotons que ha de rebre perquè pugui generar el corrent elèctric. Al final de l'exposició s'aplica una variació cíclica de potencial elèctric sobre les bandes de semiconductor (aïllades per capes de SiO₂) per tal de transferir els electrons de cada detector individual, així, el CCD es llegeix línia per línia. En la Figura 1 es mostra un possible xip on el corrent primer aniria de dalt cap a baix (les línies que es llegeixen corresponen a les columnes) i llavors de dreta a esquerra on, finalment, passa per un amplificador i per un conversor analògic-digital que treu el codi binari que pot ser traduït a la imatge per l'ordinador. La majoria de càmeres CCD utilitzen el filtre de Bayer per detectar la llum per separat segons els 3 colors bàsics (RGB: vermell, verd i blau) de manera que un píxel registra la llum vermella, un altre la blava i dos la llum verda (ja que l'ull humà és més sensible a aquesta). D'aquesta manera 3 píxels formen un conjunt de cel·les que poden captar qualsevol color de la imatge.

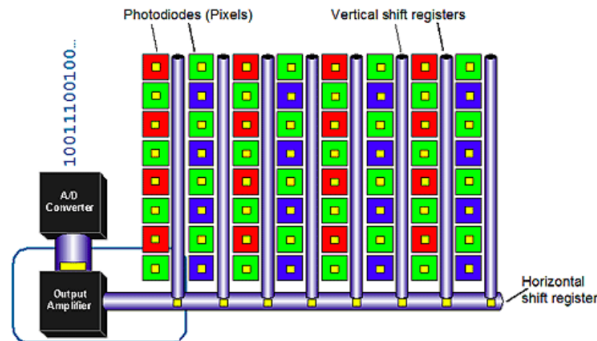


Figura 1: Representació d'un dispositiu CCD amb filtre de Bayer. [10]

Abans però d'obtenir la imatge final s'ha de passar per un procés de correcció: restar a la imatge obtinguda el senyal que produeix espontàniament el xip per l'excitació tèrmica (camp fosc, el *dark*)

ⁱⁱAnalog to Digital Units: converteix el senyal que rep en un número digital.

i dividir per una imatge de camp homogeni (camp pla, el *flat*). Aquest procés permet anivellar les diferències de sensibilitat de les diferents regions del dispositiu i corregir parcialment defectes òptics de la càmera (o les lents utilitzades). Cal tenir en compte que l'excitació tèrmica sol doblar-se cada 6-8°C i en aplicacions astronòmiques és necessari refrigerar els detectors per poder-los utilitzar en temps d'exposició llargs.

4.1.2 Paràmetres. Fórmules i deducció

La profunditat del trànsit, ΔF , és el paràmetre clau en aquest estudi, gràcies al qual podem determinar el radi del planeta conegut el radi de l'estrella. En la Figura 2 s'exemplifica aquest paràmetre, correspon a la variació de flux de l'estrella que observem. Per un disc estel·lar de lluminositat uniforme I_0 , la fracció de flux perdut està relacionada amb l'àrea enfosquida durant el trànsit (és a dir, l'àrea del planeta A_{pl}), tal com indica l'equació 2.

$$F_{enfoscuit} = I_0 A_{pl} = I_0 \pi R_{pl}^2$$

$$F_{estrella} = I_0 A_e = I_0 \pi R_e^2$$

$$\Delta F = \frac{F_{enfoscuit}}{F_{totallestrella}} = \left(\frac{R_{pl}}{R_e} \right)^2 \quad (2)$$

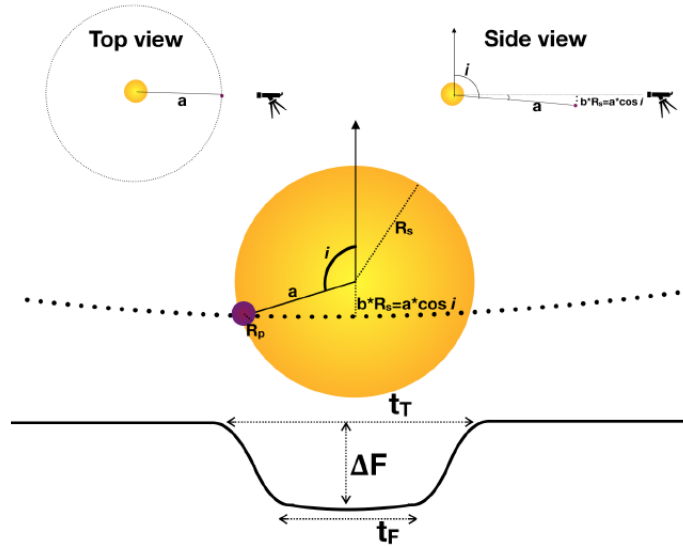


Figura 2: Esquema del trànsit d'un exoplaneta amb les principals quantitats que s'utilitzen per descriure la configuració orbital. La corba inferior representa la corba de lluminositat observada, el dibuix central és el model des del punt de vista de l'observador i altres punts de vista es poden veure en els esquemes superiors [5].

La Figura 2 també ens mostra el temps de trànsit, t_T , que seria des del primer contacte al quart, en canvi, si anem del segon contacte al tercer parlem del temps de "terra" (*floor* en anglès), t_F , que és el temps de mínima lluminositat. La distància mesurada a mig trànsit entre el centre de l'estrella i el del planeta vista per l'observador s'anomena paràmetre d'impacte i es calcula trigonòmicament, $b = a \cos(i)$, on a és el semieix major de l'òrbita del planeta i i la inclinació de l'òrbita. Usualment es divideix pel radi de l'estrella per a normalitzar.

Un altre paràmetre important és el període de l'òrbita del planeta, P . Per a fer aquesta deducció s'assumeix l'òrbita circular per simplificació i tot i l'absència de paràmetres orbitals associats a l'excentricitat aquestes fórmules reproduïen valors molt precisos. Aleshores, a velocitats constants dins la mateixa òrbita circular podem afirmar que:

$$\frac{1}{v} = \frac{t}{x} \Rightarrow \frac{t_T}{arcAB} = \frac{P}{2\pi a} \quad (3)$$

on $arcAB = a2\theta = 2a \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{a}\right)$ (visualitzar-ho en la Figura 3). Si substituïm aquesta darrera expressió en l'equació 3 podem obtenir la fórmula per a la duració del trànsit:

$$t_T = \frac{P2a \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{a}\right)}{2\pi a} = \frac{P}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{a}\right) \quad (4)$$

i com que experimentalment coneixerem aquest valor podrem aïllar el període orbital. Cal esmentar que en el marc pràctic s'aplicarà l'aproximació per angles petits, llavors el sinus es reduirà al seu argument.

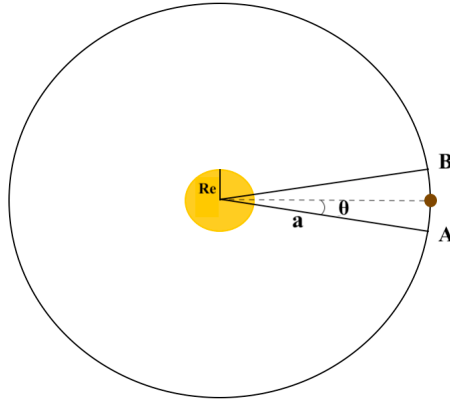


Figura 3: Esquema de l'òrbita d'un exoplaneta amb visió superior. [8]

Finalment, un cop obtingut aquest període, és possible determinar la densitat de l'estrella. El substituïm en la tercera llei de Kepler, aïllem la massa de l'estrella (negligint la massa del planeta per comparació de magnitud) i la col·loquem dins la fórmula de la densitat:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{GM_e}{4\pi^2} \quad i \quad \rho = \frac{3M_e}{4\pi R_e^3} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{3\pi}{GP^2} \left(\frac{a}{R_e}\right)^3$$

4.1.3 Variació de temps de trànsit (VTT)

Tot sovint s'observaven variacions en el temps entre trànsits d'un mateix planeta i es va buscar quina en podia ser la raó. El temps entre trànsits successius d'un planeta "no pertubat" és sempre el mateix, ja que el període orbital és constant, però ja se sap que la presència d'un tercer cos pot produir canvis a curt termini. Al llarg de les seves òrbites, el planeta transitant i el segon planeta intercanvien energia i moment angular com a resultat de la seva interacció gravitatòria mútua. Aquesta interacció, major en el moment de la conjunció, dóna fruit a oscil·lacions de curt termini en els semieixos majors i les excentricitats dels planetes, i conseqüentment, altera el temps entre trànsits. Aquest mètode permet determinar solament a través del trànsit el període orbital del planeta transitant i la massa del segon planeta. En alguns casos, quan dos o més planetes orbiten la mateixa estrella, també es pot determinar la densitat dels planetes.

