

The background is a dark blue gradient. Scattered around the text are several stylized celestial bodies: a green planet with a ring in the top right, a yellow planet with a ring in the top left, a blue and white Earth-like planet in the middle right, a grey planet in the middle left, a small orange planet in the bottom left, a red planet in the bottom left, a blue planet in the bottom center, and a large yellow planet in the bottom right. All planets are divided vertically into two halves with different textures or colors.

SISTEMA SOLAR BINARI

Abel Portas Puigdemont
2n BatxA
Tutor/a: Dolors Pujol
INS Pla de l'Estany
Banyoles, 5 d'octubre de 2021

Abstract

El treball següent tracta sobre la possibilitat que el nostre sistema solar tingui unes òrbites planetàries estables amb la presència d'un segon estel. El projecte en qüestió conté l'explicació de conceptes físics que giren al voltant del camp gravitatori o la força d'atracció gravitacional i els aplica a l'estudi de les estrelles, les òrbites planetàries i sistemes dobles. Els continguts que es mostren en el marc teòric s'han explicat de manera gradual respecte la seva dificultat. La descripció de les estrelles passa per la seva estructura i característiques, així com els diferents tipus que existeixen. El treball també inclou les possibles interaccions que es manifesten en l'espai, ja sigui entre una estrella i els planetes que l'orbiten o entre dues estrelles. La part pràctica consta de dues parts. La primera investigació consisteix en la utilització d'un simulador per recrear dos hipotètics escenaris: un per un sistema binari de tipus S i un altre per un de tipus P, aquests aplicats al sistema solar. La segona activitat experimental es fonamenta en l'anàlisi de dades sobre el trànsit d'exoplanetes al voltant d'una estrella, i així de la intensitat lumínica d'aquesta. La intenció d'aquesta activitat és conèixer com els astrofísics treballen en la detecció de sistemes binaris.

El siguiente trabajo trata sobre la posibilidad que nuestro sistema solar tenga unas órbitas planetarias estables en presencia de una segunda estrella. El proyecto en cuestión contiene la explicación de conceptos físicos que giran alrededor del campo gravitatorio o la fuerza de atracción gravitacional y los aplica al estudio de las estrellas, las órbitas planetarias y sistemas dobles. Los contenidos que se muestran en el marco teórico se han explicado de manera gradual respecto a su dificultad. La descripción de las estrellas pasa por su estructura y características, así como los distintos tipos que existen. El trabajo también incluye las posibles interacciones que se manifiestan en el espacio, ya sea entre una estrella y los planetas que lo orbitan o entre dos estrellas. La parte práctica consta de dos partes. La primera investigación consiste en el uso de un simulador para recrear dos hipotéticos escenarios: uno para un sistema binario de tipo S y otro para uno de tipo P, estos aplicados al sistema solar. La segunda actividad experimental reside en el análisis de datos sobre el tránsito de exoplanetas alrededor de una estrella y así de la

intensidad lumínica de esta. La intención de esta actividad es conocer como los astrofísicos trabajan en la detección de sistemas binarios.

The following work deals with the possibility that our solar system has stable planetary orbits in the presence of a second star. The project in question contains the explanation of physical concepts revolving around the gravitational field or the force of gravitational attraction and applies them to the study of stars, planetary orbits and double systems. The contents shown in the theoretical framework have been explained in a gradual manner with respect to their difficulty. The description of stars goes through their structure and characteristics, as well as the different types that exist. The work also includes the possible interactions that occur in space, either between a star and the planets orbiting it or between two stars. The practical part consists of two parts. The first investigation involves the use of a simulator to recreate two hypothetical scenarios: one for an S-type binary system and one for a P-type binary system, applied to the solar system. The second experimental activity consists of analysing data on the transit of ex-planets around a star and its light intensity. The intention of this activity is to learn how astrophysicists work on the detection of binary systems.

Índex

Introducció	5
Marc teòric	8
1. Estrelles	8
1.1 Definició	8
1.2 Estructura estel·lar	8
1.2.1 Nucli solar	9
1.2.2 Zona de radiació	9
1.2.3 Zona convectiva	9
1.2.4 Fotosfera	10
1.2.5 Cromosfera	10
1.2.6 Corona solar	10
1.2.7 Taca solar	11
1.2.8 Granulació fotosfèrica	11
1.2.9 Protuberància solar	11
1.3 Classificació d'estrelles	12
1.4 Vida d'una estrella	13
1.4.1 Origen	13
1.4.2 Naixement	13
1.4.3 Desenvolupament (seqüència principal)	15
1.4.4 Desenvolupament (gegants astronòmics)	15
1.4.4.1 Estrelles massives	16
1.4.4.2 Estrelles amb massa mitjana	17
1.4.5 Mort (última etapa)	18
1.4.5.1 Estrelles amb massa mitjana	18
1.4.5.2 Estrelles massives	18
1.5 Composició i característiques d'una estrella	21
1.5.1 Components químics d'una estrella	21
1.5.2 Fusió nuclear	22
1.5.3 Relació entre la temperatura i el color d'una estrella	25
1.5.4 Radiacions emeses pels astres	27
1.5.4.1 Efectes dels raigs envers l'atmosfera	28
2 Física que regeix l'espai	31
2.1 Gravetat (Newton, Einstein)	31
2.1.1 Llei de la gravitació universal	31
2.1.2 Teoria de la relativitat	33
2.2 Òrbites (definició)	38
2.2.1 Geometria de les òrbites (Lleis de Kepler)	38
2.2.1.1 Primera llei de Kepler	39
2.2.1.2 Segona llei de Kepler o llei d'àrees	40
2.2.1.3 Tercera llei de Kepler	42
3. Sistema planetari	43

3.1 Definició	43
3.2 Formació	43
3.2.1 Els cossos d'un sistema planetari	45
3.3 Tipus de sistemes planetaris	46
3.3.1 Sistemes planetaris extrasolars	46
3.3.2 Sistemes estel·lars múltiples	46
3.4 Sistema solar	48
3.4.1 Història	48
3.4.2 Teories sobre l'estructura del sistema solar	48
4. Estrelles dobles	51
4.1 Definició	51
4.2 Funcionament i vida	51
4.3 Diferents tipus d'estrelles dobles	52
4.3.1 Òptiques i físiques	52
4.3.2 Parells CPM	53
4.3.3 Binàries visuals	54
4.3.4 Binàries eclipsants	56
4.3.5 Sistemes d'estrelles múltiples	58
4.3.6 Binàries cataclísmiques	58
4.4 Astrofísica de les estrelles dobles	59
4.4.1 Centre de masses	59
4.4.2 Determinació de les masses	60
4.4.3 Distàncies d'un sistema binari	61
Marc pràctic	63
1. Introducció	63
2. Simulacions	63
2.1 Tipus P (planetari)	64
2.2 Tipus S	67
3. Anàlisis de dades de la variació lumínica d'una estrella variable	70
Conclusions	78
Bibliografia/webgrafia	80
Webgrafia visual	88
Annexos	97
Annex 1. Glossari	97
Annex 2. Demostracions matemàtiques	98
Annex 3. Partícules elementals	104
Annex 4. Simulador	106

Introducció

Una de les raons per les quals vaig triar el tema del treball és per la passió que sento envers la física, en concret al voltant de l'univers i les meravelles que hi poden ocórrer. De fet, aquesta és la motivació principal a l'hora de fer el treball, estudiar l'univers i intentar resoldre misteris que només la imaginació pot formular. El tema del treball també està vinculat amb els estudis posteriors a batxillerat que tinc previst realitzar, en aquest cas, un grau en física.

El treball s'estructura en dues parts: el marc teòric i el marc pràctic. En la primera part s'exposa la informació necessària per entendre conceptes com les estrelles, els diferents tipus d'aquestes i les seves característiques, com aconsegueixen energia, i la física que regeix l'espai, amb les lleis i els conceptes fonamentals per entendre els moviments de l'univers. Es fa especial èmfasi en els sistemes múltiples, en els que en destaquen els diferents tipus de sistemes binaris, que són l'objecte de recerca i la base per fer les simulacions del marc pràctic. Aquesta part es complementa amb la interpretació de dades de la variació de llum d'un sistema estel·lar.

La metodologia per a redactar el treball, sobretot el marc teòric, ha estat l'òbvia recerca d'informació. Primer de tot es va fer un guió inicial per saber quins conceptes es necessitaven explicar. A partir d'aquest, es va començar la recerca d'informació de cada un dels conceptes. La redacció del marc teòric ha estat basada en llibres com *Double and Multiple Stars and How to Observe Them* (2005) de James Mullaney, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* (traduït el 1984) d'Albert Einstein i *Einstein: Su vida, sus teorías y su influencia* (traduït per Remedios Diéguez Diéguez el 2012) de Glyn Bridgewater. A part d'aquests llibres, també s'ha basat en articles científics sobre estrelles dobles, articles de la Viquipèdia, sobretot anglesa, ja que conté un nombre de referències més elevat, i articles de caràcter educatiu com ara la pàgina web Isaac Physics. En relació amb la part pràctica, aquesta ha estat enfocada a utilitzar programes com Universe Sandbox², per fer simulacions sobre la hipòtesi del treball, i FotoDif, per interpretar les dades cedides per l'observatori Can Roig.

Per verificar o desmentir la hipòtesi del treball han sorgit una sèrie d'objectius. Els objectius inicials del treball van ser:

- Calcular matemàticament les òrbites dels diferents planetes per comprovar la seva estabilitat amb relació a les estrelles.
- Fer una simulació mitjançant Universe Sandbox² per observar de manera artificial com es veurien aquestes òrbites.
- Fer l'observació d'un sistema binari amb un exoplaneta amb l'ajuda de l'observatori de Llagostera (observatori Can Roig).

Un canvi a tenir en compte entre els primers objectius i els finals és la part pràctica. Tot i que l'objectiu que es volia assolir era fer una observació d'un sistema doble amb un exoplaneta orbitant-lo, per causes meteorològiques no va ser possible fer l'observació d'aquest. Per altra part, el contacte de l'observatori va proposar una part pràctica basada en l'anàlisi de dades sobre la intensitat de llum que permet la detecció d'exoplanetes. Afegir també que, després de la primera cerca d'informació, em vaig adonar que el càlcul de les òrbites planetàries quedava fora del meu abast. Juntament amb aquest canvi, els objectius generals del treball han canviat, de manera que els objectius finals del treball són els següents:

- Fer una simulació mitjançant Universe Sandbox² per observar de manera artificial com es veurien les òrbites planetàries.
- Utilitzar dades experimentals de trànsits d'exoplanetes de l'observatori Can Roig per conèixer el procediment que s'utilitza per analitzar la variació de la intensitat de llum en la detecció de possibles exoplanetes.

En aquest treball s'exposa la següent pregunta: podria ser el sistema solar un sistema binari? En altres paraules, podria ser que els planetes seguissin orbitant establement a dues estrelles? A partir d'aquesta pregunta em va sorgir una hipòtesi: potser el sistema solar podria ser un sistema binari amb òrbites estables.

El tema del treball és fruit de l'ús de la imaginació i la curiositat. Tot i haver tingut altres idees, aquestes eren més complicades de fer-ne un treball. Una d'aquestes

idees, per exemple, era fer la simulació i els càlculs del xoc entre Andròmeda i la Via Làctia (els càlculs serien de les velocitats a les quals ocorreria el xoc i quina força d'atracció hi hauria entre les dues en diversos punts de l'esdeveniment). Vaig trobar que fer un treball d'un sistema solar binari seria més assequible, ja que tenia eines com el simulador i l'observatori.

Aquest treball s'ha fet en condicions no realistes, per tant, es basa en mecànica newtoniana per reproduir l'escenari fictici (utilitzades en el simulador). S'ha fet d'aquesta manera pel fet que, primer de tot, no existeix un simulador capaç d'aplicar mecàniques no newtonianes per reproduir simulacions de l'univers.

Com hem dit abans, també es va intentar fer un apartat de càlcul per preveure quines serien les òrbites dels planetes amb el sistema proposat, però, per fer aquesta mena de càlculs es necessiten coneixements de mecànica hamiltoniana, un tipus de física més avançada al meu nivell.

Marc teòric

1. Estrelles

1.1 Definició

Una estrella és un astre^[1], massiu i lluminós format per plasma. Aquesta es manté en equilibri gràcies a dues forces: la força exercida per l'energia donada per la fusió termonuclear i la força de la gravetat. La fusió termonuclear manté en expansió l'estrella i la força gravitatòria la contrau. Quan l'estrella està en la seva etapa de maduresa, aquestes dues estan en equilibri. Les estrelles poden ser observades amb el seu moviment a través de l'espai, la seva lluminositat i el seu espectre.

1.2 Estructura estel·lar

Cal dir que l'estructura interna de cada estrella varia en funció de la seva massa i la seva edat.

Coneixent aquests elements ja podem parlar de les parts internes que formen les estrelles. L'estructura estel·lar està formada per 9 parts:

- Nucli estel·lar
- Zona de radiació
- Zona convectiva
- Fotosfera
- Cromosfera
- Corona
- Taca solar
- Granulació fotosfèrica
- Protuberància solar.

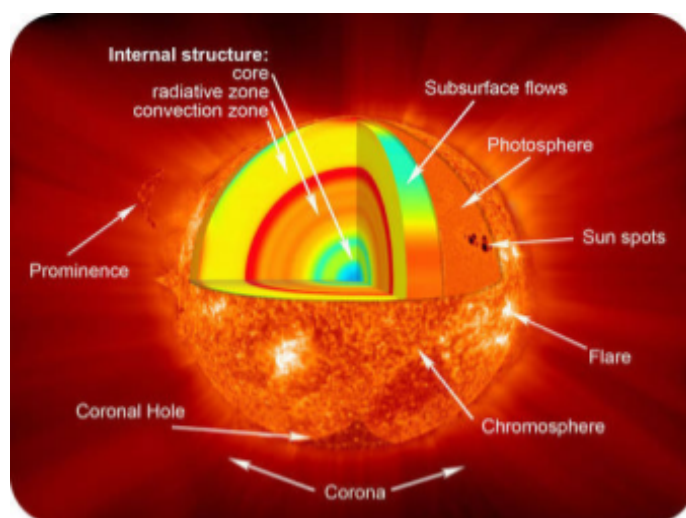


Fig. 1

Les següents parts són explicades prenent com a exemple la nostra estrella, el Sol.

1.2.1 Nucli solar

El nucli solar és un dels indrets més calents de l'univers. La densitat i la temperatura de l'estrella depenen de la seva massa. En el cas del nostre estel, el Sol, la seva densitat és de 150.000 kg/m^3 i té una temperatura de quasi 15 milions de kèlvins. El seu diàmetre és aproximadament de 175000 km. La seva pressió està al voltant de 21,7 bilions d'atmosferes. Aquestes xifres tan elevades són necessàries per al correcte desenvolupament de les reaccions que es donen al seu interior.

L'energia de l'estrella és produïda en el nucli mitjançant reaccions termonuclears (fusions nuclears, en un primer moment convertint hidrogen en heli). Aquesta energia arribarà a la superfície solar abans d'escapar en forma de radiació solar.

1.2.2 Zona de radiació

La zona de radiació està formada per dues regions:

- La **regió interior**: té una temperatura que arriba als 10 milions de kèlvins i a una pressió de 460 milers de milions d'atmosferes.
- La **regió exterior**: té una temperatura d'1,3 milions de kèlvins i 6 milions d'atmosferes. Aquesta zona ocupa un 70% de la mida del Sol, cobrint uns 500.000 km d'amplada.

A la zona de radiació, l'energia és transportada fins a l'exterior en forma de radiació solar i conducció tèrmica^[2], ja que és una manera molt eficaç de mantenir el flux elèctric. A causa de la densitat d'aquesta capa, els fotons només poden viatjar unes poques distàncies. Per exemple, en el cas del Sol, els rajos gamma tarden una mitjana de 171.000 anys a sortir d'aquesta capa.

1.2.3 Zona convectiva

La zona convectiva té, aproximadament, unes temperatures de fins a 100.000 kèlvins i una pressió de fins a 10.000 atmosferes. Té una extensió de 200.000 km,

constituïnt així un 15% de la mida solar. En aquesta, l'energia és transportada de manera convectiva, és a dir, la calor és transmesa mitjançant el moviment de les molècules de fluids (gasos i líquids), en aquest cas, el plasma.

Aquestes dues zones es determinen gràcies a la classificació espectral i, de nou, a la massa de l'estrella.

1.2.4 Fotosfera

Aquesta és la capa en la qual s'emet, pràcticament, tota la llum visible del Sol. És considerada la superfície solar i és la part de l'estrella més densa. La fotosfera consta d'una temperatura d'uns 5800 kèlvins i amb un plasma d'aproximadament entre 100 i 200 km de profunditat, emissor de la llum i la calor que rebem. També se sap que constitueix menys del 0,2% de la mida del Sol.

Aquesta capa presenta granulació fotosfèrica, l'aspecte de la superfície solar. Aquesta granulació és formada per grànuls, estructures lluminoses de gasos calents que tenen un temps de vida entre 5 i 10 minuts.

1.2.5 Cromosfera

La cromosfera és la capa que s'estén per sobre la superfície visible del Sol, la fotosfera. Constitueix uns 16.000 km de la mida total del diàmetre del Sol i està limitada per l'atmosfera solar o corona. Les seves temperatures oscil·len entre els 6300 i 1000300 kèlvins.

1.2.6 Corona solar

La corona solar és la part més exterior de l'atmosfera solar. Aquesta està constituïda per gasos que arriben fins a 2 milions de graus. La corona solar s'estén sobre la fotosfera ocupant des d'uns 16.000 km fins a uns quants milions de km més en direcció vertical. Aquesta té una temperatura aproximada d'un milió de kèlvins, és a dir, la temperatura de la part exterior de la cromosfera.

El problema de com l'energia arriba a la corona ha presentat un misteri des dels principis de l'astrofísica que fa poc es va resoldre. La revista *Nature* va publicar l'article *Energy release in the solar corona from spatially resolved magnetic braids*

(2013), en el qual van participar 13 autors de diferents organitzacions, que va mostrar que l'energia que arriba a la corona solar és deguda a fluxos magnètics que es mostren com rínxols magnètics. La manera amb la qual aquests s'escalfen s'ha convertit en el treball principal del món astrofísic, ja que segueixen havent-hi investigacions sobre aquesta capa i les seves incògnites.

Els elements de l'estructura solar són els següents:

1.2.7 Taca solar

Les taques solars són taques formades a la superfície solar causades per les fortes línies del camp magnètic que surten de dins del Sol a través d'aquesta. Apareixen visiblement com taques fosques que poden arribar a ser moltes vegades més grans que la Terra. El seu color fosc és degut a les baixes temperatures en comparació amb les de la superfície. Aquestes poden arribar, aproximadament, a 4000 kèlvins. Aquestes taques consten de dues parts: l'umbra, la part fosca, i la penombra, part que envolta l'umbra.

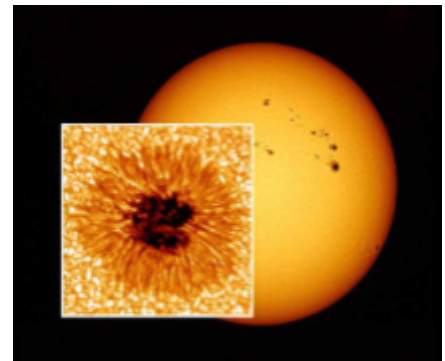


Fig. 2

1.2.8 Granulació fotosfèrica

La granulació fotosfèrica és, com he dit anteriorment, l'aspecte que presenta la superfície solar o fotosfera. Està formada per un alt nombre de grànuls brillants en moviment. Aquests grànuls són l'evidència del moviment barbotejant de gasos altament calents a conseqüència del transport de la calor de l'interior fins a l'exterior mitjançant convecció. El primer observador va ser un astrònom aficionat anomenat Christopher Carrington. L'any 1896 es va fotografiar per primera vegada la granulació fotosfèrica en mans del francès Pierre Jules Cèsar Janssen.

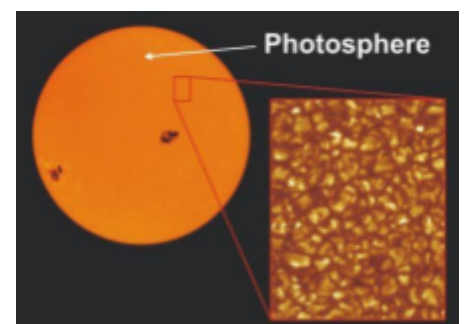


Fig. 3

1.2.9 Protuberància solar

Les protuberàncies solars són núvols de gas ejectat de la superfície solar amb l'ajuda d'un bucle del camp magnètic.



