

EXPLORANT L'UNIVERS

Trànsit i caracterització d'un exoplaneta

Treball de recerca
Pau Rodoreda Congost
2n Batxillerat

Tutor: Joan López

INS Pla de l'Estany
Banyolés, 1 d'octubre de 2024

Abstracte

Català

En aquest treball s'ha realitzat l'observació del trànsit d'un exoplaneta per davant la seva estrella, així com el tractament posterior de les dades obtingudes en l'observació per a la validació del trànsit i la caracterització química del planeta anterior mitjançant el seu espectre, per poder confirmar l'existència de l'exoplaneta (amb el trànsit) i per poder veure els elements que conté. Després d'una part teoria, amb tota la informació bàsica per poder entendre la part pràctica. Es van fer dues observacions a un observatori professional (observatori Can Roig, Llagostera). Una observació per poder fer el trànsit i una altra per fer la caracterització química de l'exoplaneta. Més endavant amb les dades obtingudes d'aquesta observació es va poder identificar si el planeta era o no habitable, a part de determinar les seves característiques generals.

Castellà

En este trabajo se ha realizado la observación del tránsito de un exoplaneta frente a su estrella, así como el tratamiento posterior de los datos obtenidos en la observación para la validación del tránsito y la caracterización química del planeta mencionado mediante su espectro, con el fin de confirmar la existencia del exoplaneta (con el tránsito) y poder observar los elementos que contiene. Tras una parte teórica, con toda la información básica para poder entender la parte práctica, se realizaron dos observaciones en un observatorio profesional (observatorio Can Roig, Llagostera). Una observación para realizar el tránsito y otra para la caracterización química del exoplaneta. Más adelante, con los datos obtenidos de esta observación, se pudo identificar si el planeta era o no habitable, además de determinar sus características generales.

Anglès

In this work, the observation of the transit of an exoplanet in front of its star was carried out, as well as the subsequent processing of the data obtained from the observation for the validation of the transit and the chemical characterization of the mentioned planet through its spectrum. This was done to confirm the existence of

the exoplanet (via the transit) and to detect the elements it contains. After a theoretical section, providing all the basic information needed to understand the practical part, two observations were made at a professional observatory (Can Roig Observatory, Llagostera). One observation was for the transit, and the other for the chemical characterization of the exoplanet. Later, with the data obtained from this observation, it was possible to identify whether the planet was habitable or not, in addition to determining its general characteristics.

Agraïments

Abans de començar el treball m'agradaria donar les gràcies a les persones que han fet possible aquest treball i que m'han donat suport al llarg d'aquest.

Primer de tot m'agradaria donar les gràcies a en Rafael Balaguer que sens dubte ha fet possible aquest treball.

Gràcies a en Rafael Balaguer es van poder fer les dues observacions. I m'agradaria donar-li les gràcies especialment, ja que tot i les complicacions del clima com d'horaris, sempre es va mostrar optimista i va buscar les solucions necessàries perquè pogués realitzar aquest treball.

Per una altra banda, m'agradaria donar les gràcies a Carles Puncernau, president d'Astrobanyoles, perquè em va oferir un gran ventall d'opcions per poder fer el meu treball sobre un tema d'astronomia. I finalment ell va ser qui em va guiar cap a Astrogirona amb en Rafael Balaguer.

No pot faltar l'agraïment a en Joan López que ha set el meu tutor durant tot aquest procés. I que ha vetllat per l'avanç del treball en tot moment. I m'ha assessorat durant tot el treball.

ÍNDEX

1. Introducció.....	7
1.1. Motivació.....	7
1.2. Pregunta de recerca.....	7
1.3. Objectius.....	8
1.4. Hipòtesi.....	8
MARC TEÒRIC.....	9
2. Introducció d'alguns astres.....	9
2.1. Planetes.....	9
2.2. Exoplanetes.....	12
2.3. Satèl·lits.....	13
2.4. Asteroides.....	15
3. Estrelles.....	16
3.1. Formació.....	16
3.2. Classes d'estrelles.....	17
1. Classificació Espectral de Harvard.....	18
2. Classificació per Luminositat (Classes de Luminositat).....	19
3. Classificació per Massa.....	20
4. Classificació per Etapa Evolutiva.....	21
3.3. Mort.....	21
4. Espectroscòpia.....	23
4.1. Cossos que emeten llum.....	25
4.1.1. Com emeten llum?.....	25
5. Mètodes per detectar exoplanetes.....	27
5.1. Trànsit.....	27
5.2. Microlent gravitatòria.....	28
5.3. Imatge directa.....	30
5.4. Astrometria.....	30
5.5. Velocitat radial.....	31
6. La missió TESS.....	32
6.1. TOI.....	34
MARC PRÀCTIC.....	35
Introducció.....	35
Objectius.....	36
Primera part.....	37
Material utilitzat.....	37
Passos a seguir per realitzar el trànsit.....	38
Observació d'un trànsit.....	38
Segona Part.....	45
Material Utilitzat.....	45

Passos a seguir per veure la composició de l'exoplaneta.....	46
Resultats definitius.....	50
Conclusió Final.....	58
Referències.....	60
Bibliografia.....	60
Webgrafia.....	60
Figures.....	62
Annex.....	65

1. Introducció

1.1. Motivació

La primera idea que vaig tenir a l'hora de fer el treball va ser que el volia fer de física, que és la ciència que més gaudeixo. Últimament, he començat a consultar contingut d'aquesta ciència i m'ha deixat meravellat.

Tenia moltes ganes d'ensenyar la meva profunda passió, però vaig tenir un gran problema, la física és una ciència que té molt d'abast i no em quedava molt clar cap a quina branca de la física orientar el treball. Finalment em vaig decantar cap a l'astronomia. Tot gràcies a la meva família que em va recordar que a mi de petit ja m'interessava l'astronomia, ja que un any pel meu aniversari em van oferir una Xbox o un telescopi (els dos de segona mà) jo sense cap dubte vaig triar el telescopi, no sabia com funcionava o si tan sols funcionaria, però vaig decidir posar-me a l'aventura. No vaig arribar a saber fer-lo servir mai, el qual va fer que perdés una mica el fil i l'interès en aquest àmbit, per això vaig decidir tornar a posar interès en aquest àmbit i fer el treball sobre l'astronomia.

Primer de tot vaig contactar amb el president d'Astrobanyoles Carles Puncernau, el qual em va donar diverses idees sobre el que podia tractar el meu treball. Em vaig quedar meravellat amb els espectres, ja que aquests et podien donar molta informació d'objectes a anys llum de la terra, i a partir d'aquí em vaig posar amb contacte amb en Rafel Balaguer d'Astrogirona que té el material per poder realitzar la part pràctica del treball.

1.2. Pregunta de recerca

Per començar aquest treball vaig decidir fer-me una pregunta sobre la qual orientaria tota la recerca realitzada. La pregunta és la següent:

És possible comprovar l'habitabilitat d'un exoplaneta, amb els recursos a l'abast d'una persona de 17 anys?

1.3. Objectius

Teòrics

- Obtenir més coneixement dels astres i la llum.
- Aprofundir en els espectres i el mètode de trànsit.
- Fomentar l'interès cap a l'astronomia.

Pràctics

- Comprovar si amb mitjans relativament senzills és possible detectar trànsits d'exoplanetes.
- Confirmar exoplanetes amb poca bibliografia o possibles falsos positius.
- Caracteritzar químicament un exoplaneta.
- Detectar la presència d'elements químics indispensables per a la vida en un exoplaneta.

1.4. Hipòtesi

Per a la pregunta de l'apartat 1.2 em vaig plantejar una hipòtesi, que és la següent:

Potser un noi pot comprovar l'habitabilitat d'un exoplaneta amb l'ajuda necessària.

MARC TEÒRIC

2. Introducció d'alguns astres

2.1. Planetes

Un planeta és un objecte astronòmic que orbita al voltant d'un estel o un romanent estel·lar, aquest té prou massa perquè la seva gravetat li doni forma esfèrica, i a l'hora no té prou massa per a poder donar a terme una reacció de fusió termonuclear. I també ha de ser prou gran perquè la seva gravetat hagi eliminat qualsevol objecte de dimensions similars, a la seva òrbita al voltant de la seva respectiva estrella.

Així, es denomina **planeta** cadascun dels cossos que descriuen òrbites el·líptiques al voltant del Sol o, en general, d'un estel, també han de mantenir una suficient massa perquè la seva gravetat li doni una forma esfèrica. I ha de ser capaç de netejar la seva pròpia òrbita. Júpiter, saturn, Mart, la Terra, etc., compleixen els requisits per tant son denominats planetes. A causa de l'última clàusula Plutó abans considerat un planeta va ser degradat a un Planeta Nan.

2.1.1. Classes de planetes

- **Planetes rocosos**

Els **planetes rocosos** com la terra són anomenats així perquè estan compostos majoritàriament per materials sòlids o semisòlids. Es diuen així perquè la superfície d'aquests està composta majoritàriament per metalls i roques. Els planetes rocosos del nostre sistema solar són: Mart, La Terra, Venus, Mercuri...

Dintre dels planetes rocosos ens trobem també els **planetes tel·lúrics** o **terrestres**. Aquest terme té una connotació més específica, ja que s'utilitza per referir-se a planetes semblants a la Terra en termes d'estructura i composició. Aquests solen tenir una atmosfera sigui més o menys densa que la de la terra.

Els exemples més clars de planetes tel·lúrics al nostre sistema solar són la Terra, Venus i Mart. Aquests planetes solen tenir una estructura interna diferenciada en crosta, mantell i nucli, i són el focus principal de la investigació sobre la possibilitat de suportar vida extraterrestre.

Les **atmosferaes** dels planetes rocosos poden ser molt variades. Posant com a exemple els planetes rocosos del sistema solar, veiem que aquestes són molt diverses tant a quantitat com a composició.

Per exemple l'atmosfera de Mercuri, que és extremadament tènue, quasi inexistent, les poques molècules que conté són de gasos com l'hidrogen, l'oxigen, l'heli, el sodi...

Per altra banda, tenim el nostre planeta, la Terra, amb una atmosfera densa, rica en nitrogen i oxigen, amb petites quantitats de gasos com el diòxid de carboni, el vapor d'aigua, i altres com gasos nobles...

Una altra gran característica que fa marcar la diferència entre diferents planetes és el fet de tenir un **camp magnètic**. Els camps magnètics tenen una gran importància, si és que pensem en la vida. Aquests actuen com a barrera protectora desviant partícules d'alta energia provinents de l'espai. El **camp magnètic terrestre** desvia la major part del vent solar, protegint la nostra atmosfera i els gasos que aquesta conté com l'Ozó (O_3), que al seu torn ens protegeix de les radiacions ultraviolades i actua com a gas d'efecte hivernacle fent possible una temperatura estable entre dia i nit.

- Planetes gasosos

La immensa majoria dels planetes extrasolars descoberts fins ara són probablement planetes gasosos a causa, almenys en part, que els actuals mètodes de detecció discriminen millor els planetes de més massa.

Els **planetes gasosos** són aquells constituïts principalment per **gasos**, en particular hidrogen i heli. Al nostre sistema solar pertanyen a aquesta categoria Júpiter i Saturn. Els planetes gasosos, depenent dels seus mecanismes de formació, no tenen per què posseir un nucli sòlid rocós, sinó que poden consistir en un continu de gasos, de mica en mica més densos, que adquireixen finalment les propietats d'un fluid quan es troba a alta pressió. En el cas de Júpiter i Saturn l'hidrogen gasós en estat molecular dóna pas a un estat conegut com a hidrogen metàl·lic, amb unes propietats particulars, i es considera que tenen als centres uns nuclis sòlids.

Els planetes gasosos estan compostos per diferents capes, principalment tres, una capa exterior amb la majoria de gasos poc densos, una capa intermitja sotmesa a una gran quantitat de pressió i temperatura, condicions que permeten l'abans mencionat hidrogen líquid, i finalment un nucli on es troben els elements més pesants en estat sòlid.

Els planetes gasosos són normalment més grans que els planetes rocosos. Això ho podem veure reflectit en el nostre sistema solar, on els 4 planetes gasosos (Júpiter, Saturn, Urà i Neptú) són els més grans en grandària (en aquest ordre). Per fer-nos una idea, Júpiter és 1321 vegades més gran que el planeta Terra. Alhora, aquests 4 planetes ocupen les posicions més allunyades al Sol. Neptú l'últim planeta del sistema solar es troba a unes 30 Unitats Astronòmiques del Sol. D'altra banda, els planetes dels gasosos tenen un nombre major de llunes a causa de la seva gravetat (que és proporcional a la seva massa). Júpiter i Saturn tenen més de 80 llunes cada un, i a part d'això els dos planetes tenen un sistema anells. Els més notoris són els de Saturn que el fan famós, aquests mesuren uns 400.000 km, són més llargs que la distància entre la Terra i la Lluna. Aquests es creu que estan formant d'antigues llunes que s'havien apropiat massa al planeta i la força de la gravetat les va polvoritzar creant així partícules minúscules (a comparació als planetes) que es

quedarien rodejant el planeta. Hi ha una altra teoria que ens diu que aquests torsos van ser recollits per la gravetat del planeta durant la creació del sistema solar.

Aquests planetes també posseeixen camps magnètics. Els camps magnètics planetaris solen generar-se dins del planeta mitjançant un fenomen electromagnètic anomenat "efecte dinamo". Aquest efecte és conseqüència dels moviments convectius d'un fluid conductor de l'interior del planeta, que transforma l'energia cinètica en energia magnètica fent aparèixer així el camp magnètic al seu voltant. Júpiter té un camp magnètic quasi dotze vegades més gran que el de la Terra. L'existència del camp magnètic de Júpiter s'explica per la presència, a l'interior del planeta, d'hidrogen metàl·lic líquid que, en ser un bon conductor i girar a gran velocitat, genera camps magnètics.

- Planetes gelats

Els planetes gelats són una subcategoria dels planetes gasosos. Aquests estan formats de manera semblant als gasosos tenen elements com l'hidrogen i heli, però els planetes gelats tenen menys quantitats d'aquest. Els planetes gelats a causa de la seva baixa temperatura tenen grans quantitats de molècules i elements en estat sòlid (gel) com l'aigua, l'hidrogen, l'amoniac i el metà. Al nostre sistema solar tenim dos exemples Urà i Neptú. Aquests són els dos planetes més llunyans al Sol, per tant, també són els que tenen temperatures més baixes. En estar tan lluny tenen les òrbites més grans i més llongues. Aquests planetes tenen també un camp magnètic, però aquests són bastant curiosos, ja que tenen camps magnètics molt inclinats respecte al seu eix de rotació.

2.2. Exoplanetes

Els exoplanetes tot i ser planetes, es mereixen un apartat a part dins d'aquest treball, ja que a la part pràctica d'aquest treball es centra directament en aquesta classe de planetes i no amb planetes corrents. Els exoplanetes o planetes extrasolars són planetes que es troben en altres sistemes solars, és a dir que no es troben en el nostre sistema solar, per tant, orbiten una estrella que no és el Sol.

Aquests es poden classificar de diferents maneres, en aquest cas els exoplanetes són classificats segons les semblances amb els planetes del sistema solar.

Els **gegants gasosos** són planetes de la mida de Saturn o Júpiter, el planeta més gran del nostre sistema solar, o molt, molt més grans. S'amaga més varietat dins d'aquestes àmplies categories. Els Júpiters calents, per exemple, van ser dels primers tipus de planetes trobats: gegants gasosos que orbiten tan a prop de les seves estrelles que les seves temperatures s'eleven fins als milers de graus Celsius.

Els **planetes neptunians** són de mida similar a Neptú o Urà al nostre sistema solar. Probablement tenen una barreja de composicions interiors, però totes tindran atmosferes exteriors dominades per hidrogen i heli i nuclis rocosos. També estem descobrint minineptuns, planetes més petits que Neptú i més grans que la Terra. No existeixen planetes d'aquesta mida o tipus al nostre sistema solar.

Les **superterres** són normalment planetes terrestres que poden tenir o no atmosferes. Són més massius que la Terra, però més lleugers que Neptú.

Els **planetes terrestres** són de la mida de la Terra i són més petits, composts per roca, silicat, aigua o carboni. Una investigació posterior determinarà si alguns d'ells tenen atmosferes, oceans o altres signes d'habitabilitat.