L'estimació analítica de la VTT es pot trobar integrant l'equació de Lagrange del moviment planetari [3]. Donat un planeta transitant amb semieix major a_1 i període P_1 , i un planeta perturbant amb semieix major a_2 (assumit major que a_1), període P_2 i massa M_2 , trobem que:

$$\Delta t = \frac{45\pi}{16} \frac{M_2}{M_e} P_1 \alpha_e^3 (1 - \sqrt{2}\alpha_e^{\frac{3}{2}})^{-2} \quad (5)$$

on $\alpha_e = \frac{a_1}{a_2(1-e_2)}$ i M_e és la massa de l'estrella orbitada. Per tant, la magnitud de l'efecte és proporcional a la massa del planeta perturbador però és independent de la massa del planeta transitant [9].

Aquest mètode és tant sensible que és capaç de detectar planetes addicionals al sistema amb masses tant petites com la de la Terra. El primer descobriment a través de VTT d'un planeta no transitant el va realitzar el telescopi espacial Kepler de la NASA el 2011. Kepler-19b presentava una variació de 5 minuts indicant la presència d'un segon planeta, el Kepler-19c, amb un període prop d'un múltiple racional del període del planeta transitant.

4.2 Velocitats radials

L'atracció gravitacional mútua entre planetes del sistema i l'estrella central fa que l'estrella també orbiti, encara que sigui poc, i aquests tentineig s'identifica amb un desplaçament Doppler en el seu espectre. A partir de la diferència entre la longitud d'ona de la línia espectral observada, λ , i de la longitud d'ona de la línia espectral en repòs, λ_0 , (mesurades en la mateixa unitat com ara metres o Àngstroms) podem determinar la velocitat radial de l'estrella, que és la component de la velocitat d'un objecte respecte a la visual de l'observador:

$$v_r = \frac{c(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} \quad (6)$$

on c és la velocitat de la llum. Varia de forma sinusoidal amb un pic màxim al primer quart de període, l'anomenem K , i aquest s'empra en la funció de massa binària que ens permet determinar la massa mínima del planeta i el seu període orbital (P_o). La funció de la que parlem és la següent:

$$f = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{P_o K^3}{2\pi G} \quad (7)$$

on M_1 i M_2 són les masses de l'estrella i el planeta respectivament, i és la inclinació de l'òrbita ⁱⁱⁱ i G la constant de gravitació universal. Coneguda la massa de l'estrella, la massa mínima del planeta pot ser calculada assumint $i = 90^\circ$, així doncs, la massa real depèn de la inclinació de l'òrbita, normalment desconeguda.

Els planetes tipus Júpiter ardent ^{iv} són els planetes extrasolars més fàcils de detectar pel mètode de la velocitat radial, ja que les oscil·lacions que indueixen en el moviment de l'estrella mare són relativament grans i ràpides en comparació amb d'altres tipus de planetes.

4.3 Microlents gravitacionals

Quan una estrella en primer pla passa per la nostra línia de visió, el seu camp gravitatori perturba els rajos de llum que arriben d'una estrella emissora més llunyana (també dins la línia de visió) creant múltiples imatges i en resulta una ampliació variable de temps de la font: això és l'event de microlent. L'estrella més propera actua doncs com una lent gravitacional ja que modifica el camí de la llum per mitjà de la seva força gravitatòria, com afirmava Einstein en la seva teoria de la Relativitat General. Si té algun planeta orbitant que passa prop del camí d'aquestes imatges generades, hi hauran, a més, perturbacions en el flux de la font, gràcies al qual ens permetrà detectar el planeta.

Els paràmetres que es poden determinar directament són la relació entre la massa del planeta i la de l'estrella i la relació entre la separació angular estrella-planeta i l'angle d'Einstein (tamany/obertura de l'anell lluminós que es produeix per microlent gravitacional al voltant de l'estrella lent). Llavors ja a partir d'aquests càlculs es pot estimar la massa del planeta i la distància orbital. Un gran desavantatge és que el fenomen no es pot repetir degut a les probabilitats que els cossos estiguin alineats altre cop.

4.4 Imatge directa

La imatge directa no és pròpiament una tècnica de detecció però ens permet obtenir l'espectre del planeta exosolar utilitzant un espectròmetre convencional, i a partir d'aquest, extreure informació sobre la composició, núvols, estructura tèrmica i variabilitat [6]. Les primeres imatges van ser publicades l'any 2008, 13 anys després del seu descobriment. En la Figura 4 podem veure una imatge directa en infraroig on s'han eliminat les fonts de llum externes als dos cossos d'interès, es tracta del sistema planetari 2M1207 i va ser presa per un dels telescopis de la ESO ^v.

ⁱⁱⁱLa inclinació de la òrbita l'entendem com l'angle entre l'òrbita del planeta i el pla perpendicular de la línia de visió Terra-objecte.

^{iv}Els Júpiter ardents són una classe d'exoplanetes amb massa similar o major a la de Júpiter i orbiten molt a prop de la seva estrella (aproximadament unes vuit vegades més a prop que Mercuri del Sol).

^vObservatori Europeu del Sud: és una organització astronòmica internacional formada per 10 estats de la Unió Europea més Suïssa, Xile n'és estat convidat ja que allotja la majoria dels seus instruments. Compta amb alguns dels telescopis més grans i més avançats del món.

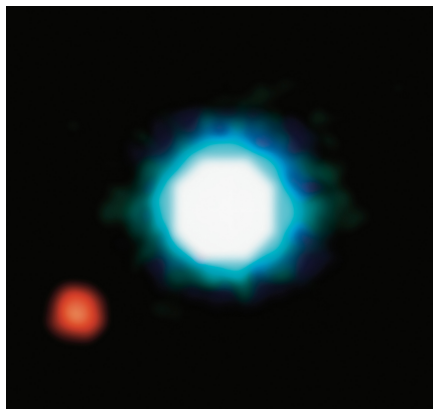


Figura 4: Imatge directa de l'estrella 2M1207 (en blau) i el planeta 2M1207b (en vermell) fotografada des del telescopi òptic *Yepun* del *Very Large Telescope* de la ESO a Xile. [7]

Els planetes són fonts de llum extremadament febles en comparació amb les estrelles i la poca llum que en prové tendeix a perdre's en l'esplendor de l'estrella. Existeixen uns instruments que s'acoblen als telescopis per bloquejar la llum de l'estrella deixant visible la del planeta, són els coronògrafs. A més a més, aquells que orbiten prou lluny de la seva hoste no reflecteixen prou llum de l'estrella per veure'ls i llavors es detecten gràcies a l'emissió tèrmica. Per a prendre imatges de planetes tipus Terra és necessària una estabilitat optotèrmica extrema, és a dir, que la deformació de la radiació electromagnètica a causa d'un canvi tèrmic sigui molt lleu.

4.5 Altres mètodes

Els sistemes de detecció no s'acaben aquí; a continuació s'anomenen la resta que són presents al catàleg oficial de la NASA [11] amb els quals almenys hi ha hagut el descobriment d'un planeta exosolar, en aquest document però no hi entrarem en detall: astrometria, pertorbacions en discs de pols circumestel·lars, variacions en el temps d'una binària eclipsant, modulació de la lluminositat de l'estrella per fases de l'òrbita del planeta i variacions en el temps de púlsar.

5 Marc pràctic

El que es descriu en aquest punt és la realització de la part pràctica del treball i es desenvolupa en format d'informe de pràctica de laboratori.

5.1 I Estudi del trànsit del planeta TrES-3b

5.1.1 Introducció i objectius

Per aquesta pràctica s'han utilitzat unes imatges astronòmiques no realitzades per mi mateixa, van ser preses el 25/08/2016 des de Can Roig (veure 5.1.2) i se m'han cedit per a treballar. A la següent pràctica sí que s'empren unes imatges pròpies.

TrES-3b està ubicat aproximadament a 1300 anys llum de la Terra i orbita l'estrella GSC 03089-00929 a la constel·lació d'Hèrcules, prop de 10 graus a l'oest de l'estrella Vega (l'estrella més brillant en el cel d'estiu). Té gairebé el doble de massa que Júpiter i està experimentant decaïment orbital per efectes de marea. Va ser descobert l'any 2007 pel projecte Trans-Atlantic Exoplanet Survey (TrES ^{vi}).