Fig. 4

Normalment, aquestes protuberàncies són lleugerament més fredes que la superfície. Les protuberàncies solars ocorren entre la cromosfera i la corona.

1.3 Classificació d'estrelles

Podem classificar les estrelles de diverses maneres, però, en aquest cas, les classificarem segons el color (espectre) i la massa d'aquesta. Trobem 7 categories:

- **Les estrelles tipus O:** tenen una temperatura de 30.000 K i són d'un color blau marí. Tenen una massa igual o superior a 16 masses solars. Per exemple, una estrella d'aquest tipus és 48 Orionis.
- **Les estrelles tipus B:** tenen una temperatura de 20.000 K i un color blau més clar. Se'ls hi atribueix una massa d'entre 2,1 i 16 masses solars. Un exemple conegut d'aquest tipus d'estrelles és Rigel.
- **Les estrelles tipus A:** tenen una temperatura de 10.000 K i un color més blanquinós. Oscil·len entre les 1,4 i 2,1 masses solars. Una estrella d'aquest tipus és Sirio A.
- **Les estrelles tipus F:** tenen una temperatura de 7.000 K i, tot i que tendeixen cap al groc, també tenen un color blanquinós. La seva massa pot oscil·lar entre 1,04 i 1,4 masses solars. Un exemple d'aquest tipus és Canopus.
- **Les estrelles tipus G:** tenen una temperatura de 6.000 K i tenen un color groc (la nostra estrella, el Sol, en forma part). Arriben a una massa d'entre 0,8 i 1,04 masses solars.
- **Les estrelles tipus K:** tenen una temperatura de 4.000 K i un color més taronjós. Poden aconseguir entre 0,45 i 0,8 masses solars. Per exemple, Albireo A.
- **Les estrelles tipus M:** tenen una temperatura de 3.000 K i un color molt vermellós. Constitueixen entre 0,08 i 0,45 masses solars. Un exemple famós del tipus M és l'estrella Betelgeuse

Els exemples mostrats han estat trets de l'article *Clasificación estelar* de la Wikipedia.

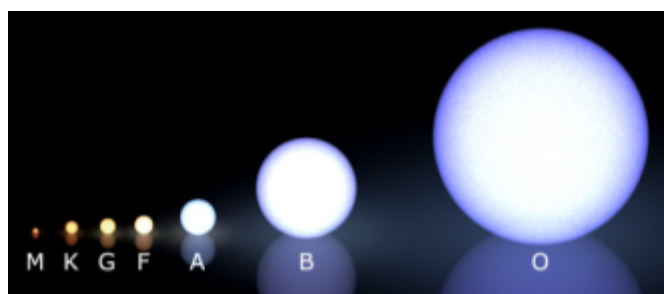


Fig. 5

Cal aclarir que el color adquirit per les estrelles és degut a la seva temperatura.

Ara que sabem tota la informació necessària per classificar i conèixer els tipus d'estrelles, podem començar a explicar el procés de vida que segueixen aquestes.

1.4 Vida d'una estrella

Les estrelles segueixen un procés de desenvolupament, és a dir, de vida. Aquesta es pot dividir en tres parts: el naixement, l'evolució i la mort. Totes aquestes tres fases varien depenent de la massa de l'estel. Abans de parlar sobre les diverses fases de la vida d'una estrella hem de saber el seu origen.

1.4.1 Origen

Els estels tenen origen en grans núvols de gas interestel·lar coneguts com les nebuloses. Aquestes zones tenen una densitat molt elevada, que fa que el gas sigui atret per efecte de la gravetat, causant de la contracció en l'estrella. A mesura que aquestes zones acumulen més gas, la seva mida augmenta i, a la vegada, la seva gravetat. La causa del naixement de les estrelles és la gravetat.

Ara que sabem l'origen de les estrelles en l'univers actual, podem arribar a parlar sobre la vida de les estrelles i els seus diferents tipus.

1.4.2 Naixement

Els estels no neixen directament del grumoll de gas anterior, sinó que abans passen per una etapa de desenvolupament inicial. Aquest primer element que s'acabarà transformant en estrella s'anomena protoestel i va acumulant gas al seu voltant. Com més gas hi ha, més interaccionen les seves partícules, fent que es produeixi un augment de la temperatura. Quan s'arriba als 14 milions de kèlvins, el protoestel es

comença a desenvolupar per arribar a estrella mitjançant la fusió nuclear de l'hidrogen. Aquesta reacció nuclear provoca una gran alliberació de moltíssima energia que, en contraposició a la gravetat, fa que el protoestel s'expandeixi. A part d'aquest augment de volum i gràcies a la mateixa reacció, el protoestel aconsegueix molta més lluminositat. Amb aquestes dues característiques, el protoestel evoluciona a estrella i passa a la seva fase de desenvolupament.

Podem distingir el naixement de 3 tipus d'estrelles diferents: les **estrelles massives** (estrelles majors a 8 masses solars), les **estrelles de massa mitjana** (estrelles menors a 8 masses solars) i les **nanes marrons**.

- **Les estrelles massives** tenen un naixement molt ràpid, ja que fusionen l'hidrogen a unes velocitats altíssimes. A causa d'aquesta velocitat, la vida d'aquestes és més curta que les estrelles de poca massa. Aquestes poden viure entre 3 i 11 milions d'anys.

Un bon exemple d'estrella massiva és BAT 99-98. BAT 99-98 és un tipus d'estrella Wolf-Rayet, estrelles molt massives amb una vida curta i que poden arribar als 50.000 kèlvins, de tipus espectral WN6. Té una massa 226 vegades més gran que la del Sol i un radi 37,5 vegades més gran que el del Sol.

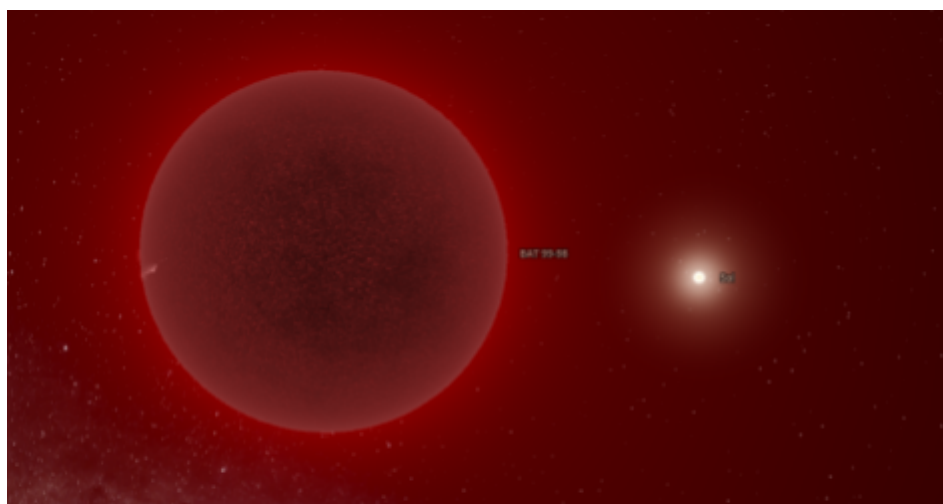


Fig. 6

- **Les estrelles de poca massa** com el Sol tenen un naixement molt més lent, ja que les velocitats a les quals fusiona hidrogen són menors en comparació

a les de les estrelles massives. Estrelles com el Sol poden arribar a viure 10 milions d'anys.

- **Les nanes marrons** són un tipus d'estrella que no arriben a la fase de desenvolupament. Les nanes marrons són estrelles que no generen la suficient energia mitjançant fusió nuclear, estan en constant equilibri amb la gravetat, sense possibilitat de créixer i arribar a ser una estrella adulta. Tenen una massa 75 vegades major a la de Júpiter i viuen molt més temps que qualsevol estrella de les altres categories anteriorment mencionades. Un exemple de nana marró pot ser Gliese 229b (exemple extret de l'article *What is a brown dwarf?* publicat a Star Child, un equip de la NASA).

1.4.3 Desenvolupament (seqüència principal)

A partir d'aquest punt, l'estrella evolucionarà a la seva seqüència principal, és a dir, l'etapa més llarga de la vida d'aquesta. Durant aquesta etapa, l'estrella romandrà en equilibri entre la gravetat i la seva fusió nuclear d'hidrogen. Tot i que les estrelles s'originen de la mateixa manera, no totes aconsegueixen les mateixes característiques. Com hem dit anteriorment, i amb excepció de les nanes marrons, podem distingir 2 tipus d'estrelles de seqüència principal: les **estrelles massives** i les **estrelles de massa mitjana** (en les quals està inclosa la nostra estrella, el Sol).

- Les estrelles massives poden ser diferenciades en 2 tipus: el tipus B o el tipus O. Les característiques dels diferents tipus han estat explicades en l'apartat 1.3 (classificació d'estrelles).
- Les estrelles de massa mitjana poden ser diferenciades en 4 tipus: el tipus A, el tipus F, el tipus G, el tipus K i el tipus M. Les característiques dels diferents tipus han estat explicades en l'apartat 1.3 (classificació d'estrelles).

1.4.4 Desenvolupament (gegants astronòmics)

Quan s'arriba a aquesta etapa de la seva vida, l'estrella ha esgotat tot o quasi tot l'hidrogen que roman en el seu nucli, només quedant com a gas majoritari en el nucli, l'heli. A causa de l'esgotament de l'hidrogen, la gravetat guanya força envers l'energia produïda per la reacció nuclear, aconseguint així contraure l'estrella. Com

la gravetat ha aconseguit contraure l'estrella, aquesta ha guanyat densitat i temperatura, fent possible la fusió nuclear de l'heli. Aquest tipus de reacció allibera moltíssima més energia que la de l'hidrogen, de manera que es torna a superar la força que exerceix la gravetat, però no amb la mateixa potència amb la qual ho feia l'hidrogen. La fusió nuclear de l'heli augmenta la temperatura del nucli fins a arribar als 100 milions de kèlvins i, com a conseqüència, creix 100 vegades la seva mida normal, és a dir, quan es fusionava hidrogen. L'estrella resultant serà més calenta en el seu nucli, més freda en la superfície, més gran però menys densa.

Podem diferenciar, igual que en les etapes anteriors, dos tipus de gegants: les gegants sorgides d'estrelles massives o gegants sorgides d'estrelles amb poca massa.

1.4.4.1 Estrelles massives

Les gegants sorgides d'estrelles massives o supergegants poden ser diferenciades en dos tipus: les supergegants vermelles o les supergegants blaves.

- Les **supergegants vermelles** tenen una temperatura en la seva superfície que oscil·la entre els 3500 i els 4500 kèlvins. Tenen un color vermellós, no molt brillant. Aquest color és a causa que l'energia de l'estrella s'estén per l'interior i la superfície d'aquesta. Com més superfície, més energia es perd i per tant, més ràpid es refreda. La majoria aconsegueixen entre 200 i 800 vegades el radi del Sol.
- Les **supergegants blaves** són aquelles que pertanyen als grups espectrals O i B i les descobertes ens donen informació sobre la seva temperatura. Les temperatures d'aquestes supergegants oscil·len entre els 11000 i els 42000 Kelvin. Cal dir que aquests valors són una oscil·lació de les temperatures de les supergegants blaves descobertes. No vol dir que hi hagi supergegants blaves no descobertes que tinguin una temperatura més elevada.



Fig. 7

A part d'aquest tipus de supergegants, se sap també de l'existència de les hipergegants. Les hipergegants són les gegants sorgides de les estrelles més massives de l'univers i es creu que és dels estats inicials de l'etapa de gegant. El tipus més particular és l'hipergegant groga. Aquestes oscil·len entre els 4000 i els 8000 kèlvins.

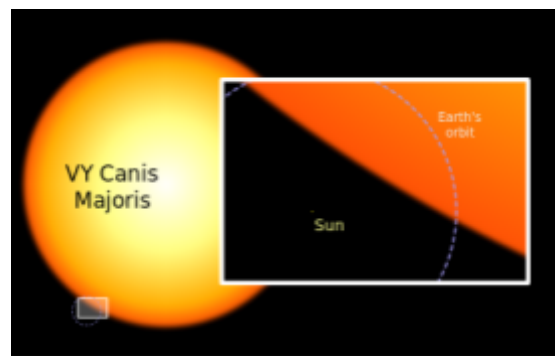


Fig. 8

1.4.4.2 Estrelles amb massa mitjana

Les gegants sorgides d'estrelles amb poca massa són conegudes com a gegants vermelles. **Les gegants vermelles** tenen una temperatura aproximada de 5000 kèlvins. Igual que les supergegants vermelles, aquestes poden presentar des del color groc fins a un color vermellós. La seva massa estarà proporcionada amb la massa de l'estrella en el seu estat normal, però se sap que serà 100 vegades aquesta.

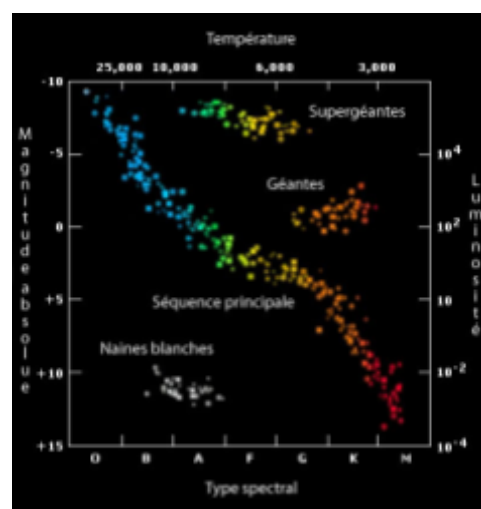


Fig. 9

1.4.5 Mort (última etapa)

Després de l'etapa anterior, és a dir, la seva etapa com a gegant vermella, l'estrella arribarà a l'última etapa de la seva vida, la mort. La manera de morir d'una estrella ve determinat, com la majoria de factors d'una estrella, per la seva massa. Aquesta etapa és causada per l'esgotament d'heli en el nucli de l'estel.

1.4.5.1 Estrelles amb massa mitjana

Aquestes estrelles tindran una mort tranquil·la en comparació a les estrelles massives. Després de l'etapa de gegant, l'estrella haurà esgotat l'heli del seu nucli. Tot i que aquesta haurà esgotat aquest element del seu nucli, encara s'estarà donant la fusió nuclear d'aquest element en les seves capes exteriors. Això generarà molta inestabilitat. A partir d'aquest punt, s'expandirà i es contraurà repetidament a causa de la inestabilitat donada pels ritmes de producció d'energia. En un moment donat, la gegant es contraurà i s'escalfarà, fins a arribar al punt en què l'estrella es desprendreà de les capes externes de material.

Seguidament, les restes d'aquest cadàver estel·lar formaran el que s'anomena nebulosa planetària. Una nebulosa planetària és un tipus de nebulosa molt petita en comparació amb altres que acumulen material per a futurs naixements d'estels. En el centre d'aquesta nebulosa tenim la resta del nucli de l'estrella, una nana blanca.

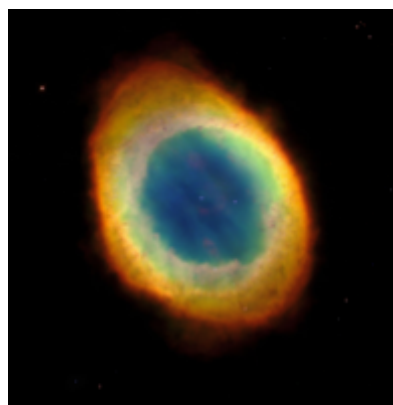


Fig. 10

1.4.5.2 Estrelles massives

En aquest cas, les estrelles massives tenen una mort molt més caòtica i espectacular que la que qualsevol de les anteriors podrà tenir. El procés de mort

d'aquestes comença quan s'esgota l'heli del nucli. El nucli d'aquest estel es compacta, a causa de les altíssimes temperatures. Això causa que no només es donin reaccions entre l'heli i el beril·li per produir carboni, sinó que tots els elements que formen l'estrella reaccionen entre ells en cadenes molt complexes de fusió fins arribar a l'últim element que poden fusionar de manera espontània, el ferro. Quan s'arriba a aquest punt, l'estrella no es pot sostenir a causa de la immensa inestabilitat que la governa. Finalment, les capes externes col·lapsen de forma dramàtica contra el nucli de l'estrella. Després, i a causa d'un efecte rebot, exploten cap a l'exterior. Aquesta explosió s'anomena supernova.

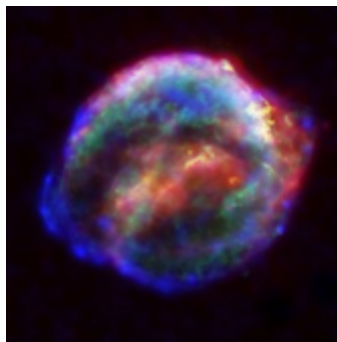


Fig. 11

Aquí entrem en la diferència més gran entre la mort d'una estrella mitjana i una estrella massiva. Després del col·lapse i supernova d'aquestes estrelles massives, les restes poden donar origen a tres tipus d'estructures: una estrella de neutrons, un forat negre o una nana blanca.

- **Les estrelles de neutrons** són un tipus d'estrella degenerada que està composta, bàsicament, per neutrons a densitats altíssimes i amb un camp magnètic immens. Solen tenir entre 20 i 30 km de diàmetre i una massa igual a la d'una estrella mitjana.
- **Els forats negres** són cossos amb un camp gravitatori extraordinàriament gran. D'aquests no es poden escapar cap mena de radiació electromagnètica ni lluminosa, d'aquí el nom forats negres.