Tenint tot això en compte, els tipus d'exoplanetes que més ens interessin són els dos últims, perquè aquests són els únics que són semblants a la Terra i que podem tenir en compte per poder considerar que hi hagi vida. D'altra banda, no hem de pensar només en la classe d'exoplaneta que és, ja que hi ha molts altres factors que s'han d'acumular dins del mateix planeta per poder considerar-lo un planeta apte per a la vida tal com la coneixem nosaltres, com podria ser la seva distància respecte a la seva estrella. Aquesta no té perquè sé la mateixa que la de la terra perquè cada estrella té diferents característiques, per tant, el planeta s'ha de trobar dins de la zona d'habitabilitat de l'estrella, la qual canvia segons les característiques d'aquesta.

2.3. Satèl·lits

Un satèl·lit natural és un cos celeste que orbita al voltant d'un planeta o d'un altre cos més gran, gràcies a la força de la gravetat. Aquests satèl·lits es diferencien dels satèl·lits artificials, que són objectes creats per l'ésser humà i llançats a l'espai per

complir diverses funcions, com ara la comunicació, l'observació terrestre, la investigació científica, entre d'altres.

Origen: Els satèl·lits naturals poden haver-se format a la mateixa època que el planeta al qual orbiten, com és el cas de moltes llunes dels planetes gegants del sistema solar. També poden ser asteroides capturats pel camp gravitatori del planeta o resultats d'impactes massius que van generar fragments que després van quedar atrapats en òrbites estables.

Dimensions i formes: La mida dels satèl·lits naturals varia enormement, des de petites roques de pocs quilòmetres de diàmetre fins a llunes gegants com Ganimedes (satèl·lit de Júpiter), que és més gran que el planeta Mercuri. Les formes poden ser irregulars en satèl·lits petits o quasi esfèriques en els més grans, a causa de l'autogravetat.

Composició: La composició d'aquests satèl·lits pot incloure roques, gel, metalls i altres materials. Per exemple, les llunes de Saturn sovint tenen altes quantitats de gel a la seva superfície, mentre que la Lluna de la Terra és principalment rocosa.

Òrbites: Les òrbites dels satèl·lits naturals poden ser molt diverses, incloent trajectòries circulars, el·líptiques i fins i tot irregulars. La distància a la qual orbiten del seu planeta també pot variar considerablement.

Exemples de Satèl·lits Naturals

La Lluna: El satèl·lit natural de la Terra és l'exemple més conegut. La seva presència és fonamental per a la vida al nostre planeta, ja que afecta les marees, estabilitza l'orientació axial de la Terra i ha estat un factor clau en molts aspectes culturals i científics al llarg de la història humana.

Ganimedes: El satèl·lit més gran de Júpiter i del sistema solar. Té un diàmetre de 5.268 km, és més gran que Mercuri i posseeix un camp magnètic propi.

Tità: La lluna més gran de Saturn, que destaca per la seva densa atmosfera rica en nitrogen i per tenir llacs i mars de metà líquid.

Fobos i Deimos: Els dos petits satèl·lits de Mart, que probablement són asteroides capturats pel camp gravitatori del planeta.

2.4. Asteroides

Els asteroides són petits cossos rocosos i metàl·lics que orbiten al voltant del Sol, principalment entre les òrbites de Mart i Júpiter, en una regió coneguda com el cinturó d'asteroides. Aquestes restes del sistema solar primitiu ofereixen una visió valuosa sobre els processos de formació planetària i l'evolució del nostre sistema solar.

Característiques dels Asteroides

Origen i Formació: Els asteroides són considerats restes sobrants de la formació del sistema solar fa uns 4.6 mil milions d'anys. Es creu que són fragments d'un protoplaneta que no va arribar a formar-se completament a causa de les fortes influències gravitacionals de Júpiter.

Dimensions i Formes: Els asteroides varien considerablement en mida, des de petits cossos de pocs metres fins a grans objectes de centenars de quilòmetres de diàmetre. A diferència dels planetes, la majoria tenen formes irregulars, ja que la seva massa no és suficient per arrossegar-los a una forma esfèrica.

Composició: Els asteroides poden ser compostos de roca, metalls, o una combinació dels dos. Es classifiquen en diferents tipus segons la seva composició: els asteroides carbonacis (tipus C), silícis (tipus S) i metàl·lics (tipus M). Els de tipus C són els més comuns i contenen una alta proporció de carboni.

Òrbites: Les òrbites dels asteroides poden ser el·líptiques i variar molt en termes d'inclinació i excentricitat. Mentre que la majoria es troben en el cinturó d'asteroides,

alguns segueixen òrbites que els porten prop de la Terra, coneguts com a asteroides propers a la Terra (NEA).

Exemples d'Asteroides

Ceres: El primer asteroide descobert i el més gran del cinturó principal, amb un diàmetre d'uns 940 km. És tan gran que està classificat com un planeta nan.

Vesta: Un dels asteroides més grans del cinturó principal, amb un diàmetre d'uns 525 km. Ha estat objectiu d'investigació de la missió Dawn de la NASA.

Eros: Un asteroide prop de la Terra que ha estat estudiat de prop per la missió NEAR Shoemaker. Té una forma allargada i mesura uns 34 km de llarg.

Aphos: Un asteroide proper a la Terra que va causar preocupació inicialment per una possible col·lisió amb la Terra el 2029, però posteriors càlculs han reduït aquesta possibilitat.

3. Estrelles

Les estrelles són cossos celestes massius que emeten llum i calor a través de processos de fusió nuclear que es produeixen en el seu interior. Són elements fonamentals de l'univers, i la seva formació, evolució i mort tenen un impacte profund en la galàxia i en la creació d'elements químics essencials per a la vida.

3.1. Formació

La formació de les estrelles és un procés complex que té lloc dins de les galàxies, on grans núvols de gas i pols col·lapsen sota la seva pròpia gravetat per formar estrelles noves. Aquests núvols, anomenats nebuloses, contenen principalment hidrogen, l'element més abundant de l'univers, així com altres elements en quantitats menors.

El procés comença en un núvol molecular, una regió freda i densa de gas i pols. La temperatura és prou baixa per permetre que els àtoms d'hidrogen es combinin formant molècules d'hidrogen (H_2). Un esdeveniment extern, com l'explosió d'una supernova propera o la col·lisió de dues galàxies, pot provocar inestabilitats dins del

núvol molecular. Aquestes pertorbacions poden fer que algunes regions del núvol es comprimeixin, augmentant la densitat i, per tant, la força gravitatòria en aquestes zones.

Quan la força gravitatòria és suficient per superar la pressió del gas, el núvol comença a col·lapsar sobre si mateix. A mesura que el núvol col·lapsa, es fragmenta en cúmuls més petits que continuen col·lapsant.

En el centre de cada fragment, el material es comprimeix i s'escalfa, formant una protostrella. Aquesta és una fase preliminar en la qual el nucli de la futura estrella està encara recollint massa de l'envoltant núvol de gas. La protostrella continua acumulant massa a través d'un disc d'acreció format per material del núvol circumdant.

A mesura que el gas cau cap a la protostrella, es converteix en energia tèrmica, augmentant la temperatura del nucli. Quan la temperatura i la pressió al nucli de la protostrella esdevenen prou altes, comença la fusió nuclear. Els àtoms d'hidrogen es fusionen per formar heli, alliberant una gran quantitat d'energia. Aquest procés marca el naixement d'una nova estrella.

Amb l'inici de la fusió nuclear, l'estrella arriba a un estat d'equilibri hidroestàtic, on la pressió de radiació produïda per la fusió nuclear contraresta la força de la gravetat. L'estrella entra a la seqüència principal, on passarà la major part de la seva vida cremant hidrogen en heli. La vida d'una estrella en la seqüència principal depèn de la seva massa.

Les estrelles més massives tenen vides més curtes perquè cremen el seu combustible nuclear més ràpidament, mentre que les estrelles menys massives poden viure milers de milions d'anys. Quan una estrella esgota el seu combustible d'hidrogen, comença a cremar heli i altres elements, evolucionant a etapes posteriors com gegants roges, nebuloses planetàries o supernoves, depenent de la seva massa.

3.2. Classes d'estrelles

Les estrelles es poden classificar segons diversos criteris com la seva massa, temperatura, lluminositat i etapa evolutiva. Una de les classificacions més utilitzades és la Classificació Espectral de Harvard, que categoritza les estrelles segons la seva temperatura superficial i color. Aquesta classificació assigna les estrelles a diferents tipus espectrals: O, B, A, F, G, K

i M, amb algunes subclasses. A continuació, es presenta una classificació basada en aquest sistema i altres criteris rellevants:

1. Classificació Espectral de Harvard

Les estrelles es classifiquen en diferents tipus espectrals, representats per lletres, seguint aquest ordre: O, B, A, F, G, K, M. Aquestes lletres corresponen a diferents rangs de temperatures superficials, des de les més calentes fins a les més fredes. A continuació es detalla cada tipus espectral:

- **Classe O:** Són les estrelles més calentes i blaves. Tenen temperatures superiors a 30.000 K. El seu espectre està dominat per línies d'absorció d'heli i tenen molt poques línies d'hidrogen visibles. Un exemple seria Zeta Puppis, es troba a la constel·lació de Puppis a l'hemisferi austral (hemisferi sud).
- **Classe B:** Són estrelles també molt calentes, amb temperatures entre 10.000 i 30.000 K. El seu color és blau-blanc. L'espectre mostra línies d'heli més febles que les estrelles O i línies més fortes d'hidrogen. Un exemple seria Rigel l'estrella que es troba a la constel·lació d'Orió.
- **Classe A:** Tenen temperatures entre 7.500 i 10.000 K. El seu color és blanc. Les línies d'hidrogen són molt prominents en el seu espectre. Un exemple d'aquesta seria Sírius A, peculiar per trobar-se en un sistema binari amb Sírius B.
- **Classe F:** Amb temperatures d'entre 6.000 i 7.500 K, són estrelles de color blanc-groguenc. A més de les línies d'hidrogen, comencen a ser visibles línies de metalls com el ferro i el calci.

- **Classe G:** Són estrelles amb temperatures d'entre 5.200 i 6.000 K. El color és groc. El nostre Sol pertany a aquesta categoria. L'espectre mostra línies prominents de metalls com el calci i el ferro.
- **Classe K:** Amb temperatures entre 3.700 i 5.200 K, són estrelles taronja. Les línies dels metalls són molt fortes i l'hidrogen gairebé no és visible en l'espectre. Un exemple d'aquesta classe d'estrella és Alpha Centauri B que pertany al sistema solar més pròxim al nostre a uns 4 anys llum.
- **Classe M:** Són les estrelles més fredes, amb temperatures inferiors a 3.700 K, de color vermell. El seu espectre està dominat per línies de metalls i molècules com l'òxid de titani. Un exemple d'aquesta seria Bategués una estrella que es troba a la constel·lació d'Orió i que ha set polèmica entre els científics, ja que molts deien que podria esdevenir una supernova molt pròximament.

Sistema de subclassificació

Per ser més precís, cada tipus espectral s'acompanya d'un nombre de 0 a 9 per indicar petites variacions dins d'una classe. Per exemple:

A0 seria una estrella del tipus A més calenta, mentre que A9 seria una estrella del tipus A més freda.

2. Classificació per Luminositat (Classes de Luminositat)

Aquesta classificació utilitza números romans per indicar la grandària i lluminositat de les estrelles:

- I - Supergegants: Estrelles molt lluminoses i massives (ex. Betelgeuse, Rigel).

- II - Gegants Luminosos: Menys lluminosos que les supergegants però més que les gegants normals.
- III - Gegants: Estrelles més lluminoses que les estrelles de la seqüència principal (ex. Arcturus, Aldebaran).
- IV - Subgegants: Estrelles que comencen a sortir de la seqüència principal.
- V - Seqüència Principal (Nanes): Estrelles que es troben en l'estat principal de fusió d'hidrogen (ex. El Sol, Sirius).
- VI - Subnans: Estrelles menys lluminoses que les nanes de la seqüència principal.
- VII - Nanes Blanques: Estrelles petites i denses que són el resultat de l'evolució d'estrelles com el Sol (ex. Sirius B).

3. Classificació per Massa

- Estrelles Massives: Amb masses majors de 8 vegades la massa solar. Evolucionen ràpidament i poden acabar com supernoves.
- Estrelles Intermèdies: Amb masses entre 0.5 i 8 vegades la massa solar. Inclou estrelles com el Sol.
- Estrelles de Baixa Massa: Amb masses inferiors a 0,5 vegades la massa solar. Inclou estrelles com les nanes vermelles.

4. Classificació per Etapa Evolutiva

- Protostrelles: Estrelles en formació.
- Estrelles de la Seqüència Principal: Estrelles que cremen hidrogen en heli.
- Gegants i Supergegants: Estrelles que han esgotat el seu hidrogen i cremen heli i elements més pesants.
- Nanes Blanques: Restes estel·lars d'estrelles de massa mitjana-baixa.
- Estrelles de Neutrons: Restes estel·lars d'estrelles massives després d'una supernova.
- Forats Negres: Restes estel·lars d'estrelles molt massives després d'una supernova.

3.3. Mort

Les estrelles passen per diferents fases al llarg de la seva vida, depenent de la seva massa inicial, i aquestes fases culminen en diferents tipus de "morts" estel·lars. Les estrelles poden acabar de manera diferent en funció de la seva mida, i el procés es pot dividir en diverses categories:

1. Estrelles de poca massa (com el sol)

Les estrelles amb una massa fins a vuit vegades la del Sol segueixen un camí força tranquil cap a la seva mort:

La major part de la seva vida, una estrella crema hidrogen en el seu nucli, produint heli mitjançant la fusió nuclear. Aquesta fase pot durar milers de milions d'anys. Quan s'acaba l'hidrogen del nucli, l'estrella s'expandeix i es converteix en una gegant vermella. El nucli comença a fusionar heli en elements més pesants, com el carboni i l'oxigen. Quan l'heli també s'esgota, l'estrella no pot sostenir les reaccions nuclears al nucli, i les capes externes de l'estrella són expulsades, formant una nebulosa planetària.

Aquestes nebuloses són núvols de gas que brillen al voltant del nucli estel·lar restant. El nucli que queda després de l'expulsió de les capes externes és molt dens i es refreda amb el temps, formant una nana blanca. Aquest objecte ja no té fusió nuclear en el seu interior i es refreda lentament durant milers de milions d'anys.

2. Estrelles de massa intermèdia

Les estrelles amb una massa entre 8 i 25 vegades la del Sol segueixen una evolució similar fins a la fase de gegant vermella, però el seu final és més dramàtic:

Aquestes estrelles creixen molt més en la seva fase final i es converteixen en supergegants vermelles. En aquesta etapa, el seu nucli continua fusionant elements cada cop més pesants fins a arribar al ferro. Quan el nucli està compost principalment de ferro, no es pot sostenir la fusió nuclear, cosa que provoca un col·lapse gravitacional. El nucli col·lapsa sobtadament i provoca una explosió massiva coneguda com a supernova. Aquesta explosió pot alliberar tanta energia com la d'una galàxia sencera durant un curt període de temps.

Si el nucli que queda després de la supernova té entre 1,4 i 3 vegades la massa del Sol, el col·lapse es continua fins a formar una estrella de neutrons. Aquestes estrelles són objectes increïblement densos, formats principalment per neutrons, ja

que la força gravitacional en aquestes estrelles és tan alta que obliga els electrons dels àtoms a apropar-se als nuclis atòmics i fusionar-se amb els protons creant neutrons. En alguns casos, aquestes estrelles de neutrons es poden convertir en púlsars, emetent feixos de radiació a través dels pols magnètics.

3. Estrelles massives

Les estrelles amb més de 25 vegades la massa del Sol tenen un final molt més violent:

Com les estrelles de massa intermèdia, passen per una fase de supergegant vermella. El seu final també culmina en una supernova, però en aquest cas, el nucli pot ser tan massiu que continua col·lapsant més enllà del punt d'una estrella de neutrons. Si la massa del nucli restant és superior a 3 vegades la del Sol, col·lapsa sota la seva pròpia gravetat per formar un forat negre. Els forats negres són regions de l'espai amb una força gravitacional tan forta que ni tan sols la llum pot escapar-ne.

