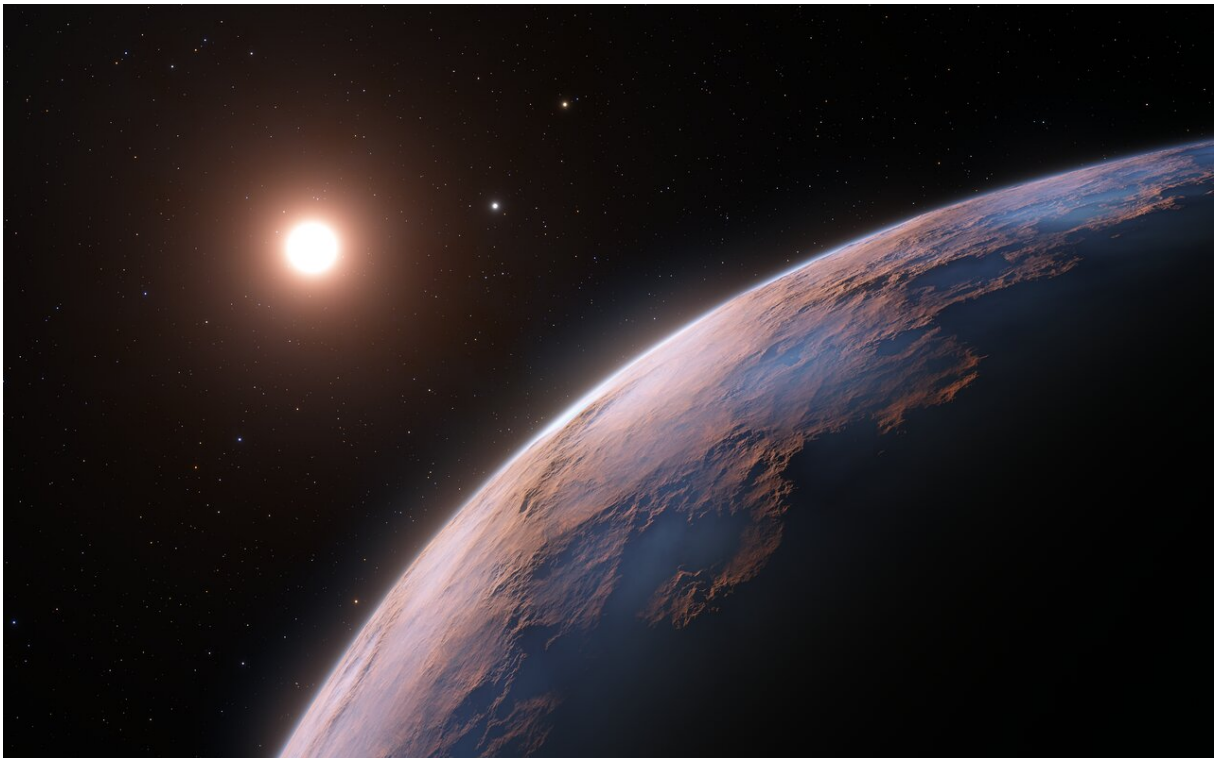


DESCOBRINT NOUS HORIZONS: CONFIRMANT L'EXOPLANETA TOI 1131.01 b



Treball de Recerca
Anna Iglesias Rodríguez
B2A
Institut de Palamós
Curs: 2023/24
Tutors: Elisabet Aguilar/ David Martí

“Mankind was born on Earth. It was never meant to die here”.

Cooper, Interstellar

AGRAÏMENTS

A en Rafael Balaguer, director de l'observatori de Can Roig i president de l'Associació Astronòmica de Girona, per ajudar-me a realitzar el trànsit i l'espectre de l'exoplaneta TOI 1131.01 b, sense ell hauria sigut impossible portar a terme la part pràctica del treball. Així mateix, vull expressar la meva gratitud pel seu ajut altruista, que ha estat constant al llarg del projecte.

Al meu pare, per haver estat a la meua vora durant tot el procés de seguiment del planeta i per haver-me brindat el seu continu suport al llarg del desenvolupament d'aquest treball. La seva presència i orientació han estat inestimables i han contribuït significativament a l'èxit d'aquest projecte.

A l'Elisabet Aguilar, qui va ser la persona que em va guiar inicialment i em va facilitar l'oportunitat de connectar amb en Rafael Balaguer, una col·laboració que va tenir un impacte profund i indispensable en el treball.

I finalment, vull agrair a en David Martí per la seva orientació durant els darrers mesos de l'execució del treball.

RESUMEN

La finalidad principal de este estudio es llevar a cabo una investigación sobre los exoplanetas, más concretamente, determinar si se puede confirmar y caracterizar químicamente un exoplaneta con un equipo medianamente sencillo.

La primera parte de este trabajo incluye una revisión bibliográfica que nos permite entender el universo, más concretamente, los planetas y adentrarnos en el funcionamiento de su detección, su constitución química y los programas necesarios para la realización del marco práctico.

En la segunda parte se lleva a cabo el estudio del tránsito y la espectroscopia del exoplaneta TOI 1131.01 b en el observatorio de Can Roig, para determinar su existencia, su composición química y, finalmente, verificar si este es potencialmente habitable.

El trabajo concluye que, aunque debido a la tecnología actual no se puede determinar si el exoplaneta es potencialmente habitable, el objeto TOI 1131.01 b contiene los elementos esenciales para la vida tal y como la conocemos, conocidos como CHONPS (Carbono, Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno, Fósforo y Azufre). Este estudio no solo contribuye al conocimiento actual sobre exoplanetas, sino que también destaca la viabilidad de realizar investigaciones con equipos astronómicos no tan avanzados.

Palabras clave: exoplaneta, tránsito, espectroscopia, potencialmente habitable

ABSTRACT

The main purpose of this study is to conduct research on exoplanets, specifically determining whether it is possible to confirm and chemically characterize an exoplanet with moderately simple equipment.

The first part of this work includes a literature review that allows us to comprehend the universe, specifically planets, and delve into the mechanics of their detection, chemical composition, and the necessary programs for the practical framework.

In the second part, the transit and spectroscopy study of the exoplanet TOI 1131.01 b is carried out at the Can Roig observatory to determine its existence, chemical composition, and ultimately, to verify its potential habitability.

The study concludes that, although current technology does not allow a definitive determination of the exoplanet's habitability, the object TOI 1131.01 b contains the essential elements for life as we know it, known as CHONPS (Carbon, Hydrogen, Oxygen, Nitrogen, Phosphorus, and Sulfur). This study not only contributes to current knowledge about exoplanets but also highlights the feasibility of conducting research with less advanced astronomical equipment.

Keywords: exoplanet, transit, spectroscopy, potential habitability

ÍNDIX

INTRODUCCIÓ.....	9
Objectius.....	11
Hipòtesis.....	12
Metodologia.....	12
MARC TEÒRIC.....	14
1. L'UNIVERS.....	14
1.1. La formació de l'Univers.....	14
1.2. Les galàxies.....	15
1.3. Les estrelles.....	15
1.3.1. Classificació de les estrelles.....	16
2. ELS PLANETES.....	17
2.1. Condicions necessàries perquè un objecte sigui categoritzat com a planeta.....	17
2.2. Exoplanetes.....	18
2.2.1. La història dels exoplanetes.....	19
2.2.2. Classes d'exoplanetes descoberts.....	19
3. MÈTODES DE DETECCIÓ D'EXOPLANETES.....	21
3.1. Mètode de trànsit.....	21
3.2. Velocitat radial.....	21
3.3. Astrometria.....	22
3.4. Imatge directa.....	22
3.5. Microlent gravitatòria.....	23
4. ESPECTROSCÒPIA.....	24
4.1. VisualSpec.....	25
5. MISSIÓ TESS.....	26
5.2. TOI: Objectes d'interès de la missió TESS.....	27
6. BASE DE DADES ETD (EXOPLANET TRANSIT DATABASE).....	28
6.1. Projecte TRESCA.....	28
7. ELS OBSERVATORIS.....	29
7.1. Astrogirona.....	29
7.2. L'observatori de Can Roig.....	29
MARC PRÀCTIC.....	31
8. MATERIAL UTILITZAT DURANT LA DETECCIÓ.....	31
8.1. Muntura.....	31
8.2. Telescopi d'autoguiat.....	32
8.3. Telescopi d'astrofotografia.....	32
8.4. Telescopi d'observació solar.....	33
8.5. Telescopi d'observació visual.....	34

8.6. Cúpula semiesfèrica.....	35
9. REALITZACIÓ DEL TRÀNSIT DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01 b.....	37
10. RESULTATS DEL TRÀNSIT DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01.....	42
11. REALITZACIÓ DE L'ESPECTRE DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01 b.....	51
12. RESULTATS DE L'ESPECTRE DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01.....	59
13. CONCLUSIÓ.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	68
ANNEX 1. FOTOGRAFIES DEL TRÀNSIT.....	73
ANNEX 2. INFORME DEL TRÀNSIT DE TOI 1131.01 b COMPLET.....	84
ANNEX 3. ANÀLISI ESPECTROSCÒPICA COMPLETA DE TOI 1131.01 b.....	88

INTRODUCCIÓ

La gran majoria de les pel·lícules de ciència-ficció que tenim al nostre abast tracten temes futuristes que, molts, estan relacionats amb les formes de vida extraterrestres. Una de les productores més famoses de l'actualitat és Marvel; tothom ha vist almenys una pel·lícula d'aquesta companyia. Les pel·lícules Marvel tracten amb ciència superavançada que permet des d'endinsar-se en el món quàntic, fins a explorar els llocs més llunyans del nostre univers. Aquestes històries ens han fet veure més de prop tots aquests avenços, i això ha despertat una ambició en els científics i, fins i tot a la gent aficionada a aquesta mena de pel·lícules a trobar la manera d'aconseguir aquest tipus de tecnologia i ciència que ens permetrien, per exemple, trobar nous planetes potencialment habitables i, d'aquesta manera poder arribar a trobar formes de vida completament desconegudes. Jo mateixa soc una d'aquestes aficionades, sempre m'han interessat els temes relacionats amb la vida fora del nostre planeta.

S'estima que l'univers té un diàmetre de noranta-tres mil milions d'anys llum, si tenim en compte que la nostra galàxia és només una entre els dos bilions de galàxies que podrien existir al cosmos¹, trobem que amb prou feines ens hem mogut del nostre petit entorn. Ara bé, si tenim en compte que, a l'univers, podrien haver-hi bilions de galàxies, que cada una d'elles contindria milers de milions d'estrelles, i que cadascuna d'aquestes tindria, almenys, un planeta orbitant² al seu voltant, creure que la Terra és l'únic planeta amb vida pot arribar a ser egocèntric. En algun moment de la història de l'univers ha hagut d'existir vida més enllà de la Terra, perquè només havent descobert uns 4516 exoplanetes, ja trobem alguns possibles candidats. A més, hi ha més o menys cinquanta mil milions de planetes a la nostra galàxia, d'aquests, 500 milions estan situats en una regió de la galàxia que podria arribar a

¹ Sinònim d'univers, és tot allò que existeix

² Camí o ruta que segueix un objecte físic mentre gira al voltant d'un altre a causa d'una força central, com ara la força de la gravetat

ser habitable, així que ja tenim 500 milions de planetes en els quals, de partida podrien albergar vida (Bertran, 2021).

Durant els últims anys, aquesta idea ha augmentat la meva motivació envers la vida extraterrestre³, donant vida així mateix, al meu interès en els exoplanetes, aquells planetes que trobem fora del nostre sistema solar. Així que, a l'hora d'escollir un tema per al meu treball de recerca, em va passar pel cap la idea de dedicar la meua recerca a aquest. Vaig estar rumiant com podria enfocar-ho d'una manera interessant, finalment, després de parlar amb la tutora, va sorgir el tema ideal per aquest treball: l'observació i estudi d'exoplanetes, el seu trànsit i la seva composició química (que ens podria donar pistes envers la seva habitabilitat).

Més detalladament, aquest treball estarà basat en l'estudi del trànsit de l'exoplaneta TOI 1131.01 b, és a dir, estudiar el canvi de lluminositat de l'estrella amfitriona d'aquest planeta, per així reconèixer el moment en el qual TOI 1131.01 b transita entre l'estrella que orbita i la terra. Què passa en aquest moment? Que des de la Terra veiem que la llum de l'estrella disminueix - mínimament - perquè l'exoplaneta està tapant una part de la seva estrella. El que farem és estudiar aquesta diferència de llum que hi ha quan veiem l'estrella sense que hi passi el planeta i just el moment en què el planeta està passant pel davant. D'aquesta manera, el petit eclipsi⁴, fa que la llum que nosaltres detectem traci una corba, ajuntant-nos a saber diferents aspectes del planeta com ara, la seva mida.

Per a poder dur a terme aquest treball, hem de tenir clars una varietat de conceptes, aquests estaran estructurats de la següent manera.

En primer lloc, començarem amb el més primigeni i general, l'Univers. Aquí ens centrarem a entendre la seva formació i extensió.

Seguidament, ens endinsarem en el món de les galàxies. La seva formació i composició.

³ Que prové de fora de la Terra

⁴ Quan un objecte celeste passa per davant d'un altre

A continuació, parlarem sobre les estrelles. Aquestes són les que ens permeten la vida com la coneixem. Coneixerem els diferents tipus.

Per altra banda, veurem els planetes. Ells són els protagonistes d'aquest treball, així que ens ha de quedar totalment clar el seu concepte. Sobretot els exoplanetes, ja que estarem treballant amb un en concret: TOI 1131.01 b.

Més endavant, tractarem més les formes de detecció d'exoplanetes, endinsant-nos més en el que nosaltres utilitzarem, el mètode de trànsit.

Tot seguit, ens endinsarem en el món de l'espectroscòpia, aquesta és la que ens ajudarà a distingir la composició química de l'exoplaneta. Esmentarem eines que s'usen per a aquest procés com ara el VisualSpec.

Així mateix, aclarirem que és la Missió TESS i la seva importància en aquest treball. A més, comentarem la seva relació amb els objectes d'interès TOI.

Altrament, necessitem conèixer diversos tipus d'informació sobre les bases de dades, més concretament sobre la base de dades ETD (Exoplanet Transit Database), ja que aquesta és una de les principals.

De la mateixa manera, parlarem sobre els observatoris, quina és la seva funció i importància. En aquest punt comentarem l'observatori usat per al nostre estudi.

L'últim punt en què ens centrarem serà l'equip que farem servir per a l'estudi del trànsit, és a dir, el material necessari per a realitzar la part pràctica.

Finalment, donarem pas a l'estudi pràctic: el què hem fet, com ho hem fet, els nostres obstacles i sobretot les nostres conclusions.

Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és comprovar si amb mitjans relativament senzills és possible detectar el trànsit d'un exoplaneta. A partir d'aquest objectiu podem trobar altres relacionats:

- Reconèixer i confirmar exoplanetes dubtosos o possibles falsos positius.
- Detectar les variacions de l'espectre de l'exoplaneta durant i acabat el trànsit.
- Caracteritzar químicament el planeta estudiat.
- A partir de la caracterització química, detectar si l'exoplaneta conté els elements químics indispensables per a la vida.

Hipòtesis

A partir dels objectius que em plantejo deriven les següents hipòtesis:

- Es poden detectar els trànsits d'exoplanetes partint d'uns mitjans relativament senzills.
- Les variacions trobades durant l'estudi de l'espectre proporcionen informació rellevant sobre la composició de l'atmosfera i altres característiques de l'exoplaneta.
- La composició química identificada proporciona indicis importants sobre la possibilitat d'existència de condicions adequades per a la vida.

Metodologia

El seguiment d'un exoplaneta no és una tasca fàcil, però amb el temps s'han anat descobrint diferents mètodes per poder trobar aquests planetes que ens transmeten curiositat. Un d'aquests mètodes és el mètode de trànsit, aquest és el que més planetes ha aconseguit trobar. Apuntant cap a l'estrella que orbita el planeta amb un detector molt sensible, aquest ens permet estudiar amb detall la llum que emet, i quan el planeta que busquem passa per davant de l'estrella ens tapa una petita part de la llum que emet l'estrella, cosa que ens fa percebre una lleugera disminució en la lluminositat que rebem, fent que ens adonem que davant de l'estrella trobem un planeta. Seguidament, analitzant les corbes de llum que percebem durant el trànsit,

podem descobrir la mida del planeta i la distància entre aquest i la seva estrella (Esero, 2017). A causa de l'efectivitat d'aquest mètode, és el que utilitzarem en el desenvolupament d'aquest treball.

L'estudi d'aquest trànsit el realitzarem des de l'observatori planetari de Can Roig, a Llagostera, amb l'ajuda d'en Rafael Balaguer Rosa i els estris que necessitem per a realitzar el trànsit.

Per a assegurar-nos que el trànsit d'un l'exoplaneta sigui efectiu hem necessitat el següent equipament:

- El telescopi refractor apocromàtic William Optics FLT-98 (98 mm de diàmetre i focal de 618 mm, F/6.3)
- La muntura Skywathcer EQ-8 Pro
- Càmera CCD QHY9
- Programa de control Stellarium
- Programa de captura NINA
- Programa d'autoguiat PHD2 Guiding
- Base de dades ETD (Exoplanet Transit Database)

MARC TEÒRIC

1. L'UNIVERS

1.1. La formació de l'Univers

Per molt difícil que sigui concebre-ho, segons va dir Garlick (2004) al seu llibre "Astronomy", va haver-hi un moment, fa uns 13900 milions d'anys, en què l'Univers existia en un únic punt. Tot el que va haver-hi a continuació, espai, temps, matèria i energia, estava atapeït en un punt infinitament calent i dens. De sobte, per raons que potser no coneixerem mai, aquesta llavor inicial es va expandir en una bola de foc de creació; el Big Bang (p.262).

La teoria del Big Bang, la més acceptada sobre l'origen de l'univers, sosté que tot va començar amb un punt infinitament petit. En els primers instants, era tan calent, que ni els àtoms⁵ podien sustentar vida, era un pèlag de partícules subatòmiques, però a mesura que l'expansió va posar-se en marxa, la seva temperatura es va reduir gradualment, uns tres minuts després, aquesta reducció de temperatura, va fer possible la unió d'aquestes partícules subatòmiques donant forma als primers àtoms d'hidrogen. No obstant aquest veloç esdeveniment, passarien uns tres-cents mil anys fins que aquests àtoms fossin prou estables per a donar lloc a les primeres estrelles (Garlick, 2004, p. 262).

A mesura que les estrelles es transformaven i col·lapsaven, el material alliberat en esclatar, es va estendre per l'univers, formant les primeres galàxies, planetes i tot el que veiem a l'univers actualment.

L'univers és infinitament extens, i amb el pas del temps, s'han anat desenvolupant diferents tecnologies per poder observar la mida de tots aquests cossos que rebem, que, des del nostre punt de vista, semblen tan petits. En cas contrari, si no disposéssim d'aquests avenços tecnològics, la nostra percepció de l'Univers no

⁵ La part més petita de la matèria que conté les propietats d'un element químic

aniria més enllà de les teories dels antics astrònoms, que com he dit només són teories.

1.2. Les galàxies

Un altre concepte bàsic relacionat amb aquest treball són les galàxies. Una galàxia és un conglomerat d'objectes astronòmics i matèria, com, ara bé: gas i pols, bilions d'estrelles amb els seus sistemes solars respectius, nebuloses, asteroides, cometes, forats negres i, fins i tot, matèria obscura; tots aquests agrupats per la força de la gravetat. (Instituto de Física Técnica, 2021)

Hi ha diferents tipus de galàxies, algunes són tan grans que la mateixa llum tarda milers d'anys en travessar-les, i n'hi ha d'altres amb una mida més considerable.

Els astrònoms han classificat les galàxies en diferents tipus; espirals, espirals barrades, lenticulars, irregulars, el·líptiques nanes, irregulars nanes, etc.