L'estrella hoste és una mica més petita ($0,826R_S$) i més freda que el Sol. És una estrella de magnitud aparent 12, tipus espectral G dins la seqüència principal i està identificada com una estrella variable. Pel moment no s'ha detectat la presència de cap altre planeta en el sistema.

Pel que fa a la introducció teòrica, es correspon al marc teòric del treball explicat prèviament, més concretament l'apartat 4.1 on es detalla el mètode emprat.

L'objectiu de la pràctica és determinar la corba de llum de l'estrella GSC 03089-00929 durant el trànsit de TrES-3b a través d'una successió d'imatges astronòmiques. Un cop obtinguda la corba es procedeix a extreure'n la informació necessària per calcular el radi del planeta i el seu període orbital.

5.1.2 Instal·lació i material

La realització de la pràctica s'ha dut a terme gràcies a les instal·lacions del Centre Cultural Can Roig de Llagostera (comarca del Gironès). L'entitat encarregada de l'observatori és l'Agrupació Astronòmica de Girona, Astrogirona, i compta amb dos observatoris astronòmics preparats amb instrumental de precisió per tal de portar a terme activitats de difusió i de recerca científica.

El material que es va utilitzar per a la presa d'imatges és el següent:

- Telescopi Takahashi Mewlon 200mm d'obertura, muntura equatorial Gemini G42 i càmera CCD QHY9.
- Cúpula Sirius de 3,5m de diàmetre.
- Filtre IDAS que minimitza els efectes de contaminació lumínica.
- Telescopi d'autoguiat Lunático EZG amb càmera CCD QHY5.

^{vi}Projecte per localitzar exoplanetes creat per David Charbonneau del Centre d'Astrofísica Harvard-Smithsonian, Timothy Brown del Centre Nacional de Recerca Atmosfèrica, i Edward Dunham de l'Observatori Lowell.

- Software de control del telescopi: THE SKY6.
- Programa per prendre les imatges: Maxim DL

Pel posterior anàlisi de les imatges s'ha utilitzat: Muniwin C-MuniPack, és un paquet de programari que ofereix la solució completa per a la reducció d'imatges realitzades per càmera CCD, destinada a una observació d'estrelles variables; programa FitsLiberator, permet obrir les fotos astronòmiques ja que estan en format .fits i editar-les; la web del projecte TRESKA (Transiting Exoplanets and Candidates [4]) de la Societat Astronòmica Txeca on després de reduir les imatges amb en Muniwin et permet obtenir la corba de llum i paràmetres.

5.1.3 Metodologia i anàlisi de dades

El primer que cal fer és obtenir les imatges del trànsit, és a dir, fotografies del cel amb l'estrella GSC 03089-00929 més o menys centrada. Cal introduir les coordenades galàctiques de l'estrella a l'ordinador que guia el telescopi i llavors ja segueix l'estrella amb el sistema d'autoguiat. Es fa una primera imatge amb un temps d'exposició d'entre 30 i 50 segons i es compara amb una de referència ^{vii} per corregir la direcció. L'interval entre imatges és de 2 minuts amb exposició d'entre 30 i 60 segons.

Prèviament s'ha d'haver consultat a una base de dades per a conèixer quan es podrà observar el trànsit d'interès des de les coordenades terrestres en les que ens trobem. S'ha utilitzat la base de dades de la mateixa web del TRESKA [4].

Un cop tenim les imatges en format .fits procedim a analitzar-les amb el Muniwin. Cal seleccionar l'opció d'obtenció de corba de llum d'entre totes les opcions que presenta, llavors crear un nou projecte i importar les imatges del trànsit.

1. Comencem amb el pas *Reduce - Express reduction* el qual ens transforma les imatges en escala de grisos mitjançant una calibració lluminositat-nivell de gris.
2. Seguim amb *Reduce - Photometry* on s'estudia la brillantor de les estrelles presents a les imatges i es descarta les imatges amb una mala qualitat global.
3. Ara seleccionem el comandament *Reduce - Match Stars* i ens apareixen totes les imatges, hi hem de fer un cop d'ull i seleccionar-ne una que serveix com a referència per fer l'estudi, normalment són totes molt iguals però a vegades n'hi ha alguna amb petites imperfeccions i és important no seleccionar-ne una d'aquestes.
4. Fins aquí hem estat preparant les imatges, a continuació ens disposem a obtenir la corba de llum però per això primer hem de dir-li al programa quina és l'estrella d'interès (*Variable*), identificar una que no sigui variable (*Comparsion*) i dos de lluminositat semblant a ull nu per utilitzar com a referència lluminosa (*Check*). A la Figura 5 es marquen respectivament en vermell, verd i blau. Aquesta selecció es du a terme amb el comandament *Light Curve* que et proporciona la imatge de referència que haves triat i un cop les has seleccionat en treu la corba.

^{vii}Obtinguda de la web del TRESKA ja que estudiarem exoplanetes ja descoberts.

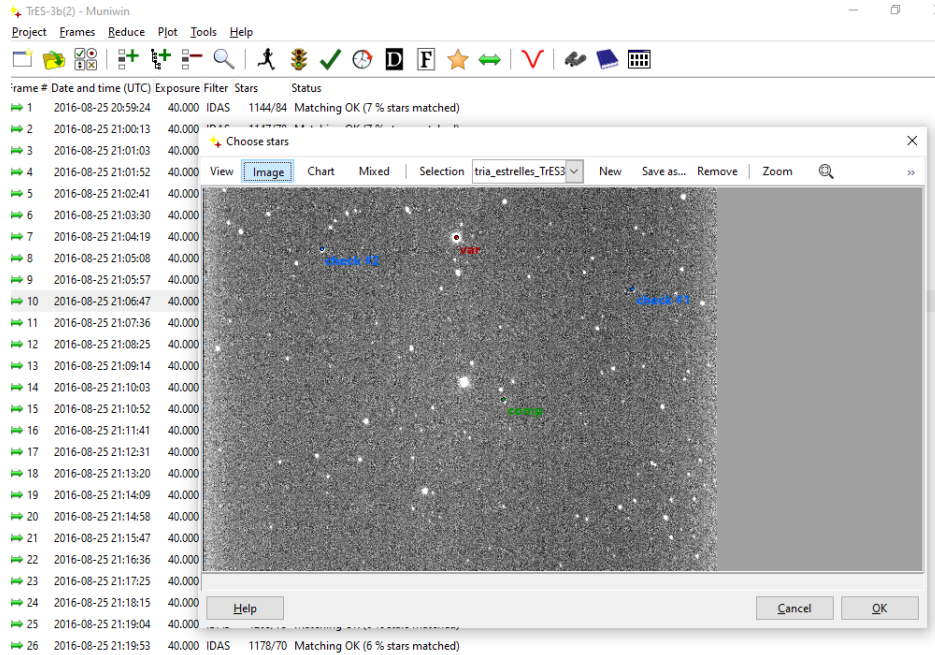


Figura 5: Visió del programa Muniwin amb la selecció d'estrelles variable, comparació i control.

L'eix de les abscisses representa el temps i el de les ordenades el flux estel·lar, cada punt del gràfic correspon a una imatge amb el seu marge d'error. El gràfic et permet modificar l'obertura i l'eix de les ordenades per trobar les posicions que millor s'ajusten a la corba esperada, un cop acabat procedim a desar el fitxer en format text per a poder continuar (també es pot guardar en .jpg o .jpeg i ja volguessim finalitzar amb aquest gràfic).

El següent pas és obtenir la corba de llum, no amb el Muniwin, sinó des de la web del TRESCA ja que té la capacitat de processar les dades astromètricament i, a part de mostrar-nos la corba, calcula la profunditat del trànsit.

Ens col·loquem a l'apartat *Model-fit your data* i ens dona l'opció de pujar un fitxer. Abans de tirar endavant hem de decidir si volem format geocèntric o heliocèntric i si la columna de brillantor la volem en magnitud o flux. Utilitzem el mode preseleccionat que correspon a geocèntric i magnitud. Un cop passada aquesta pàgina ens permet definir 3 paràmetres pel procediment d'ajust: el dia Julià Heliocèntric del trànsit, la duració i el radi del planeta. Hi ha la possibilitat d'ajustar els paràmetres a OFF cosa que ens donarà la corba de llum teòrica en comparació amb la de les nostres dades reals. És exactament el que fem i seguidament cliquem a *compute*.

