

**MÉS ENLLÀ DEL QUE
VEIEM**



There is no joy more intense than that of coming upon a fact that cannot be understood in terms of currently accepted ideas.

- *Cecília Payne* -

AGRAÏMENTS

La realització d'aquest treball no hauria estat possible sense un seguit de persones que m'han donat el seu suport, temps i ajuda.

En primer lloc m'agradaria agrair a la tutora d'aquest treball les seves correccions i orientació al llarg de tot el procés.

En segon lloc, voldria donar les gràcies al Dr. Ribas, el qual m'ha proporcionat les dades necessàries per dur a terme la part pràctica del treball, a més de concedir-me una entrevista i resoldre'm la majoria de dubtes que se m'han plantejat durant la realització de la part pràctica. Els resultats obtinguts en aquest treball no haurien estat possibles sense ell, i és per això que li estic eternament agraïda.

En tercer lloc, voldria agrair a la Federica Beduini la seva orientació durant el taller realitzat a l'ICFO i la seva disposició a resoldre els meus dubtes.

També vull reconèixer a la Bibiana Corominas, professora de català, els consells que m'ha proporcionat per realitzar l'entrevista i el temps que ha dedicat a revisar-la.

Considero important, també, donar les gràcies als meus amics per animar-me a continuar endavant i no rendir-me.

Finalment, vull fer esment dels meus pares, que m'han aconsellat, ajudat i donat suport durant tot el procés.

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ	1
2.	HISTÒRIA DE L'ESTUDI DE LA LLUM	2
3.	LA LLUM I LES SEVES CARACTERÍSTIQUES	8
4.	L'ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC I LES LÍNIES ESPECTRALS	12
5.	APLICACIONS DE L'ANÀLISI DE LA LLUM EN L'ASTROFÍSICA	14
5.1.	LA CLASSIFICACIÓ ESTEL·LAR	14
5.2.	VELOCITATS RADIALS.....	15
5.3.	CORBES DE LLUM	19
6.	PART PRÀCTICA	21
6.1.	CÀLCUL DE LES VELOCITATS RADIALS DE DUES ESTRELLES.....	21
6.2.	CONSTRUCCIÓ D'UN INTERFERÒMETRE A L'INSTITUT DE LES CIÈNCIES FOTÒNIQUES.....	32
6.3.	ENTREVISTA A IGNASI RIBAS.....	36
7.	CONCLUSIONS	37
8.	LLISTA DE REFERÈNCIES	40
9.	ANNEXOS	42

1. INTRODUCCIÓ

Fa dos anys vaig anar a una xerrada de l'astrofísic Ignasi Ribas, on parlava d'un nou exoplaneta que s'havia descobert feia poc: Alfa Centauri, el planeta situat més a prop del sistema solar que presenta totes les característiques necessàries per contenir vida. En aquesta xerrada el Dr. Ribas parlava, entre altres, de les tècniques que s'havien utilitzat per descobrir el nou planeta i obtenir-ne dades suficientment precises com per saber que es tractava d'un planeta al qual hi podria haver vida.

Una de les tècniques de les quals parlava era la descomposició de la llum, que els havia permès saber dades com de quins elements estava format el planeta o a quina distància de la seva estrella es trobava. Aquesta metodologia em va cridar molt l'atenció, i des d'aleshores he volgut profunditzar més en el tema.

Els objectius d'aquest treball, per tant, són explicar els diferents tipus d'informació que podem obtenir a través de l'anàlisi de la llum, especialment la que emeten o reflecteixen els astres, i dur a terme l'estudi de l'espectre d'un sistema de dues estrelles.

Per tal de realitzar aquest treball s'elaborarà un marc teòric i es durà a terme un procés d'experimentació, recollida de dades i anàlisi de resultats.

2. HISTÒRIA DE L'ESTUDI DE LA LLUM

Des dels principis dels temps els humans ens hem fet preguntes sobre l'univers que ens envolta. Hem sentit curiositat per tot, des dels detalls més insignificants fins als fenòmens més rellevants de la nostra existència.

Probablement, algunes de les primeres preguntes que ens vam fer, quan encara fèiem pintures a les parets de les coves, van ser sobre els milers de puntets brillants que es veien al cel quan es feia de nit. Com podia ser que quan es feia fosc i el Sol marxava apareguessin en lloc seu milers de llumetes?

La història de l'estudi de la llum té el mateix origen que la de qualsevol ciència: la curiositat humana.

La primera teoria que parlava de la llum era la de la visió: veiem les coses perquè els nostres ulls emeten rajos de llum que arriben als objectes o perquè els objectes emeten rajos de llum que arriben a l'ull?

A l'antiga Grècia apareixen dos grans pensadors, entre altres, que defensen teories diferents: Empèdocles (495 aC - 444 aC) i Demòcrit (460 aC - 370 aC).

El primer defensava la idea que veiem els objectes gràcies als raigs de llum que emetem amb els ulls. Però si aquesta teoria hagués sigut certa, hauríem sigut capaços de veure'ns-hi durant la nit. Per justificar aquesta manca de visió nocturna, Empèdocles va argumentar que els rajos que emetien els nostres ulls havien d'interactuar amb els raigs d'una altra font de llum (com el Sol o el foc) per tal de poder veure els objectes. Aquesta teoria va inspirar posteriorment a pensadors com Euclides, que també va contribuir en l'avenç de l'estudi de la llum.

Demòcrit, en canvi, deia que la llum tenia una naturalesa corpuscular (estava formada per partícules) i que el fet de poder veure els objectes era causat per la projecció de partícules d'aquests, que l'ànima interpretava a continuació. Aquesta teoria va rebre el suport de pensadors com Epicur, i és un avançament a la que posteriorment publicaria Newton.

Més endavant, el matemàtic Euclides (323 aC – 285 aC) va afirmar que la llum viatjava en línia recta. Euclides era defensor de la teoria d'Empèdocles, que més endavant va resultar ser errònia però que així i tot va donar lloc a conclusions encertades sobre la llum.

Hem de tenir en compte que en l'actualitat ens sembla completament lògic que la llum no provingui dels nostres ulls sinó dels objectes que l'emeten, i el mateix ens passa amb milers de fenòmens més. Però tot el que ja donem per suposat sobre el que ens envolta ha estat abans estudiat, i les persones que han arribat a les conclusions que nosaltres ara afirmem sense donar-los gens d'importància eren autèntics genis.

El següent personatge històric que ens trobem és Heró d'Alexandria (10 dC – 75 dC). Heró era enginyer i matemàtic, i va definir la llei de la reflexió, sovint atribuïda a Euclides.

Aquesta llei va ser posteriorment comprovada per Claudi Ptolemeu (100 dC – 170 dC), matemàtic i astrònom que també va postular les lleis de la refracció. Ptolemeu també pensava que la visió era causada gràcies als rajos de llum que emetien els ulls i, per tant, tots els seus experiments els va realitzar basant-se en aquesta teoria. Tot i això, els resultats van ser bons i avui dia encara es fan servir aquestes lleis, que no van ser expressades de forma matemàtica fins al segle XVII per Willebrord Snell.

Amb el pas del temps la teoria d'Empèdocles va anar perdent força i la majoria de científics es van començar a inclinar cap a la de Demòcrit.

Aquest canvi d'opinió es va donar, en gran part, gràcies al científic d'Iraq Ibn-al Haytam (965 – 1040), conegut a Occident com a Alhazen. Aquest argumentava que la teoria d'Empèdocles era errònia, ja que, en el cas que hagués sigut certa, no era lògic que després de mirar un objecte brillant molta estona ens fessin mal els ulls. Alhazen va ser un dels grans científics de la història. Gràcies als seus estudis també va argumentar que la velocitat de la llum era finita però extremadament alta, i va investigar extensament la visió i el mecanisme ocular.

Després dels descobriments d'Alhazen, malgrat que l'òptica experimentés un gran desenvolupament, l'estudi i anàlisi de la composició de la llum va quedar estancat durant uns 600 anys (amb alguna excepció puntual, com la llei de Snell), fins que Newton (1643-1727) va publicar la teoria corpuscular, on afirmava que la llum està formada per partícules que viatgen en línia recta a una velocitat extremadament elevada. També va escriure *Òptica o Tractat de les Reflexions, Refraccions, Inflexions i Colors de la Llum*, un dels primers tractats on s'establien les bases de l'òptica moderna i on parlava del comportament i la naturalesa de la llum.

Newton també va arribar a la conclusió que la llum blanca no existia per si mateixa, sinó que era la composició de llums de tots els colors. Encara que anteriorment ja s'haguessin intentat estudiar i descriure fenòmens com l'arc de Sant Martí, Newton va ser el primer en postular aquesta teoria i comprovar-la realitzant diversos experiments amb prismes i la llum del Sol. A més, Newton també va veure que la composició de la llum no variava en veure's afectada per factors externs, i això el va portar a pensar que aquesta era l'ànima de la llum, motiu pel qual la va anomenar *Spectrum* (ànima en llatí), en català espectre.



Figura 1. Il·lustració d'Isaac Newton descomponent la llum del Sol amb un prisma.



Figura 2. Il·lustració de William Herschel experimentant amb les temperatures de la llum.

Uns anys més tard, el 1800, William Herschel (1738 - 1822), un gran compositor i astrònom que construïa telescopis, va adonar-se que els filtres que feia servir per observar el Sol s'escalfaven més o menys depenent del color que fossin. Herschel va sentir molta curiositat per aquest fet, i va decidir mesurar la temperatura de cada color. Per fer-ho va descompondre la llum del Sol amb un prisma com ja havia fet Newton uns anys abans. Les

temperatures obtingudes les anava comparant amb dos termòmetres que tenia a l'ombra per tal d'assegurar-se que no hi havia factors externs que influïssin en els valors obtinguts. Amb aquest experiment Herschel es va adonar que la temperatura augmentava a mesura que desplaçava el termòmetre del lila cap al vermell.

Però això no va ser l'únic que va veure. Mentre duia a terme cada mesura va decidir comprovar la temperatura de la zona que hi havia més enllà del vermell (aparentment no il·luminada) i es va sorprendre en veure que la temperatura encara augmentava més. Herschel va anomenar aquests rajos (invisibles per l'ull humà) "rajos calorífics" i, realitzant més experiments, va arribar a la conclusió que es comportaven de la mateixa manera que la llum "normal" (eren absorbits, reflectits, refractats i transmesos com la llum visible). Acabava de descobrir la llum infraroja.

Aquest va ser un esdeveniment clau en la història de l'estudi de la llum i de la ciència en general, ja que per primera vegada es va veure que encara que els humans no puguem percebre alguns dels elements i fenòmens que ens envolten no vol dir que aquests no existeixin.

La notícia del descobriment de Herschel es va escampar per tot Europa i va arribar a orelles de Johann Ritter (1776 – 1810). Ritter, que era un gran físic i químic, creia que, si hi havia llum invisible més enllà del vermell, també n'hi havia d'haver abans del lila. Per tal de demostrar la seva hipòtesi, Ritter va decidir experimentar amb plaques de sals de plata: en aquella època s'estava desenvolupant la fotografia i se sabia que aquestes s'enfosqueixen en ser exposades a la llum i que aquest efecte es veu més pronunciat com més propera al violeta és aquesta. Tal com havia fet Herschel, Ritter va descompondre la llum del Sol amb un prisma. A continuació va exposar la placa a cada color. Aleshores va observar que, tal com ell s'esperava, la placa encara es tornava més fosca en ser exposada a la zona pròxima al color lila, on aparentment la llum no arribava.

Ritter va anomenar aquests rajos "rajos químics", i més endavant van rebre el nom de rajos ultraviolats, ja que es trobaven en una zona no visible més enllà del violeta.

Tornant a l'època de Newton, aproximadament durant el mateix període de temps en què aquest va publicar la teoria corpuscular, el científic Christiaan Huygens (1629-1695) va postular una altra teoria que defensava que la llum era



Figura 3. Conjunt d'ones propagant-se pel medi aquàtic.

un fenomen ondulatori. Una ona és una pertorbació d'una propietat física del medi que es propaga per aquest a una velocitat concreta. Tots estem familiaritzats amb aquest fenomen, i el podem detectar en elements quotidians com les ones de ràdio, les ones del mar o els terratrèmols.

Simultàniament als descobriments de Herschel i Ritter, Thomas Young (1773 - 1829), va aconseguir comprovar la teoria de Huygens. Per fer-ho, Young va realitzar un experiment on va fer passar un feix de llum per dos orificis i el va projectar a continuació en una pantalla. El patró que va obtenir (línies de llum i línies d'ombra), només es podia explicar amb les característiques del comportament d'una ona i, per tant, va poder demostrar la teoria de Huygens.

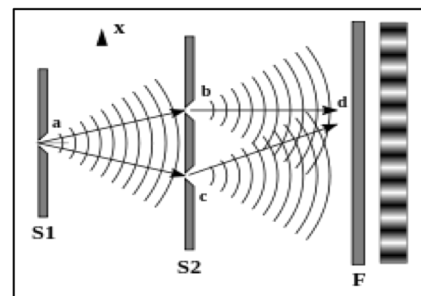


Figura 4. Esquema de l'experiment de Young, on a és el focus de llum (espelma), b i c són els orificis a la paret, i d és la pantalla on es projecta el patró de llum obtingut.

Amb aquest experiment Young va ser capaç de mesurar la longitud d'ona (distància entre dos punts consecutius en el mateix estat de pertorbació en una ona) de cada color i, en veure que eren diferents entre elles (la del vermell és d'uns 700 nm i la del violeta d'uns 400 nm), va arribar a la conclusió que cada color venia caracteritzat per una longitud d'ona concreta.

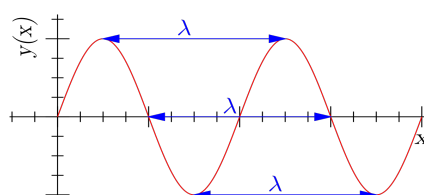


Figura 5. Representació d'una ona i la seva longitud d'ona (λ)

Així doncs, durant molt de temps es va creure que la llum era un fenomen ondulatori, i la teoria corpuscular de Newton va quedar refutada.

Amb el pas dels anys, es van anar descobrint tots els tipus de “llum invisible” que existeixen: les ones de ràdio, les microones, els raigs x i els raigs gamma. Aquests, juntament amb la llum visible, els raigs infrarojos i la llum ultraviolada formen la radiació electromagnètica o llum i varien depenent de la seva longitud d’ona.

