



**ESTRELLES VARIABLES: OBSERVACIÓ
D'EXOPLANETES A PARTIR DEL MÈTODE DEL
TRÀNSIT**

AGRAÏMENTS

Gràcies,

Al Sr. Pere Guerra, per haver-me dedicat el seu temps i atenció, i sense el qual la part pràctica d'aquest treball no hagués estat possible.

Al meu tutor, per haver-me guiat quan em trobava perduda, i per haver estat a la meva disposició sempre que m'ha fet falta.

A la meva tia, per haver vetllat per la gramàtica d'aquest treball i haver procurat que totes les idees fossin ben enteses.

I per últim, a la meva família, que m'ha acompanyat a les meves sortides a Albanyà i recolzat en els moments més difícils.

“The most incomprehensible thing about the universe is that it is comprehensible.”

Albert Einstein

ABSTRACT

Within the last decades, the search of exoplanets has remarkably increased thanks to amateur astronomers and to the light curves provided by the transit method, which can be carried out by anyone who has the minimum material required. Because of this, we can now better understand how the matter that forms our Universe works, as well as how everything we discover can affect to our lives. In this project, the detection of several exoplanets using the transit method will be attempted, in order to prove the effectiveness of this technique and with the purpose to contribute to the scientific knowledge.

Before putting into practice the exoplanet detection, an introduction to the variable star world will be given, so that the concepts concerning the exoplanet activity and the transit method are settled. After that, the methodology and steps taken to observe exoplanets will be described. The two observed exoplanets in this project are WASP-12b and CoRoT-11b, both categorized as giant gaseous planets. Finally, the results obtained will be discussed and some other questions will be addressed.

Key words: exoplanet, transit method, light curve, Universe.

RESUMEN

A lo largo de los últimos años, la búsqueda de exoplanetas ha aumentado notablemente gracias a astrónomos aficionados y a las curvas de luz proporcionadas por el método del tránsito, que puede ser empleado por cualquier persona que disponga del mínimo material necesario. Debido a ello, ahora podemos entender mejor cómo funciona la materia que forma nuestro Universo y cómo puede afectar a nuestras vidas todo lo que descubrimos. En este proyecto, se intentará detectar varios exoplanetas utilizando el método del tránsito, para comprobar la efectividad de esta técnica y con el propósito de contribuir al conocimiento científico.

Antes de poner en práctica la detección de exoplanetas, se hará una introducción sobre el mundo de las estrellas variables, para así clarificar los conceptos que tratan sobre la actividad de los exoplanetas. A continuación, se describirán la metodología y los pasos que deben seguirse para la observación de exoplanetas. Los dos exoplanetas observados en este proyecto son WASP-12b y CoRoT-11b, ambos categorizados como planetas gigantes gaseosos. Finalmente, se discutirán los resultados obtenidos y otras cuestiones.

Palabras clave: exoplaneta, método del tránsito, curva de luz, Universo.

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ.....	4
1.1.	OBJECTIUS	4
2.	INTRODUCCIÓ A LES ESTRELLES VARIABLES.....	6
2.1.	OBSERVACIÓ DE LES PRIMERES ESTRELLES VARIABLES	6
2.2.	QUÈ ENS PERMET L'OBSERVACIÓ D'ESTRELLES VARIABLES?.....	7
2.2.1.	DISTÀNCIES CÒSMIQUES.....	8
2.2.2.	PLANETES HABITABLES.....	8
2.2.3.	EVOLUCIÓ D'UNA ESTRELLA.....	9
2.3.	MAGNITUD ESTEL·LAR.....	9
2.3.1.	MAGNITUD APARENT.....	9
2.3.2.	MAGNITUD ABSOLUTA.....	11
3.	CLASSIFICACIÓ D'ESTRELLES VARIABLES	12
3.1.	ESTRELLES VARIABLES INTRÍNSEQUES	12
3.2.	ESTRELLES VARIABLES EXTRÍNSEQUES.....	13
4.	EXOPLANETES.....	14
4.1.	MÈTODES DE DETECCIÓ D'EXOPLANETES.....	15
5.	INSTRUMENTACIÓ.....	18
6.1.	CCD	18
5.1.	TELESCOPI.....	18
5.2.	MUNTURA	19
5.3.	ALTRES: CÀMERA DE GUIATGE.....	20
6.	FOTOMETRIA DIFERENCIAL.....	21
6.1.	IMATGES DE CALIBRACIÓ	21
6.2.	CORBA DE LLUM.....	22
7.	DESCRIPCIÓ DE L'OBSERVATORI ASTRONÒMIC D'ALBANYÀ.....	25
8.	EXEMPLE 1: WASP-12b.....	26
8.2.	METODOLOGIA.....	26
8.2.1.	METEOROLOGIA.....	26
8.2.2.	TRIA D'EXOPLANETES	27
8.2.3.	EL TRÀNSIT	27
8.3.	RESULTATS.....	27

9.	EXEMPLE 2: COROT-11b	31
9.1.	METODOLOGIA.....	31
9.2.	RESULTATS.....	32
10.	DISCUSSIÓ	34
11.	CONCLUSIONS	35
	REFERÈNCIES	36
	ANNEX I	41
	FOTODIF. REALITZACIÓ DE LA CORBA DE LLUM DE WASP-12b.	41
	PUBLICACIÓ DE LES DADES A ETD (EXOPLANET TRANSIT DATABASE).....	42
	ANNEX II	45
	PROCESSAMENT DE LES IMATGES DE WASP-12B AMB ASTROIMAGEJ	45

1. INTRODUCCIÓ

En els últims 100 anys, la ciència que estudia l'univers ha evolucionat de manera notable. S'han ideat teories, s'han enviat sondes i satèl·lits a l'espai sideral i a altres planetes, s'han contestat preguntes que abans no tenien resposta (que a la vegada han originat noves qüestions), etc. Tanmateix, encara ens queda molt per explorar i entendre. Es podria dir que tot just ara ens trobem a l'inici del camí que ens ajudarà a descobrir com funciona allò que ens envolta.

Sempre m'ha fascinat tot allò que no té resposta, que no puc entendre. Per aquest motiu, soc una gran seguidora de l'univers i vaig voler investigar sobre un tema relacionat amb ell des de quasi el principi (tot i que també contemplava altres opcions). Actualment, són tants els temes i àmbits que comprenen l'univers, tantes les preguntes sense resposta i tantes les hipòtesis que descriuen el seu funcionament, que se'm va fer bastant complicat trobar un projecte adequat i viable en què poder fer una recerca exhaustiva i en el qual pogués a més incloure un bon treball de camp. Finalment, escombrant Internet en busca de temes interessants, vaig trobar la inspiració en els astres que tenen per nom *estrelles variables*. Informant-me, vaig observar que els resultats que comporten els descobriments d'aquests astres són molt significatius per a la ciència. A més, astrònoms aficionats d'arreu del món es dediquen bàsicament a això: a cercar estrelles d'aquest tipus. De fet, científics professionals agraeixen aquesta feina, ja que amb la quantitat d'estrelles que hi ha a l'espai se'ls fa impossible dedicar-hi part del seu temps. La informació que pot proporcionar l'observació d'una estrella variable és molt variada i valuosa, i ajuda a entendre la vida dels astres que formen el nostre Univers. Els descobriments d'estrelles variables són recollits i penjats en arxius i pàgines web com ara l'AAVSO¹.

Avui dia l'astronomia és un dels camps amb més incògnites de la ciència, així com un dels àmbits en què més avenços s'han produït en els últims anys. El fet que jo mateixa pogués contribuir a la recerca astronòmica posant-hi el meu granet de sorra va ser el detonant que em va fer decidir del tot a centrar-me en aquest tema. Els resultats de les meves observacions han estat penjats en arxius d'estrelles variables.

1.1. OBJECTIUS

- Detectar dos exoplanetes i, si és possible, descobrir-ne un a partir del mètode del trànsit, que analitza la lluminositat de les estrelles.
- Demostrar que el mètode del trànsit és efectiu i està a l'abast d'aficionats.
- Dominar el procés de la generació d'una corba de llum.
- Poder extreure dades a partir de la corba de llum.
- Comprendre com funcionen els mecanismes i la maquinària necessaris per a la recerca d'estrelles variables i exoplanetes.
- Poder contribuir a la recerca científica amb la publicació de les meves dades.

¹ AAVSO (American Association of Variable Star Observers) v. <https://www.aavso.org/>.

Per tal d'aconseguir aquests objectius parteixo de la hipòtesi (ja demostrada) que l'eclipsament produït per un planeta al passar davant d'una estrella produeix una davallada en l'anàlisi de la seva brillantor. Em centro primer en una explicació teòrica dels conceptes que hem de tenir en compte per entendre com podem fer i en què consisteix un trànsit planetari: aquest apartat correspon al marc teòric, on defineixo el que comporta el món de les estrelles variables. He dividit la teoria en tres grans blocs: el primer, que engloba diversos apartats i és on aclareixo què són les estrelles variables i com les podem classificar, el segon, que és el bloc on hi figura la informació sobre el material requerit per l'observació d'estrelles variables, i l'últim, on descriu amb detall què és la fotometria diferencial, és a dir l'eina emprada en l'observació dels dos planetes d'aquest treball.

Seguidament, introdueixo el treball de camp. És aquí on hi consta tota la feina realitzada al llarg de l'estiu principalment, i on hi apareix la metodologia, el material, la localització i els resultats. Els resultats obtinguts a les instal·lacions de l'Observatori d'Albanyà són analitzats a les conclusions, però abans, faig esment de tots aquells projectes que s'estan duent a terme en aquests instants i que contextualitzen millor el món de les estrelles variables, per entendre fins a quin punt n'és d'important la seva observació a nivell científic.

Acabo el treball amb els annexos, on hi trobareu com he arribat a publicar les dades que he obtingut en la plataforma d'ETD (*Exoplanet Transit Database*) com també una altra manera d'obtenir les dades del primer exoplaneta que he observat.

MARC TEÒRIC

2. INTRODUCCIÓ A LES ESTRELLES VARIABLES

L'univers està constituït per diferents components, entre els quals trobem la matèria fosca, l'energia fosca i la matèria tal com la coneixem avui en dia (que ocupa només el 4% del total). Dins la matèria, ens podem trobar amb diferents astres: planetes, estrelles, meteorits... Ens centrarem en les estrelles, i més concretament en les variables.

La brillantor que emet una estrella s'anomena magnitud. Si aquesta magnitud varia al llarg de x temps, tindrem una estrella variable. És a dir, anomenem estrella variable a tota aquella que al llarg del temps pateix un canvi de lluminositat, augmentant o disminuint la brillantor que emet, segons la perspectiva des d'on la mirem des de la Terra. Aquests canvis poden produir-se al llarg d'uns quants anys o en qüestió de fraccions de segon, i poden ser regulars o no. De fet, el Sol mateix és una estrella variable, que canvia la seva magnitud al llarg d'11 anys, la qual cosa es correspon amb un cicle solar.

2.1. OBSERVACIÓ DE LES PRIMERES ESTRELLES VARIABLES

Des de temps immemorials, la humanitat s'ha interessat per comprendre com funciona allò que l'envolta. Filòsofs com Aristòtil ja es van veure atrets per descriure el cel que tenim sobre nostre, i ja especulaven sobre ell. Una de les afirmacions més primerenques sobre les quals diferents filòsofs van reflexionar a la seva època va ser que les estrelles mantenien la seva brillantor de manera constant al llarg de la seva vida. Més tard, i amb l'ajut de la ciència, es va comprovar que això no és així.

La primera estrella variable identificada (any 1596) va ser *Òmicron Ceti*, més tard re-anomenada *Mira*, observada per David Fabricius. Inicialment, l'estrella va ser catalogada com a *nova* (nana blanca que pateix una explosió nuclear, fent que canviï la seva brillantor); però més tard, al 1638, amb l'observació de Johannes Holwarda, es va comprovar que l'estrella variava la seva magnitud amb un cicle regular d'11 mesos. Aquest descobriment va ser el que va permetre descartar totalment la idea que la lluminositat de les estrelles fos sempre la mateixa al llarg del temps.

Més tard, al 1669, es va detectar una segona estrella variable: la variable (de tipus eclipsant) *Algol*. Va ser John Goodricke qui, quasi més de 100 anys després del descobriment, va donar l'explicació de la seva variabilitat lumínica. Ell mateix va descobrir també les famoses estrelles variables *Delta Cephei* i *Beta Lyrae*.

Segons *General Catalogue of Variable Stars*, ja són 57.247 les estrelles variables confirmades que tenen nom oficial, sense comptar aquelles que encara conserven el seu nom temporal.

A partir de les estrelles variables podem identificar exoplanetes², si el motiu de la seva variació és el bloqueig de la seva llum per l'eclipsament de l'estrella quan el planeta li passa per davant. Quant a descobriments d'exoplanetes, aquests van tenir lloc a partir de la invenció de la CCD (*charge-coupled device*), creada al 1969, és a dir fa tan sols 52 anys. A finals de la dècada dels 80 del segle xx, un observatori canadenc va proposar que un exoplaneta orbitava l'estrella *Gamma Cephei A*, ja que aquesta patia unes variacions en la seva velocitat radial (això és, la velocitat d'un objecte al llarg de la línia visual de l'observador). Tot i confirmar-se al 2002 que realment es tractava d'un exoplaneta el que feia variar l'estrella, en aquell moment no va ser acceptat. El segon exoplaneta que es va descobrir va ser l'estrella binària HD 114762, tot i ser considerada un altre cop, al principi, una nana marró (una estrella de reduïdes dimensions incapacitada per a dur a terme les reaccions termonuclears de fusió d'hidrogen).

Més tard (al 1992), Wolszczan va descobrir dos púlsars. Els púlsars són estrelles que emeten radiació de manera regular, i aquestes emissions poden ser fàcilment predites ajustant un model. Això va ser el que Wolszczan va intentar fer sense èxit. Per algun motiu desconegut, els seus càlculs fallaven considerablement: què causava els seus errors? Doncs el causant era que no un sinó dos planetes orbitaven al seu voltant. Aquest descobriment va suposar l'observació dels primers planetes orbitant un púlsar.

Fins a dia d'avui, s'han descobert prop de 4.367 exoplanetes³, i el número segueix creixent cada dia.

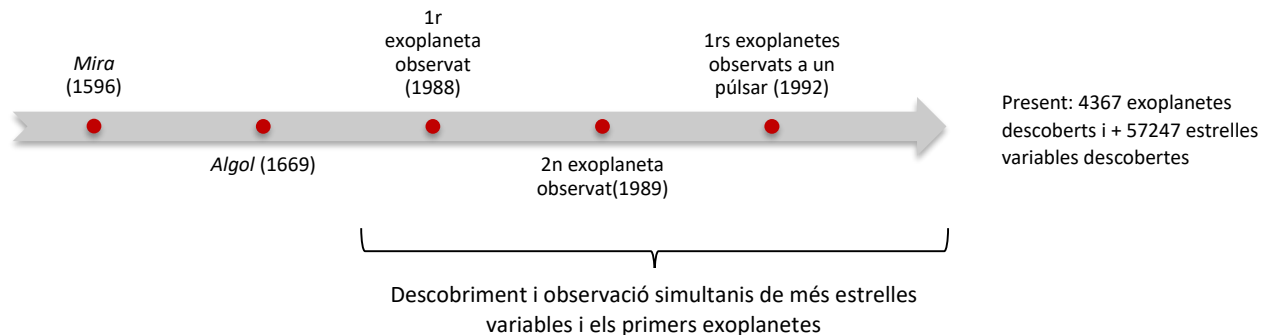


Fig. 1. Línia temporal del descobriment d'estrelles variables i exoplanetes. Elaboració pròpia.