5.1.4 Resultats

La Figura 6 és el gràfic final obtingut de l'ajust de les dades del trànsit de TrES-3b davant de GSC 03089-00929. L'eix de les X representa el temps en dies i l'eix de les Y representa la magnitud de l'estrella, és a dir, mostra la corba de llum. De fet, podem observar dues corbes en aquest mateix gràfic: a dalt, en blau, correspon a les nostres dades reals i a baix, en gris, s'ha aplicat una correcció

de la tendència. Cada punt del gràfic correspon a una imatge amb el seu marge d'error i veiem com ens marca el primer, el cinquè i el quart contacte (inici, meitat i final del trànsit).

Es fa palès un inici d'aproximadament 7 min i un final de 15 min on la magnitud és estable, això és degut a què es va programar l'ordinador perquè comencés a registrar imatges quan encara el planeta no passava per davant l'estrella i que registrés imatges després que hagués passat per davant. És simplement per poder determinar exactament quan comença i acaba el trànsit i que sigui més visual.

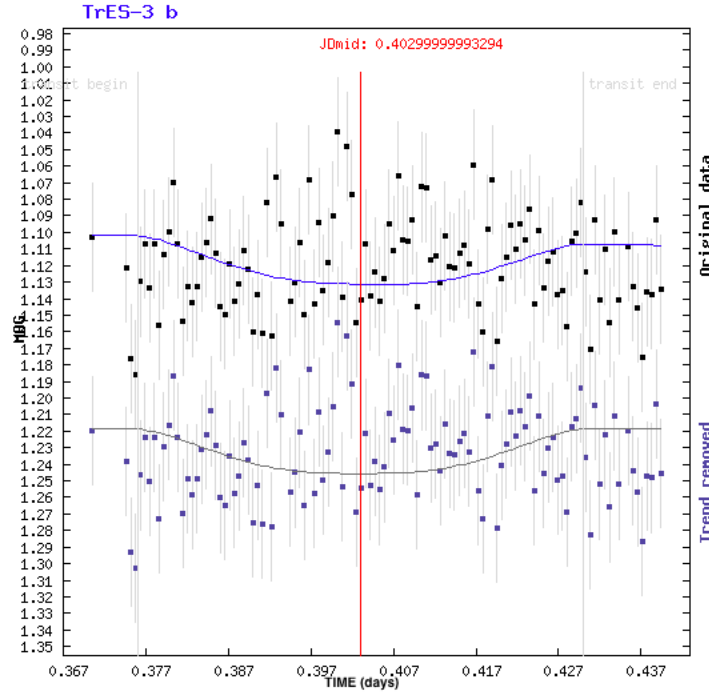


Figura 6: Corba de llum dels trànsit de TrES-3b. A dalt: dades experimentals; a baix: correcció sense el senyal de fons.

Els paràmetres que ens proporciona el web són: duració del trànsit $t_T = (77,8 \pm 0,3)$ minuts i profunditat $\Delta F = (0,0268 \pm 0,0004)$ magnituds. A partir d'aquests i amb les fórmules deduïdes a l'apartat 4.1.2 podem calcular el radi planetari, R_{pl} i el període orbital, P , de TrES-3b. Abans però, hem de consultar a la base de dades de la NASA [11] el semieix major de l'òrbita, a , i el radi de l'estrella, R_e . El resum de tots aquests paràmetres el trobem a la Taula 1, amb els càlculs ja realitzats.

$t_T(min)$	$\Delta F (mag)$	$a (UA)$	$R_e(R_{\odot})$	$R_{pl} (R_J)$	$P (dies)$
$77,8 \pm 0,3$	$0,0268 \pm 0,0004$	$0,0228 \pm 0,0003$	$0,829 \pm 0,022$	$1,35 \pm 0,003$	$1,0 \pm 0,3$

Taula 1: Duració del trànsit de TrES-3b, profunditat del trànsit, semieix major de l'òrbita del planeta, radi estel·lar, radi planetari i període orbital planetari. $R_{\odot}$ correspon al radi solar i R_J al radi de Júpiter.

Les fórmules de les incerteses combinades es poden consultar a l'aparat d'annexos.

No podem acabar sense comprovar la validesa del resultats i ho farem buscant el percentatge d'error entre els nostres resultats i els determinats per la NASA.

El radi de TrES-3b teòric està calculat a $(1,336 \pm 0,003) R_J$, per tant:

$$error R_{pl} = \frac{|1,34 - 1,35|}{1,34} \times 100 = 0,74\% \quad (8)$$

I el període orbital teòric és $(1,30618648 \pm 0,00000007)$ dies, per tant:

$$error P = \frac{|1,31 - 1,00|}{1,31} \times 100 = 23,66\% \quad (9)$$

5.1.5 Conclusió

Pel que fa a la corba de llum, s'ha obtingut el resultat esperat: una lluminositat constant fins al moment del trànsit en què pateix una lenta disminució fins a un mínim i llavors augmenta simètricament fins al valor constant d'inici i s'hi manté.

En el cas del radi del planeta els resultats s'han ajustat molt al valor teòric, tan sols divergeixen d'un 0,74%, però pel període orbital la diferència és de 23,66%, cosa que podríem considerar no acceptable, però si ens fixem amb les incerteses sí que estem dins el marge.

La font d'error més evident rau en la diferència dels instruments utilitzats per a nosaltres o pels que van realitzar les mesures per la NASA, amb els qui ens estem comparant. La nostra precisió és menor i això fa variar els paràmetres obtinguts experimentalment que s'utilitzen pels càlculs d'altres paràmetres, d'aquesta manera l'error s'acumula. Una d'aquestes diferències és per exemple la sensibilitat de la càmera CCD o el nivell d'anàlisi del software.

La profunditat del trànsit experimental (0,0268 mag) divergeix de la teòrica (0,0291 mag) en un 7,9%. El mateix passa amb el temps del trànsit però en aquest cas és pràcticament negligible, parlem d'un 0,51% solament.

Una altra possible font d'error és el temps exposició decidit, potser es podria haver perllongat una mica i la definició de les imatges hagués millorat. Un punt a tenir en compte però que tampoc es pot controlar massa són les condicions de l'atmosfera, tant pel que fa a contaminació (lumínica i no lumínica) com a la meteorologia.

És important recordar també que s'ha dut a terme l'aproximació a òrbita circular abstenint-nos de paràmetres associats a l'excentricitat i que es considera tant l'estrella com el planeta esfèricament perfectes. Com veiem, ens segueixen portant a resultats veraçs però no exactes.

5.2 II Estudi del trànsit de TrES-1b

5.2.1 Introducció i objectius

TrES-1b és un planeta extrasolar situat a la constel·lació de Lira, a uns 500 anys llum de la Terra, orbitant l'estrella GSC 02652-01324 (nana taronja de seqüència principal). Té una massa propera a la de Júpiter però orbita molt més a prop de l'estrella del que ho fa Júpiter del Sol, per tant, es considera un Júpiter Ardent. Va ser descobert l'agost de 2004 pel projecte TrES i confirmat per l'observatori Keck usant velocitats radials.

El trànsit que estudiarem a continuació va ser observat el 29/05/2020 des de l'Observatori Astronòmic Albanyà entre les 00:18 i les 2:47 hora local (UTC+2^{viii}).

Els objectius són: determinar la corba de llum de GSC 02652-01324, calcular el radi del planeta i el període orbital i saber si ens allunyem o no de les dades teòriques.

5.2.2 Instal·lació i material

El centre disposa d'un equipament d'última generació dedicat a la divulgació científica i a la investigació professional, compta amb el telescopi més gran de la província de Girona.

Detall del material emprat:

- Telescopi catadiòptic Meade ACF de 16 polzades (406 mm), amb una focal F8.
- Muntura equatorial 10Micron GM3000 HPS.
- Càmera CCD monocromàtica Moravian G4-9000, amb xip KAF-9000.
- Roda porta filtres de 7 posicions. Utilitzat el filtre fotomètric infraroig de Collins (Ic).

FotoDif ha estat el programa d'anàlisi, és basat en la fotometria diferencial i fa el mateix que Muniwin però amb menys passos. Igualment s'ha necessitat el FitsLiberator i posteriorment la web del TRESA.

5.2.3 Metodologia i anàlisi

Primer de tot s'han de registrar unes imatges de *flat* per corregir efectes no uniformes creats per errors dels òptics, pols o taques que hi pugui haver a les lents i/o miralls. Imatges *dark* per a la correcció del senyal de fons tèrmic de la CCD i imatges *bias* per eliminar la senyal de lectura que es genera cada cop que intervé el circuit electrònic que escombra el xip.