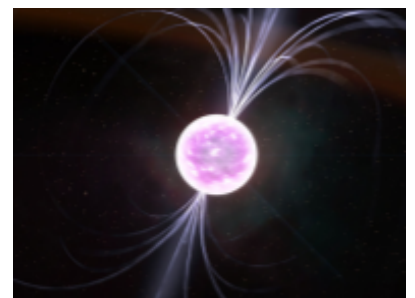
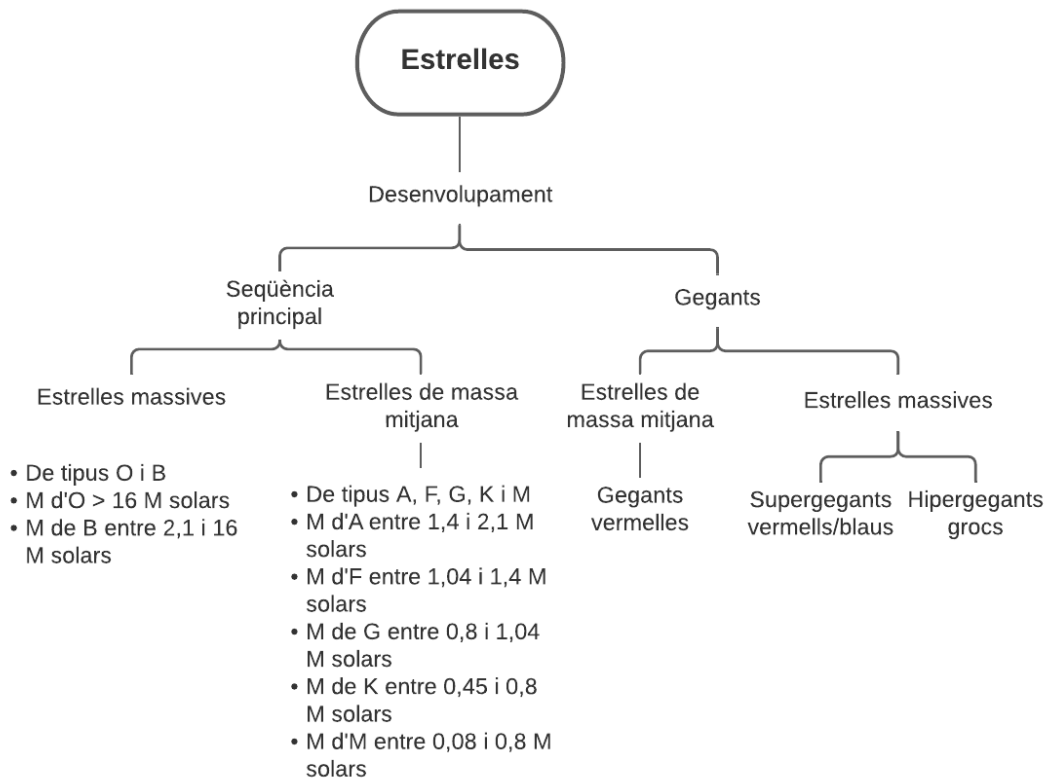
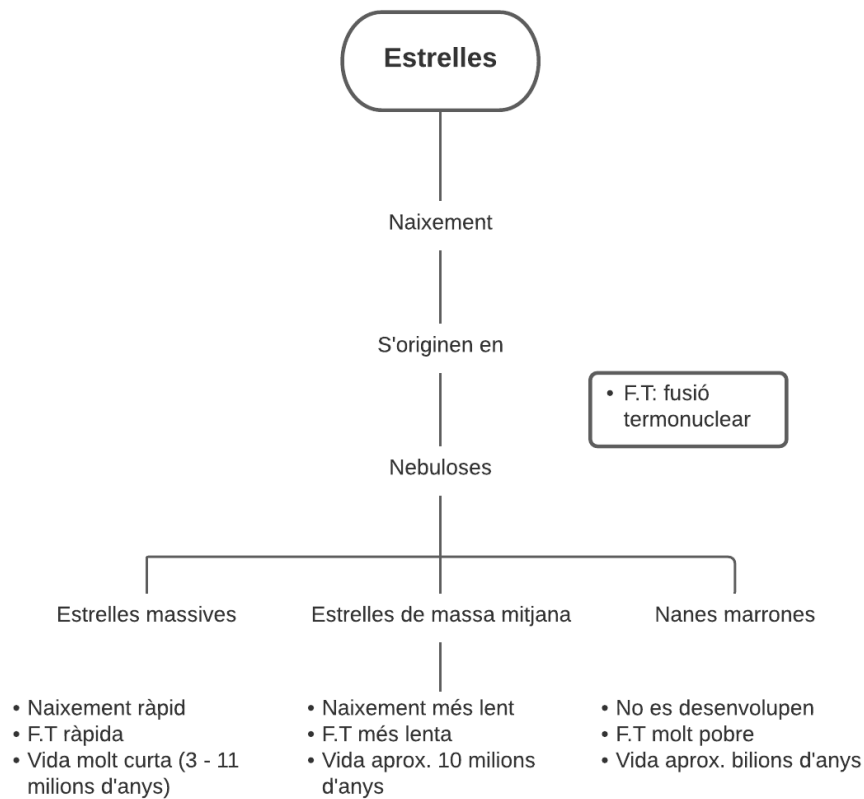


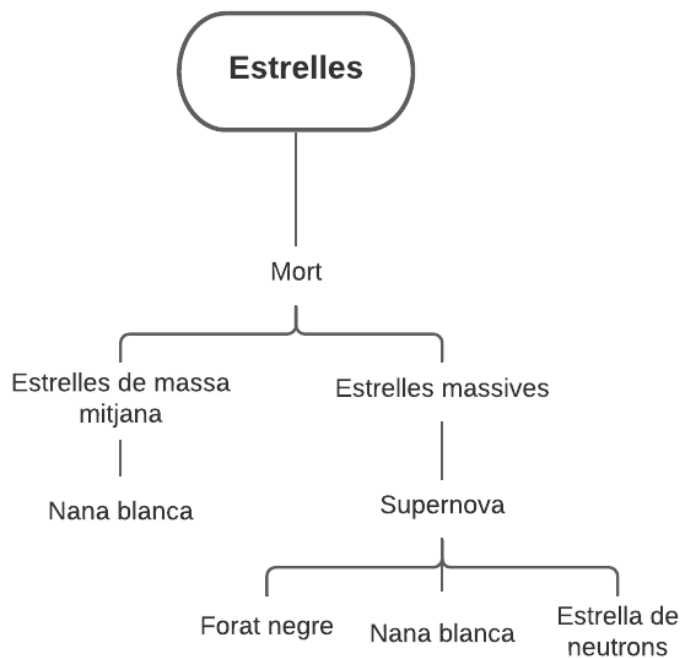
Fig. 12



Fig. 13

Diagrames que resumeixen l'explicació (fonts pròpies)





1.5 Composició i característiques d'una estrella

1.5.1 Components químics d'una estrella

Les estrelles, com hem vist anteriorment, sorgeixen d'un col·lapse gravitatori d'una nebulosa la qual està composta, majoritàriament, per hidrogen i heli, tot i que a més d'aquests elements, en trobem alguns de més pesats. Normalment, l'estrella resultant estarà composta pels següents percentatges: un 75 % de l'estrella serà hidrogen mentre que un 25 % de la seva composició serà heli. Quan el nucli estel·lar estigui prou dens, començarà el procés d'obtenció d'energia de l'estel.

Anteriorment hem explicat que el procés d'obtenció d'energia de les estrelles és la fusió nuclear. Per entendre aquest procés, primer cal saber en què consisteix. La fusió nuclear és una reacció nuclear en la qual dos nuclis d'àtoms lleugers, generalment d'hidrogen, s'uneixen formant un altre nucli més pesant. Les estrelles utilitzen aquesta reacció per obtenir energia. Però, quin és el procés exacte que es produeix a l'interior del nucli estel·lar? Quines partícules són emeses? Com s'allibera aquesta energia?

1.5.2 Fusió nuclear

En aquest apartat ens encarregarem d'explicar i fer entenedor el complicat procés de la fusió nuclear. Parlarem de les partícules emeses i quins efectes produeixen envers l'estrella.

Com hem dit, la fusió nuclear és un procés que consisteix en la fusió d'àtoms per aconseguir un nucli atòmic més pesat. En aquest cas, les estrelles, en la seva etapa inicial i de seqüència principal, fusionen nuclis d'hidrogen. Però, de què està format un àtom? Bàsicament, un àtom està format per 3 tipus de partícules. Els electrons, els protons i els neutrons.

- **Electrons:** són les partícules que contenen la càrrega negativa de l'àtom i que és anomenada i representada de la següent manera: e^- .
- **Protons:** són les partícules que contenen la càrrega positiva de l'àtom i que és anomenada i representada de la següent manera: p^+ . Aquesta partícula es troba en el nucli de l'àtom i el nombre de protons que tingui un àtom definirà el seu nombre atòmic. Aquest nombre determina de quin element és el nucli, ja que cada element té un nombre atòmic diferent, el que explica l'ordre dels elements a la taula periòdica. Com a curiositat sabem que els protons són 2000 vegades més pesants que els electrons. Juntament amb els neutrons aporten la major part de la massa de l'àtom.
- **Neutrons:** són les partícules que no tenen càrrega elèctrica neta, a diferència de les dues partícules anteriors. Aquesta partícula és molt interessant, ja que determina l'isòtop que forma part de l'element. És representada amb una n o n^0 .

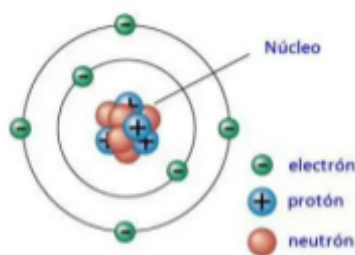


Fig. 14

També, i per entendre la fusió nuclear, necessitem saber què és un isòtop i què és un neutrí (visitar annex 3, partícules elementals).

- **Isòtop**: hem d'entendre que un àtom només té un nucli, sempre. Per un mateix element, aquest nucli té el mateix nombre de protons, però, pot tenir diferent nombre de neutrons. Per exemple, trobem el cas de l'hidrogen. L'hidrogen té isòtops d'origen natural, en concret tres: el proti, el deuteri i el triti. Tots els isòtops de l'hidrogen tenen un protó al nucli, i la diferència entre ells és que el proti no té cap neutró, el deuteri en té un i en canvi el triti, té dos neutrons. Aquests s'utilitzen en la fusió nuclear o en la bomba d'hidrogen.

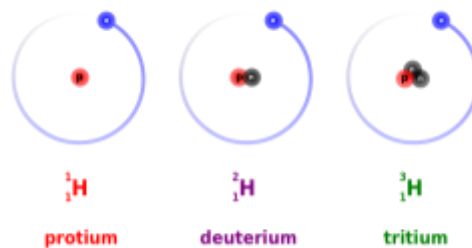
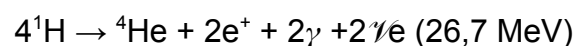


Fig. 15

Ara que sabem els elements necessaris per entendre la reacció que es produeix entre l'hidrogen, passem a explicar el procés amb aquests. Expliquem-lo primer mitjançant un esquema de reaccions químiques.



En concret **es fusionen 4 àtoms d'hidrogen** (isòtop amb un protó, el proti). Aquesta fusió dels 4 àtoms dona com a resultant **un àtom d'Heli 4**, un isòtop de l'heli, **2 positrons**, l'antipartícula de l'electró, **2 fotons de radiació gamma** i, finalment, **2 neutrins**. Tot això **dona una energia equivalent a 26,7 MeV** (mega electró-volts). Aquest esquema és un de globalitzat, ja que rere aquest enunciat resumit hi ha tot un procediment més complex.

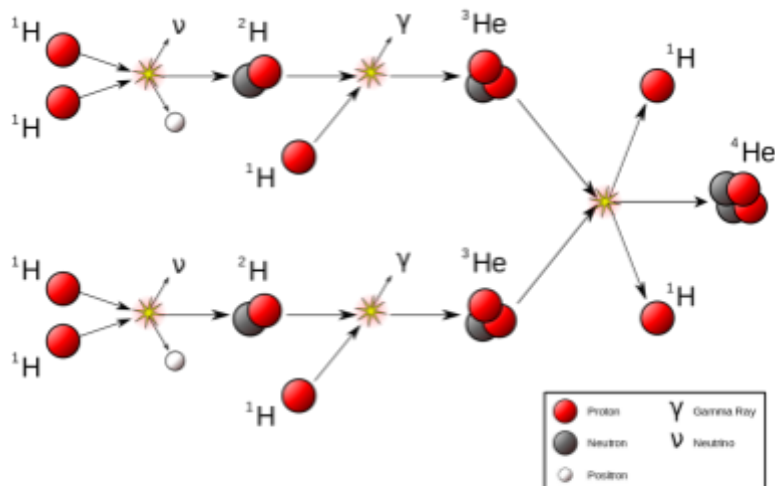
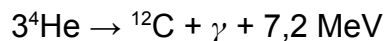


Fig. 16

Hem vist l'esquema d'una reacció de fusió en el nucli d'una estrella de seqüència principal. Però, i en una gegant vermella? Quin és l'esquema de fusió en aquest cas? Hem de recordar que en una gegant vermella, l'element que es fusiona en aquest cas és l'heli. Partint d'aquí, podem continuar amb la reacció que ens ha resultat de l'anterior.



Com es pot veure, aquesta reacció prové de l'anterior, ja que conté el mateix isòtop de l'heli (heli 4). En aquesta **es fusionen 3 àtoms d'heli 4**, donant **1 àtom de carboni 12**, l'isòtop més abundant de carboni, **1 fotó de radiació gamma** i **7,2 MeV** (mega electró-volts). Igual que en el cas anterior, aquesta equació és un esquema globalitzat de la reacció que realment es dona, que és més complexa.

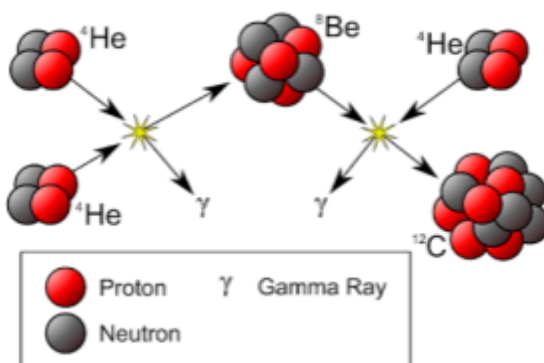


Fig. 17

1.5.3 Relació entre la temperatura i el color d'una estrella

El color d'una estrella, com hem pogut llegir anteriorment, ve determinat per la seva temperatura. Però, és correcta parlar de color amb les estrelles? Estem utilitzant el terme adequat? La resposta és que no. En comptes de parlar de color d'una estrella, hauríem de parlar de tipus espectral d'una estrella o, simplement, espectre d'una estrella.

L'espectroscòpia és una tècnica analítica experimental que es basa a detectar l'absorció o emissió de radiació electromagnètica per part d'una substància que volem estudiar. La radiació electromagnètica és composta per ones que es transmeten per qualsevol medi, fins i tot per l'espai. Aquestes ones transporten energia, però no matèria. La llum té doble naturalesa: es comporta com una ona i com a partícula. En el cas de les ones de baixa freqüència, aquestes manifesten un comportament ondulatori, mentre que les zones amb alta freqüència, com poden ser els raigs gamma, aquestes manifesten un comportament de corpuscle. La zona de la llum visible, també està formada per ones electromagnètiques, cada una transportant una energia diferent. L'ull humà interpreta aquestes ones com a colors, els colors de l'arc de Sant Martí. Aquesta explicació es pot comprovar mitjançant un experiment, llançant llum blanca a un prisma transparent. Cada color té una energia associada.

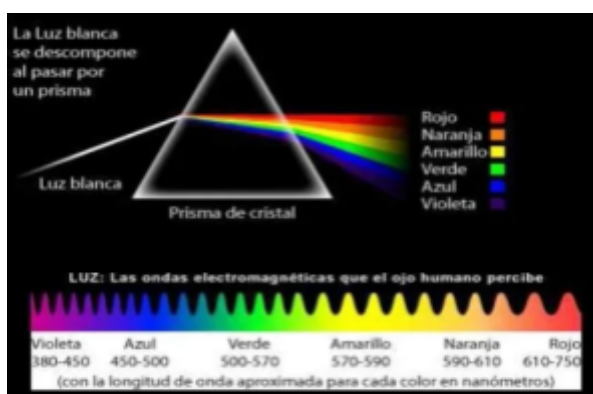


Fig. 18

És a dir, que el color que ens arriba per mitjà de la llum d'un cos estel·lar, no és més que la radiació que emet, transportada per ones. Si analitzem, mitjançant

l'espectroscòpia, aquestes ones, podem veure que tenen un espectre característic. La classificació de la llum segons la seva longitud d'ona és la següent:

- Les **ones de ràdio** emeten una energia molt feble i tenen una longitud d'ona associada de 10^3 m.
- Les **ones de microones**, emeten una energia associada a una longitud d'ona de 10^{-2} m.
- Les **ones infraroges**, amb una longitud d'ona de 10^{-5} m.
- Seguidament trobem la **llum visible**, que té associada una longitud d'ona que va des dels 380 nm fins als 740 nm. Aquesta llum són els colors que podem percebre amb els nostres ulls. Per exemple, l'ona de llum que emet una energia associada al color verd té una longitud d'ona que va de 520 a 565 nm.
- Els **raigs ultraviolats**, amb una longitud d'ona de 10^{-8} m.
- Els **raigs X**, amb una longitud d'ona d'entre 10^{-10} m.
- Els **raigs Gamma**, amb una longitud d'ona de 10^{-12} m.

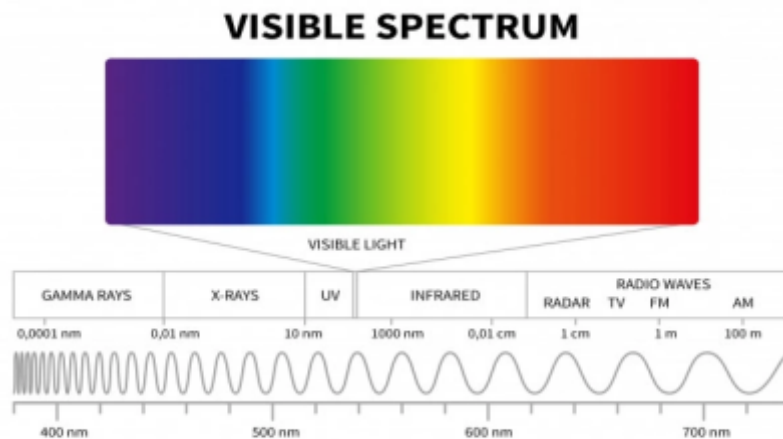


Fig. 19

Aquesta representació per colors s'ha especificat a l'hora de treballar amb l'espectrografia, és a dir, el color és utilitzat per identificar la longitud d'ona i per determinar si l'objecte d'estudi s'allunya o s'apropa de la Terra. Si la font de llum s'allunya, l'espectre obtingut estarà desplaçat cap al vermell, perquè les ones es detectaran amb una longitud d'ona més gran. En el cas d'un objecte lluminós que

s'acosti, el seu espectre correrà cap al violeta, notant-se l'efecte d'unes longituds d'ona menors.

L'espectroscòpia és la tècnica amb la qual es classifiquen els tipus d'estrelles segons el seu "color". També, com he dit en aquest mateix apartat, les estrelles no es classifiquen simplement pel seu color, sinó pel seu espectre. Cada tipus d'estrella, O, B, A, etc. constitueix un tipus d'espectre. Depenent de la temperatura de l'estrella, l'espectre que s'analitzarà serà un o serà un altre.

1.5.4 Radiacions emeses pels astres

Com hem vist en l'anterior apartat, hi ha diversos tipus d'ona associats a diferents longituds d'ona. Dins les radiacions electromagnètiques, n'hi ha que són ones, com les ones de ràdio, i d'altres que són partícules, com els raigs X o gamma. Aquí és on diferenciem dos tipus de radiacions electromagnètiques: la no ionitzant i la ionitzant.

- **Radiacions no ionitzants:** són aquelles radiacions que no suposen un perill per l'espècie humana ni per l'entorn en el qual viu, incloent-hi les espècies que hi viuen. Per exemple, les ones de ràdio.
- **Radiacions ionitzants:** són aquelles radiacions que, en menor o major mesura, afecten l'organisme humà i poden afectar l'entorn en el qual viu, així mateix a les espècies que hi viuen. Són formades per fotons o partícules que, quan interaccionen amb la matèria produeixen ions. Per exemple, els raigs gamma.

Les estrelles emeten radiacions ionitzants, anomenades raigs còsmics. Aquests raigs còsmics són electrons, neutrons i nuclis atòmics d'alta energia que es mouen en l'espai gairebé a la velocitat de la llum, la qual viatja a 300.000 km/s. Aquests poden arribar a la Terra provinent del nostre Sol o de l'exterior del sistema solar. Aquest tipus de raigs són formats per radiacions electromagnètiques. Aquesta radiació còsmica està formada per raigs gamma o raigs X, demostrant així algunes ones electromagnètiques poden suposar un perill. Les estrelles emeten raigs X o raigs gamma depenent de l'energia dels fotons de l'estel.

- **Raigs gamma:** són produïts per la desintegració radioactiva de nuclis atòmics. Com hem vist anteriorment, tenen una freqüència molt alta, fent-los un dels més perillosos per als éssers humans. Els fotons d'aquests raigs s'indiquen amb la lletra grega γ .
- **Raigs X:** tot i ser ionitzants, són raigs de naturalesa electromagnètica, procedents de l'escorça de l'àtom que es produeixen per l'acció d'electrons ràpids. Del grup de radiacions ionitzants, són els menys energètics. Tot i això, presenten una capacitat de penetració elevada.

Els estels també emeten un altre tipus de radiació, en aquest cas, no ionitzant. La radiació ultraviolada. Aquesta ens permet produir vitamina D, però també ens pot provocar una sèrie de riscos per la salut, com el càncer de pell, a causa d'una llarga exposició a aquests raigs.

1.5.4.1 Efectes dels raigs envers l'atmosfera

L'atmosfera és una capa de gasos concentrada al voltant d'un planeta o astre celeste. Es manté en el seu lloc per acció de la gravetat. En el cas del nostre planeta, conté els gasos necessaris per preservar la temperatura planetària estable i permetre el desenvolupament de la vida. La seva densitat desvia o atenua les formes de radiació electromagnètica provinents de l'espai, així com meteorits i objectes que puguin impactar a la superfície de la Terra. També conté una part molt important per la vida terrestre, la capa d'ozó, una acumulació d'ozó que absorbeix del 97 al 99% de la radiació ultraviolada a la superfície terrestre, mantenint la temperatura del planeta, estable.

En els últims anys hem sentit molt a parlar de la capa d'ozó i la seva destrucció per l'acumulació de gasos d'efecte hivernacle, i és que l'acció de l'ésser humà, sobretot des de la revolució industrial, ha estat la culpable de l'increment de temperatura del nostre planeta, ja que l'emissió d'aquests gasos ha provocat la destrucció d'aquesta capa. La temperatura terrestre ha augmentat 0,6 °C la mitjana anual durant l'últim segle. S'han suggerit dues variants a aquest augment exponencial de la temperatura. Aquestes dues són la influència solar en el temps i clima i la influència d'activitats humanes envers els processos atmosfèrics.