4. Espectroscòpia

L'espectroscòpia estudia la quantitat de llum que absorbeix o dispersa (reflexa) un objecte. És a dir, descompon la llum i amida les diferents longituds d'ona de llum visible i no visible. Per exemple, al camp de la medicina, s'utilitzen diferents tipus d'espectroscòpia per estudiar els teixits i ajudar en el diagnòstic. No obstant això, també es pot estudiar en astrofísica per determinar la naturalesa i les propietats físiques dels astres. I, alhora, també es pot aplicar en física, química i biologia, entre altres disciplines científiques.

- **L'espectre electromagnètic**

L'espectre electromagnètic és el conjunt de totes les freqüències d'ones electromagnètiques possibles. La radiació electromagnètica està formada per fotons. En un espectre es mostra la descomposició d'una radiació electromagnètica en els seus components: freqüència, longitud d'ona i l'energia dels fotons a través dels quals es propaga la radiació. Aquestes tres magnituds estan relacionades per la constant de Planck i per la velocitat de la llum. Les ones electromagnètiques de major freqüència són els raigs gamma i els raigs X i les de menor freqüència les ones de ràdio.

- **Espectre d'emissió i d'absorció**

L'espectre d'emissió d'un element químic són les radiacions que emet, en estat gasós, quan se li transmet energia. Si es posa un tub amb hidrogen escalfat a una temperatura elevada, això fa que emeti radiacions, i quan aquestes radiacions passen per un prisma, es refracten i desvien. Quan surten del prisma, les radiacions es troben separades a la placa detectora.



(Figura 1) Espectre d'emissió de l'hidrogen (Xtec, 2017)

L'espectre d'absorció és l'espectre resultant després que una radiació electromagnètica d'espectre continu passi a través d'una substància absorbent. L'espectre resultant té l'aspecte d'un espectre continu amb una sèrie de ratlles o bandes fosques que corresponen a les longituds d'ona que han estat absorbides per les substàncies que ha travessat la radiació. És, en cert sentit, l'oposat d'un espectre d'emissió.



(Figura 2) Espectre d'absorció de l'hidrogen (Xtec, 2017)

Cada element químic té línies d'absorció en algunes longituds d'ona, fet que està associat a les diferències d'energia dels seus diferents orbitals atòmics. De fet, s'empra l'espectre d'absorció per identificar els elements components d'algunes mostres, com líquid si gas és, més enllà, es pot emprar per a determinar l'estructura de compostos orgànics.

4.1. Cossos que emeten llum

4.1.1. Com emeten llum?

La llum es pot emetre de dues maneres principals la incandescència i la fluorescència.

Incandescència:

La incandescència és el fenomen en el qual un material emet llum a causa de la seva elevada temperatura. Aquest procés és típic en materials sòlids, com el filament d'una bombeta incandescent o el ferro calent.

Mecanisme:

Quan un material s'escalfa a una temperatura prou alta, els àtoms i les molècules que el componen comencen a vibrar de manera més intensa. A mesura que aquestes vibracions augmenten, alguns dels electrons dels àtoms del material poden ser excitats a nivells d'energia més alts. Quan aquests electrons tornen al seu estat original, alliberen l'energia excessiva en forma de fotons (partícules de llum).

El color de la llum emesa depèn de la temperatura del material:

- A temperatures baixes (al voltant de 800 °C), la llum és d'un color vermell (llum infraroja).
- A temperatures més altes (al voltant de 2000 °C), la llum es torna groga o blanca.
- A temperatures molt elevades (més de 3000 °C), el color pot ser blanc o blau.

Exemples:

- **Bombetes incandescents:** Utilitzen un filament de tungstè que s'escalfa fins a emetre llum quan circula corrent elèctric.
- **Estrelles:** La incandescència és la causa de la llum emesa per les estrelles, incloent-hi el Sol, que a causa de les reaccions nuclears a l'interior de les estrelles la temperatura arriba a temperatures extremes.

Fluorescència:

La fluorescència és un fenomen en el qual un material emet llum visible quan és excitada per radiació electromagnètica (com la llum ultraviolada) o altres formes d'energia.

Mecanisme:

Quan un material fluorescent absorbeix radiació (com la llum ultraviolada), els electrons dels àtoms del material són excitats a un nivell d'energia més alt. Retorn a l'estat base: A diferència de la incandescència, la fluorescència és un procés ràpid. Els electrons excitats tornen al seu estat base en un temps molt curt (mil·lisegons) i alliberen energia en forma de llum visible.

El color de la llum emesa depèn del material i de la longitud d'ona de la radiació absorbida. Pot ser visible en colors com el verd, blau o groc, depenent del compost químic.

Exemples:

- **Tubs fluorescents:** Utilitzen gasos que emeten llum ultraviolada quan són excitats per una descàrrega elèctrica. Aquesta llum ultraviolada fa que la capa de pintura fluorescent a l'interior del tub emeti llum visible.
- **Material fluorescent:** Com ara alguns minerals, que brillen amb llum visible quan són exposats a la llum ultraviolada.

5. Mètodes per detectar exoplanetes

5.1. Trànsit

El mètode de trànsit és una tècnica utilitzada per detectar exoplanetes, que són planetes situats fora del nostre sistema solar. Aquest mètode consisteix a observar la llum d'una estrella i detectar petites disminucions en la seva brillantor. Aquestes disminucions es produeixen quan un planeta passa davant de l'estrella des de la nostra perspectiva, bloquejant una petita part de la llum que ens arriba.

El mètode de trànsit funciona de manera que es monitora la llum d'una estrella durant un llarg període de temps per identificar qualsevol canvi regular en la seva brillantor. Si un planeta orbita l'estrella i passa pel seu disc, el planeta bloquejarà una part de la llum de l'estrella, causant una petita disminució en la seva brillantor. Aquest fenomen es coneix com un "trànsit". A partir d'aquesta disminució de llum podem crear una gràfica anomenada: "corba de llum", que mostra la brillantor de l'estrella al llarg del temps. Quan es produeix un trànsit, es pot veure una caiguda característica en la corba de llum.

Analitzant aquestes caigudes periòdiques en la corba de llum, els astrònoms poden inferir l'existència d'un exoplaneta. La profunditat i durada del trànsit poden proporcionar informació sobre la mida i l'òrbita del planeta.

Amb el mètode de trànsit podem obtenir diferents informacions:

Mida del planeta: La profunditat de la disminució en la brillantor de l'estrella està relacionada amb la mida del planeta. Com més gran sigui el planeta, més llum bloquejarà.

Òrbita del planeta: La freqüència amb què es produeixen els trànsits indica el període orbital del planeta, que és el temps que triga a completar una volta al voltant de l'estrella.

Possibles atmosferes: Si es realitzen observacions molt detallades durant el trànsit, és possible detectar variacions en la llum que passa a través de l'atmosfera del planeta, la qual cosa pot revelar la seva composició.

Tot i això, el mètode de trànsit té certes limitacions:

Necessitat d'alineament: Aquest mètode només funciona si el pla de l'òrbita del planeta està alineat de manera que des de la Terra puguem observar el trànsit. Això vol dir que no tots els exoplanetes seran detectables amb aquest mètode.

Falsos positius: Altres fenòmens astrofísics poden causar disminucions similars en la llum d'una estrella, com binàries eclipsants (sistemes estel·lars dobles), per tant, és necessari confirmar les deteccions amb altres mètodes.

En conjunt, podem concloure que el mètode de trànsit és una de les tècniques més efectives i utilitzades per detectar exoplanetes, especialment amb telescopis com el Kepler, que ha descobert milers de planetes utilitzant aquest mètode.

5.2. Microlent gravitatòria

La detecció d'exoplanetes per microlent gravitatòria, també coneguda com a mètode de microlent d'Einstein, és un fenomen que es basa en la teoria de la relativitat

general d'Albert Einstein. Aquest mètode es fonamenta en la manera com la gravetat d'un objecte massiu pot doblar i amplificar la llum d'un objecte més llunyà, com una estrella.

Principis Bàsics

Quan un objecte massiu (com un planeta o una estrella) passa davant d'una estrella més llunyana, la gravetat de l'objecte massiu pot doblar la llum que prové de l'estrella de fons. Això provoca un efecte de lent, on la imatge de l'estrella es fa més brillant i pot aparentar-se que s'amplifica.

L'efecte de lent es deu al fet que la gravetat de l'objecte massiu provoca que els raigs de llum de l'estrella de fons es corbin al seu voltant, fent que la llum arribi a l'observador de manera diferent. Si l'objecte massiu (el "lente") es mou, la intensitat de la llum de l'estrella de fons variarà amb el temps.

Procés de Detecció

Els astrònoms observen un grup d'estrelles a través de telescopis amb detectors molt sensibles. Busquen variacions en la lluminositat d'estrelles que semblen estar en línia amb un altre objecte massiu.

Quan un objecte massiu passa davant d'una estrella més llunyana, es produirà un augment temporal en la seva brillantor. Aquesta brillantor variada es coneix com a "curve de microlent".

Els científics analitzen les dades d'aquesta variació de lluminositat. A través de models matemàtics, poden determinar les característiques de l'objecte massiu, incloent-hi la seva massa i distància.

Si l'objecte massiu és un planeta orbitant al voltant d'una estrella, el seu efecte de lent pot ser més difícil de detectar, ja que és més petit que l'estrella. No obstant això, la seva presència pot revelar-se a través de petites variacions en la lluminositat de l'estrella que no coincideixen amb el moviment de l'estrella mateixa.

Tot i que aquest mètode permeti detectar planetes que podrien ser difícils de veure amb altres mètodes. I identificar planetes que es troben lluny de la seva estrella, incloent-hi exoplanetes flotants (sense estrella mare). Aquest és un mètode de detecció indirecta; no es pot observar el planeta directament. Depèn de l'alineació precisa entre l'objecte massiu, l'estrella de fons i l'observador.

5.3. Imatge directa

La imatge directa consisteix a obtenir fotografies o imatges dels exoplanetes separades de la seva estrella mare. A diferència d'altres mètodes de detecció, com el mètode de trànsit o el mètode de la velocitat radial, que infereixen l'existència de planetes de manera indirecta, la imatge directa permet veure el planeta de manera directa.

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

5.4. Astrometria

L'Astrometria és una de les metodologies utilitzades per detectar exoplanetes i es basa a mesurar amb precisió la posició de les estrelles en el cel. A continuació es detallen els principals aspectes d'aquesta tècnica:

Principi de Funcionament

Quan un exoplaneta orbita al voltant d'una estrella, la gravetat del planeta provoca que l'estrella també es mogui. Aquest moviment és molt petit i es coneix com a "moviment astromètric" de l'estrella.

Mitjançant telescopis d'alta precisió, els astrònoms poden mesurar canvis en la posició de l'estrella en el cel. Aquestes variacions són extremes i necessiten instruments molt sensibles.

Els canvis en la posició de l'estrella es comparen amb les prediccions de la seva posició si no tingués planetes al seu voltant. Qualsevol desviació pot ser un indicatiu de la presència d'un exoplaneta.

L'astrometria permet detectar planetes de gran tamany i obtenir molta informació de l'òrbita de l'exoplaneta observat. Tot i això, es pot complicar per culpa de l'efecte de fons que seria la influència d'altres cossos sobre el sistema observat.

5.5. Velocitat radial

El mètode de detecció d'exoplanetes per velocitat radial, també conegut com a mètode de Doppler, és una tècnica fonamental en l'astronomia per identificar planetes fora del sistema solar.

Principi Bàsic

Quan un planeta orbita al voltant d'una estrella, la gravetat del planeta provoca que l'estrella es mogui lleugerament al voltant d'un centre de massa comú. Aquesta oscil·lació provoca que la llum de l'estrella experimenti un desplaçament en la seva longitud d'ona a causa de l'efecte Doppler:

- Si l'estrella s'acosta a nosaltres, la llum es desplaça cap al blau (desplaçament al blau).

- Si l'estrella s'allunya, la llum es desplaça cap al vermell (desplaçament al vermell).

Mitjançant espectroscòpia, els astrònoms poden mesurar aquest desplaçament en les línies espectrals de l'estrella. Això permet determinar la velocitat radial de l'estrella, és a dir, la seva velocitat en la direcció de l'observador.

Procés de Detecció

Es recullen espectres de llum de l'estrella durant períodes de temps per observar canvis en les línies espectrals.

Les variacions en la velocitat radial són analitzades per identificar patrons que poden indicar la presència d'un planeta. Si hi ha un patró periòdic en les variacions, és un signe que l'astre té un planeta en òrbita.

Amb les dades obtingudes, els científics poden estimar la massa del planeta, la seva òrbita i la seva distància a l'estrella.

Aquest mètode permet detectar planetes que són molt petits i que no són visibles per altres mètodes. També pot proporcionar informació sobre l'òrbita i la massa dels exoplanetes. Però la sensibilitat del mètode depèn de la llum de l'estrella; estrelles més brillants són més fàcils de mesurar. Aquest mètode no pot detectar planetes en òrbites molt inclinades respecte a la línia de visió.

6. La missió TESS

La missió TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) és una missió espacial de la NASA dedicada a la cerca i estudi d'exoplanetes, és a dir, planetes que orbiten estrelles fora del nostre sistema solar. L'objectiu principal de la missió és identificar planetes de mida semblant a la Terra o planetes més petits que orbiten estrelles pròximes a la Terra.

Característiques principals de la missió TESS:

Llançament: TESS va ser llançada el 18 d'abril de 2018.

Objectiu principal: Detectar exoplanetes mitjançant el mètode de trànsit. Això implica observar la lleu disminució de la llum d'una estrella quan un planeta passa per davant d'ella, la qual cosa permet deduir-ne la presència i característiques.

Àmbit d'observació: TESS se centra en estrelles properes, cobrint pràcticament tot el cel, la qual cosa permet descobrir planetes en regions de l'espai que són relativament accessibles per a observacions futures.

Durada: Tot i que la missió original tenia una durada de dos anys, s'ha allargat gràcies a l'èxit i la importància dels resultats obtinguts.

Equip: TESS té quatre telescopis idèntics, cadascun amb un camp de visió molt ampli. Cada telescopi té un camp de visió de 24 x 24 graus, que és considerablement més gran que el d'altres missions similars com Kepler. Amb els quatre telescopis, TESS pot observar àrees extenses del cel alhora. Els telescopis utilitzen càmeres amb resolució suficient per detectar petits canvis en la llum de les estrelles provocats per un trànsit planetari.

Estratègia d'observació:

Els telescopis són organitzats per observar una "faixa" del cel durant un període de 27 dies. Després d'aquest període, la missió canvia el seu camp d'observació, movent-se cap a una nova regió.

Durant els dos primers anys de la missió, TESS va cartografiar primer l'hemisferi sud i després l'hemisferi nord, cobrint pràcticament tot el cel.

TESS és la successora de la missió Kepler, que va ser pionera en la detecció d'exoplanetes. A diferència de Kepler, que es va concentrar en una petita regió del cel, TESS cobreix pràcticament tot el cel, la qual cosa permet un mapa més complet dels exoplanetes que orbiten estrelles properes. Els planetes descoberts per TESS serveixen de base per a futures investigacions detallades, com les que faran missions com el James Webb Space Telescope.

Fins ara, TESS ha descobert milers de candidats a exoplanetes, alguns dels quals han estat confirmats. A més, molts d'aquests planetes es troben a una distància relativament propera, la qual cosa facilita la seva posterior caracterització per entendre'n l'atmosfera i potencial habitabilitat.

Així, TESS és una peça clau per a la nostra comprensió de l'univers i l'estudi de planetes fora del nostre sistema solar.

6.1. TOI

TOI és l'acrònim de TESS Object of Interest (Objecte d'Interès de TESS). Es tracta d'un terme utilitzat per referir-se a estrelles observades per la missió TESS que mostren senyals que podrien indicar la presència d'un exoplaneta.

Quan TESS detecta una disminució en la llum d'una estrella, la qual cosa podria ser causada pel trànsit d'un exoplaneta, aquesta estrella s'inclou a la llista de TOIs.