S'introdueixen les coordenades de l'estrella objectiu, l'interval entre imatges desitjat (2 minuts) i el temps d'exposició (120 segons). La càmera de seguiment realitza imatges cada 4 segons. Es programa perquè comenci a registrar minuts abans i minuts després del trànsit.

Un cop obtingudes les imatges astronòmiques en format .fits es pot procedir a analitzar-les. Es carreguen al FotoDif i demana les coordenades galàctiques de l'estrella i les coordenades terrestres de

^{viii}Temps Universal Coordinat. Estàndard de temps amb el qual es regulen els rellotges i el temps del món.

l'observatori, també s'estableixen 3 radis a la configuració de fotometria que serviran per al càlcul: el primer és per llegir la llum de les estrelles, el segon fa de separador i el tercer per calcular la brillantor de fons.

Com en el Muniwin, s'ha de fer una selecció d'estrelles per a què pugui comparar les magnituds a l'hora de fer la fotometria (ja que treballa amb fotometria relativa). S'identifica la variable d'interès i entre 6-8 estrelles de calibratge. Aquest pas és a prova i error, no existeix cap base de dades on trobar les estrelles òptimes i per això se'n fa unes quantes seleccions i es tria la que millor resultat dóna (es determina amb la corba de llum posterior). Un paràmetre que ajuda però, és el número "MAX"; diu per a cada estrella seleccionada el valor del píxel amb màxim input. El mínim que ha de tenir és 8.000 i el màxim 60.000 ja que llavors perd la linealitat (i es satura per sobre de 65.000), per tant, s'han d'evitar estrelles fora d'aquest rang.

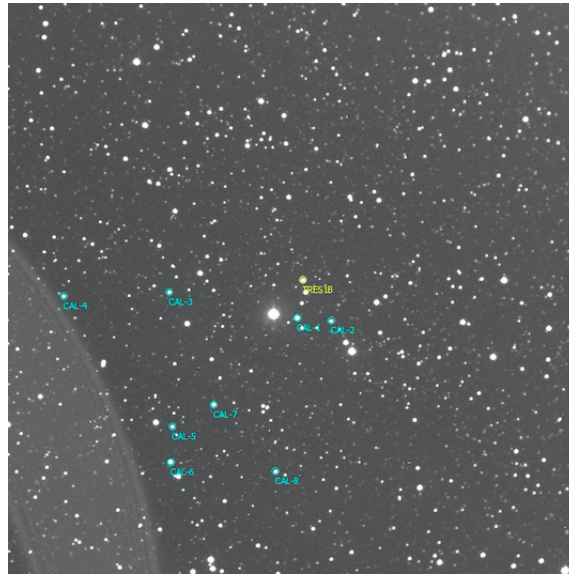


Figura 7: Visió de la imatge de treball del programa FotoDif amb la selecció de l'estrella variable d'interès i 8 de calibració.

Veiem l'estrella que orbita TrES-1b marcada en groc en la Figura 7 i les de calibratge en blau. Aquesta és una imatge sense cap correcció (no *flat*, ni *bias* ni *dark*).

Només falta clicar a *Process* i ja treballa tot sol. Tarda uns minuts i quan acaba es pot veure la corba de llum i les dades en format text, el darrer és el que s'utilitza per carregar-ho a TRESCA (es pot consultar en els annexos). A partir d'aquí el procés és ídem a la pràctica anterior.

5.2.4 Resultats

La corba de llum de l'estrella GSC 02652-01324 es pot veure en la Figura 8. El trànsit de TrES-1b té una duració de $t_T = (153,3 \pm 1,4)$ minuts i una profunditat de $\Delta F = (0,0254 \pm 0,0005)$ magnituds. L'inici constant és d'aproximadament 36 min i el final de 57 min.

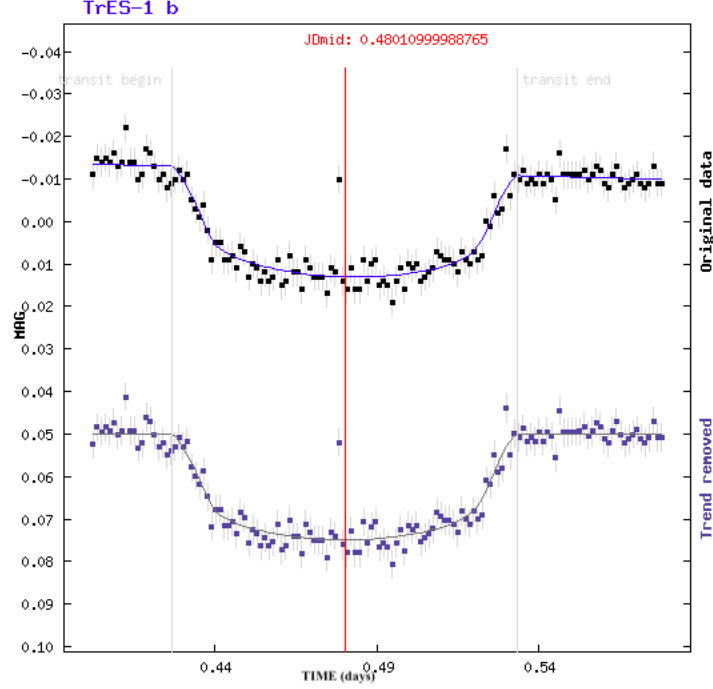


Figura 8: Corba de llum dels trànsit de TrES-1b del dia 29/05/2020 entre les 00:18 i les 2:47 hora local (UTC+2).

Observem un punt aïllat just al mig del trànsit que s'allunya molt de l'ajust. És un augment sobtat de lluminositat i pot ser degut al pas d'un raig còsmic just per la línia de visió entre nosaltres i l'estrella. Els raigs còsmics són partícules subatòmiques provinents de l'espai exterior amb una elevadíssima velocitat que fa que tinguin molta energia, d'aquesta manera poden ser detectades per la CCD.

Amb els paràmetres necessaris ja cercats i realitzats els càlculs pertinents, la Taula 2 mostra els resultats del radi del planeta i del període orbital.

$t_T(min)$	$\Delta F (mag)$	$a (UA)$	$R_e(R_{\odot})$	$R_{pl} (R_J)$	$P(dies)$
$153,3 \pm 1,4$	$0,0254 \pm 0,0005$	$0,0393 \pm 0,0005$	$0,82 \pm 0,02$	$1,300 \pm 0,002$	$3,4 \pm 0,4$

Taula 2: Duració del trànsit de TrES-1b, profunditat del trànsit, semieix major de l'òrbita del planeta, radi estel·lar, radi planetari i període orbital planetari.

Calculem els percentatges d'error respecte les dades teòriques de la NASA. El radi de TrES-1b teòric està calculat a $(1,07 \pm 0,02) R_J$, per tant:

$$error R_{pl} = \frac{|1,07 - 1,30|}{1,07} \times 100 = 21,49\% \quad (10)$$

I el període orbital teòric és $(3.0300697 \pm 0.0000001)$ dies, per tant:

$$errorP = \frac{|3,03 - 3,44|}{3,03} \times 100 = 13,53\% \quad (11)$$

5.2.5 Conclusió

La corba de llum compleix les expectatives perfectament i de fet està molt més definida que a la pràctica anterior. El filtre fotomètric que s'utilitza pot afectar la profunditat del trànsit i la seva forma; el filtre infraroig marca una corba més quadrada, en canvi, un filtre ultraviolat defineix una corba més suau.

L'error en el càlcul del radi del planeta és bastant gran, un 21,49%, i en cap cas entrem dins els marges d'incertesa. Pel període orbital l'error és del 13,53% però sí que entrem dins els marges d'incertesa.

La profunditat del trànsit experimental (0,0254mag) divergeix de la teòrica (0,0208mag) en un 28,84%, per tant, tenint dades experimentals lluny de les teòriques és impossible acostar-nos bé en els càlculs posteriors. El temps de trànsit divergeix tan sols d'un 2,33%.

Ens tornem a trobar amb les mateixes fonts d'error ja explicades però en aquest cas, el TrES-1b comptava amb una elevació angular molt propera al zenit, pel que la massa d'aire a travessar és menor que per a baixes elevacions. Això fa que la dispersió sigui menor i s'obtingui més precisió fotomètrica. Malauradament no s'ha apreciat en els resultats.