1.3. Les estrelles

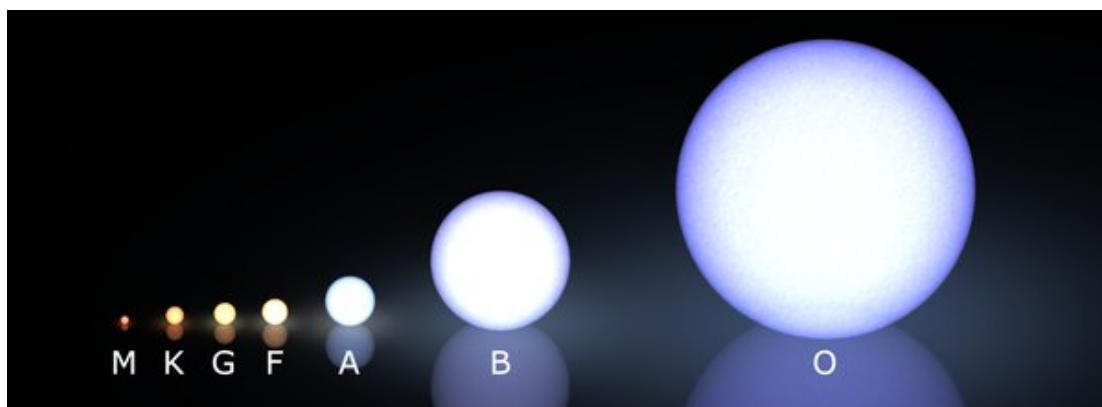
Uns dels objectes astronòmics més reconeguts són les estrelles. Aquestes són esferes lluminoses i extremadament calentes que donen llum als planetes que els orbiten, en cas que en tinguin. National Geographic (2023), defineix les estrelles més detalladament:

Són motors d'energia còsmica que produeixen calor, llum, raigs ultraviolats, raigs X i altres formes de radiació. Estan compostes gairebé íntegrament de gas i plasma, un estat de superescalfament de la matèria composta de partícules subatòmiques. Encara que l'estrella més coneguda, el Sol, existeix en solitari, tres de cada quatre estrelles existeixen com a part d'un sistema binari compost per dues estrelles orbitant mútuament.

1.3.1. Classificació de les estrelles

Trobem les estrelles classificades en diferents tipus a partir de la seva classificació estel·lar o la seva classificació espectral; en aquest treball ens centrarem en aquesta última. La classificació espectral separa les estrelles en funció de la llum de l'espectre visible que emeten. Aquest tipus de classificació també és conegut com a Morgan–Keenan, que separa les estrelles en 7 tipus: O, B, A, F, G, K i M (El Gran Observatorio, 2020)

Figura I: Tipus d'estrelles i la seva dimensió



Font: PRASAD, ARYAN. «Are there different star types?». *Quora* (2020)

2. ELS PLANETES

Els planetes són cossos celestes que orbiten al voltant d'una estrella, no emeten llum pròpia, sinó que reflecteixen la llum que emet la seva estrella. Es formen a partir de la nebulosa solar, discos de gas i pols que orbiten les estrelles més joves.

Inicialment, es forma una acumulació de pols, la “llavor del planeta”, a poc a poc, gràcies a l'atracció gravitatòria, s'agrega matèria a aquesta llavor produint un solc en el disc amb la forma de la seva òrbita (La Vanguardia, 2016).

Depenent de la distància amb l'estrella, els planetes tenen un tipus de composició o una altra. Els planetes que es troben a l'interior de l'òrbita, com Venus, tenen unes temperatures molt elevades a causa de la seva proximitat amb l'estrella que orbiten. Per altra banda, els planetes que trobem a la zona exterior de l'òrbita, com ara Neptú, reben molta menys radiació portant que la seva superfície sigui molt més freda. Ambdues zones tenen condicions extremes que condicionen l'existència de vida, però trobem diferents estrelles que tenen una zona habitable a la seva òrbita, un bon exemple és la nostra. El sol té una zona en la seva òrbita en què les condicions, les temperatures i radiacions no són extremes, cosa que fa possible que el nostre planeta, la Terra, pugui sustentar vida.

2.1. Condicions necessàries perquè un objecte sigui categoritzat com a planeta

La Unió Astronòmica Internacional va establir diferents requisits que un astre ha de complir per poder ser nomenat planeta. Un planeta ha de ser un cos celeste que manté una òrbita regular al voltant d'una estrella, no pot ser el satèl·lit d'un altre planeta. D'altra banda, ha de tenir prou massa perquè la seva gravetat li permeti tenir una forma esfèrica i ha d'haver pogut netejar la seva òrbita d'altres objectes (Algarabía, 2022).

Si un objecte astronòmic no compleix aquestes condicions, es pot classificar en dues categories:

- **Planeta nan:** aquests objectes completen totes les característiques d'un planeta, però no són capaços de netejar l'entorn de la seva òrbita, cosa que els extreu de poder ser classificats com a planetes.
- **Cossos menors del sistema solar (Small Solar System body):** tots els altres cossos que orbiten el Sol, però no compleixen les altres condicions -sense incloure els satèl·lits- formen part d'aquest grup. Els cometes són un exemple d'aquests objectes astronòmics. (NASA, 2023)

2.2. Exoplanetes

El terme "exoplaneta" fa referència un planeta fora del nostre sistema solar, és a dir, que orbita una altra estrella.

S'han confirmat més de 5.000 exoplanetes fins a la data. Alguns d'ells són d'una gran massa, comparable a la de Júpiter, però orbiten a distàncies molt més pròximes a les seves estrelles amfitriones com Mercuri ho fa al voltant del nostre Sol. D'altres presenten una composició predominantment rocosa o glacera, i molts d'ells simplement no tenen equivalents en el nostre sistema solar. Existeixen sistemes amb la particularitat de contenir diversos planetes, casos en els quals un planeta orbita dues estrelles i fins i tot uns pocs exoplanetes que podrien albergar les condicions adients perquè l'aigua sigui estable a la seva superfície, un element crucial per a la vida tal com la concebem.

Per tal d'explicar la diversitat dels exoplanetes, els científics estableixen correlacions amb planetes del nostre sistema solar, emprant nomenclatures com superterres, júpiters calents o mini-Neptuns. Aquestes relacions proporcionen orientació per a comprendre característiques com la grandària, l'òrbita i la temperatura dels exoplanetes. (The European Space Agency)

2.2.1. La història dels exoplanetes

Durant els anys vuitanta, els investigadors Geoffrey Marcy i Paul Butler de la Universitat de Berkeley, a Califòrnia, van obrir-nos les portes al món dels exoplanetes. Van desenvolupar una nova tècnica que es basava en l'efecte Doppler⁶, per a detectar planetes al voltant d'estrelles. En poques paraules, aquest mètode implicava l'anàlisi del canvi de freqüència Doppler de la llum estel·lar per a detectar petites oscil·lacions⁷ a l'estrella, causades per les lleugeres pertorbacions gravitacionals produïdes per cossos planetaris.

Uns anys després, l'any 1995, un equip liderat per Michel Mayor de l'Observatori de Ginebra⁸ va anunciar el descobriment del primer planeta fora del nostre sistema solar mitjançant l'ús de l'astrometria. Aquest exoplaneta, conegut com a Pegàs 51B, va ser descobert gràcies a la seva dimensió mentre orbitava al voltant de l'estrella 51 Pegàs.

Posterior a aquest extraordinari descobriment, la tècnica Doppler, va començar a donar els seus fruits, portant a l'equip de Berkeley a confirmar públicament sis nous exoplanetes el març de 1997 a Tenerife. (Trigo i Rodríguez, 2000, pàg. 125)

2.2.2. Classes d'exoplanetes descoberts

Els exoplanetes són extremadament variats, podem trobar alguns més petits que la terra o increïblement més gran que aquesta, tot i això, hi ha diferents tipus en què es classifiquen per a conèixer més la seva similitud a planetes que coneixem de més a prop.

Gegants gasosos: aquest són planetes de grans dimensions compostos majoritàriament d'heli i hidrogen. Similars a Júpiter i Saturn, aquests planetes gasosos es troben molt a prop de les seves estrelles mares, amb òrbites de fins a 18

⁶ Doppler: canvi de freqüència que es produeix en la recepció de les ones

⁷ Canvi periòdic d'una característica mesurable en un sistema físic

⁸ Versoix, Suïssa

hores. Aquest fenomen és completament atípic en comparació amb el nostre sistema solar, ja que els planetes d'aquest tipus no es troben a distàncies tan curtes del sol, sinó que són els planetes més propers al Sol són rocosos i es troben a una distància molt més gran. Un exemple d'aquest tipus de planeta, és el famós Pegàs 51B.

Planetes neptunians: els exoplanetes dins d'aquest grup tenen mides semblants a Neptú i Urà, amb atmosferes dominades per hidrogen i heli i nuclis de roca i metalls més pesants. Dins d'aquests, també s'estan descobrint minineptuns, planetes més petits que Urà i Neptú, però més gran que la Terra. OGLE-2005-BLG-390L b és un exemple d'un exoplaneta neptunià.

Superterres: aquests planetes són més grans que la terra, però més petits que Neptú. El seu nom no està relacionat amb la composició, és a dir, que s'anomenin superterres no vol dir que siguin similars a la terra químicament. Tot i que no existeix cap planeta d'aquesta mena al nostre sistema solar, les superterres són bastant comunes en el cosmos. Els planetes que es troben en aquest grup, poden ser tant gasosos com rocosos o, fins i tot, ambdós. Gràcies a la seva varietat de possibilitats de composició, les superterres són exoplanetes molt interessants. Barnard's Star b, descoberta per Ignasi Ribas⁹, és la segona superterra més propera a nosaltres.

Planetes tel·lúrics: els planetes tel·lúrics tenen una composició rocosa, de silicat¹⁰, aquosa o de carbó. Aquests exoplanetes també tenen una composició dominada per ferro, roques i una superfície líquida o sòlida. Dins d'aquest grup, s'han trobat exoplanetes que podrien ser potencialment habitables, que ens encaminen i ajuden a continuar estudiant planetes en els quals podríem trobar formes de vida. (NASA, 2022)

⁹ Astrònom i director de l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)

¹⁰ Compost químic que conté silici en forma d'anió

3. MÈTODES DE DETECCIÓ D'EXOPLANETES

La detecció directa d'exoplanetes és una tasca complexa, de manera que s'han creat diverses estratègies per identificar-los. Gràcies a tota l'evolució tecnològica de la nostra societat, hem pogut trobar planetes fora del nostre sistema solar amb l'ajuda de diversos mètodes de detecció. Existeixen una gran varietat de mètodes.

3.1. Mètode de trànsit

El mètode de trànsit, és el mètode amb el qual s'han descobert la major part d'exoplanetes. Aquest mètode es porta a terme a través del trànsit d'un planeta, és a dir, quan el planeta passa entre l'estrella i l'observador. Això ens permet detectar una variació en la lluminositat que percebem, oferint indicis que algun objecte astronòmic ha interceptat una part de la llum estel·lar. (NASA)

Aquestes variacions de lluminositat es poden representar com a corbes en un gràfic, on representem la variació de la llum en un període específic de temps.

Per a realitzar la part pràctica, hem fet ús d'aquest mètode, cosa que ens ha permès extreure uns bons resultats.

Un dels inconvenients del mètode de trànsit és el terme fals positiu, aquest fa referència a la disminució de la llum que rebem, ja que un objecte -que no és un planeta- passant davant de l'estrella. La diferència entre el trànsit d'un planeta i un fals positiu, es troba en la corba de llum, la seva forma alternada i profunditat percentual la diferencien d'un planeta. (Howard Community College)

3.2. Velocitat radial

Aquest mètode es basa en l'Efecte Doppler, és a dir, en el canvi de freqüència¹¹ aparent d'una ona produït pel moviment relatiu de la font respecte al seu observador. Quan el planeta orbita al voltant de la seva estrella, exerceix una atracció gravitatòria

¹¹ Mesura del nombre de cops que es repeteix un fenomen per unitat de temps

sobre l'estrella mateixa. Aquesta atracció fa que l'estrella també es mogui al voltant d'un punt de massa comuna al centre del sistema planetari.

Les oscil·lacions de l'estrella poden ser detectades a partir de petits canvis en les línies espectrals, segons l'estrella s'acosta a nosaltres (desplaçament cap al blau) o s'allunya (desplaçament cap al vermell). Aquest és un mètode que ens ajuda, sobretot, a la detecció de planetes gegants que estiguin molt a prop de l'estrella. (Vicente Díaz, 2017).

3.3. Astrometria

L'astrometria es basa en la mesura de la distància relativa que hi ha entre l'estrella que observem i les que es troben prop d'ella. I com es pot confirmar un exoplaneta amb aquest procés?

Doncs, a causa de la interacció d'un planeta amb la seva estrella, la distància entre aquesta i altres estrelles properes pot variar, oferint-nos indicis de la possible presència d'un objecte astronòmic orbitant l'estrella amfitriona.

Tot i que aquest mètode té el potencial de confirmar exoplanetes, és considerat un dels més complicats i difícils d'implementar, ja que requereixen una gran precisió en les mesures astronòmiques. Per aquesta raó, un nombre molt limitat de planetes s'han descobert utilitzant l'astrometria. (Universitat internacional de València, 2022)

3.4. Imatge directa

Com el seu nom indica, la imatge directa consisteix en la realització de fotografies de l'exoplaneta de forma directa, però, com és possible això?

En intentar fotografiar un exoplaneta el que no ens ho permet és l'estel amfitrió, llavors el que fa aquest mètode és "tapar" d'alguna forma l'estrella per poder detectar el reflex de la llum sobre el planeta en longituds d'ona infraroja. Un dels grans

avantatges de la imatge directa és que és menys probable que ens aporti falsos positius, al contrari del mètode de trànsit. (Universe Today, 2018)

3.5. Microlent gravitatòria

La microlent gravitatòria és el mètode en el qual els camps gravitatoris d'un estel i el planeta actuen juntament per amplificar o concentrar la llum d'un estel llunyà. Per a assegurar-nos que aquest mètode sigui efectiu, els tres objectes han d'estar gairebé perfectament alineats.

Tot i ser un bon mètode de detecció, té un inconvenient denotat, les deteccions que es porten a terme no es poden repetir, consegüentment, per acabar de confirmar aquests planetes, haurien de ser estudiats mitjançant altres mètodes. Deguda la precisió necessària per a poder tenir resultats concloents, la microlent gravitatòria és un mètode poc usual. (Univerzoo Cuantico, 2021)

4. ESPECTROSCÒPIA

L'espectroscòpia és el camp que ens permet trobar la composició química d'un exoplaneta a través de l'estudi de la quantitat de llum que absorbeix, reflexa o emet un objecte. Com ho fa? Descompon la llum i mesura les diferents longituds d'ona de llum visible i no visible.

Aquest procediment s'estudia mitjançant l'anàlisi de l'espectre. En aquest context, quan la llum blanca travessa determinats elements òptics, com ara prismes o xarxes de difracció, es fragmenta i es descompon en els diversos colors que la componen. Quan l'element òptic dispersiu és prou potent, pot separar els colors més enllà de la capacitat de percepció de l'ull humà. La raó d'aquest fenomen, és que la llum és una ona, i està formada per diverses freqüències. Els colors que percebem com blaus, tenen freqüències més altes que els colors vermells. Els rajos infrarojos, que no són visibles per a nosaltres, tenen freqüències encara més baixes, mentre que els rajos ultraviolats, també invisibles, tenen freqüències més altes que els colors blaus. L'anomenat "espectre" fa referència a la separació de les diferents freqüències presents en la llum o, més específicament, en la radiació, i implica mesurar la quantitat d'energia percebuda en cada una d'aquestes freqüències. (Sociedad Española de Astronomía)

Com és que podem descobrir la composició química d'un planeta a partir d'aquest mètode? En resum, l'espectroscòpia ens dona la capacitat d'examinar la composició de la llum rebuda i inferir quanta energia rep un astre per a cada "color" específic, on cada color es correspon a una longitud d'ona o freqüència única. Utilitzant aquestes dades, podem crear un gràfic que mostra la intensitat de la llum en relació amb la longitud d'ona (el "color"), i aquest gràfic ens ofereix el que busquem des d'un principi, la composició química de l'astre. (Sociedad Española de Astronomía)

4.1. VisualSpec

Visual Spec (Vspec) és un programari lliure creat per Valerie Desnoux. Aquesta eina completa ens permet, en termes generals, processar imatges espectrals. En primer lloc, transforma la imatge en valors d'intensitat lluminosa, creant una corba. Després, permet calibrar-la¹² segons la longitud d'ona per identificar les diferents línies d'absorció o emissió.

Aquest programa compta amb una base de dades en la que podem trobar classificats els diferents tipus espectrals, que els utilitzem com a referència. Això fa més fàcil l'adquisició de la resposta instrumental del nostre material, que ens permet la conversió de les corbes inicials a un format estàndard. (Astro Astur)

¹² Ajustar-la i comparar-la

5. MISSIÓ TESS

TESS és una missió de la NASA liderada per l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT), una investigació a escala completa per a la detecció de planetes en trànsit fora del nostre sistema solar. Els planetes en trànsit són aquells que passen per davant de l'estrella tal com es veu des del telescopi i, fins a la data, com hem explicat a l'apartat 3.1, és la tècnica de descobriment més exitosa per trobar exoplanetes petits.

El satèl·lit TESS es va llançar el 18 d'abril de 2018 a bord d'un coet SpaceX Falcon 9 des de Cap Canyaveral¹³, cobrint el cel amb vint-i-sis segments. Té una òrbita cis-lunar¹⁴ el·líptica¹⁵ al voltant de la terra amb una duració de 13,7 dies.

TESS conté quatre càmeres idèntiques, aquestes tenen un camp de visió de 24x24 graus, és a dir, l'àrea que pot capturar la càmera és de 24x24 graus. Amb les seves càmeres, TESS busca una precisió fotomètrica de 50 ppm (parts per milió) en estrelles amb una magnitud de 9-15, això vol dir que els petits canvis en la intensitat de la llum que aquesta missió és capaç de capturar són de 50 ppm i els objectius d'aquesta precisió fotomètrica estan fixats en estrelles amb una escala de lluminositat concreta, d'entre 9-15. Tot i això, la missió TESS és capaç de treballar amb estrelles encara més brillants, això amplia el ventall d'estels que pot observar i analitzar. (Massachusetts Institute of Technology)

La gran missió de TESS és trobar planetes semblants a la Terra orbitant les estrelles més brillants i properes. Tot i que Kepler, va ser una missió llançada anteriorment amb un propòsit semblant, TESS cobreix una àrea 400 vegades més extensa, quasi el 85% del cel. Per poder abastar una superfície tan extensa, l'òrbita de TESS està inclinada de manera que permet que el telescopi evadeixi gairebé completament les obstruccions causades per la brillantor de la Terra i la Lluna.

¹³ Cap situat al comtat de Brevard, Florida, als Estats Units

¹⁴ Regió de l'espai entre la terra i la lluna

¹⁵ L'òrbita que traça és ovalada

Amb el pas dels primers dos anys, la missió ja havia escanejat al voltant de 200000 estrelles, trobant 2100 candidats a planetes i confirmant-hi 66. (The Planetary Society)

5.2. TOI: Objectes d'interès de la missió TESS

La missió TESS, compta amb un catàleg de candidats a planetes petits al voltant d'estrelles brillants, que s'observen i s'analitzen detalladament, anomenats TOI (Transiting Objects of Interest: Objectes d'interès en trànsit).

El catàleg TOI inclou tant els candidats a planetes descoberts per la mateixa missió TESS com els planetes d'estudis anteriors. També compta amb una diversitat de columnes en les quals classifiquen a cadascun dels planetes segons la seva procedència, característiques notables, el radi del planeta, el radi de l'estrella que orbita, la temperatura del planeta, així com altres aspectes particulars de cada astre.

Solem trobar els TOI més petits al voltant d'estrelles de tipus M i K, però a les estrelles com les F i A solen abundar més els TOI més grans. Aquest fenomen es deu al fet que, amb el mètode de trànsit, resulta més complex detectar planetes de petites dimensions que orbiten estrelles més grans, ja que la corba de llum és més difícil de distingir.