2.2. QUÈ ENS PERMET L'OBSERVACIÓ D'ESTRELLES VARIABLES?

Una de les parts més importants de la física és l'observació dels canvis al llarg del temps per així establir lleis que responguin el perquè de la no permanència de les coses. Així doncs, una estrella variable experimenta un canvi: la seva lluminositat varia. A l'estudiar el motiu d'aquest canvi, estem contribuint a la recerca de les propietats físiques d'aquestes estrelles i, per extensió, de totes les

² Exoplaneta: planeta extra solar, que no forma part del nostre sistema solar.

³ V. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>.

estrelles en general. A partir d'aquí, podem determinar paràmetres com la massa d'una estrella, el radi, la lluminositat, la temperatura, l'estructura interna i externa, la composició i l'evolució.

A més, l'observació d'estrelles variables ens permet deduir altres aspectes molt interessants per a l'astronomia i la ciència en general. Aquests són els següents:

2.2.1. DISTÀNCIES CÒSMIQUES

Una distància còsmica és, tal com indica el seu nom, la distància que separa a una matèria astral d'una altra, com ara una estrella de la Terra. A partir de l'estudi de les estrelles *Cefeides* podem extreure aquest tipus de dades. Henrietta Swan Leavitt va ser l'astrofísica que, el 1908, va establir que hi havia una relació entre la magnitud de diverses estrelles variables i el seu període⁴ i va fer-ne una llei, anomenada actualment Llei de Leavitt. Gràcies a aquest descobriment, ara som capaços d'obtenir la distància que ens separa de diferents elements del cosmos. Per exemple, amb el mesurament de diverses estrelles va ser possible entendre finalment la forma i mida de la Via Làctia, o també conèixer la distància que hi ha entre nosaltres i altres galàxies.



Fig. 2. Henrietta Swan Leavitt (astrònoma).FONT: Wikipedia

2.2.2. PLANETES HABITABLES

Si trobem un exoplaneta, pot existir la possibilitat que aquest reuneixi les condicions necessàries per a albergar vida, situant-se així dins la zona habitable. D'aquesta manera estarem més prop de resoldre un dels dubtes més existencials de tota la humanitat: estem sols? Pel que sabem, seria necessària una superfície líquida, ja que en química es considera el solvent universal, un ambient capaç de mantenir moltes reaccions i de crear enllaços covalents entre diversos elements, entre els quals destaca el de carboni i hidrogen per a la vida. Actualment, entre els planetes descoberts que són de la mida terrestre, es considera que 5 podrien tenir aigua líquida a la seva superfície, cosa que encara està pendent de confirmació. A més, és important tenir una bona atmosfera, que pugui mantenir una temperatura estable al planeta. Un altre aspecte important a tenir en compte és la presència d'un sol, ja que aquest proporcionarà elements que podrien ser clau per a la vida i un suport físic.

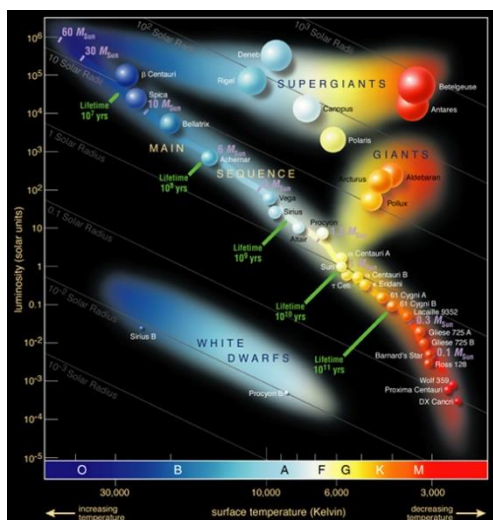
Tots els éssers vius necessitem energia per funcionar i dur a terme les reaccions químiques que incentivaran el desequilibri termodinàmic essencial per a la vida i regularan els processos biològics. Aquesta font d'energia química sol venir de les estrelles, però avui en dia coneixem l'existència de microorganismes que obtenen la seva energia d'altres fonts, com ara de la radioactivitat o la calor

⁴ Període: temps que triga a produir-se una variació de llum a partir de l'última variació de llum. Pot ser regular o no.

dels volcans. Aquest fet ens obre la porta a noves maneres de sostenir vida en altres llocs de l'Univers.

A part d'aquests paràmetres necessaris per a la vida, n'hi ha d'altres, com ara l'existència d'un camp magnètic, la irradiació de les energies de l'estrella al planeta, la massa del planeta, etc.

2.2.3. EVOLUCIÓ D'UNA ESTRELLA



Tot i que les estrelles viuen més temps del que una vida humana és capaç d'observar, l'estudi d'una estrella variable ens permet entendre com es comporten en general els astres que són semblants a elles. Aquest concepte va estretament relacionat amb el diagrama de Hertzsprung-Russell (*H-R diagram*). El diagrama H-R ens permet classificar les estrelles segons la lluminositat i la temperatura: una estrella que té una determinada lluminositat es mourà entre un determinat rang de colors, i viceversa. D'aquesta manera, si classifiquem una estrella variable dins del diagrama H-R, podrem entendre com es comporten les altres estrelles que se situen en la mateixa posició.

Fig. 3. Diagrama H-R. Classificació de les diferents estrelles existents segons la relació lluminositat-temperatura. FONT: Naukas (2016)

2.3. MAGNITUD ESTEL·LAR

Com ja s'ha definit anteriorment, la magnitud d'una estrella és la quantitat de llum que emet. Ara bé, aquesta quantitat de llum pot ser aparent o absoluta.

2.3.1. MAGNITUD APARENT

La magnitud aparent (*m*) correspon a la quantitat de llum que un observador percep d'un astre des de la Terra, ajustant-la a la quantitat que percebria si no hi hagués l'atmosfera. Depèn de la lluminositat intrínseca de l'objecte i la distància a la qual es troba. Les estrelles que brillen més tenen un número més baix, mentre que a les menys lluminoses els correspon un nombre més elevat.

L'escala de magnituds és logarítmica. Una diferència de magnitud correspon a una variació lluminosa de $\sqrt[5]{100}$ ($\approx 2,512$ unitats), constant coneguda com a *constant de Pogson*. Així doncs, una estrella de primera magnitud és 100 vegades més lluminosa que una estrella de sisena magnitud (que correspon a la magnitud mínima que l'ull humà és capaç de d'observar). La fórmula que defineix la magnitud aparent respecte el flux lumínic estel·lar és la següent:

$$m_x = -2,5 \log(l)$$

Fórmula 1. Magnitud aparent (1). FONT: Scientia et technica (2010)

On m_x és la magnitud d'una estrella situada en una banda x de l'espectre i l el flux de llum percebut de l'estrella en lúmens (lm).

D'altra banda, si comparem la magnitud aparent de dues estrelles, la seva diferència en un instant concret correspondria a la següent fórmula:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log\left(\frac{l_1}{l_2}\right)$$

Fórmula 2. Magnitud aparent (2). FONT: HORTA (2020) p.72

Comparar la brillantor aparent de dues estrelles ens serveix per exposar a dos astres al mateix error, i per tant fer que la relació entre aquests dos no variï. D'aquesta manera, obtenim càlculs més concrets.

Però, com s'ha dit abans, s'ha de tenir en compte la presència de l'atmosfera. A més, els diferents aparells que mesuren aquesta intensitat lumínica arreu del món no són tots iguals. Cal sumar-hi que, segons on es trobi l'observació en la banda de freqüències, hi haurà un tipus de pertorbació o un altre. Així doncs, l'equació que en resulta finalment és la fórmula següent:

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

Fórmula 3. Magnitud aparent (3). Scientia et technica (2010)

On $m_{\lambda obs}$ és la magnitud aparent en una banda de freqüència λ , m_{λ} la magnitud aparent real de l'objecte en aquesta banda (mesurada fora de l'atmosfera i amb els aparells ideals), K_{λ} el coeficient d'extinció de l'atmosfera, X_z la massa d'aire present en un angle zenital z (és l'angle que es forma entre l'estrella i el zenit) i C la constant instrumental donada per l'equip involucrat en el procés de mesurament.

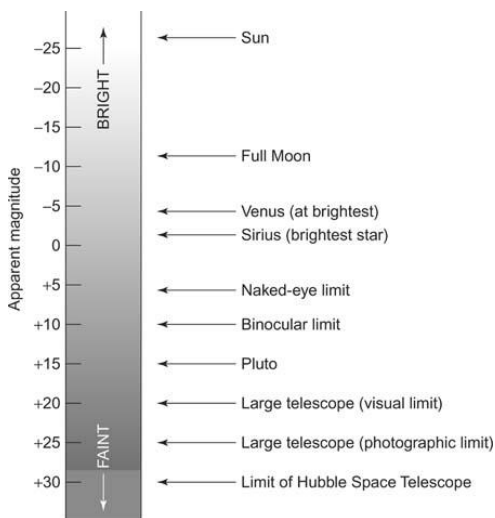


Fig. 5. Llista de la magnitud aparent de diferents astres. FONT: Cliff Notes (s.d.)

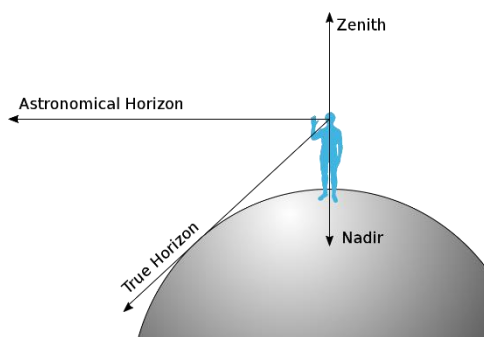


Fig. 4. Angle z : zenit i horitzó. FONT: Wikipedia

2.3.2. MAGNITUD ABSOLUTA

Com que la magnitud aparent no té en compte la distància a la qual es troben les estrelles en relació amb la Terra a l'hora de fer-ne la seva observació, ens podem trobar que una estrella que realment és molt lluminosa ens ho sembli poc degut a la seva llunyania respecte del nostre planeta. Per solucionar-ho, fem servir la magnitud absoluta, amb la qual localitzem tots els astres a la mateixa distància. Per tant, la magnitud absoluta és la brillantor que un astre tindria si es localitzés a 10 parsecs (32,6 anys llum) de la Terra.

En la mesura de la magnitud absoluta de dues estrelles es compleix la llei del quadrat invers de la distància⁵: la brillantor és inversament proporcional al quadrat de la distància des del punt on s'emet.

Finalment, a través d'una sèrie de càlculs matemàtics obtenim l'equació següent:

$$M = m + 5 - 5 \log d$$

Fórmula 4. Magnitud absoluta. FONT: QUINTERO (2010) p. 35

On M és la magnitud absoluta, m la magnitud aparent i d la distància en parsecs que separa l'estrella de la Terra.

⁵ V. Ros, M. R. (et. al.). *La vida de las estrellas*. Network for Astronomy School Education (presentació de diapositives pwp).

3. CLASSIFICACIÓ D'ESTRELLES VARIABLES

Com ja s'ha dit, una estrella variable és la que varia en lluminositat. Ara bé, què pot causar aquest canvi de brillantor? Segons on es localitzi el causant d'aquesta fluctuació d'intensitat lumínica, les classifiquem en dos grans grups: intrínseques o extrínseques.

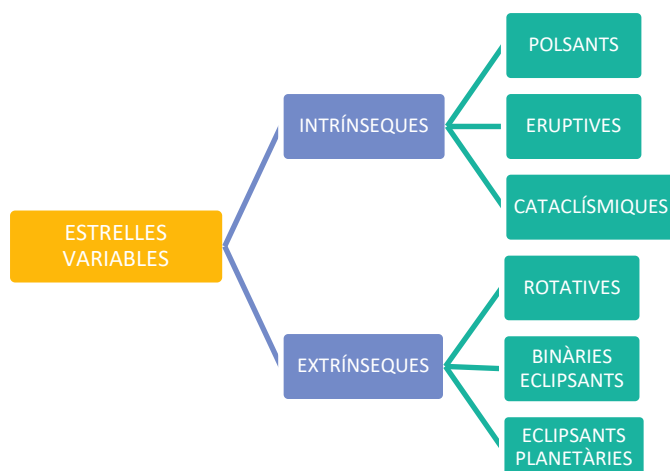


Fig. 6. Classificació d'estrelles variables. FONT: elaboració pròpia.

3.1. ESTRELLES VARIABLES INTRÍNSEQUES

Les estrelles variables intrínseques són aquelles que varien a causa de canvis físics en la mateixa estrella, com ara pulsacions o erupcions. Es divideixen en els subgrups següents:

- **Intrínseques polsants:** Són les estrelles que s'expandeixen i es comprimeixen contínuament. La causa d'aquesta contracció i expansió ve donada generalment per un fet que anomenem *equilibri hidrostàtic*. Una estrella manté un equilibri entre la "força" de la gravetat que actua comprimint la seva matèria i la pressió dels gasos i la radiació que l'estrella emet cap a fora. Si aquest equilibri no es troba del tot proporcionat, pot ser que es produeixi aquest tipus de variació de la magnitud, ja que hi haurà o bé moments on la gravetat guanyarà (contracció) o bé moments on la pressió externa guanyarà (expansió). Exemples d'aquests tipus d'astres són les *Cefeïdes*, *RR Lyrae*, *Mira* i *RV Tauri*.
- **Intrínseques eruptives:** Les estrelles d'aquesta categoria varien la lluminositat per erupcions a la seva superfície, causades per temes relacionats amb el magnetisme. Si aquestes erupcions són molt fortes, hi ha la possibilitat que s'expulsi part de les capes més externes de l'estel cap a l'espai. Astres que pertanyen a aquest grup són els de tipus *UV Ceti*, *T Tauri* i *R Coronae Borealis*, entre d'altres.

- **Intrínseques cataclísmiques:** Aquest tipus d'estrelles experimenten canvis sobtats de magnitud, produint-se una explosió causada per processos termonuclears. La majoria d'aquestes estrelles es troben en sistemes binaris, on una nana blanca succiona part del material de l'altra estrella. Aquest fet té lloc quan els dos estels esmentats es troben a una distància suficient perquè l'alta gravetat de la nana blanca atragui els components de l'altre astre. Quan això passa, la nana blanca va guanyant massa i densitat, fins a sobrepassar el límit de *Chandrasekhar* (massa límit en la qual una nana blanca pot mantenir l'equilibri entre les forces que actuen sobre ella), i és llavors quan es pot produir una *supernova*.

3.2. ESTRELLES VARIABLES EXTRÍNSEQUES

Les estrelles variables extrínseques varien de magnitud per causes externes a elles, és a dir, la causa no prové directament de l'estat físic de l'estrella, sinó que ve donada per algun agent aliè que fa variar la seva magnitud aparent. Classifiquem aquests astres en 3 subgrups:

- **Binàries rotatives:** Varien la seva magnitud aparent degut a l'existència de taques solars que taponen parcialment la seva superfície. Al rotar (recordem que les estrelles també roten), arribarà a un punt on les taques solars se situaran a la línia visual de l'observador, i serà aquí quan aquest percebrà un canvi de lluminositat. El Sol mateix és un astre amb taques solars, que són estudiades contínuament.
- **Binàries eclipsants:** Aquest fenomen es troba en sistemes binaris d'estrelles. Si estan situades a certs angles de l'observador, aquest podrà veure com una estrella eclipsa a l'altra quan passa pel seu davant i, com a resultat, experimentarà com l'estrella que està sent eclipsada perd lluminositat. Una de les binàries eclipsants més famoses és l'estrella *Algol*.
- **Eclipsants planetàries:** Aquest tipus d'estrelles s'observen quan tenen un o més planetes orbitant-les. Si l'alineació entre nosaltres, l'exoplaneta i l'estrella que l'allotja és òptima des del nostre punt de vista, serem capaços de veure com l'estrella varia a causa de l'eclipsament del planeta.