Els TOIs són candidats a exoplanetes que requereixen un estudi i una confirmació addicional per determinar si realment hi ha un planeta orbitant l'estrella. Aquesta confirmació es fa mitjançant observacions de seguiment amb altres telescopis o mitjans.

Un cop es descobreix un possible senyal de trànsit, es classifica com a TOI i es verifica amb observacions addicionals per assegurar que no es tracta d'un fals positiu, com ara una binària eclipsant o altres fenòmens estel·lars.

Si el senyal es confirma com a planeta, l'objecte deixa de ser només un TOI i passa a tenir una classificació oficial com a exoplaneta confirmat.

Els TOIs són essencials perquè ajuden a filtrar els objectes d'interès potencial abans d'invertir més recursos per a la seva confirmació. La llista de TOIs s'actualitza constantment a mesura que TESS continua les seves observacions i descobreix nous candidats.

En resum, els TOIs són els candidats a exoplanetes descoberts per TESS que tenen un alt interès científic per a futurs estudis i confirmacions.

MARC PRÀCTIC

Introducció

La part pràctica anirà entorn d'un exoplaneta en concret (TOI 2109 B). Més endavant es donarà la informació de com es va escollir aquest exoplaneta. La part pràctica es divideix en dues parts, la primera és la realització del trànsit d'aquest exoplaneta i la segona tracta de com fer la caracterització química de l'exoplaneta anterior amb el seu espectre.

Aprofundint en el primer bloc, veurem com fer el trànsit d'un exoplaneta ja descobert. En aquest bloc s'ha fet servir Foto Dif (un programa per tractar imatges i realitzar trànsits). També parlarem del material que aquest bloc requereix. L'Associació Astronòmica de Girona, incloent-hi l'observatori Can Roig de Llagostera va organitzar una jornada d'observació el dia 5/07/2024. Aquesta observació va ser feta en una nit, en la qual es va fer exclusivament les fotografies per realitzar el trànsit.

El segon bloc, se centrarà a analitzar l'espectre tant de l'estrella com de l'exoplaneta. En aquest bloc s'utilitzarà Visual Spec, aquest programa ens ajudarà a crear una gràfica amb les longituds d'ona de cada color de l'espectre captades pel telescopi. Aquesta aplicació ens ajudarà també a identificar els diferents elements químics que es troben tant a l'estrella com al planeta. Aquí es va realitzar una segona observació a nivell només de l'observatori el dia 10/07/2024.

Objectius

En aquesta part pràctica es plantegen dos objectius:

- El primer objectiu és realitzar el trànsit d'un exoplaneta. El qual equivaldria a demostrar que existeix l'exoplaneta del qual hem fet el trànsit.
- Per altra banda, l'objectiu en la segona part del treball és realitzar la caracterització química de l'exoplaneta del qual anteriorment s'ha fet el trànsit.
- Finalment, l'últim objectiu que em proposo és fer una reflexió sobre si aquest exoplaneta podria tenir vida.

Primera part

Material utilitzat

Per a realitzar aquest treball es va fer servir el material de l'observatori de Can Roig que és el següent:

- Muntura Skywatcher Eq8 pro
- Telescopi refractor apocromàtic de fluorita William Optics FLT 98
- Càmera CCD QHY9
- Software de control del telescopi
- Observatori NINA

Passos a seguir per realitzar el trànsit

Observació d'un trànsit

Per poder observar un exoplaneta primer hem de saber on hem de mirar. Les possibilitats són limitades, hem de saber el punt exacte on mirar, i el moment exacte. Per això en el cas d'aquest treball s'ha utilitzat l'ETD (Exoplanet Transit Database), una base de dades on es poden consultar aquests paràmetres.

Aquesta web ens ensenyarà els diferents trànsits que es poden observar des de la nostra posició, i ens donarà tota la informació necessària per poder-lo veure. La posició en el cel a la que haurem d'apuntar el telescopi, el dia i l'hora. Si l'hora que ens marca la web encara no és fosc, no podrem fer l'observació. Per tant, haurem de procurar que sigui una hora adequada.

Aquesta web alhora ens dona informació dels TOI. Que com es menciona a la part teòrica són objectes d'interès de la missió TESS, per tant, aquests exoplanetes que ens mostra la web són exoplanetes amb molt poca bibliografia i fins i tot es podrien tractar de falsos positius.

Els dies escollits van ser el 5 de juliol (per realitzar el trànsit) i el 10 de juliol (per fer l'anàlisi espectroscòpic) del 2024. I l'exoplaneta escollit va ser TOI 2109 B que orbita l'estrella TOI 2109, per tant, haurem d'apuntar a aquesta estrella per poder captar el trànsit.

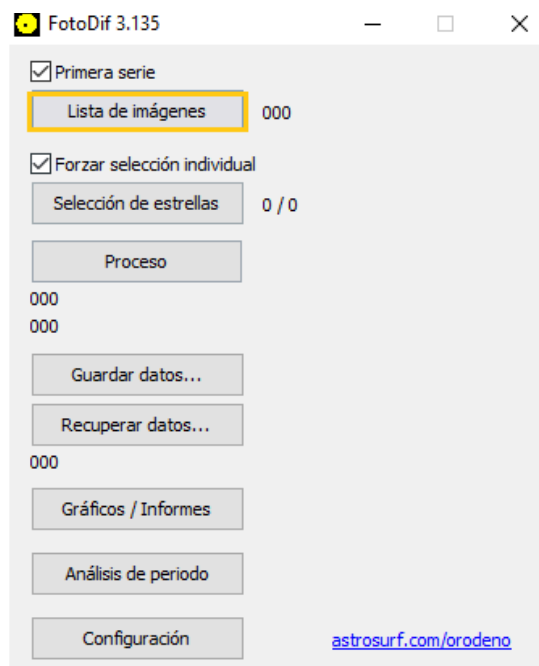
Abans de començar el trànsit hem de fer uns preparatius, ja que si comencéssim a fotografiar l'instant que comença el trànsit no tindríem la referència de la llum de l'estrella nua.

El programa amb el qual hem alineat el telescopi fotografiarà el cel cada 40 segons aproximadament. En aquest cas durant uns 100 minuts.

Procés de dades amb FotoDif

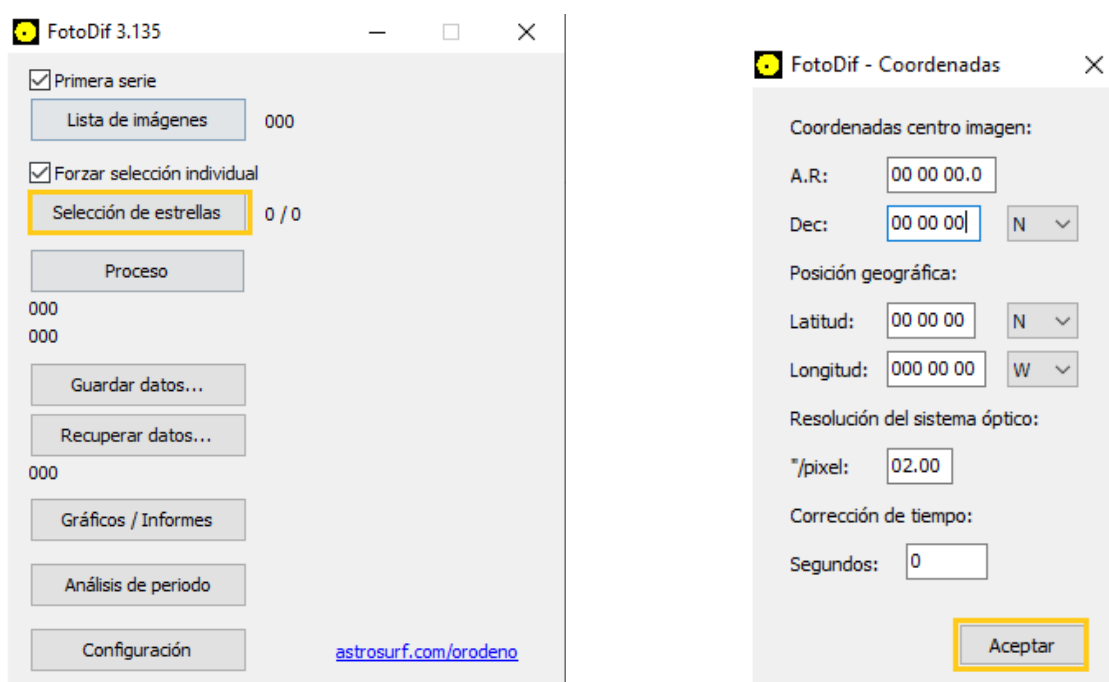
1. FotoDif és una aplicació totalment gratis i disponible per a tothom. Aquesta serà l'aplicació amb la qual obtindrem el gràfic del trànsit a partir de les fotos fetes amb el telescopi anteriorment. Primer de tot s'ha d'instal·lar al dispositiu i obrir el programa. Una vegada descarregat, s'han de seguir els següents passos:

1. Obrir l'aplicació. Se'ns obrirà la pantalla inicial i hem d'anar de dalt a baix en ordre. El primer botó que ens surt anomenat: "Lista de imágenes" és on seleccionarem les imatges que va realitzar el telescopi, molt important les fotos han d'estar en format .fit. (Figura 1)



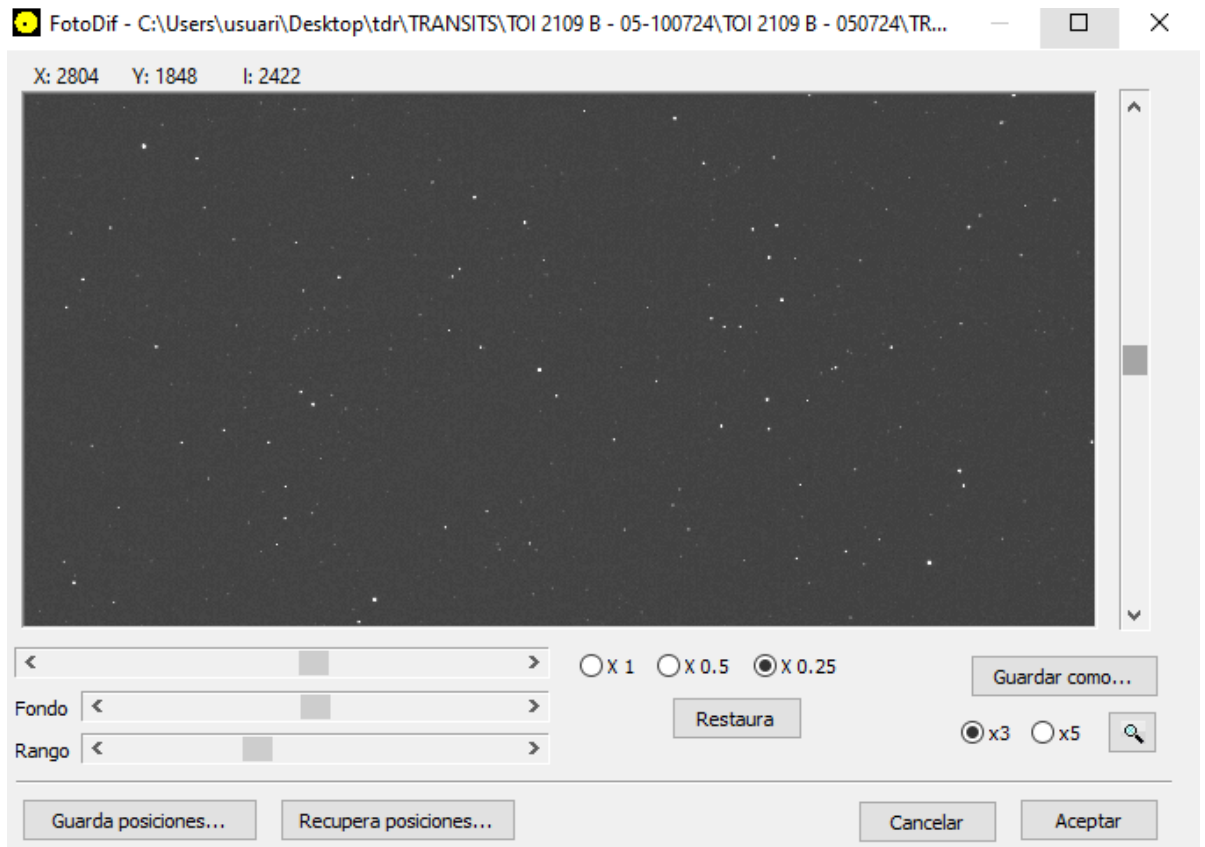
(Figura 3) Selecció d'imatges Foto Dif

- Un cop seleccionades les fotos ens sortirà un menú per seleccionar les coordenades, que haurem d'ignorar i acceptar. Tornarem a anar al menú principal i passarem a la segona opció anomenada "Selección de estrellas". (Figura 4)



(Figura 4) Selecció d'estrelles Foto Dif

- Se'ns obrirà la primera foto, captada pel telescopi, on haurem d'assenyalar l'estrella on es realitzarà el trànsit que anomenarem estrella variable (ja que el llarg de les fotos la intensitat del seu brill variarà). Seguidament, haurem de buscar unes estrelles que tinguin valors semblants a la nostra estrella variable que anomenarem estrelles de calibratge. Aquestes serviran de guia al programa, perquè aquest pugui diferenciar entre una estrella que varia la seva intensitat lumínica i una que no variï. Encara que es poden seleccionar tantes estrelles de calibratge com es vulguin amb tres o quatre l'aplicació en fa el fet. (Figura 5)



(Figura 5) Menú de selecció d'estrelles

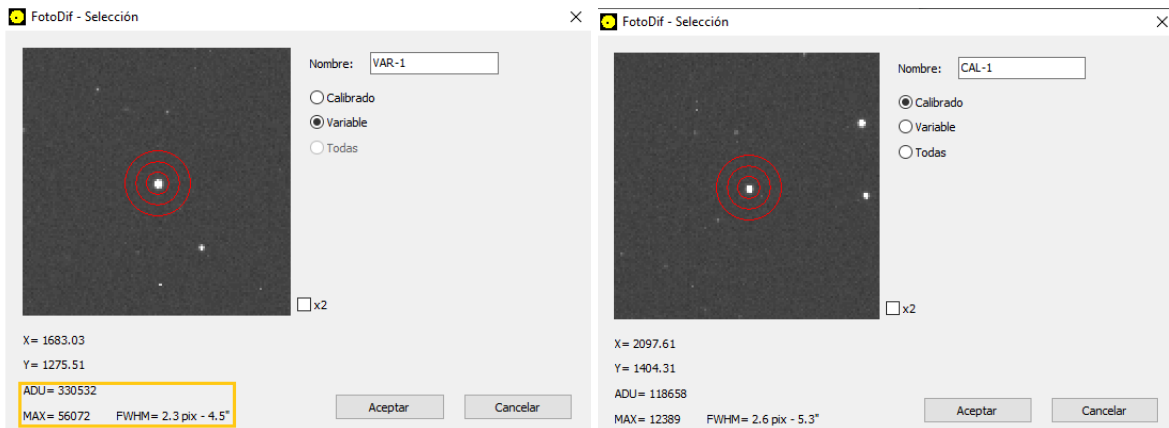
Quan cliquem a cada estrella ens dona uns valors que ens dona informació de l'estrella i de la imatge:

Informació de l'estrella variable (Figura 6)

ADU: 330532

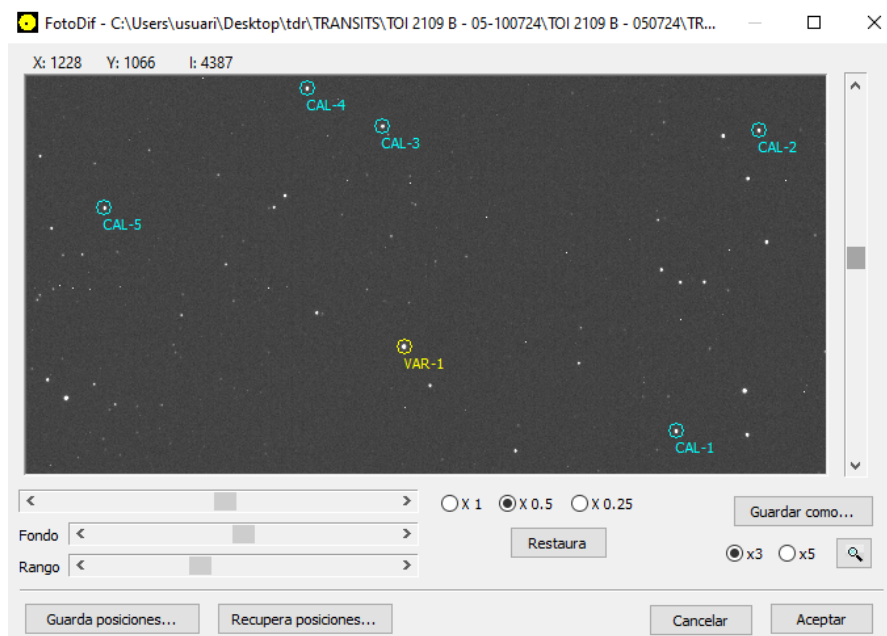
MAX: 56072

FWHM: "2,3 pix - 4,4"



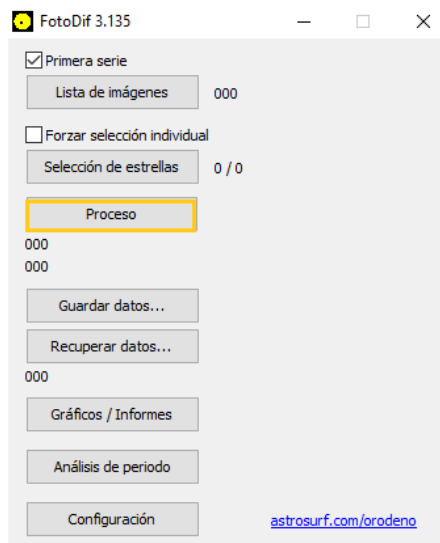
(Figura 6) Selecció per a l'estrella variable i exemple d'estrella de calibratge.