És rellevant destacar la importància dels TOI, o objectes d'interès, en la comunitat científica. Aquests ofereixen una oportunitat única per a realitzar estudis detallats sobre les característiques atmosfèriques i altres propietats dels exoplanetes detectats fins a la data. (Natalia M. Guerrero et al, 2021)

TOI 1131.01 b, l'exoplaneta que estem treballant, es troba dins d'aquest llistat, juntament amb altres més coneguts com per exemple TOI 700 e o TOI 700 b.

6. BASE DE DADES ETD (EXOPLANET TRANSIT DATABASE)

Per poder observar el trànsit d'exoplanetes que ja estan confirmats, necessites extreure les seves dades d'una base de dades. En l'actualitat la base de dades més utilitzada és l'ETD (Exoplanet Transit Database) i, en efecte, aquesta és la que hem utilitzat a la part pràctica.

Llançada el setembre de 2008 com a projecte de la secció de l'estrella variable de la societat astronòmica de la República Txeca, l'ETD inclou el trànsit de tots els planetes que s'han descobert fins a l'actualitat. I, per a servir com a informació útil, ja siguin prediccions de trànsit, les duracions d'aquests trànsits, i molt més, es va crear una plataforma en línia a la qual tothom pot accedir per a recollir tota la informació necessària. (Stanislav Poddaný, 2010)

La base de dades està formada per diverses parts. Predicció de trànsit: aquesta secció et proporciona amb totes les prediccions dels propers trànsits de cada exoplaneta anteriorment confirmat. Model-fit your data: aquesta secció accepta i processa totes les noves dades que vulguis introduir. I finalment, O-C plots: aquesta última secció conté tots els diagrames de la duració dels trànsits que es generen a partir de la base de dades. (Stanislav Poddaný, 2010)

6.1. Projecte TRESKA

L'acrònim TRESKA prové de les paraules: Transiting Exoplanets and Candidates (Exoplanetes en Trànsit i Candidats). TRESKA és un projecte dedicat a l'estudi i observació d'exoplanetes, centrant-se específicament en la investigació de més de cinquanta exoplanetes amb òrbites que permeten la detecció dels seus trànsits des de la Terra. A més, té un paper crucial com a creador de la base de dades ETD (Exoplanet Transit Database), que conté les dades dels exoplanetes descoberts mitjançant el mètode de trànsit. (Czech Astronomical Society)

7. ELS OBSERVATORIS

Els observatoris són centres d'investigació i estudis celestials essencials per a la comprensió de l'Univers. La funció d'aquests és analitzar els objectes i fenòmens celestes que es poden captar gràcies a la radiació electromagnètica i altres senyals que arriben al nostre planeta des de l'espai exterior. (Universitat Internacional de València, 2018). Per aquesta mateixa raó, els observatoris compten amb una gran quantitat d'instruments, com telescopis, antenes, sistemes electrònics, ordinadors, càmeres...

Els observatoris, per aconseguir les millors condicions a l'hora de l'observació del cel, se solen trobar en zones aïllades dels nuclis de població, on la contaminació lumínica i química són inferiors. Malgrat això, també podem trobar observatoris en nuclis urbans, com l'observatori de Can Roig.

7.1. Astrogirona

L'Astrogirona és una associació astronòmica que compta amb dos observatoris ubicats al centre de Llagostera i a un mas proper al poble. Fundada el 1999, l'associació és dirigida per Rafael Balaguer Rosa, ell mateix s'encarrega de supervisar els observatoris de l'agrupació.

L'associació astronòmica de Girona, disposa de cursos i activitats relacionats amb l'astronomia amb la finalitat de divulgar el coneixement científic. De manera similar, aquesta associació està oberta a la col·laboració en projectes de recerca i observació no només en l'àmbit astronòmic, sinó també en un ampli ventall de ciències.

7.2. L'observatori de Can Roig

L'observatori de Can Roig és un dels dos observatoris de l'associació astronòmica de Girona, està ubicat al centre cultural de Llagostera i compta amb tres telescopis

que poden ser operats a distància des de qualsevol lloc on es disposi de connexió a Internet.

Aquests telescopis són un Takahashi Mewlon de 200 mm, un refractor apocromàtic de fluorita William Optics de 98 mm i un telescopi solar Coronado CaK, especialment dissenyat per observar el Sol de manera segura. Cadascun d'aquests telescopis està equipat amb la seva pròpia càmera CCD corresponent, possibilitant així la captura i realització d'imatges astronòmiques de gran qualitat.

L'observatori es va inaugurar el 3 de gener de 2012 i, des de llavors, ha mantingut les seves portes obertes al públic tots els dimecres, per així promocionar la ciència mitjançant observacions astronòmiques i visites a les seves instal·lacions.

Algunes de les seves activitats inclouen xerrades dedicades a l'estudi dels planetes, o tallers que ajuden a comprendre de manera més clara el funcionament del material astronòmic, com per exemple, tallers d'astrofotografia.

A més, el febrer de 2012, l'observatori va tenir l'honor de rebre el codi de Minor Planet Center (MPC), que va permetre als 88 socis de l'agrupació poder participar com a astrònoms no professionals en recerques de la comunitat científica internacional i en la recerca de cossos menors. (Dani Vilà, 2012)

El MPC, o Minor Planet Center, té com a funció principal nomenar els objectes més petits en el sistema solar, com ara planetes menors, cometes i satèl·lits naturals. A més, assumeix la responsabilitat de reunir, calcular, verificar i difondre de manera eficient les observacions astromètriques i les òrbites associades als planetes menors i cometes. (Minor Planet Center, 2023)

MARC PRÀCTIC

8. MATERIAL UTILITZAT DURANT LA DETECCIÓ

8.1. Muntura

La muntura és una part molt important, en el nostre cas hem usat la muntura Skywathcer EQ-8 Pro, aquesta aguanta fins a cinquanta quilograms d'equipament. La seva funció principal és localitzar els objectes del cel i mantenir-los fixes en el camp de la càmera o de l'ocular quan observem. Això ho fa contrarestant el moviment de rotació de la terra per fer que els objectes sempre quedin fixes en el camp de rotació. Aquesta muntura també ens permet localitzar els objectes de manera automàtica amb total precisió. Té un comandament amb dos-cents mil objectes emmagatzemats, en el que introdueixes les coordenades de l'astre que t'interessa i et porta directe a ell.

Figura II: Muntura del telescopi



Font: Pròpia

8.2. Telescopi d'autoguiat

Aquest telescopi té una funció d'autoguiat i estabilització. Juntament amb una càmera CCD (molt més sensibles que els ulls) amb poc augment, a banda de fer fotografies del camp d'estrelles, dona una ajuda a la muntura per acabar d'estabilitzar el camp de visió, permetent-nos així una visibilitat més estable a partir del sistema d'autoguiat.

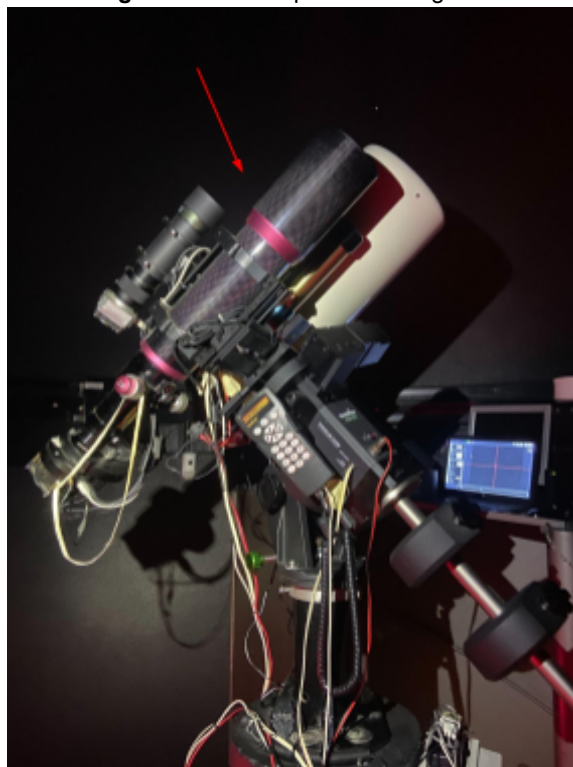
Figura III: Telescopi d'autoguiat



Font: Pròpia

8.3. Telescopi d'astrofotografia

En aquest telescopi també es col·loca una càmera CCD, en el nostre cas una QHY9, que és una càmera molt més sensible que l'ull humà. La seva funció principal és fer les fotografies dels astres, guardant de manera automàtica aquestes fotografies i les dades concretes de cadascuna. Normalment no observem amb ell.

Figura IV: Telescopi d'astrofotografia

Font: Pròpia

8.4. Telescopi d'observació solar

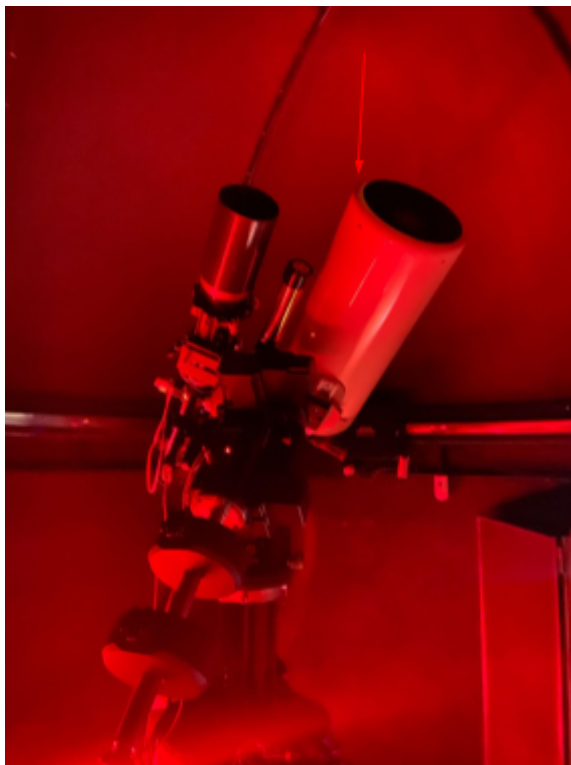
Un telescopi de calci i potassi, que ens ajuda a observar les estrelles més brillants. Està equipat amb un filtre solar que protegeix l'ull de la intensitat de la llum i ajuda a garantir una observació segura. Aquest tipus de telescopi d'observació solar en concret, permet estudiar regions específiques de l'espectre solar.

Figura V: Telescopi d'observació solar

Font: Pròpia

8.5. Telescopi d'observació visual

En el nostre cas aquest era un Takahashi Mewlon 210 (210 mm de diàmetre, focal de 2415 mm, F/11.5), aquest ens ajuda a fer l'espectre de l'exoplaneta. El telescopi és el que ens permet gaudir del cel nocturn, té diverses funcions, entre elles, l'observació planetària, l'observació lunar, l'astrofotografia, l'observació d'esdeveniments astronòmics com trànsits planetaris i la investigació de l'espai profund.

Figura VI: Telescopi d'observació visual

Font: Pròpia

8.6. Cúpula semiesfèrica

Les cúpules semiesfèriques protegeixen el telescopi de les condicions tant meteorològiques com tèrmiques, i ajuden a mantenir una temperatura constant adequada per al telescopi. De la mateixa manera, redueixen les turbulències de l'aire, que podrien distorsionar les imatges astronòmiques. Les cúpules poden girar per permetre que el telescopi s'orienti cap a qualsevol part del cel, cosa que és essencial, ja que diferents objectes astronòmics són visibles en diferents direccions del cel.

Figura VII: Cúpula semiesfèrica de l'observatori de Can Roig des de l'exterior



Font: NADAL, JORDI. «L'observatori astronòmic de Can Roig de Llagostera entra en una xarxa mundial». El punt d'avui (2012)

Figura VIII: Cúpula semiesfèrica de l'observatori de Can Roig des de l'interior



Font: Pròpia

9. REALITZACIÓ DEL TRÀNSIT DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01 b

El dia 04 d'octubre de 2023 ens vam trobar amb en Rafael Balaguer (director de l'observatori de Can Roig i president de l'Associació Astronòmica de Girona) a l'Observatori Can Roig (MPC C99¹⁶), seu d'Astrogirona a Llagostera, per intentar observar el trànsit d'un exoplaneta.

Quan volem estudiar exoplanetes, una de les opcions més efectives és triar un exoplaneta, en principi ja confirmat, que resulti visible des de la nostra ubicació en les dates que ens convinguin segons la disponibilitat del personal de l'observatori, la meteorologia més favorable, etc. En aquest sentit, sovint, també convé seleccionar trànsits relativament "curts" (perquè habitualment poden durar hores), per minimitzar inconvenients derivats de possibles canvis en la densitat¹⁷ dels núvols, incidències tècniques o altres impediments.

Per seleccionar l'exoplaneta a estudiar podem consultar diverses bases de dades públiques. Nosaltres consultem l'excel·lent ETD (Exoplanet Transit Database, <http://var2.astro.cz/ETD/>), on podem trobar molta informació sobre exoplanetes coneguts, i també podem confirmar en quines dates/hores podem observar trànsits des de la nostra posició.

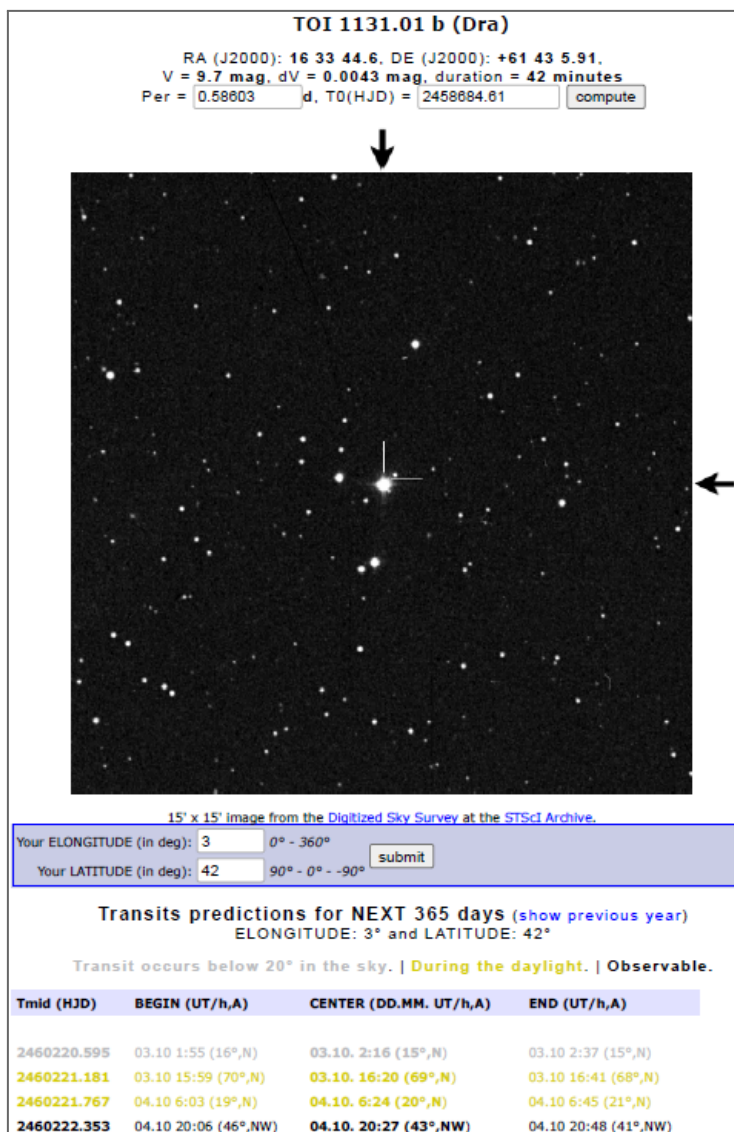
A l'ETD, en l'apartat de prediccions, podem introduir les nostres coordenades (a l'Observatori Can Roig són longitud 3° i latitud 42°), i immediatament se'ns mostraran els trànsits observables en les dates que seleccionem.

I en aquesta ocasió, seguint el criteri d'observació d'un exoplaneta en principi confirmat, i que el seu trànsit fos curt, vam seleccionar per al dia 4 d'octubre de 2023 l'exoplaneta TOI 1131.01 b, a la constel·lació del Drac.

¹⁶ Minor Planet Center

¹⁷La magnitud que fa referència a la quantitat de massa continguda en una determinada quantitat de volum d'una substància

Figura IX: Prediccions del trànsit de TOI 1131.01 b a l'ETD



Font: ETD (Exoplanet Transit Database)

Com podem observar a la imatge anterior, la base de dades ETD és molt completa. Inclou una fotografia del camp d'estels a on es localitza l'exoplaneta que volem estudiar, el que resulta molt útil per confirmar que estem analitzant la zona correcta del cel i posteriorment analitzar bé les imatges obtingudes. L'ETD ens indica que el trànsit comença a les 20:06, arriba a la màxima profunditat a les 20:27, i acaba a les 20:48, en Temps Universal¹⁸. Des de la nostra ubicació cal afegir dues hores en

¹⁸ El temps estàndard basat en la rotació de la Terra

horari d'estiu i una en horari d'hivern al Temps Universal. Llavors, a l'observatori el trànsit començarà a les 22:27 i acabarà a les 22:48, en total, tindrà una durada de 42 minuts.

Comencem el procés amb el programa NINA, que és el que ens permet fotografiar l'objecte que estem estudiant. Per poder aconseguir un gràfic clar de la corba de llum i poder captar correctament la caiguda i recuperació de brillantor de l'estel progenitor, hem de fotografiar l'estrella uns minuts abans del trànsit, durant i després d'aquest. Per aquest motiu, abans de començar el trànsit introduïm les coordenades celestes de TOI 1131.01 b al programa NINA, que ens ha mostrat anteriorment l'ETD i arrenquem la sessió d'observació i la presa d'imatges.

Posem tots els sistemes en funcionament, llancem l'autoguiat (amb el programa d'autoguiat PHD2 Guiding) que ens establitzarà la visió permetent-nos una millor precisió en el seguiment, i programem la seqüència d'imatges per a realitzar preses de 60 segons d'exposició¹⁹.

Gràcies a aquests programes, de seguida veiem que el telescopi apunta perfectament al nostre planeta, mostrant ben centrada l'estrella a estudiar.

¹⁹ Programem la realització d'imatges de manera que el programa executi fotografies cada 60 segons

Figura X: Fotografia del que veiem al programa, el nostre estel



Font: Pròpia

Figura XI: Fotografia del que veiem al programa més de prop



Font: Pròpia

Aleshores, les fotografies obtingudes les analitzarem amb el programa FotoDif, aquest ens permetrà obtenir la fotometria diferencial, que és la que ens permet registrar el pendent de llum que es produeix quan el planeta passa per davant de l'estrella.

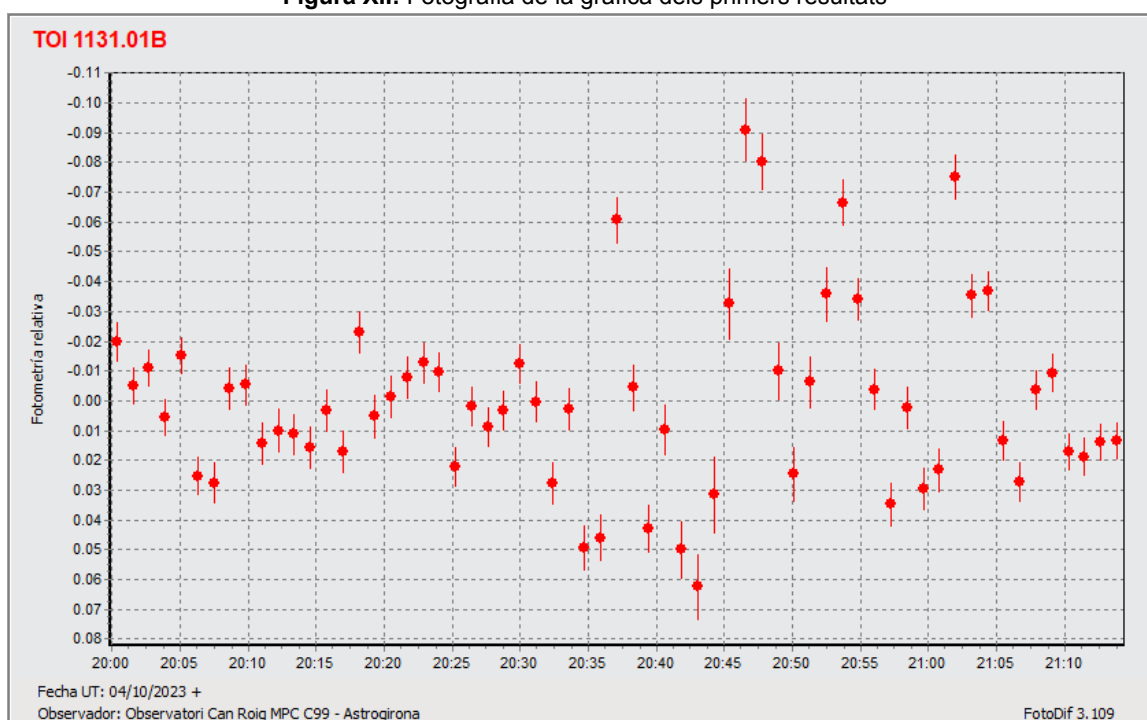
Acabat tot el procediment, podrem començar a estudiar la corba de llum que la gràfica ens proporciona i, d'aquesta manera, determinar si hi ha un planeta orbitant l'estrella.