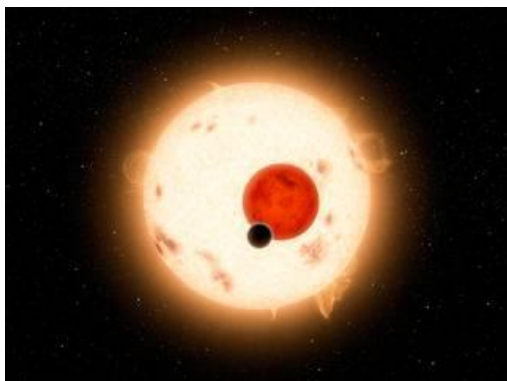


Fig. 7. Planeta extrasolar Kepler 16-b orbitant un sistema binari. FONT: NASA

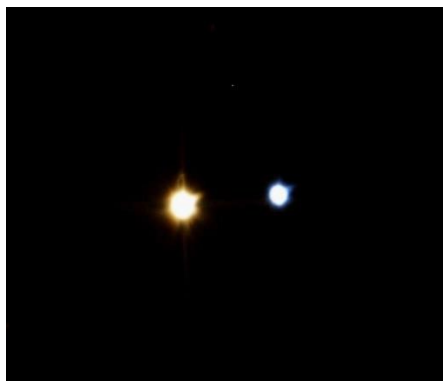


Fig. 8. Sistema binari Albiero. FONT: UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA.

4. EXOPLANETES

Tal com descriu el prefix *exo-* (d'origen grec, que indica "fora de"), un exoplaneta és tot aquell que es troba més enllà del nostre sistema solar. La majoria orbita a altres estrelles, però n'hi ha que es troben orbitant al centre galàctic lliurement, als quals anomenem *rogue planets*. Estan formats per les mateixes substàncies que formen la Terra, però segons la composició i l'estructura seran diferents els uns dels altres. Per exemple, podem trobar planetes amb abundant ferro o d'altres amb molt de gel. Un dels principals objectius de l'estudi dels diferents exoplanetes que es van trobant és determinar si hi ha vida fora de la Terra.

Podem classificar als exoplanetes en 4 grups, segons la mida i la composició: gegants gasosos, neptunians, súper-terres i terrestres. Com es pot veure, sovint les diferents classificacions reben noms de planetes que formen part del nostre sistema solar, degut a les semblances que hi presenten.

- **Gegants gasosos:** Són planetes compostos majoritàriament per hidrogen i heli, i no tenen una superfície sòlida ja que són gasosos, com Júpiter i Saturn. Sovint són referits com a *Hot Jupiters* si es troben molt a prop de l'estrella a la qual orbiten, i es desconeix com poden haver arribat a adquirir posicions tant properes a les seves estrelles de referència. El gegant gasós més famós és *51 Pegasi b*.
- **Neptunians:** Són planetes amb una mida similar a Urà. A les seves atmosferes normalment hi predominen l'heli i l'hidrogen, i freqüentment hi ha núvols densos que bloquegen la llum que aquest tipus de planetes podrien emetre, amagant-nos així la composició dels elements de què podrien estar formades. Un planeta neptunià és *HAT-P-26b*.
- **Súper-terres:** Els planetes súper-terres poden estar formats de roca, de gas o d'ambdós. Són més massius que la Terra (poden arribar a tenir una massa 10 vegades més gran), però menys que planetes com Urà i Neptú. Un exemple d'aquest tipus de planetes és *Kepler-22b*.
- **Terrestres:** Són bàsicament planetes rocosos que oscil·len entre la meitat del radi de la Terra fins a 2 vegades el radi de la Terra. Si es troben dins la zona habitable, són els més susceptibles d'albergar vida. Al 2017 es va descobrir un sistema solar de 7 planetes terrestres orbitant l'estrella *TRAPPIST-1*, i tots ells amb possibilitat de contenir aigua a les seves superfícies.



Fig. 9. Representació del sistema solar TRAPPIST-1. FONT: NASA

4.1. MÈTODES DE DETECCIÓ D'EXOPLANETES

Actualment, s'han descobert planetes a través de 10 metodologies diferents, de les quals només una és practicable per astrònoms aficionats. Per sort, es tracta del mètode més eficaç: el 78% d'exoplanetes s'han descobert emprant-lo. En aquest apartat, es descriuran els mètodes usats més freqüentment i els més significatius.

4.1.1.ASTROMETRIA

Aquesta tècnica consisteix a mesurar de manera molt precisa la posició d'una estrella. Si aquesta estrella té un planeta, aquests dos interactuaran a través del seu centre de masses conjunt, i amb el temps s'observarà que l'estrella descriu una circumferència o el·lipse. Com més gran sigui el planeta i menor l'estrella, més fàcil serà de detectar, ja que el centre de masses es trobarà més allunyat de l'estrella i per tant el seu moviment serà major. Només s'ha descobert un planeta amb aquesta tècnica: *DENIS-P*.

4.1.2.IMATGE DIRECTA

És la tècnica més complicada per a la recerca d'un planeta, ja que pren imatges del planeta quan aquest passa per davant de la seva estrella, emmascarant així la seva brillantor. Analitza la llum provinent del planeta i, en ser aquesta ínfima en comparació amb la de la seva estrella, sembla impossible aconseguir trobar planetes amb aquest mètode. Tot i així, s'han descobert 51 planetes emprant-la. Per tal d'atenuar la llum provinent de l'estrella, s'utilitzen mecanismes de bloqueig de la llum. Es creu que, en un futur, amb un bon desenvolupament de la tècnica es podran aconseguir dades rellevants dels planetes observats, com la composició de les atmosferes o la presència d'oceans. A part d'haver-se descobert planetes també s'han trobat nanes marrons amb el mètode d'imatge directa.

4.1.3.VELOCITAT RADIAL

Igual que l'astrometria, la tècnica de velocitat radial es basa en la rotació de les estrelles i els planetes al voltant del seu centre de masses conjunt. Tots els cossos tenen gravetat. Com més gran i més dens sigui el cos, més gran també serà el seu camp gravitatori. És per això que els planetes giren al voltant d'una estrella: se senten atrets per ella. Tot i que el camp gravitatori de l'estrella és molt més gran que el dels planetes, això no treu que aquests tinguin força gravitatòria. Conseqüentment, una estrella també descriurà una petita trajectòria a causa de la força gravitacional del planeta, i com més gran sigui aquest més pronunciada serà la trajectòria. Així, quan l'estrella es trobi dibuixant la seva òrbita movent-se cap a nosaltres, la longitud d'ona que rebrem de les ones que emetrà serà més petita i se situarà dins el color blau. Quan passi el contrari i l'estrella s'allunyi de nosaltres, esdevindrà la situació inversa i se situarà dins el color vermell. Això s'anomena

efecte Doppler. Així doncs, si hi ha un canvi en l'espectre de l'estrella pot tractar-se d'un exoplaneta. És el segon mètode més efectiu, amb què ja s'han detectat 837 planetes fins ara.

4.1.4. TRÀNSIT

Si l'alineació entre nosaltres, el planeta i l'estrella és l'adequada des del nostre punt de vista, quan el planeta passi per davant de l'estrella, aquesta bàsicament quedarà eclipsada de manera parcial. Quan passa això, la llum de l'estrella s'atenua. Això és precisament el que busca aquest mètode: canvis de variació en la lluminositat d'un estel.

A partir de l'observació durant un cert temps d'una estrella podem obtenir el que s'anomena corba de llum, on s'observarà de manera visual aquesta decaiguda de brillantor. Una corba de llum pot proporcionar informació molt interessant des del punt de vista astronòmic, de la qual parlarem més endavant (v. apartat 6.2).

El trànsit també ens permet conèixer la composició atmosfèrica d'un planeta, ja que quan passa per davant d'una estrella certa quantitat de la llum de l'astre travessarà l'atmosfera del planeta. Els rajos que ens arriben d'aquesta acció són analitzats amb un espectroscopi i, segons el color que emetin, distingirem entre un element o altre.

Aquest mètode és el més eficaç i, afortunadament, és a l'abast d'astrònoms aficionats. Amb ell s'han descobert 3.325 planetes.

Una variant del mètode del trànsit és l'anomenada *Variació en el Temps del Trànsit* (VTT). Aquesta tècnica analitza el període orbital d'un exoplaneta (és a dir, el temps que triga a donar una volta sencera a la seva estrella) i busca canvis de temps en ella. Si observem que el període orbital d'un exoplaneta varia (accelerant-se o desaccelerant-se), pot indicar la presència d'altres cossos celestes, en especial d'altres exoplanetes, ja que es produeix una interacció gravitacional entre ells, la qual provoca aquesta variació en el temps del trànsit. Gràcies a aquest mètode, es poden detectar planetes de masses tan petites com la Terra, cosa molt interessant des de la perspectiva de la recerca de planetes habitables. Un exemple de sistema planetari descobert amb la VTT és al voltant de l'estrella Kepler-19.

4.1.5. MICROLENTS GRAVITACIONALS

La base d'aquesta tècnica és el camp gravitatori dels cossos celestes. Quan una estrella s'alineja amb una altra i amb la Terra, l'estrella que ens quedi més a prop magnificarà la llum de l'estrella que tingui al darrere, situada més lluny de nosaltres (ja que en certa manera els seus rajos electromagnètics quedaran desviats i atrets per la gravetat del cos). Per tant, l'astre actuarà com a lent. Si a més l'estrella que fa de lent posseeix un planeta, la gravetat d'aquest també influirà en la llum procedent de l'estrella alineada, i nosaltres serem capaços de detectar-ho. Amb aquest mètode és possible detectar planetes petits, de la mida de Mart. L'inconvenient és que una lent gravitacional

només pot ser observada un sol cop, ja que les estrelles i la Terra es troben en un moviment relatiu entre elles. Ja s'han descobert 108 planetes utilitzant les lents gravitacionals.

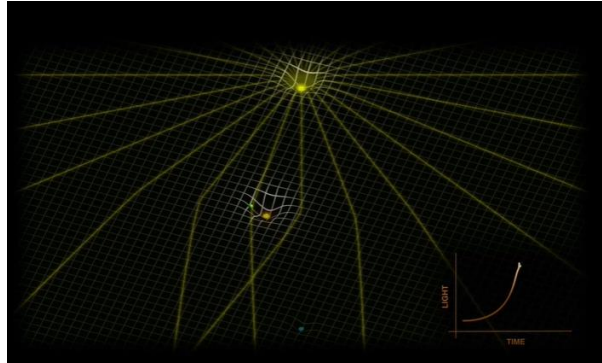


Fig. 10. Microlent gravitacional. Al darrere, l'estrella més llunyana; al davant seu, l'estrella lent amb el seu planeta, i el punt blau, la Terra. FONT: NASA

5. INSTRUMENTACIÓ

Com és lògic, l'observació d'exoplanetes requereix un material específic: la CCD, el telescopi i la muntura són els tres elements imprescindibles que cal tenir en compte a l'hora de fer una observació.

6.1. CCD

El CCD (sigles de l'anglès per *Charged Coupled Device*) és un sensor utilitzat en càmeres especialitzades per a l'astronomia. Està dividit en petites cel·les anomenades píxels, els quals seran els encarregats de captar els fotons que incideixen sobre ells. Un cop rebuts els fotons, el CCD emetrà electrons (de manera proporcional), per així produir una imatge digital: d'aquest funcionament, se'n diu efecte fotoelèctric. Per tal de crear la imatge, el corrent elèctric generat ha de passar per uns conversors AD, que generalment solen ser de 16 bits⁶, per la qual cosa el valor digital obtingut per cada píxel estarà entre 0 i 65.535, comunament anomenat *nombre de comptes*.

Perquè la CCD funcioni correctament cal saber el seu rang de linealitat, és a dir, aquells valors del nombre de comptes entre els quals l'electricitat generada és proporcional als fotons rebuts. Un altre factor important a tenir en compte és l'eficàcia quàntica o sensibilitat. Aquest valor descriu la qualitat del sensor a l'hora de transformar els fotons (llum) en electricitat i es dona en un percentatge que és el mateix per a totes les longituds d'ona. En astronomia, se solen acoblar càmeres CCD en blanc i negre, ja que d'aquesta manera l'eficàcia quàntica és més elevada.

Quan s'utilitza una CCD, és necessari estar a l'aguait del soroll, això és, totes les interferències que empitjoren la qualitat de la imatge a l'hora d'analitzar-ne les dades. Es troben en forma de comptes i se sumen als píxels per factors diferents a la llum procedent de l'objecte que s'està observant. El soroll pot ser causat per diversos motius, i el més important és el soroll tèrmic, que prové de la temperatura de la mateixa CCD. Per tant, és important que la càmera disposi d'un refrigerador que faci baixar la seva temperatura per sota 0, per tal d'aconseguir el mínim soroll tèrmic possible.

5.1. TELESCOPI

El telescopi és l'eina que ens servirà per observar cossos molt llunyans captant la seva radiació electromagnètica (llum). El paràmetre més important d'un telescopi és el diàmetre, ja que definirà la quantitat d'observacions que es podran fer. Com més gran sigui el diàmetre, més llum captarà, i per tant es podran observar cossos que no emetin tanta brillantor.

Podem trobar tres tipus de telescopis, tots ells òptims per a l'observació d'exoplanetes: el reflector, el refractor i el catadiòptric. La diferència entre ells es troba en la manera en què es mostra (o es processa) la imatge.

⁶ Bit: unitat d'informació mínima utilitzada en informàtica. Es sol representar amb 0 i 1 (codi binari).

- **Telescopis refractors:** En aquests tipus de telescopis, la llum travessa una lent convergent que desvia la llum concentrant-la en un focus des d'on la imatge serà observada. Permet observar amb qualitat els objectes més brillants. Per contra, té bastanta aberració cromàtica⁷ i no capta objectes del cel profund.
- **Telescopis reflectors:** Tal com indica el seu nom, la llum incident és reflectida per uns miralls situats a l'interior: el primari i el secundari. El paper del secundari és reflectir a l'ocular la llum que és vista al mirall primari. Aquest telescopi corregeix l'aberració cromàtica present als telescopis refractors i permet observar el cel profund.
- **Telescopis catadiòptrics:** Aquests telescopis combinen lents i miralls. La llum rebota al mirall secundari i passa per un tub, en el qual al final es troba el mirall primari. Seguidament, el mirall primari reflecteix la imatge a l'ocular. El gran avantatge d'aquests telescopis és que posseeixen una distància focal⁸ gran.

Al telescopi podem acoblar-hi altres aparells per tal de facilitar i optimitzar al màxim l'observació, com ara els filtres. Es recomana utilitzar el filtre R, és a dir l'infraroig, ja que és el que deixa passar més llum.

5.2. MUNTURA

Per tal d'aguantar el telescopi, es necessita una muntura, que servirà de pilar. Hi ha diversos tipus de muntures, i sempre ha estat tema de discussió quin d'elles és la més efectiva i òptima. Les més importants, però, són les de forquilla i les equatorials. En les primeres, el telescopi és subjectat per dos braços. Tot i ser muntures molt còmodes, solen ser força inestables i no permeten observar el cel profund, cosa que suposa un gran inconvenient per a l'astrofotografia. En les segones, el telescopi és contrapesat amb una estructura que té el seu eix paral·lel a l'eix de rotació de la Terra. Amb aquesta muntura, es poden fer fotografies de llarga exposició. Tot i això, es produeix un efecte anomenat *meridian flip*⁹, que pot comportar pèrdues d'imatges i una rotació de 180° de la imatge.