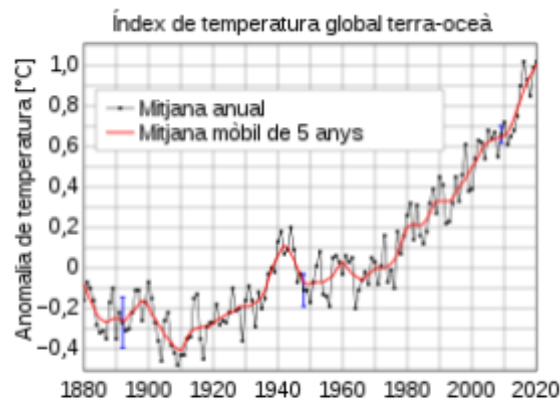


Fig. 20

Els raigs solars i còsmics influencien els processos fisicoquímics de la part baixa de l'atmosfera, incloent-hi els canvis de densitat de nuvolositat, la cobertura de núvols d'atmosfera i així el control de variabilitat de la transparència de l'atmosfera, afectant la radiació solar que arriba a la part inferior de l'atmosfera. Aquests raigs i a la vegada vents solars són contrarestats pel **camp magnètic terrestre**, camp magnètic generat per l'activitat interna de la Terra. Aquest camp magnètic terrestre forma la magnetosfera.

- **Magnetosfera:** és una regió que envolta un objecte astronòmic, camp magnètic del qual actua com escut modificant o organitzant les partícules carregades d'alta energia procedents del Sol.

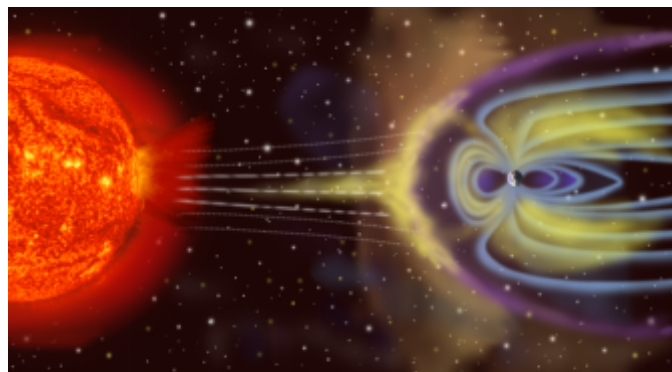


Fig. 21

És a dir, la magnetosfera protegeix el planeta de pertorbacions del Sol, permetent que la vida no desaparegui i garantint una atmosfera adient per aquesta.

Estar en la part habitable del sistema solar permet que el nostre planeta tingui les condicions ideals perquè s'hi formi la vida i aquesta proliferi. És veritat que els raigs còsmics i vents solars influencien processos i condicions per la vida en el nostre planeta, però l'avantatge d'estar localitzat en una zona tan privilegiada del sistema solar va donar la possibilitat de desenvolupar condicions ideals per no estar del tot afectats per aquestes perturbacions. Cal dir que ens afecten, no en molta gran mesura, però no es pot negar la seva influència.

2 Física que regeix l'espai

2.1 Gravatat (Newton, Einstein)

La gravetat ha estat una de les grans qüestions de la història humana més intrigants per aquest. Per què un cos cau a terra quan el deixes caure? Se sent el cos atret per la superfície? Aquestes eren preguntes que se solia plantejar la societat científica de l'època. Actualment coneixem dues interpretacions clares de la gravetat: la gravetat segons Newton i segons Einstein.

Tots els estudiants de física s'han creuat en algun punt amb la famosa g , els $9,8 \text{ m/s}^2$ que representen l'acceleració de la gravetat a la superfície de la Terra. Però, d'on ve aquesta acceleració? Com és que sigui $9,8 \text{ m/s}^2$? Bé, la gravetat no és res més que la intensitat que genera un camp gravitatori, és l'acceleració que li genera el camp gravitatori a un cos. Aquesta és la seva expressió matemàtica (vegeu annex 2, demostracions matemàtiques):

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

En aquesta equació es pot veure la g , que representa la intensitat del camp gravitatori en qüestió, la lletra G , la constant gravitacional ($6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$), la lletra M que representa una massa i la r , que representa la distància a la qual està el cos a estudiar.

2.1.1 Llei de la gravitació universal

Podríem definir Newton com el creador de la física clàssica i pare del càlcul infinitesimal. Newton va desenvolupar les primeres lleis del moviment, conegudes com les 3 lleis de Newton, que van donar origen al camp de la dinàmica, les lleis de l'òptica i la **lleis de gravitació universal**. Newton no només és reconegut per les seves 3 lleis de la dinàmica, sinó que també per la seva llei de gravitació universal. Segons



Fig. 22

Newton, la força gravitatòria és una força d'atracció que experimenten els cossos pel fet de tenir una massa determinada. És a dir, que l'atracció que senten dos cossos amb una massa determinada pot ser expressada com una força. Aquesta definició va ser denominada **lleï de la gravitació universal** i publicada l'any 1687 en el seu llibre *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Principis matemàtics de la filosofia natural). Newton va expressar aquesta definició de la llei mitjançant una expressió matemàtica:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

En aquesta es veu com la força gravitacional (F) és igual a la constant gravitacional (G) multiplicat pel producte de les dues masses (M i m) dividit pel radi entre aquestes dues elevat al quadrat (r^2). Així doncs, podem dir que **la força d'atracció és inversament proporcional al quadrat de la distància** (vegeu annex 2, demostracions matemàtiques).

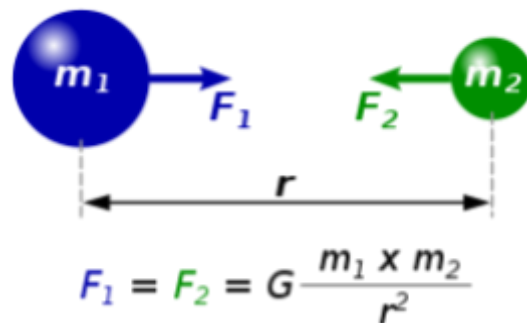


Fig. 23

Aquest científic va definir l'univers com un espai determinat i intuïtiu, és a dir, un espai en el qual tots els cossos que hi formen part poden ser previstos per càlculs matemàtics i en el qual el temps és fix.

A partir de la llei d'atracció gravitatòria es poden fer càlculs relacionats amb el moviment de satèl·lits al voltant de la Terra, o dels mateixos planetes al voltant del Sol, ja que es compleix el següent:

$$F_g = F_c$$

Aquesta equació simplement vol dir que la força gravitatòria és igual a la força centrípeta. Per tant:

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Amb aquesta equació també podem saber la velocitat orbital d'un planeta al voltant del Sol o d'un satèl·lit al voltant de la Terra o qualsevol planeta:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Però una òrbita d'un planeta del sistema solar no compleix amb les prediccions que dona aquesta teoria. Aquesta és l'òrbita del planeta Mercuri, el planeta més proper al Sol. Aquest error no ve donat del càlcul, sinó que el planeta té un moviment orbital estrany. Els astrònoms, després de fer els càlculs orbitals segons aquesta llei, van comprovar que la posició de Mercuri no era fixa. Aquesta posició canviava cada any, canviava un angle molt petit, de 5,75 segons per arc. No seria fins al segle XX que el físic teòric **Albert Einstein** va reformular l'equació numèrica d'aquesta llei aplicant-la a la teoria que va desenvolupar entre el 1905 i el 1916, la **teoria de la relativitat**.

2.1.2 Teoria de la relativitat

Com hem vist, durant el 1905 i el 1916 un home va revolucionar el món de la física publicant una sèrie de treballs en molt poc temps i, de la mateixa manera que ho va fer Newton, de manera autònoma. Aquest home era **Albert Einstein**. Podríem definir Albert Einstein com al pare de la física moderna, no només publicant treballs que fonamentarien algunes de les bases de la física estadística i la mecànica quàntica, sinó que va desenvolupar la física clàssica de segles anteriors. Aquella sèrie de treballs que hem anomenat al principi de l'apartat van ser publicats de manera única l'any 1916 com a teoria de la relativitat. Aquesta teoria es divideix en **relativitat especial** i **relativitat general**. Totes dues comparten una característica

comuna, i és que les dues intentaven explicar els misteris del cosmos, plantejant noves qüestions i maneres de calcular els esdeveniments que passen a l'univers.

- **Relativitat especial:** aquesta teoria es denomina així perquè pretenia estudiar el cas particular on l'espai-temps sigui un pla geomètric no corbat, és a dir, la relativitat especial no té en compte la gravetat com a variable.

En aquesta teoria, Einstein, a part d'altres descobriments, va donar dues conclusions molt importants, de fet diria de les més importants del món de la física.

- **La velocitat de la llum és, aproximadament, de 300.000 km/s = $3 \cdot 10^8$ m/s**
- **L'energia i la massa són equivalents.**

A part d'aquests descobriments, en la teoria especial de la relativitat Einstein arriba al descobriment de la dilatació del temps. Einstein va descobrir que a més velocitat, més lentament envelleix un cos, cosa que té relació amb l'efecte de la contracció de Lorentz.

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Segons aquesta expressió, el temps que experimentarà un cos dependrà de la velocitat que tingui aquest durant un període de temps (t') i de la proximitat que tingui aquesta respecta la de la llum. A velocitats més pròximes a la de la llum, més gran serà la dilatació temporal.

També es va donar el descobriment que l'univers en el qual vivim està format per 3 dimensions d'espai i una de temps. Aquesta teoria les va unificar donant així un univers de 4 dimensions que formaven el teixit anomenat com a espai-temps.

Aquesta teoria va significar un abans i un després en la física:

- Va eliminar la possibilitat que qualsevol cos o objecte pugui superar la velocitat de la llum, ja que, segons la teoria, per arribar a la velocitat de la llum, es necessita una energia infinita per accelerar el cos.
- L'equivalència entre massa i energia es va formular amb una equació: **$E=mc^2$** (vegeu annex 2, demostracions matemàtiques). Aquesta equació i equivalència va donar resultat a una conseqüència bona i una de dolenta. Per una part, va ser una peça clau per al desenvolupament de l'energia nuclear. Per altra banda, aquests coneixements van desembocar en la creació de la bomba atòmica.
- L'última gran aportació que va donar aquesta teoria és a l'**espín quàntic**. El 1927, el físic teòric Paul Dirac va deduir les equacions de l'espín quàntic de Pauli aplicant la teoria especial de la relativitat a les lleis de la teoria quàntica.

Abans hem vist que Einstein no va tenir en compte la curvatura de l'espai-temps. Però no es va quedar aquí. Einstein va desenvolupar aquesta teoria en una encara més complexa, la teoria de la relativitat general. En aquesta, sí que tenia en compte la curvatura de l'espai-temps.

- **Relativitat general:** Einstein va publicar l'article *Electrodinàmica de cossos en moviment* l'any 1905, any anomenat *annus mirabilis* (any miraculós), ja que va publicar un gran nombre d'articles en tot aquell any, cosa que pocs científics aconsegueixen fer. Després de publicar aquest document, Einstein sentia que la seva teoria estava incompleta, ja que només s'hi tenien en compte cossos sense acceleració, és a dir, amb velocitat constant.

En aquesta teoria, Einstein va tenir en compte l'acceleració de la gravetat i el que volia explicar amb ella és quelcom que Newton no va poder explicar. Què és el que causa la força d'atracció entre masses? En altres paraules, què és el que causa la gravetat?

La teoria general de la relativitat va donar lloc al descobriment teòric del següent fenomen:

- L'espai-temps no té una geometria plana, sinó que té una geometria corbada, explicant així l'atracció gravitatòria.

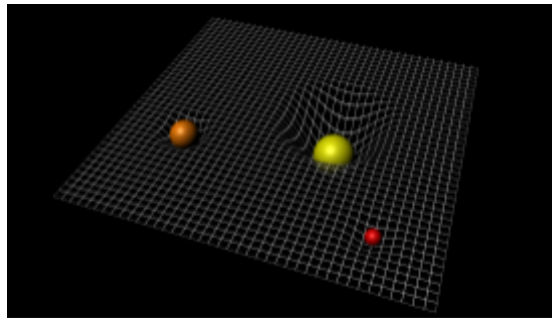


Fig. 24

Einstein va pensar en l'exemple d'un disc giratori. Quan la rentadora rota, per exemple, ho fa amb una certa acceleració. Aquesta és la causant que la roba quedi enganxada a la part exterior del tambor. Segons Einstein, a causa de l'efecte de contracció de Lorentz, el radi del disc s'ha d'escurçar com més ràpid gira. Tot i això, el radi del disc es manté constant. Perquè passi això, el disc ha d'adoptar una forma similar a la d'un plat.

Amb aquest descobriment, Einstein va arribar a la conclusió que el teixit de l'espai-temps actua com a un camp, en aquest cas, el camp gravitatori. Però, què és un camp? Un camp físic existeix quan en tots els punts d'una regió de l'espai hi ha present una determinada magnitud física. El camp gravitatori és un camp de forces, el qual es manifesta quan, en posar-hi una partícula, aquesta experimenta una força. De fet, és el que passa amb el camp gravitatori. Perquè el camp gravitatori presenti una curvatura es necessita una massa.

Amb aquesta curvatura podem explicar, també, la velocitat orbital dels planetes. Per què les velocitats orbitals de planetes com Júpiter o Saturn són més lentes que la de la Terra? Bé, la resposta és relativament senzilla. Com

es veu en la imatge anterior, una massa genera una certa curvatura. A més massa, més curvatura genera. Pensem la curvatura de l'espai-temps com un embut. Quan es deixa anar un objecte per un embut aquest tindrà una certa velocitat. Però, tindrà la mateixa velocitat en tota la superfície? La resposta és no. Aquest, a mesura que el radi disminueix, és a dir, a mesura que arriba al final del con, la seva velocitat augmenta. També es pot veure que, cada vegada que s'apropa al final de l'embut, el cos té un comportament més caòtic. Això és el que passa amb la curvatura de l'espai-temps. Un cos que estigui més proper a la massa que genera el camp, tindrà més velocitat. A més distància, més lentament orbitarà.

Com hem dit en aquest anterior paràgraf, com més proper està un cos de la massa que genera un camp gravitatori, aquest experimentarà un comportament més caòtic. Aquest és el cas de Mercuri, el planeta més proper al Sol. Amb la mecànica Newtoniana no es podia predir amb exactitud quina seria la posició del planeta a l'hora d'observar-lo. Mercuri orbitava de manera estranya. No va ser fins al 1915 que Albert Einstein va arribar a la conclusió que l'equació de Newton estava incompleta.

El problema amb l'òrbita de Mercuri estava en el seu periheli. Més concretament en la precessió d'aquest. Els observadors no aconseguien observar el que predeien les equacions de la mecànica newtoniana. Einstein va trobar la solució a aquest problema, amb una senzilla equació:

$$\delta = \frac{24\pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1-e^2)}$$

Aquesta equació relaciona el semieix major de l'òrbita de Mercuri (a), el període de l'òrbita de Mercuri (T) i l'excentricitat de l'òrbita de Mercuri (e). Amb aquesta equació Einstein va predir, amb exactitud, la precessió del periheli de mercuri: 43 segons d'arc per segle.

La teoria general de la relativitat va significar un canvi enorme envers la comprensió de l'univers. Va canviar la visió que es tenia sobre l'univers. En l'univers no governa una força que interactua entre cossos, sinó que és la mateixa geometria de l'espai-temps la que provoca el moviment dels planetes i cossos en l'espai.

2.2 Òrbites (definició)

Durant la història, l'ésser humà s'ha preguntat com es mouen els planetes en la immensitat de l'espai. Com és que aquests cossos es mouen de manera "circular" i no surten disparats? Per què aquests no canvien exageradament el seu moviment? Com pot ser que ocupin, aproximadament, el mateix *pla orbital*? I és que aquest moviment que descriuen els planetes es podria definir com a òrbita. Aquestes òrbites es van formar en el naixement del sistema solar, però d'això en parlarem en el següent apartat, quan descrivim el que és un sistema planetari i la història del sistema solar. Podríem definir una òrbita com un camí recorregut per un giny (entenent giny com a objecte o cos) espacial, quan és periòdic i aparentment tancat.

2.2.1 Geometria de les òrbites (Lleis de Kepler)

L'any 1600 un jove home anomenat Johannes Kepler va ajudar en un treball del matemàtic Tycho Brahe, el qual va recopilar dades sobre la posició de planetes en el cel. A partir de la mort d'aquest, Kepler, amb les dades obtingudes de Tycho Brahe, va intentar obtenir l'òrbita circular de Mart. Però Kepler es va trobar amb un problema, i és que cap cercle s'ajustava a les mesures del matemàtic. Kepler, envers aquesta adversitat, va trobar que, utilitzant el·lipses, les mesures s'ajustaven perfectament amb les observacions. D'aquesta manera és com van sorgir les lleis de Kepler.

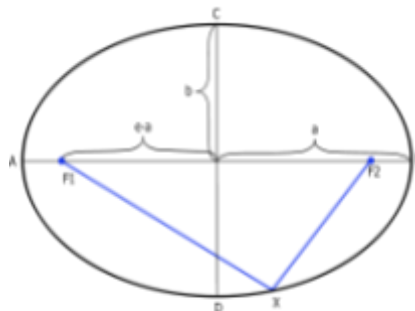


Fig. 25

Una el·lipse es podria descriure, molt senzillament, com un cercle aplanat, és a dir, no és un cercle perfecte, sinó que està estirat. Com es pot veure en la imatge anterior, una el·lipse consta de diversos punts que ens ajudaran a entendre les lleis de Kepler. En aquesta podem veure un punt central de l'el·lipse. Trobem els dos focus de l'el·lipse, F_1 i F_2 , que estan separats del centre per la distància anomenada c . També podem observar que aquesta el·lipse està ancorada a un eix de coordenades, amb els eixos x i y . Al límit d'aquests eixos trobem els 4 punts límits de l'el·lipse, 2 a l'eix de les x i 2 a l'eix de les y . Com es pot observar, no formen un cercle. Observem que del centre c al límit de l'el·lipse B trobem la variant a . Aquesta variant pot ser descrita com la distància entre el centre de l'el·lipse i un dels límits de l'eix x de l'el·lipse. Es coneix $2a$ com a la distància entre els dos punts límits de l'eix x . També trobem la distància b , distància entre c i un límit de l'eix de coordenades y .

- a : semieix major
- b : semieix menor
- c : semidistància focal
- $a^2 = b^2 + c^2$
- $F(c, 0)$

En aquest exemple podem veure que hi ha un punt x en la superfície de l'el·lipse. Amb aquest podem deduir l'expressió algebraica de l'el·lipse, utilitzada en la primera llei de Kepler (vegeu annex 2, demostracions matemàtiques).

2.2.1.1 Primera llei de Kepler

La primera llei de Kepler estableix que tots els planetes es mouen al voltant del Sol descrivint una trajectòria el·líptica. Aquesta primera llei té com a expressió matemàtica la mateixa que les el·lipses:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

En aquesta expressió es veuen dues variants de l'eix de coordenades x i y , les quals són, bàsicament, dues coordenades d'un punt. També es poden observar dues

variants més, a i b . Aquestes són la representació algebraica del semieix major i menor, respectivament.

Igualment, en la primera llei de Kepler va ser descrita la manera de calcular l'excentricitat d'una el·lipse, que és la mesura de la distància a la qual es troben els focus de l'el·lipse del centre. Aquesta és la seva expressió matemàtica:

$$e = \frac{c}{a}$$

En aquesta podem veure que l'excentricitat (e) d'una el·lipse és igual a la distància del focus al centre (c) dividit pel semieix major (a).

2.2.1.2 Segona llei de Kepler o llei d'àrees

La segona llei de Kepler ens dona informació sobre la velocitat a la qual es desplaça un planeta. Segons la web Fisicalab.net en el seu article sobre les lleis de Kepler, tenim un requisit que s'ha de complir: *La recta que uneix el planeta amb el Sol escombra àrees iguals en temps iguals*. Perquè això passi, la velocitat del planeta ha d'augmentar a mesura que s'apropa al Sol. Com hem vist en apartats anteriors, aquest requisit es compleix gràcies a la llei de gravitació universal, ja que quan la distància entre les dues masses és cada vegada més petita, la força d'atracció és més elevada, augmentant així la seva velocitat.