10. RESULTATS DEL TRÀNSIT DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01

En total vam obtenir 63 fotografies²⁰ de 60 segons d'exposició i, tot i que durant tota la sessió de l'observació ens vam trobar amb intervals de núvols primers que anàvem enteranyinant el cel i deterioràvem la qualitat de les imatges captades i la precisió de l'autoguiat, vam poder obtenir resultats positius.

Un cop obtinguts els primers resultats, amb el programa FotoDif analitzem les fotografies per obtenir la fotometria diferencial. Amb l'esmentat analitzem la magnitud d'aquests primers resultats, i els considerem poc concloents, ja que no sembla evident que hàgim pogut captar el trànsit, atès que la corba de llum no mostra l'esperada morfologia en V o U:

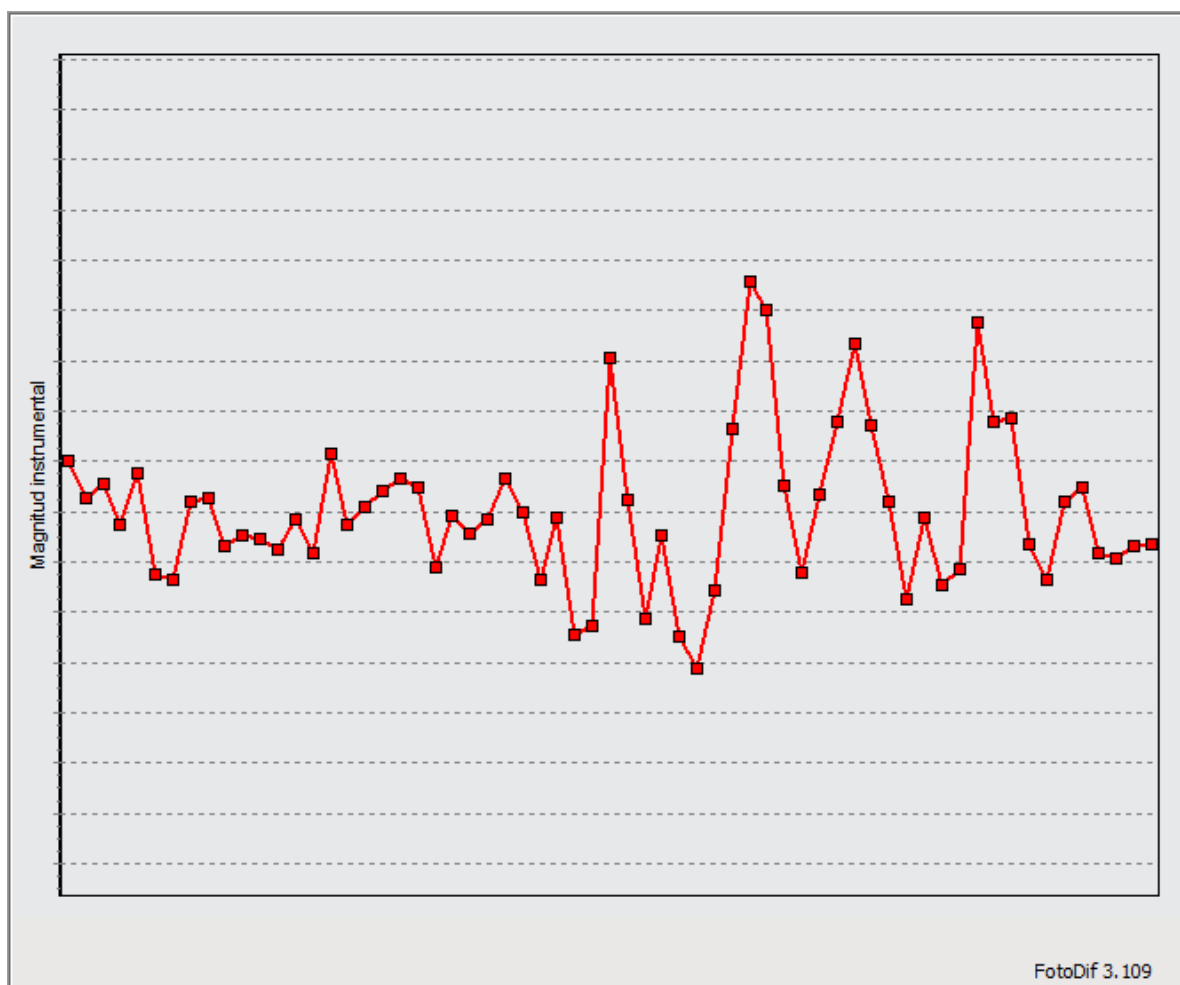
Figura XII: Fotografia de la gràfica dels primers resultats



Font: Pròpia

Figura XIII: Fotografia de la línia que traça la gràfica

²⁰ Annex 1

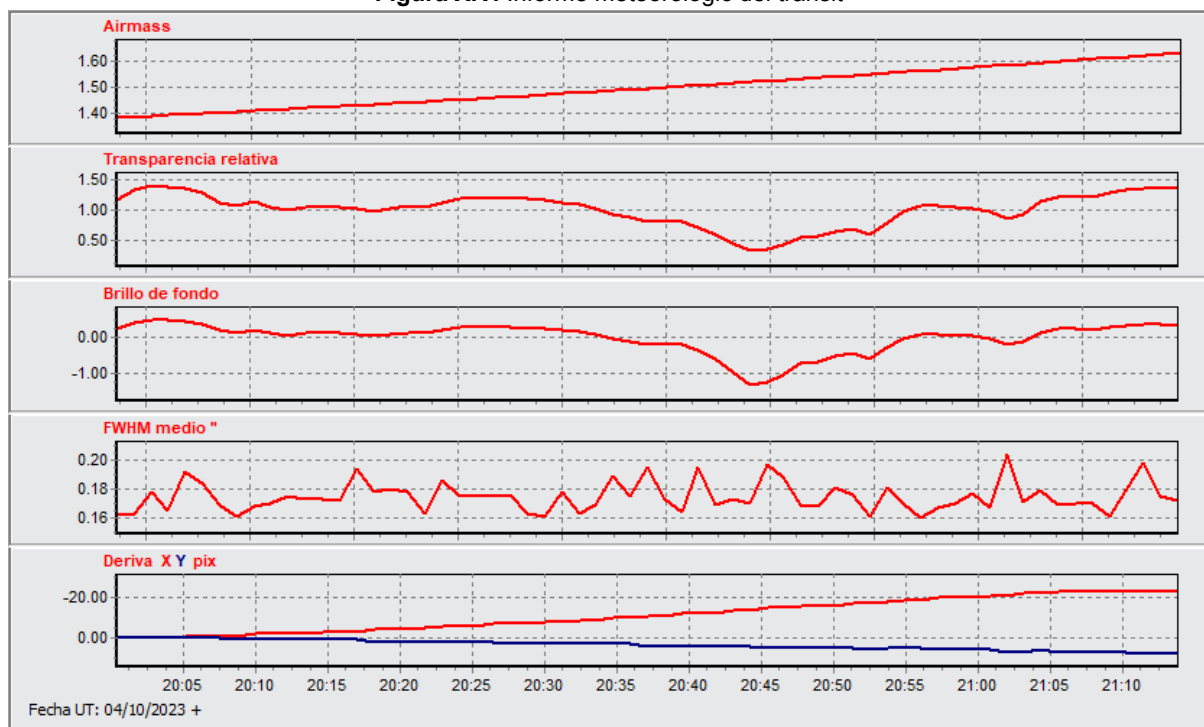


Font: Pròpia

Ens al contrari, sembla que la magnitud disminueix (augmenta la brillantor) en passar el temps, cosa que seria impossible amb la presència d'un exoplaneta.

En un principi atribuïm el resultat a la degradació de les condicions atmosfèriques durant la sessió, ja que, com hem comentat anteriorment, ens vam trobar amb intervals de núvols prims que anàvem enteranyinant el cel i deterioràvem la qualitat de les imatges captades i la precisió de l'autoguiat, el que resulta evident en el gràfic informe de FotoDif:

Figura XIV: Informe meteorològic del trànsit



Font: Pròpia

Veiem que la massa d'aire (densitat de l'aire entre nosaltres i l'objecte estudiat) va augmentant progressivament; i que la transparència relativa (qualitat de l'aire) i la brillantor de fons del cel detectada (influència de la contaminació lumínica), disminueixen. Per altra banda, el valor FWHM (relatiu a la corba gaussiana de la qualitat de l'enfocament) es mostra bastant inestable. A conseqüència de l'augment dels núvols, la capacitat de l'autoguiat per a mantenir una alta precisió es veu fortament perjudicada i això es pot veure clarament en la deriva, que es va allunyant del valor ideal de 0 en ambdós eixos.

Però malgrat tot, i tenint en compte els paràmetres atmosfèrics, com que sí que podem observar prou nítidament tot el camp d'estels complet en les nostres fotografies, això ens anima a aprofundir en l'estudi de les dades obtingudes, més enllà de la magnitud.

I, el que fa especialment interessant aquesta observació, és que l'objecte seleccionat és un TOI. L'acrònim "TOI" fa referència a les estrelles i exoplanetes estudiats per la

missió TESS, i és l'abreviatura de: "Transiting Exoplanet Survey Satellite Object of Interest".

I aquí està la clau, l'exoplaneta triat és un OBJECTE D'INTERÈS per a la missió TESS. I això implica que es tracta d'un exoplaneta no confirmat plenament, i fins i tot es podria tractar d'un cas de fals positiu.

De fet, no hi ha pràcticament literatura científica sobre aquest objecte i, en la base de dades ETD, tot i que apareix com a trànsit conegut, només trobem 7 observacions, de les quals quatre mostren un possible fals positiu, perquè no han pogut detectar el trànsit, i els altres tres, sí que mostren una corba de llum més clara segons l'esperat:

Figura XV: Gràfic dels trànsits coneguts dins l'ETD

#	HJD mid (2400000 +)	Epoch	O-C (d)	D (min)	Depth (mmag)	band	DQ	LC	Author & REFERENCE	changed *
7	60249.33319 +/- 0.00343	2670	0.0231	41.8 +/-	2.3 +/- 1.7	R	5		Zlatko Orbanić TRESCA	2023-11-03
6	60229.38589 +/- 0.00248	2636	0.0008	61.2 +/- 8.2	8.2 +/- 3.4	R	3		Ivo Peretto TRESCA	* 2023-10-14
5	60137.37067 +/- 0.00354	2479	-0.0077	32.7 +/- 10.5	0.6 +/- 0.6	V	5		Yenal Ogmen TRESCA	* 2023-08-05
4	59844.42505 +/- 0.00078	1979	0.0617	62.6 +/- 2.7	10.6 +/- 1	Clear	3		Miguel Angel Alava TRESCA	* 2022-10-01
3	59844.36359 +/-	1979	0.0002	41.8 +/-	+/-	R	5		Matthieu BACHSCHMIDT TRESCA	* 2022-10-01
2	59821.53256 +/- 0.00088	1940	0.0244	41.8 +/-	7 +/- 1.2	Clear	4		V. Dienstbier TRESCA	* 2022-09-01
1	59736.55695 +/- 0.00113	1795	0.0231	65.4 +/- 3.7	6.2 +/- 1.1	Clear	3		Miguel Angel Alava TRESCA	* 2022-10-01

Font: ETD (Exoplanet Transit Database)

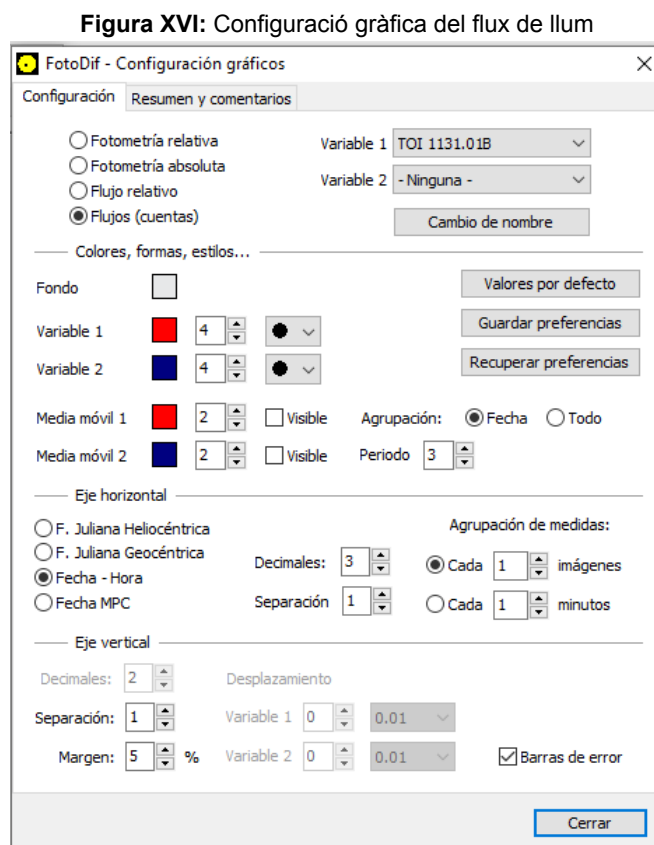
Ara entenem millor per què l'anàlisi de la magnitud no ens ha aportat resultats concloents, perquè es tracta d'un objecte molt complicat de confirmar, possiblement per la mida relativament petita del planeta en comparació amb la seva estrella. L'aparent diversitat de dades observacionals és el que ha determinat que aquest exoplaneta hagi estat considerat un TOI.

I nosaltres podríem aportar alguna informació que ajudés a confirmar-lo com a exoplaneta? La resposta és sí!

Tot i les condicions meteorològiques no òptimes, vam poder observar amb claredat totes les estrelles de les nostres fotografies. Per tant, decidim analitzar el trànsit basant-nos no directament en la davallada de la magnitud esperada, sinó en el flux de llum rebut de les estrelles, que és menys sensible als núvols prims que el càlcul de la magnitud.

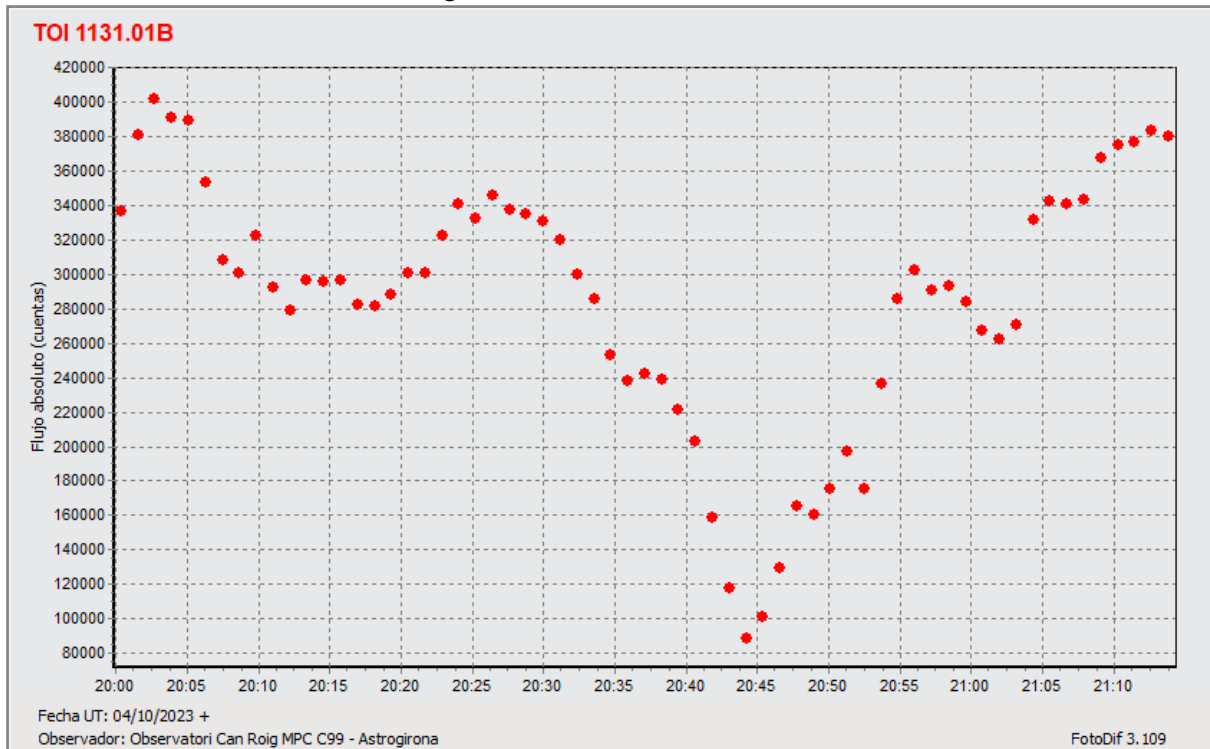
Precisament, per validar les observacions de trànsits, podem incorporar les nostres dades al projecte TRESKA de l'ETD, a on diversos observadors d'arreu del món comparteixen les seves dades. I allà, podem pujar els nostres informes basats en la magnitud o en el flux de llum.

Llavors, activem l'anàlisi de flux de llum:



Font: Pròpia

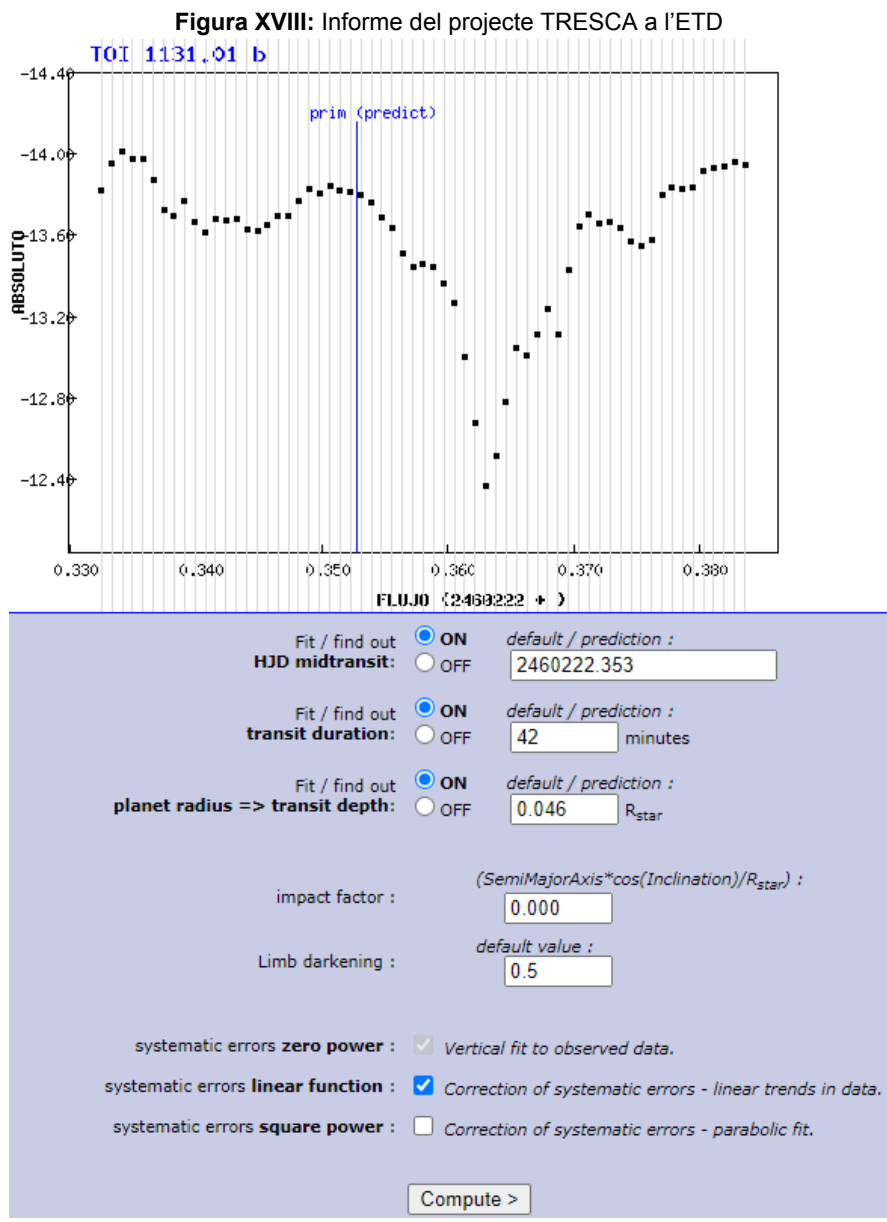
Figura XVII: Gràfic del flux de llum



Font: Pròpia

D'aquesta manera sí que podem veure la corba de llum, que és espectacular.