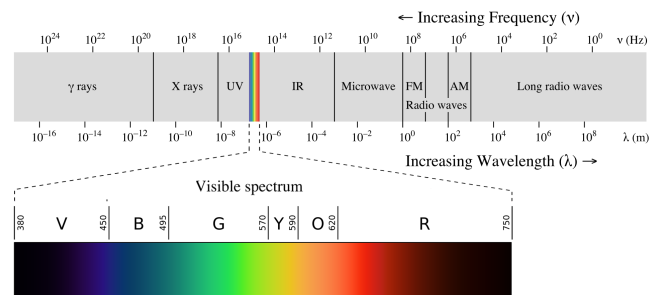


Figura 6. Representació gràfica de la radiació electromagnètica. En colors veiem representat el rang de llum visible.

3. LA LLUM I LES SEVES CARACTERÍSTIQUES

Fins ara hem pogut veure com ha anat evolucionant l'estudi de la llum i les diferents teories que s'han anat postulant amb el pas dels anys. El comportament de la llum i la seva naturalesa s'ha intentat explicar repetides vegades al llarg de la història i, fins a l'època d'Einstein, havien sorgit dues teories principals que explicaven aquest fenomen: la teoria corpuscular i l'ondulatòria.

3.1. TEORIA CORPUSCULAR

Segons la teoria corpuscular de Newton, la llum està formada per partícules diminutes sense massa, les quals va anomenar corpuscles (més endavant van rebre el nom de fotons). Aquestes partícules viatgen en línia recta a grans velocitats i a totes direccions.

Amb aquesta teoria, Newton va justificar els fenòmens de la reflexió i la refracció, tot i que l'explicació de la segona va resultar ser errònia.

Per altra banda, aquesta teoria no podia explicar fenòmens com la difracció, la polarització o la interferència, els quals sí que quedaven justificats amb la teoria ondulatòria. És per això que durant molt de temps la majoria de científics es van inclinar per aquesta altra, i la teoria corpuscular de Newton va quedar refutada.

3.2. TEORIA ONDULATÒRIA

Aquesta teoria defensa que la llum és una ona que es propaga pel medi. Tal com s'ha dit abans, el primer científic a postular aquesta teoria va ser Huygens, però no va ser fins al 1801 que Thomas Young va demostrar-la amb el seu experiment d'interferències.

Uns anys més tard, basant-se en els experiments realitzats per Michael Faraday (1791 - 1867), James Clerk Maxwell (1831 - 1879) va postular que l'electricitat, el magnetisme i l'òptica eren manifestacions d'un mateix fenomen: la radiació electromagnètica, que engloba des de les ones ràdio fins als raigs gamma. A més, Maxwell va postular que la velocitat de la llum és constant.

En aquest punt és important introduir un concepte nou que serà molt rellevant pel fil argumental d'aquest treball: la freqüència de l'ona. La podem definir com la magnitud que mesura la quantitat de crestes o valls que passen per un punt determinat cada segon.

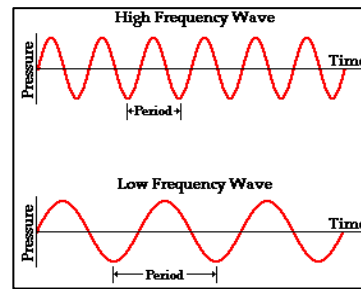
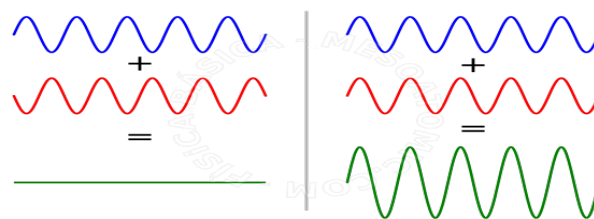


Figura 7. Representació de la freqüència d'ona.

Amb la teoria ondulatoria es podien explicar fenòmens com la interferència, la difracció i la refracció.

La interferència és el fenomen que es produeix quan dues ones amb la mateixa amplitud i longitud d'ona se superposen formant-ne una de nova.

Hi ha dos tipus principals d'interferència: la constructiva i la destructiva. La primera es dona quan les crestes de les dues ones coincideixen. Aleshores, les seves amplituds se sumen donant lloc a una ona amb el doble d'amplitud però la mateixa longitud d'ona. La segona té lloc quan se superposen la cresta d'una ona i la vall de l'altra. Com a resultat l'ona s'anul·la, i no veiem cap perturbació en aquest punt.



Interferència destructiva

Interferència constructiva

Figura 8. Esquema dels dos tipus principals d'interferència.

Quan es produeix aquest fenomen podem veure que les ones creen un patró fàcilment identificable. Va ser gràcies a això que Young va poder arribar a la conclusió que la llum era una ona, ja que si s'hagués comportat com un feix de partícules la imatge que hauria projectat hauria sigut com la de l'esquerra de la

figura, mentre que el comportament d'ona dona com a resultat la imatge de la dreta.

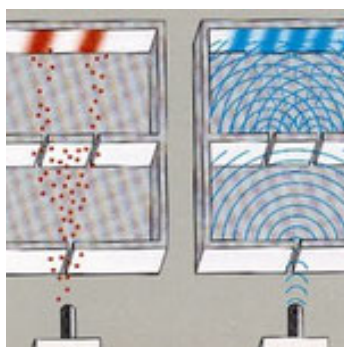


Figura 9. Diferència entre la propagació d'un feix de fotons i la propagació d'una

Per altra banda, el fet que la llum sigui una ona també explica el fenomen de la difracció, que té lloc quan una ona que viatja en línia recta topa amb la vora d'un obstacle o passa per una ranura molt petita. Quan això succeeix, aquesta ona passa de propagar-se en línia recta a obrir-se un cop superat l'obstacle.

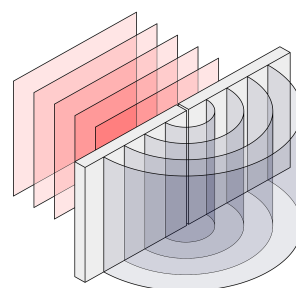


Figura 10. Esquema de la difracció.

A part de la difracció i les interferències, la teoria ondulatoria també explica la refracció i la polarització, però no les explicarem amb detall, ja que no són rellevants per aquest treball.

3.3. DUALITAT ONA-CORPUSCLE

Durant el segle XIX, la teoria ondulatoria va ser l'única que va prevaldre per explicar el comportament de la llum, i no va ser fins a principis del segle XX que aquesta concepció va canviar radicalment.

En aquesta època s'estava desenvolupant la física quàntica, que sorgia de l'estudi de diferents fenòmens com l'estructura de l'àtom, la radiació del cos negre i la interacció de l'energia amb la matèria per part de científics com Bohr, Plank i Einstein.

A partir d'aquesta teoria es va explicar com l'energia que rep o emet un àtom només pot tenir uns valors concrets anomenats quàntums. Quan és alliberada, aquesta energia es propaga per l'espai en forma de partícules sense massa anomenades fotons (els corpuscles que originalment havia definit Newton).

Tot i afirmar que aquesta estava formada per fotons, la física quàntica no negava que la llum fos un fenomen ondulatori.

Per tant, es va arribar a la conclusió que la llum o radiació electromagnètica era un conjunt de fotons (paquets d'energia sense massa) transportats per un camp magnètic i un camp elèctric que oscil·len perpendicularment:

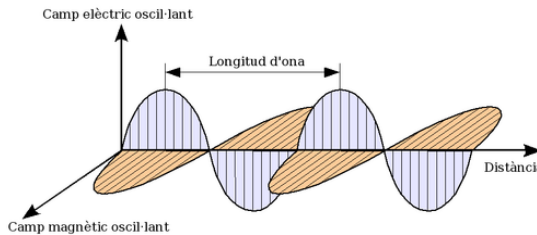


Figura 11. Representació d'una ona electromagnètica propagant-se per l'espai.

Si observem la representació de l'espectre electromagnètic, podem veure que l'energia dels fotons i la freqüència són directament proporcionals (com més energia més freqüència) mentre que la longitud d'ona i la freqüència són inversament proporcionals (com més longitud d'ona més freqüència i a la inversa). És per això que depenent del rang de l'espectre que s'observi veurem que predomina o el comportament d'ona (si la longitud d'ona és molt gran i la freqüència i l'energia són baixes) o el comportament de partícula (si la freqüència i l'energia són altes i la longitud d'ona és petita).

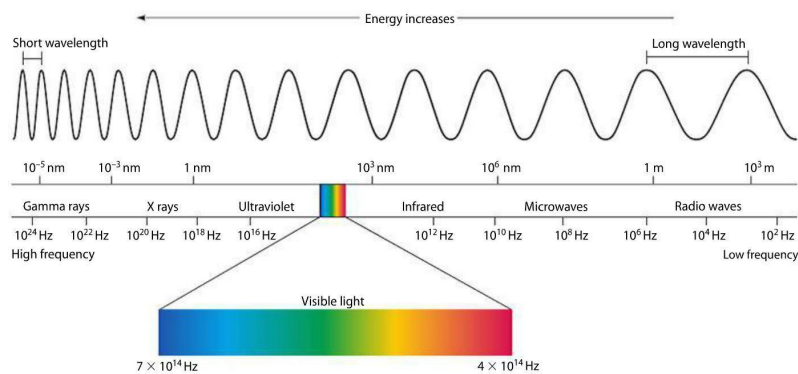


Figura 12. Representació de l'espectre electromagnètic.

4. L'ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC I LES LÍNIES ESPECTRALS

Com ja s'ha dit abans, l'espectre electromagnètic és el rang que engloba totes les ones electromagnètiques, des dels raigs gamma fins a les ones radio.

L'espectre electromagnètic és un dels conceptes més importants d'aquest treball, ja que el seu estudi ens permet obtenir dades de tota classe, des de la composició dels materials que tenim a la terra fins al moviment dels planetes més llunyans.

Les línies espectrals són el fenomen que ens permet conèixer la composició dels cossos que emeten o reflecteixen llum. Tenen lloc quan es produeix un canvi d'estat en els electrons d'un element.

Cada element disposa de la seva pròpia configuració electrònica i, per tant, cada element té un nombre concret d'electrons als seus orbitals. Els electrons de cada àtom tenen diferents nivells d'energia: l'estat fonamental és el nivell on es troben els electrons que no tenen energia extra, i l'estat excitat és el nivell on es desplacen els electrons que han rebut energia provinent de l'exterior, ja sigui en forma de llum, calor o electricitat.

Si un electró rep energia, passa de l'estat fonamental a l'estat excitat instantàniament. Quan aquest electró retorna al seu estat fonamental perd tota l'energia extra que havia rebut, la qual allibera en forma de llum d'un color concret. Cada element és capaç d'absorbir una quantitat concreta d'energia, i és per això que cada element emet una freqüència diferent.

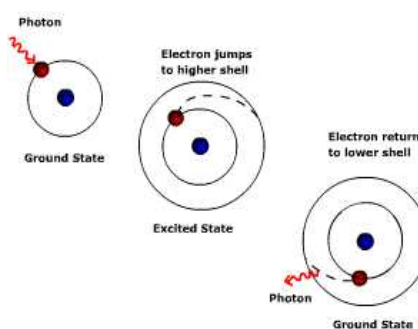
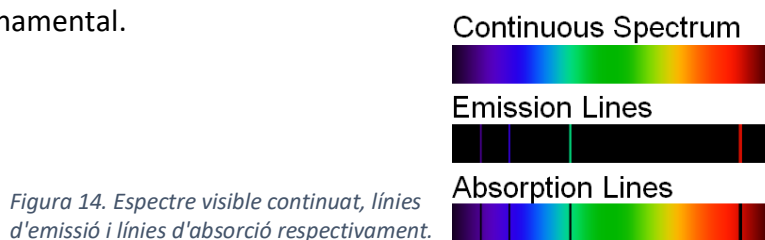


Figura 13. Canvis d'estat de l'electró.

Quan observem aquest fenomen en una llum determinada podem veure una de dues: o les línies d'absorció o les línies d'emissió. En el primer cas podem observar unes ratlles negres en l'espectre visible. Això ens indica que els electrons dels elements que formen la llum es troben en estat excitat, i, per tant, han absorbit l'energia corresponent a les línies fosques. En canvi, en el segon cas és al revés. Les úniques franges que es veuen

són les que corresponen a l'energia que han alliberat els electrons en retornar al seu estat fonamental.



Gràcies a aquest procés podem saber quina és la composició de qualsevol cos que emeti o reflecteixi llum.

4.1. CECILIA PAYNE

El mètode de l'espectrometria va ser primer utilitzat per l'astrofísica britànica Cecilia Payne (1900-1979) per tal saber la composició dels astres. Cecilia va realitzar els seus estudis a la universitat de Harvard, i el 1925 va publicar la seva tesi doctoral on postulava que la gran variació de línees d'absorció en els espectres estel·lars era deguda als diferents estats de ionització dels àtoms. Emprant aquest mètode va veure que l'heli i l'hidrogen eren molt més abundants al Sol i altres estrelles que a la Terra, i va arribar a la conclusió que l'hidrogen era l'element principal de les estrelles i el més abundant de l'univers.

Aquesta conclusió contradeia els coneixements de l'època, que deien que la Terra i el Sol tenien aproximadament la mateixa composició. És per això que Henry Norris Russell, el seu director, li va denegar la tesi.

Malgrat tot, al cap de quatre anys Russell va arribar a la mateixa conclusió que Cecilia però utilitzant altres mètodes, i li va haver de reconèixer el mèrit. Així i tot, de vegades encara s'atribueix el reconeixement d'aquest descobriment a Russell en lloc de Cecilia.



Cecilia Payne va ser la primera dona a dirigir un departament a Harvard i va ocupar una càtedra al departament d'astronomia.

Figura 15. Cecilia Payne

5. APLICACIONS DE L'ANÀLISI DE LA LLUM EN L'ASTROFÍSICA

A causa de les grans distàncies que separen els astres de l'Univers, l'astrofísica és una ciència que es basa principalment en observacions indirectes.

Gràcies a aquestes observacions els científics són capaços de calcular magnituds com la distància a la qual es troben els cossos que observem des de la terra, la seva massa, els anys que tenen, com evolucionen amb el pas del temps, en quina direcció es desplacen o de quins elements químics estan compostos.

L'anàlisi de la llum juga un gran paper a l'hora d'obtenir aquest tipus de dades, ja que és l'element més fàcil d'observar des de la Terra i ens proporciona una gran quantitat d'informació.

Existeix una gran varietat de tècniques relacionades amb l'anàlisi de la llum que permeten als astrònoms estudiar les característiques i el comportament dels astres, però en aquest treball només se n'explicaran dues: el mètode de les velocitats radials i la tècnica dels trànsits.

Per tal de parlar sobre aquestes tècniques, però, abans cal aclarir què són els tipus espectrals i per a què serveixen:

5.1. LA CLASSIFICACIÓ ESTEL·LAR

A principis del segle XX, l'astrònoma Annie Cannon va classificar més de 225.000 estrelles en funció del seu espectre, i les va distribuir en set tipus espectrals principals: O, B, A, F, G, K i M.