Fig. 11. Sistema òptic d'Albanyà. FONT: elaboració pròpia.

⁷ Aberració cromàtica: distorsió òptica que es produeix quan una lent no és capaç de convergir totes les longituds d'ona en un sol punt.

⁸ Distància focal: Distància entre el centre òptic d'una lent i el punt on es forma la imatge.

⁹ Meridian flip: fenomen que es produeix quan el telescopi creua el meridià i ha de donar una volta de 180° per no xocar amb la muntura.

5.3. ALTRES: CÀMERA DE GUIATGE

El telescopi pot desviar-se i moure's per diverses causes, ja sigui per un cop que donem sense voler a la cúpula, o pel vent, o simplement per qualsevol turbulència. Quan això passa, podem arribar a perdre l'estrella que volem observar o alguna altra que ens pot servir de calibració, és a dir de comparació. I encara que aconseguíssim mantenir-les dins el camp de visió, les CCD no són perfectes i tots els píxels no són iguals; per tant, podrien produir-se alteracions. Per aquest motiu, és interessant tenir una segona càmera que anomenarem càmera de guiatge. La seva feina és controlar les desviacions que el sistema òptic pugui patir i corregir-les. Per fer-ho, se li assigna una estrella de guiatge, a la qual pren fotografies constantment. Quan detecta que la muntura del telescopi s'ha desviat gràcies a la presa d'aquestes fotografies, li envia un impuls elèctric per tornar-lo a estabilitzar.

6. FOTOMETRIA DIFERENCIAL

El mètode del trànsit, que com s'ha dit és l'únic a l'abast d'astrònoms aficionats, utilitza la fotometria diferencial com a eina, que és la tècnica que analitza i mesura la quantitat de llum procedent d'un objecte al llarg d'un temps comparant-la amb la d'altres objectes, preferiblement estables en paràmetres de brillantor. Per què comparem la lluminositat d'una estrella amb la d'altres? Perquè en fer-ho, estem sotmetent dues estrelles (una constant i l'altre variable) a les mateixes condicions, per tant totes dues rebran el mateix error. Com que al llarg del temps l'estrella invariable haurà variat per l'error tal com també ho haurà fet la variable, això serà idoni per corregir les mesures de l'estrella que volem observar i obtenir dades molt específiques.

En casos ideals, la llum rebuda per l'estrella hauria de cabre en un sol píxel; però degut a les condicions atmosfèriques i al soroll, la llum captada forma una circumferència d'un cert diàmetre. Per mesurar-la, s'utilitzen els segons d'arc ("). Si agafem un rang lineal de píxels que formin part del diàmetre de la circumferència, podrem fàcilment generar un gràfic semblant a la corba de Gauss¹⁰. Com que la circumferència s'estén fins a un punt on no som capaços de distingir si es tracta de llum provinent de l'estrella o no, s'imposa una limitació anomenada *Full Width at Half Maximum* (FWHM), és a dir, s'agafa l'amplada de la corba on la seva altura és a la meitat. Si passem a segons d'arc el FWHM podrem obtenir informació com ara el *seeing*¹¹ a partir de la resolució del nostre sistema òptic.

Càlcul de la resolució:

$$\text{Resolució} = 36 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{\text{mida de píxel}}{\text{distància focal}} \right)$$

Fórmula 5. Resolució d'un sistema òptic. HORTA (2020). P.72.

On la mida del píxel és en μm i la distància focal en mm.

El millor valor de FWHM de què podem disposar a la Terra és de 0,4". És important intentar aconseguir valors baixos, ja que el seeing afectarà en major o menor mesura la qualitat i la quantitat de la magnitud aparent obtinguda (v. Fórmula 2).

6.1. IMATGES DE CALIBRACIÓ

Cal diferenciar *soroll* de *senyal*. El soroll fa referència a aquelles comptes de més afegides als píxels per causes diferents a la llum, mentre que el senyal fa referència a aquells fotons procedents de l'objecte observat que s'han transformat en comptes als píxels. No obstant, el senyal que es dona a una corba de llum pot anar barrejat amb el soroll i per tant ser influït per ell.

¹⁰ Corba de Gauss: Corba de forma acampanada que serveix de representació gràfica de la distribució normal d'un grup de dades.

¹¹ Seeing: terme que fa referència a la estabilitat o la turbulència atmosfèrica.

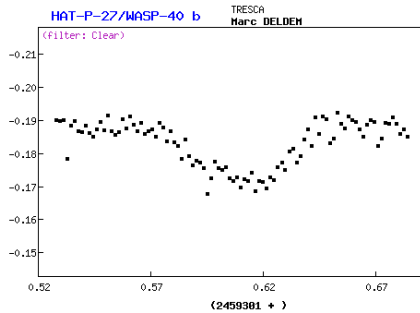
Quan toca fer el seguiment d'una estrella, cal tenir en compte els factors externs que tenen lloc durant la seva observació (pols a les lents del telescopi, brutícia...) i que podem corregir amb l'ajuda de les anomenades imatges de calibració: les *Bias*, les *Darks* i les *Flats*.

- **BIAS:** El Bias és un senyal que afecta la CCD aplicant un valor inicial a tots els píxels. Per eliminar-lo de la imatge presa serà necessari prendre unes quantes fotografies de temps d'exposició de 0 segons sense il·luminació: aquestes imatges seran les que anomenarem Bias. Es recomana renovar-les cada 2-3 mesos abans o després d'un trànsit.
- **DARKS:** Són imatges que s'obtenen amb exposicions sense llum a la mateixa temperatura que les imatges del trànsit, cosa que aconseguim tancant l'obturador de la càmera CCD i prenent-les després d'una sessió de treball. S'utilitzen per corregir els salts d'electrons que es poden produir a causa de la calor i no a causa de la recepció de fotons (tal com hauria de ser). La causa que fa que els electrons puguin saltar d'un lloc a un altre ve donada per l'estructura dels sensors CCD: estan formats per dos materials; un amb un excés d'electrons i l'altre amb una manca, separats de tal manera que els electrons no puguin passar d'un lloc a l'altre sense l'aportació d'energia (que idealment serà l'energia dels fotons). Les Darks s'haurien de repetir cada 2-3 setmanes.
- **FLATS:** Les Flats ens serveixen per eliminar les ombres que puguin estar produïdes per motius diversos a les imatges. Són les més importants i per tant les que amb més freqüència s'han de realitzar, cada 3-4 dies, encara que idealment les prendrem abans i després de cada trànsit que desitgem fer. S'aconsegueixen prenent fotografies en les quals tots els píxels estiguin sotmesos a la mateixa llum constant i uniforme que pugui donar un total de comptes d'aproximadament la meitat de la linealitat de la CCD.

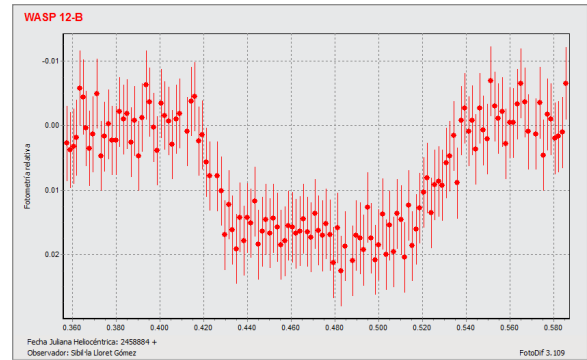
Sempre cal prendre un nombre imparell de cada tipus d'imatge de calibració, ja que quan s'han processat es calcula la mediana. Normalment realitzarem 101 imatges de cadascuna.

6.2. CORBA DE LLUM

Com ja s'ha mencionat anteriorment, la corba de llum és el producte de la variació de la lluminositat en la magnitud (eix y) d'una estrella al llarg d'un temps (eix x), i es dona en forma de gràfic de dispersió atenent a les comptes que s'obtenen a cada píxel en cada imatge presa durant el trànsit. Tots els punts estaran representats al centre d'una línia vertical que representarà l'error que pugui haver-hi en la mesura. Les corbes de llum poden ser periòdiques si es tracten d'estrelles amb variacions de llum regulars. Segons la causa de la variació d'intensitat lumínica en una estrella, obtindrem una corba de llum amb una forma o altra. En una corba de llum, hi apareix la data d'obtenció; però aquesta va en *data Juliana*, la qual consisteix en el recompte de dies un darrere l'altre des de l'1 de gener de 4713 A.C.



Gràfic 1. Corba de llum de l'exoplaneta HAT-P-27 WASP-40 b. FONT: Deldem, M. A ETD. (2021)



Gràfic 2. Corba de llum de l'exoplaneta WASP 12b. Elaboració pròpia.

Com podem observar, al primer gràfic apareix la magnitud relativa de l'estrella, mentre que al segon apareixen uns nombres que simbolitzen la decaiguda de brillantor que es produeix a l'estrella, és a dir, la diferència en llum que hi ha des d'un moment determinat fins a un altre, sense tenir en compte la magnitud real de l'astre (recordem que en fotometria diferencial ens interessa la diferència que es produeix, i no els valors reals que la llum pugui tenir). Pel que fa a l'eix x, correspon a la data juliana heliocèntrica, la qual consisteix en una mesura del temps agafant com a referència el Sol, ja que aquest no pateix el moviment orbital terrestre. Així doncs, es tracta d'un temps "universal", que negligeix en certa manera els efectes de la relativitat general d'Einstein. En ambdues imatges podem identificar la data juliana a sota el gràfic.

A partir de la informació proporcionada pel gràfic resultant es determinen molts paràmetres. Per exemple, podem deduir la mida del planeta segons la profunditat de la caiguda de brillantor en la corba de llum, ja que la profunditat de l'eclipsi és proporcional al quadrat del quocient entre els radis del planeta i l'estrella:

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

Fórmula 6. Profunditat de l'eclipsi. FONT: GARCIA (2016) p. 30.

On R_* és el radi de l'estrella, R_p el radi del planeta i ΔF el canvi de llum de l'astre (flux de llum abans del trànsit – flux de llum durant el trànsit). Aquesta fórmula ens pot ajudar a identificar si el que ha produït l'eclipsi de l'estrella és un planeta o simplement es tracta d'una altra estrella (sistema binari), ja que, si surt un radi del planeta molt gran en comparació amb la seva estrella, haurem de considerar la possibilitat que es tracti d'un estel i no d'un exoplaneta.

Com més exagerada sigui la profunditat de la corba, més probable és que es tracti d'un planeta més gran, ja que bloquejarà més part de la llum solar; com més prim sigui el trànsit, més probable és que indiqui que la velocitat de translació del planeta és elevada. A més, la corba de llum també ens pot assenyalar l'existència de més d'un planeta orbitant l'estrella o com de prop o de lluny es troben d'aquesta, segons el temps que passi entre que el planeta comença a bloquejar la llum de l'astre fins que l'astre recupera totalment la seva magnitud.

Un altre paràmetre interessant a determinar és el semieix major de l'òrbita (a), el qual podem trobar a partir de la tercera llei de Kepler:

$$\vec{F} = \frac{-Gm_*m_p}{a^2}$$

Fórmula 7. 3a llei de Kepler. FONT: Serra Estrada, S. (Et. al.) "Camp gravitatori" a Física 2n Batxillerat. Espanya: Mc Graw Hill 2018.

Sabem que força equival a la massa per l'acceleració, en aquest cas angular:

$$\vec{F} = m_p \cdot \omega^2 \cdot a$$

Nota: En aquest cas, a representa el radi, és a dir, una distància (no confondre amb acceleració).

Relacionem la velocitat angular amb el període:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \rightarrow \vec{F} = m_p \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot a = m_p \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot a \rightarrow \frac{\vec{F}}{m_p \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}} = a$$

Recuperem la definició de força segons la tercera llei de Kepler:

$$a = \frac{\frac{-Gm_*m_p}{a^2}}{\frac{4\pi^2 \cdot m_p}{T^2}} = \frac{-Gm_*m_p T^2}{a^2 m_p 4\pi^2}$$

Resumint:

$$a^3 = \frac{Gm_*T^2}{4\pi^2}$$

Fórmula 8. Semieix major d'un astre.

On T és el període orbital, G la constant gravitacional universal ($=6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N}^2\text{m}^2/\text{kg}$), M_* la massa de l'estrella i a la distància que separa els dos cossos des del centre (semieix major orbital). Hem prescindit del signe negatiu de la constant de gravitació, ja que com que es tracta d'una distància l'hauréem de donar en valor absolut.

En resum, hi ha quatre aspectes clau que podem extreure de la corba de llum per a la classificació de l'exoplaneta en qüestió:

1. El quadrat de la fracció del radi de l'exoplaneta (R_p) respecte a l'estrella hoste (R_*) (Fórmula 6).
2. La fracció del semieix major orbital (a) de l'exoplaneta respecte a (R_*).
3. El punt central T_c y la duració del trànsit.
4. La inclinació de l'òrbita exoplanetària relativa a la línia de visió de l'observador.

MARC PRÀCTIC: OBSERVACIÓ D'EXOPLANETES

7. DESCRIPCIÓ DE L'OBSERVATORI ASTRONÒMIC D'ALBANYÀ (OAA)

L'Observatori d'Albanyà se situa a 239 metres d'altitud dins la comarca de l'Alt Empordà i, tal com el seu nom indica, es troba al municipi d'Albanyà. El gran avantatge que té és que es troba lluny de la contaminació lumínica de les grans poblacions que pugui haver-hi a la comarca, ja que la zona més important que podria influir en les observacions és Figueres, a 25 km de l'observatori. Tot i això, com que està situat en una plana envoltada de muntanyes, el vent pot alterar les observacions, ja que es produeixen turbulències al xocar amb elles. A més, a prop hi passa el riu Muga, així que la humitat que es genera a la zona també pot dificultar les observacions fetes de nit. Cal tenir en compte tots aquests desavantatges a l'hora de planificar un dia de treball. Les coordenades de l'observatori són $42^{\circ}18'25''\text{N } 2^{\circ}42'40.2''\text{E}$, dada important a l'hora de fer una observació, ja que haurem de saber la disponibilitat que tenim quan vulguem observar una estrella.

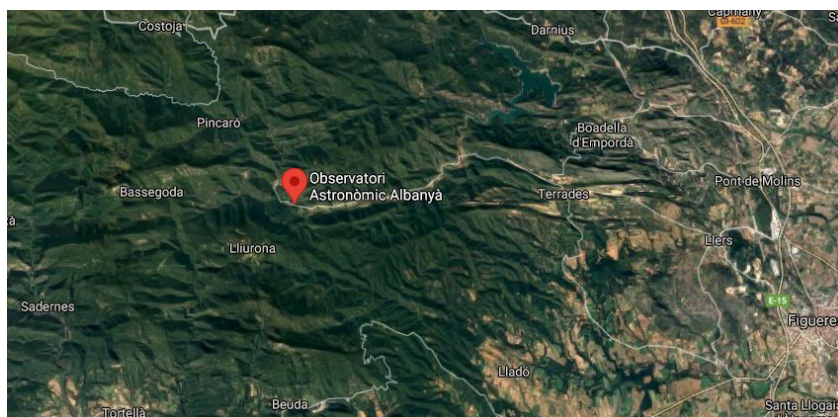


Fig. 12. Localització de l'Observatori d'Albanyà. FONT: Google Maps.