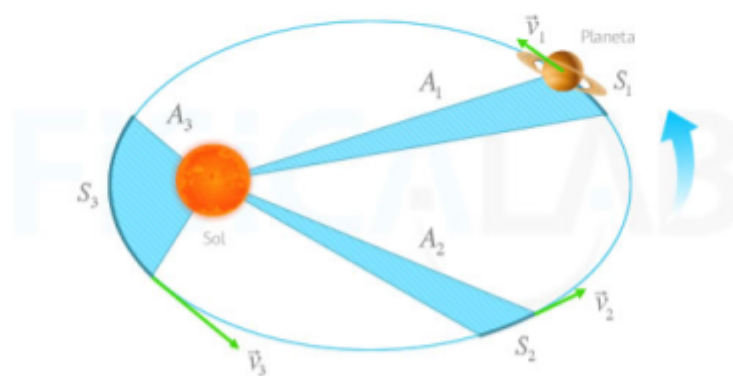


Fig. 26

En aquest exemple es pot veure com la velocitat 1 ($\bar{v}_1$) és inferior a la velocitat 2 ($\bar{v}_2$) i aquesta a la vegada inferior a la velocitat 3 ($\bar{v}_3$).

$$(\bar{v}_1 < \bar{v}_2 < \bar{v}_3)$$

La velocitat a la qual es mou un planeta s'anomena velocitat areolar (v_A). Segons la segona llei de Kepler, aquesta és constant. L'expressió algebraica d'aquesta velocitat és la següent:

$$v_A = \frac{dA}{dt} = \text{constant}$$

En aquesta expressió podem observar una variable que no s'havia vist abans, la derivada d'A. A prové d'una sèrie més de variants. En un instant, és a dir, un diferencial de temps dt , el planeta tindrà un desplaçament dr . Aquesta distància, a part de variar pel temps, variarà per la posició en la qual estigui el planeta, representada pel vector de posició d'aquest ($\bar{u}$). Així doncs, el desplaçament serà igual al producte entre el vector de posició i l'increment que s'estudiï. És a dir,

$$d\bar{r} = \bar{u} \cdot dt$$

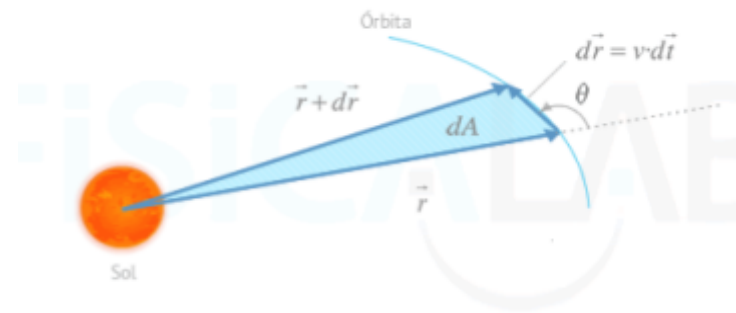


Fig. 27

Com es veu en la imatge, el vector $\bar{r}$ i el vector de desplaçament $d\bar{r}$ formen un paral·lelogram, l'àrea del qual és el doble que dA . Com es veu en la imatge, dA és la meitat d'aquesta àrea, formant el triangle representat. També es veu que hi ha un angle representat (θ), i és que aquest angle diferencia l'el·lipse d'un cercle. **La segona llei de Kepler estableix que la v_A roman constant al llarg del recorregut orbital.** Amb l'equació de v_A es pot estudiar l'àrea. Sabem que el mòdul del

producte vectorial dels dos vectors és l'àrea del paral·lelogram que formen, és a dir, $\vec{r} \cdot \vec{v}$. Tenint en compte que l'angle θ és l'angle que formen aquests dos vectors podem deduir la següent expressió:

$$r \cdot v \cdot \sin(\theta) = |\vec{r} \cdot \vec{v}|$$

Si estudiem dues àrees de l'òrbita d'un planeta i sabent que aquestes seran iguals, podem deduir una expressió que serviria per explicar que l'àrea no varia a mesura que un planeta orbita. Seria la següent expressió matemàtica:

$$r_1 \cdot v_1 \cdot \sin(\theta_1) = r_2 \cdot v_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

En el cas en què la trajectòria del planeta fos aproximadament circular, és a dir, que tingués una excentricitat aproximada a 0, com és el cas de la Terra que té una excentricitat de 0,0167, voldrà dir que $\theta \approx 90^\circ$ en qualsevol punt i que les velocitats 1 i 2 (v_1 i v_2) seran iguals, trobant-nos un moviment circular uniforme.

2.2.1.3 Tercera llei de Kepler

Aquesta llei relaciona els períodes dels planetes (quant tarden a fer una volta completa al Sol) amb els seus radis mitjans. Per això és coneguda com a llei dels períodes. La seva expressió matemàtica és la següent:

$$T^2 = kr^3$$

Per entendre-ho millor, donarem l'expressió matemàtica com a descripció escrita. El quadrat del període orbital (T) és igual o proporcional al producte entre la constant de proporcionalitat (k) i el cub del radi mitjà del planeta al Sol (r) (vegeu annex 2, demostracions matemàtiques).

3. Sistema planetari

3.1 Definició

Conceptualment, un sistema planetari és un conjunt de planetes que orbiten al voltant d'un estel, per exemple, el sistema solar, un grup de 7 planetes orbitant a una estrella, el Sol. Però, encara que tinguem aquesta definició tan fixada i extensa durant la història moderna, com és que estan en constant rotació? Quin és l'origen d'aquest moviment?

3.2 Formació

Han existit diverses teories durant el temps que van intentar explicar la formació del sistema solar i altres sistemes planetaris, però van ser descartades per la comunitat científica. Actualment coneixem una teoria que s'adequa a la formació de sistemes planetaris. Podem dividir la formació d'un sistema solar en 6 fases:

- **Col·lapse del núvol interestel·lar:** els sistemes planetaris s'originen en grans núvols moleculars, que contenen un 98% d'hidrogen, heli i liti, i un 2 % d'elements com el carboni, l'oxigen, el nitrogen o el ferro. Aquests núvols es caracteritzen per tenir una densitat i temperatura baixa. En el seu centre s'originen les primeres estrelles, massives i amb un temps de vida curt. Aquestes estrelles causen una supernova en morir, generant una ona expansiva que fa que les molècules del núvol es concentrin al centre, formant una concentració gasosa central, de la qual en sorgeix l'estrella del sistema. Aquesta fase dura entre 0,1 i 1 milió d'anys.
- **Formació de planetesimals:** els planetesimals són la versió més primitiva dels actuals planetes. Aquests es van formar mitjançant l'acreció de grans de matèria deguda a xocs i fusions. Aquestes partícules s'agrupen fins a arribar a l'estat de planetesimal. Al final d'aquesta fase, que dura aproximadament 1 milió d'anys, podem trobar-ne milers, de planetesimals.
- **Formació d'embrions planetaris:** els embrions planetaris es formen mitjançant el xoc de planetesimals, fonent-los en un sol cos, l'embrió. En el cas en què es fonen, la massa d'aquests augmenta, provocant que la

interacció gravitatòria sigui major, és a dir, augmentarà el seu camp gravitatori, causant cada vegada més impactes. A partir del punt en què els cossos adquireixin masses de la Lluna o Mart se'ls pot denominar embrions planetaris. Cal dir que durant aquests períodes del sistema, les òrbites són molt caòtiques, fent que molts planetes surtin disparats del sistema inicial. Aquest caos fa que l'excedent d'embrions sorgits disminueixi, ja que, com he dit, alguns són expulsats fins que s'adquireix un estat d'equilibri. Aquesta fase dura entre 1 a 10 milions d'anys aproximadament.

- **Formació del primer planeta gegant:** el sistema planetari inicial té una zona on es concentra més gel que pols. Aquesta és una zona rere una línia de gel. En aquesta zona és on es pot formar un planeta gegant. Aquests es donen mitjançant la fusió d'embrions planetaris, obtenint una massa molt més gran. Es genera molta calor a causa de xocs, permetent que aquest cos adquireixi una brillantor similar a la de l'estrella. Aquest pot arribar a alterar el disc, obrint un espai que s'emplenarà de gas per la pressió d'aquest. Es generen normalment en estrelles de metal·licitat moderada o alta. Aquesta fase dura entre 1 i 10 milions d'anys aproximadament.
- **Formació de planetes rocosos:** els planetes rocosos són aquells que es formen en l'interior de la línia de gel, on la quantitat de gas és menor a la de pols. Aquests es van formar mitjançant la fusió de planetesimals i embrions compostos per substàncies poc volàtils. Algunes d'aquestes fusions van ser expulsades. L'òrbita d'aquests era molt excèntrica, en un principi, però es va suavitzar. Existeixen dues hipòtesis de com va ocórrer: una que diu que la força estabilitzadora provenia del gas que envoltava aquests planetes o que aquesta força era originada per altres planetesimals i objectes menors. Aquesta fase dura entre 10 i 100 milions d'anys aproximadament.

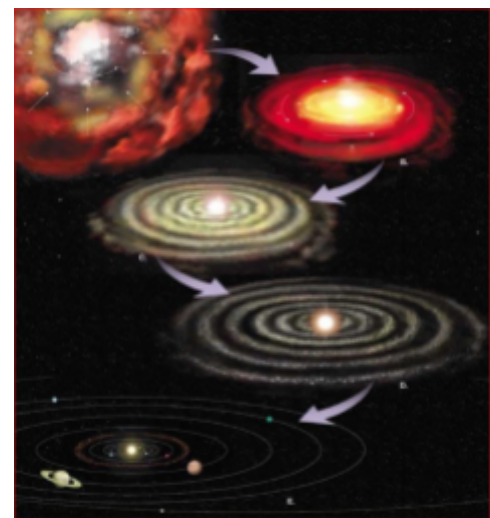


Fig. 28

- **Eliminació del gas restant i dispersió de planetesimals:** en un sistema planetari la influència gravitatòria dels planetes gegants (en el nostre cas Júpiter) permet que els planetesimals siguin expulsats del sistema planetari. Aquesta fase dura entre 50 i 1000 milions d'anys.

3.2.1 Els cossos d'un sistema planetari

Per entendre un sistema planetari, hem de saber els elements que el formen. En aquests, no només hi ha planetes orbitant a l'estrella central. A part dels planetes, un sistema planetari està compost per altres elements. En aquest apartat explicarem les diferències entre aquests.

- **Planeta:** segons la UAI en la redefinició de planeta del 24 d'agost de 2006, un planeta és un cos esfèric que orbita al voltant del Sol i que exerceix una dominació orbital, és a dir, haver eliminat els objectes de la seva òrbita.



Fig. 29

Hi ha objectes que tenen una descripció similar a la d'un planeta, però com es diferencien?

- **Planeta nan:** aquests objectes són descrits com un planeta, però no com els 8 clàssics planetes. No són considerats en si un planeta com aquests, ja que la seva massa no ha estat suficient elevada per tenir una influència gravitatòria suficient per a exercir una dominació orbital, és a dir, ser l'única massa de la seva òrbita sense que hi hagi asteroides o altres cossos. Tenim el conegut exemple de Plutó.



Fig. 30

- **Satèl·lits:** objectes similars als planetes, menors a un planeta nan i que orbiten al voltant d'un planeta. Pot haver-hi diversos satèl·lits per planeta, com és el cas de Júpiter o Saturn. Podem diferenciar els satèl·lits naturals, com la Lluna, i els satèl·lits artificials, com l'Sputnik 1.

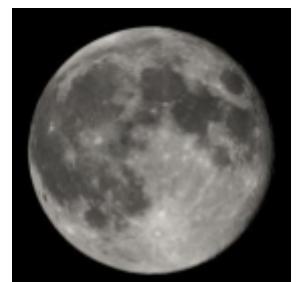


Fig. 31

- **Asteroides:** són objectes rocosos menors que un planeta i un satèl·lit i que no estan atrapats en la gravetat d'un planeta. Les mides i formes dels asteroides són molt variada. En el sistema solar hi ha dos cinturons d'asteroides: el cinturó principal d'asteroides, entre Mart i Júpiter, i el cinturó de Kuiper, a l'exterior del sistema solar.



Fig. 32

- **Cometes:** són cossos que presenten un nucli sòlid de glaç format per aigua i amoníac barrejat amb pols i fragments de roca. Aquests objectes giren al voltant de la nostra estrella, el Sol, amb òrbites molt excèntriques. Un cometa conegut és el cometa Halley.



Fig. 33

3.3 Tipus de sistemes planetaris

Al llarg del segle XX s'han descobert diversos tipus de sistemes planetaris diferents del nostre sistema. En aquest apartat explicarem aquests sistemes diferents del sistema solar.

3.3.1 Sistemes planetaris extrasolars

Un sistema planetari extrasolar, com el seu nom indica, és qualsevol sistema planetari fora del sistema solar. Sobre aquests sistemes se'n tenen hipòtesis des del segle XVII, però no va ser fins que Bruce Campbell, G.A.H. Walker i S. Yang (1988) van publicar un article que trobaven evidències de planetes fora el sistema solar orbitant estrelles properes. G.A.H. Walker i S. Yang, amb altres científics (1995) van publicar un article en el qual afirmaven descobrir el primer exoplaneta, 51 Peg b. Aquest orbitava a una estrella anomenada 51 Pegasi. Amb aquest descobriment es va obrir la porta a un nou camp d'investigació, la investigació dels exoplanetes i sistemes extrasolars. En l'actualitat han estat detectats 4158 exoplanetes, 3264 confirmats.

3.3.2 Sistemes estel·lars múltiples

Segons James Mullaney en el seu llibre *Double and Multiple Stars and How to Observe Them* (2005), aquests sistemes estel·lars són aquells sistemes en què dues o més estrelles estan en proximitat en l'espai en què són vistes, a ull nu, amb

binoculars o amb telescopi, com una entitat única. Aquestes estrelles orbiten entre si mitjançant l'atracció gravitacional. En aquesta definició s'exceptuen els grups d'estrelles que es veuen en una mateixa línia de visió, però que realment estan separades en l'espai. Hi ha dos sistemes estel·lars que predominen en l'univers: els sistemes estel·lars de dues i tres estrelles.

Com hem dit anteriorment, aquests sistemes poden ser de dues o més estrelles. En el cas en què el sistema consti de dues estrelles s'anomena sistema d'estrelles dobles o binàries. Ara bé, existeixen exoplanetes que orbiten a sistemes d'estrelles dobles? La resposta és que sí, existeixen exoplanetes que orbiten a sistemes estel·lars múltiples. Aquests exoplanetes s'anomenen planetes circumbinaris. Segons un estudi de Raúl A. Henríquez de la Universitat del Salvador (2017), les òrbites dels planetes circumbinaris es poden dividir en dos tipus: tipus S i tipus P.

- **Tipus S:** les òrbites tipus S són aquelles en les que el planeta es comporta com un satèl·lit, és a dir, orbita a una de les dues estrelles.
- **Tipus P:** aquestes són en les que el planeta orbita al voltant de les dues estrelles, és a dir, com un planeta.

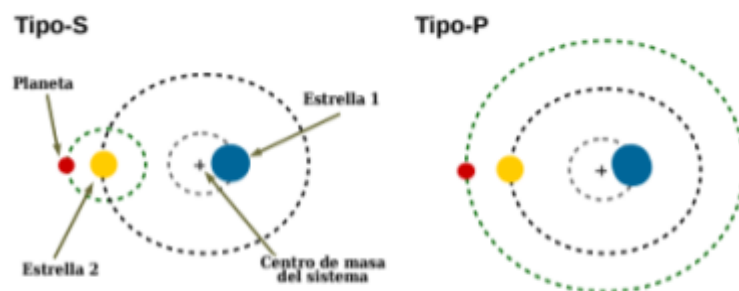


Fig. 34

Anteriorment hem parlat sobre sistemes estel·lars de tres estrelles. Aquests són sistemes on les estrelles orbiten el centre de massa del sistema. Segons Isaacphysics.org, una web dedicada a l'ensenyament de la física, el centre de massa o centre gravitacional d'un sistema és el punt des del qual actua tot el pes de l'objecte. Com en els sistemes binaris, també poden tenir exoplanetes orbitant al voltant de les estrelles. Poden ser, de la mateixa manera, de tipus P o S. Segons els

autors F. Buseti i C. Harley, de la Universitat de Witwatersrand, i H. Beust de la Universitat de Grenoble Alpes, el o els planetes orbitarien com un satèl·lit a una de les estrelles o a les dues estrelles principals o al sistema sencer, de manera planetària.

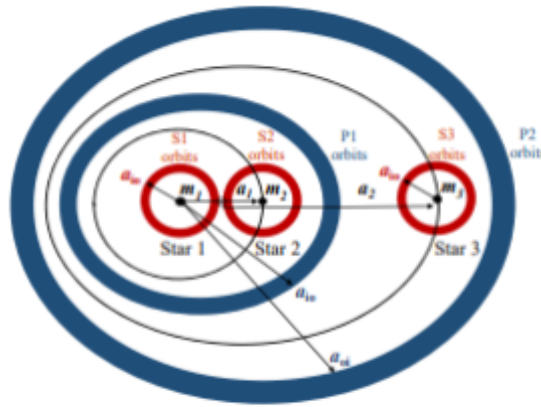


Fig. 35

3.4 Sistema solar

3.4.1 Història

El sistema solar és un sistema planetari que s'estima que es va formar fa 4.600 milions d'anys. Aquest, com hem explicat en apartats anteriors, es va formar com qualsevol sistema planetari, partint d'una supernova fins a la formació d'un disc envoltant l'estrella. Els primers protoplanetes van tardar a formar-se entre 10 i 100 milions d'anys. A partir d'aquí es van donar col·lisions fins a arribar als planetes de l'actualitat.

3.4.2 Teories sobre l'estructura del sistema solar

Des dels temps de l'antiga Grècia, la humanitat s'ha plantejat el seu espai en la infinitat de l'univers. Durant aquest temps s'han introduït diverses teories sobre l'estructura del sistema solar i moviment de les òrbites dels planetes que ens envolten. En aquest apartat explicarem en què consistien aquestes teories i qui les va proposar. Parlarem de la teoria geocèntrica i l'heliocèntrica i com es plantejaven les òrbites planetàries al llarg de la història.

- **Teoria geocèntrica:** aquesta teoria situa al planeta Terra en el centre de l'univers. Els planetes que es coneixien en l'època, la Lluna i el Sol orbitaven al seu voltant circularment. Aquesta teoria va ser formulada per Aristòtil i va ser vigent fins al segle XVI. Claudi Ptolemeu, en el seu llibre *L'Almagest* del segle II aC, va introduir els epicicles^[4], equants^[5] i deferents^[3].

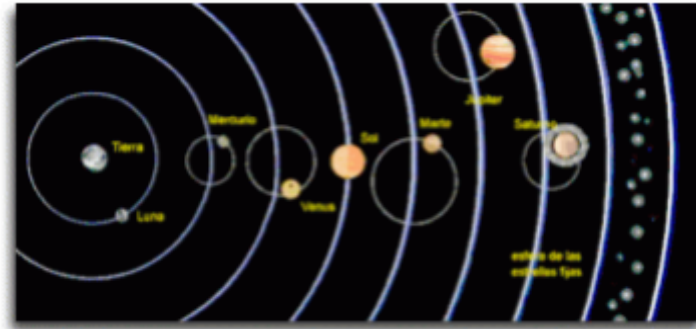


Fig. 36

- **Teoria heliocèntrica:** aquesta teoria diu, a diferència de l'anterior, que el Sol és el centre del sistema solar. Al voltant d'aquest hi orbitaven, de manera circular, els planetes i satèl·lits coneguts de l'època. Abans de conèixer l'autor principal d'aquesta teoria, cal mencionar el treball d'Aristarc de Samos, un astrònom grec que va donar el primer model heliocèntric. Aquesta teoria va ser proposada per Nicolau Copèrnic amb la publicació l'any 1543 del seu llibre *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. En aquest, Copèrnic sosté el Sol com el centre del sistema solar. Aquest és el model de sistema solar que s'adequa a la realitat i el que se sosté fins al dia d'avui, però amb petites diferències de com ho plantejava Nicolau Copèrnic.

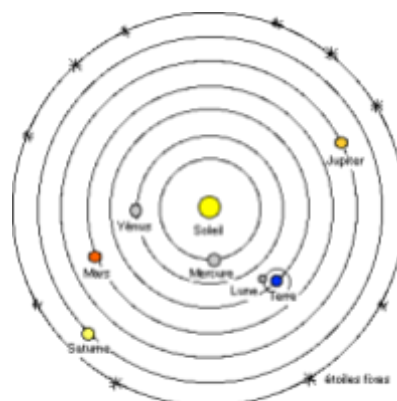


Fig. 37

En aquestes dues teories es pot observar com en el final dels sistemes trobem un espai únic per estrelles fixes. Aquest espai va ser inclòs pel fet que en aquella època es pensava que les estrelles observades en el cel eren fixes. Posteriorment es va descobrir que els estels observats en el cel no eren fixos, ja que es necessitava un mesurament precís.