Més endavant, a mitjans dels anys 20, es va descobrir que el rang d'emissió de l'espectre d'una estrella, és a dir, la longitud d'ona on emet la majoria de la seva llum, determinava la seva temperatura superficial i, per tant, cada tipus spectral venia determinat per aquesta. Les estrelles de tipus O són les més calentes, i les de tipus M les més fredes.

Però amb el pas del temps es va veure que algunes estrelles del mateix tipus spectral presentaven diferents propietats que no depenien de la seva

temperatura, sinó de la lluminositat que emetien. Aleshores, es van subclassificar les estrelles segons la seva lluminositat i es va comprovar que aquesta estava estretament relacionada amb la seva temperatura.

Aquesta relació es veu representada en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Gràcies a aquest diagrama es coneixen els diferents models d'estrelles que existeixen i se'n saben algunes dades aproximades com el seu radi, edat o àrea. D'aquesta manera, si es necessiten saber altres paràmetres de l'estrella, es parteix d'uns coneixements bàsics.

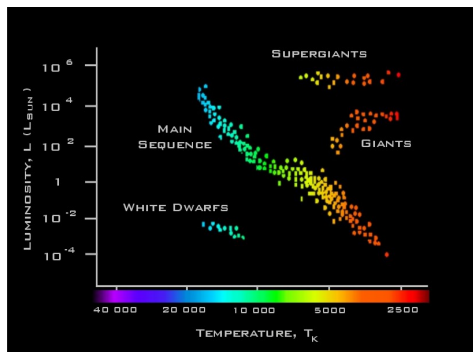


Figura 16. Diagrama de Hertzsprung-Russell

5.2. VELOCITATS RADIALS

Una de les tècniques més usades pels astrofísics a l'hora d'investigar i descobrir nous exoplanetes orbitant una estrella és el mètode de les velocitats radials o espectroscòpia de Doppler.

La velocitat radial és la velocitat projectada sobre l'eix que uneix un objecte i el seu observador.

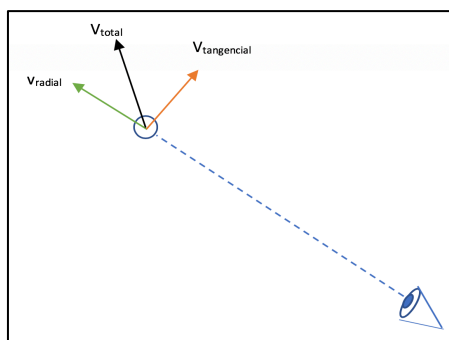


Figura 17. Esquema de la velocitat radial.

Quan un planeta orbita al voltant d'una estrella, no només la gravetat de l'estrella atrau el planeta, sinó que la gravetat d'aquest també actua sobre l'estrella, fent així que aquesta es desplaci dibuixant una òrbita al voltant de l'anomenat

baricentre (el centre de masses del sistema estrella-planeta, entorn del qual cadascun d'ells orbita).

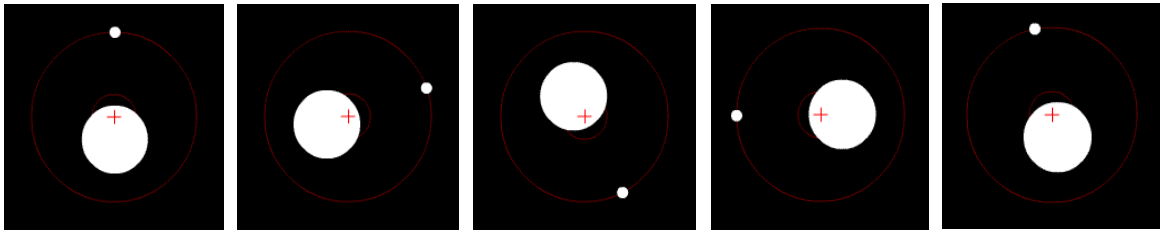


Figura 18. Representació d'una estrella i un planeta orbitant al voltant del seu baricentre, la creu vermella.

A causa de l'efecte Doppler, aquest moviment es veu reflectit en l'espectre de l'estrella i, d'aquesta manera, es poden detectar planetes inicialment invisibles.

L'EFECTE DOPPLER

L'efecte Doppler és el fenomen que té lloc quan un objecte que emet ones es troba en moviment.

Si aquest objecte està en repòs, totes les ones que emeti tindran la mateixa longitud d'ona. Ara bé, si es troba en moviment, la longitud d'ona augmentarà (en el cas que l'objecte s'allunyi del receptor) o disminuirà (en el cas que s'apropi).

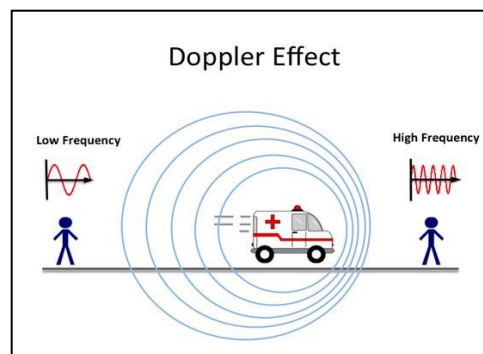


Figura 79. Esquema de l'efecte Doppler: si l'objecte s'allunya la longitud d'ona augmenta i, per tant la freqüència disminueix. Si l'objecte s'apropa passa al revés.

Com que la llum té comportament d'ona, aquest efecte es pot veure observant les línies espectrals d'una estrella: si aquesta s'acosta a l'observador, les línies es desplacen cap al blau i, si s'allunya, les línies es desplacen cap al vermell.

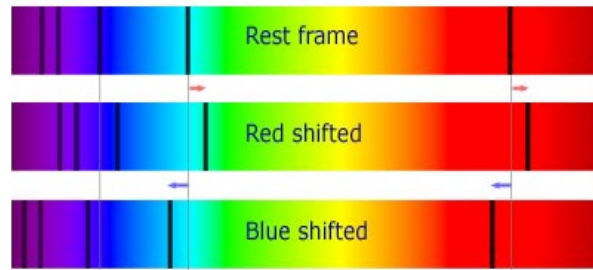


Figura 20. Desplaçament de les línies d'absorció degut a l'efecte Doppler.

Aquests moviments són enregistrats pels astrofísics i, si s'observa que es repeteixen cíclicament, es dedueix l'existència d'un cos orbitant al voltant de l'estrella. Aquest astre podria ser un planeta o una altra estrella.

5.2.1 CÀLCUL DE VELOCITATS RADIALS

A partir d'aquestes dades es poden calcular les velocitats radials dels dos astres.

S'enregistra l'espectre de llum d'una estrella en diferents instants al llarg de diversos dies. Cadascun d'aquests espectres és representat en un diagrama de flux¹:

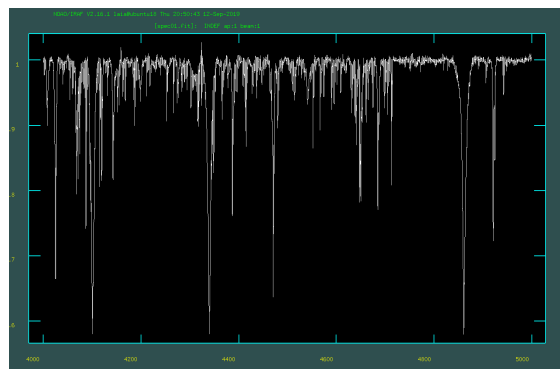


Figura 81. Diagrama de flux de l'espectre d'una estrella.

Cada vall d'aquest diagrama representa una línia d'absorció. Observant-lo i coneixent les línies d'absorció de diferents elements químics en repòs es pot saber la variació relativa de la longitud d'ona que han patit les línies d'absorció

¹ Quantitat d'energia rebuda en funció de la longitud d'ona.

degut al moviment de l'estrella. Amb aquesta variació podem obtenir la velocitat radial aplicant la següent fórmula:

$$v = \frac{\lambda - \lambda_{\text{repòs}}}{\lambda_{\text{repòs}}} c = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{repòs}}} c$$

on v és la velocitat radial, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{repòs}}}$ és la variació relativa de la longitud d'ona i c és la velocitat de la llum.

Analitzant la variació de la velocitat radial amb el pas del temps es poden deduir magnituds com un valor mínim del semieix major de l'el·lipse que dibuixa l'òrbita, un valor mínim de la massa de cada cos, la velocitat radial del sistema i el període de l'òrbita, entre altres.

Aquest és el mètode més utilitzat i efectiu per detectar exoplanetes, però, així i tot, presenta alguns desavantatges:

1. A partir de les velocitats radials només es pot calcular la massa mínima dels cossos, ja que els càlculs que ens permeten deduir-la inclouen la inclinació de l'òrbita, la qual no es pot determinar utilitzant només aquesta tècnica.
2. Com que aquest mètode es basa en les velocitats radials, el moviment de l'estrella només es pot detectar quan s'apropa o s'allunya de l'observador. Si l'òrbita del cos és perpendicular a l'observador, no es veu cap desplaçament en les línies d'absorció de l'espectre, i, per tant, se'n desconeix la seva existència.
3. La majoria de planetes que es detecten emprant aquesta tècnica són de la mida de Júpiter o més grans, motiu pel qual és gairebé impossible que continguin vida.

Això és degut a que, com més petita és la diferència entre les masses dels dos cossos, més es desplaça l'estrella i, per tant, el moviment de les seves línies espectrals és molt més pronunciat.

Per tal de trobar planetes rocosos de mides molt més reduïdes és necessari utilitzar altres tipus de procediments que es basen en les velocitats radials però són més precisos.

5.3. CORBES DE LLUM

Una de les tècniques que s'utilitzen per descobrir nous exoplanetes i determinar-ne les característiques és l'estudi de la corba de llum d'una estrella.

Un trànsit és el fenomen que té lloc quan un planeta que orbita al voltant d'una estrella passa entre aquesta i un observador i bloqueja la seva llum parcial o completament.

Quan un trànsit té lloc, podem detectar una petita disminució de la brillantor de l'estrella. Si enregistrem la variació d'aquesta brillantor, obtindrem una corba de llum, una gràfica que ens indica com varia la brillantor de l'estrella en funció del temps.

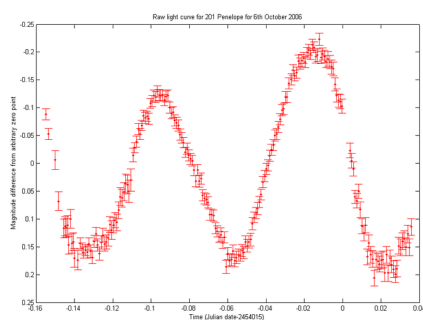


Figura 102. Corba de llum.



Figura 103. Trànsit de Venus per davant del Sol fotografiat l'any 2004.

Gràcies a aquesta gràfica podem saber, de manera indirecta, una sèrie de magnituds físiques relacionades amb aquests astres.

- **La profunditat del trànsit:** Ens indica la disminució de la brillantor de l'estrella en %. Aquesta magnitud és equivalent a la relació entre l'àrea del planeta i l'àrea de l'estrella. D'aquesta manera, si ja coneixem la mida de l'estrella (que depèn del tipus i la classe espectral al qual pertanyi), podem saber la mida de l'exoplaneta que l'orbita. La distància entre un exoplaneta i la seva estrella no afecta la profunditat del trànsit, ja que en trobar-se tant lluny de la Terra, el punt des d'on realitzem les observacions, aquest valor és negligible.

- **Duració del trànsit:** És el temps que triga el planeta a recórrer la superfície del disc estel·lar. La duració del trànsit està fortament lligada a l'anomenat paràmetre d'impacte, que és la distància projectada entre el centre del disc estel·lar i el centre del disc del planeta. D'aquesta manera, sabent la duració del trànsit i utilitzant relacions trigonomètriques, podem saber el radi de l'exoplaneta i la inclinació de la seva òrbita.
- **Període de l'exoplaneta:** observant un trànsit podem deduir el temps que triga el planeta a fer una volta completa a l'estrella.
- **Duració d'entrada/sortida:** és el temps que tarda el planeta a entrar completament al disc estel·lar i el temps que tarda a sortir completament del disc estel·lar.

Gràcies a aquests paràmetres podem determinar característiques com el semieix major de l'òrbita que segueix el planeta, la massa i el radi del planeta, l'excentricitat de l'òrbita i la inclinació.

Tot i que aquest mètode pot resultar molt efectiu a l'hora de determinar les característiques d'un exoplaneta i la seva estrella, també presenta dos grans desavantatges.

1. Els trànsits planetaris només es poden observar en el cas que l'òrbita del planeta estigui perfectament alineada amb l'observador, ja que, en cas contrari, no projectarà cap ombra i, per tant, no es podrà detectar cap disminució en la brillantor que emet l'estrella.
2. Una gran quantitat de les deteccions que es fan són falses, ja que si un cos que no sigui un planeta passa per davant de l'estrella observada, també s'hi detecta una disminució en la brillantor.

6. PART PRÀCTICA

6.1. CÀLCUL DE LES VELOCITATS RADIALS DE DUES ESTRELLES

OBJECTIUS

- Aconseguir calcular la velocitat radial de dues estrelles que orbiten l'una al voltant de l'altra fent servir el mètode de l'efecte Doppler.
- Trobar un seguit de dades sobre les estrelles i les seves òrbites (la cota mínima de la seva massa i radi, l'excentricitat de la seva òrbita, etc.).

Com que es busquen dos objectius diferents, també es duran a terme dos procediments diferents.

INTRODUCCIÓ

Com ja s'ha explicat en la part teòrica d'aquest treball, el càlcul de velocitats radials es basa en el desplaçament de les línies d'absorció d'una estrella degut a l'efecte Doppler.

Per tal de calcular aquest desplaçament, es fa ús del diagrama de flux de cada espectre, que enregistra la quantitat d'energia que emet l'espectre en funció de la longitud d'ona.

Cada vall d'aquest diagrama representa una línia d'absorció, a la qual li correspon una longitud d'ona concreta. Si es coneix la longitud d'ona que hauria de tenir la línia d'absorció en el cas que l'estrella no es trobés en moviment, es pot calcular la velocitat radial d'aquesta fent ús de la fórmula esmentada anteriorment:

$$v = \frac{\lambda - \lambda_{repòs}}{\lambda_{repòs}} c$$

Per tal de dur a terme la primera part de la pràctica (calcular les velocitats radials) dispo dels diagrames de flux de 20 espectres de les dues estrelles combinades enregistrats en moments diferents. Aquestes dades, juntament amb el programa

IRAF^[2] que utilitzaré per visualitzar els espectres i determinar la longitud d'ona de cada línia d'absorció, han estat proporcionades pel Dr. Ignasi Ribas, director de l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

Pel que fa a la segona part de la pràctica (trobar un seguit de dades sobre el sistema binari que analitzaré), és necessari especificar que els resultats no seran calculats per mi, sinó que dispo de uns algorismes (també proporcionats pel Dr. Ribas) que duen a terme les operacions automàticament.