La web de TRESCA ens permet comparar les nostres dades amb d'altres de publicades i la Figura 9 n'és un exemple. Mostra el nostre resultat (en blau) vers les diverses publicacions pel que fa a la profunditat de trànsit. No ens allunyem de la mitjana pel que podem estar satisfets amb els nostres resultats. Les abscisses representen l'època de publicació i les ordenades la profunditat en mil·limagnituds.

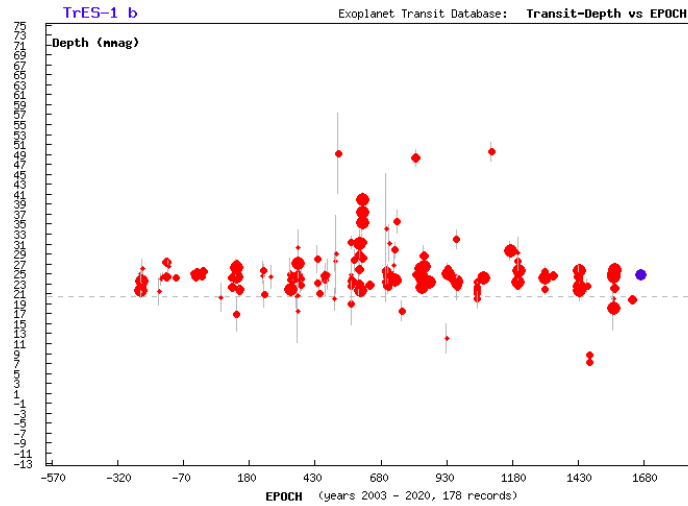


Figura 9: Comparació dels resultats obtinguts per publicacions al TRESCA (en vermell) amb els resultats propis (en blau) respecte la profunditat de trànsit.

6 Conclusions

Planetes errants, nòmades, perduts... fins que es troba el nexce: una estrella mare. Cossos celestes, com la Terra o Júpiter, que orbiten estrelles, com el Sol. Des d'un inici, la troballa d'exoplanetes ja induïa una diversitat interessant en aquest nou camp. Es van descobrir primer orbitant púlsars i dos anys més tard en estrelles de seqüència principal. Hores d'ara se'n coneixen a sistemes estel·lars múltiples i fins i tot es teoritzen a forats negres i a la possibilitat de tenir exollunes.

La manera de detectar-los no és única. El mètode de velocitats radials estudia el desplaçament Doppler de l'estrella provocat per l'acció gravitacional del planeta. Les microlents gravitacionals, on una estrella situada entre l'observador i l'estrella hoste pertorba els rajos de la darrera creant múltiples imatges i el planeta pertorba el flux resultant de l'estrella. També és possible l'observació directa però s'han de tenir unes condicions determinades, per tant, no és viable per tots. Existeixen altres mètodes i, de fet, el més reconegut junt amb velocitats radials és el de trànsits. Quan un planeta passa per la línia de visió entre l'estrella i l'observador apreciem una disminució de la lluminositat estel·lar, i segons la profunditat és possible calcular el radi del planeta.

En aquesta tesi s'han analitzat els trànsits dels planetes TrES-3b i TrES-1b. Gràcies a les corbes de llum de les seves estrelles orbitades s'ha apreciat unes profunditats de trànsit de $(0,0268 \pm 0,0004)\text{mag}$ i $(0,0254 \pm 0,0005)\text{mag}$ respectivament i unes duracions de $(77,8 \pm 0,3)\text{min}$ i $(153,3 \pm 1,4)\text{min}$. Amb aquests paràmetres i els càlculs pertinents, s'ha obtingut un valor de radi planetari de $(0,136 \pm 0,004)R_{\odot}$ pel TrES-3b i $(0,131 \pm 0,003)R_{\odot}$ pel TrES-1b i un període orbital de $(1,0 \pm 0,3)\text{dies}$ i $(3,4 \pm 0,4)\text{dies}$.

Un fet que em va sorprendre tot just començar el treball va ser adonar-me que hi ha una tipologia enorme de cossos celestes. Tots són diferents, alguns divergeixen molt i d'altres només presenten un petit canvi però és una tasca molt difícil pels astrònoms classificar-los, constantment generen nous subgrups. M'és impossible no relacionar-ho amb nosaltres, els éssers humans, ens estem intentant desprendre de les etiquetes, de la catalogalització, perquè tothom se sent diferent i és diferent. Resulta que no som els únics amb aquesta característica.

Puc afirmar que, efectivament, després del pas per aquesta experiència acadèmica, sóc capaç de desxifrar una mica més d'aquest gran enigma que és el nostre cel. Ara, quan miro el cel nocturn d'estiu, busco Lira, i sé que allà hi ha un planeta orbitant. Me'l puc imaginar, passant per davant d'aquell astre tan brillant al qual està lligat, com si Orfeu encara tingués el seu instrument i l'hagués hipnotitzat.

Referències

- [1] IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU Resolution votes — Press Releases — IAU, 2006.
- [2] Butler R. P. Hubbard W. B. Ianna P. A. Kürster M. Lissauer J. J. Boss, A. P. Working Group on Extrasolar Planets. *IAU Transactions*, Vol. 26A:183–186, 2007.
- [3] Carl D. Murray and Stanley F: Dermott. SOLAR SYSTEM DYNAMICS. Technical report, Cambridge University Press, 1999.
- [4] Czech Astronomical Society. ETD - Exoplanet Transit Database.
- [5] Hans J Deeg and Roi Alonso. Transit Photometry as an Exoplanet Discovery Method. Technical report, 2018.
- [6] Edited by S. Seager; with the assistance of Renee Dotson with 34 collaborating authors. *Exoplanets*. University of Arizona Press, 2010.
- [7] ESO. 2M1207b - First Image of an Exoplanet. Technical report, 2010.
- [8] G. Garriga Rovira. Òrbita exoplaneta [Imatge]. 2020.
- [9] Matthew J Holman and Norman W Murray. The Use of Transit Timing to Detect Extrasolar Planets with Masses as Small as Earth. Technical report, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics and Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, 2005.
- [10] Diego. Liarte. Xataka Foto. Sensor CCD, 2009.
- [11] NASA. Exoplanet Catalog – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System.
- [12] Keiichi Wada, Yusuke Tsukamoto, and Eiichiro Kokubo. Planet Formation around Super Massive Black Holes in the Active Galactic Nuclei. 9 2019.

A Càlcul del radi estel·lar

Una estrella pot ser considerada un cos negre, per tant, segueix la llei d'Stefan-Boltzmann. La considerem esfèrica amb superfície $4\pi R^2$, on R és el radi. T és la temperatura, que ve donada pel color de la llum amb la que irradia i es mesura a través del seu espectre. Llavors:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (12)$$

on L és la lluminositat que es deriva de la magnitud absoluta, la qual és una mesura de la seva brillantor corregida per distància (es defineix amb com de brillant seria si fos a 10 pàrsecs de la Terra). Per determinar la magnitud absoluta és doncs necessari saber a quina distància es troba l'estrella i això es determina per diferents mètodes com són el paral·laxi i la comparació amb estrelles variables. D'aquí només cal determinar els paràmetres L i T experimentalment i aïllar el radi.

B Fórmules d'incertesa

Pel radi del planeta:

$$u_{R_{pl}} = \sqrt{\Delta F u_{R_e}^2 + \frac{R_e^2}{4\Delta F} u_{\Delta F}^2} \quad (13)$$

Pel període orbital del planeta:

$$u_P = \sqrt{\left(\frac{\pi t_T u_a}{R_e}\right)^2 + \left(\frac{\pi t_T a u_{R_e}}{R_e^2}\right)^2 + \left(\frac{\pi a u_{t_T}}{R_e}\right)^2} \quad (14)$$