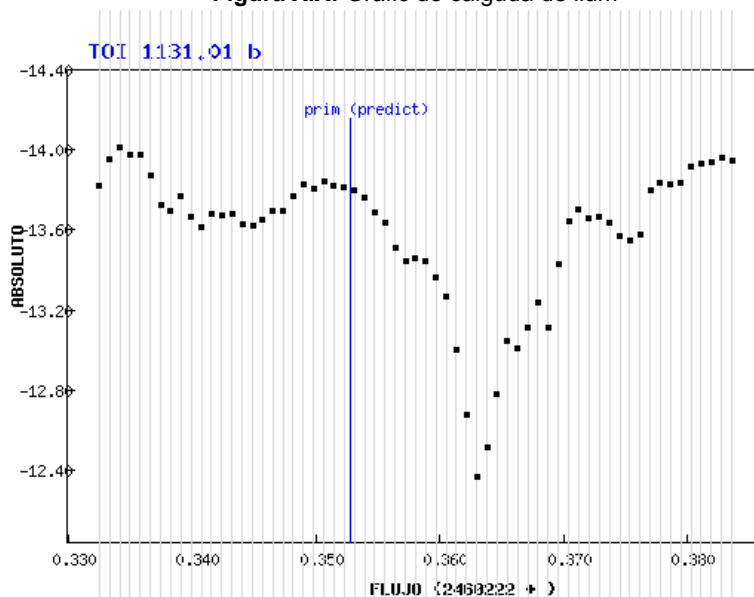
A continuació, el que hem de fer és generar l'informe amb totes les dades. Aquest és el que incorporarem al projecte TRESKA a l'ETD, on podrem obtenir dades molt interessants.



Font: Pròpia

De seguida podem comprovar que la màxima profunditat del trànsit que hem observat es va produir uns minuts més tard que quan estava prevista (línia blava), el que suposa una millora de la precisió sobre el model basat en les dades actuals:

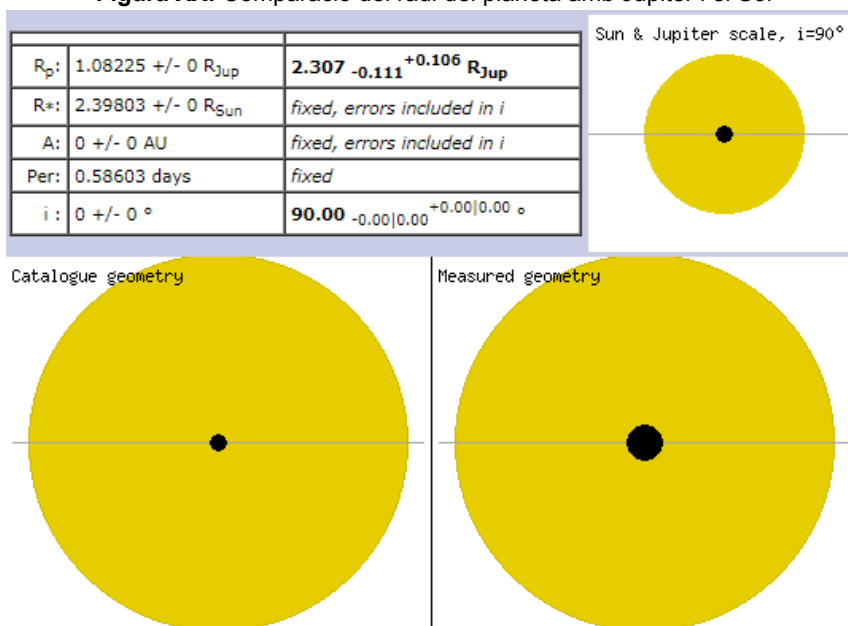
Figura XIX: Gràfic de caiguda de llum



Font: Pròpia

També, es pot inferir la mida de l'exoplaneta a partir de relacions entre la magnitud i el període de rotació del planeta. Els gràfics ens ajuden a visualitzar-ho comparant amb Júpiter i el Sol. En aquest cas el radi del planeta és de 0.046 radis de la seva estrella:

Figura XX: Comparació del radi del planeta amb Júpiter i el Sol



Font: Pròpia

Així, considerem que hem obtingut un trànsit positiu de TOI 1131.01 b, i les dades recopilades no només han validat la presència d'aquest planeta, sinó que també han aportat una millora en el coneixement actual d'aquest evasiu objecte, enriqueixen així de la nostra comprensió dels sistemes planetaris més enllà del nostre sistema solar.

11. REALITZACIÓ DE L'ESPECTRE DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01 b

Per acabar de completar l'estudi de l'exoplaneta, durem a terme una anàlisi espectroscòpica que ens permetrà caracteritzar químicament TOI 1131.01 b.

Si volem obtenir resultats concloents, necessitem capturar l'espectre de l'estrella durant i sense el trànsit del planeta.

L'espectre el portarem a terme usant el telescopi Takahashi Mewlon 210 (210 mm de diàmetre, focal de 2415 mm, F/11.5), una càmera Atik Infinity, i per a l'obtenció de l'espectre utilitzem una xarxa de difracció de 100 línies Baader Planetarium.

Obtenim les següents imatges de l'estrella progenitora i el seu espectre, sense trànsit:

Figura XXI: Fotografia de l'estrella progenitora



Font: Pròpia

Figura XXII: Fotografia de l'espectre de l'estrella progenitora

Font: Pròpia

Van intentar obtenir l'espectre durant el trànsit el dia 18 d'octubre, quan podríem percebre des de Llagostera un altre trànsit de TOI 1131.01 b.

Però finalment no va ser possible observar el trànsit el dia 18 d'octubre des de Llagostera, i vam decidir intentar l'observació del trànsit que tindria lloc el dia 21 d'octubre de 2023.

Aquest cop l'observació seria des de Rocafort, al Bages, a l'Observatori Can Leonart, de Rafael Balaguer.

Per obtenir les imatges i l'espectre de l'estrella progenitora durant el trànsit, l'observació es realitza amb un telescopi catadiòptic Ritchey-Chrétien, Meade LX200 GPS (250 mm de diàmetre i focal de 2500 mm, F/10) i una càmera Atik Infinity, amb la xarxa de difracció²¹ Baader de 100 línies.

²¹ Superfície amb una sèrie de ranures que es fa servir per descompondre la llum en els seus components espectrals.

El primer pas és localitzar l'estrella de TOI 1131.01 b, introduint les coordenades, i centrar-la bé en el camp visual:

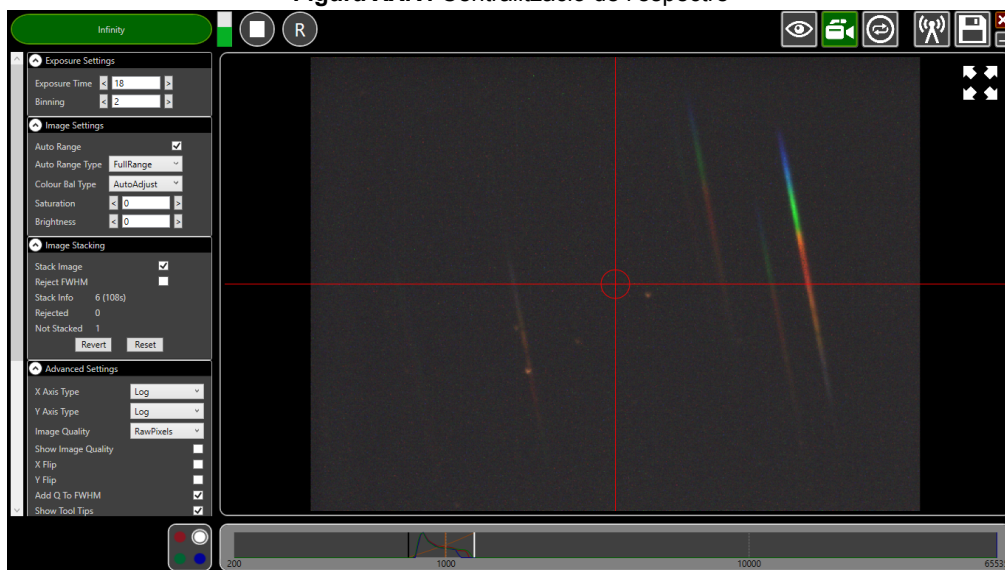
Figura XXIII: Centralització de l'estrella



Font: Pròpia

Com que la focal del telescopi Meade és més alta que la del Takahashi de Llagostera, podem obtenir certa millora en la resolució, el que ens resultarà molt útil per captar espectres febles com el d'aquesta estrella.

Figura XXIV: Centralització de l'espectre

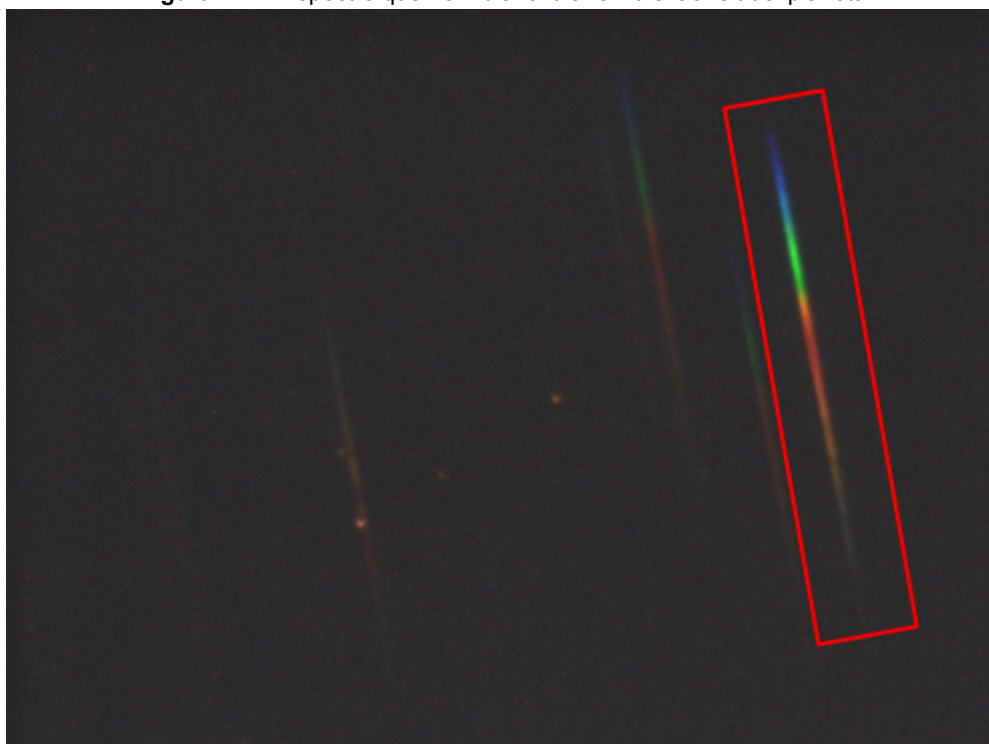


Font: Pròpia

Com que sempre s'observen molts espectres en la fotografia, i l'espectre es desplega lluny de l'objecte a estudiar, convé tenir en compte aquests desplaçaments per identificar correctament l'espectre que volem analitzar.

En aquest cas, l'espectre a analitzar és el més brillant que veiem en les captures.

Figura XXV: Espectre que hem d'analitzar amb el trànsit del planeta



Font: Pròpia

Figura XXVI: Espectre que hem d'analitzar sense el trànsit del planeta



Font: Pròpia

Així que ara ja tenim dos espectres capturats: un de l'estrella progenitora sense trànsit i un amb el planeta transitant.

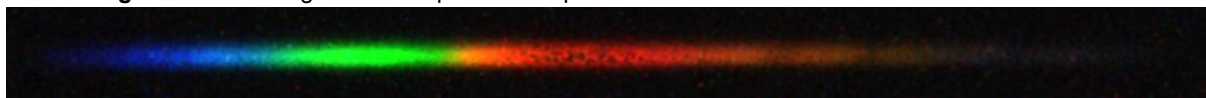
Un dels objectius del treball és determinar la composició química de l'exoplaneta. L'espectre de l'estrella mostrarà alguna diferència respecte al seu espectre sense planeta transitant i, en cas d'observar-se diferències, aquestes ens podrien indicar quins elements químics poden estar presents en el planeta.

Per analitzar els espectres utilitzem el programa gratuït Visual Spec.

Hem d'analitzar dos espectres, el de l'estrella sense i amb trànsit respectivament.

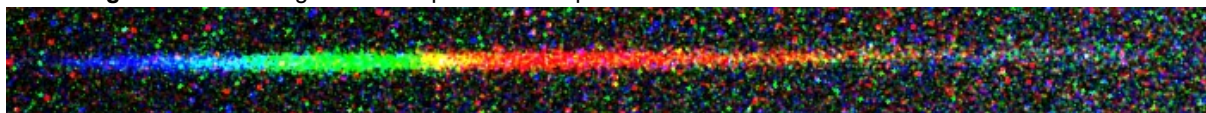
Per començar a analitzar espectres, el primer que cal fer és aïllar l'espectre que ens interessa i orientar-lo correctament, horitzontal i amb el vermell cap a la dreta, i el blau a l'esquerra.

Figura XXVII: Fotografia de l'espectre amb planeta orbitant retallada i orientada horitzontalment



Font: Pròpia

Figura XXVIII: Fotografia de l'espectre sense planeta orbitant retallada i orientada horitzontalment



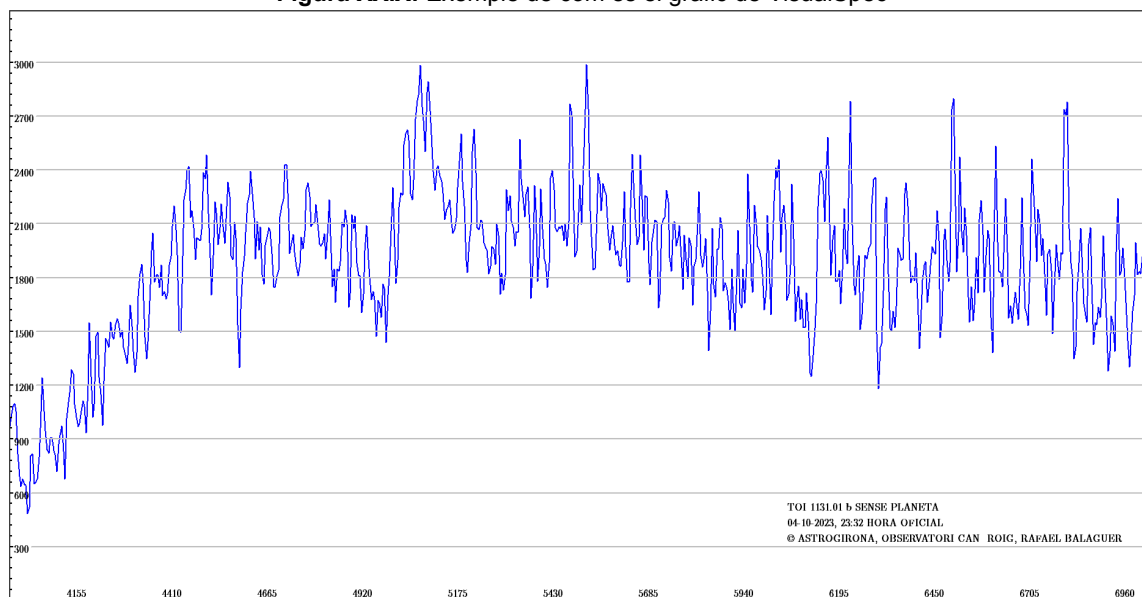
Font: Pròpia

Amb una eina d'edició de fotografies portem a terme aquest procés, simplement orientem la imatge de la manera que ens interessa amb el vermell a la dreta, i la retallem de forma que ens quedi l'espectre de l'estrella amfitriona com a protagonista. La fotografia final l'hem de guardar en format bmp, ja que el programa que utilitzarem per analitzar l'espectre entra les imatges en aquest format.

El programa VisualSpec és el que ens proporciona el gràfic, aquest analitza la fotografia segons la seva longitud d'ona. A la dreta trobarem la longitud d'ona més llarga i a l'esquerra la més curta, el color vermell és una longitud d'ona llarga, per això hem orientat l'espectre de manera que aquest color es trobi a la dreta.

En els gràfics, en l'eix X tenim la longitud d'ona en àngstroms, i en l'eix Y tenim la intensitat per píxel. A l'esquerra del tot del gràfic tenim 4000 àngstroms mentre que a la dreta en tenim 7000.

Figura XXIX: Exemple de com és el gràfic de VisualSpec



Font: Pròpia

Si analitzem detingudament el gràfic, podem establir quins elements químics es troben presents en els objectes analitzats, ja que cada element té una longitud d'ona concreta. Llavors observant el gràfic podem determinar en quins moments es detecten els diferents elements.

I potser seríem capaços de trobar indicis que en aquest exoplaneta hi hagi vida?

La detecció irrefutable, definitiva i positiva de biomarcadors en exoplanetes de moment queda fora del nostre abast amb els mitjans disponibles ja citats, però sí que podem intentar detectar traces dels elements que es consideren indispensables per a la vida tal com la coneixem a la Terra o que, com a mínim, considerem elements biogènics, que són necessaris per als processos vitals bàsics.

Els elements biogènics són els anomenats CHONPS. CHONPS és l'acrònim d'aquests elements, que són el carboni, hidrogen, oxigen, nitrogen, fòsfor i sofre, respectivament. El terme representa els sis elements químics més importants, les combinacions covalents dels quals conformen la majoria de molècules biològiques a la Terra. Tots aquests elements són no-metalls.

Al mateix programa VisualSpec, analitzarem quins són els elements que més conté utilitzant una de les seves funcions, en la que, amb la taula periòdica, podrem detectar quins són els elements més denotats en aquest planeta.

Figura XXX: La taula periòdica que el programa VisualSpec ens proporcionarà

Mendeleiev table																	
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	UUb	UUt	UUq	UUp	UUh	UUs	UUo
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Font: Pròpia

Donada aquesta informació estarem una mica més a prop de conèixer els elements dels quals TOI 1131.01 b està compost.