MATERIAL

Per realitzar aquesta pràctica he seguit un guió prèviament escrit pel Dr. Ribas, que es pot trobar als annexos d'aquest treball.

El material que he necessitat és el següent:

- Programa IRAF
- Algorismes escrit en llenguatge FORTRAN
- Màquina virtual Ubuntu per executar el programa IRAF i el algorismes esmentats
- 20 espectres representats en diagrames de flux
- Aplicació Excel per enregistrar les dades i representar-les

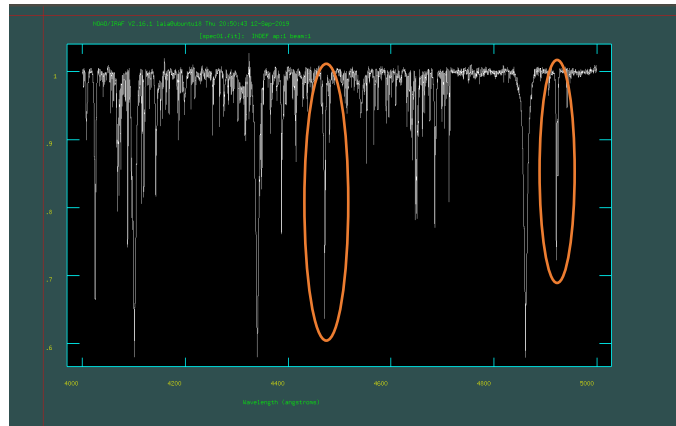
PROCEDIMENT 1: CÀLCUL DE VELOCITATS RADIALS

La primera part d'aquesta pràctica consisteix a trobar les velocitats radials de les dues estrelles que formen el sistema binari observat. El paquet amb les dades, els algorismes i l'IRAF que se'm va proporcionar estava preparat per funcionar amb el sistema operatiu Linux, en concret Ubuntu, de manera que era molt més fàcil d'instal·lar en un ordinador que tingués aquest sistema operatiu. És per això que vaig haver de fer ús d'una màquina virtual que funcionés amb Ubuntu.

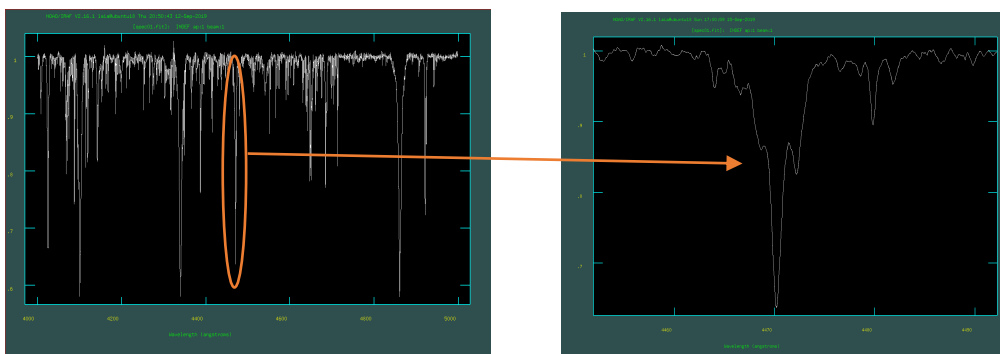
² Image Reduction and Analysis Facility. Programa utilitzat en astronomia per mesurar les longituds d'ona de les línies d'absorció de l'espectre d'una estrella.

Un cop obtingut el material, vaig procedir a obrir l'IRAF per poder visualitzar els espectres i mesurar les longituds d'ona de les línies d'absorció.

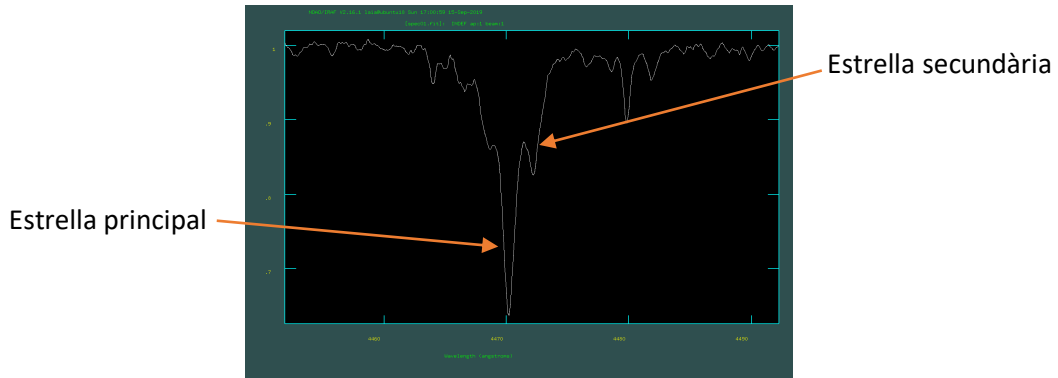
Per tal de calcular la velocitat radial, se'm van suggerir dues longituds d'ona de referència: dues de les línies d'absorció de l'Heli, a 4471,477 Å i 4921,929 Å.



A causa que les estrelles estan en moviment, les seves línies d'absorció no es troben exactament a la longitud d'ona que els pertoca, sinó que estan desplaçades. La meua tasca, doncs, va ser trobar aquestes línies i mesurar-ne la longitud d'ona. Per localitzar-les vaig ampliar a la zona on més o menys havien d'estar situades, i de seguida vaig ser capaç de trobar-les, ja que es tractava de la vall més profunda:

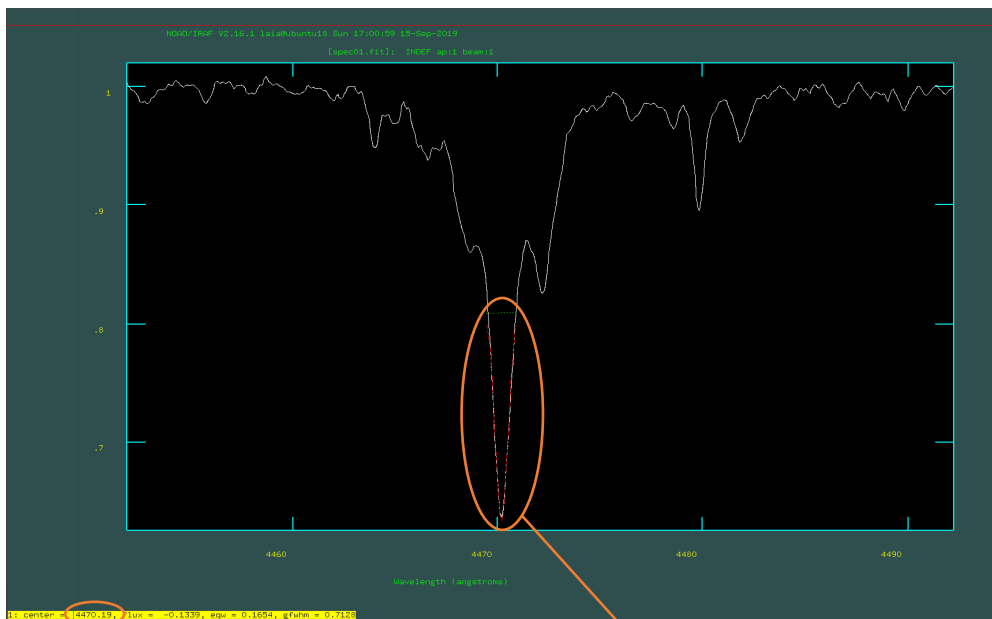


Com que estava observant l'espectre de dues estrelles orbitant l'una entorn de l'altra, vaig trobar dues línies d'absorció situades més o menys a la mateixa zona. La línia més profunda correspon a l'estrella principal, mentre que l'altra correspon a l'estrella secundària:



Un cop localitzades les línies d'absorció vaig procedir a mesurar-ne la longitud d'ona. Aquesta mesura la fa el propi programa, i l'únic que vaig haver de fer va ser situar-me amb el ratolí a cada costat de la vall i prémer la tecla "k".

Com es pot veure a la imatge, el programa troba el centre de la línia i indica la seva longitud d'ona.



Longitud d'ona: 4470,19 Å

Ajust gaussià del programa per trobar el centre

Finalment, vaig repetir el procés per cada un dels 20 espectres. En total, vaig obtenir 80 longituds d'ona: 40 per les línies d'absorció situades aproximadament a 4471,477 Å (20 de cada estrella) i 40 per les línies d'absorció situades aproximadament a 4921,929 Å (20 de cada estrella).

RECOLLIDA DE DADES

Les longituds d'ona que vaig mesurar les vaig recollir en una taula resum:

Espectre	Estrella 1		Estrella 2	
	λ_1 (Å)	λ_2 (Å)	λ_1 (Å)	λ_2 (Å)
1	4470,19	4920,43	4472,18	4922,83
2	4470,84	4921,11	4470,84	4923,57
3	4472,76	4923,28	4469,04	4919,15
4	4472,96	4923,51	4468,85	4918,88
5	4471,04	4921,4	4471,04	4923,94
6	4470,12	4920,34	4472,26	4922,83
7	4468,89	4919,02	4473,73	4924,38
8	4468,54	4918,66	4474,21	4924,83
9	4471	4921,36	4471	4923,84
10	4471,17	4921,58	4471,17	4921,58
11	4472,09	4922,56	4469,96	4920,11
12	4472,28	4922,74	4469,72	4919,81
13	4472,73	4923,24	4469,03	4919,19
14	4471,46	4921,86	4471,46	4921,86
15	4468,92	4919,08	4473,68	4924,34
16	4468,47	4918,59	4474,32	4924,95
17	4469,08	4919,22	4473,55	4924,16
18	4470,27	4920,55	4472,04	4922,57
19	4472,81	4923,33	4469	4919,11
20	4472,94	4923,48	4468,88	4918,92

En aquesta taula, λ_1 correspon a les línies d'absorció que es troben aproximadament a 4471,477 Å, mentre que λ_2 correspon a les línies d'absorció que es troben aproximadament a 4921,929 Å. En tractar-se de dues estrelles que orbiten l'una al voltant de l'altra, en alguns casos les seves línies d'absorció es veien sobreposades i no era possible saber la seva longitud d'ona, de manera que el valor apuntat és el mateix per les dues estrelles.

TRACTAMENT DE DADES I ANÀLISI DE RESULTATS

A partir de les dades recollides, utilitzant l'Excel i aplicant la fórmula esmentada anteriorment, vaig calcular la velocitat radial de cada una de les línies d'absorció³.

estrella 1									
	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$V_R \lambda 1$ (m/s)	$V_R \lambda 1$ (km/s)		$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$V_R \lambda 2$ (m/s)	$V_R \lambda 2$ (km/s)
1	-1,29	-0,000287824	-86287,57	-86,29		-1,50	-0,0003046	-91303,41	-91,30
			$\Delta\lambda/\lambda * C$	$Vr/1000$				$\Delta\lambda/\lambda * C$	$Vr/1000$

Per tal de tenir una estimació més exacta de les velocitats radials de les dues estrelles, vaig fer la mitjana de les velocitats radials de les dues línies d'absorció de cada espectre:

Estrella 1		Estrella 2	
Velocitat radial mitja (Km/s)		Velocitat radial mitja (Km/s)	
$Vr \lambda 1 + Vr \lambda 2$	mitjana	$Vr \lambda 1 + Vr \lambda 2$	mitjana
-177590,98	-88795,49	102012,49	51006,25

Finalment, vaig representar aquestes velocitats en un gràfic velocitat-temps:

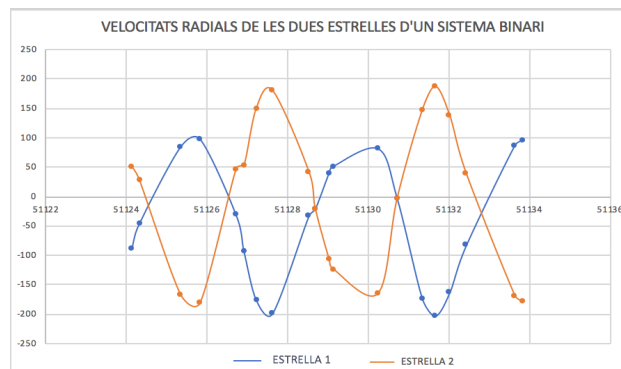


Figura 113. Gràfic velocitat radial-temps. El temps està expressat en dies del calendari julià, és per això que els números són tant elevats.

Observant aquest gràfic podem veure que les dues estrelles tenen unes velocitats radials semblants, cosa que ens indica que són de mides molt similars.

³ En la següent imatge podem veure els càlculs realitzats amb les mesures d'un dels espectres. A l'apartat d'annexos es podran trobar les taules de dades completes.

PROCEDIMENT 2: OBTENCIÓ DE DADES

La segona part d'aquesta pràctica consisteix a trobar un seguit de dades mitjançant uns algorismes que em permeten fer un ajust^[4] de les velocitats radials.

Per tal de que el propi programa em permetés fer l'ajust, hi vaig haver d'introduir tres paràmetres:

- 1. Un document amb dades de l'òrbita.** Aquest fitxer em va ser proporcionat pel Dr. Ribas, i contenia informació aproximada sobre l'excentricitat de l'òrbita, el seu període, les amplituds de les corbes de les velocitats radials, entre altres.
- 2. Una taula de les velocitats radials en funció del temps⁵.** Aquesta taula contenia les dades mesurades per mi. En la primera columna hi vaig posar en calendari julià els dies en què s'havia enregistrat cada espectre. En la segona, vaig posar-hi les velocitats radials mitjanes de la primera estrella, i al costat de cada velocitat un número del 0 a l'1 per indicar el pes de cada mesura (algunes de les mesures no eren gaire fiables ja que se solapaven les línies d'absorció de les dues estrelles). Finalment, en la tercera i quarta columna vaig fer el mateix per la segona estrella.
- 3. Dos fitxers preparats per organitzar els resultats.** En el primer fitxer (result.orb) s'hi enregistrarien les observacions realitzades per mi classificades en funció de la fase, mentre que en el segon fitxer (result.curb) s'hi enregistrarien les dades sobre les estrelles calculades per el programa juntament amb els valors per fer l'ajust de les velocitats radials.

⁴ Un ajust és un procés que ens permet trobar la funció matemàtica que s'ajusti més als punts observats.

⁵ Aquesta taula serà inclosa a l'apartat d'annexos.