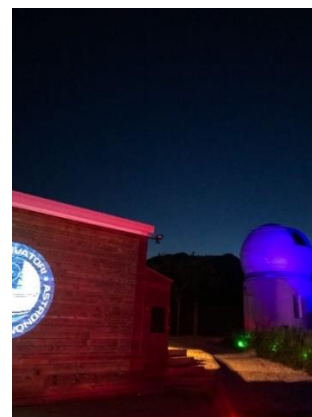


Fig. 13. Observatori d'Albanyà. Elaboració pròpia.

Pel que fa a l'equipament, l'observatori compta amb un telescopi catadiòptic reconegut com el més gran de la província de Girona, amb una focal de 8 establert sobre una muntura de tipus equatorial. Concretament, es tracta d'un telescopi Meade ACF de 406 mm d'amplada. És una variació del telescopi Schmidt-Cassegrain en el qual s'ha corregit la coma¹². A més, consta d'un telescopi secundari refractor, idoni per a l'astrofotografia i l'observació de la superfície solar.

Per a les observacions, utilitza una càmera amb un xip CCD (KAF-9000) muntada sobre una roda portafiltres de 7 posicions i té una eficiència quàntica del 70%. La seva linealitat es mou entre les 8.000 i les 58.000 comptes. Quant a la resolució, aquesta és de 1,44 segons d'arc per píxel. També té una segona càmera que serveix de guiatge (v. apartat 5.3).

¹² Coma: tipus d'aberració que es produeix quan els rajos de llum provenen de sobre l'eix x, donant com a resultat una desviació de la llum en forma de cua, com si fos un cometa.

8. EXEMPLE 1: WASP-12B

8.2. METODOLOGIA

En tota observació, s'han de tenir clars els passos que cal seguir i planificar de la millor manera possible el transcurs de la nit per evitar problemes que podrien influir el nostre ritme. També s'han de tenir en compte les afectacions que podrien sorgir i saber què hem de fer per solucionar-les.

El dia 2 d'abril de 2021 vaig fer una visita a l'OAA per fer una primera observació. Malauradament, el cel es va ennuvol·lar i no vam poder acabar el trànsit, així que ens vam quedar al pas descrit a l'apartat 8.2.3 del mètode que cal seguir. Per no quedar-me amb les mans buides, em van enviar les imatges del trànsit de WASP-12b, i em va tocar fer la corba de llum i penjar-la a l'ETD (*Exoplanet Transit Database*¹³). El dia en què el trànsit va ser efectuat va ser el 4 de febrer de 2020, observat per Pere Guerra, fundador de l'Observatori d'Albanyà.

8.2.1. METEOROLOGIA

El primer pas que hem de fer quan planifiquem una observació és assegurar-nos que la previsió del temps durant aquella nit és estable. Els paràmetres més importants que cal tenir en compte són el vent, la temperatura i la humitat. Si el vent és molt fort, per exemple, es poden produir vibracions al telescopi i que per això no s'obtinguin imatges nítides, o si hi ha humitat, pot ser que hi hagi boira, entre d'altres. Com és lògic, també cal mirar que no hi hagi núvols que ens tapin la visió ni que plougui.

Com que l'observatori es troba a l'Empordà, el temps és poc previsible. Es pot girar vent de tramuntana en qualsevol moment, o la humitat del riu que hi ha prop de l'observatori ens pot afectar fàcilment. Per tant, és difícil estar segurs que farà una bona nit. No obstant, l'observatori compta amb una estació meteorològica amb 4 sensors diferents: de pluja, de temperatura, de velocitat del vent i de llum infraroja. També és important documentar-nos sobre l'estat de la lluna, ja que la seva lluminositat pot empitjorar la qualitat de les nostres observacions.

La previsió per al dia 4 de febrer de 2020 va ser la següent: temperatures càlides arreu de l'Alt Empordà i algun núvol a la tarda, que més tard es va dispersar. Cal remarcar que hi bufaven ràfegues de vent de fins a 100 km/h en alguns punts. Pel que fa a l'estat de la lluna, aquesta es trobava en posició creixent amb una il·luminació del 68,3%.

Personalment, recomano utilitzar la plataforma *accuweather*¹⁴, ja que proporciona informació variada que ens pot ser molt útil, com la humitat, el vent i la visibilitat.

¹³ V. <http://var2.astro.cz/ETD/>.

¹⁴ V. <https://www.accuweather.com/es/es/spain-weather>.

8.2.2. TRIA D'EXOPLANETES

Un cop ens hem assegurat que la previsió per a la nit d'observació podria ser estable, toca triar quins exoplanetes voldrem observar. Aquest pas el podem fer a través de diferents plataformes; des d'aquelles on hi ha missions liderades per centres d'investigació com la NASA fins a les que són públiques obertes al públic. Sempre intentarem escollir un planeta que se situï a no menys de 35° de la lluna (ja que, si no és així, la seva brillantor ens podria afectar) i que el seu trànsit es produeixi a una estrella propera al zenit (és a dir, un trànsit proper a una posició de 90°, ja que d'aquesta manera la massa d'aire és inferior). En aquest cas, es van utilitzar les dades d'ETD. Es va escollir l'exoplaneta (ja conegut) WASP-12b pel seu horari de trànsit (de les 20:38h fins les 01:55h) i la seva posició envers la lluna. La posició exacta del planeta es d'una ascensió (RA¹⁵) de 6h 30min 32.7967s i amb una declinació (DEC¹⁶) de +29° 40' 20.2663".

8.2.3. EL TRÀNSIT

Quan ja tenim preparat el planeta que volem observar i ens hem assabentat de les hores que comprèn el trànsit, ja podem començar. Abans de tot, però, cal prendre les imatges de calibració. Aquestes s'han de començar com a mínim 30 minuts abans de començar el trànsit. Les més importants són les flats, com ja s'ha explicat anteriorment (v. apartat 6.1) i, per tant, són les que comencem realitzant just abans de fer-se fosc, quan el cel disposa d'una llum homogènia. Aquell dia no es van realitzar ni darks ni bias, ja que encara podíem seguir utilitzant les que es van prendre per última vegada.

En acabar aquest pas, configurem la càmera de guiatge: li assignem una estrella que no sobrepassi la linealitat de la CCD per orientar correctament la muntura en cas de desviacions de l'objectiu. Després, ja podem introduir les coordenades de l'objecte que volem observar i configurar els paràmetres d'imatge: exposició, enfocament, etc. Per a WASP-12b, s'ha utilitzat una exposició de 140s. En acabar el trànsit, les imatges s'han tractat amb el programa FotoDif¹⁷, dissenyat per Julio Castellano.

8.3. RESULTATS

La corba de llum de l'estrella WASP-12 ha estat la següent:

¹⁵ RA: *Right ascension*, correspon a la direcció est o oest en què es troba un objecte celeste. Es mesura en hores, minuts i segons. La posició 0 coincidiria amb la RA del Sol en l'equinocci de primavera.

¹⁶ DEC: Declinació, correspon a la direcció nord o sud en què es troba un objecte celeste. Es mesura en graus, minuts d'arc i segons d'arc. El 0 es relaciona amb l'equador celeste, situat sobre l'equador terrestre.

¹⁷ CASTELLANO, J. FotoDif. <http://www.astrosurf.com/orodeno/fotodif/>

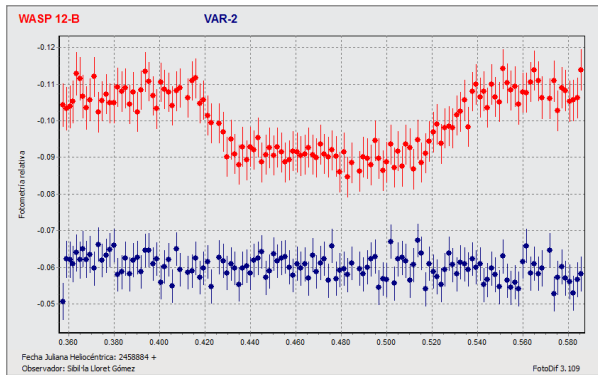


Fig. 14. Corba de llum de WASP-12b en comparació amb una estrella no variable. En vermell, WASP-12b; en blau, estrella no variable.

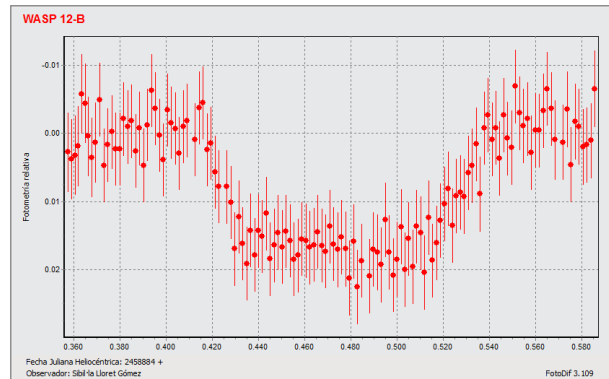


Fig. 15. Corba de llum de WASP-12b.

Al primer gràfic podem observar dues variables: la blava (situada a baix) i la vermella (situada a dalt). Mentre la blava correspon a una estrella no variable i dibuixa una línia recta al llarg del gràfic (és a dir, la lluminositat no varia al llarg del temps), la vermella (WASP-12b) segueix una forma d'U. Podem observar com clarament els valors de la magnitud relativa (eix y) varien entre el 0,11 i el 0,9. En aquest gràfic, no estan ajustats els valors reals de la magnitud que l'estrella WASP 12 té, però aquest fet és irrellevant perquè el que ens interessa és veure com es produeix un canvi en la lluminositat. Pel que fa al temps (eix x), s'indica que el dia julià en què es va produir el trànsit és el 2458884, és a dir el 4 de febrer de 2020, i a continuació hi ha el signe +, ja que haurem de sumar-hi els valors representats a l'eix x del gràfic per saber l'hora exacta a la qual pertanyen les imatges. Els nombres de l'eix x van del 0,360 fins al 0,580, que corresponen de les 20:38h fins les 1:55h.

Si calculem la mitjana dels valors de la magnitud relativa de l'estrella abans del trànsit, ens sortirà que aquesta és de 0,090. D'altra banda, si fem la mitjana de la magnitud relativa durant el trànsit, sortirà de 0,10. Si restem aquests dos valors, obtindrem una diferència de -0,01 magnituds, que equival a la davallada de brillantor que ha experimentat l'estrella WASP-12 en ser eclipsada pel planeta WASP-12b. Per tant, si l'estrella WASP-12 té una magnitud aparent de 11,69 i ha disminuït la seva brillantor -0,0151 magnituds, podem afirmar que ha experimentat una diferència del 0,13%.

Per trobar el radi del planeta, apliquem la Fórmula 6:

$$\Delta F = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \rightarrow \Delta F \cdot R_*^2 = R_p^2 \rightarrow \sqrt{\Delta F \cdot R_*^2} = R_p$$

Calcularem el radi del planeta utilitzant el radi de l'estrella en radis solars, és a dir $1R_{\odot}=695700$ km. El radi de WASP-12 en radis solars és de 1,57.

$$\sqrt{0,0151 \cdot 1,57^2} = R_p = 0,193 R_{\odot}$$

Passem de radis solars a radis Júpiter (R_{\oplus}):

Dada: 1 radi Júpiter = 71492 km.

$$0,193 \cdot 695700 = 134217,8 \text{ km} \rightarrow 134217,8 : 71492 = 1,88 R_{\oplus}$$

Si el que volem és trobar el semieix major de rotació de WASP-12b al voltant de la seva estrella, podem aplicar la Fórmula 8:

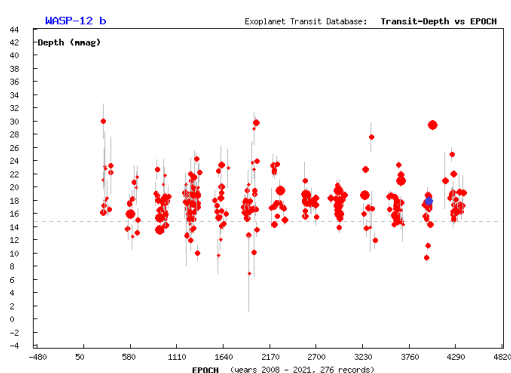
$$a^3 = \frac{Gm_*T^2}{4\pi^2}$$

El període de WASP-12b, el qual podem trobar fàcilment a partir de l'observació o altres fórmules, és de 1,09 dies ($\approx 94807,76$ s). Pel que fa a la massa de l'estrella, aquesta és de $2,72 \cdot 10^{30}$ kg.

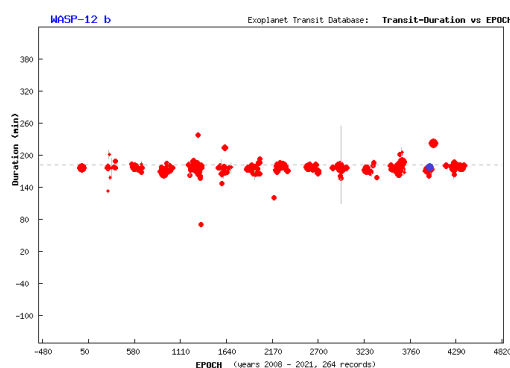
$$a^3 = \frac{(6,67 \cdot 10^{-11}) \cdot (2,72 \cdot 10^{30}) \cdot 94807,76^2}{4\pi^2}$$

$a = 3,45 \cdot 10^9$ m, que, sabent que 1 Unitat Astronòmica correspon a $1,49 \cdot 10^{11}$ m, estaríem parlant de 0,0232 AU.

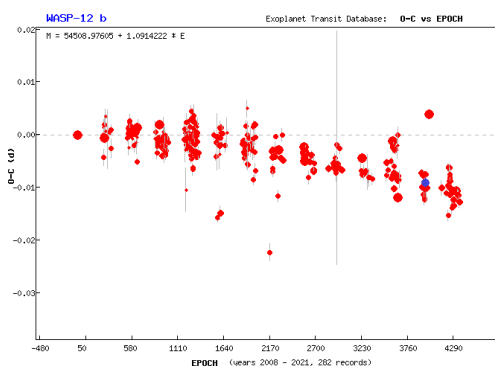
Després de publicar les dades a la base d'ETD, s'han obtingut els següents gràfics:



Gràfic. 1. Gràfic de la profunditat teòrica del trànsit respecte a la profunditat del nostre trànsit.



Gràfic. 2. Gràfic de la duració teòrica del trànsit respecte a la nostra duració.



Gràfic. 3. Gràfic del moment d'inici teòric del trànsit respecte a l'inici del nostre trànsit.

El punt blau situa el nostre trànsit en els gràfics. S'aprecia que als dos primers gràfics no ens desviem massa dels valors teòrics (línia sobre l'eix x representada als gràfics), mentre que a l'últim gràfic els

punts tendeixen a desviar-se del valor teòric. Es tracta del gràfic on surt representat el moment teòric d'inici del trànsit segons el seu període orbital. A més, ETD ens ha mostrat un DQ (Data Quality¹⁸) de 3.

El gegant gasós WASP-12b és un planeta situat a uns 1.000 anys llum de la Terra a la constel·lació d'Auriga, orbitant l'estrella WASP-12, i fou descobert amb el mètode del trànsit al 2008 pel projecte SuperWASP. Aquest *Hot-Jupiter* es troba tan a prop de la seva estrella que la gravetat d'aquesta el deforma, fent que agafi forma d'ou. De fet, li va succionant la matèria, i s'espera que en uns 10 milions d'anys el planeta acabi sent consumit del tot.