C Dades del trànsit de TrES-1b

Dia Julià Heliocèntric	Magnitud	$\pm$	RSR	AIRMS	TRANS	FWHM	FONDO	N	NUM
2458998.40238	-0.011	0.007	166	1.715	0.93	5.84	-0.44	01	0001
2458998.40365	-0.015	0.006	167	1.702	0.93	5.82	-0.42	01	0002
2458998.40492	-0.014	0.006	167	1.689	0.93	6.20	-0.41	01	0003
2458998.40620	-0.015	0.006	167	1.676	0.94	6.08	-0.41	01	0004
2458998.40746	-0.014	0.006	168	1.664	0.94	6.03	-0.39	01	0005
2458998.40871	-0.016	0.006	168	1.652	0.94	5.95	-0.38	01	0006
2458998.40999	-0.013	0.006	169	1.640	0.95	5.68	-0.36	01	0007
2458998.41124	-0.014	0.006	168	1.628	0.95	6.32	-0.37	01	0008
2458998.41250	-0.022	0.006	170	1.617	0.96	5.78	-0.34	01	0009
2458998.41378	-0.014	0.006	170	1.605	0.97	5.64	-0.33	01	0010
2458998.41505	-0.014	0.006	170	1.594	0.97	5.77	-0.32	01	0011
2458998.41631	-0.010	0.006	169	1.583	0.96	6.54	-0.33	01	0012
2458998.41757	-0.011	0.006	169	1.572	0.96	6.56	-0.32	01	0013
2458998.41885	-0.017	0.006	170	1.561	0.97	5.98	-0.31	01	0014
2458998.42010	-0.016	0.006	171	1.551	0.98	5.65	-0.30	01	0015
2458998.42136	-0.013	0.006	171	1.541	0.98	5.52	-0.30	01	0016
2458998.42263	-0.010	0.006	170	1.531	0.98	6.14	-0.29	01	0017
2458998.42390	-0.011	0.006	171	1.521	0.98	5.78	-0.28	01	0018
2458998.42515	-0.008	0.006	171	1.511	0.98	5.49	-0.27	01	0019
2458998.42642	-0.009	0.006	171	1.501	0.99	5.62	-0.26	01	0020
2458998.42768	-0.010	0.006	170	1.492	0.97	6.77	-0.28	01	0021
2458998.42895	-0.012	0.006	171	1.483	0.98	5.97	-0.26	01	0022
2458998.43021	-0.010	0.006	171	1.473	0.98	6.08	-0.25	01	0023
2458998.43147	-0.011	0.006	171	1.464	0.98	6.15	-0.23	01	0024
2458998.43275	-0.005	0.006	170	1.456	0.98	6.44	-0.24	01	0025
2458998.43400	-0.003	0.006	170	1.447	0.98	6.23	-0.23	01	0026
2458998.43526	-0.001	0.006	170	1.438	0.98	6.03	-0.22	01	0027
2458998.43652	-0.004	0.006	171	1.430	0.99	5.78	-0.20	01	0028
2458998.43779	0.002	0.006	170	1.422	0.99	6.05	-0.20	01	0029
2458998.43905	0.009	0.006	169	1.414	0.98	6.12	-0.20	01	0030
2458998.44032	0.005	0.006	170	1.406	0.99	6.03	-0.19	01	0031
2458998.44159	0.005	0.006	169	1.398	0.97	6.57	-0.20	01	0032
2458998.44286	0.009	0.006	169	1.390	0.98	6.50	-0.19	01	0033
2458998.44411	0.009	0.006	168	1.382	0.97	6.76	-0.19	01	0034
2458998.44537	0.008	0.006	169	1.375	0.98	6.54	-0.19	01	0035
2458998.44666	0.011	0.006	168	1.367	0.97	6.87	-0.18	01	0036

Dia Julià Heliocèntric	Magnitud	$\pm$	RSR	AIRMS	TRANS	FWHM	FONDO	N	NUM
2458998.44792	0.006	0.006	169	1.360	0.97	6.83	-0.17	01	0037
2458998.44917	0.007	0.006	169	1.353	0.98	6.71	-0.16	01	0038
2458998.45044	0.013	0.006	170	1.346	0.99	6.31	-0.14	01	0039
2458998.45170	0.010	0.006	170	1.339	0.99	6.34	-0.15	01	0040
2458998.45297	0.011	0.006	169	1.332	0.98	6.68	-0.15	01	0041
2458998.45423	0.014	0.006	169	1.325	0.98	6.86	-0.14	01	0042
2458998.45550	0.012	0.006	170	1.319	1.00	5.96	-0.13	01	0043
2458998.45675	0.014	0.006	170	1.312	0.99	6.22	-0.13	01	0044
2458998.45802	0.013	0.006	170	1.306	0.99	6.31	-0.13	01	0045
2458998.45930	0.009	0.006	170	1.299	0.99	6.49	-0.12	01	0046
2458998.46056	0.015	0.006	170	1.293	0.99	6.43	-0.11	01	0047
2458998.46182	0.014	0.006	170	1.287	0.99	6.45	-0.11	01	0048
2458998.46308	0.008	0.006	171	1.281	1.00	6.18	-0.11	01	0049
2458998.46435	0.012	0.006	171	1.275	1.01	5.70	-0.09	01	0050
2458998.46560	0.012	0.006	171	1.269	1.00	6.25	-0.09	01	0051
2458998.46687	0.016	0.006	170	1.264	1.00	6.14	-0.09	01	0052
2458998.46812	0.009	0.006	170	1.258	0.99	6.41	-0.09	01	0053
2458998.46947	0.011	0.006	171	1.252	1.00	6.17	-0.07	01	0054
2458998.47072	0.013	0.006	171	1.247	1.00	5.91	-0.05	01	0055
2458998.47199	0.013	0.006	171	1.241	1.00	6.25	-0.05	01	0056
2458998.47326	0.013	0.006	170	1.236	1.00	6.35	-0.04	01	0057
2458998.47452	0.017	0.006	171	1.231	1.00	5.84	-0.04	01	0058
2458998.47577	0.011	0.006	171	1.226	1.01	5.86	-0.03	01	0059
2458998.47704	0.012	0.006	171	1.221	1.01	5.89	-0.03	01	0060
2458998.47830	-0.010	0.006	173	1.216	1.00	5.97	-0.03	01	0061
2458998.47957	0.014	0.006	171	1.211	1.01	5.92	-0.01	01	0062
2458998.48085	0.016	0.006	171	1.206	1.00	6.05	0.00	01	0063
2458998.48210	0.011	0.006	171	1.201	1.01	5.64	0.01	01	0064
2458998.48336	0.016	0.006	171	1.197	1.01	5.57	0.01	01	0065
2458998.48462	0.016	0.006	171	1.192	1.01	5.80	0.01	01	0066
2458998.48588	0.009	0.006	172	1.188	1.01	5.53	0.02	01	0067
2458998.48714	0.014	0.006	172	1.183	1.02	5.39	0.02	01	0068
2458998.48839	0.010	0.006	172	1.179	1.02	5.54	0.03	01	0069
2458998.48966	0.009	0.006	172	1.175	1.01	5.77	0.04	01	0070
2458998.49093	0.015	0.006	171	1.170	1.01	6.08	0.04	01	0071
2458998.49219	0.014	0.006	172	1.166	1.01	5.66	0.05	01	0072
2458998.49344	0.015	0.006	171	1.162	1.00	6.45	0.04	01	0073
2458998.49471	0.019	0.006	171	1.158	1.01	6.24	0.05	01	0074

Dia Julià Heliocèntric	Magnitud	$\pm$	RSR	AIRMS	TRANS	FWHM	FONDO	N	NUM
2458998.49599	0.014	0.006	171	1.154	1.01	6.22	0.06	01	0075
2458998.49724	0.011	0.006	172	1.150	1.01	6.08	0.07	01	0076
2458998.49851	0.016	0.006	171	1.146	1.01	6.37	0.06	01	0077
2458998.49977	0.010	0.006	172	1.143	1.01	5.96	0.06	01	0078
2458998.50103	0.011	0.006	172	1.139	1.01	6.48	0.06	01	0079
2458998.50229	0.010	0.006	172	1.135	1.01	6.12	0.07	01	0080
2458998.50357	0.014	0.006	171	1.132	1.01	6.44	0.08	01	0081
2458998.50484	0.013	0.006	171	1.128	1.00	6.57	0.08	01	0082
2458998.50609	0.012	0.006	171	1.125	1.01	6.50	0.09	01	0083
2458998.50734	0.011	0.006	171	1.121	1.00	6.47	0.09	01	0084
2458998.50863	0.007	0.006	172	1.118	1.01	6.23	0.11	01	0085
2458998.50989	0.008	0.006	172	1.115	1.01	6.43	0.11	01	0086
2458998.51114	0.009	0.006	171	1.112	1.01	6.45	0.10	01	0087
2458998.51240	0.009	0.006	172	1.109	1.01	6.68	0.10	01	0088
2458998.51367	0.010	0.006	172	1.105	1.02	5.93	0.12	01	0089
2458998.51492	0.012	0.006	171	1.102	1.01	6.41	0.12	01	0090
2458998.51618	0.007	0.006	172	1.099	1.01	6.11	0.13	01	0091
2458998.51746	0.009	0.006	172	1.096	1.01	6.11	0.13	01	0092
2458998.51873	0.010	0.006	172	1.094	1.01	6.42	0.12	01	0093
2458998.51998	0.007	0.006	173	1.091	1.02	5.77	0.13	01	0094
2458998.52124	0.009	0.006	172	1.088	1.01	6.59	0.13	01	0095
2458998.52251	0.008	0.006	172	1.085	1.01	6.32	0.14	01	0096
2458998.52376	0.000	0.006	173	1.083	1.01	6.36	0.14	01	0097
2458998.52503	0.001	0.006	173	1.080	1.01	6.36	0.15	01	0098
2458998.52629	-0.006	0.006	174	1.077	1.02	5.68	0.17	01	0099
2458998.52756	-0.002	0.006	174	1.075	1.02	6.07	0.18	01	0100
2458998.52881	-0.003	0.006	173	1.073	1.01	6.49	0.18	01	0101
2458998.53007	-0.017	0.006	175	1.070	1.02	6.14	0.19	01	0102
2458998.53133	-0.006	0.006	174	1.068	1.02	6.11	0.19	01	0103
2458998.53260	-0.011	0.006	174	1.065	1.02	6.16	0.19	01	0104
2458998.53386	-0.010	0.006	174	1.063	1.02	6.09	0.20	01	0105
2458998.53511	-0.012	0.006	174	1.061	1.02	6.12	0.21	01	0106
2458998.53639	-0.009	0.006	174	1.059	1.02	6.39	0.21	01	0107
2458998.53764	-0.010	0.006	174	1.057	1.02	6.43	0.20	01	0108
2458998.53890	-0.009	0.006	174	1.055	1.02	6.35	0.21	01	0109
2458998.54015	-0.011	0.006	173	1.053	1.01	6.78	0.21	01	0110
2458998.54143	-0.009	0.006	174	1.051	1.01	6.43	0.23	01	0111