12. RESULTATS DE L'ESPECTRE DE L'EXOPLANETA TOI 1131.01

En la realització de l'espectre vam obtenir les següents fotografies de l'estrella amfitriona amb el trànsit del planeta i sense aquest:

Figura XXXI: Fotografia de l'estrella progenitora amb el trànsit del planeta



Font: Pròpia

Figura XXXII: Fotografia de l'espectre de l'estrella progenitora amb el trànsit del planeta



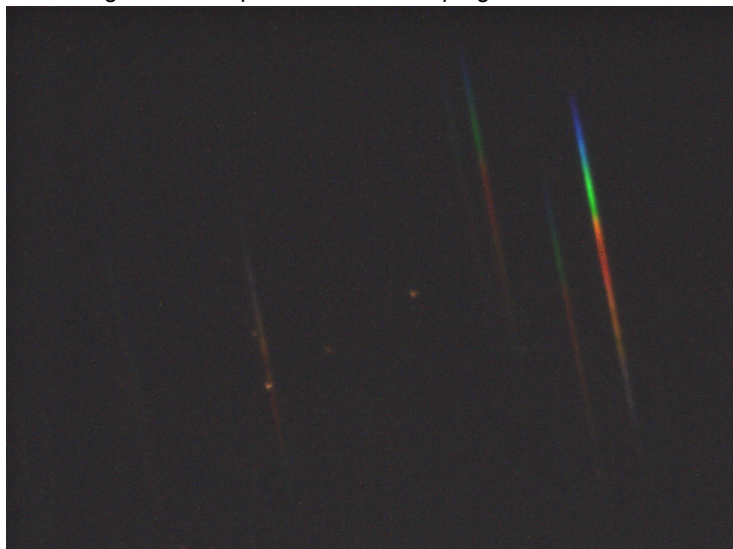
Font: Pròpia

Figura XXXIII: Fotografia de l'estrella progenitora sense el trànsit del planeta



Font: Pròpia

Figura XXXIV: Fotografia de l'espectre de l'estrella progenitora sense el trànsit del planeta

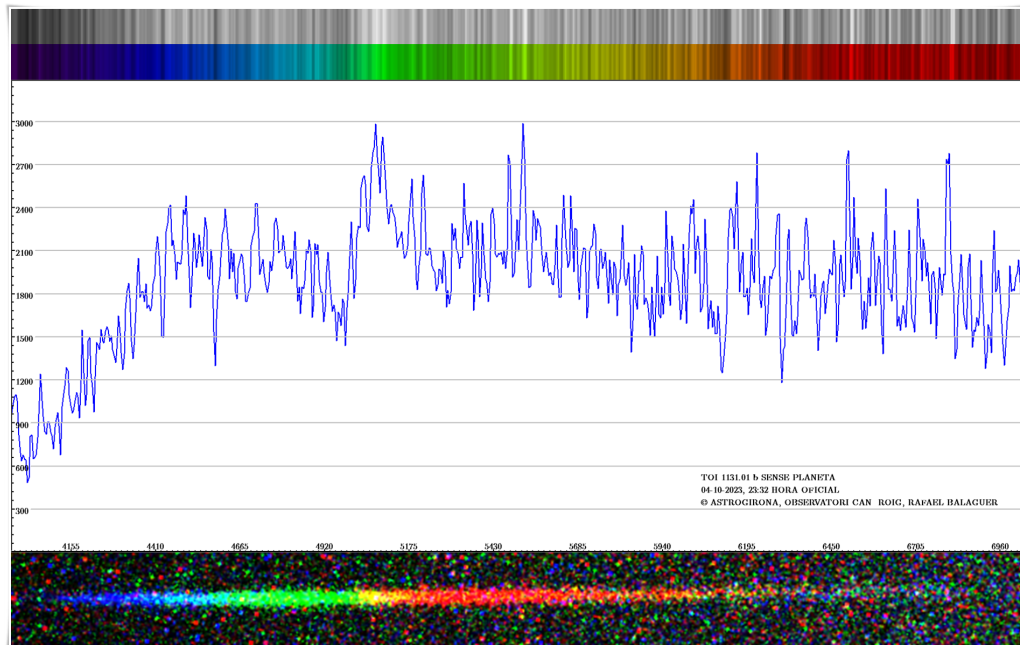


Font: Pròpia

La fotografia de l'estrella amb el trànsit del planeta es va realitzar el mateix dia del trànsit, el 04 d'octubre de 2023 a l'Observatori de Can Roig, mentre que la fotografia de l'estrella sense el trànsit del planeta es va elaborar el 21 d'octubre a l'Observatori Can Lleó.

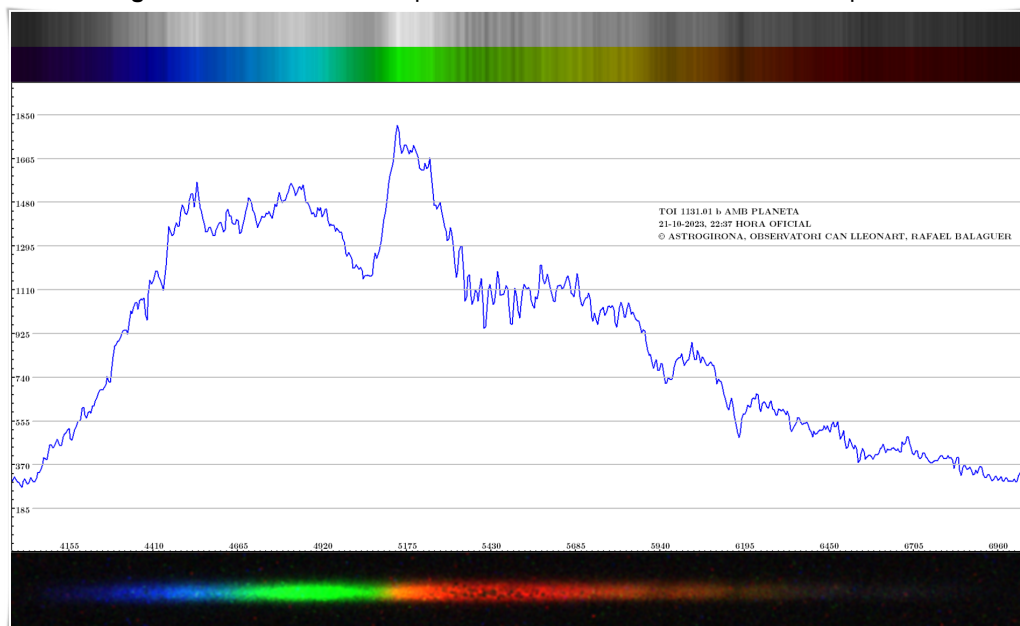
Després d'editar les fotografies de manera que es puguin utilitzar dins el programa VisualSpec, seguint els passos esmentats a l'apartat 11, obtenim els següents gràfics:

Figura XXXV: Gràfic de l'espectre de l'estrella sense el trànsit del planeta



Font: Pròpia

Figura XXXVI: Gràfic de l'espectre de l'estrella amb el trànsit de l'exoplaneta



Font: Pròpia

Si observem els dos gràfics, a la part inferior, el primer que cal comentar és la diferència de qualitat dels espectres obtinguts. El primer, de l'estrella sense planeta, es va obtenir a Llagostera amb núvols primers, que introdueixen força soroll. En canvi, l'espectre de l'estrella amb planeta, obtingut a Rocafort amb el cel serè, ja es mostra molt més nítid i sense soroll. El soroll de fons provoca l'obtenció d'un espectre de qualitat inferior, el que es visualitza amb l'aspecte més uniforme i continu de "dents de serra" de l'espectre obtingut a Llagostera. També podem veure que l'espectre de l'estrella amb trànsit es mostra més suau i precís en els detalls.

Si ens fixem en la part esquerra dels gràfics, podem veure que els dos espectres són molt similars, especialment fins als 5300 àngstroms aproximadament.

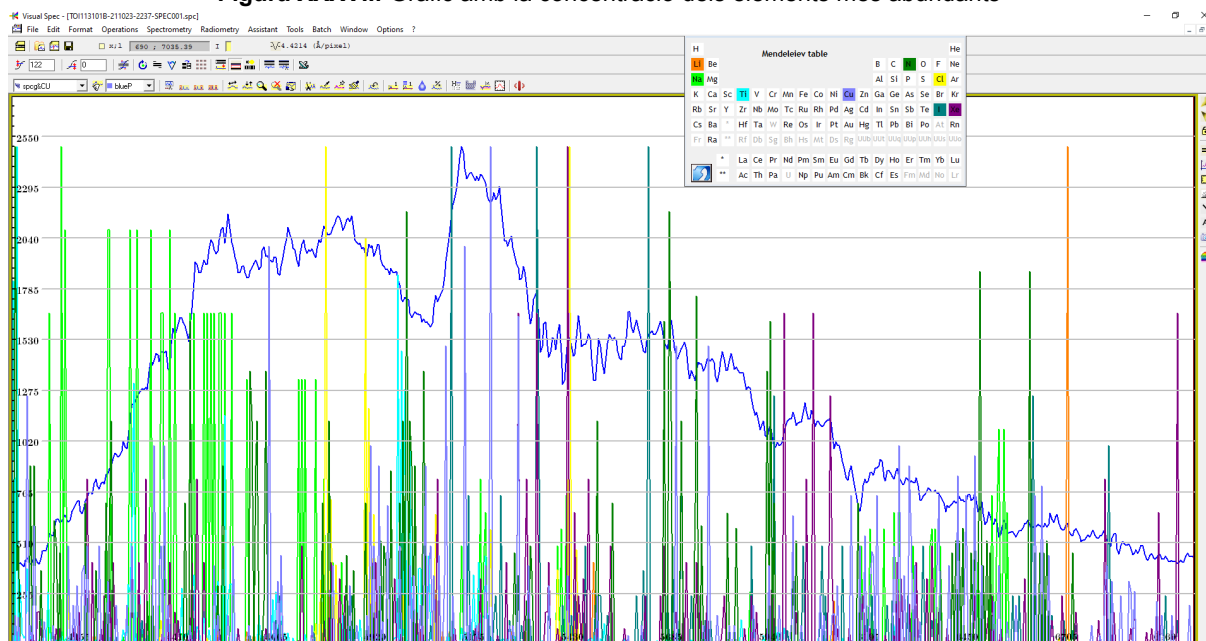
Però a partir d'aquests 5300 àngstroms ja observem diferències substancials entre ambdós espectres. La similitud de la zona inicial dels gràfics ens indica coherència entre ambdós gràfics, ja que estem analitzant la mateixa estrella. Però les diferències acusades que apareixen en el gràfic amb trànsit, indiquen que aquí alguna cosa ha canviat. En aquest sentit, resulten evidents tres bandes d'absorció destacables en les zones d'aproximadament 5940, 6190 i 6500 àngstroms, les zones on la intensitat per píxel disminueix. Com que aquestes zones no es detecten en el primer espectre, les bandes d'absorció corresponen efectivament a la presència de l'exoplaneta, i així doncs podem també confirmar la seva existència de forma experimental amb una altra tècnica d'observació i anàlisi.

Gràcies als gràfics anteriors, hem pogut confirmar l'existència de l'exoplaneta TOI 1131.01 b, però volem anar més enllà, ens interessa saber de què està compost aquest planeta, i si té algunes de les condicions necessàries per a la vida tal com nosaltres la coneixem.

Per a estudiar la seva composició necessitarem l'espectre en el qual el planeta transitava l'estrella, i amb el mateix programa VisualSpec ja podem analitzar el gràfic amb la concentració d'elements.

Aleshores, observem el gràfic amb la concentració d'alguns elements que ens han cridat especialment l'atenció, i que són els següents: Cu (Coure), Na (Sodi), Xe (Xenó), I (Iode), Cl (Clor), Ti (Titani), Li (Liti), N (Nitrogen).

Figura XXXVII: Gràfic amb la concentració dels elements més abundants



Font: Pròpia

Si ens fixem en les zones de les bandes d'absorció associades a la presència de l'exoplaneta, descobrim que a la zona dels 5940 àngstroms destaquen concentracions de N i Xe, nitrogen i xenó. A la zona dels 6190 predominen el nitrogen (N), i també trobem sodi (Na) i coure (Cu). A la zona dels 6500 àngstroms destaca també la presència del sodi Na, i també en zones adjacents torna a aparèixer el nitrogen.

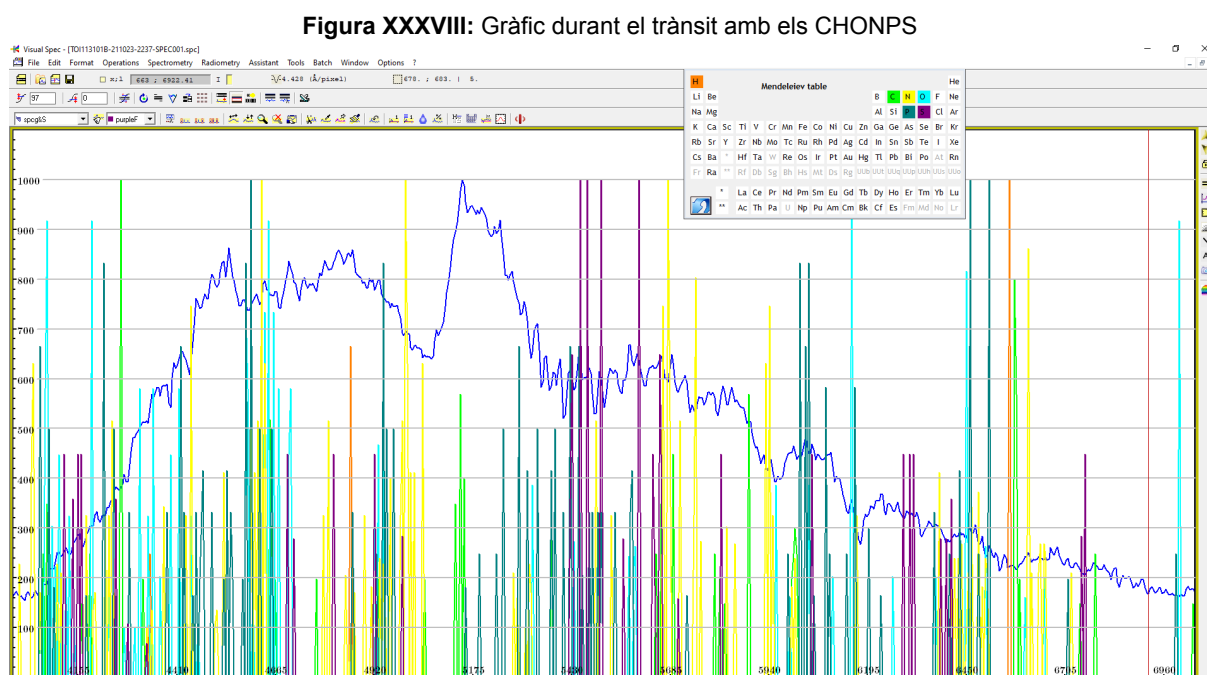
Així, segons la nostra anàlisi, podem inferir que a l'exoplaneta TOI 1131.01 b, es troben presents els elements químics N (Nitrogen), Xe (Xenó), Na (Sodi) i Cu (Coure). El sodi i el coure són metalls, i el nitrogen i el xenó són gasos.

Potser TOI 1131.01 b és un planeta amb una superfície sòlida, rica en metalls com el sodi i el coure, i una atmosfera rica en nitrogen i xenó. A la Terra, el xenó es troba en

traces²² a l'atmosfera terrestre, apareixent en una part per vint milions i aquest gas noble es detecta també en els gasos emesos per algunes fonts naturals.

Amb aquesta funció podem intentar detectar els que anteriorment, a l'apartat 11, hem comentat que eren els elements químics més importants que conformen la majoria de molècules biològiques a la Terra, els CHONPS (Carboni, Hidrogen, Oxigen, Nitrogen, Fòsfor i Sofre).

Si busquem els CHONPS en el nostre gràfic durant el trànsit, obtenim aquest resultat:



Font: Pròpia

Es pot apreciar clarament que aquests elements biogènics tenen una presència important, ja que les línies verticals assoleixen valors alts d'intensitat.

I resulta especialment interessant fixar-nos en la zona dels aproximadament 6500 àngstroms, la tercera banda d'absorció associada a TOI 1131.01 b.

²² En quantitats molt petites

En aquesta zona observem una presència abundant de carboni, hidrogen, oxigen, nitrogen i fòsfor. El sofre, en canvi, no apareix, però sí que ho fa en les zones adjacents.

Així, no podem afirmar que a TOI 1131.01 b hi hagi vida, ja que per a poder afirmar-ho necessitaríem una tecnologia que actualment està fora del nostre abast, però sí que hem estat capaços de detectar la presència en aquest exoplaneta dels elements biogènics, precursors de la vida!²³

²³ L'anàlisi espectroscòpica completa de TOI 1131.01b segons els nostres resultats la podeu trobar a l'annex 3

13. CONCLUSIÓ

Aquest estudi ha permès l'assoliment dels objectius específics següents, proposats en un primer moment.

En primer lloc, hem pogut confirmar l'existència de TOI 1131.01 b com a planeta, mitjançant el mètode del trànsit. Això ha sigut gràcies al fet que hem pogut detectar correctament la caiguda de llum de l'estrella progenitora coincidint amb el trànsit esperat. Aquesta caiguda de llum en la brillantor de l'estrella, representada al gràfic estudiat a l'apartat 10, demostra que hi ha un objecte astronòmic que passa per davant de l'estel, en aquest cas, el planeta TOI 1131.01 b està orbitant l'estrella. Així mateix, hem constatat certes diferències en el moment de màxima profunditat del trànsit respecte a les previsions dels models actuals, aportant correccions que poden representar una millora en aquests models.

Per acabar de confirmar que l'objecte que orbitava l'estrella progenitora era un planeta, hem realitzat tècniques d'espectroscòpia amb les quals hem sigut capaços de detectar diferències substancials en els espectres de l'estrella durant i sense el trànsit visible de l'exoplaneta des de la perspectiva de la Terra. Mitjançant aquest estudi, hem pogut confirmar que TOI 1131.01 b és un exoplaneta, ja que hem detectat les diferències desitjades durant l'espectroscòpia de l'estrella, en les quals el gràfic de l'espectre de l'estrella durant el trànsit del planeta ha mostrat tres bandes d'absorció evidents en les zones dels 5940, 6190 i 6500 àngstroms, on la intensitat per píxel ha disminuït, mentre que el gràfic de l'espectre de l'estrella sense el trànsit del planeta no ha mostrat aquestes bandes d'absorció. La diferència entre els dos espectres en aquestes zones verifiquen la presència de l'exoplaneta.

Més endavant, ens hem plantejat com a objectiu utilitzar aquest estudi espectroscòpic per poder caracteritzar químicament el planeta. Amb l'emprament del programa VisualSpec, tenint en compte les bandes d'absorció, hem analitzat les longituds d'ona del gràfic de l'espectre durant el trànsit. Mitjançant aquest procés,

hem assolit amb èxit el nostre propòsit i hem obtingut informació més específica sobre la composició química de l'objecte TOI 1131.01 b. Els resultats revelen que, com a mínim, el planeta conté traces detectables dels elements químics següents: Coure (Cu), Sodi (Na), Xenó (Xe), Iode (I), Clor (Cl), Titani (Ti), Liti (Li) i Nitrogen (N). Aquesta caracterització proporciona una comprensió més detallada de la composició atmosfèrica i química del planeta en qüestió.

A la vista dels resultats, especulem que TOI 1131.01 b, podria ser un planeta amb una superfície sòlida, rica en metalls com el coure i el sodi. A més, podria ser que l'exoplaneta tingues una atmosfera caracteritzada per la presència de nitrogen i xenó, a causa de l'abundància d'aquests gasos en el nostre estudi espectroscòpic.

Ara bé, amb aquest treball no només volíem conèixer la composició química del planeta, sinó que ens interessava saber si podríem trobar algun indici que ens ajudés a esbrinar si TOI 1131.01 b podria sustentar vida. Així doncs, amb el mateix procediment que hem usat anteriorment, hem constatat que el planeta analitzat conté traces dels elements imprescindibles per a la vida tal com els coneixem a la terra: els CHONPS (Carboni, Hidrogen, Oxigen, Nitrogen, Fòsfor i Sofre). Però, tot i que podem trobar aquests elements essencials a la seva atmosfera, això no implica la presència de vida, només la presència dels elements químics que la fan possible.