CARACTERÍSTIQUES WASP-12b	
Radi orbital	0,0232 AU
Període orbital	1,1 dies
Excentricitat orbital¹⁹	0,0447
Distància de la Terra	1.393 anys llum
Temperatura del planeta	2.210 °C
Radi del planeta	1.937 R _J
Massa del planeta	1.465 M _J



Fig. 16. Hipotètica representació de WASP-12b. FONT: NASA

Taula 1. Característiques de WASP 12-b. FONT: NASA

¹⁸ Data Quality: és un indicador de la qualitat del nostre informe que pren valors de l'1 al 5, essent 1 el millor i 5 el pitjor.

¹⁹ Excentricitat orbital: Valor de desviació de la cònica circumferència que pren l'el·lipse que ressegueix el planeta. Pren valors entre 0 i 1.

9. EXEMPLE 2: COROT-11B

9.1. METODOLOGIA

El dia 29 de juliol de 2021 vaig tenir l'oportunitat de fer una segona visita al OAA. Aquesta vegada no vam fer una observació a partir de les dades d'ETD, sinó que vam anar un pas més enllà: vam escollir un exoplaneta pendent de confirmació que ens proporcionava la missió TESS de la NASA, aprofitant que l'observatori d'Albanyà hi participa.

Mitja hora abans de començar el trànsit, es van prendre 117 imatges de calibració de tipus flats. L'exoplaneta que es va observar es tractava d'un força brillant, motiu pel qual vam decidir fer imatges amb un temps d'exposició de 60s. És ideal fer-ne amb un temps d'exposició més llarg, com ara de 120s, ja que d'aquesta manera el telescopi està més temps pendent del cel i no es perd tanta informació entre imatge i imatge. Ara bé, en el cas de l'exoplaneta que vam decidir observar, com que era força brillant, voldria dir que el nostre telescopi estaria prenent imatges amb un temps massa llarg i que admetria molts més fotons, i com a resultat obtindríem imatges sobresaturades (sobreexposades, que les comptes sobrepassarien la linealitat de la CCD, que els fotons emplenarien tot el píxel i es vessarien al del costat). Així doncs, una exposició de 60s era idònia, tot i perdre informació, perquè s'estaria menys temps observant el cel i hi haurien més pauses entre una imatge i l'altra. A l'hora de processar-se la corba, no hagués sortit una de molt marcada (pels fets esmentats anteriorment en relació amb els 60s); però no hagués estat problema, ja que es podrien haver dibuixat els punts a partir de la mitjana d'una imatge amb la següent (i així anar fent) i haguéssim obtingut una corba bona.

L'estrella que es va decidir observar ocupava un total de 35.000 comptes, nombre força elevat tenint en compte que la CCD de l'observatori perd la seva linealitat a les 58.000. Afortunadament, igualment era viable fer el trànsit, perquè l'estrella s'allunyava cada cop més del zenit i això significava que la massa d'aire (AIRMASS) cada cop seria més gran, fent baixar les comptes de l'estrella.

Tot semblava anar correctament; però un altre cop, quan es va fer un cop d'ull al trànsit l'endemà, vam veure que les dades no havien anat bé. Així que en Pere Guerra em va enviar dades d'un altre trànsit que tenia pendent per fer: CoRot-11b.

El dia 13 de juny de 2021 es va efectuar el trànsit de CoRot-11b que va tenir una duració final de 135 minuts. En total, es van realitzar 98 imatges amb una exposició de 140s i a una temperatura de -21°C, utilitzant un filtre I. Un cop fet el trànsit, seguint el mètode descrit anteriorment (veure apartat 8.2), s'han processat les dades obtingudes amb el programa AstrolmageJ²⁰. AstrolmageJ és un software (molt més complex que el FotoDif) per tractar amb imatges astronòmiques. És utilitzat

²⁰ V. HESSMAN, F. V. (et. al.). (2017, 25 gener) *Astroimagej: Image processing and photometric extraction for ultra-precise astronomical light curves*, a The Astronomical Journal, Vol. CLIII.

per astrònoms i centres d'investigació com la NASA, degut a la seva precisió i les múltiples funcions que pot exercir.

9.2. RESULTATS

Finalment, la corba de llum resultant ha estat la següent:

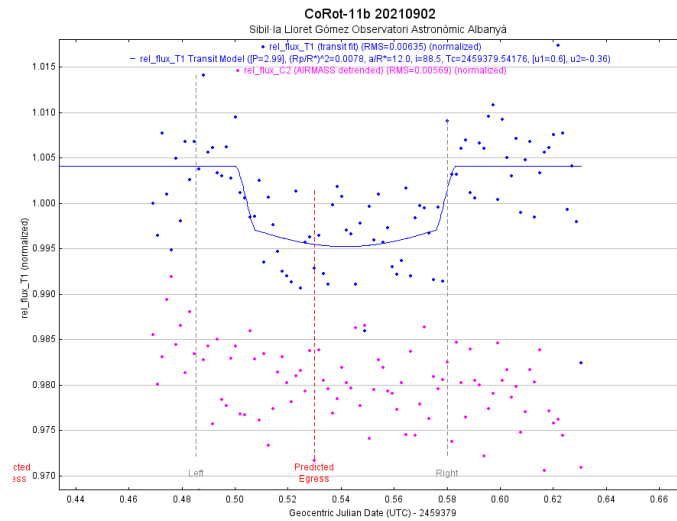


Fig. 17. Corba de llum de CoRoT-11b. FONT: elaboració pròpia.

Per a realitzar-la, s'han escollit les següents estrelles i s'han obtingut els següents paràmetres:

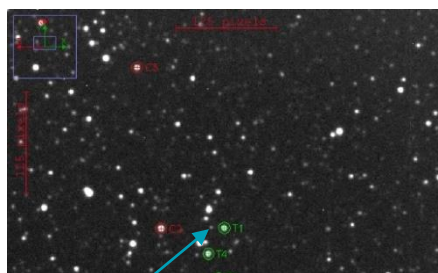


Fig. 18. Tria d'estrelles.

CoRoT-11b

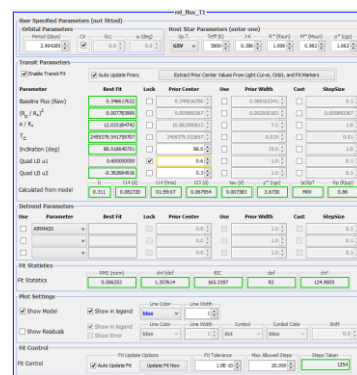


Fig. 19. Pestanya Rel_Flux_T1.

La corba ens mostra que s'ha produït una variació del 0,0123 i que, per tant, l'estrella CoRoT-11 (de magnitud aparent 11,248) ha experimentat una caiguda de brillantor del 0,11%. A més, sobre el gràfic podem observar un valor RMS (*root-mean-square*) de 0,00635, que és un indicador de la

contaminació per part del soroll que hi pugui haver. Com més baix, millor. Pel que fa a la Fig. 19 Fig. 19, ens dona una dada d'inclinació de 88,52. Aquesta dada és l'angle que forma l'eix de rotació del planeta amb la nostra línia visual.

Per trobar el radi, tornem a aplicar la Fórmula 6:

$$\sqrt{\Delta F \cdot R_*^2} = R_p \rightarrow \sqrt{0,0123 \cdot 1,36^2} = 0,15 R_\odot$$

$$\frac{0,15 \cdot 695700}{71492} = 1,47 R_\oplus$$

I ara trobem el semieix major orbital, sabent que CoRot-11b té un període de 253259,55 s (2,93 dies), i que la massa de CoRot 11 és de $2,53 \cdot 10^{30}$ kg (Fórmula 8):

$$a^3 = \frac{Gm_*T^2}{4\pi^2}$$

$$a^3 = \frac{(6,67 \cdot 10^{-11}) \cdot (2,53 \cdot 10^{30}) \cdot 253259,55^2}{4\pi^2}$$

$$a = 6,5 \cdot 10^9 \text{ m} = 0,0436 \text{ AU}$$

CoRot-11b és el primer exoplaneta descobert per la missió CoRot al 2010, i és l'únic planeta orbitant l'estrella CoRot 11. Es va descobrir utilitzant la tècnica del trànsit. Localitzat a la constel·lació de Serpens, concretament amb una ascensió de 18h 42min 44,95s i una declinació de +5° 56' 16,12", està catalogat dins els gegants gasosos de tipus júpiter calent.

CARACTERÍSTIQUES CoRot-11b	
Radi orbital	0,0436 AU
Període orbital	3 dies
Excentricitat orbital	0,0
Distància de la Terra	2.136 anys llum
Temperatura del planeta	1.320 °C
Radi del planeta	1.43 R _J
Massa del planeta	2.33 M _J

Taula 2. Característiques de CoRot-11b. FONT: The Extra Solar Planets Encyclopaedia.

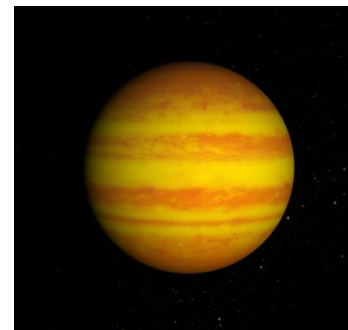


Fig. 20. Hipotètica representació de CoRot-11b. FONT: NASA

10. DISCUSSIÓ

Les dades de la NASA apunten que la tècnica del trànsit és la més eficaç, ja que és amb la que s'han descobert més planetes, i, pel que la tècnica ens pot proporcionar, segurament estariem parlant del mètode a partir del qual més informació podem extreure. A més, pel simple fet que és a l'abast de qualsevol persona que tingui el material necessari fa encara més eficient i ràpida la cerca de nous planetes. Per contra, només pot ser utilitzat si es produeixen unes condicions específiques: l'exoplaneta ha de transitar a la línia visual de l'observador. El problema és que aquestes limitacions són presents en totes les tècniques; cada una d'elles permet detectar exoplanetes si es produeixen unes condicions necessàries i, per tant, és cosa de sort trobar-ne o no, ja que no podem saber quin seria el mètode més òptim en cada observació.

Actualment, la recerca i la millora per entendre com funciona l'univers i descobrir vida fora de la Terra segueix avançant. D'entre les missions més destacades que es preveu que poden marcar un canvi en la comprensió d'exoplanetes hi ha la missió Gaia, un satèl·lit-observatori espacial de l'ESA llançat el 2013 amb l'objectiu de crear un mapa 3D dels astres presents a la Via Làctia usant l'astrometria, que aproximadament seran 1 bilió. S'espera que amb la missió Gaia es descobreixin uns quants milers d'exoplanetes nous utilitzant fotometria diferencial i també astrometria. La majoria d'ells es trobaran a estrelles nanes de tipus espectral M, molt menys massives que altres classes d'estrelles i més fredes. Un avantatge d'això és que la zona habitable es troba més a prop de l'estrella. Pel que fa a la fotometria, és capaç d'observar trànsits llargs d'uns quants dies, els quals no podríem fer des de la Terra. La majoria de planetes detectats amb aquesta tècnica són Júpiter calents. Les dades finals recopilades per Gaia seran lliurades el 2022.

Una altra missió a destacar és la "*James Webb mission*". Llançat el 24 de desembre de 2021, té per objectiu ampliar la informació obtinguda amb el telescopi *Hubble*, però amb una sensibilitat superior i un temps inferior. La seva feina comprèn explorar les propietats dels diversos sistemes planetaris presents i investigar la possibilitat de vida en ells. Per fer-ho, estudiarà les seves atmosferes a través de l'espectroscòpia. Gràcies al projecte, s'espera aconseguir entendre millor el funcionament dels planetes i acostar-se a respostes de preguntes com el perquè de l'origen de vida a la Terra o com poden afectar els planetes grans als més petits en un sistema solar, entre d'altres.

Com hom pot observar, són múltiples les investigacions que s'estan duent a terme en aquests mateixos instants i, gràcies a elles, cada dia som un pas més endavant.

11. CONCLUSIONS

Si comparem els dos exemples, veiem clarament com la corba de llum del primer planeta es veu més definida, mentre que la del segon no tant. La causa d'aquest fenomen pot ser atribuïda a diferents factors: les condicions atmosfèriques de les dues nits (massa d'aire, humitat...), el soroll influent a les imatges, la presència de la lluna, la contaminació de la llum de fons, la temperatura a què la CDD va estar sotmesa, etc. Podem observar que l'astronomia depèn de moltes variables, que no són fixes, i per tant és difícil obtenir sempre bons resultats.

A més, al segon exemple, els punts liles (que representen una estrella no variable) no formen una línia recta del tot. Potser hauríem d'haver escollit una altra estrella per comparar, o potser no s'ha corregit prou bé l'alineació del trànsit.

Quant a la desviació del gràfic 3 del primer exemple, el fet que hi sigui ens permet identificar que alguna cosa sobresurt de la norma. En aquest cas, cal mencionar la tècnica VTT (v. apartat 4.1.4), ja que ha canviat el període del planeta observat. No es creu que aquests canvis en el període hagin estat causats per la influència d'un altre planeta, sinó que els ha provocat la interacció amb la seva estrella hoste.

Tot i les dificultats que s'han presentat a l'hora de fer el treball, finalment s'han pogut acabar acomplint quasi tots els objectius que estaven marcats al principi: s'han pogut detectar exoplanetes demostrant que el mètode del trànsit és a l'abast d'astrònoms aficionats i és eficaç; he comprès el procés que cal seguir per a observar exoplanetes i el material i els mètodes que això requereix, i ara soc capaç de generar una corba de llum a partir de programes diversos i les imatges d'una observació.

Pel que fa a la publicació de les dades, aquestes s'han pogut penjar en el cas de WASP-12b, contribuint d'aquesta manera a la recerca científica, mentre que les relatives al segon exemple, CoRoT-11b, no s'han pogut publicar per certes complicacions. Tot i això, bona part de les dades que he pogut proporcionar seran útils científicament, i per tant he acomplert un altre dels objectius marcats al principi.

El temps i la dificultat de la detecció d'exoplanetes no ens han permès fer cap nou descobriment. No obstant això, m'agradaria comentar que l'observatori d'Albanyà ha co-descobert recentment, juntament amb la NASA, un sistema planetari de 3 planetes.

Ara que la ciència ha avançat tant i la recerca de nous planetes ha deixat de ser un obstacle per a nosaltres, ens toca fer un pas més enllà. Descobrirem algun dia vida fora de la Terra?