Un cop introduïts aquests paràmetres, el programa em va crear l'ajust automàticament, proporcionant-me dues taules com les següents:

fase	RV_1	RV_2
0,2075	-88,8	51,01
0,24917	-46,3	28,62
0,48061	84,15	-166,33
0,59268	97,86	-180,92
0,79473	-30,76	46,6
0,83996	-93,88	53,69
0,90843	-175,32	150,17
0	-198,01	179,97
0,20368	-33,32	42,21
0,24008	-20,92	-20,92
0,31689	39,77	-106,25
0,34008	51,62	-123,43
0,59288	81,93	-165,45
0,70127	-2,67	-2,67
0,84269	-172,48	147,28
0,91514	-202,49	187,31
0,99677	-162,86	137,44
0,09027	-82,46	38,39
0,36301	87,35	-168,89
0,40848	96,28	-178,7

fase	RV_1	RV_2
0,00889	-160,06	146,22
0,02889	-153,79	138,49
0,04889	-145,8	128,65
0,06889	-136,28	116,91
0,08889	-125,4	103,51
0,10889	-113,35	88,66
0,12889	-100,3	72,58
0,14889	-86,43	55,48
0,16889	-71,89	37,56
0,18889	-56,85	19,03
0,20889	-41,46	0,07
0,22889	-25,88	-19,13
0,24889	-10,27	-38,37
0,26889	5,23	-57,47
0,28889	20,46	-76,24
0,30889	35,27	-94,48
0,32889	49,49	-112
0,34889	62,95	-128,59
0,36889	75,48	-144,03
0,38889	86,9	-158,11
0,40889	97,04	-170,61
0,42889	105,7	-181,27
0,44889	112,69	-189,89
0,46889	117,83	-196,22
0,48889	120,93	-200,04

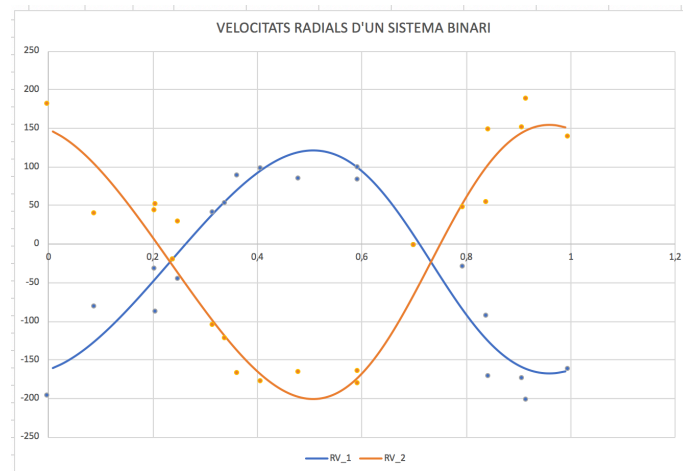
La primera columna d'aquestes taules ens indica la fase en què es troba cada velocitat radial mesurada per mi. Per calcular la fase, el programa busca el temps que tarda en repetir-se el patró que segueixen les velocitats radials. Un cop trobat el període, el representa sobre 1 (normalització) i es relaciona cada velocitat radial amb un valor situat entre el 0 i l'1. D'aquesta manera, es poden "sobreposar" les dades i, per tant, guanyar precisió a l'hora d'interpretar-les en un gràfic.

Pel que fa la segona taula⁶, hi trobem 50 valors aproximats de velocitats radials en funció de la fase. Aquests són els valors que posteriorment em van permetre representar l'ajust en un gràfic.

Agrupant els valors de les dues taules obtenim un gràfic com el següent on, representades en forma de punts, veiem cada velocitat radial que vaig calcular

⁶ Aquesta taula és més extensa, però per raons d'espai d'estètica només he inclòs la meitat de les dades. A l'apartat d'annexos es podran trobar les dades complertes.

jo, mentre que, representats com una línia veiem els ajustos de les velocitats radials de cada estrella.



RECOELLIDA DE DADES I ANÀLISI DE RESULTATS

A partir de les velocitats radials introduïdes i fent ús de la tercera llei de Kepler juntament amb diverses raons trigonomètriques, el programa va poder calcular diferents paràmetres en relació a les dues estrelles del sistema binari observat:

1. **El període de l'òrbita.** Gràcies a les dates introduïdes en calendari julià, el programa calcula el període de l'òrbita:

$$4.39900000 \quad \text{DAYS}$$

2. **L'excentricitat.** Aquest és un valor que descriu la forma que dibuixa l'òrbita, i va del 0 a l'1. Quan l'excentricitat és 0, l'òrbita és circular, i com més s'apropa a 1 més ovalada es torna.

En aquest cas, l'excentricitat de l'òrbita és de 0.0762, fet que ens indica que és bastant circular.

3. **La velocitat radial del sistema.** Finalment, el programa també ens mostra la velocitat radial del sistema:

$$-22.8566 \quad \text{Km/s}$$

El fet que sigui negativa ens indica que el sistema s'apropa a l'observador, és a dir, a la Terra.

4. **Les masses mínimes.** El programa ens proporciona les masses^[7] mínimes de cada estrella:

Estrella 1: 8.361 SOLAR MASSES

Estrella 2: 6.785 SOLAR MASSES

Les masses són un valor mínim perquè depenen de la inclinació de l'òrbita, i aquesta no es pot saber només utilitzant el mètode de les velocitats radials. Les dues masses venen donades de la següent manera:

$$M \cdot \sin(i)^3$$

Com es pot veure, la massa està multiplicada pel sinus d' i , que és la inclinació de l'òrbita. Per tal que la massa calculada fos la massa de l'estrella, i hauria de ser igual a 90° , ja que el sinus de 90° és 1, mentre que si i fos igual a qualsevol altre angle, el sinus seria més petit que 1. En aquest cas, per tal de trobar la massa real de l'estrella hauríem de dividir el valor trobat per el sinus de l'angle, i el resultat seria una massa molt més gran.

Les masses obtingudes concorden amb el tipus espectrals que se'ns donen a la pràctica (tipus O).

5. **La relació de masses.** Sabent les masses mínimes de les dues estrelles podem trobar la relació entre les masses:

$$M(2)/M(1) = 0.812$$

Amb aquesta relació sabem que la massa de l'estrella secundària equival aproximadament al 80% de la massa de l'estrella primària.

⁷ Les masses de cada estrella són representades en masses solars. Aquesta unitat s'utilitza per expressar la massa d'estrelles i altres cossos celestes. Una massa solar equival a 2×10^{30} kg, la massa del Sol.

CONCLUSIÓ DE LA PRÀCTICA

En acabar aquesta pràctica puc dir que he assolit els meus objectius.

Partint tan sols dels espectres d'un sistema binari observats en diferents instants, he pogut calcular les velocitats radials de les dues estrelles i, emprant uns algorismes proporcionats pel Dr. Ribas, he trobat diferents dades sobre aquest sistema. Si hagués disposat de la formació i el temps suficient, m'hauria agradat calcular jo mateixa els paràmetres que he obtingut gràcies a aquest programa. Tot i això, he trobat molt interessant tot el procés de realització de la pràctica, i m'ha agradat molt poder calcular jo mateixa les velocitats radials.

Per tal de disminuir el marge d'error, hauria d'haver mesurat les longituds d'ona de més línies d'absorció. Quan aquest mètode és aplicat en l'àmbit professional es realitzen milers de mesures, no només les de dues línies d'absorció.

6.2. CONSTRUCCIÓ D'UN INTERFERÒMETRE A L'INSTITUT DE LES CIÈNCIES FOTÒNIQUES

Amb l'objectiu d'ampliar els meus coneixements sobre el comportament i les propietats de la llum, el dia 25 de juliol del 2019 vaig assistir a un taller organitzat per l'ICFO que consistia en construir un interferòmetre.

L'ICFO (Institut de les Ciències Fotòniques) és un centre de recerca mundialment reconegut dedicat a la investigació i desenvolupament de la fotònica. Va ser fundat l'any 2002 pel Govern de Catalunya i la Universitat Politècnica de Catalunya amb l'objectiu de reunir investigadors d'arreu del món especialitzats en l'estudi de la llum. L'edifici es troba situat al polígon industrial de Castelldefels, i les instal·lacions estan molt ben preparades per acollir a tothom qui desitgi entrar-hi. Un dels seus objectius principals és la divulgació dels coneixements científics. És per això que, al llarg de l'any, l'institut organitza diverses activitats obertes al públic, ja siguin tallers, visites a les instal·lacions o xerrades.



Figura 24. Entrada principal a l'Institut de les Ciències Fotòniques.

El taller al qual vaig assistir el va portar la Federica Beduini, que forma part de l'equip d'*outreach* de l'ICFO. El seu tracte va ser excel·lent, amb unes explicacions molt entenedores i un taller molt ben estructurat. A més, un cop finalitzada l'activitat em va ajudar a resoldre uns quants dubtes i em va proporcionar informació sobre algunes de les investigacions que es duen a terme a l'institut.

CONSTRUCCIÓ D'UN INTERFERÒMETRE

Un interferòmetre és una eina utilitzada per mesurar distàncies molt petites a través de les longituds d'ona d'un raig làser. Per fer-ho, se separa una mateixa font de llum (el raig làser) i es torna a ajuntar, creant així un patró d'interferències^[8] que és projectat a una pantalla i pot ser estudiat i analitzat.

L'interferòmetre està compost de quatre peces essencials: una font de llum (làser), un divisor de feix i dos miralls plans ben fixats.

El làser projecta un raig que es dirigeix al divisor de feix, que el separa en dos raigs creant un angle de 90° . Aleshores, cada feix de llum es projecta al seu mirall corresponent, que el reflecteix, fent-lo tornar al divisor de feix. Quan els dos raigs es tornen a trobar es crea un patró d'interferències que finalment és projectat a una pantalla.

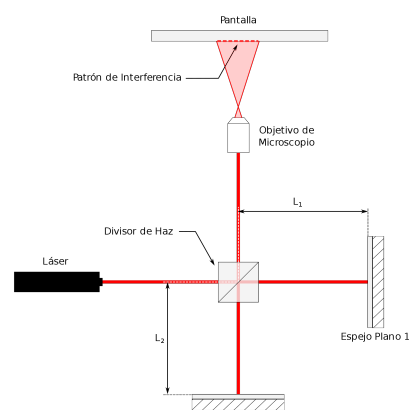


Figura 25. Esquema d'un interferòmetre

En ser un aparell de tanta precisió es necessita molta estabilitat, ja que qualsevol factor extern (corrents d'aire, calor, moviment, etc.) podria afectar el patró d'interferència.

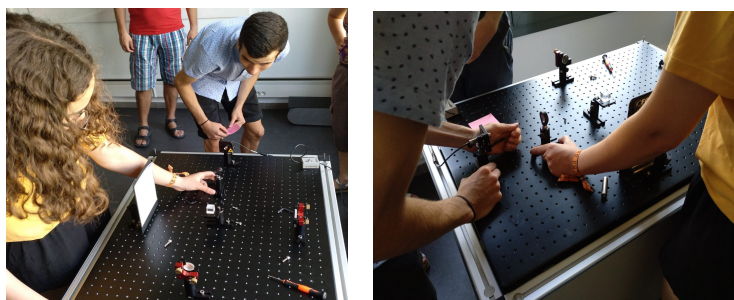
Al taller realitzat a l'ICFO vam construir un interferòmetre a petita escala, ja que els més grans poden arribar a mesurar quilòmetres.

PROCÉS DE CONSTRUCCIÓ

Abans de començar a construir, la Federica ens va fer una petita introducció sobre el comportament de la llum, les interferències i el funcionament d'un interferòmetre. Durant aquesta introducció ens va fer un esquema de l'estructura de l'interferòmetre semblant al de la figura 25 i ens va ensenyar les diferents peces que utilitzaríem: dos miralls plans amb bases mòbils, el desviador de feix, el làser, una pantalla i les bases on fixaríem cada una de les peces anteriors.

⁸ Veure pàgina 11

Un cop vam haver cobert els conceptes bàsics ens vam dirigir cap a la taula on havíem de construir l'interferòmetre, i la Federica ens va advertir que no poséssim els ulls a l'alçada del làser, ja que, encara que aquest no fos gaire potent, ens els podria danyar si ens hi anés directament. Pel mateix motiu, per tal de saber en quina direcció apuntava el làser havíem de fer servir una nota adhesiva.



Figures 26 i 27 . Procés de fixació de les peces a la taula

La construcció de l'interferòmetre va ser un procés relativament fàcil, ja que disposàvem de totes les peces necessàries i l'únic que vam haver de fer va ser alinear-les i fixar-les a la taula. Entre el desviador de feix i el làser vam col·locar una lent que ampliava el raig, ja que inicialment aquest era molt fi.

Quan vam haver fixat totes les peces a la taula vam encendre el làser. Per tal d'aconseguir que aquest es dividís formant un angle de 90° , es reflectís en els miralls i acabés projectant-se a la pantalla vam haver de moure algunes de les peces, canviar la inclinació dels dos miralls i fins i tot buscar una base diferent per el divisor de feix, ja que aquest no arribava a l'alçada del làser.

Finalment, després d'uns deu minuts ajustant els miralls, vam aconseguir l'alineació que estàvem buscant. Aleshores, vam projectar el raig resultant a la pantalla i vam obtenir el patró d'interferències que buscàvem.

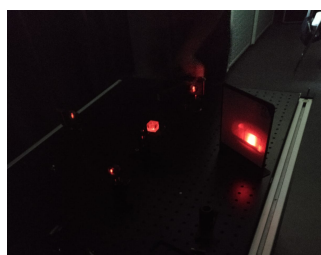


Figura 28. Procés d'alineació dels miralls per obtenir un patró d'interferència.



Figura 29. Patró d'interferència resultant

ERRORS

Un cop obtingut el patró, la Federica ens va explicar que els interferòmetres són aparells extremadament sensibles i, que per tant, els resultats es poden veure afectats per qualsevol factor extern. A gran escala, els interferòmetres es poden utilitzar per detectar ones gravitatòries, ja que aquestes deformen l'espai i, amb aquest aparell es pot detectar les petites variacions en les distàncies que es formen. Moltes vegades, el que passa és que es detecten terratrèmols que es confonen per ones gravitatòries, cosa que endarrereix les investigacions de manera significant. És per això que quan es fan mesures i experiments amb interferòmetres s'ha d'estar molt pendent de qualsevol factor que pugui afectar els resultats.