- ADU: És el nombre de píxels que hi ha a l'interior del cercle que es mostra quan selecciones la variable. Aquest número pot ser molt gran, però no està relacionat amb la saturació.
- MAX: Intensitat de píxel més brillant dins del cercle de la variable. Al moment de triar les estrelles de calibratge hem de buscar estrelles amb valors semblants a l'estrella variable.
- FWHM: Ens informa de la mida estel·lar a la imatge.

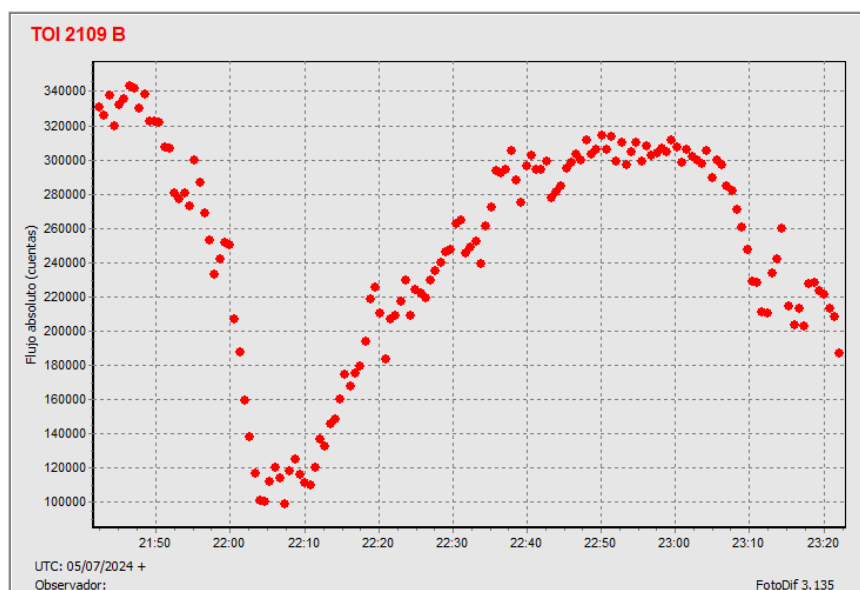


(Figura 7) Imatges amb les estrelles variables i de calibratge seleccionades.

4. Un cop s'hagi seleccionat la variable i les estrelles de calibratge, tornarem al menú inicial on trobarem polsarem el tercer botó anomenat "Proceso". El programa començarà a processar la informació que li hem donat i començarà a analitzar totes les imatges. Al cap de pocs minuts (depenent de les característiques de l'ordinador) obtindrem un gràfic on es veurà representat el trànsit. Totes les dades generades en el procés es poden veure a l'annex. (Figura 8 i 9)



(Figura 8) Botó procés



(Figura 9) Gràfic del trànsit de TOI 2109 B

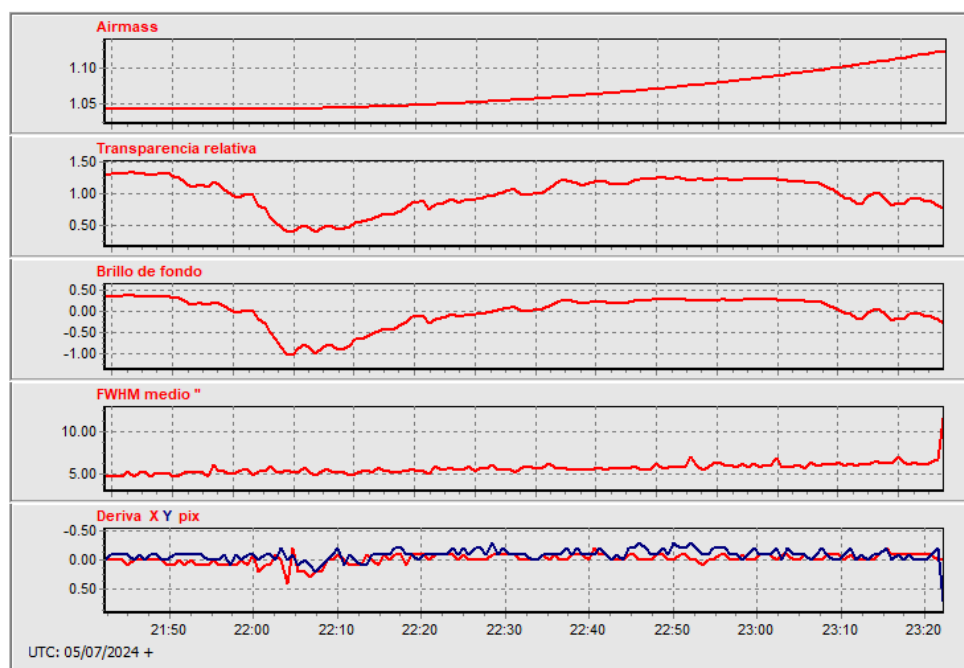
5. Amb aquest programa, també s'elaboren uns gràfics que ens mostren les variacions de diferents paràmetres durant el període d'observació, entred'altres. (Figura 10)

(a) El primer ens mostra la variació de la massa d'aire.

(b) El segon la transparència relativa

(c) El tercer la brillantor de fons

(d) El quart la mida estel·lar mitjana



(Figura 10) Informació addicional sobre la mesura del trànsit proporcionada per Foto Dif.

Segona Part

Material Utilitzat

Per a realitzar aquest treball es va fer servir el material de l'observatori de Can Roig que és el següent:

- Muntura Skywatcher Eq8 pro
- Telescopi refractor apocromàtic de fluorita William Optics FLT 98
- Càmera CCD QHY9
- Software de control del telescopi
- Observatori NINA

Passos a seguir per veure la composició de l'exoplaneta

Per poder veure la composició química de l'exoplaneta, primer hem d'obtenir el seu espectre. Per això, es va realitzar una segona observació el dia 10 de juliol de 2024, on es va aplicar una xarxa de difracció que va permetre descompondre la llum.

Com que el planeta no crea llum per si mateix hem de recórrer a la seva estrella. L'estrella sí que crea llum, per tant, un cop que l'exoplaneta torni a passar per davant de la seva estrella (quan es repeteixi el trànsit) és quan utilitzarem el telescopi per captar l'espectre. Per comprovar que hem captat l'espectre de l'atmosfera de l'exoplaneta i no l'espectre de l'estrella, repetirem el procés, però en un moment en què el planeta no estigui realitzant el trànsit, per tant, captant l'espectre de l'estrella.

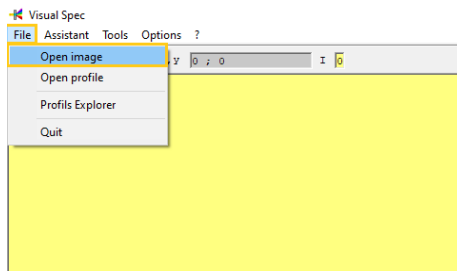
Un cop s'han obtingut els dos espectres, només ens faltaria comparar-los per poder esbrinar la composició de l'exoplaneta. Cal mencionar que, alhora també tindrem la composició de l'estrella i podrem determinar a la classe a la qual pertany.

Procés d'anàlisi amb Visual Spec

Per analitzar els dos espectres s'utilitzarà Visual Spec.

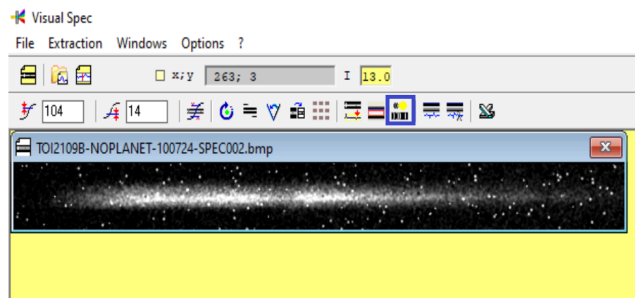
Primer de tot s'ha d'instal·lar al dispositiu i obrir el programa. Una vegada descarregat, s'han de seguir els següents passos:

1. Un cop dins del programa ens dirigim a dalt a la dreta on posa "file" seguidament anirem a la part on posa "Open image" aquí s'obrirà l'arxiu del dispositiu que estem fent servir. Es selecciona la imatge que es va fer amb el telescopi (aquesta imatge ha d'estar en format .bpm). (Figura 11)

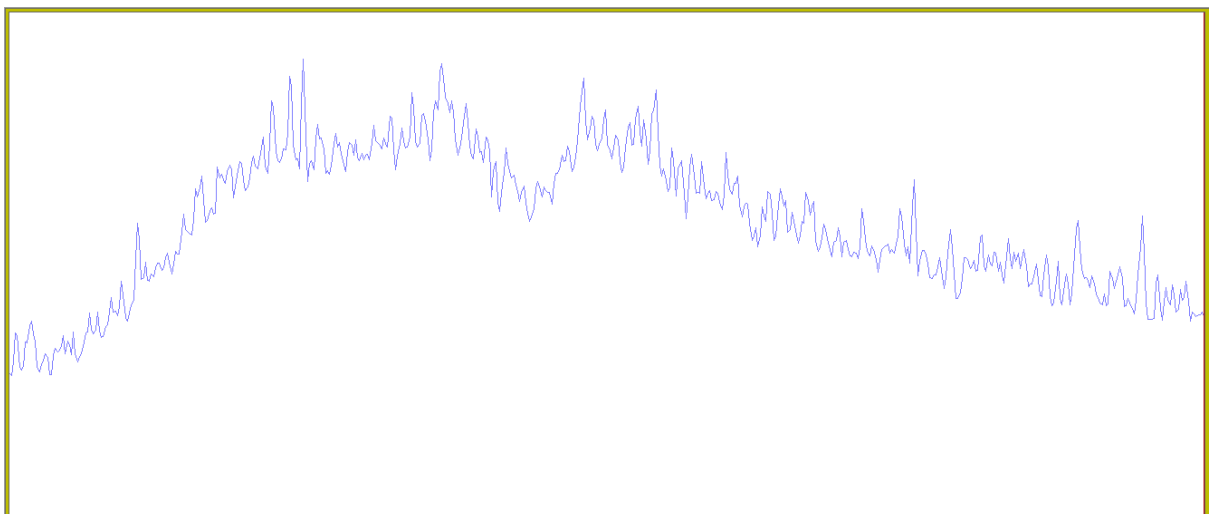


(Figura 11) Menú principal amb els botons “File” i “Open image” seleccionats.

2. Seguidament, s’obrirà la imatge al menú inicial de l’aplicació i haurem de buscar, entre les icones que ens surten a dalt, la icona que posa “Reference binning” un cop s’hagi seleccionat. El mateix programa ens crearà un gràfic amb les longituds d’ona (λ) en l’eix de les abscisses i l’amplitud d’ona (intensitat) en l’eix de les ordenades Per tant, és un gràfic (intensitat/ λ). (Figures 12 i 13)

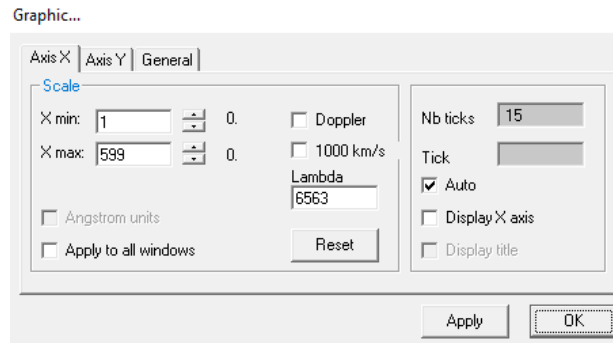


(Figura 12) Imatge seleccionada en el pas anterior i la icona (referència binning)



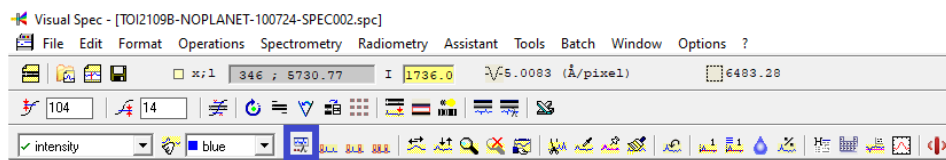
(Figura 13) Gràfic provisional (de l’espectre de l’estrella, sense el planeta)

- Si fem doble clic sobre la gràfica se'ns desplegarà un menú on podrem editar els eixos de coordenades al nostre gust. Molt important posar que es mostrin els eixos i els seus valors, ja que per defecte no hi són, també pots posar el títol del gràfic, el títol dels eixos, línies de referència, posar la distància entre els valors, etc (Figura 14)

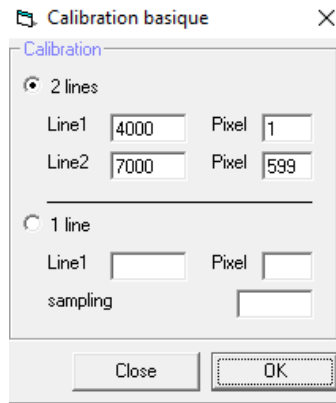


(Figura 14) Menú d'edició dels eixos

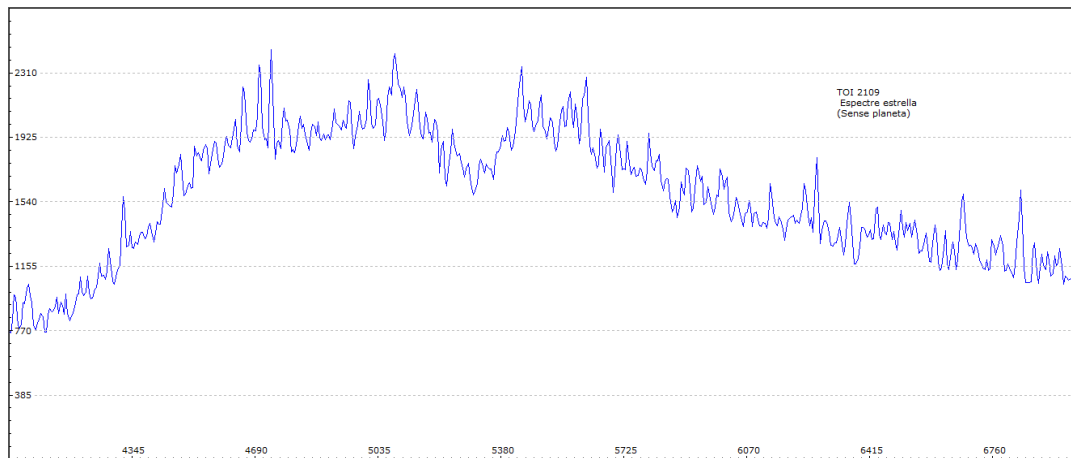
- Aquest gràfic no està del tot bé, per tant, s'haurà de corregir. La longitud d'ona eix X té uns valors que no li pertoquen. Ara anirem a buscar la icona que posa "Calibration basique" on s'obrirà un petit menú on haurem de seleccionar l'opció "2 lines" Al primer forat posarem 4000 i al segon 7000 i en el forat on posa píxel posarem 1 i en el de sota 599 perquè així el valor anterior que es representava amb 1 (valor mínim) ara es representi amb 4000 i el mateix al final amb el 599 (valor màxim) i el 7000. Cliquem "ok" i ja podrem tancar aquest menú. Els valors 4000 i 7000 són escollits perquè aquests representen l'inici i el final de les longituds d'ona que podem veure (les captades amb el telescopi). (Figura 15,16 i 17)