REFERÈNCIES

- AAVSO. (2014). "Variable stars – The what, why, and how of photometry" a *The AAVSO Guide to CCD Photometry* (Cambridge, 1.1 ed., pp. 9–13).
https://www.aavso.org/sites/default/files/publications_files/ccd_photometry_guide/CCD_PhotometryGuide.pdf ISBN 978-1-939538-10-9
- AAVSO. (s. d.). Variable Stars and the Stories they Tell | aavso. <https://www.aavso.org/variable-stars> [consulta: 24 març 2021]
- AAVSO. (s. d.). *Variables: What Are They and Why Observe Them?* | aavso.
<https://www.aavso.org/variables-what-are-they-why-observe-them> [consulta: 22 març 2021]
- AAVSO. (s. d.). *About Julian Dates*. AAVSO. <https://www.aavso.org/about-jd> [consulta: 27 juny 2021]
- BIT. (2021, 25 gener). [en línia] A *Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure*. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Bit> [consulta: 25 juny 2021]
- BRAVO, R. (2019, 19 juny). *Calidad del cielo: Seeing y transparencia*. AstroAficion.
<https://astroaficion.com/2019/08/19/calidad-cielo-seeing-transparencia/> [consulta: 14 setembre 2021]
- BRENNAN, P. (s. d.). *Overview | What is an Exoplanet?* –. Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System. <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/overview/> [consulta: 1 maig 2021]
- BORJA, E. F. [en línia] (2016, 21 octubre). *HR, la estrella de los diagramas en astrofísica* a Naukas.
<https://culturacientifica.com/2016/10/21/hr-la-estrella-los-diagramas-astrofisica/> [consulta: 20 març 2021]
- CENTRE DE TERMINOLOGIA. Campana de Gauss. A *Termcat*. <https://www.termcat.cat/ca/diccionaris-en-linia/157/fitxa/Mjk1MzY5OQ%3D%3D> [consulta: 14 setembre 2021]
- COMA (OPTICS). (2021, 12 març). [en línia] A *Wikipedia, the free encyclopedia*.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_(optics)) [consulta: 25 juliol 2021]
- CSIRO. (s. d.). *Pulsating Variable Stars*. Australia Telescope National Facility.
https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable_pulsating.html [consulta: 25 març 2021]

- CURSOS ASTRONOMÍA. (2014, 9 setembre). *tipos y clasificación de estrellas variables*. Vigiacosmos. <http://www.vigiacosmos.es/tipos-y-clasificacion/> [consulta: 23 març 2021]
- D. FORTENBACH, C & D. DRESSING, C. *A Framework For Optimizing Exoplanet Target Selection For The James Webb Space Telescope*. (2020, 1 de maig). The Astronomical Society of the Pacific. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/AB70DA>
- DISTÀNCIA FOCAL. (2021, 27 juny). [en línia] A *Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure*. https://ca.wikipedia.org/wiki/Dist%C3%A0ncia_focal [consulta: 14 setembre 2021]
- DURGAPAL, A., [ET AL.] (2020, 10 abril). *Estrellas variables y cómo encontrarlas*. Astrobites en español. <https://astrobitos.org/2020/04/10/estrellas-variables-y-como-encontrarlas/> [consulta: 21 febrer 2021]
- ESA & PARQUE DE LAS CIENCIAS DE GRANADA. (Maig 2020). *Modelado de tránsitos de exoplanetas* (1a ed.). Esero Spain. <https://esero.es/wp-content/uploads/2021/05/modelado-de-transitos-de-exoplanetas.pdf>
- FERNÁNDEZ PEREA, M. (2002) *Curvas de luz de estrellas variables*. Universidad Complutense de Madrid. <https://webs.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TRABAJOS/VARIABLES/Monica/variables.html>
- GARCÍA, E. (s. d.). *Fundamentos de analisis de curvas deluz*. Wayback machine. <https://web.archive.org/web/20070827192746/http://www.astrogea.org/var2/basics%7E1.htm> [consulta: 25 juliol 2021]
- GIMÉNEZ, Á. & CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (Espanya). (2012). “Exoplanetas” (Vol. 29) a *¿Qué sabemos de?* Madrid: Catarata, 2012 (pp. 45-76, 109-134).
- GLAZE, L., ERICKSON, K., W. DAVIS, P., & BARNETT, A. (s. d.). *In Depth | Gaia* –. NASA Solar System Exploration. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/gaia/in-depth/> [consulta: 20 setembre 2021]
- GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. (2010, desembre). *Imagine the Universe! NASA*. https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/cataclysmic_variables.html [consulta: 24 març 2021]
- HERNÁN OBISPO, M.M. (2015) *Detección de planetas en estrellas activas y estudio de la interacción estrella-planeta: el caso de BD+20 1790*. Elisa de Castro Rubio & Maria Cruz Gálvez Ortiz (dirs.) Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral.

- HERNÁNDEZ CHÁVEZ, L. (s. d.). *Estrellas variables* [Diapositives pdf]. <http://astro.org.sv/wp-content/uploads/2018/02/Estrellas-variables-v2.pdf> [consulta: 25 març 2021]
- HIGUERA, MARIO A. (s. d.). *Magnitud, Flujo y Luminosidad*. Universidad Nacional de Colombia. <https://web.archive.org/web/20120915140659/http://www.observatorio.unal.edu.co/docentes/armando/archivosMAHG/2Magnitudes.pdf>
- HOLMAN, M. J. & MURRAY N. W. (2004, 17 de noviembre) *The Use of Transit Timing to Detect Extrasolar Planets with Masses as Small as Earth*. *A Science*.
- HORTA, G. F. *Observación de exoplanetas* (1a ed.). Ulzama: Marcombo, 2020.
- M. CONTI, D., & ALSINA FERRER, I. (2018, octubre). *Guía práctica para la observación de exoplanetas* (4.2 ed.).
- MAGNITUD APARENTE. [En línea] (2021, 22 gener). A *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Magnitud_aparente [consulta: 29 març 2021]
- MAGNITUD ESTELAR. (s.d.). Boletín Patrón. <https://www.boletinpatron.com/magnitud-estelar/> [consulta: 29 març 2021]
- NASA EXOPLANET SCIENCE INSTITUTE. *NASA Exoplanet Archive*. NASA Exoplanet Archive. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> [consulta: 4 abril 2021]
- NASA, & BRENNAN, P. (s. d.). *Exoplanet-catalog* – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System. <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/4931/corot-11-b/> [consulta: 7 setembre 2021]
- NASA, ESA, & CSA. *Webb’s Launch GSFC/NASA*. James Webb Space Telescope. <https://www.jwst.nasa.gov/content/webbLaunch/index.html> [consulta: 20 setembre 2021]
- NASA. *Eyes On Exoplanets – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Eyes On Exoplanets. <https://exoplanets.nasa.gov/eyes-on-exoplanets/#/>
- NATIONAL GEOGRAPHIC. (2019, 7 març). *Exoplanets 101 | National Geographic* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=EUU0-ZpFoK4>
- P. D. DIAGO NEBOT. (s.d.) *Búsqueda de exoplanetas y zona de habitabilidad*. Valencian International University. Master en Astronomia i Astrofísica. https://svo.cab.inta-csic.es/docs/files/svo/Public/Education/VIU/03-BUS_EXOP.pdf

- PICÓ, A. R. (2020, 4 febrer). *El tiempo para el martes 4 de febrero: Mañana vuelve el invierno*. La Vanguardia. <https://www.lavanguardia.com/vida/20200204/473283049804/el-tiempo-cataluna-madrid-prediccion-avisos-contaminacion-martes-4-febrero.html> [consulta: 13 agost 2021]
- QUINTERO SALAZAR, E. A. (2010). *Medición de los cambios en la Luminosidad de las Estrellas Variables mediante el Procesamiento Digital de Imágenes*. MSc. William Ardila Urueña (dir). Facultad de Ciencias Básicas Universidad Tecnológica de Pereira. Tesis doctoral.
- RIVEIRO, A. (2015, 5 octubre). *Las estrellas variables*. Astrobitácora. <https://www.astrobitacora.com/las-estrellas-variables/> [consulta: 25 març 2021]
- RIVEIRO, A. (2015, 12 octubre). *Magnitud aparente y magnitud absoluta*. Astrobitácora. <https://www.astrobitacora.com/magnitud-aparente-y-magnitud-absoluta/> [consulta: 25 març 2021]
- ROJAS GARCÍA, E. A. (2016, octubre) *Análisis de curvas de luz de exoplanetas utilizando datos de la sonda espacial Kepler*. M.Sc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu (dir). Universidad de San Carlos de Guatemala, departamento de Física. Treball de graduació.
- SAINTONGE, A. (2015, 28 juny). *What are RA and DEC? (Intermediate)*. Curious About Astronomy? Ask an Astronomer. <http://curious.astro.cornell.edu/about-us/112-observational-astronomy/stargazing/technical-questions/699-what-are-ra-and-dec-intermediate> [consulta: 25 juliol 2021]
- SCIENTIA ET TECHNICA Año XVII, No 46, Desembre 2010. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701. [file:///C:/Users/sibil/Downloads/Dialnet-
AlgoritmoParaFotometriaDiferencialDeEstrellasVaria-4532987.pdf](file:///C:/Users/sibil/Downloads/Dialnet-AlgoritmoParaFotometriaDiferencialDeEstrellasVaria-4532987.pdf).
- SOUSSE VILLA, R. *Métodes de detecció i anàlisi d'exoplanetes*. (2011, 11 gener) Barcelona. (treball de recerca) https://www.edubcn.cat/rcs_gene/treballs_recerca/2010-2011-03-3-TR.pdf
- SPACE.COM STAFF. (2015, 29 gener). *Types of Variable Stars: Cepheid, Pulsating and Cataclysmic*. Space.Com. <https://www.space.com/15396-variable-stars.html> [consulta: 23 març 2021]
- TATAY, T. (2020, 17 juliol). *Aberraciones Cromáticas: Qué son, Cómo Evitarlas y Cómo Corregirlas*. dzoom. <https://www.dzoom.org.es/aberraciones-cromaticas/> [consulta: 25 juny 2021]
- TELESCOPIO. [en línia] (2021, 15 febrer). A *Wikipedia, la enciclopedia libre*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Telescopio> [consulta: 2 maig 2021]

Teleskop-Express: Meade 16" LX200 GoTo Telescope ACF SC 406/4064 mm. (s. d.). Teleskop-Express. https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/language/en/info/p5877_Meade-16--LX200-GoTo-Teleskop-ACF-SC-406-4064-mm.html [consulta: 30 juliol 2021]

UFE-OBSERVATOIRE DE PARIS. (s. f.). *Magnitud aparente*. Ventanas Abiertas al Universo. <https://media4.obspm.fr/public/VAU/temperatura/radiacion/luminosidad/magnitud-aparente/APPRENDRE.html> [consulta: 29 març 2021]

VANDERBURG, A. (2017, abril). *Transit Light Curve Tutorial*. Andrew Vanderburg. <https://web.cfa.harvard.edu/%7Eavanderb/tutorial/tutorial.html> [consulta: 28 juny 2021]

VARIABLE STAR. [en línia] (2021, 26 setembre). *Wikipedia, the free encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_star [consulta: 24 març 2021]

WASP-12b –. (2020, 13 abril). WASP Planets. <https://wasp-planets.net/tag/wasp-12b/> [consulta: 29 agost 2021]

ANNEX I

FOTODIF. REALITZACIÓ DE LA CORBA DE LLUM DE WASP-12b.

Després de prendre totes les imatges del trànsit, ens toca processar-les. Per fer-ho, utilitzarem el programa FotoDif, un programa dissenyat per a la mesura de fotometria diferencial i absoluta, per Julio Castellano. Amb FotoDif serem capaços de realitzar una corba de llum i observar com es mostra.

Obrim el programa i ens trobem amb la Fig. 21. Abans de seleccionar les imatges configurem els paràmetres de la nostra observació a *Configuración* (Fig. 22). Només modificarem algunes coses; deixarem la resta amb els valors predeterminats. En el meu cas, he configurat la resolució del sistema òptic, el nombre de comptes mínim, el nombre de comptes on perdem la linealitat i les coordenades de l'observatori.

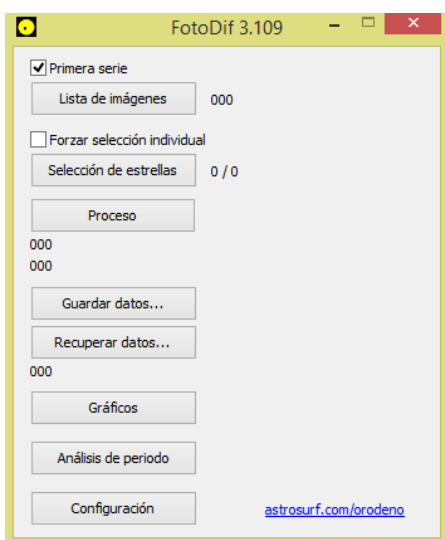


Fig. 21. Inici de FotoDif.

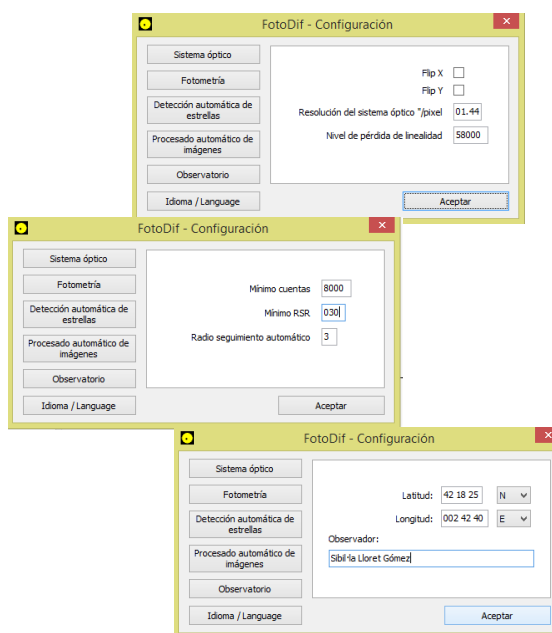


Fig. 22. Paràmetres de configuració.

Seguidament, ja podem processar el trànsit anant a *Lista de imágenes*. És important tenir “check” a la casella *Primera serie* per tal d'esborrar les dades que puguin haver quedat emmagatzemades en l'última utilització del programa. Quan ja s'han carregat, anem a *Selección de estrellas*: aquí és on triarem les estrelles de comparació per fer fotometria diferencial amb l'estrella de l'exoplaneta que hem escollit (Fig. 23). Com que no podem saber de memòria quina és l'estrella que conté el planeta que volem observar, anem a la web de ETD, busquem el nom de l'exoplaneta i cliquem sobre *Show transit predictions for next 365 days*. Des d'allà podrem localitzar l'estrella en qüestió. Seleccionem l'estrella i la marquem com a variable (VAR). Després, triem les estrelles de comparació (CAL): aquestes han de tenir un nombre de comptes dins la linealitat de la CCD de la càmera i idealment haurien de tenir un nombre de comptes o magnituds semblant a l'estrella variable. També és convenient que no es trobin molt lluny de l'estrella variable i que estiguin força aïllades.

Un cop seleccionades totes les estrelles que volem utilitzar cliquem sobre *Aceptar* (part inferior dreta), i ens sortirà un altre cop la Fig. 21. Anem a *Procesar* i quan s'hagin carregat tots els arxius ja podem clicar a *Gráficos*. El gràfic resultant és la corba de llum. Per poder penjar les dades a ETD, haurem de guardar l'arxiu en format de text, simplement fent clic sobre *Guardar como...* .

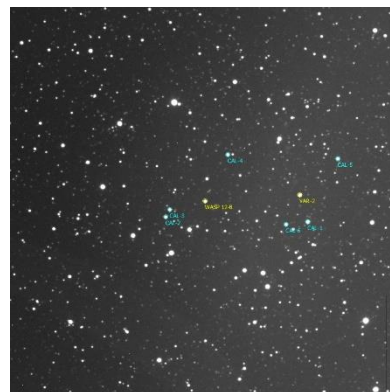


Fig. 23. Selecció d'estrelles.

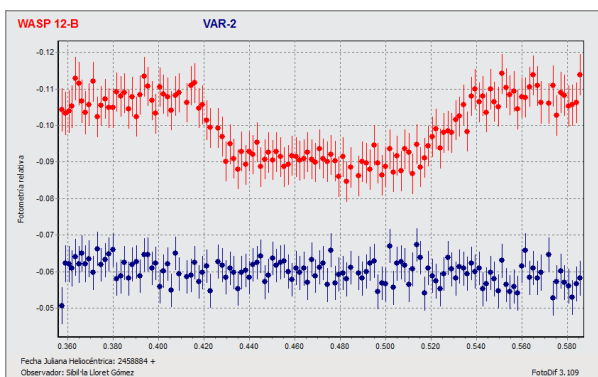


Fig. 24. Corba de llum de WASP-12b en comparació amb una estrella no variable. En vermell, WASP-12b; en blau, estrella no variable.