En el nostre cas, hi havia tres factors externs que modificaven el patró d'interferència:

1. **L'aire condicionat:** els corrents d'aire són capaços de fer variar els patrons d'interferència que es produeixen amb els interferòmetres.
2. **La inestabilitat de la taula:** la taula sobre la qual treballàvem no era completament estable, ja que no estava fixada al terra i, a més, tenia rodes a les potes. A causa d'aquesta inestabilitat, qualsevol cop que féssim a la taula modificava el patró d'interferències.
3. **La calor:** Per demostrar-nos l'efecte que tenia aquesta sobre el raig làser, la Federica va encendre una espelma i la va col·locar a sota d'un dels raigs que es reflectien al mirall. Immediatament vam poder veure com el patró projectat a la pantalla s'anava movent.

CONCLUSIONS

La realització d'aquest taller va estar molt interessant. Vaig poder veure en primera persona com funciona un interferòmetre i experimentar les dificultats que suposa construir-ne un des de zero.

El tracte per part del personal va ser excel·lent, i la Federica em va ajudar a resoldre diferents dubtes i curiositats que tenia. Les instal·lacions de l'ICFO són molt acollidores, i el centre està ben preparat per a rebre a tothom.

6.3. ENTREVISTA A IGNASI RIBAS

Com a ampliació de la part pràctica del meu treball vaig decidir entrevistar al Dr. Ignasi Ribas, el qual també em va ajudar a realitzar les mesures per calcular les velocitats radials del primer apartat pràctic.

L'entrevista es pot trobar a l'apartat dels annexos, juntament amb una petita introducció sobre l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

Gràcies a aquesta entrevista he pogut constatar en què consisteix la feina dels astrofísics, davant de quines adversitats es troben en el seu dia a dia i què suposa realitzar un projecte gran en el camp de l'astronomia.

7. CONCLUSIONS

Amb la realització d'aquest treball he pogut endinsar-me en el món de la llum i entendre per què és un element tan important per a la investigació científica.

Al llarg de la història, la llum ha estat un dels fenòmens de gran interès per als científics, els quals s'han dedicat a investigar-ne les propietats i descobrir-ne els usos. Amb el pas dels anys, s'ha intentat definir diverses vegades el concepte de llum, des de la teoria corpuscular, que diu que la llum és un feix de partícules sense massa, passant per la teoria ondulatoria, que defensa que la llum és una ona, fins a arribar a la teoria de la dualitat ona-corpúscle, postulada per Albert Einstein i Max Plank, que diu que la llum es comporta tant com una partícula com una ona. Aquesta és una definició molt poc intuïtiva, ja que els humans estem acostumats que els elements siguin A o B, i no els dos alhora. El fet que s'arribés a aquesta conclusió és extraordinari, i obre moltes portes al món de la ciència, ja que ens indica que segurament hi ha molts més fenòmens que s'escapen de la lògica humana, però no per això deixen d'existir.

Un dels altres grans descobriments que s'han fet en relació amb la llum és que aquesta no només està formada per l'espectre visible, sinó que existeixen altres tipus de llum invisibles per l'ull humà (els raigs infrarojos, la llum ultraviolada, ...). De la mateixa manera que la dualitat ona-corpúscle, aquest fenomen dona una lliçó a la humanitat, demostrant que el fet que els homes no disposem dels sensors naturals adequats per detectar certs elements no implica que aquests no hi siguin.

L'objectiu principal d'aquest treball era explicar les utilitats que té la llum en diferents ciències, però sobre tot en l'astronomia. Amb el pas dels anys, s'han anat descobrint diferents propietats de la llum que han permès un gran avenç en ciència i tecnologia. Degut a l'extensió d'aquest tema, no l'he pogut incloure al treball, però sí que he pogut veure algunes de les aplicacions que té la llum en la medicina i la tecnologia industrial i de les comunicacions, i m'ha sorprès la quantitat d'usos que se li dona en aquests dos camps. A més, m'he adonat que moltes d'aquestes aplicacions són presents al nostre dia a dia, però ens passen desapercebudes perquè les hem normalitzat.

Un element clau en els estudis de la llum són les línies d'absorció i d'emissió de l'espectre. Gràcies a aquestes podem saber de què estan compostos els cossos que emeten o reflecteixen llum i, a més, en el cas de l'astronomia, analitzant aquestes línies també podem trobar exoplanetes orbitant al voltant d'estrelles de les quals només en detectem la llum.

L'estudi i anàlisi de la llum és un element crucial en l'àmbit de l'astronomia, ja que és de les poques fonts d'informació sobre l'Univers que es poden extreure de manera directa, és a dir, només realitzant observacions. A partir dels patrons que s'obtenen observant la llum d'una estrella o un planeta se'n deriven la resta de dades de forma indirecta i sovint aproximada. Això em porta a preguntar-me què podríem arribar a descobrir si disposéssim d'una tecnologia suficient com per fer mesures directes, i crec que la resposta va molt més lluny del que ens podríem imaginar.

Pel que fa la part pràctica, he utilitzat el mètode de les velocitats radials per trobar diferents dades sobre un sistema binari. Aquest mètode es basa en la teoria de l'efecte Doppler i és molt efectiu a l'hora de detectar planetes o estrelles orbitant al voltant d'una altra estrella. Sabent la velocitat radial de l'estrella es pot calcular la seva massa mínima, el seu període, etc. Tot i això, també presenta alguns inconvenients, ja que el desplaçament de les línies d'absorció de l'espectre, que és el que ens permet calcular les velocitats radials, només té lloc quan hi ha moviment endavant o enrere respecte l'observador. Per tant, si l'òrbita d'una estrella és perpendicular al punt de vista de l'observador, aquest no podrà detectar el seu moviment. De la mateixa manera, si l'òrbita de l'estrella no és completament paral·lela a l'observador, sinó que està inclinada, les dades que es calculin sobre aquesta seran aproximacions mínimes.

A part d'aquest mètode existeixen moltes altres tècniques que ens proporcionen informació sobre els cossos celestes, i una de les que m'ha semblat més interessant és la dels trànsits estel·lars. Aquesta tècnica consisteix a observar la corba de llum d'una estrella que té un altre cos orbitant al seu voltant. Quan aquest cos passa entre l'observador i l'estrella es pot veure una disminució en la brillantor que emet l'estrella, obtenint així quatre paràmetres que posteriorment es fan servir per calcular diferents magnituds referents als dos cossos estudiats:

la profunditat del trànsit, la seva duració, el període del planeta i la seva duració d'entrada/sortida.

Per acabar, m'agradaria mencionar la visita a l'ICFO i l'entrevista amb el Dr. Ignasi Ribas. Amb la realització del taller a l'ICFO vaig poder veure com la llum té un comportament d'ona, i com crea interferències. A més, les instal·lacions del centre són molt acollidores i se'm van resoldre molts dubtes que tenia. Pel que fa l'entrevista amb el Dr. Ribas, em va ser de gran utilitat per entendre el que representa treballar en el món de l'astronomia i què comporta embarcar-se en un projecte d'aquest àmbit. Un dels missatges més importants que em va donar el Dr. Ribas és que la ciència no només s'ha de fer per necessitat, sinó que fer-la per curiositat és igual d'important, i no tot el que s'investiga en la ciència ha de tenir una aplicació a la vida quotidiana.

Penso que la realització d'aquest treball ha estat una gran oportunitat per endinsar-me en un món que m'interessava molt i, encara que hagi tingut moments de dificultat i frustració, tornaria a triar el mateix tema si se'm donés l'oportunitat de repetir-ho.

8. LLISTA DE REFERÈNCIES

BIBLIOGRAFIA

GONZÁLEZ, Pedro. *La naturaleza de la luz: Breve historia bibliográfica*. 1a ed. València: Universitat de València, 2018

WEBGRAFIA

- *Els grecs i la història de la llum*. [en línia]. Accessible a <https://blocs.xtec.cat/elfildelesclassiques/2015/11/09/els-grecs-i-la-historia-de-la-llum/>. [Consulta: 24 de juny, 2019].
- *La naturaleza de la luz*. [en línia]. Accessible a <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz26.htm>. [Consulta: 30 de juny, 2019].
- *William Herschell*. [en línia]. Accessible a https://es.wikipedia.org/wiki/William_Herschel#Obras_musicales [Consulta: 30 de juny, 2019]
- *Thomas Young*. [en línia]. Accessible a https://ca.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young [Consulta: 1 de juliol, 2019]
- *Espectre*. [en línia]. Accessible a <https://ca.wikipedia.org/wiki/Espectre> [Consulta: 3 de juliol, 2019]
- *Espectre electromagnètic*. [en línia]. Accessible a <http://www.digits.cat/colaboracions/espectre-electromagnetic> [Consulta: 3 de juliol, 2019]
- *Radiació electromagnètica*. [en línia]. Accessible a https://ca.wikipedia.org/wiki/Radiació_electromagnètica [Consulta: 4 de juliol, 2019]
- *Cecilia Payne*. [en línia]. Accessible a <https://mujeresparapensar.com/2018/12/10/cecilia-payne/> [Consulta: 10 de juliol, 2019]
- *Cecilia Payne-Gaposchkin*. [en línia]. Accessible a https://ca.wikipedia.org/wiki/Cecilia_Payne-Gaposchkin#Doctorat [Consulta: 10 de juliol, 2019]
- *About transits*. [en línia]. Accessible a <https://www.nasa.gov/kepler/overview/abouttransits> [Consulta: 20 de juliol, 2019]
- *The exoplanet transit method*. [en línia]. Accessible a <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/> [Consulta: 20 de juliol, 2019]
- *Methods of detecting exoplanets*. [en línia]. Accessible a https://en.wikipedia.org/wiki/Methods_of_detecting_exoplanets#Transit_photometry [Consulta: 21 de juliol, 2019]
- *Radial velocity*. [en línia]. Accessible a <http://www.planetary.org/explore/space-topics/exoplanets/radial-velocity.html> [Consulta: 26 de juliol, 2019]
- *Clasificación estelar*. [en línia]. Accessible a https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificación_estelar [Consulta: 30 de juliol, 2019]

IMATGES

- Figura 1. Font: https://warehouse-13-artifact-database.fandom.com/wiki/Isaac_Newton%27s_Prism
- Figura 2. Font: http://www.laifi.com/laifi.php?id_laifi=4590&idC=74306#
- Figura 3. Font: https://www.google.com/search?q=ripple+effect&hl=ca&sxsrf=ACYBGNSb5UsZLv_s3K_IVMJyGUwNCWUqTQ:1571051819698&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwia5luN0JvIAhW3AWMBHVEoAxYQ_AUIESgB&biw=1080&bih=624#imgrc=7_imwZyywLMUOM
- Figura 7. Font: <https://www.pinterest.com/pin/73957618859004795/>
- Figura 9. Font: <https://www.fisic.ch/contenidos/ondas-y-la-luz/interferencia-de-la-luz/>
- Figura 12. Font: https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html
- Figura 13. Font: https://www.earthonlinemedia.com/ebooks/tpe_3e/energy/digging%20deeper_selective_absorption.html
- Figura 14. Font: http://astro.unl.edu/naap/hr/hr_background1.html
- Figura 16. Font: <http://mannenstarslife.weebly.com/prediction-of-death.html>
- Figura 19. Font: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?l=brazilian&id=1223006750>
- Figura 20. Font: https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/spectra_info.html

9. ANNEXOS

IMATGES I TAULES DE DADES DEL CÀLCUL DE VELOCITATS RADIALS

Per tal de realitzar el càlcul de les velocitats radials de l'apartat pràctic d'aquest treball, vaig organitzar les dades en diferents taules i gràfics mencionats anteriorment. Per raons d'espai no les he pogut incloure totes al cos del treball i, per tant, les he adjuntat a l'apartat d'annexos:

TAULA 1: VELOCITATS RADIALS DE L'ESTRELLA PRIMÀRIA

estrella 1											
Espectre	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$V_R \lambda 1$ (m/s)	$V_R \lambda 1$ (km/s)	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$V_R \lambda 2$ (m/s)	$V_R \lambda 2$ (km/s)	Velocitat radial mitja (Km/s)		
			$\Delta\lambda/\lambda * C$	$Vr/1000$			$\Delta\lambda/\lambda * C$	$Vr/1000$	$Vr \lambda 1 + Vr \lambda 2$	mitjana	
1	-1,29	-0,000287824	-86287,57	-86,29	-1,50	-0,0003046	-91303,41	-91,30	-177590,98	-88795,49	
2	-0,64	-0,000142459	-42707,99	-42,71	-0,82	-0,0001664	-49884,92	-49,88	-92592,91	-46296,45	
3	1,28	0,00028693	86019,39	86,02	1,35	0,00027449	82288,80	82,29	168308,19	84154,09	
4	1,48	0,000331658	99428,49	99,43	1,58	0,00032122	96297,99	96,30	195726,48	97863,24	
5	-0,44	-9,77306E-05	-29298,89	-29,30	-0,53	-0,0001075	-32221,15	-32,22	-61520,04	-30760,02	
6	-1,36	-0,000303479	-90980,76	-90,98	-1,59	-0,0003228	-96785,27	-96,79	-187766,03	-93883,01	
7	-2,59	-0,000578556	-173446,74	-173,45	-2,91	-0,000591	-177185,87	-177,19	-350632,60	-175316,30	
8	-2,94	-0,00065683	-196912,66	-196,91	-3,27	-0,0006642	-199113,30	-199,11	-396025,97	-198012,98	
9	-0,48	-0,000106676	-31980,71	-31,98	-0,57	-0,0001156	-34657,53	-34,66	-66638,24	-33319,12	
10	-0,31	-6,86574E-05	-20582,97	-20,58	-0,35	-7,091E-05	-21257,43	-21,26	-41840,40	-20920,20	
11	0,61	0,000137091	41098,90	41,10	0,63	0,0001282	38433,92	38,43	79532,82	39766,41	
12	0,80	0,000179583	53837,54	53,84	0,81	0,00016477	49397,64	49,40	103235,19	51617,59	
13	1,25	0,000280221	84008,02	84,01	1,31	0,00026636	79852,41	79,85	163860,44	81930,22	
14	-0,02	-3,80188E-06	-1139,77	-1,14	-0,07	-1,402E-05	-4202,76	-4,20	-5342,53	-2671,27	
15	-2,56	-0,000571847	-171435,37	-171,44	-2,85	-0,0005788	-173531,29	-173,53	-344966,67	-172483,33	
16	-3,01	-0,000672485	-201605,85	-201,61	-3,34	-0,0006784	-203376,97	-203,38	-404982,82	-202491,41	
17	-2,40	-0,000536064	-160708,09	-160,71	-2,71	-0,0005504	-165003,96	-165,00	-325712,05	-162856,02	
18	-1,21	-0,000269933	-80923,93	-80,92	-1,38	-0,0002802	-83994,26	-83,99	-164918,19	-82459,10	
19	1,33	0,000298112	89371,67	89,37	1,40	0,00028464	85334,27	85,33	174705,94	87352,97	
20	1,46	0,000327185	98087,58	98,09	1,55	0,00031512	94470,70	94,47	192558,29	96279,14	