(Figura 15) Icona "Basiqie calibration"

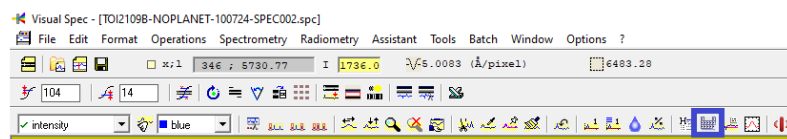


(Figura 16) Menú per rectificar l'eix X per posar-hi els valors que li pertocuen

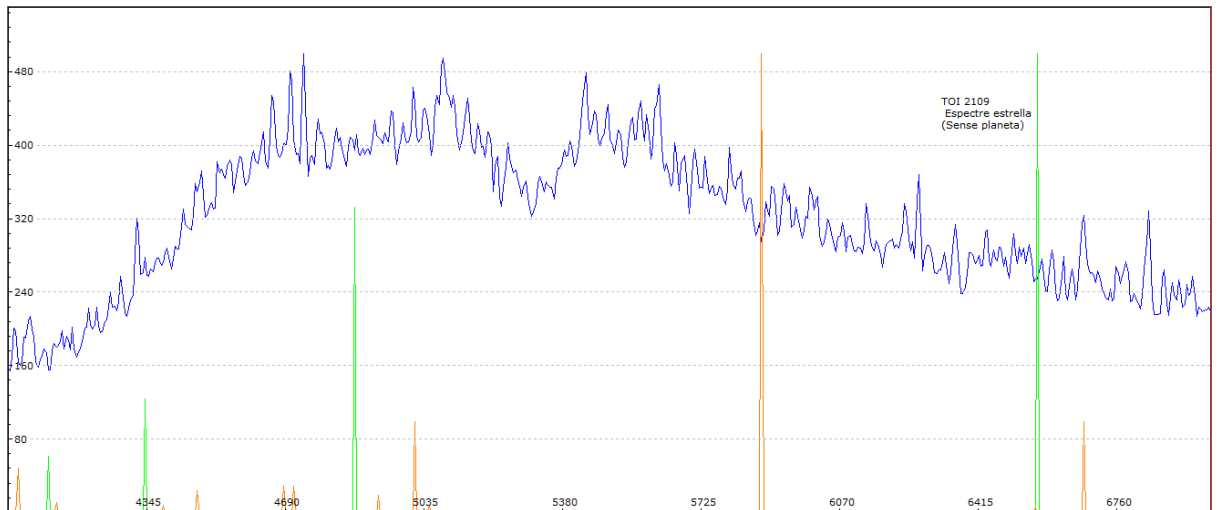


(Figura 17) Espectre de l'estrella, sense el planeta. Amb els eixos corregeixis.

5. Haurem d'anar a la icona de la taula periòdica, anomenat "Mendeléiev" on podrem seleccionar diferents elements i veure si aquests hi són presents i en quina quantitat. (Figura 18 i 19)

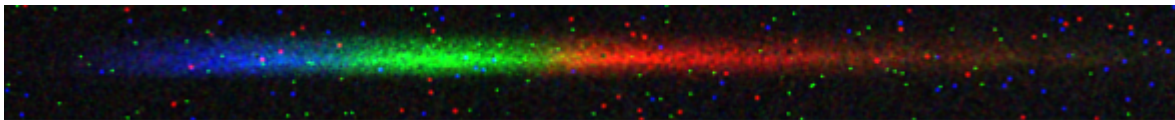


(Figura 18) Icona "Mendeléiev"

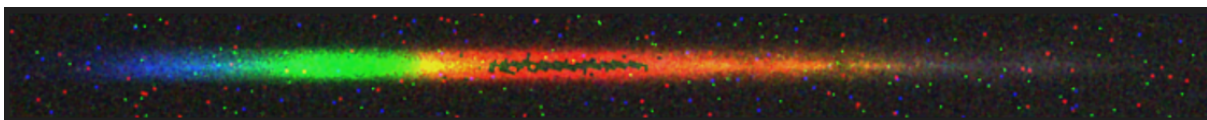


(Figura 19) Espectre de l'estrella, sense el planeta. Amb els elements hidrogen (en color verd) i heli (en color vermell)

6. Aquest procés l'hauríem de realitzar dues vegades. Una per l'espectre de l'estrella i una per l'espectre del planeta. (El procés explicat anteriorment s'ha fet amb l'espectre de l'estrella sense el planeta)



(Figura 20) Espectre de l'estrella 2109 B



(Figura 21) Espectre de l'estrella durant el trànsit. On es pot observar l'ombra de l'exoplaneta.

Resultats definitius

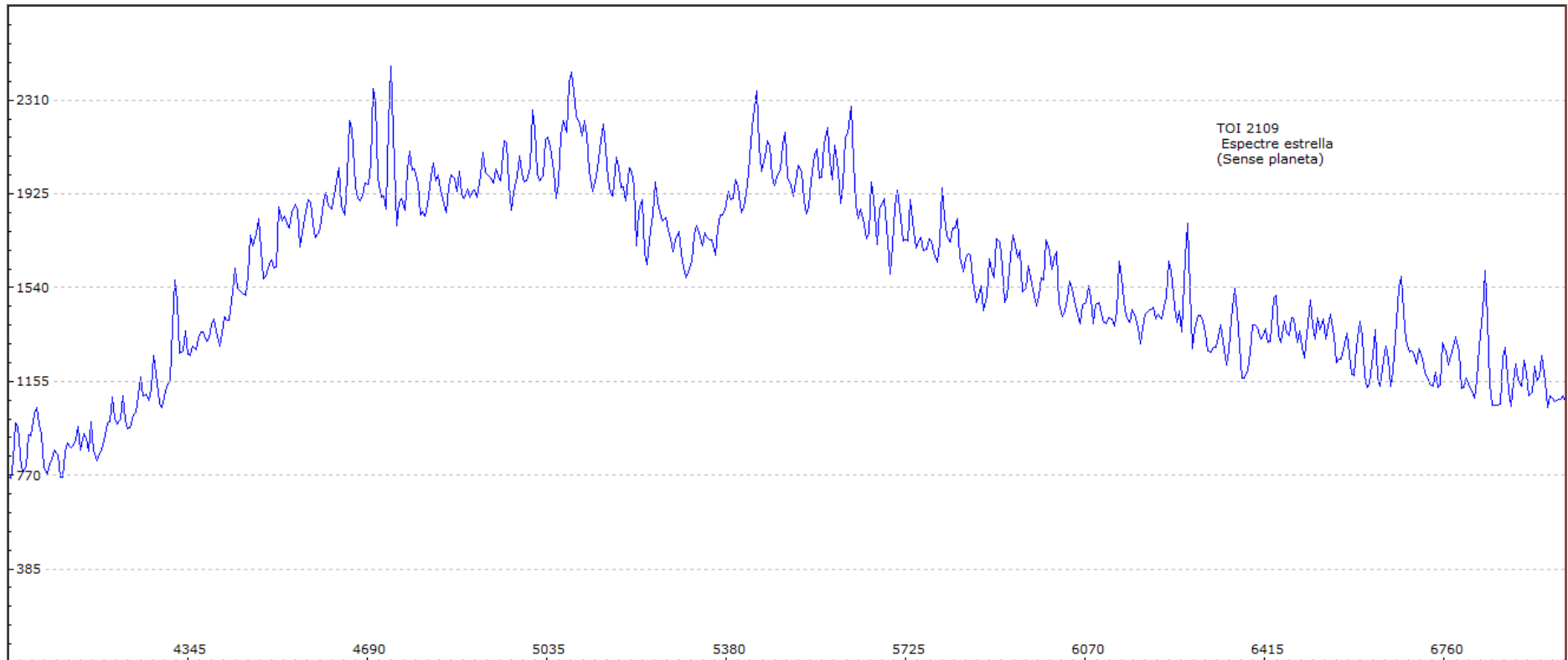
Un cop realitzat tot el procés, podem primer de tot confirmar (de manera poc precisa) que aquest exoplaneta existeix, ja que hem realitzat el seu trànsit i hem vist que hi ha una caiguda de llum significativa en la primera part de la gràfica de la intensitat de la llum (figura 7). També cal recalcar la segona caiguda al final de la

gràfica que ens demostra perquè hem de mirar els paràmetres de la (Figura 8). Aquesta segona caiguda és deguda a l'aparició de núvols en el cel. El qual va resultar en una segona caiguda de llum, ja que els núvols tapaven l'estrella i reduïen la llum captada de l'estrella. Aquests núvols els podem veure representats en el primer paràmetre de la figura 8 on podem veure que la "Arimas" ha augmentat. Per sort no va influir en el transit, ja que aquest ja havia acabat quan van aparèixer els núvols.

Amb la comprovació de l'exoplaneta podem passar a la caracterització química de l'exoplaneta i de l'estrella. Començant per l'estrella podem veure en la figura 21 que conté una gran presència d'elements com el calci el potassi el sodi i el liti sabem això perquè es pot veure que apareixen moltes línies amb molta altura dels colors que estan marcats els elements anteriors. Al contrari que els elements anteriors l'hidrogen quasi que no té presència. Aquestes característiques ens informen que l'estrella que hem observat es tracta d'una estrella de classe F (segons la classificació de Harvard).

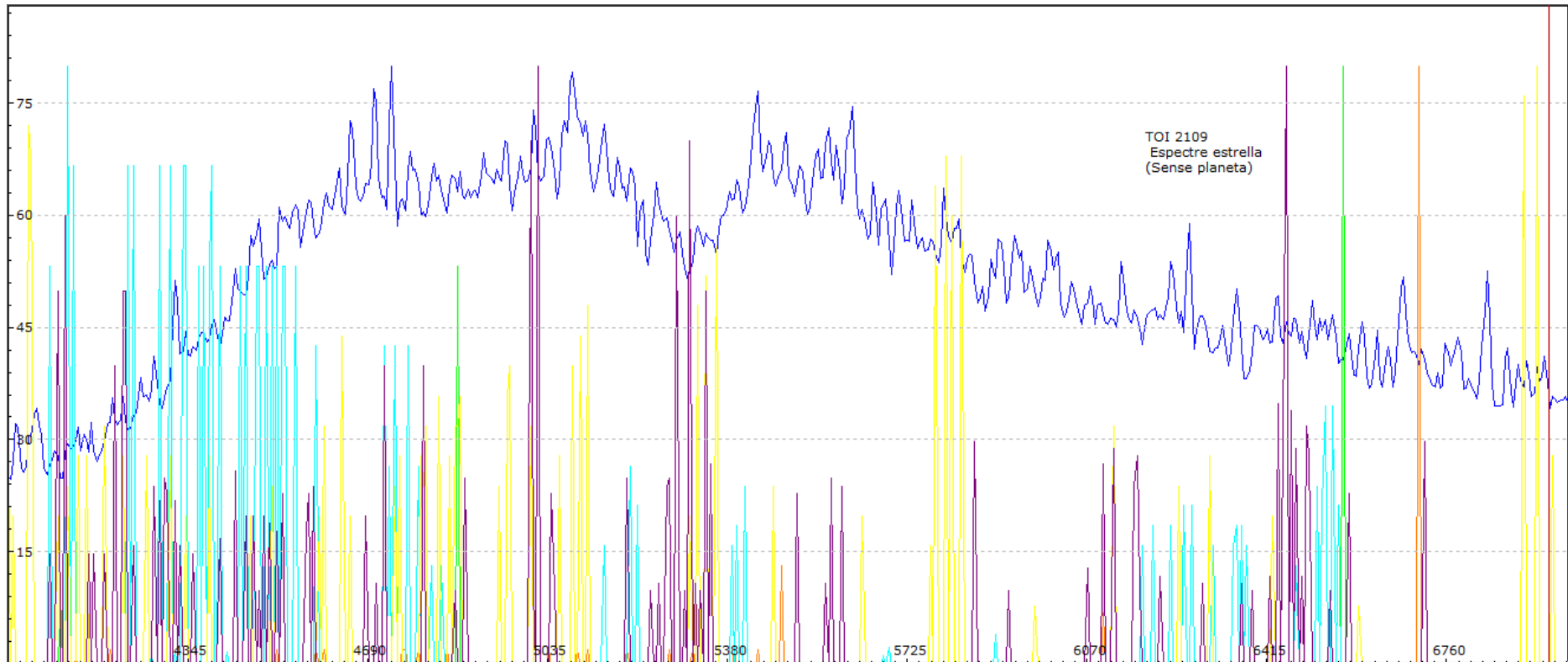
Seguint amb l'exoplaneta, nosaltres volem comprovar l'habitabilitat d'aquest. Per tant ens centrarem a mirar si trobem els elements més importants per a la vida els CHONPS. En la imatge figura 23 podem veure que només hi ha traces rellevants de sofre i nitrogen.