Un altre aspecte a marcar és que, amb els coneixements actuals, sobretot els adquirits a partir de relativitat general i especial i el coneixement de la geometria tridimensional, sabem que les òrbites planetàries de qualsevol sistema, fins i tot de qualsevol objecte al voltant d'una galàxia, no són òrbites circulars en un pla bidimensional. Principalment, ja que es va demostrar amb els estudis de Kepler, mencionats en anteriors apartats, que les òrbites no eren circulars sinó el·líptiques. Seguidament, derivat dels estudis del segle XX i de la geometria tridimensional en l'espai, DjSadhu va proposar el 2012 una idea no convencional, en les seves pròpies paraules, del sistema solar. El va anomenar model de l'hèlix. Aquest va ser desmentit per la comunitat científica anys posteriors de la publicació de DjSadhu.

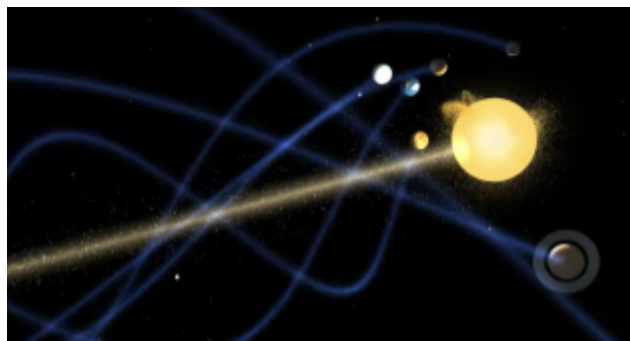


Fig. 38

4. Estrelles dobles

4.1 Definició

La definició simple d'estrelles dobles o binàries són dues estrelles que orbiten entre si. Però, és realment tan simple? La resposta és que depèn, ja que hi ha diversos tipus de sistemes dobles. D'aquests en parlarem en l'apartat 3.3, on diferenciarem els diversos tipus. Però, per completar la informació del principi, seguim amb una definició que va donar María Kaulen en el seu article *¿Como se forman las estrellas binarias?* (2019). Va definir les estrelles binàries com dues estrelles que formen un sistema estel·lar on cada una d'aquestes orbita un centre de gravetat comú. Mitjançant la primera llei de Kepler també se sap un altre detall important sobre les estrelles dobles i és que, en el cas que els planetes orbitin les dues estrelles, aquestes ocupen el lloc dels dos focus (ocupen aquest espai en el moment en què es forma el sistema).

4.2 Funcionament i vida

Segons James Mullaney en el seu llibre *Double and Multiple Stars and How to Observe Them* (2005) podem diferenciar dues teories per les quals les estrelles binàries es poden formar, la teoria de la captura i la teoria de fissió.

- **Teoria de la captura:** aquesta teoria diu que dues protoestrelles es desenvolupen individualment fins a arribar a ser estrelles. Aquestes dues viatgen de manera solitària fins que els seus camps gravitacionals atrapen les estrelles fent que orbitin entre elles. D'aquesta manera es formarien estrelles dobles amb una separació àmplia.
- **Teoria de fissió:** aquesta teoria explica la formació d'estrelles binàries però tenint com a origen un mateix protoestel. Aquest protoestel té un spin massa ràpid per arribar a formar una estrella adulta. Per això, es divideix. D'aquesta manera es formarien estrelles dobles amb una separació relativament baixa.

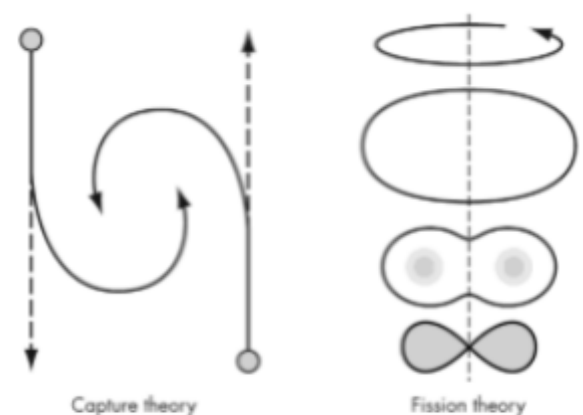


Fig. 39

En aquestes teories hem vist com en una es formen amb una separació àmplia i en una altra es formen amb una separació relativament baixa. Aquestes distàncies es mesuren per un ranc d'entre 10 i 50 unitats astronòmiques (AUs). Per tenir una referència mínima, 1 AU és la distància de la Terra fins al Sol. Cal afegir que existeixen teories en mecànica orbital que diuen que sistemes dobles amb una distància de separació àmplia podrien evolucionar a sistemes dobles de separació relativament baixa.

Durant la vida dels sistemes dobles les dues estrelles evolucionaran de manera individual, és a dir, cadascuna d'aquestes seguirà el seu procés evolutiu. Tot segueix normal fins que una de les estrelles arriba al punt d'evolucionar a una gegant fins que col·lapsi i finalment arribar a l'estat de nana blanca. A partir d'aquí aquesta nana blanca comença a absorbir el material que compon l'altra estrella que conforma el sistema, una estrella de seqüència principal que ha evolucionat a una gegant. Finalment, la nana blanca ha absorbit tant material que col·lapse resultant en una supernova tipus 1a. L'altra estrella del sistema queda com un remenat de la gegant que va ser anteriorment.

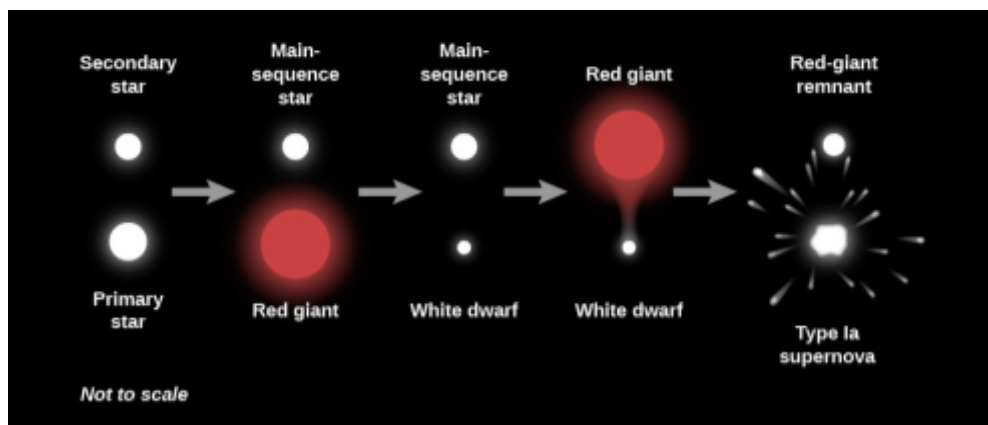


Fig. 40

4.3 Diferents tipus d'estrelles dobles

4.3.1 Òptiques i físiques

Per lògica podem definir els sistemes estel·lars dobles com a sistemes físics, estrelles de les quals estan relativament pròximes i que s'atrauen per mitjà

d'atracció gravitatòria. Aquestes serien les estrelles binàries conegudes com a estrelles físiques, ja que en si són un sistema físic. Però, pot ser que algun d'aquests sistemes no sigui el que sembli? En altres paraules, pot ser que quelcom d'aquests sistemes siguin només resultat de la nostra perspectiva? Efectivament, les estrelles dobles òptiques són estrelles que semblen formar un sistema doble, però, que en realitat, estan separades per tals distàncies que no estan relacionades entre elles.



Fig. 41

4.3.2 Parells CPM

Els parells CPM (*common proper motion*) són sistemes dobles d'estrelles que estan separades per grans distàncies, però que estan relacionades mitjançant la seva atracció gravitatòria. S'ha demostrat que estan relacionades a causa de les seves velocitats radials, que els dona un moviment orbital molt lent en relació amb el seu centre de massa.

Marc Davis, Piet Hut i Richard A. Muller van publicar un article titulat *Extinction of Species By Periodic Comet Showers* (1984) que donava la hipòtesi que la nostra estrella, el Sol, formés part d'un sistema d'aquest tipus. En aquest cas, una nana marró estaria orbitant al Sol a 1,5 anys llum. Segons aquesta hipòtesi, la nana marró anomenada Nemesis entraria al núvol d'Oort cada 27 milions d'anys (aproximadament), provocant una pluja de cometes que explicaria les extincions massives que s'han donat en el nostre planeta els passats milions d'anys.

4.3.3 Binàries visuals

Les binàries visuals conformen un sistema de dues o més estrelles que són visibles mitjançant un telescopi i que presenten un moviment orbital definit mentre orbiten al voltant del seu centre de gravetat. El seu període pot variar entre un parell d'anys, fins a un parell de segles. Normalment, es tarda 10 o més anys per veure un moviment orbital mínim si es visualitzen sense aplicar mesures i utilitzant aparells poc professionals.

Tot i això, com a tota àrea de la ciència, hi ha excepcions. Una d'elles és Rasalgethi, un sistema binari format per α Herculis i α Her. Aquest sistema va ser descobert per l'astrònom William Herschel l'any 1782. És un dels sistemes més ràpids pel que fa a l'observació amb aparells no professionals i té un període aproximat de trenta-quatre anys.

Les binàries visuals amb períodes més curts es poden observar mitjançant diverses tècniques. Aquestes tècniques són: interferometria, astrometria i espectroscòpia.

- **Binàries interferomètriques:** com el seu nom indica, aquestes són les binàries detectades mitjançant interferometria. En la interferometria s'utilitzen els efectes de la interferència (o difracció) d'una ona de llum. Normalment no s'utilitza només un detector, sinó que s'utilitza més d'un per tenir més precisió a l'hora de determinar el resultat de la detecció.

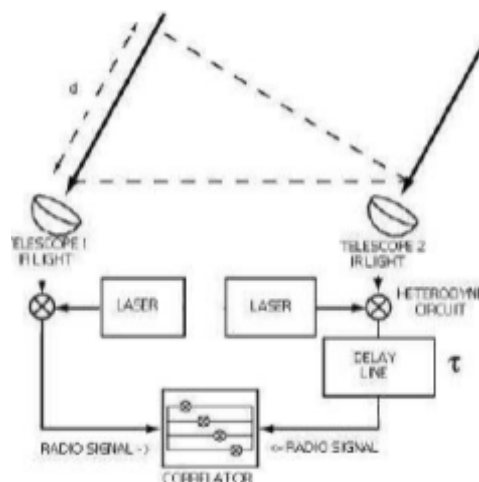


Fig. 42

El resultat serà la suma entre les dues deteccions dels telescopis. Aquestes es posaran en comú en un dispositiu (anomenat en la imatge *correlator*).

- **Binàries astromètriques:** com el seu nom indica, les binàries astromètriques són aquelles que són detectades mitjançant astrometria. L'astrometria és un camp de l'astronomia que es dedica a mesurar les posicions i separacions de les estrelles del cosmos amb una alta precisió. Per determinar les posicions i separacions entre astres utilitzen mètodes observacionals com la paral·laxi trigonomètrica i mètodes de càlcul. El resultat per sistema doble s'expressa de la següent manera:

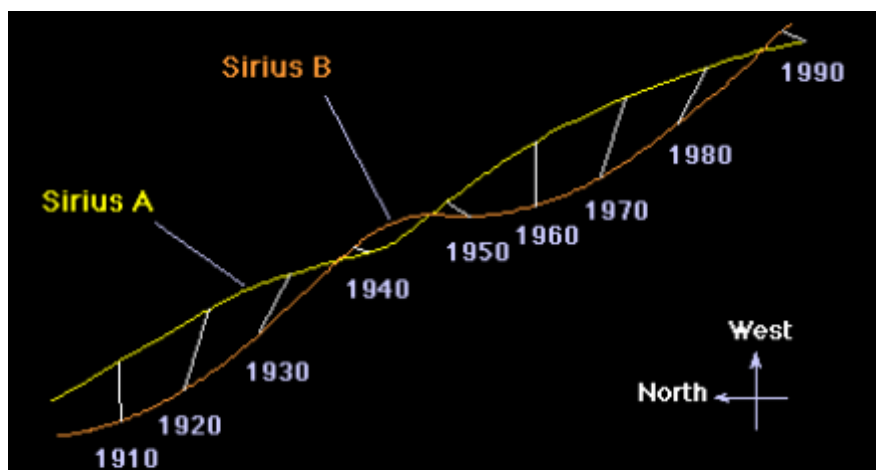


Fig. 43

- **Binàries espectroscòpiques:** com el seu nom indica, les binàries espectroscòpiques són un tipus de sistema doble que es detecta mitjançant les línies de l'espectre que reveli l'estrella. Com més a prop de la Terra estigui una estrella d'aquest sistema, les línies del seu espectre es mostraran cap al blau. En canvi, quan aquesta s'allunyi de la Terra, les línies del seu espectre es mostraran cap al vermell.

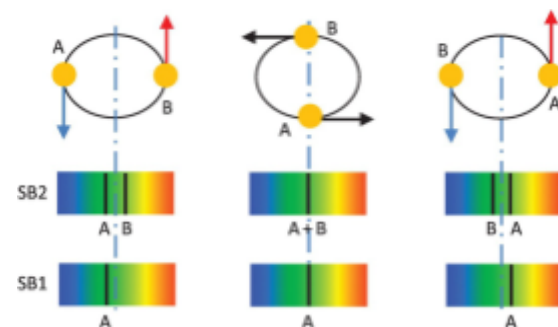


Fig. 44

4.3.4 Binàries eclipsants

La definició per aquest tipus de sistema és el següent: un sistema binari eclipsant és aquell sistema, el pla orbital del qual és tan proper a la nostra línia de visió, vist des de la Terra, que una vegada cada òrbita, un dels astres eclipsa l'altre. Es detecten mitjançant el seu registre de llum, com es veu en la imatge següent:

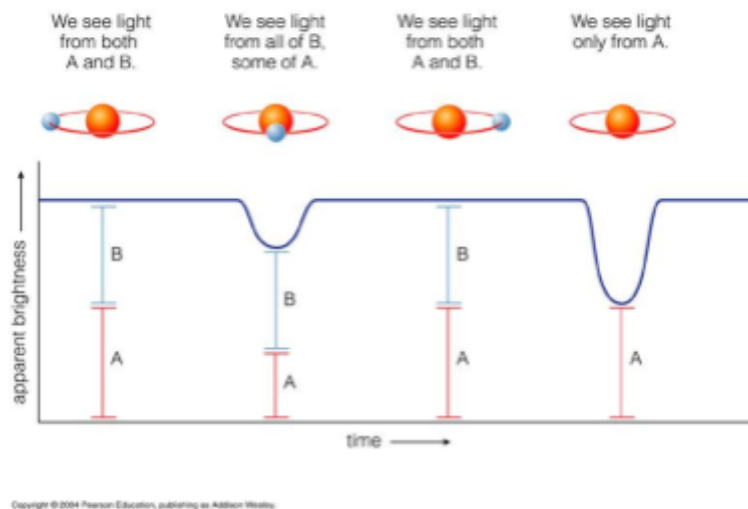


Fig. 45

Hi ha tres tipus de binàries eclipsants: el tipus Algol, Beta Lyrae i W Ursae Majoris.

- **Tipus Algol:** en aquest tipus de sistema eclipsant les dues estrelles estan tan separades que no distorsionen la seva forma. Com la seva forma no canvia són esfèriques i es detecten mitjançant el seu registre de llum, depenent de si una estrella cobreix l'altre.
- **Tipus Beta () Lyrae:** en aquest tipus de sistema eclipsant o bé les dues estrelles es poden trobar amb formes el·lipsoïdals, o bé poden distorsionar-se entre elles, ja que la distància que les separa és relativament poca.

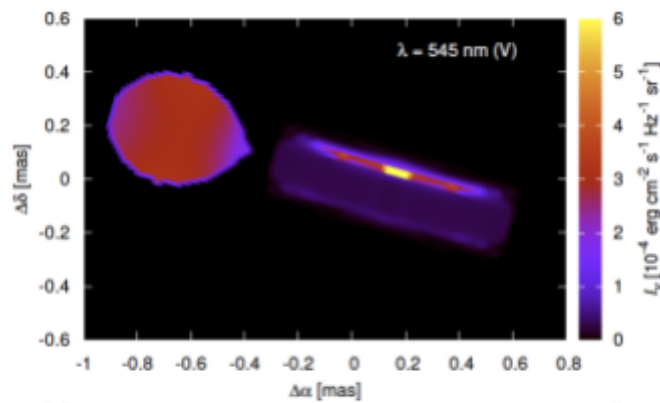


Fig. 46

En el diagrama anterior es pot veure com s'està transferint la massa d'una estrella a l'altre. També es pot observar com l'estrella principal, situada a l'esquerra, es distorsiona a causa de la poca distància que hi ha entre elles. Finalment, podem observar com s'ha format un disc al voltant de l'estrella secundària, situada a la dreta. Aquest disc és anomenat disc d'acreció i és la matèria que es transfereix de l'estrella principal a la secundària.

- **Tipus W Ursae Majoris:** en aquest tercer tipus de sistema eclipsant les atmosferes de les dues estrelles, masses de les quals són similars, es troben en contacte. Això és causat per la curta distància que separa les dues estrelles.

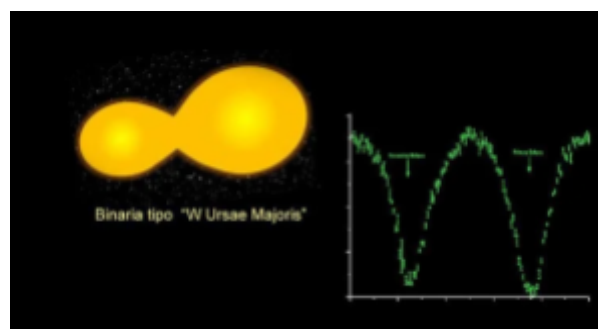


Fig. 47

Finalment, podem observar com entre les dues estrelles hi ha hagut una transferència de massa, i és que aquesta és una de les característiques d'aquests sistemes. Com la seva distància és tan poca i a més estan en contacte, es dona una transferència de masses.

4.3.5 Sistemes d'estrelles múltiples

Un sistema d'estrelles múltiples, com el seu propi nom indica, és un sistema on es dona un moviment orbital entre més d'una estrella. Aquí entren els sistemes binaris, però també sistemes, amb tres, quatre, cinc o més estrelles. Hi pot haver dos tipus de sistemes múltiples. Un tipus és en el que es formen parells d'estrelles que no interactuen amb altres parells. Aquest tipus es pot entendre molt fàcilment amb un sistema quàdruple.

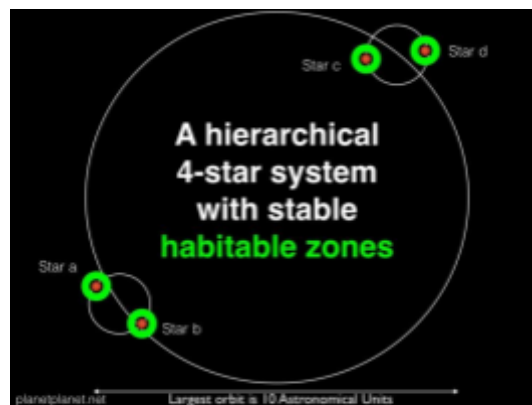


Fig. 48

En aquest cas es pot veure com les 4 estrelles s'agrupen en 2 parells. Es pot observar que les estrelles de cada parell no interaccionen amb les altres dos, individualment, ja que col·lectivament es pot veure com els dos parells orbiten entre si.

El segon tipus de sistemes múltiples és més senzill d'entendre que l'anterior. En aquest tipus de sistemes, els components que formen el sistema, és a dir, el nombre d'estrelles que el formen, es troben a tan curta distància que interactuen entre si. No només això. També es creu que poden canviar de parelles, com si es tractés d'una dansa.

4.3.6 Binàries cataclísmiques

Les binàries cataclísmiques són molt similars a un tipus de binàries eclipsants, les de tipus W Ursae Majoris. Recordem que les atmosferes de les estrelles d'aquest tipus de sistemes estan en contacte i que una de les dues estrelles transfereix la seva massa a l'altra. Bé, doncs el mateix procediment es dona en les binàries

cataclísmiques. Però, en aquest cas, en el moment en què es transfereix la massa, l'estrella que rep la massa desprèn grans quantitats de radiació de manera violenta. Normalment aquestes binàries estan formades per una nana blanca i una estrella de més massa. Aquesta és la diferència entre les binàries cataclísmiques i les binàries eclipsants de tipus W Ursae Majoris.