Dia Julià Heliocèntric	Magnitud	$\pm$	RSR	AIRMS	TRANS	FWHM	FONDO	N	NUM
2458998.54268	-0.011	0.006	174	1.049	1.02	6.40	0.24	01	0112
2458998.54393	-0.010	0.006	175	1.047	1.03	5.75	0.26	01	0113
2458998.54519	-0.005	0.006	173	1.045	1.02	6.36	0.25	01	0114
2458998.54646	-0.016	0.006	175	1.043	1.03	5.81	0.26	01	0115
2458998.54772	-0.011	0.006	176	1.041	1.04	5.28	0.27	01	0116
2458998.54897	-0.011	0.006	175	1.040	1.03	5.65	0.27	01	0117
2458998.55023	-0.011	0.006	175	1.038	1.03	5.71	0.27	01	0118
2458998.55151	-0.011	0.006	175	1.036	1.03	5.79	0.27	01	0119
2458998.55277	-0.011	0.006	174	1.035	1.02	6.37	0.26	01	0120
2458998.55403	-0.012	0.006	174	1.033	1.02	6.13	0.27	01	0121
2458998.55528	-0.010	0.006	175	1.032	1.03	5.71	0.27	01	0122
2458998.55655	-0.011	0.006	175	1.030	1.03	5.81	0.27	01	0123
2458998.55780	-0.013	0.006	175	1.029	1.02	6.04	0.26	01	0124
2458998.55907	-0.012	0.006	174	1.028	1.02	6.31	0.24	01	0125
2458998.56034	-0.009	0.006	174	1.026	1.02	6.08	0.25	01	0126
2458998.56160	-0.008	0.006	174	1.025	1.02	6.60	0.22	01	0127
2458998.56285	-0.011	0.006	175	1.024	1.03	6.07	0.23	01	0128
2458998.56411	-0.013	0.006	176	1.022	1.03	5.76	0.24	01	0129
2458998.56538	-0.010	0.006	175	1.021	1.03	6.09	0.25	01	0130
2458998.56663	-0.008	0.006	174	1.020	1.02	6.29	0.25	01	0131
2458998.56790	-0.009	0.006	175	1.019	1.03	5.96	0.27	01	0132
2458998.56917	-0.010	0.006	175	1.018	1.03	6.08	0.26	01	0133
2458998.57043	-0.011	0.006	175	1.017	1.03	5.96	0.26	01	0134
2458998.57169	-0.009	0.006	174	1.016	1.02	6.44	0.25	01	0135
2458998.57295	-0.008	0.006	174	1.015	1.02	6.36	0.26	01	0136
2458998.57420	-0.009	0.006	173	1.014	1.01	6.96	0.25	01	0137
2458998.57548	-0.013	0.006	174	1.013	1.02	6.60	0.25	01	0138
2458998.57673	-0.009	0.006	175	1.013	1.03	5.92	0.25	01	0139
2458998.57799	-0.009	0.006	174	1.012	1.02	6.45	0.23	01	0140

Taula 3: Taula de dades corresponent a la fotometria diferencial realitzada pel programa FotoDif del trànsit de l'exoplaneta TrES-1b.

Declaració d'Extensió del Treball de Grau

Jo, Güelfa Garriga Rovira, amb Document Nacional de Identitat 45831335-V, i estudiant del Grau en Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en relació amb la memòria del treball de final de Grau presentada per a la seva defensa i avaluació durant la convocatòria de juliol del curs 2019-2020, declaro que:

- El nombre total de paraules (segons comptatge proposat ^{ix}) incloses en les seccions des de la introducció a les conclusions és de 8111 paraules
- El nombre total de figures és de 9.

En total el document, comptabilitza:

$$8111 + 9 \times 200 \frac{\text{paraules}}{\text{figura}} = 9911$$

Que compleix amb la normativa al ser inferior a 10000.

Signat: Güelfa Garriga Rovira, 13/06/2020.

^{ix}Utilitza l'eina de comptatge de paraules de Word. La versió Word 365, amb llicència de campus UAB, permet obrir arxius pdf. Per tal de fer el comptatge s'ha de seleccionar el text des de la introducció fins a les conclusions. Queden exclosos del comptatge: abstract, referències, annexos i qualsevol document que no formi part pròpiament del cos del treball.

Declaració d'autoria del Treball de Grau

Jo, Güelfa Garriga Rovira, amb Document Nacional de Identitat 45831335-V, i estudiant del Grau en Física de la Universitat Autònoma de Barcelona, en relació amb la memòria del treball de final de Grau presentada per a la seva defensa i avaluació durant la convocatòria de juliol del curs 2019-2020, declaro que:

- El document presentat és original i ha estat realitzat per la meva persona.
- El treball s'ha dut a terme principalment amb l'objectiu d'avaluar l'assignatura de treball de grau en física en la UAB, i no s'ha presentat prèviament per ser qualificat en l'avaluació de cap altra assignatura ni aquesta ni en cap altra universitat.
- En el cas de continguts de treballs publicat per terceres persones, l'autoria està clarament atribuïda, citant les fonts degudament.
- En el casos en els que el meu treball s'ha realitzat en col·laboració amb altres investigadors i/o estudiants, es declara amb exactitud quines contribucions es deriven del treball de tercers i quines es deriven de la meva contribució.
- Amb l'excepció del punts esmentat anteriorment, el treball presentat és de la meva autoria.

Signat: Güelfa Garriga Rovira, 13/06/2020.

Declaració de Supervisió del Treball de Grau

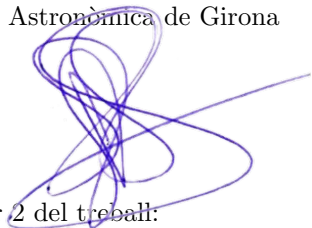
Aquest document té com a objectiu certificar que l'alumne Güelfa Garriga Rovira, amb DNI 45831335-V, ha realitzat el seu treball titulat "Exoplanetes i estudi pel mètode fotomètric de trànsits de TrES-3b i TrES-1b" sota la meua direcció, i el presentarà per tal de defensar l'assignatura a Treball final de grau en el Grau de física.

L'alumne m'ha fet arribar el formulari word d'avaluació de l'activitat de l'alumne per part del director.

Codirector 1 del treball:

Rafael Balaguer Rosa

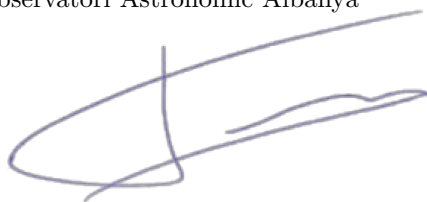
Associació Astronòmica de Girona



Codirector 2 del treball:

Pere Guerra Serra

Observatori Astronòmic Albanyà



Tutor del treball:

Carles Domingo Miralles

Universitat Autònoma de Barcelona