Gràfiques resultants

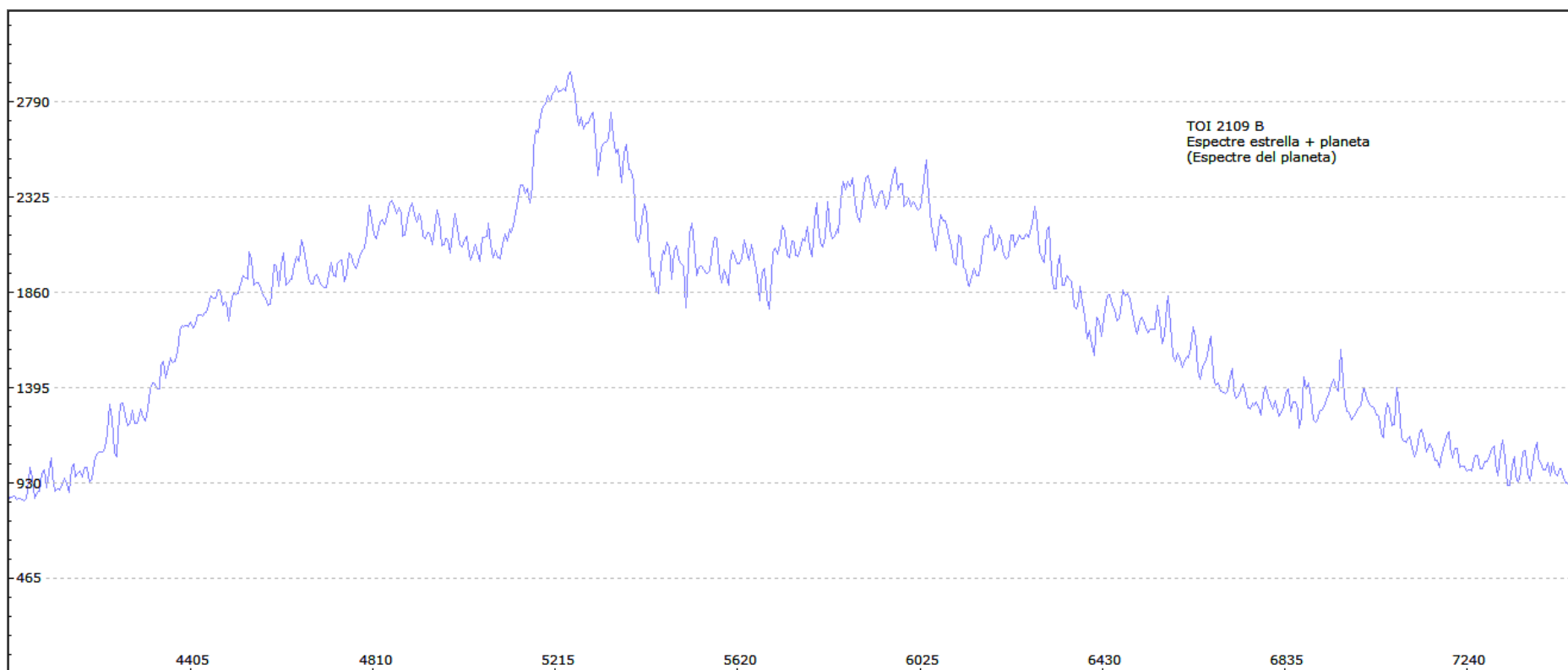


(Figura 22) Espectre de l'estrella (sense el planeta)

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	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

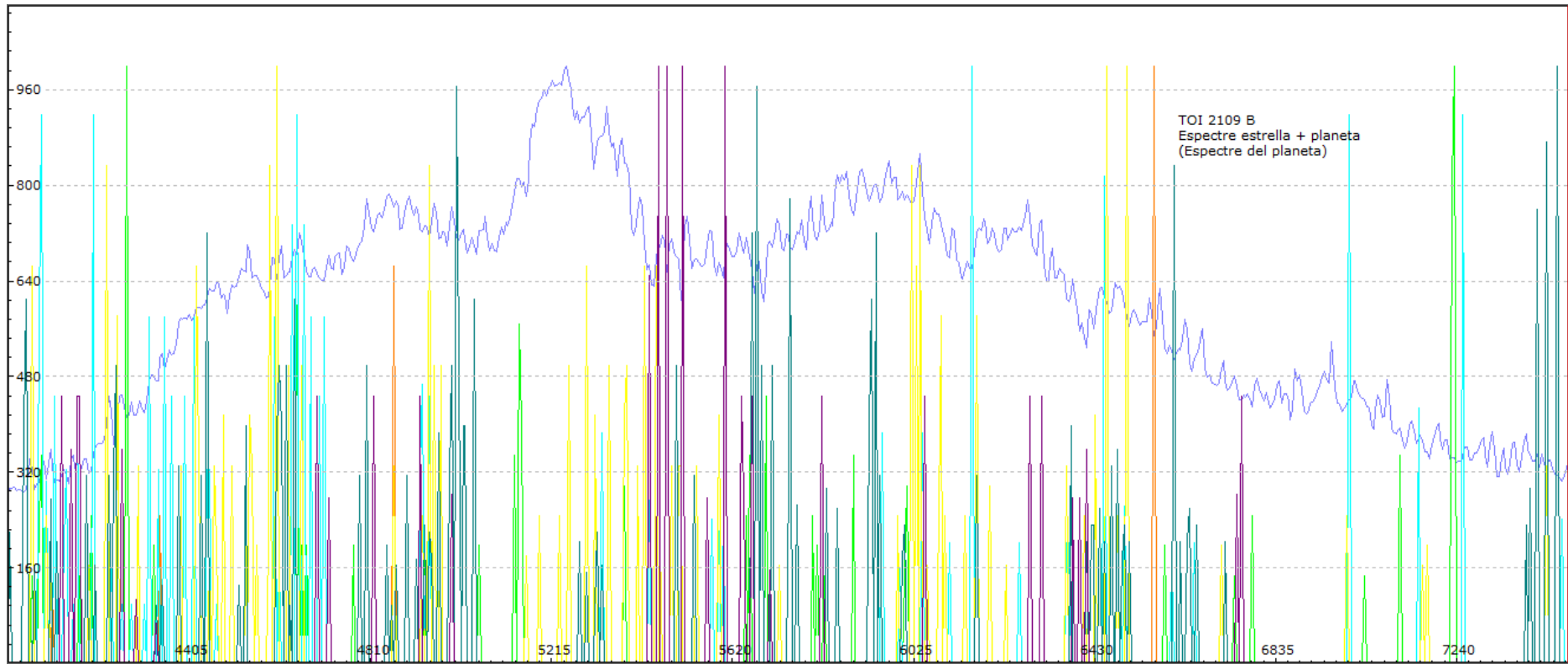


(Figura 23) Espectre de l'estrella (sense el planeta). On es mostren diferents elements marcats a la taula periòdica superior



(Figura 24) Espectre de l'estrella quan el planeta està realitzant el trànsit.

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



(Figura 25) Espectre de l'estrella quan el planeta està realitzant el trànsit. On es mostren diferents elements marcats a la taula periòdica superior.

Informació addicional de TOI 2109 B

És un exoplaneta gegant de gas calent (hot Jupiter), que orbita l'estrella TOI-2109, a la constel·lació d'Hèrcules. 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 amb poca bibliografia, i fins i tot en alguns casos podria tractar-se d'un fals positiu.

L'estrella TOI-2109 és aproximadament un 70% més gran que el Sol i la seva temperatura està al voltant dels 6227°C, aproximadament un 112% de la temperatura del Sol. És una estrella de classe espectral F0.

L'exoplaneta TOI-2109 B es va descobrir el 2021 pel mètode del trànsit i està a uns 861 anys llum de nosaltres. És un Júpiter calent, un planeta semblant a Júpiter que orbita molt a prop de la seva estrella. De fet, TOI-2109 B està tan a prop, que completa la seva òrbita al voltant de l'estrella en només 16 hores! Això el converteix en el Júpiter calent més ràpid conegut i el segon més calent! De moment, és l'únic exoplaneta conegut en l'estrella TOI-2109. (Rafel Balaguer 12/7/2024)

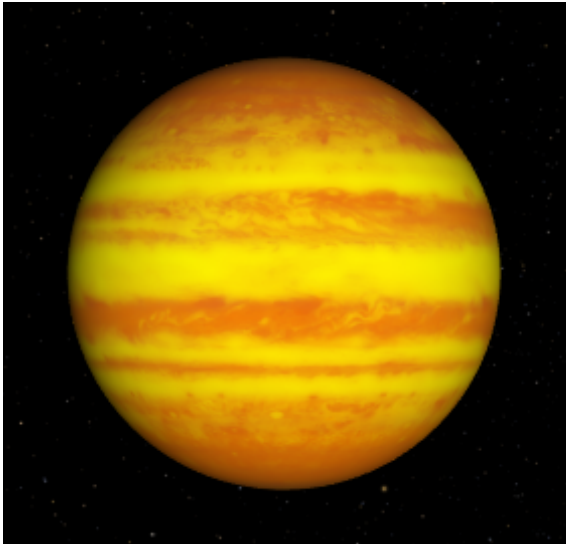
Les seves característiques bàsiques són:

Massa: 1595,9 M Terra | 5,0217 M Júpiter

Dimensions: 15.098 R Terra | 1,3 R Júpiter

Densitat: 2557 kg/m³ | 46% Terra

Temperatura: 3358°C



(Figura 26) Possible aparença de TOI 2109 B (NASA, 2024).

Habitabilitat de TOI 2198 B

Si analitzem la zona d'habitabilitat de l'estrella TOI 2109 veurem que l'exoplaneta TOI 2109 B no està a prop de la zona. Aquest planeta està massa a prop a la seva estrella hoste el qual dona lloc al seu curt període de 16h i a la seva increïble temperatura estimada d'uns 3358°C. Sense mencionar que té 5 vegades la massa de Júpiter. La qual donaria lloc a una gravetat immensa.

Si ignorem aquests paràmetres i tenim l'esperança que la seva composició química sigui l'adequada, veuríem que ens equivoquem, si busquem “els CHONPS” els elements fonamentals per la vida només hi trobem traces significatives de (S) sofre i de (N) nitrogen. (Figura 23). Pel qual com era d'esperar probablement la vida tal com la coneixem és impossible a TOI 2109B.

Conclusió Final

Valorant els objectius marcats al principi d'aquest treball, es pot sortir d'aquest treball de manera positiva, ja que la majoria dels objectius han set assolits.

Els objectius proposats a la part Teòrica, no han suposat un greu problema. Ja que consistien en el meu propi coneixement del tema. He hagut de fer molta recerca per obtenir informacions importants i que milloressin el meu coneixement en el tema. I haver triat un tema que m'agradava m'ha ajudat molt a fer que aquesta tasca que normalment és la més passada es fes més lleugera del que tenia pensat.

S'ha ampliat significativament la comprensió sobre els astres, en particular els exoplanetes i les estrelles, i com la seva llum pot proporcionar informació crítica sobre la seva naturalesa. La relació entre la llum que ens arriba i les característiques físiques dels astres ha estat fonamental per a l'estudi d'aquests cossos celestes.

La profunditat amb què s'ha treballat l'anàlisi dels espectres ha permès identificar signatures químiques i processos físics en els exoplanetes estudiats. El mètode de trànsit ha demostrat ser una eina fiable i eficient per detectar aquests cossos celestes.

D'altra banda, els objectius pràctics han oposat més resistència. Aquests eren més complicats i més específics. Per completar aquests objectius he hagut de necessitar ajuda de diferents agrupacions que me l'han donat amablement.

Els resultats mostren que és possible detectar trànsits d'exoplanetes utilitzant tècniques d'observació no excessivament complexes. Però no es pot dir el mateix del material utilitzat, tot i que m'han deixat el material aquest és un material altament costos i que s'ha de tractar amb molta cura.

Durant el treball, s'ha pogut confirmar un exoplaneta amb poca bibliografia, el que contribueix al fet que sigui menys probable de tractar-se d'un fals positiu. Per tant, s'ha aportat un petit granet de sorra dins de tot el conjunt del món científic.

S'ha pogut analitzar l'espectre de l'estrella TOI 2109 i el planeta TOI 2109 B. No obstant això, s'ha arribat a la conclusió que TOI 2109 B no té indicis per a tenir vida tal com la coneixem, ja que aquesta a part de tenir unes temperatures i una gravetat enorme, manca dels elements necessaris per a la vida.

Per tant, puc concloure aquest treball molt satisfet, ja que a part d'assolir majoritàriament tots els objectius. He pogut col·laborar a la comunitat científica donant el meu petit gra de sorra en un món infinit de coneixement.

Referències

Bibliografia

Galfard, Christophe. El universo en tu mano: un viaje extraordinario a los límites del tiempo y el espacio. 1a ed. Barcelona: Blackie Books, 2023.

Sagan, Carl. Cosmos: Una evolución cósmica de quince mil millones de años que ha transformado la materia en vida y consciencia. 5a ed. Barcelona: Planeta S.A., 1982.

Webgrafia

(2017, abril 24). 1.1. L'espectre electromagnètic | zenit. Recuperat 28 setembre 2024, de https://projectes.xtec.cat/zenit/general/p03_ud01-1-lespecte-electromagnetic/

About the Planets. (s.d.). NASA Science. Recuperat Setembre 28, 2024, de <https://science.nasa.gov/solar-system/planets/>

Asteroids: Facts. (s.d.). NASA Science. Retrieved Juliol 14, 2024, de <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/in-dept/h/>

Asteroids: Facts. (s.d.). NASA Science. Recuperat Setembre 28, 2024, de <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/in-dept/h/>

Asteroid Watch | NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (s.d.). Jet Propulsion Laboratory. Recuperat Setembre 28, 2024, de <https://www.jpl.nasa.gov/asteroid-watch>

Astrometria. (s.d.). Aster.cat. Recuperat Setembre 25, 2024, de <https://www.aster.cat/es/seccions/astrometria.html>

Balaguer, R. (2024, 07 12). Observant exoplanetes, TOI-2109 b. Astrogirona. Recuperat setembre 28, 2024, de <https://astrogirona.cat/2024/07/12/observant-exoplanetes-toi-2109-b/>

Borrelly, N. (s.d.). *Visual Spec (Vspec) – AstroAstur.* AstroAstur. Recuperat Setembre 28, 2024, de <https://astroastur.com/visual-spec-vspect/>

Clasificación estelar – astronomia-iniciacion.com. (s.d.). astronomia-iniciacion.com. Recuperat Juliol 15, 2024, de <https://www.astronomia-iniciacion.com/tipos-de-estrellas.html>

Fluorescència. (s.d.). Viquipèdia. Recuperat Setembre 25, 2024, de <https://ca.wikipedia.org/wiki/Fluoresc%C3%A8ncia>

Incandescència. (s.d.). Viquipèdia. Recuperat Setembre 25, 2024, de <https://ca.wikipedia.org/wiki/Incandesc%C3%A8ncia>

Métodos de detección de planetas extrasolares. (s.d.). Wikipedia. Recuperat Setembre 25, 2024, de https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todos_de_detecci%C3%B3n_de_planetas_extrasolares

Resumen de los principales métodos de detección de exoplanetas | ¿QUIERES DETECTAR EXOPLANETAS? (n.d.). ESERO Spain. Recuperat Setembre 25, 2024, de https://esero.es/practicas-en-abierto/exoplanetas-secundaria/resumen_de_los_principales_mtodos_de_deteccin_de_exoplanetas.html

Space-Warping Planets: The Microlensing Method. (s.d.). The Planetary Society. Recuperat Setembre 25, 2024, de

<https://www.planetary.org/articles/space-warping-planets-the-microlensing-method>

Star - Binaries, Extrasolar, Planetary Systems. (2024, Setembre 17). Britànica. Recuperat Juliol 20, 2024, de <https://www.britannica.com/science/star-astronomy/Binaries-and-extrasolar-planetary-systems>

Star Formation (Stellar Evolution or Life Cycle of A Star). (s.d.). PMF IAS. Retrieved Setembre 25, 2024, de <https://www.pmfias.com/star-formation-stellar-evolution-life-cycle-of-a-star/>

Stars. (s.d.). NASA Science. Recuperat Setembre 28, 2024, de <https://science.nasa.gov/universe/stars/>

Stellar evolution. (s.d.). Wikipedia. Recuperat Setembre 25, 2024, de https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution#Massive_stars

Figures

Figura 1. Espectre d'emissió de l'hidrogen (Xtec, 2017)

Figura 2. Espectre d'absorció de l'hidrogen (Xtec, 2017)

Figura 3. Selecció d'imatges Foto Dif (creació pròpia, 2024)

Figura 4. Selecció d'estrelles Foto Dif (creació pròpia, 2024)

Figura 5. Menú de selecció d'estrelles (creació pròpia, 2024)

Figura 6. Selecció per a l'estrella variable i exemple d'estrella de calibratge. (creació pròpia, 2024)

Figura 7. Imatges amb les estrelles variables i de calibratge seleccionades. (creació pròpia, 2024)

Figura 8. Botó procés. (creació pròpia, 2024)

Figura 9. Gràfic del trànsit de TOI 2109 B (creació pròpia, 2024)

Figura 10. Informació addicional sobre la mesura del trànsit proporcionada per Foto Dif. (creació pròpia, 2024)

Figura 11. Menú principal amb els botons “File” i “Open image” seleccionats. (creació pròpia, 2024)

Figura 12. Imatge seleccionada en el pas anterior i la icona (referència binning). (creació pròpia, 2024)

Figura 13. Gràfic provisional de l'estrella sense el planeta. (creació pròpia, 2024)

Figura 14. Menú d'edició dels eixos. (creació pròpia, 2024)

Figura 15. Icona “Basiqne calibration”. (creació pròpia, 2024)

Figura 16. Menú per rectificar l'eix X per posar-hi els valors que li pertocuen. (creació pròpia, 2024)

Figura 17. Espectre de l'estrella, sense el planeta. Amb els eixos corregeixis. (creació pròpia, 2024)

Figura 18. Icona “Mendeléiev”. (creació pròpia, 2024)

Figura 19. Espectre de l'estrella, sense el planeta. Amb els elements hidrogen (en color verd) i heli (en color vermell). (creació pròpia, 2024)

Figura 20. Espectre de l'estrella 2109 B. (creació pròpia, 2024)

Figura 21. Espectre de l'estrella durant el transit. On es pot observar l'ombra de l'exoplaneta. (creació pròpia, 2024)

Figura 22. Espectre de l'estrella (sense el planeta). (creació pròpia, 2024)