Finalment, després de completar minuciosament el procés de trànsit de l'exoplaneta i realitzar l'espectroscòpia de l'estrella tant durant el trànsit com fora d'aquest, hem aconseguit no només confirmar l'existència del planeta, sinó també classificar-lo químicament.

Així doncs, arribem a la conclusió que, en general, amb les eines tècniques disponibles per als aficionats a l'astronomia és viable dur a terme recerca efectiva en l'àmbit astronòmic, especialment en el camp apassionant dels exoplanetes i l'espectroscòpia. Aquesta experiència destaca la capacitat de la comunitat d'astrònoms aficionats per contribuir significativament al coneixement científic i explorar els misteris de l'univers amb recursos accessible.

BIBLIOGRAFIA

Algarabía. [En línia]. *Requisitos para ser un planeta*. Algarabía, 2022. [Consulta: 13 gener 2023]

<https://algarabia.com/requisitos-para-ser-un-planeta/>

Astro Artur. [En línia]. *Visual Spec (Vspec)*. [Consulta: 20 novembre 2023]

<https://astroastur.com/visual-spec-vspect/>

Bertran, P. [Vídeo]. *Los 10 Planetas Donde Podría Existir VIDA*. Barcelona, 2022. [Consulta: 23 gener 2023]

<https://www.youtube.com/watch?v=PQyCNPzWhpQ&t=137s>

Czech Astronomical Society. [En línia]. *TRESCA Project - Exoplanets*. Variable Star and Exoplanet Section. [Consulta: 30 octubre 2023]

<http://var2.astro.cz/EN/tresca/index.php>

Catalunyapress. [En línia]. *Com trobar exoplanetes*. Notícies sobre l'actualitat. Catalunyapress, 2017. [Consulta: 5 juny 2023]

<https://www.catalunyapress.cat/texto-diario/mostrar/742999/com-trobar-exoplanetes>

La Vanguardia. [En línia]. *Cómo nacen los planetas*. Revista social corporativa. La Vanguardia, 2016. [Consulta: 25 febrer 2023]

<https://www.lavanguardia.com/local/sevilla/20160318/40528417631/formacion-planetas-instituto-de-astrofisica-andalucia-estrella.html#:~:text=Los%20planetas%20se%20forman%20a,la%20forma%20de%20su%20%C3%B3rbita>

El Gran Observatorio. [En línia]. (2020, novembre 4). *Estrellas: qué son, tipos y todas las que debes conocer*. [Consulta: 6 de febrer 2023]

https://elgranobservatorio.com/estrellas/#Tipos_de_estrellas_sus_caracteristicas_principales_y_de_que_color_son_las_estrellas

Equip d'Experts en Ciència i Tecnologia. [En línia]. *Exoplaneta: más allá del sol*. Universitat Internacional de València, 2022. [Consulta: 30 maig 2023]

<https://www.universidadviu.com/ec/actualidad/nuestros-expertos/exoplaneta-mas-alla-del-sol>

Esero. [En línia]. *El método del tránsito*. Esero, 2017. [Consulta: 12 de febrer 2023]

https://esero.es/practic-as-en-abierto/exoplanetas-primaria/el_mtodo_del_trnsit_o.html

GARLICK, M. *Astronomía: biblioteca visual*. [p.262]. Barcelona: Libros cúpula, 2004. [Consulta: 15 febrer 2023]

Howard Community College. [En línia]. *Exoplanet Photometry and False Positives*. Pressbooks, S.D. [Consulta: 4 setembre 2023]

<https://pressbooks.howardcc.edu/jrip3/chapter/exoplanet-photometry-and-false-positives/#:~:text=Identification%20of%20false%20positives%20are,shape%20of%20the%20light%20curve>

Instituto de Física Técnica. [Vídeo]. *¿Sabes cómo se formaron las galaxias?* Madrid: 2021. [Consulta: 4 març 2023]

<https://www.youtube.com/watch?v=KLi7FwwGagE>

Massachusetts Institute of Technology. [En línia]. *TESS, the Transiting Exoplanet Survey Satellite*. [Consulta: 21 abril 2023]

<https://tess.mit.edu/>

Minor Planet Center. [En línia]. *The Minor Planet Center (MPC)*. MPC, 2023. [Consulta: 30 maig 2023]

<https://minorplanetcenter.net/>

Natalia M. Guerrero et al. [En línia]. *The TESS Objects of Interest Catalog from the TESS Prime Mission*. The astrophysical journal, 2021. [Consulta: 20 setembre 2023]

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/abefe1>

Nathional Geographic. [En línia]. *¿Qué sabes de las estrellas?* National Gegraphic, 2023. [Consulta: 5 maig 2023]

<https://www.nationalgeographic.es/espacio/que-sabes-de-las-estrellas>

NASA. [En línia]. *What is a transit?* [Consulta: 17 abril 2023]

<https://exoplanets.nasa.gov/faq/31/whats-a-transit/#:~:text=Most%20known%20exoplanets%20have%20been,between%20us%20and%20the%20Sun>

NASA. [En línia]. *What is an exoplanet?* Nasa, 2022. [Consulta: 2 març 2023]

<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/>

SMD Content Editors. [En línia] . *What is a Planet?* NASA, 2023. [Consulta: 25 febrer 2023]

<https://science.nasa.gov/solar-system/planets/what-is-a-planet/>

Sociedad Española de Astronomía. [En línia]. *ESPECTROSCOPIA (O ESPECTROSCOPIA)*. [Consulta: 20 novembre 2023]

<https://www.sea-astronomia.es/glosario/espectroscopia-o-espectroscopia>

Sociedad Española de Astronomía. [En línia]. *ESPECTRO*. [Consulta: 20 novembre 2023]

<https://www.sea-astronomia.es/glosario/espectro>

Stanislav Poddaný. [En línia]. *Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits*. Science Direct, 2010. [Consulta: 17 abril 2023]

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1384107609001213>

The European Space Agency. [En línia]. *What are exoplanets?* [Consulta: 23 setembre 2023]

https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Exoplanets/What_are_exoplanets

The Planetary Society. [En línia]. *TESS, finding new worlds*. [Consulta: 20 octubre 2023]

<https://www.planetary.org/space-missions/tess>

Trigo i Rodríguez, J. [En línia]. *L'origen del sistema solar*. [pàg. 125]. Capellades: Pòrtic Edicions, 2000. [Consulta: 12 abril 2023]

Universitat Internacional de València. [En línia]. *¿Qué es un observatorio astronómico?* Equip d'Experts en Ciència i Tecnologia, 2018. [Consulta: 20 novembre 2023]

<https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/que-es-un-observatorio-astronomico>

Univerzoo Cuantico. [En línia]. *¿Qué es una Microlente Gravitacional?* Univerzoo Cuantico, 2021. [Consulta: 19 octubre 2023]

<https://univerzoocuantico.com/fisica/que-es-una-microlente-gravitacional/>

VILÀ, D. [En línia]. *L'observatori astronòmic de Can Roig de Llagostera entra en una xarxa mundial*. El Punt Avui, 2012. [Consulta: 30 maig 2023]

<https://www.elpuntavui.cat/article/2-societat/5-societat/509868-observatori-astromomic-de-can-roig-de-llagostera-entra-en-una-xarxa-mundial.html>

WILLIAMS, M. [En línia]. *What is the direct imaging method?* Universe Today. Space and astronomy news, 2018. [Consulta: 27 setembre 2023]

<https://www.universetoday.com/140341/what-is-direct-imaging/>

ANNEX 1. FOTOGRAFIES DEL TRÀNSIT

Figura A1.I: Fotografia a les 21.59



Font: Pròpia

Figura A1.II: Fotografia a les 22.00



Font: Pròpia

Figura A1.III: Fotografia a les 22.01



Font: Pròpia

Figura A1.IV: Fotografia a les 22.02



Font: Pròpia

Figura A1.V: Fotografia a les 22.03



Font: Pròpia

Figura A1.VI: Fotografia a les 22.04



Font: Pròpia

Figura A1.VII: Fotografia a les 22.05



Font: Pròpia

Figura A1.VIII: Fotografia a les 22.06



Font: Pròpia

Figura A1.IX: Fotografia a les 22.07



Font: Pròpia

Figura A1.X: Fotografia a les 22.08



Font: Pròpia

Figura A1.XI: Fotografia a les 22.09



Font: Pròpia

Figura A1.XII: Fotografia a les 22.10



Font: Pròpia

Figura A1.XIII: Fotografia a les 22.11



Font: Pròpia

Figura A1.XIV: Fotografia a les 22.12



Font: Pròpia

Figura A1.XV: Fotografia a les 22.13



Font: Pròpia

Figura A1.XVI: Fotografia a les 22.14



Font: Pròpia

Figura A1.XVII: Fotografia a les 22.15



Font: Pròpia

Figura A1.XVIII: Fotografia a les 22.16



Font: Pròpia

Figura A1.XIX: Fotografia a les 22.17



Font: Pròpia

Figura A1.XX: Fotografia a les 22.18



Font: Pròpia

Figura A1.XXI: Fotografia a les 22.19



Font: Pròpia

Figura A1.XXII: Fotografia a les 22.20



Font: Pròpia

Figura A1.XXIII: Fotografia a les 22.21



Font: Pròpia

Figura A1.XXIV: Fotografia a les 22.22



Font: Pròpia

Figura A1.XXV: Fotografia a les 22.23



Font: Pròpia

Figura A1.XXVI: Fotografia a les 22.24



Font: Pròpia

Figura A1.XXVII: Fotografia a les 22.25



Font: Pròpia

Figura A1.XXVIII: Fotografia a les 22.26



Font: Pròpia

Figura A1.XXIX: Fotografia a les 22.27



Font: Pròpia

Figura A1.XXX: Fotografia a les 22.28



Font: Pròpia

Figura A1.XXXI: Fotografia a les 22.29



Font: Pròpia

Figura A1.XXXII: Fotografia a les 22.30



Font: Pròpia

Figura A1.XXXIII: Fotografia a les 22.31



Font: Pròpia

Figura A1.XXXIV: Fotografia a les 22.32



Font: Pròpia

Figura A1.XXXV: Fotografia a les 22.33



Font: Pròpia

Figura A1.XXXVI: Fotografia a les 22.34



Font: Pròpia

Figura A1.XXXVII: Fotografia a les 22.35



Font: Pròpia

Figura A1.XXXVIII: Fotografia a les 22.36



Font: Pròpia

Figura A1.XXXIX: Fotografia a les 22.37



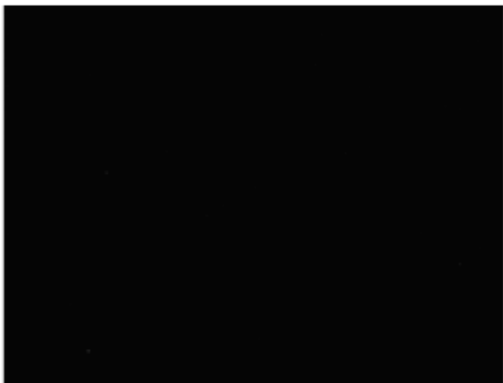
Font: Pròpia

Figura A1.XL: Fotografia a les 22.38



Font: Pròpia

Figura A1.XLI: Fotografia a les 22.39



Font: Pròpia

Figura A1.XLII: Fotografia a les 22.40



Font: Pròpia

Figura A1.XLIII: Fotografia a les 22.41



Font: Pròpia

Figura A1.XLIV: Fotografia a les 22.42



Font: Pròpia

Figura A1.XLV: Fotografia a les 22.43



Font: Pròpia

Figura A1.XLVI: Fotografia a les 22.44



Font: Pròpia

Figura A1.XLVII: Fotografia a les 22.45



Font: Pròpia

Figura A1.XLVIII: Fotografia a les 22.46



Font: Pròpia

Figura A1.XLIX: Fotografia a les 22.47



Font: Pròpia

Figura A1.LX: Fotografia a les 22.48



Font: Pròpia

Figura A1.XLXI: Fotografia a les 22.49



Font: Pròpia

Figura A1.XLXII: Fotografia a les 22.50



Font: Pròpia

Figura A1.XLXIII: Fotografia a les 22.51



Font: Pròpia

Figura A1.XLXIV: Fotografia a les 22.52



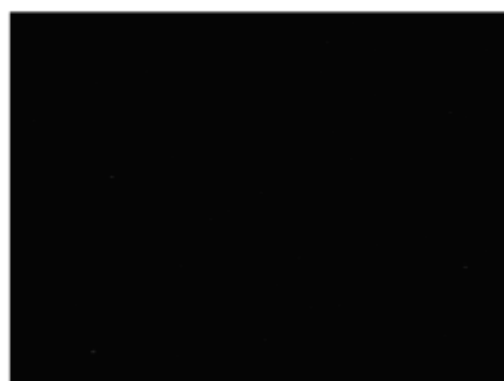
Font: Pròpia

Figura A1.XLXV: Fotografia a les 22.53



Font: Pròpia

Figura A1.XLXVI: Fotografia a les 22.54



Font: Pròpia

Figura A1.XLXVII: Fotografia a les 22.55



Font: Pròpia

Figura A1.XLXVIII: Fotografia a les 22.56



Font: Pròpia

Figura A1.XLXIX: Fotografia a les 22.57



Font: Pròpia

Figura A1.XLXX: Fotografia a les 22.58



Font: Pròpia

Figura A1.XLXXI: Fotografia a les 22.59



Font: Pròpia

Figura A1.XLXXII: Fotografia a les 23.00



Font: Pròpia

Figura A1.XLXXIII: Fotografia a les 23.01



Font: Pròpia

Figura A1.XLXXIV: Fotografia a les 23.02



Font: Pròpia

ANNEX 2. INFORME DEL TRÀNSIT DE TOI 1131.01 b COMPLET

FLUJO ABSOLUTO (CUENTAS)

TOI 1131.01 B

FECHA J HELIO	FLUJO	+/-	RSR AIRMS	TRANS	FWHM"	FONDO	N	NUM
2460222.33253	336858	2010	168	1.385	1.17	0.14	0.28	01 0001
2460222.33335	381300	2139	178	1.388	1.34	0.13	0.45	01 0002
2460222.33417	402122	2197	183	1.391	1.40	0.15	0.50	01 0003
2460222.33499	390662	2165	180	1.395	1.38	0.14	0.49	01 0004
2460222.33583	388839	2160	180	1.398	1.34	0.17	0.45	01 0005
2460222.33665	353654	2060	172	1.401	1.25	0.16	0.36	01 0006
2460222.33747	308487	1924	160	1.405	1.09	0.14	0.19	01 0007
2460222.33829	301067	1901	158	1.408	1.07	0.14	0.16	01 0008
2460222.33911	322517	1967	164	1.411	1.11	0.14	0.21	01 0009
2460222.33993	292686	1874	156	1.415	1.03	0.15	0.11	01 0010
2460222.34076	278934	1830	152	1.418	0.97	0.15	0.04	01 0011
2460222.34158	296130	1885	157	1.422	1.04	0.14	0.12	01 0012
2460222.34240	295327	1883	157	1.425	1.04	0.15	0.12	01 0013
2460222.34322	296459	1886	157	1.429	1.05	0.15	0.14	01 0014
2460222.34404	282245	1840	153	1.432	0.99	0.16	0.07	01 0015

2460222.34488	281529	1838	153	1.436	0.97	0.15	0.04	01	0016
2460222.34570	287935	1859	155	1.440	1.02	0.15	0.11	01	0017
2460222.34652	300497	1899	158	1.443	1.06	0.15	0.15	01	0018
2460222.34734	300824	1900	158	1.447	1.06	0.15	0.15	01	0019
2460222.34816	322680	1968	164	1.451	1.14	0.17	0.24	01	0020
2460222.34898	340816	2022	169	1.454	1.19	0.15	0.29	01	0021
2460222.34981	332810	1998	167	1.458	1.18	0.15	0.28	01	0022
2460222.35063	345782	2037	170	1.462	1.20	0.14	0.30	01	0023
2460222.35145	337641	2013	168	1.466	1.19	0.14	0.29	01	0024
2460222.35227	335315	2006	167	1.469	1.18	0.14	0.28	01	0025
2460222.35311	330863	1993	166	1.473	1.15	0.13	0.26	01	0026
2460222.35393	319771	1959	163	1.477	1.11	0.16	0.21	01	0027
2460222.35475	299708	1896	158	1.481	1.05	0.13	0.15	01	0028
2460222.35557	285830	1852	154	1.485	0.99	0.14	0.07	01	0029
2460222.35639	253339	1744	145	1.489	0.91	0.16	-0.05	01	0030
2460222.35721	238078	1690	141	1.493	0.84	0.15	-0.13	01	0031
2460222.35804	241924	1704	142	1.497	0.82	0.18	-0.16	01	0032
2460222.35886	239085	1694	141	1.501	0.83	0.14	-0.16	01	0033
2460222.35969	221126	1629	136	1.505	0.79	0.14	-0.22	01	0034
2460222.36051	202707	1560	130	1.509	0.70	0.17	-0.37	01	0035
2460222.36133	158366	1379	115	1.513	0.56	0.15	-0.65	01	0036
2460222.36216	117353	1187	99	1.517	0.41	0.15	-1.01	01	0037

2460222.36298	88659	1032	86	1.521	0.31	0.15	-1.35	01	0038
2460222.36380	101071	1101	92	1.525	0.36	0.18	-1.18	01	0039
2460222.36462	129494	1247	104	1.530	0.45	0.17	-0.91	01	0040
2460222.36544	165404	1409	117	1.534	0.56	0.15	-0.66	01	0041
2460222.36628	159941	1385	115	1.538	0.56	0.14	-0.66	01	0042
2460222.36710	175698	1452	121	1.542	0.63	0.16	-0.53	01	0043
2460222.36792	196948	1537	128	1.547	0.70	0.15	-0.40	01	0044
2460222.36874	175315	1450	121	1.551	0.59	0.14	-0.60	01	0045
2460222.36956	235970	1683	140	1.555	0.83	0.15	-0.20	01	0046
2460222.37039	285848	1852	154	1.560	0.99	0.15	0.01	01	0047
2460222.37121	302766	1906	159	1.564	1.05	0.13	0.09	01	0048
2460222.37204	290370	1867	156	1.569	1.04	0.14	0.07	01	0049
2460222.37286	292807	1874	156	1.573	1.02	0.15	0.05	01	0050
2460222.37368	284217	1847	154	1.578	1.01	0.15	0.03	01	0051
2460222.37451	267457	1792	149	1.582	0.94	0.14	-0.06	01	0052
2460222.37533	262004	1773	148	1.587	0.90	0.18	-0.11	01	0053
2460222.37615	270571	1802	150	1.591	0.96	0.15	-0.04	01	0054
2460222.37697	331977	1996	166	1.596	1.15	0.14	0.18	01	0055
2460222.37780	342359	2027	169	1.601	1.22	0.14	0.26	01	0056
2460222.37863	340788	2022	169	1.605	1.22	0.15	0.25	01	0057
2460222.37945	343318	2030	169	1.610	1.21	0.15	0.24	01	0058
2460222.38027	367928	2101	175	1.615	1.30	0.14	0.33	01	0059

2460222.38109	374763	2121	177	1.620	1.34	0.15	0.36	01	0060
2460222.38191	377047	2127	177	1.624	1.33	0.18	0.35	01	0061
2460222.38273	383102	2144	179	1.629	1.36	0.14	0.37	01	0062
2460222.38357	379742	2135	178	1.634	1.35	0.15	0.36	01	0063

ANNEX 3. ANÀLISI ESPECTROSCÒPICA COMPLETA DE TOI 1131.01 b

Línia	Longitud d'ona	Intensitat
1	3982.44775390625	298
2	3986.89501953125	311
3	3991.34252929688	321
4	3995.78979492188	310
5	4000.2373046875	302
6	4004.68481445313	299
7	4009.13208007813	286
8	4013.57958984375	277
9	4018.02685546875	304
10	4022.47436523438	314
11	4026.92163085938	298
12	4031.369140625	291
13	4035.81640625	298
14	4040.26391601563	319
15	4044.71118164063	308
16	4049.15869140625	301
17	4053.60595703125	302