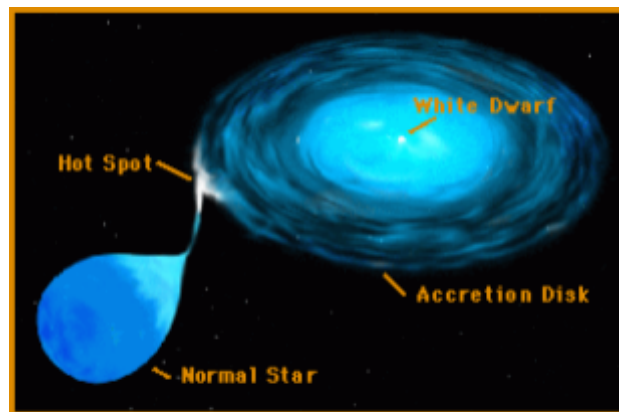


Fig. 49

4.4 Astrofísica de les estrelles dobles

En aquest apartat parlarem sobre alguns aspectes de les estrelles dobles que s'utilitzen en l'astrofísica, tant per calcular el moviment orbital d'un sistema com per la seva observació.

4.4.1 Centre de masses

El centre de masses o centre de gravetat, com hem dit anteriorment, és un punt d'un cos o d'un sistema en el qual actua tot el pes d'aquest. També es pot definir com a la posició d'equilibri d'un cos o d'un sistema. En el cas del treball, el centre de masses d'un sistema binari és la posició d'equilibri del sistema i on actua el pes total del sistema.

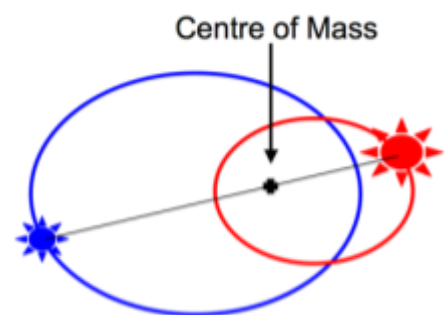


Fig. 50

Ara que entenem què és el centre de masses hem de comprendre com es coneix aquest punt de l'espai. La definició matemàtica del centre de masses per a un sistema de n partícules és el següent:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum m_i}$$

Aquesta equació ens diu que el centre de masses és igual a la suma dels productes entre les masses i les seves respectives posicions ($\sum_{i=1}^n m_i x_i$) dividit per la suma de totes les masses que actuen en el sistema.

Per simplificar el problema a les necessitats del treball podem definir matemàticament el centre de masses d'un sistema de dues partícules de la següent manera:

$$x = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}$$

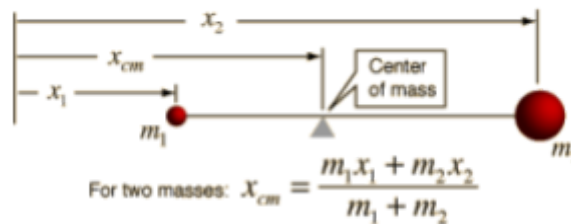


Fig. 51

4.4.2 Determinació de les masses

Determinar les masses de les dues estrelles d'un sistema binari és relativament fàcil. Primer de tot hem de tenir en compte la massa del sistema en conjunt. Per trobar-la, els físics utilitzen l'equació que va donar Newton a la tercera llei de Kepler. Com s'ha demostrat en l'annex 2, la constant de proporcionalitat (k) és idèntic a dir $\frac{4\pi^2}{GM}$. La pregunta que hem de respondre a partir d'aquí és, com es dedueix la massa del sistema a partir d'aquesta dada? Doncs, mitjançant observacions, podem saber quin és el període i la distància entre les dues estrelles del sistema. D'aquesta manera trobem la massa total del sistema. Per trobar la massa individual de cada estrella hem d'utilitzar un procediment més teòric.

Els astrònoms utilitzen l'expressió del centre de masses Sabent on és el centre de massa podem calcular la distància que separa cada estrella del centre de massa. Sabent la massa total i aquestes distàncies podem trobar quina és la massa dels dos components del sistema.

4.4.3 Distàncies d'un sistema binari

Les distàncies de l'univers es poden mesurar mitjançant diversos mètodes. Però, hi ha un mètode en específic que ajuda a descobrir aquestes distàncies desconegudes. Aquest mètode és anomenat paral·laxi trigonomètrica i dona mesures immediates i precises.

Aquest mètode és basat en un principi que es pot aplicar a la Terra per designar distàncies entre dos punts. La paral·laxi trigonomètrica es basa en el fet que un objecte, vist des de dos punts diferents, és a dir, dues direccions diferents, i a mesura que ens allunyem d'ell, sembla canviar en relació amb objectes que són més propers a nosaltres.

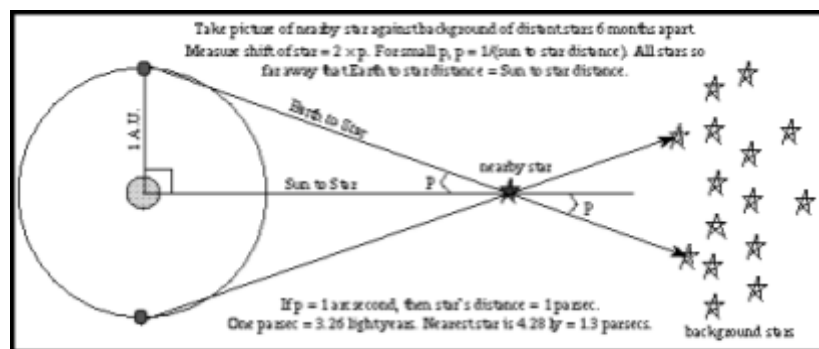


Fig. 52

A part de la paral·laxi trigonomètrica tenim dos tipus principals més de paral·laxi: la paral·laxi dinàmica i la paral·laxi espectroscòpica.

- **Paral·laxi dinàmica:** és un mètode que funciona exclusivament per sistemes binaris. Aquest tipus de paral·laxi es basa en el fet que les masses d'un sistema doble combinades resulta en ser un nombre aproximat al doble de la massa de la nostra estrella. Les distàncies entre estrelles es calculen

mitjançant la tercera llei de Kepler i amb la relació massa-lluminositat. Aquest mètode ha estat utilitzat per milers de sistemes dobles.

- **Paral·laxi espectroscòpic:** aquest mètode utilitza l'espectre de l'estrella o estrelles observades per determinar la brillantor i lluminositat d'aquestes. Amb la variació de lluminositat de gegants amb comparació amb estrelles de seqüència principal, com per exemple el Sol, podem trobar la distància d'aquest objecte utilitzant la llei de l'invers al quadrat.

$$Intensitat = \frac{1}{r^2}$$

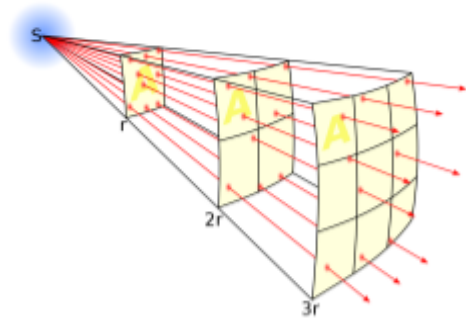


Fig. 53

Marc pràctic

1. Introducció

En el marc teòric hem parlat sobre les estrelles (la seva vida, quin és el mecanisme que les fa brillar i poder sobreviure, etc.), la física que regeix l'univers (newtoniana com s'entén l'univers amb la física moderna), la història del sistema solar i fonaments teòrics de sistemes dobles. L'objectiu del marc pràctic és respondre la pregunta principal del treball: podrien els planetes del sistema solar seguir orbitant en el cas d'haver-hi una segona estrella?

Bé, per respondre aquesta pregunta hem de saber que, primer de tot, és impossible observar aquest sistema, ja que, en la realitat, no existeix tal sistema. Però, hi ha alguna possibilitat d'observar-ho de manera virtual? La resposta és sí. Podem fer una aproximació de com seria aquest sistema binari i de com actuarien els planetes mitjançant Universe Sandbox².

2. Simulacions

Universe Sandbox² és un programa capaç de simular qualsevol cosa imaginable de l'univers. Aquest programa, tot i que es basa en càlculs reals, no utilitza les lleis de la relativitat general per les simulacions, sinó que utilitza mecànica newtoniana, per això sempre parlarem d'una simulació aproximada. Universe Sandbox², fins i tot és capaç de simular la col·lisió entre la Via Làctia i Andròmeda, escenari que ocorrerà, aproximadament, d'aquí 4500 milions d'anys.

Així doncs, comencem amb la simulació. Universe Sandbox² té com a escenari predeterminat el sistema solar, amb tots els seus elements (planetes, asteroides coneguts, cometes i satèl·lits naturals). Hem de tenir en compte que la hipòtesi del treball és: potser els planetes seguiran orbitant tot i haver-hi dues estrelles. Així doncs, hauríem de treure tots els elements del sistema solar a excepció dels planetes. L'eliminació d'aquests elements no suposa cap canvi, ja que la gravetat del sistema solar actual és proporcionada majoritàriament pel Sol. El programa té un menú amb una llista d'escenaris disponibles. L'escenari que necessitem és un

sistema solar únicament amb els planetes orbitant al Sol, sense asteroides, cometes o qualsevol altre objecte. Ara que tenim l'escenari ideal per la simulació concretem on se situarà la segona estrella. Com hem vist en el marc teòric, existeixen dos tipus d'òrbites planetàries per sistemes planetaris binaris, un associat a un sistema. En aquest treball cobrirem els dos escenaris. Estudiem, primer de tot, una òrbita tipus P, on els planetes orbiten al voltant de les dues estrelles. Per veure com funciona el programa i com es fan simulacions amb aquest visiti l'annex 4, Simulador.

A partir d'aquest punt hem de concretar les distàncies dels cossos a estudiar, és a dir, a quina distància hem de col·locar el segon Sol. Bé, recordem que en un sistema planetari binari les estrelles representen els focus de l'el·lipse, com hem vist en l'apartat 4 del marc teòric. Per comprovar quin planeta té una excentricitat més elevada utilitzarem l'equació d'excentricitat descrita en la primera llei de Kepler:

$$e = \frac{c}{a}$$

Podem trobar les excentricitats de cada planeta en la base de dades del sistema solar de la NASA. Segons la NASA Planetary Fact Sheet, les excentricitats dels planetes del sistema solar es poden ordenar de la següent manera:

Mercuri > Mart > Saturn > Júpiter > Urà > Terra > Neptú > Venus

És a dir, el planeta amb l'excentricitat més elevada i per tant, el planeta amb una òrbita més el·líptica és Mercuri. Així doncs, col·locarem el segon Sol en el segon focus de l'el·lipse formada per l'òrbita de Mercuri, a 0,31 UA aproximadament. Així doncs, comencem amb les simulacions. Partim del sistema solar actual.

2.1 Tipus P (planetari)

Com hem dit en l'últim paràgraf, col·locarem la segona estrella a 0,31 UA de l'òrbita de mercuri al voltant Sol ja existent.

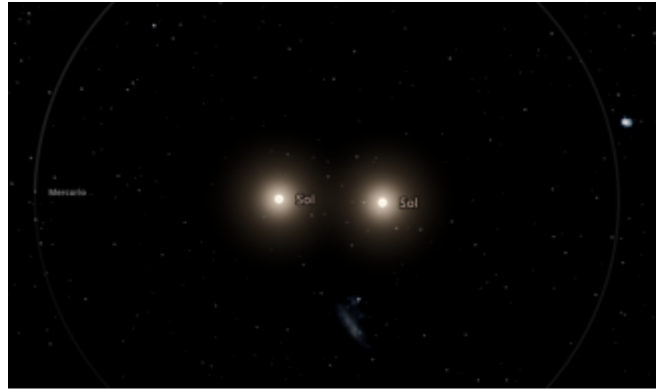


Fig. 54

El pas del temps es disminueix a 7,33 dies/segon, ja que d'aquesta manera podrem veure amb detall el moviment orbital de cadascun dels planetes. En el cas que no es vegi un desenvolupament notable, s'incrementarà. Així doncs, iniciem l'experiment.

Pocs segons després de l'inici podem observar els primers canvis. Es pot veure com Mercuri i Venus, els planetes més propers als dos estels, entren en òrbites caòtiques. Primer de tot, Mercuri, orbita alternadament al voltant de cada una de les estrelles i, amb pocs segons, és desviat a velocitats altíssimes, amb les quals s'allunya tant del sistema que ja no tornarà a interactuar-hi més. Amb Venus ocórrer el mateix. Interactua amb el sistema de manera caòtica fins a sortir disparat a velocitats tan altes que no tornarà a interactuar amb el sistema.

Passem a parlar de la Terra i Mart. El primer planeta que interactua amb el sistema binari és la Terra. Durant un cert període de temps sembla que la Terra es mantingui en estabilitat orbital amb el sistema. Tanmateix, aquesta és desviada aconseguint una òrbita hiperbòlica. En el cas de Mart, la seva òrbita és menys caòtica que les de Venus o Mercuri. Tot i això, és expulsat del sistema després d'interaccionar amb les dues estrelles. Cap dels dos planetes tornaran a interactuar amb el sistema a causa de les seves velocitats.

Finalment, parlem dels planetes exteriors: Saturn, Júpiter, Urà i Neptú. En el cas dels dos primers, Saturn i Júpiter, no interaccionen amb el sistema. Això és causat per la direcció del sistema binari i la seva distància i posició respecte a aquest. En el cas d'Urà, aquest és desviat pel camp gravitatori generat pel sistema, però no

interacciona amb cap de les dues estrelles. La seva òrbita es veu afectada però sense haver-hi interacció entre planeta i estrelles. En canvi, el cas de Neptú és similar al de la Terra. Aquest entra en interacció amb el camp gravitatori generat pel sistema. Per culpa d'aquesta interacció, la seva òrbita canvia dràsticament, allunyant-se del sistema i sense tornar a interaccionar amb aquest. Així doncs, el sistema final quedaria d'aquesta manera:



Fig. 55



Simulació completa

2.2 Tipus S

En el cas del tipus S col·locarem la segona estrella a 10 vegades la distància entre Urà i Neptú. En el marc teòric es menciona una estrella, en concret una nana vermella anomenada Nemesis, que segons estudis citats en el text, aquesta orbitaria al sistema solar, convertint el sistema solar en un sistema binari de tipus S.

En el cas de la simulació, s'ha intentat col·locar la segona estrella a la distància a la qual se suposa que està Nemesis, però al cap de dues hores, s'observa com aquesta fa un quart d'òrbita al voltant del sistema solar. Vistos els resultats, s'ha col·locat a la meitat d'aquesta distància, però amb resultats similars, en aquest cas, fent una òrbita al voltant del sistema solar en 2 hores. Per aquest motiu, s'ha decidit col·locar la segona estrella a una distància més propera en la qual es poden observar resultats apreciables durant un temps assequible.

A partir d'Urà, se li sumarà aquesta distància. La distància d'Urà a Neptú és d'11,4 UA, així doncs, la distància a la qual col·locarem el Sol és de 114 UA. Per tant, el sistema quedaria de la següent manera:



Fig. 56

El pas del temps es disminueix a 7,33 dies/segon per veure un bon desenvolupament de la simulació i, en el cas que no es vegi un desenvolupament, s'incrementarà. Iniciem l'experiment.

Quan s'inicia l'experiment no es veu cap desenvolupament quant a moviment orbital. Per aquest motiu, el pas del temps s'incrementa a 44,5 anys/segon. A partir d'aquest punt es comencen a apreciar els canvis en el moviment orbital. Primer de tot es veu com el primer planeta que pateix un canvi orbital és Neptú. L'òrbita d'aquest es veu afectada, a causa del moviment orbital entre les estrelles. Com l'estrella a la qual orbita Neptú s'allunya en una direcció diferent de la qual va Neptú i aquest va a unes velocitats tan altes que no nota l'efecte del camp gravitatori generat per l'estrella.

Passem al cas d'Urà. En el cas del penúltim planeta del sistema trobem una interacció més activa amb la segona estrella. En la primera òrbita entre les dues estrelles es veu com Urà assoleix un període molt més llarg que el que normalment s'observa. Fins que arriba la segona òrbita entre les estrelles. En aquest moment, Urà sent més atracció gravitatòria per la segona estrella, ja que s'assoleix un període més gran, i per tant, una distància més gran a l'estrella a la qual estava orbitant. En canvi, com la distància entre el planeta i la segona estrella disminueix, la força d'atracció entre aquests cossos creix, és a dir, Urà sent més atracció pel camp gravitatori de la segona estrella que no pel de l'estrella que ja orbitava. Per aquest motiu, Urà inicia una òrbita al voltant de la segona estrella. En la tercera òrbita entre les estrelles passa idènticament el mateix, però ara torna a orbitar a l'estrella a la qual inicialment orbitava. En la cinquena òrbita estrella-estrella, l'òrbita d'Urà canvia dràsticament. Es veu com durant el període orbital de les estrelles, Urà arriba a orbitar gairebé tot el sistema, fins que interacciona amb el camp gravitatori de la primera estrella. En passar això, la seva òrbita entra en caos, causant que el planeta sigui desviat del sistema a velocitats altíssimes. No tornarà a interaccionar amb el sistema.

Ara bé, i els altres planetes? Bé, doncs tots els altres planetes, des de Mercuri fins a Saturn, es mantenen en les seves òrbites pertinents. L'únic canvi a tenir en compte és l'excentricitat de les seves òrbites, la qual augmenta poc. Tots mantenen la seva distància respecte al Sol i la seva posició, sense sentir atracció pel camp gravitatori generat per la segona estrella.

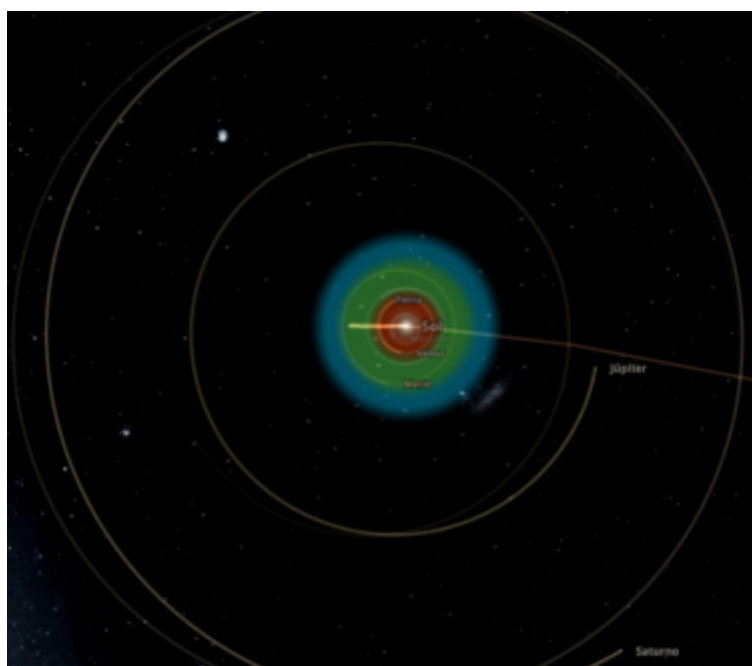


Fig. 57

Així doncs, l'escenari restant de la simulació, és el següent:



Fig. 58



Simulació completa

3. Anàlisis de dades de la variació lumínica d'una estrella variable

Ara bé, totes aquestes simulacions i resultats són purament teòrics. Però, i si hi hagués la possibilitat d'observar-ho? Com ho podríem fer? Hem comptat amb l'ajuda de l'observatori astronòmic de Can Roig per saber com es fa una observació, quin és l'equip utilitzat i quins són els resultats que s'esperen.

L'observatori astronòmic de Can Roig, també seu de l'associació AstroGirona, està localitzat en el poble de Llagostera, a la comarca del Gironès. Hem fet una visita per veure les seves instal·lacions i els equips que tenen al seu abast. L'observatori és part del centre cultural de Can Roig, en el qual hi ha, a part de l'observatori, la biblioteca Julià Cutiller, la seu de la Fundació Ramon Noguera de Llagostera i diverses sales d'actes.



Fig. 59

La cúpula en la qual s'hi fan observacions està col·locada en la part més alta de l'edifici. El primer que trobem en aquesta última planta és la seu d'AstroGirona, un espai dedicat al coneixement científic i de l'espai.