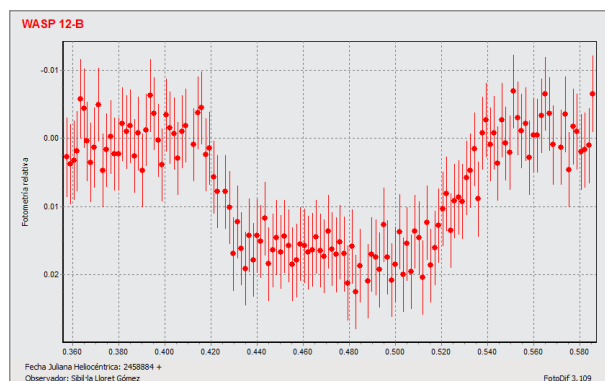


Fig. 25. Corba de llum de WASP-12b.

Com podem observar, hi ha una forma de U pronunciada, indicant que el trànsit s'ha fet correctament.

PUBLICACIÓ DE LES DADES A ETD (EXOPLANET TRANSIT DATABASE)

Ja per acabar, només ens falta publicar els resultats a la ETD, per així contribuir a la recerca científica i facilitar la feina a astrònoms professionals.

Primerament, anem a <http://var2.astro.cz/ETD/index.php> i entrem a *How to contribute to ETD*. Un cop allà, a l'apartat 2 cliquem sobre *on-line protocol*.

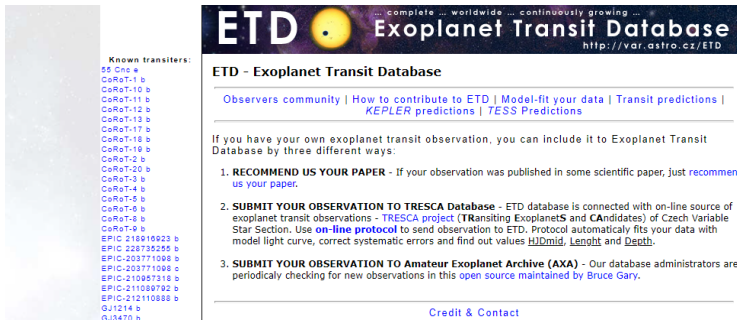


Fig. 26. Com penjar dades a ETD (1).

A partir d'aquí comença el procés on haurem d'anar introduint les dades que hem obtingut i les característiques del nostre trànsit. Primer, seleccionem el nom del nostre exoplaneta (que en el nostre cas es tracta de WASP-12b) i, seguidament, seleccionem l'arxiu en forma de text que hem guardat anteriorment. Com que el format de Julian Date l'hem obtingut en forma heliocèntrica fem clic sobre la casella corresponent. El mateix fem per a *Brightness column* i seleccionem *in magnitudes*.

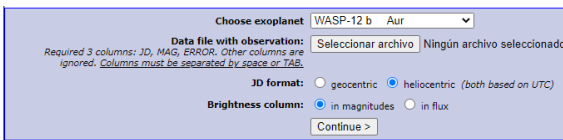


Fig. 27. Com penjar dades a ETD (2).

Fem clic sobre *Continue >* i ens apareixeran una sèrie de dades que en la majoria de casos no haurem de tocar. Per tant, saltem al següent pas anant a *Compute >*.

Veurem que al següent pas ja hi ha la informació del nostre trànsit i hi apareix la nostra corba de llum. D'aquest apartat, tampoc n'haurem de tocar res, ja que les caselles s'emplenen totes soles. És important que ens fixem en la informació que hi apareix sobre el gràfic de la Fig. 29: La *S* ens indica la precisió fotomètrica, *ro* la freqüència de dades i *DQ* (Data Quality) és un indicador de la qualitat

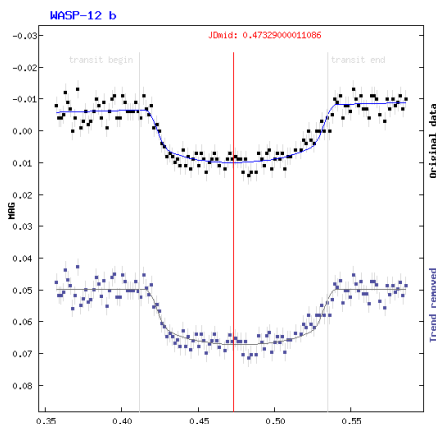


Fig. 28. Com penjar dades a ETD (3).

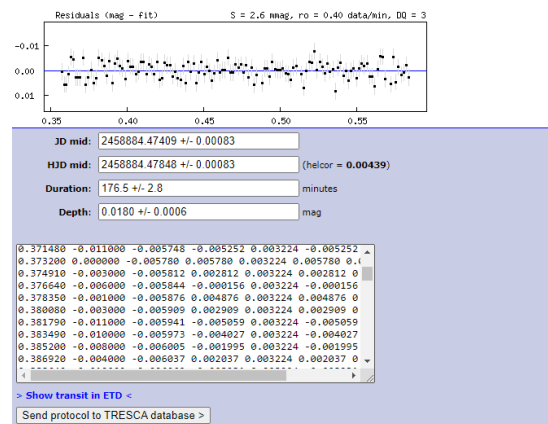
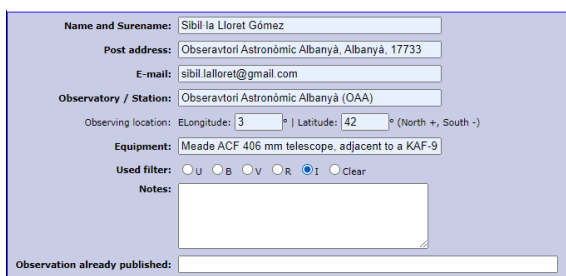


Fig. 29. Com penjar dades a ETD (4).

del nostre informe, que pren valors de l'1 al 5, essent 1 el millor i 5 el pitjor. En el meu cas, he obtingut una DQ de 3, prou bé tenint en compte que és el primer que realitzo.

Fem clic sobre *Send protocol to TRESCA data base* > i ens sortirà el pas on haurem d'introduir les nostres dades personals: nom de l'observador, nom de l'observatori, direcció e-mail... A la mateixa pàgina, al final de tot, ETD ens demanarà que li adjuntem una imatge on es mostri l'estrella variable amb les estrelles de calibració que hem escollit (Fig. 23), amb l'etiqueta *Append map / reference CCD frame*. Després d'haver-la adjuntat, cliquem sobre *Continue* > i ens tornarà a mostrar el trànsit amb totes les dades. Llavors fem clic sobre *SAVE PROTOCOL* ! i ja se'ns hauran publicat les dades a la web.



The image shows a web form with the following fields and options:

- Name and Surname:** Sibillà Lloret Gómez
- Post address:** Observatori Astronòmic Albanyà, Albanyà, 17733
- E-mail:** sibillairet@gmail.com
- Observatory / Station:** Observatori Astronòmic Albanyà (OAA)
- Observing location:** Elongitude: 3 ° | Latitude: 42 ° (North +, South -)
- Equipment:** Meade ACF 406 mm telescope, adjacent to a KAF-9
- Used filter:** Radio buttons for U, B, V, R, I (I is selected), and a Clear button.
- Notes:** A large empty text area.
- Observation already published:** A checkbox.

Fig. 30. Com penjar dades a ETD (5).

ANNEX II

PROCESSAMENT DE LES IMATGES DE WASP-12B AMB ASTROIMAGEJ

Nota: el procés descrit en aquest annex és el que s'ha seguit de manera simplificada per obtenir les dades de WASP-12b. No pretén servir de guia, ja que no s'hi descriuen totes les funcions del software ni les característiques de cadascuna de les seves opcions.

En obrir AstrolmageJ, ens trobem amb la *tool bar*: aquesta serà l'instrument que farem servir per configurar els paràmetres que fan falta per dur a terme correctament la fotometria diferencial. Anem a *File* i cliquem a *Import Image sequence*. Des d'allà, seleccionem una de les imatges del nostre trànsit. Aleshores se'ns obrirà la *Image Display*, des d'on visualitzarem les imatges del trànsit i seleccionarem les estrelles que vulguem utilitzar. Abans, però, ens sortirà una pestanya en la qual és important tenir marcada la casella de *Use virtual stack*. De no ser així, podria passar que no tinguéssim prou memòria al software i no poguéssim acabar de tractar les imatges.

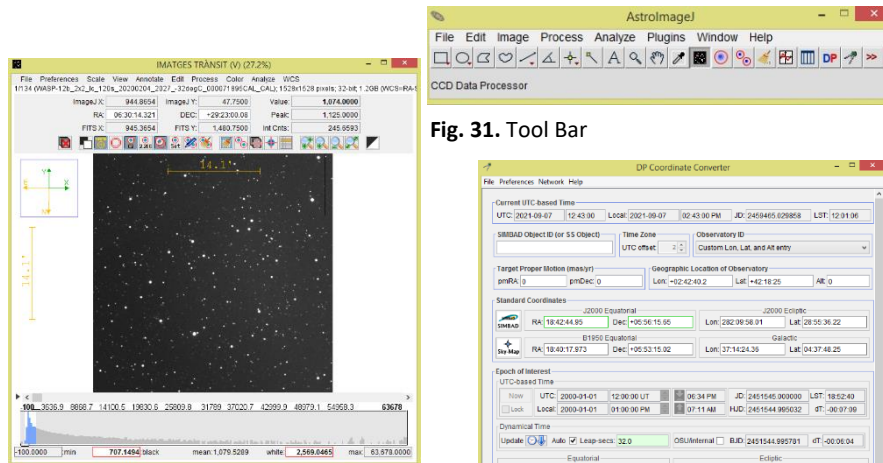


Fig. 32. Image Display.

Fig. 31. Tool Bar

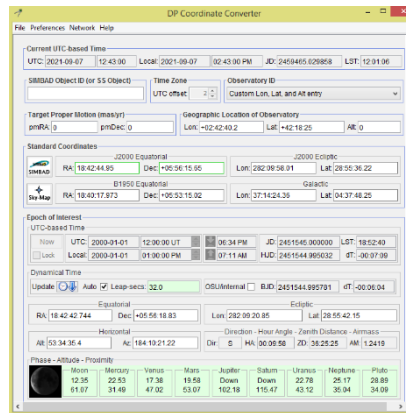



Fig. 33. DP converter.

A la icona , configurarem la localització del planeta i del nostre observatori. Un cop fet, tornem a *Image Display* i cliquem sobre l'estrella que conté WASP-12b. Després d'haver-la clicat, anem a *Plot seeing profile...*, que trobarem anant a *Analyse*, a dalt de tot de la pantalla d'*Image Display*. D'aquesta manera ens sortirà un gràfic que ens servirà per saber quins valors hem d'agafar a l'hora de introduir els paràmetres d'obertura. Els paràmetres d'obertura ens permeten reduir el màxim possible la llum de fons, és a dir, tota aquella que no prové directament de l'estrella que volem observar.

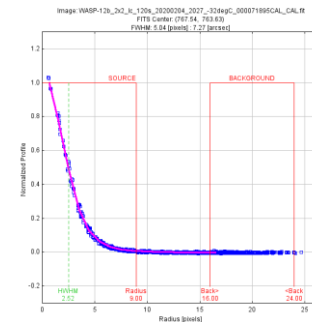



Fig. 34. Profile de l'estrella WASP-12

²¹ Nota: tractarem amb imatges ja calibrades anteriorment.

Un cop fet això entrem a la icona  , la qual ens permetrà començar la fotometria diferencial. Ens apareixerà la pestanya de la Fig. 36 i és aquí on haurem d'introduir les obertures que hem extret a partir de la Fig. 34. Si la localització de l'objecte està introduït en les dades de les imatges, podrem seleccionar la casella *Use RA/DEC to locate aperture positions*. En el nostre cas, l'he deseleccionat, ja que un cop he intentat fer la corba de llum, em posava error perquè no totes les imatges tenien aquesta informació al seu format. Cliquem sobre *Place apertures* i ja podem seleccionar les estrelles que vulguem per fer la fotometria diferencial. En el meu cas, he seleccionat les que es poden veure a la Fig. 35. Després, apremem la tecla Enter i veurem com se'ns obren moltes pestanyes de cop. De moment, només ens interessarà la que mostra com es va formant la corba de llum i esperarem que s'acabi de generar. Un cop s'hagi acabat, anirem a la pestanya *Multi-plot Y-data* i activarem la funció AIRMASS a *trend data set*. Després ens caldrà fixar-nos en el valor de RMS que apareixerà a dalt del gràfic: ens indica el coeficient de la massa d'aire present al gràfic. Per tal de minimitzar-lo el màxim possible, anirem a la pestanya *Multi-Plot Reference Star Settings* i haurem d'anar seleccionant i deseleccionant les caselles de les estrelles que hem triat per trobar la combinació que ens porti el valor més petit de RMS. Un cop fet això, ja podem anar a Multi-plot Main i introduir les dades de l'observador.

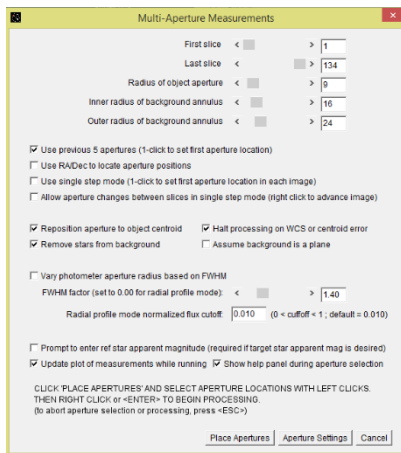


Fig. 36. Multi-Aperture Measurements.

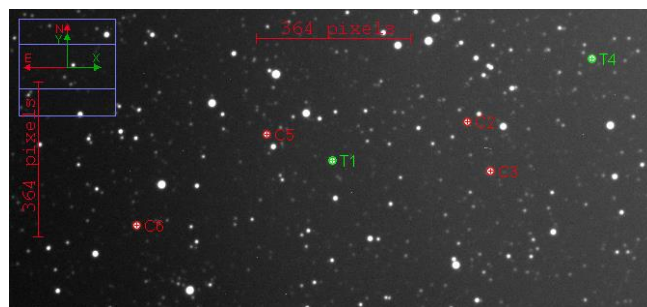


Fig. 35. Selecció d'estrelles.

RESULTAT FINAL:

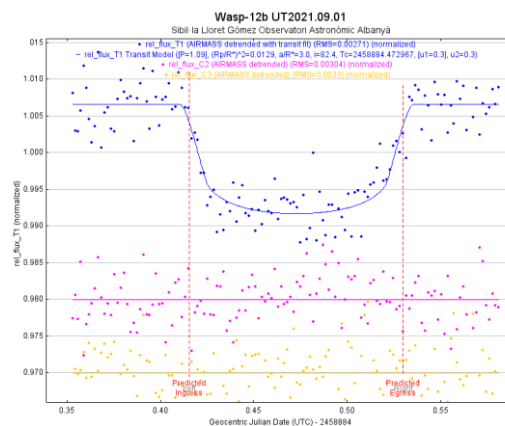


Fig. 37. Corba de llum resultant de WASP-12b