TAULA 2: VELOCITATS RADIALS DE L'ESTRELLA SECUNDÀRIA

Espectres	estrella 2											
	velocitat radial $\lambda 1$			velocitat radial $\lambda 2$			Velocitat radial mitja (Km/s)		temps		mitjana/1000	
	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda * C$	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda * C$	Vr $\lambda 1 + Vr \lambda 2$	mitjana	temps	mitjana/1000		
1	0,70	0,000157219	47132,99	0,90	0,000183058	54879,50	102012,49	51006,25	51124,1413	51,01		
2	-0,64	-0,000142459	-42707,99	1,64	0,000333406	99952,56	57244,57	28622,29	51124,3246	28,62		
3	-2,44	-0,00054501	-163389,91	-2,78	-0,000564616	-169267,63	-332657,54	-166328,77	51125,3427	-166,33		
4	-2,63	-0,000587502	-176128,56	-3,05	-0,000619473	-185713,20	-361841,76	-180920,88	51125,8357	-180,92		
5	-0,44	-9,77306E-05	-29298,89	2,01	0,00040858	122489,10	93190,21	46595,10	51126,7245	46,60		
6	0,78	0,00017511	52496,63	0,90	0,000183058	54879,50	107376,14	53688,07	51126,9235	53,69		
7	2,25	0,00050386	151053,54	2,45	0,000497975	149289,30	300342,83	150171,42	51127,2247	150,17		
8	2,73	0,000611207	183235,38	2,90	0,000589403	176698,59	359933,97	179966,99	51127,6275	179,97		
9	-0,48	-0,000106676	-31980,71	1,91	0,000388262	116398,14	84417,43	42208,72	51128,5235	42,21		
10	-0,31	-6,86574E-05	-20582,97	-0,35	-7,09072E-05	-21257,43	-41840,40	-20920,20	51128,6836	-20,92		
11	-1,52	-0,000339262	-101708,04	-1,82	-0,000369571	-110794,46	-212502,50	-106251,25	51129,0215	-106,25		
12	-1,76	-0,000392935	-117798,96	-2,12	-0,000430522	-129067,33	-246866,29	-123433,14	51129,1235	-123,43		
13	-2,45	-0,000547246	-164060,36	-2,74	-0,000556489	-166831,24	-330891,61	-165445,80	51130,2356	-165,45		
14	-0,02	-3,80188E-06	-1139,77	-0,07	-1,40189E-05	-4202,76	-5342,53	-2671,27	51130,7124	-2,67		
15	2,20	0,000492678	147701,26	2,41	0,000489849	146852,91	294554,17	147277,09	51131,3345	147,28		
16	2,84	0,000635808	190610,39	3,02	0,000613784	184007,74	374618,12	187309,06	51131,6532	187,31		
17	2,07	0,000463605	138985,34	2,23	0,000453278	135889,20	274874,54	137437,27	51132,0124	137,44		
18	0,56	0,000125909	37746,62	0,64	0,000130233	39043,02	76789,64	38394,82	51132,4236	38,39		
19	-2,48	-0,000553956	-166071,73	-2,82	-0,000572743	-171704,01	-337775,74	-168887,87	51133,6235	-168,89		
20	-2,60	-0,000580792	-174117,19	-3,01	-0,000611346	-183276,82	-357394,01	-178697,01	51133,8234	-178,70		

TAULA 3: VELOCITATS RADIALS EN FUNCIÓ DEL TEMPS I EL SEU PES

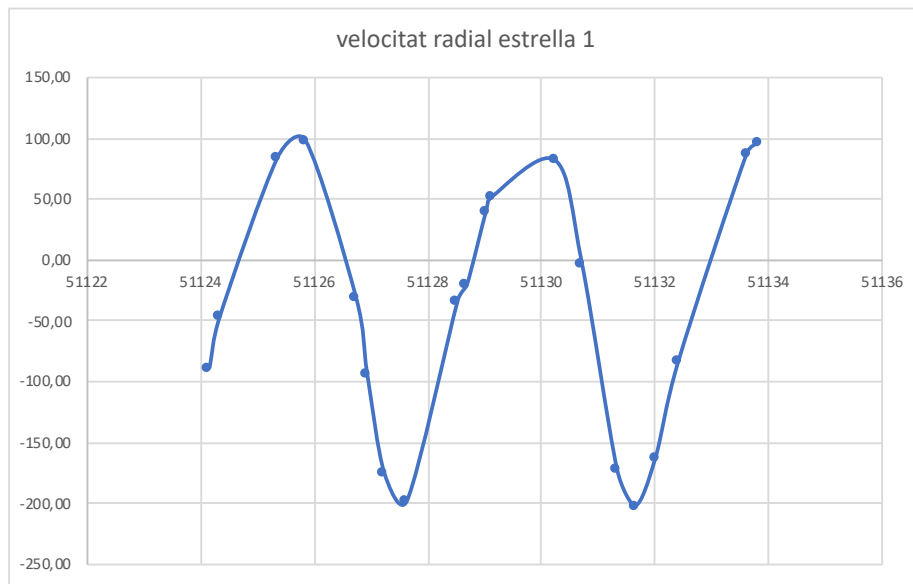
dia (calendari julià)	VR1	pes VR1	VR2	pesVR2
51124,14132	-88,79549	1	51,0062471	1
51124,32456	-46,296454	1	28,6222869	0,5
51125,34269	84,1540929	1	-166,32877	1
51125,83574	97,8632417	1	-180,92088	1
51126,72454	-30,760019	1	46,5951039	0,5
51126,92346	-93,883013	1	53,6880676	1
51127,22474	-175,3163	1	150,171415	1
51127,62752	-198,01298	1	179,966986	1
51128,52346	-33,31912	1	42,2087164	0,5
51128,68356	-20,920202	1	-20,920202	0,5
51129,02153	39,7664105	1	-106,25125	1
51129,12346	51,6175931	1	-123,43314	1
51130,23564	81,9302193	1	-165,4458	1
51130,7124	-2,6712662	1	-2,6712662	1
51131,3345	-172,48333	1	147,277087	1
51131,65324	-202,49141	1	187,309061	1
51132,01235	-162,85602	1	137,43727	1
51132,42356	-82,459097	1	38,3948205	1
51133,62345	87,3529693	1	-168,88787	1
51133,82344	96,2791434	1	-178,69701	1

**TAULA 4: VELOCITATS RADIALS CALCULADES PEL PROGRAMA PER TAL
DE FER L'AJUST**

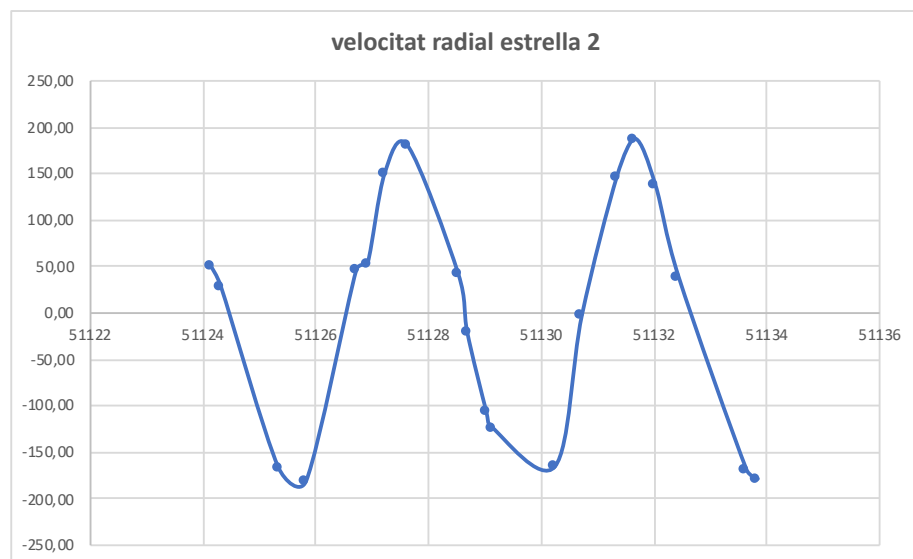
fase	RV_1	RV_2
0,00889	-160,06	146,22
0,02889	-153,79	138,49
0,04889	-145,8	128,65
0,06889	-136,28	116,91
0,08889	-125,4	103,51
0,10889	-113,35	88,66
0,12889	-100,3	72,58
0,14889	-86,43	55,48
0,16889	-71,89	37,56
0,18889	-56,85	19,03
0,20889	-41,46	0,07
0,22889	-25,88	-19,13
0,24889	-10,27	-38,37
0,26889	5,23	-57,47
0,28889	20,46	-76,24
0,30889	35,27	-94,48
0,32889	49,49	-112
0,34889	62,95	-128,59
0,36889	75,48	-144,03
0,38889	86,9	-158,11
0,40889	97,04	-170,61
0,42889	105,7	-181,27
0,44889	112,69	-189,89
0,46889	117,83	-196,22
0,48889	120,93	-200,04

0,50889	121,82	-201,14
0,52889	120,37	-199,35
0,54889	116,45	-194,52
0,56889	110	-186,57
0,58889	101	-175,48
0,60889	89,5	-161,31
0,62889	75,63	-144,22
0,64889	59,59	-124,45
0,66889	41,67	-102,37
0,68889	22,24	-78,43
0,70889	1,75	-53,18
0,72889	-19,33	-27,2
0,74889	-40,48	-1,14
0,76889	-61,18	24,37
0,78889	-80,95	48,73
0,80889	-99,33	71,38
0,82889	-115,94	91,84
0,84889	-130,47	109,75
0,86889	-142,7	124,82
0,88889	-152,48	136,87
0,90889	-159,75	145,83
0,92889	-164,5	151,69
0,94889	-166,79	154,51
0,96889	-166,73	154,43
0,98889	-164,43	151,6

GRÀFIC 1: VELOCITATS RADIALS DE L'ESTRELLA PRIMÀRIA



GRÀFIC 2: VELOCITATS RADIALS DE L'ESTRELLA SECUNDÀRIA



ENTREVISTA A IGNASI RIBAS

Per tal de completar la informació del meu treball, he decidit entrevistar a l'astrofísic Ignasi Ribas, director de l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya. El Dr. Ribas es dedica a la recerca i estudi d'exoplanetes habitables, i en aquesta entrevista parlarem sobre les tècniques, els recursos i la metodologia que s'utilitzen en aquest camp.

Fa dos anys vaig assistir a una de les teves xerrades sobre Alfa Centauri, l'exoplaneta que s'acabava de descobrir en aquell moment. Aquesta xerrada em va motivar a seguir indagant sobre el tema i és el que em va impulsar a enfocar el meu treball de recerca cap aquest camp. Creus que és important invertir en la divulgació dels coneixements sobre l'univers?

Sí. Jo considero que els qui ens dediquem a la recerca tenim el deure de fer divulgació. No és només una cosa que hauríem de fer perquè ens ve de gust o perquè considerem que és divertit, sinó que tota la recerca que fem prové de diners que hi posa la gent, són impostos que s'inverteixen en recerca, i el nostre deure, per tant, és tornar aquest coneixement a la societat d'alguna manera. Aquest retorn, més que ser una acció voluntària, hauria de ser si més no moralment obligatòria.

De fet, aquí a Espanya anem molt endarrerits. En altres països, com els Estats Units, la difusió dels coneixements és obligatòria: Si demanes diners per fer un projecte, en aquesta sol·licitud has de dir com faràs la difusió dels resultats que obtinguis.

Quan veiem a les notícies que s'ha fet un nou descobriment relacionat amb l'astronomia només se'ns mostra el resultat, però mai el procés que s'ha dut a terme per arribar fins a aquest punt. Quant de temps pot passar des que s'inicia un projecte en el camp de l'astrofísica fins que se n'obtenen els resultats?

És molt variable. Hi ha projectes en els quals es té una idea molt clara i es realitzen unes observacions molt concretes que permeten arribar directament a allò que es pensa trobar, que es creu que serà un bon resultat i que, per tant, es podrà publicar, és a dir que poden passar uns períodes relativament curts: menys d'un any, per exemple.

El que passa normalment, però, és que en els grans projectes en astronomia, i en ciències molt en general també, els projectes tenen un cicle de vida molt més llarg que aquest. El cas extrem, per exemple, són les missions a l'espai, en les quals algú té una idea, comença a reunir gent al voltant d'aquesta idea, es fa un projecte que s'envia a una agència espacial que ho pot finançar, i des del moment en que es té aquesta idea fins al moment en què es pot deixar d'operar perquè ja s'han obtingut les dades i els resultats suficients poden passar uns 25 o 30 anys. Aquest seria el cas extrem, però normalment parlem de dècades.

La durada dels projectes varia molt, i depèn de com de grans siguin aquests i quanta inversió econòmica impliquin. Per una missió a l'espai es necessiten centenars de milions d'euros, mentre que un projecte com el que deia al principi segurament no implicarà més que comprar un ordinador.

Quantes persones hi ha involucrades a l'hora de dur a terme un d'aquests projectes?

El nombre de persones també depèn del projecte. A vegades, una sola persona pot dur a terme un projecte sencer. Però quan parlem de missions a l'espai o grans projectes, la gent que hi ha involucrada passa dels centenars: podríem parlar de 400, 500 o 1.000 persones en molts casos. És per això que, quan els resultats d'aquests projectes són publicats, apareix un article amb 500 coautors, ja que són 500 persones les que han col·laborat, amb més o menys mesura, per obtenir aquest resultat.

Hi ha molta gent que sosté que les investigacions en astronomia no són tan útils com els estudis en altres camps, ja que no tenen una aplicació pràctica a la vida real. Què en penses sobre això?

Està molt bé que facis aquesta pregunta. Amb aquest raonament només investigariem en tecnologia aplicable o bé en ciències de la salut perquè ens permeten millorar la qualitat i l'esperança de vida, i no fariem cap mena d'investigació fonamental.

Si la humanitat tingués aquest enfocament encara estaríem a la prehistòria, perquè, de fet, el que els humans hem volgut fer sempre és donar respostes a les preguntes que ens sorgien de la curiositat. Seguint aquesta mentalitat separariem la investigació aplicada de la investigació conduïda per la curiositat. I si decidíssim que la curiositat ja

no val i, per tant, només féssim recerca aplicada, jo crec que duríem a terme la traïció més gran que ens hem fet mai a nosaltres mateixos, els éssers humans. Hem de ser capaços de donar respostes a les coses que ens generen curiositat, sense pensar quina aplicació directe en podem treure.

També és curiós perquè aquest tipus de raonament se li pot posar a la cultura: per què es diu que l'astronomia no serveix per res però en canvi no es diu el mateix de la literatura, la música o el teatre? Al final tampoc produeixen res. Però com a societat ens enriqueix i ens permet créixer i millorar. El mateix passa amb l'astronomia.