Figura 23. Espectre de l'estrella (sense el planeta). On es mostren diferents elements marcats a la taula periòdica superior. (creació pròpia, 2024)

Figura 24. Espectre de l'estrella quan el planeta està realitzant el transit. (creació pròpia, 2024)

Figura 25. Espectre de l'estrella quan el planeta està realitzant el transit. On es mostren diferents elements marcats a la taula periòdica superior. (creació pròpia, 2024)

Figura 26. Possible aparença de TOI 2109 B (NASA, 2024)

<https://science.nasa.gov/exoplanet-catalog/toi-2109-b/>

Annex

Dades del trànsit de TOI 2109 B

FLUJO ABSOLUTO (CUENTAS)

TOI 2109 B

FECHA UTC	FLUJO	+/-	RSR	AIRMS	TRANS	FWHM"	FONDO	N	NUM
05/07/2024 21:42:21	330532	1992	166	1.045	1.30	4.94	0.38	01	0001
05/07/2024 21:43:01	326224	1979	165	1.044	1.32	4.69	0.37	01	0002
05/07/2024 21:43:43	337613	2013	168	1.044	1.31	4.84	0.37	01	0003
05/07/2024 21:44:22	320021	1960	163	1.044	1.32	4.78	0.38	01	0004
05/07/2024 21:45:04	331871	1996	166	1.044	1.33	5.30	0.39	01	0005
05/07/2024 21:45:44	335250	2006	167	1.044	1.33	4.82	0.39	01	0006
05/07/2024 21:46:24	343110	2029	169	1.044	1.31	5.26	0.37	01	0007
05/07/2024 21:47:06	341710	2025	169	1.044	1.31	5.40	0.38	01	0008
05/07/2024 21:47:46	329750	1989	166	1.043	1.30	4.78	0.36	01	0009
05/07/2024 21:48:27	338071	2014	168	1.043	1.32	5.24	0.38	01	0010
05/07/2024 21:49:07	322550	1967	164	1.043	1.31	5.07	0.37	01	0011
05/07/2024 21:49:47	322509	1967	164	1.043	1.33	5.23	0.39	01	0012
05/07/2024 21:50:29	321841	1965	164	1.043	1.27	4.76	0.34	01	0013
05/07/2024 21:51:09	307124	1920	160	1.043	1.25	4.89	0.32	01	0014
05/07/2024 21:51:50	306736	1919	160	1.043	1.19	5.19	0.25	01	0015
05/07/2024 21:52:31	280739	1835	153	1.043	1.11	5.32	0.18	01	0016
05/07/2024 21:53:10	276915	1823	152	1.043	1.12	5.25	0.19	01	0017
05/07/2024 21:53:52	280758	1835	153	1.043	1.14	5.38	0.20	01	0018
05/07/2024 21:54:32	272681	1809	151	1.043	1.10	4.78	0.16	01	0019
05/07/2024 21:55:12	299699	1896	158	1.043	1.18	6.13	0.24	01	0020
05/07/2024 21:55:54	286678	1855	155	1.043	1.15	5.33	0.21	01	0021
05/07/2024 21:56:34	269038	1797	150	1.043	1.07	5.42	0.12	01	0022
05/07/2024 21:57:15	252844	1742	145	1.043	1.00	5.10	0.05	01	0023
05/07/2024 21:57:55	233070	1672	139	1.043	0.94	5.25	-0.02	01	0024
05/07/2024 21:58:37	241811	1703	142	1.043	0.97	5.45	0.01	01	0025
05/07/2024 21:59:17	251549	1737	145	1.043	1.00	5.48	0.05	01	0026
05/07/2024 21:59:57	250193	1733	144	1.043	0.98	4.94	0.03	01	0027
05/07/2024 22:00:38	207066	1576	131	1.043	0.82	5.37	-0.18	01	0028
05/07/2024 22:01:18	187472	1500	125	1.043	0.77	5.32	-0.27	01	0029
05/07/2024 22:02:00	159175	1382	115	1.043	0.63	5.99	-0.49	01	0030
05/07/2024 22:02:40	137859	1286	107	1.043	0.55	5.38	-0.65	01	0031
05/07/2024 22:03:20	117125	1186	99	1.044	0.48	5.22	-0.82	01	0032
05/07/2024 22:04:02	100786	1100	92	1.044	0.40	5.59	-1.01	01	0033
05/07/2024 22:04:41	100637	1099	92	1.044	0.40	5.18	-1.02	01	0034
05/07/2024 22:05:23	112240	1161	97	1.044	0.46	5.19	-0.85	01	0035
05/07/2024 22:06:03	119966	1200	100	1.044	0.49	5.81	-0.77	01	0036

05/07/2024 22:06:43	114124	1170	98	1.044	0.46	5.29	-0.86	01	0037
05/07/2024 22:07:25	98651	1088	91	1.044	0.41	4.85	-1.00	01	0038
05/07/2024 22:08:04	118242	1191	99	1.045	0.46	5.34	-0.86	01	0039
05/07/2024 22:08:45	124814	1224	102	1.045	0.50	5.66	-0.77	01	0040
05/07/2024 22:09:27	116100	1180	98	1.045	0.49	5.21	-0.78	01	0041
05/07/2024 22:10:06	111258	1155	96	1.045	0.44	5.44	-0.90	01	0042
05/07/2024 22:10:48	109598	1147	96	1.045	0.46	5.16	-0.86	01	0043
05/07/2024 22:11:28	120032	1200	100	1.046	0.48	4.88	-0.80	01	0044
05/07/2024 22:12:08	137047	1282	107	1.046	0.55	4.98	-0.65	01	0045
05/07/2024 22:12:50	132400	1260	105	1.046	0.56	5.38	-0.63	01	0046
05/07/2024 22:13:29	145711	1322	110	1.046	0.59	5.52	-0.57	01	0047
05/07/2024 22:14:11	148216	1334	111	1.047	0.61	5.14	-0.53	01	0048
05/07/2024 22:14:51	159959	1385	115	1.047	0.64	5.84	-0.47	01	0049
05/07/2024 22:15:31	174283	1446	121	1.047	0.69	5.37	-0.38	01	0050
05/07/2024 22:16:13	167519	1418	118	1.047	0.67	5.30	-0.42	01	0051
05/07/2024 22:16:52	175126	1450	121	1.048	0.69	5.27	-0.39	01	0052
05/07/2024 22:17:34	179697	1468	122	1.048	0.74	5.29	-0.31	01	0053
05/07/2024 22:18:14	193641	1524	127	1.048	0.79	5.37	-0.22	01	0054
05/07/2024 22:18:54	218839	1621	135	1.049	0.87	5.68	-0.12	01	0055
05/07/2024 22:19:36	225457	1645	137	1.049	0.88	5.30	-0.10	01	0056
05/07/2024 22:20:16	210660	1590	133	1.049	0.87	5.38	-0.12	01	0057
05/07/2024 22:20:57	183522	1484	124	1.050	0.76	5.09	-0.27	01	0058
05/07/2024 22:21:38	206978	1576	131	1.050	0.84	6.07	-0.16	01	0059
05/07/2024 22:22:17	209258	1585	132	1.050	0.84	5.51	-0.15	01	0060
05/07/2024 22:22:59	216994	1614	134	1.051	0.88	5.65	-0.10	01	0061
05/07/2024 22:23:39	229260	1659	138	1.051	0.93	5.72	-0.04	01	0062
05/07/2024 22:24:19	208976	1584	132	1.051	0.86	5.47	-0.12	01	0063
05/07/2024 22:25:01	224265	1640	137	1.052	0.90	5.52	-0.07	01	0064
05/07/2024 22:25:41	222117	1633	136	1.052	0.90	6.07	-0.07	01	0065
05/07/2024 22:26:22	219597	1623	135	1.053	0.91	5.42	-0.06	01	0066
05/07/2024 22:27:02	229464	1659	138	1.053	0.92	5.87	-0.05	01	0067
05/07/2024 22:27:42	234959	1679	140	1.054	0.96	5.68	-0.01	01	0068
05/07/2024 22:28:24	239928	1697	141	1.054	0.96	6.12	0.00	01	0069
05/07/2024 22:29:04	246259	1719	143	1.054	1.01	5.49	0.06	01	0070
05/07/2024 22:29:45	247756	1724	144	1.055	1.01	5.60	0.06	01	0071
05/07/2024 22:30:25	262883	1776	148	1.055	1.07	5.72	0.12	01	0072
05/07/2024 22:31:07	264808	1783	149	1.056	1.06	5.23	0.11	01	0073
05/07/2024 22:31:47	245585	1717	143	1.056	1.01	5.70	0.06	01	0074
05/07/2024 22:32:27	248819	1728	144	1.057	0.98	6.02	0.02	01	0075
05/07/2024 22:33:08	252455	1741	145	1.057	1.00	5.81	0.05	01	0076
05/07/2024 22:33:48	239511	1695	141	1.058	0.99	5.71	0.04	01	0077
05/07/2024 22:34:30	261049	1770	147	1.058	1.02	5.77	0.07	01	0078
05/07/2024 22:35:10	272534	1808	151	1.059	1.08	6.38	0.14	01	0079
05/07/2024 22:35:50	293689	1877	156	1.060	1.16	5.81	0.22	01	0080
05/07/2024 22:36:31	292329	1873	156	1.060	1.20	5.70	0.26	01	0081
05/07/2024 22:37:12	294499	1880	157	1.061	1.21	5.65	0.27	01	0082
05/07/2024 22:37:52	305541	1915	160	1.061	1.19	5.55	0.25	01	0083
05/07/2024 22:38:33	287899	1859	155	1.062	1.18	5.56	0.24	01	0084

05/07/2024 22:39:13	274829	1816	151	1.062	1.13	5.59	0.19	01	0085
05/07/2024 22:39:55	296375	1886	157	1.063	1.18	5.56	0.24	01	0086
05/07/2024 22:40:35	302186	1904	159	1.064	1.18	5.70	0.24	01	0087
05/07/2024 22:41:15	293983	1878	157	1.064	1.20	5.82	0.26	01	0088
05/07/2024 22:41:56	294463	1880	157	1.065	1.18	5.51	0.24	01	0089
05/07/2024 22:42:36	298979	1894	158	1.066	1.15	5.77	0.22	01	0090
05/07/2024 22:43:18	277823	1826	152	1.066	1.15	5.69	0.21	01	0091
05/07/2024 22:43:58	281205	1837	153	1.067	1.14	5.70	0.20	01	0092
05/07/2024 22:44:38	284664	1848	154	1.068	1.17	5.70	0.24	01	0093
05/07/2024 22:45:20	294607	1880	157	1.068	1.20	5.93	0.26	01	0094
05/07/2024 22:45:59	298579	1893	158	1.069	1.23	5.67	0.28	01	0095
05/07/2024 22:46:41	303518	1908	159	1.070	1.22	5.49	0.28	01	0096
05/07/2024 22:47:21	299840	1897	158	1.071	1.23	5.71	0.29	01	0097
05/07/2024 22:48:01	311583	1934	161	1.071	1.24	6.38	0.30	01	0098
05/07/2024 22:48:43	303229	1908	159	1.072	1.27	5.68	0.33	01	0099
05/07/2024 22:49:22	305676	1915	160	1.073	1.24	5.84	0.29	01	0100
05/07/2024 22:50:04	314410	1942	162	1.074	1.25	6.01	0.30	01	0101
05/07/2024 22:50:45	306240	1917	160	1.074	1.26	5.84	0.31	01	0102
05/07/2024 22:51:24	313511	1940	162	1.075	1.24	6.06	0.29	01	0103
05/07/2024 22:52:06	299314	1895	158	1.076	1.20	7.15	0.26	01	0104
05/07/2024 22:52:45	309750	1928	161	1.077	1.22	6.21	0.28	01	0105
05/07/2024 22:53:26	297008	1888	157	1.078	1.22	5.60	0.28	01	0106
05/07/2024 22:54:08	304231	1911	159	1.078	1.21	5.80	0.27	01	0107
05/07/2024 22:54:47	310165	1929	161	1.079	1.22	6.32	0.28	01	0108
05/07/2024 22:55:29	299072	1894	158	1.080	1.23	6.52	0.28	01	0109
05/07/2024 22:56:09	308065	1923	160	1.081	1.24	5.97	0.30	01	0110
05/07/2024 22:56:49	302177	1904	159	1.082	1.22	6.18	0.28	01	0111
05/07/2024 22:57:31	303600	1909	159	1.083	1.22	5.82	0.28	01	0112
05/07/2024 22:58:10	306810	1919	160	1.084	1.23	6.37	0.29	01	0113
05/07/2024 22:58:52	304423	1911	159	1.085	1.22	5.90	0.28	01	0114
05/07/2024 22:59:32	311343	1933	161	1.086	1.23	6.28	0.29	01	0115
05/07/2024 23:00:12	307327	1920	160	1.086	1.23	5.90	0.29	01	0116
05/07/2024 23:00:54	298515	1893	158	1.087	1.22	6.11	0.28	01	0117
05/07/2024 23:01:33	305715	1915	160	1.088	1.22	6.03	0.29	01	0118
05/07/2024 23:02:15	301619	1902	159	1.089	1.23	6.92	0.29	01	0119
05/07/2024 23:02:55	299644	1896	158	1.090	1.20	5.81	0.26	01	0120
05/07/2024 23:03:35	297522	1890	157	1.091	1.22	5.90	0.28	01	0121
05/07/2024 23:04:17	305565	1915	160	1.092	1.20	5.98	0.26	01	0122
05/07/2024 23:04:57	289758	1865	155	1.093	1.19	6.20	0.25	01	0123
05/07/2024 23:05:38	299424	1896	158	1.094	1.19	5.71	0.25	01	0124
05/07/2024 23:06:19	296711	1887	157	1.095	1.17	6.45	0.23	01	0125
05/07/2024 23:06:58	284578	1848	154	1.096	1.18	5.95	0.24	01	0126
05/07/2024 23:07:40	281945	1839	153	1.097	1.16	6.22	0.22	01	0127
05/07/2024 23:08:20	271004	1803	150	1.099	1.10	6.29	0.16	01	0128
05/07/2024 23:09:00	260283	1767	147	1.100	1.06	6.10	0.12	01	0129
05/07/2024 23:09:42	247477	1723	144	1.101	1.01	6.47	0.06	01	0130
05/07/2024 23:10:21	228609	1656	138	1.102	0.94	6.01	-0.03	01	0131
05/07/2024 23:11:03	228036	1654	138	1.103	0.92	6.35	-0.05	01	0132

05/07/2024 23:11:43	210900	1591	133	1.104	0.85	6.03	-0.13	01	0133
05/07/2024 23:12:23	210212	1588	132	1.105	0.83	6.27	-0.16	01	0134
05/07/2024 23:13:05	233529	1674	140	1.106	0.95	6.21	-0.01	01	0135
05/07/2024 23:13:45	242009	1704	142	1.107	0.99	6.40	0.04	01	0136
05/07/2024 23:14:26	260113	1767	147	1.109	1.02	6.41	0.07	01	0137
05/07/2024 23:15:19	214555	1605	134	1.110	0.90	6.25	-0.08	01	0138
05/07/2024 23:16:02	203411	1562	130	1.111	0.81	6.28	-0.19	01	0139
05/07/2024 23:16:42	213054	1599	133	1.113	0.85	7.04	-0.14	01	0140
05/07/2024 23:17:24	202445	1559	130	1.114	0.83	6.40	-0.17	01	0141
05/07/2024 23:18:04	227206	1651	138	1.115	0.92	6.11	-0.05	01	0142
05/07/2024 23:18:44	227898	1654	138	1.116	0.92	6.45	-0.05	01	0143
05/07/2024 23:19:25	223307	1637	136	1.118	0.92	6.14	-0.05	01	0144
05/07/2024 23:20:05	221149	1629	136	1.119	0.88	6.20	-0.11	01	0145
05/07/2024 23:20:47	213101	1599	133	1.120	0.88	6.43	-0.11	01	0146
05/07/2024 23:21:27	207985	1580	132	1.122	0.82	6.73	-0.18	01	0147
05/07/2024 23:22:07	187049	1498	125	1.123	0.76	11.65	-0.27	01	0148

Observador:
FotoDif 3.135