18	4058.05346679688	317
19	4062.50073242188	340
20	4066.9482421875	342
21	4071.39575195313	353
22	4075.84301757813	377
23	4080.29052734375	403
24	4084.73779296875	398
25	4089.18530273438	394
26	4093.63256835938	420
27	4098.080078125	457
28	4102.52734375	458
29	4106.974609375	445
30	4111.42236328125	449
31	4115.86962890625	465
32	4120.31689453125	482
33	4124.76416015625	464
34	4129.2119140625	453
35	4133.6591796875	456
36	4138.1064453125	491
37	4142.55419921875	501

38	4147.00146484375	509
39	4151.44873046875	519
40	4155.89599609375	526
41	4160.34375	484
42	4164.791015625	477
43	4169.23828125	501
44	4173.685546875	520
45	4178.13330078125	534
46	4182.58056640625	556
47	4187.02783203125	558
48	4191.47509765625	563
49	4195.9228515625	611
50	4200.3701171875	617
51	4204.8173828125	583
52	4209.2646484375	571
53	4213.71240234375	594
54	4218.15966796875	598
55	4222.60693359375	590
56	4227.0546875	621
57	4231.501953125	623

58	4235.94921875	642
59	4240.396484375	654
60	4244.84423828125	676
61	4249.29150390625	690
62	4253.73876953125	688
63	4258.18603515625	690
64	4262.6337890625	701
65	4267.0810546875	712
66	4271.5283203125	747
67	4275.9755859375	726
68	4280.42333984375	722
69	4284.87060546875	768
70	4289.31787109375	828
71	4293.765625	875
72	4298.212890625	880
73	4302.66015625	892
74	4307.107421875	896
75	4311.55517578125	910
76	4316.00244140625	926
77	4320.44970703125	941

78	4324.89697265625	941
79	4329.3447265625	940
80	4333.7919921875	925
81	4338.2392578125	977
82	4342.6865234375	1023
83	4347.13427734375	1011
84	4351.58154296875	1038
85	4356.02880859375	1058
86	4360.4765625	1056
87	4364.923828125	1029
88	4369.37109375	1066
89	4373.818359375	1072
90	4378.26611328125	1069
91	4382.71337890625	1077
92	4387.16064453125	1006
93	4391.60791015625	983
94	4396.0556640625	1095
95	4400.5029296875	1152
96	4404.9501953125	1136
97	4409.3974609375	1149

98	4413.84521484375	1165
99	4418.29248046875	1191
100	4422.73974609375	1190
101	4427.1875	1169
102	4431.634765625	1156
103	4436.08203125	1134
104	4440.529296875	1110
105	4444.97705078125	1154
106	4449.42431640625	1215
107	4453.87158203125	1310
108	4458.31884765625	1378
109	4462.7666015625	1358
110	4467.2138671875	1340
111	4471.6611328125	1348
112	4476.1083984375	1372
113	4480.55615234375	1396
114	4485.00341796875	1378
115	4489.45068359375	1382
116	4493.89794921875	1440
117	4498.345703125	1471

118	4502.79296875	1454
119	4507.240234375	1435
120	4511.68798828125	1430
121	4516.13525390625	1451
122	4520.58251953125	1491
123	4525.02978515625	1516
124	4529.4775390625	1517
125	4533.9248046875	1462
126	4538.3720703125	1500
127	4542.8193359375	1566
128	4547.26708984375	1508
129	4551.71435546875	1457
130	4556.16162109375	1446
131	4560.60888671875	1412
132	4565.056640625	1386
133	4569.50390625	1357
134	4573.951171875	1357
135	4578.39892578125	1375
136	4582.84619140625	1375
137	4587.29345703125	1360

138	4591.74072265625	1341
139	4596.1884765625	1339
140	4600.6357421875	1362
141	4605.0830078125	1380
142	4609.5302734375	1393
143	4613.97802734375	1398
144	4618.42529296875	1382
145	4622.87255859375	1356
146	4627.31982421875	1366
147	4631.767578125	1438
148	4636.21484375	1452
149	4640.662109375	1422
150	4645.10986328125	1422
151	4649.55712890625	1396
152	4654.00439453125	1389
153	4658.45166015625	1391
154	4662.8994140625	1409
155	4667.3466796875	1405
156	4671.7939453125	1350
157	4676.2412109375	1356

158	4680.68896484375	1380
159	4685.13623046875	1407
160	4689.58349609375	1443
161	4694.03076171875	1467
162	4698.478515625	1499
163	4702.92578125	1493
164	4707.373046875	1475
165	4711.8203125	1448
166	4716.26806640625	1436
167	4720.71533203125	1403
168	4725.16259765625	1375
169	4729.6103515625	1389
170	4734.0576171875	1401
171	4738.5048828125	1423
172	4742.9521484375	1418
173	4747.39990234375	1417
174	4751.84716796875	1435
175	4756.29443359375	1432
176	4760.74169921875	1443
177	4765.189453125	1425

178	4769.63671875	1413
179	4774.083984375	1437
180	4778.53125	1472
181	4782.97900390625	1464
182	4787.42626953125	1502
183	4791.87353515625	1524
184	4796.3212890625 1	495
185	4800.7685546875	1480
186	4805.2158203125	1489
187	4809.6630859375	1488
188	4814.11083984375	1511
189	4818.55810546875	1528
190	4823.00537109375	1548
191	4827.45263671875	1562
192	4831.900390625	1547
193	4836.34765625	1529
194	4840.794921875	1510
195	4845.2421875	1524
196	4849.68994140625	1543
197	4854.13720703125	1549

198	4858.58447265625	1534
199	4863.0322265625	1556
200	4867.4794921875	1511
201	4871.9267578125	1481
202	4876.3740234375	1480
203	4880.82177734375	1469
204	4885.26904296875	1455
205	4889.71630859375	1432
206	4894.16357421875	1439
207	4898.611328125	1419
208	4903.05859375	1420
209	4907.505859375	1458
210	4911.953125	1445
211	4916.40087890625	1459
212	4920.84814453125	1420
213	4925.29541015625	1431
214	4929.7431640625	1453
215	4934.1904296875	1452
216	4938.6376953125	1404
217	4943.0849609375	1381

218	4947.53271484375	1389
219	4951.97998046875	1384
220	4956.42724609375	1384
221	4960.87451171875	1358
222	4965.322265625	1372
223	4969.76953125	1363
224	4974.216796875	1354
225	4978.6640625	1353
226	4983.11181640625	1329
227	4987.55908203125	1316
228	4992.00634765625	1265
229	4996.45361328125	1253
230	5000.9013671875	1269
231	5005.3486328125	1258
232	5009.7958984375	1241
233	5014.24365234375	1202
234	5018.69091796875	1205
235	5023.13818359375	1217
236	5027.58544921875	1209
237	5032.033203125	1199

238	5036.48046875	1205
239	5040.927734375	1195
240	5045.375	1158
241	5049.82275390625	1170
242	5054.27001953125	1170
243	5058.71728515625	1174
244	5063.16455078125	1172
245	5067.6123046875	1168
246	5072.0595703125	1175
247	5076.5068359375	1226
248	5080.95458984375	1266
249	5085.40185546875	1245
250	5089.84912109375	1258
251	5094.29638671875	1280
252	5098.744140625	1314
253	5103.19140625	1373
254	5107.638671875	1408
255	5112.0859375	1441
256	5116.53369140625	1493
257	5120.98095703125	1562

258	5125.42822265625	1592
259	5129.87548828125	1618
260	5134.3232421875	1649
261	5138.7705078125	1690
262	5143.2177734375	1765
263	5147.66552734375	1806
264	5152.11279296875	1780
265	5156.56005859375	1723
266	5161.00732421875	1687
267	5165.455078125	1703
268	5169.90234375	1722
269	5174.349609375	1723
270	5178.796875	1706
271	5183.24462890625	1684
272	5187.69189453125	1702
273	5192.13916015625	1693
274	5196.58642578125	1721
275	5201.0341796875	1711
276	5205.4814453125	1693
277	5209.9287109375	1673

278	5214.37646484375	1625
279	5218.82373046875	1620
280	5223.27099609375	1617
281	5227.71826171875	1618
282	5232.166015625	1647
283	5236.61328125	1624
284	5241.060546875	1630
285	5245.5078125	1668
286	5249.95556640625	1610
287	5254.40283203125	1542
288	5258.85009765625	1468
289	5263.29736328125	1471
290	5267.7451171875	1452
291	5272.1923828125	1466
292	5276.6396484375	1481
293	5281.0869140625	1451
294	5285.53466796875	1418
295	5289.98193359375	1381
296	5294.42919921875	1361
297	5298.876953125	1319

298	5303.32421875	1326
299	5307.771484375	1374
300	5312.21875	1356
301	5316.66650390625	1303
302	5321.11376953125	1222
303	5325.56103515625	1164
304	5330.00830078125	1190
305	5334.4560546875	1276
306	5338.9033203125	1295
307	5343.3505859375	1296
308	5347.7978515625	1199
309	5352.24560546875	1063
310	5356.69287109375	1083
311	5361.14013671875	1166
312	5365.587890625	1176
313	5370.03515625	1084
314	5374.482421875	1050
315	5378.9296875	1070
316	5383.37744140625	1113
317	5387.82470703125	1100

318	5392.27197265625	1063
319	5396.71923828125	1120
320	5401.1669921875	1159
321	5405.6142578125	1059
322	5410.0615234375	949
323	5414.5087890625	956
324	5418.95654296875	1049
325	5423.40380859375	1112
326	5427.85107421875	1134
327	5432.298828125	1092
328	5436.74609375	1049
329	5441.193359375	1057
330	5445.640625	1115
331	5450.08837890625	1190
332	5454.53564453125	1163
333	5458.98291015625	1089
334	5463.43017578125	1092
335	5467.8779296875	1091
336	5472.3251953125	1106
337	5476.7724609375	1129

338	5481.2197265625	1114
339	5485.66748046875	1043
340	5490.11474609375	971
341	5494.56201171875	966
342	5499.00927734375	1058
343	5503.45703125	1118
344	5507.904296875	1086
345	5512.3515625	1023
346	5516.79931640625	994
347	5521.24658203125	1043
348	5525.69384765625	1105
349	5530.14111328125	1135
350	5534.5888671875	1127
351	5539.0361328125	1115
352	5543.4833984375	1121
353	5547.9306640625	1110
354	5552.37841796875	1069
355	5556.82568359375	1046
356	5561.27294921875	1035
357	5565.72021484375	1082

358	5570.16796875	1074
359	5574.615234375	1110
360	5579.0625	1215
361	5583.51025390625	1216
362	5587.95751953125	1157
363	5592.40478515625	1137
364	5596.85205078125	1149
365	5601.2998046875	1178
366	5605.7470703125	1147
367	5610.1943359375	1111
368	5614.6416015625	1095
369	5619.08935546875	1065
370	5623.53662109375	1062
371	5627.98388671875	1103
372	5632.43115234375	1127
373	5636.87890625	1129
374	5641.326171875	1130
375	5645.7734375	1117
376	5650.22119140625	1120
377	5654.66845703125	1142

378	5659.11572265625	1164
379	5663.56298828125	1171
380	5668.0107421875	1143
381	5672.4580078125	1098
382	5676.9052734375	1093
383	5681.3525390625	1082
384	5685.80029296875	1128
385	5690.24755859375	1180
386	5694.69482421875	1152
387	5699.14208984375	1082
388	5703.58984375	1049
389	5708.037109375	1043
390	5712.484375	1064
391	5716.93212890625	1078
392	5721.37939453125	1079
393	5725.82666015625	1099
394	5730.27392578125	1074
395	5734.7216796875	996
396	5739.1689453125	980
397	5743.6162109375	1014

398	5748.0634765625	985
399	5752.51123046875	965
400	5756.95849609375	996
401	5761.40576171875	1026
402	5765.85302734375	1032
403	5770.30078125	1038
404	5774.748046875	1005
405	5779.1953125	1015
406	5783.642578125	1041
407	5788.09033203125	1043
408	5792.53759765625	1036
409	5796.98486328125	1045
410	5801.4326171875	1028
411	5805.8798828125	975
412	5810.3271484375	953
413	5814.7744140625	999
414	5819.22216796875	1036
415	5823.66943359375	1060
416	5828.11669921875	1037
417	5832.56396484375	997

418	5837.01171875	996
419	5841.458984375	1031
420	5845.90625	1057
421	5850.353515625	1041
422	5854.80126953125	1010
423	5859.24853515625	1019
424	5863.69580078125	999
425	5868.1435546875	989
426	5872.5908203125	981
427	5877.0380859375	979
428	5881.4853515625	962
429	5885.93310546875	932
430	5890.38037109375	943
431	5894.82763671875	938
432	5899.27490234375	895
433	5903.72265625	859
434	5908.169921875	836
435	5912.6171875	841
436	5917.064453125	807
437	5921.51220703125	780

438	5925.95947265625	805
439	5930.40673828125	816
440	5934.8544921875	772
441	5939.3017578125	774
442	5943.7490234375	802
443	5948.1962890625	798
444	5952.64404296875	755
445	5957.09130859375	717
446	5961.53857421875	717
447	5965.98583984375	741
448	5970.43359375	734
449	5974.880859375	732
450	5979.328125	739
451	5983.775390625	785
452	5988.22314453125	810
453	5992.67041015625	818
454	5997.11767578125	824
455	6001.5654296875	824
456	6006.0126953125	842
457	6010.4599609375	816

458	6014.9072265625	791
459	6019.35498046875	806
460	6023.80224609375	813
461	6028.24951171875	817
462	6032.69677734375	853
463	6037.14453125	889
464	6041.591796875	851
465	6046.0390625	817
466	6050.486328125	816
467	6054.93408203125	856
468	6059.38134765625	838
469	6063.82861328125	803
470	6068.27587890625	829
471	6072.7236328125	824
472	6077.1708984375	807
473	6081.6181640625	794
474	6086.06591796875	791
475	6090.51318359375	801
476	6094.96044921875	808
477	6099.40771484375	792

478	6103.85546875	795
479	6108.302734375	765
480	6112.75	715
481	6117.197265625	735
482	6121.64501953125	727
483	6126.09228515625	723
484	6130.53955078125	694
485	6134.98681640625	671
486	6139.4345703125	648
487	6143.8818359375	619
488	6148.3291015625	605
489	6152.77685546875	627
490	6157.22412109375	654
491	6161.67138671875	618
492	6166.11865234375	581
493	6170.56640625	548
494	6175.013671875	510
495	6179.4609375	489
496	6183.908203125	507
497	6188.35595703125	567

498	6192.80322265625	589
499	6197.25048828125	587
500	6201.69775390625	597
501	6206.1455078125	626
502	6210.5927734375	618
503	6215.0400390625	616
504	6219.48779296875	651
505	6223.93505859375	655
506	6228.38232421875	650
507	6232.82958984375	672
508	6237.27734375	669
509	6241.724609375	612
510	6246.171875	597
511	6250.619140625	633
512	6255.06689453125	638
513	6259.51416015625	633
514	6263.96142578125	618
515	6268.40869140625	611
516	6272.8564453125	637
517	6277.3037109375	643

518	6281.7509765625	609
519	6286.1982421875	604
520	6290.64599609375	583
521	6295.09326171875	581
522	6299.54052734375	610
523	6303.98828125	605
524	6308.435546875	599
525	6312.8828125	606
526	6317.330078125	597
527	6321.77783203125	585
528	6326.22509765625	600
529	6330.67236328125	579
530	6335.11962890625	525
531	6339.5673828125	514
532	6344.0146484375	528
533	6348.4619140625	541
534	6352.9091796875	551
535	6357.35693359375	572
536	6361.80419921875	571
537	6366.25146484375	553

538	6370.69921875	542
539	6375.146484375	547
540	6379.59375	548
541	6384.041015625	552
542	6388.48876953125	546
543	6392.93603515625	522
544	6397.38330078125	513
545	6401.83056640625	491
546	6406.2783203125	515
547	6410.7255859375	501
548	6415.1728515625	507
549	6419.6201171875	514
550	6424.06787109375	521
551	6428.51513671875	517
552	6432.96240234375	522
553	6437.41015625	538
554	6441.857421875	522
555	6446.3046875	539
556	6450.751953125	525
557	6455.19970703125	512

558	6459.64697265625	542
559	6464.09423828125	554
560	6468.54150390625	534
561	6472.9892578125	533
562	6477.4365234375	559
563	6481.8837890625	522
564	6486.3310546875	482
565	6490.77880859375	494
566	6495.22607421875	517
567	6499.67333984375	477
568	6504.12109375	442
569	6508.568359375	450
570	6513.015625	484
571	6517.462890625	473
572	6521.91064453125	453
573	6526.35791015625	441
574	6530.80517578125	455
575	6535.25244140625	441
576	6539.7001953125	383
577	6544.1474609375	393

578	6548.5947265625	420
579	6553.0419921875	442
580	6557.48974609375	427
581	6561.93701171875	397
582	6566.38427734375	405
583	6570.83154296875	412
584	6575.279296875	413
585	6579.7265625	408
586	6584.173828125	397
587	6588.62158203125	407
588	6593.06884765625	417
589	6597.51611328125	416
590	6601.96337890625	421
591	6606.4111328125	442
592	6610.8583984375	444
593	6615.3056640625	460
594	6619.7529296875	437
595	6624.20068359375	425
596	6628.64794921875	439
597	6633.09521484375	435

598	6637.54248046875	435
599	6641.990234375	443
600	6646.4375	445
601	6650.884765625	438
602	6655.33251953125	434
603	6659.77978515625	441
604	6664.22705078125	428
605	6668.67431640625	427
606	6673.1220703125	470
607	6677.5693359375	459
608	6682.0166015625	466
609	6686.4638671875	490
610	6690.91162109375	493
611	6695.35888671875	463
612	6699.80615234375	439
613	6704.25341796875	421
614	6708.701171875	414
615	6713.1484375	430
616	6717.595703125	434
617	6722.04345703125	409

618	6726.49072265625	400
619	6730.93798828125	405
620	6735.38525390625	422
621	6739.8330078125	424
622	6744.2802734375	405
623	6748.7275390625	399
624	6753.1748046875	389
625	6757.62255859375	383
626	6762.06982421875	381
627	6766.51708984375	385
628	6770.96435546875	389
629	6775.412109375	390
630	6779.859375	393
631	6784.306640625	402
632	6788.75439453125	411
633	6793.20166015625	411
634	6797.64892578125	400
635	6802.09619140625	399
636	6806.5439453125	398
637	6810.9912109375	413

638	6815.4384765625	402
639	6819.8857421875	404
640	6824.33349609375	395
641	6828.78076171875	359
642	6833.22802734375	381
643	6837.67529296875	403
644	6842.123046875	404
645	6846.5703125	351
646	6851.017578125	329
647	6855.46484375	361
648	6859.91259765625	376
649	6864.35986328125	364
650	6868.80712890625	354
651	6873.2548828125	359
652	6877.7021484375	363
653	6882.1494140625	352
654	6886.5966796875	331
655	6891.04443359375	336
656	6895.49169921875	351
657	6899.93896484375	338

658	6904.38623046875	357
659	6908.833984375	368
660	6913.28125	362
661	6917.728515625	331
662	6922.17578125	320
663	6926.62353515625	318
664	6931.07080078125	331
665	6935.51806640625	330
666	6939.9658203125	314
667	6944.4130859375	306
668	6948.8603515625	312
669	6953.3076171875	323
670	6957.75537109375	324
671	6962.20263671875	308
672	6966.64990234375	314
673	6971.09716796875	323
674	6975.544921875	307
675	6979.9921875	304
676	6984.439453125	317
677	6988.88671875	319

678	6993.33447265625	304
679	6997.78173828125	305
680	7002.22900390625	302
681	7006.6767578125	304
682	7011.1240234375	313
683	7015.5712890625	300
684	7020.0185546875	302
685	7024.46630859375	328
686	7028.91357421875	339
687	7033.36083984375	325
688	7037.80810546875	327
689	7042.255859375	329
690	7046.703125	312
691	7051.150390625	0