Així i tot, de vegades, certes investigacions que fem els astrònoms acaben tenint una aplicació pràctica al cap dels anys.

A més, sí que és veritat que una missió espacial pot costar molts diners, centenars de milions d'euros. Això pot semblar una quantitat molt gran per un país, una empresa o fins i tot una persona, però estem parlant de projectes que fan conjunts de països o grans països, també crec que invertir mil milions d'euros en una missió que té 30 anys de durada en termes absoluts és ridícul, i si ho compares amb altres activitats que fem els humans, com ara la lliga de futbol espanyola, que cada any val uns 2.500 milions d'euros o els jocs olímpics, que es celebren un cop cada quatre anys i valen uns 15.000 milions d'euros, el que fem nosaltres és una misèria.

És difícil aconseguir el suport de les Institucions Públiques per finançar aquestes investigacions?

Ni molt ni poc. No és fàcil, evidentment, i a vegades és més fàcil aconseguir diners per a fer coses aplicades. Depèn molt de en quin context estiguis: hi ha llocs on la investigació en astronomia té un pes important. Si per exemple mirem a les illes Canàries, on hi ha molts observatoris, el govern local inverteix més en astronomia que en altres llocs. Si en canvi ens fixem en Catalunya, on la biomedicina té una potència molt gran, al govern català li és molt més fàcil invertir diners en el que ja saben que són punters i funciona, i no en una altra cosa, és a dir que això depèn moltíssim, i en general estem mal finançats: el que Catalunya, Espanya i fins i tot Europa dedica a recerca és menys, crec, del que haurien. I això no vol dir que hi hagin de dedicar recursos destinats a altres tipus de

projectes, sinó que s'hi ha de dedicar una quantitat de diners que sigui raonable per avançar.

Quins recursos es fan servir per realitzar un projecte d'aquesta magnitud?

La major part de la recerca que fem nosaltres està finançada amb fonts públics, per tant són recursos que provenen dels impostos. Dissortadament, pel mateix motiu que em preguntaves abans de la investigació aplicada, les empreses que posen diners a innovació, normalment no els posen a recerca bàsica, i per tant tenim pocs diners que vinguin de les empreses.

Quan llegim un article sobre un astre que ha estat descobert fa poc se'ns dona informació detallada sobre la distància en la qual es troba, la velocitat a la que es desplaça, la seva composició, etc. Quines són les principals tècniques que s'utilitzen per determinar aquestes característiques?

Aquesta és la diferència que va tenir lloc al segle XIX, quan vam passar de fer astronomia a fer astrofísica, i això significa que es va inventar l'espectroscòpia: no només érem capaços d'observar la llum de les estrelles, sinó que també érem capaços de descompondre la llum en els seus constituents i, per tant, poder saber quina composició química tenien les estrelles.

Mitjançant aquesta tècnica es pot saber la velocitat a la que va l'estrella i la seva composició entre altres paràmetres.

Gran part del meu treball està enfocada en l'espectrometria i la informació que se n'extreu. Em podries dir quins materials s'utilitzen per aconseguir informació sobre un planeta mitjançant aquesta tècnica?

L'espectrometria la fem servir per detectar els planetes amb la tècnica Doppler o de velocitats radials, i el que fem és mesurar com l'estrella es mou degut a que un planeta "invisible" l'orbita. Mesurant això a través de l'efecte Doppler som capaços de trobar el planeta. Les característiques espectrals del planeta encara no som capaços de veure-les, ja que el planeta brilla unes 10.000 milions de vegades menys que l'estrella, i amb les

tècniques d'avui dia no podem arribar a veure'l. En alguns casos concrets, fent servir espectrometria sobre planetes que tenen eclipsis que fan trànsits, és possible veure quina empremta deixa l'atmosfera del planeta sobre la llum que la travessa.

En un futur, a llarg termini, potser serem capaços de saber directament les característiques d'un planeta com la Terra.

Com es determina si un exoplaneta té les característiques necessàries per ser habitable?

Ara mateix, l'habitabilitat d'un planeta la definim d'una manera molt bàsica: ha d'estar situat a una distància de la seva estrella que els nostres càlculs ens indiquen que podria tenir aigua líquida a la superfície, i això vol dir que tingui una temperatura superficial d'entre els 0º i els 100ºC. Això delimita una regió orbital on estigui situat el planeta. Aquest planeta, a més, ha de tenir una superfície sòlida per poder tenir aigua líquida, és a dir que ha de ser un planeta rocós, com la nostra Terra.

Per tant, avui dia, per poder dir que un planeta és potencialment habitable, ha de ser un planeta rocós situat a la zona habitable de la seva estrella.

El fet que busqueu vida en altres planetes i fora del sistema solar fa pensar que heu de col·laborar amb biòlegs experts en els orígens de la vida. Em podries explicar com és aquesta col·laboració i què ha aportat o podria aportar la investigació en biologia al camp de l'astrofísica i viceversa? És tan estreta la col·laboració que una part important de la recerca es fa dins d'una nova disciplina que es diu astrobiologia. Això significa que els astrònoms identifiquem hàbitats més o menys extrems o possibles, i els biòlegs pensen o calculen si en aquell hàbitat hi podria haver una biosfera activa.

Si posem com a exemple Pròxima Centauri, sabem que la radiació que emet l'estrella és molt vermella, per tant ens preguntàriem què passa quan la vida ha de sobreviure en una superfície on la radiació és molt més vermella del que és a la Terra. Pot haver-hi fotosíntesi? La resposta és que sí, però en certes circumstàncies. Podrien haver-hi algues marines que fessin la fotosíntesi? La resposta és sí, però no en gaire profunditat perquè si no la radiació infraroja queda absorbida.

És a dir que hi ha aquest tipus de relació complementària en què els biòlegs ens donen a saber si hi podria haver vida en planetes amb condicions molt diferents a les de la Terra.

Els humans hem estat enviant senyals per intentar comunicar-nos amb una possible vida extraterrestre durant molts anys. És possible que, en algun moment, rebem un senyal de resposta? Quant de temps hauria de passar?

De moment no puc donar una resposta precisa a aquesta pregunta, ja que no sabem si el que ha passat aquí ha passat a altres llocs i si aquests altres llocs hauran conduït a éssers vius que es vulguin comunicar. hem de tenir en compte que això voldria dir comunicar-se amb civilitzacions intel·ligents, i la vida intel·ligent és tot un altre nivell de complexitat, i és dubtós que s'hagi produït enlloc més a l'Univers.

Quan al temps que hauria de passar, la comunicació interestel·lar és molt avorrida: la major part de planetes que estem trobant avui dia estan a desenes d'anys llum, que vol dir que estem parlant de que es comunicarà la humanitat, no els humans. No serem els individus, sinó la civilització la que es comunicarà.

A quins coneixements del camp de l'astrofísica tindriem accés si disposéssim d'una tecnologia molt més avançada?

Avui dia tenim molts camps en els quals sabem que amb més tecnologia podríem tenir molts més coneixements i per tant fer més avenços. Captar imatges directes de planetes seria possible si tinguéssim telescopis més potents i tecnologies més bones. Qualsevol astrònom si tingués la oportunitat de demanar tecnologia faria una carta els reis ja que els avenços que fem estan molt vinculats als avenços tecnològics. La tecnologia està molt associada amb els recursos que s'inverteixen, és a dir si tenim un govern que té ganes de innovar i fer descobriments podem avançar més ràpid però si aquest decideix no confiar en nosaltres i per tant no invertir, el procediment per fer nous descobriments i millorar les tècniques és més lent.

Al llarg dels anys hem pogut ser testimonis dels grans avanços que hi ha hagut al camp de la ciència i el coneixement. Com es presenta el futur dels estudis espacials?

Es presenta un futur apassionant. Ara vivim en un moment clau de la humanitat perquè estem a punt de trobar la resposta de si hi ha altres éssers vius fora del nostre sistema solar. Trobar la resposta a la pregunta que la humanitat fa milers d'anys que es planteja suposaria un gran descobriment que canviaria les nostres vides. Fa temps es deia que es descobriria l'any 2050 i això sonava molt llunyà i impossible però ara només queden 30 anys i per tant que en una escala de temps tan curta siguem capaços de respondre una pregunta d'aquest calibre jo crec que és molt apassionant. Això suposa una de les motivacions més grans que tinc per realitzar aquesta feina.

El nostre sistema educatiu està enfocat a triar els estudis que presentin més sortides laborals. Això fa que hi hagi una gran desmotivació per part de molts estudiants, que inicialment estan interessats en un camp però acaben decidint estudiar-ne un altre perquè "tindran més possibilitats de trobar feina". Què diries als alumnes que se sentin atrets per l'astrofísica o la recerca en general però no s'atreveixin a fer el pas per por a no tenir cap sortida?

La por a no tenir sortides professionals és una por molt natural i tots l'hem tingut. El consell que donaria és que el jovent d'ara té la oportunitat d'estudiar encara que siguin més anys per trobar una bona feina. No sempre triar el camí més fàcil serà el que t'obrirà més portes, per mi el més important és tenir passió pels estudis o la feina que estiguis realitzant. S'ha de tenir en compte que es treballa unes quantes dècades i per tan s'ha de triar una feina que sigui interessant i apassionant. És una llàstima abandonar una passió per la por a no tenir feina perquè si llavors resulta que no tens sortides professionals sempre podràs tornar enrere però hauràs gaudit d'uns anys estudiant el que t'agrada. També és cert que s'inventen feines noves a gran velocitat i que mai sabràs si d'aquí uns anys podràs aplicar els teus estudis a una d'aquestes. També depèn molt de la situació econòmica que es viu a casa però qui tingui la oportunitat d'estudiar una passió l'hauria d'aprofitar.

LES APLICACIONS DE LES PROPIETATS DE LA LLUM EN LA CIÈNCIA I LA TECNOLOGIA

Tot i que aquest treball està enfocat principalment a tractar les aplicacions de l'estudi de la llum en el camp de l'astrofísica, la llum és un fenomen que té una gran quantitat d'utilitats tant en la tecnologia com en la ciència en general.

És per això que per tal d'ampliar els meus coneixements durant aquest treball, he indagat sobre les diverses aplicacions que té la llum en aquests àmbits.

Explicar totes aquestes aplicacions segurament significaria la realització de tot un altre treball de recerca, i és per això que no hi puc entrar en detall. Tot i això, penso que és important parlar de l'ús de la llum en dos àmbits en concret, ja que són els que causen un impacte més directe a la societat: la medicina i la tecnologia industrial, de comunicacions i ambiental.

MEDICINA

Durant les últimes dècades hi ha hagut un gran desenvolupament en les tècniques que fan ús de la llum en la medicina, i això ha donat lloc a una gran millora tant en les cirurgies i tractaments com en el benestar dels pacients, ja que moltes de les teràpies que impliquen llum representen processos molt més senzills i de fàcil recuperació.

Tres de les tècniques fotomètriques més rellevants que s'utilitzen en medicina són:

- **Tractament de càncer amb làser:** Moltes vegades, quan els metges es troben davant d'un cas de càncer poc evolucionat o superficial (de pell, per exemple) opten per tractar-lo amb làser. Mitjançant aquest mètode són capaços de reduir i fins i tot destruir tumors i, per tant, evitar que el càncer es compliqui i requereixi teràpies o cirurgies més agressives.
- **Teràpia fotodinàmica:** La teràpia fotodinàmica és un tractament que s'utilitza en casos de patologies dermatològiques, com serien el càncer de pell, l'acne o la malaltia de Bowen.

Aquest procediment consisteix a aplicar una crema que provoca la formació de molècules fotosensibles en les cèl·lules. Quan aquestes molècules són exposades a la llum formen radicals molt agressius que ataquen les cèl·lules. Les cèl·lules malignes no són capaces de defensar-se d'aquests radicals, mentre que les cèl·lules sanes poden resistir-los. D'aquesta manera s'aconsegueixen matar les cèl·lules malignes.

- **Radiografies:** Una radiografia és una imatge obtinguda mitjançant raigs x que ens permet veure els ossos del nostre cos. Gràcies a les radiografies els metges poden saber si el pacient ha patit alguna fractura o trencament d'una forma fàcil i ràpida.



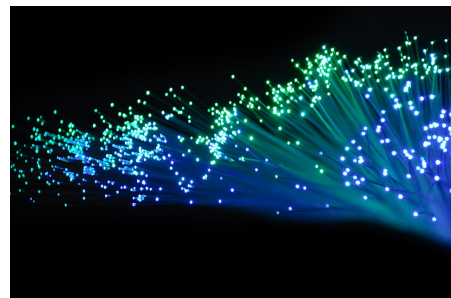
TECNOLOGIA

De la mateixa manera que en la medicina, les tècniques que utilitzen la llum en la tecnologia han evolucionat molt durant els últims anys.

Tres de les aplicacions de la llum més importants en la tecnologia són:

- **Fibra òptica:** La fibra òptica és un filament molt prim i flexible fabricat a partir de plàstic o vidre que permet transmetre la llum. És per això que s'utilitza com a mitjà de comunicació i a poc a poc ha anat substituint la transmissió elèctrica.

La comunicació a través de la fibra òptica funciona de la següent manera: En primer lloc, es crea un senyal de llum amb un transmissor. A continuació s'envia aquest senyal a través de la fibra òptica, que és important que no hagi patit cap trencament, ja que si no es podria perdre informació. Finalment, el senyal arriba al receptor, que la converteix en electricitat i la interpreta.



- **Làser:** El làser té diverses aplicacions en la tecnologia, tant en l'àmbit industrial com en l'àmbit quotidià. Amb la llum làser es pot gravar informació en alguns dispositius d'emmagatzematge, com els CD o els DVD. En la tecnologia industrial, en canvi, s'utilitza per realitzar soldadures làser, i un dels exemples més comuns del seu ús en la vida quotidiana és el de les impressores làser.
- **Plaques solars:** Les plaques solars són uns dispositius que transformen la llum solar en energia tèrmica o elèctrica. Existeixen sistemes de plaques solars capaços de mantenir estructures molt grans, inclús ciutats.

Un exemple de la utilització de les plaques solars és la de l'empresa Disney, que actualment disposa de dues instal·lacions de plaques solars que generen suficient energia per a



mantenir dos dels quatre parcs temàtics (Disney World) que té distribuïts a tot el món.

Tot i que aquest recurs presenta un gran nombre d'avantatges (la radiació solar és una font d'energia renovable que es troba a l'abast de tothom), també presenta un major inconvenient: depèn de la llum que arribi a les plaques, el que significa que hi ha una irregularitat en l'obtenció d'energia, sobretot en els països nòrdics, on sovint plou o fa núvol.