A partir d'aquí entrem a la cúpula pujant per unes petites escales. En la cúpula hi trobem els telescopis que utilitzen els astrònoms per observar l'espai.

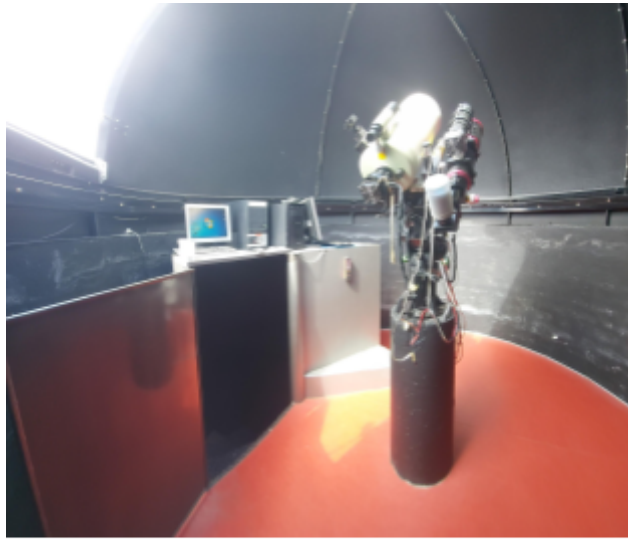


Fig. 60

Com es veu en la imatge, trobem que en el centre de la cúpula estan situats els telescopis. Cadascun d'aquests té una funció concreta. El telescopi gran de color blanc, situat a l'esquerra, és un telescopi encarregat de l'observació en si, és a dir, la imatge que es veurà en la fotografia que s'extregui posteriorment. A la dreta hi trobem un telescopi més petit, de color negre. Aquest és l'encarregat de fer les fotografies quan s'observen trànsits d'exoplanetes. Finalment, trobem un telescopi més primet entremig dels últims. Aquest és un telescopi solar, un tipus de telescopi encarregat de detectar la llum en longituds d'ona visibles dins l'espectre visible.



Fig. 61



Fig. 62

Les observacions de trànsits d'exoplanetes que es donen a terme en l'observatori duren, com a mínim, 2 hores. Per tenir uns bons resultats de l'observació cal començar a observar al cos en qüestió una estona abans i una estona després que el cos estigui davant l'estrella amb relació a nosaltres, l'observador. Per fer l'observació i a la vegada per distingir-lo hem de centrar la imatge que veiem pel telescopi. Això, en un telescopi com el que tenen observatoris es poden programar les coordenades que volem observar, però en el cas que sigui un telescopi més rudimentari, caldrà que les ajusti l'observador en si. Una vegada centrat el telescopi amb les coordenades correctes podem començar a fer fotografies. Un altre cop, si es té un telescopi en el qual se li puguin aplicar càmeres programables es pot triar cada quants segons o minuts es fa una fotografia. En el cas que no es pugui instal·lar una càmera programable, haurem de fer les fotografies nosaltres mateixos. Una vegada fetes les fotografies podem passar a interpretar aquestes fotografies per obtenir-ne uns resultats.

A l'hora de trobar els resultats hem d'utilitzar algun programa que pugui obrir fitxers .fit*. Quan hem acabat de fotografiar el trànsit de l'objecte en qüestió, passarem les fotografies a aquest programa que pugui llegir arxius .fit. Amb aquestes imatges podem trobar el resultat que estem buscant. L'objectiu d'aquests estudis és aconseguir un gràfic que ens ensenyi la variació de llum que ha patit l'estrella en qüestió mentre es donava el trànsit.

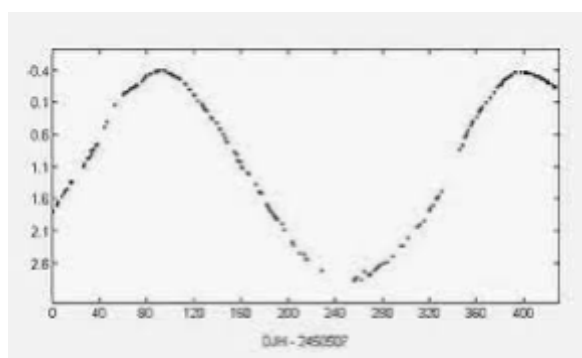


Fig. 63

A partir d'aquesta explicació passarem a veure com s'arriben a obtenir aquests resultats, és a dir, a la variació lumínica de l'estrella observada. Per arribar als resultats utilitzarem l'aplicació **FotoDif**, un programa de fotometria diferencial i

absoluta utilitzada per a donar la intensitat de variació de llum per a la detecció de possibles exoplanetes. Aquest programa és l'encarregat d'interpretar les dades cedides per l'observatori Can Roig. Els exoplanetes que utilitzarem per a aquesta tasca són: K2-30b i WASP-10b.

El que es troba en obrir el programa és el següent:

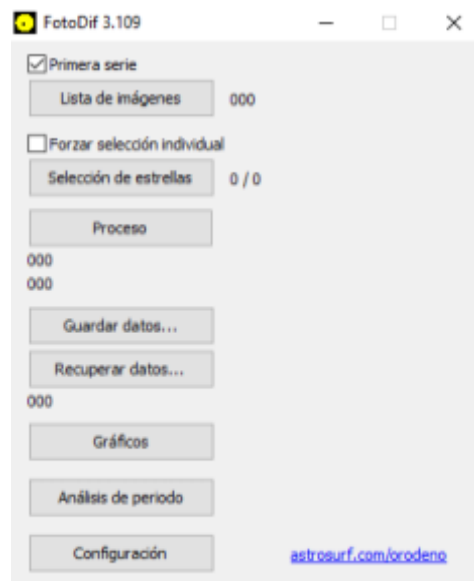


Fig. 64

Primer de tot s'han de seleccionar totes les imatges que es van fer durant l'observació d'aquests sistemes. Comencem pel K2-30b. Per seleccionar les imatges s'ha de clicar a "Lista de imágenes".

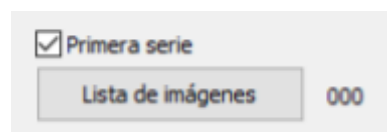


Fig. 65

S'obrirà una pestanya amb la qual se seleccionen les imatges que descriuen el moviment de l'exoplaneta, al qual anomenem variable, al voltant de l'estrella.

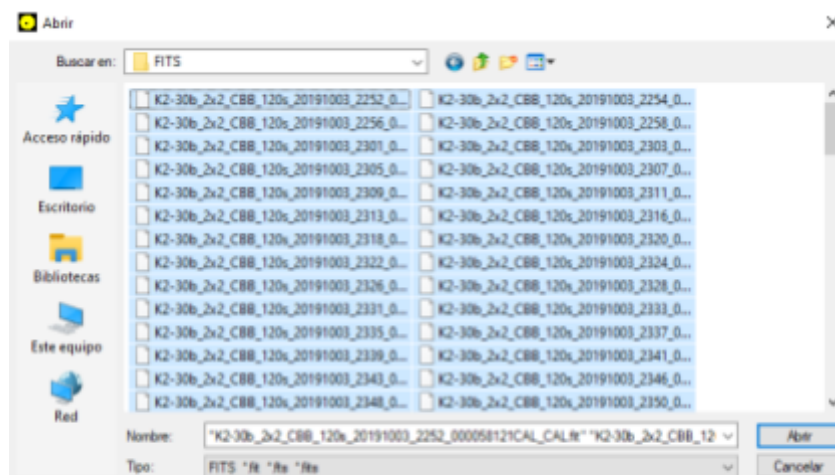


Fig. 66

Quan s'hagi fet, se selecciona "Abrir" i canviarà el nombre de "000" a "x", que representa el nombre d'imatges que s'han seleccionat. En aquest cas 156. Seguidament, s'obre la pestanya "Selección de estrellas":

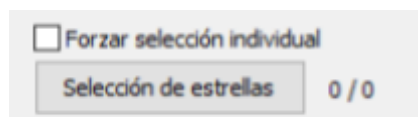


Fig. 67

Quan seleccionem l'opció s'obrirà una finestra on es veu la primera imatge en la qual surten punts blancs en un fons negre. Com es pot intuir, els punts blancs són les estrelles.

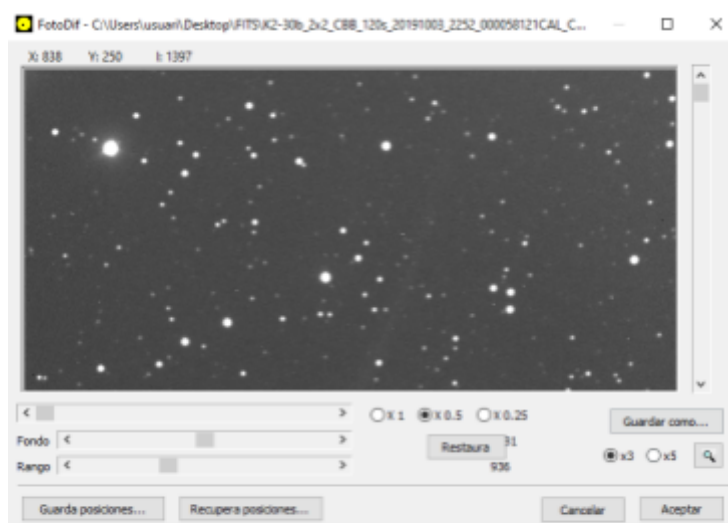


Fig. 68

El que hem de fer en aquest cas és introduir quina serà la variable a observar, en aquest cas K2-30b. Segons exoplanet.eu, K2-30b és un planeta amb una massa de $0,579 M_J$, és a dir, 0,579 vegades la massa de Júpiter descobert el 2016 mitjançant el mètode de trànsit. Se situa a 336,26 pc de la seva estrella, K2-30, el que equival a $4,9 \cdot 10^{-6}$ UA. Aquesta estrella té $0,9 M_S$, és a dir, 0,9 vegades la massa del Sol. També, cal seleccionar una sèrie d'objectes que actuaran com a calibradors. Per indicar la nostra variable seleccionarem l'exoplaneta a observar i li aplicarem la següent configuració:

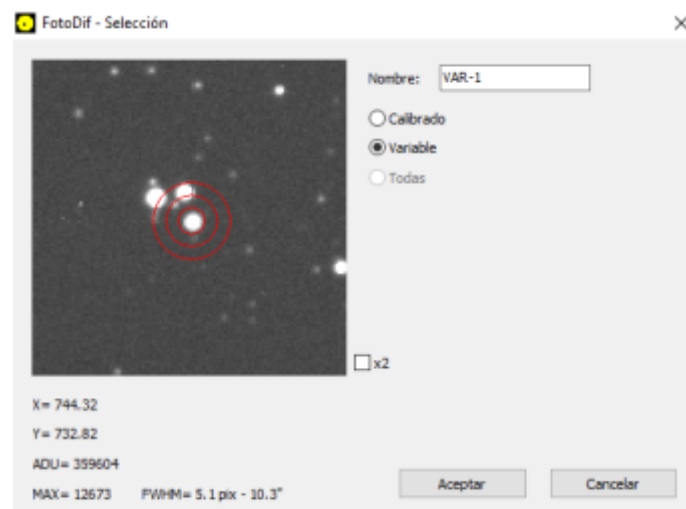


Fig. 69

Podem observar que la nostra variable té com a nombre MAX 12673. En el cas dels calibradors, hem d'intentar que aquest nombre oscil·li entre els 8000 i els 40000. És recomanable seleccionar-ne entre 3 i 4 en el cas que el nombre MAX oscil·li entre 8000 i 40000. En el nostre cas, la imatge quedaria així:

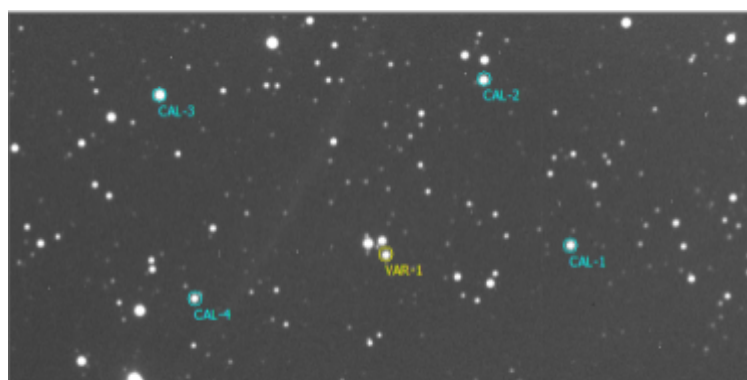


Fig. 70

Una vegada seleccionats els cossos calibradors i la variable a tenir en compte, seleccionarem “Aceptar”. Finalment, farem clic a l’opció “Proceso”.

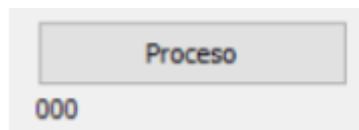


Fig. 71

Amb aquesta opció el programa començarà a registrar els canvis en les diferents imatges per donar un resultat de la variació lumínica de l’estrella K2-30. Quan ha acabat aquest procés, el resultat el trobarem a la finestra “Gráficos”. Així doncs, obtenint una gràfica de la variació lumínica de l’estrella i confirmant l’existència de l’exoplaneta. Aquest seria el resultat:

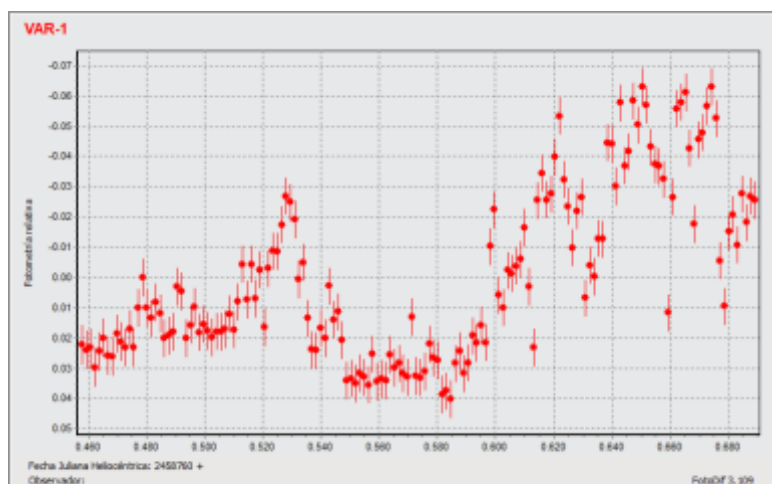


Fig. 72

En la gràfica es poden observar una sèrie de màxims i mínims que ens indiquem en quins moments K2-30b interfeiria en la il·luminació de l’estrella. Com es pot veure, la gràfica fa una mena de corba en el centre. Aquesta corba és el moment en què l’exoplaneta interfeireix en el senyal lumínic, just com es descriu en l’apartat 4.3 amb les binàries eclipsants.

El mateix s’hauria de fer amb WASP-10b. (afegir dades de l’exoplaneta i estrella). En aquest cas però, la corba lumínica queda de la següent manera:

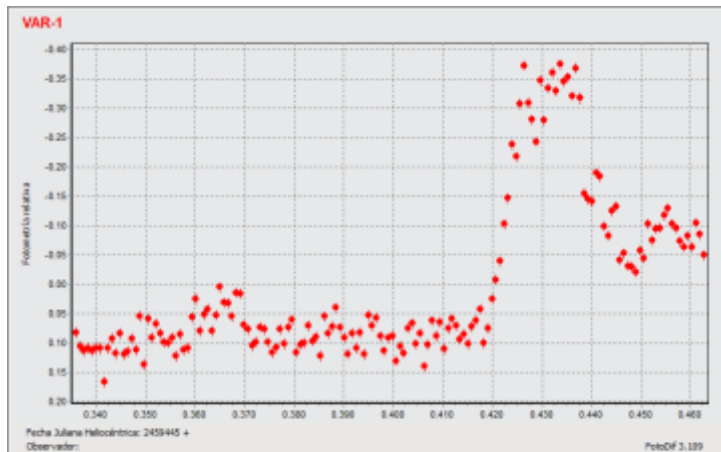


Fig. 73

Igual que amb el cas anterior, s'observen uns màxims i uns mínims, però, en el cas de WASP-10b, el mínim és molt extens. Tota aquesta extensió representa el trànsit de l'exoplaneta en funció de l'estrella. Per la durada del màxim es pot interpretar que el període de l'exoplaneta és més aviat llarg.

Cal dir que aquesta és la manera amb la qual els astrònoms poden detectar si un estel té planetes al seu voltant orbitant. Amb aquest raonament podríem extrapol·lar-ho a un sistema binari. En aquest cas, el resultat de la corba de llum seria molt diferent de la vista en l'exemple anterior, ja que s'hauria de tenir en compte la segona estrella, que donaria una corba de llum pel seu període, i l'exoplaneta o exoplanetes del sistema, que aquesta corba també dependria del seu període. Agafem el cas més simple, una estrella orbitant a una altra estrella. La corba de llum seria com si es tractés d'un exoplaneta com es veu en l'apartat 4.3.4 del marc teòric. En el cas que una estrella es posicionés davant l'altra i un exoplaneta estigués també davant seu, el resultat es podria interpretar com una sola corba de llum, però realment, la corba de llum entre les dues estrelles se superposaria a la corba de llum entre l'exoplaneta i la segona estrella.

Conclusions

Una vegada finalitzada la pràctica experimental del treball i gràcies als coneixements que he adquirit durant tot aquest darrer any, he adquirit la destresa necessària per poder interpretar els resultats obtinguts.

El propòsit del treball, com es menciona en la introducció, es va modificar a mesura que aquest evolucionava. Sobre els objectius definitius del treball, és a dir, fer una simulació per cada tipus de sistema planetari per observar el comportament de les òrbites i analitzar les dades cedides per l'observatori Can Roig, considero que han estat assolits. Gràcies a la utilització del programa Universe Sandbox, s'ha aconseguit visualitzar el comportament de les òrbites planetàries que tindrien lloc en el supòsit de la presència d'un segon estel en el nostre sistema solar, i s'ha fet en el cas que el sistema binari format, fos de tipus S i en l'escenari que fos de tipus P. Per altra banda, en l'anàlisi de dades de trànsits d'exoplanetes sobre els sistemes planetaris K2-30 i WASP-10, s'han obtingut els resultats esperats en els dos casos. En aquestes condicions, els resultats obtinguts depenen de l'interval de temps amb el que es fan les fotografies i el període de l'exoplaneta. En l'estudi del trànsit de K2-30b, s'ha observat que la variació lumínica de l'estrella és de més curta durada que la de l'estrella WASP-10, però en els dos casos es confirma la presència d'exoplanetes orbitant aquests estels.

Arribats a aquest punt del treball, cal comprovar si els resultats de la part pràctica permeten verificar o desmentir la hipòtesi del treball. Com es pot veure en les simulacions, només hi ha un tipus de sistema planetari que es manté estable i que permetria que el planeta Terra es mantingués en òrbita i amb les característiques actuals. Aquest sistema és el tipus S. En canvi, el sistema planetari tipus P no presenta cap mena d'estabilitat en cap moment, ja que, com es veu en la seva simulació, cap planeta orbita de manera estable al voltant de les dues estrelles en cap moment. Per tant, la hipòtesi de si el sistema solar podria ser un sistema estel·lar binari, es verifica pel sistema de tipus S, però es desmenteix pel sistema de tipus P. Aquests resultats es podrien comparar amb l'article mencionat en el marc teòric, *Extinction of Species By Periodic Comet Showers*, de Marc Davis, Piet Hut i Richard A. Muller en el qual hi ha la possibilitat que el sistema solar formi part d'un

sistema CPM, binari tipus S. Segons aquest article, la companya del nostre Sol seria una nana marró anomenada Nemesis.

Passem a parlar d'adversitats que s'han trobat durant el treball. Un dels objectius que no s'ha pogut realitzar ha estat el càlcul de les òrbites. En el moment d'estudiar com calcular-les per un sistema de més de dos cossos, em vaig adonar que el nivell d'aquests càlculs era molt complicat. Es pot veure, en el document que vaig consultar per comprendre la complexitat de les operacions, *Estabilidad orbital de planetas circumbinarios* (2016), redactat per Raúl Antonio Henríquez Ortiz, que el nivell en matemàtiques i en física era d'un grau universitari. Per aquest motiu, es va haver d'eliminar del treball aquest tipus de consideracions, limitant els seus objectius. L'últim infortuni que vaig haver de superar va ser que per motius meteorològics no va ser possible realitzar l'observació d'un sistema doble. Tanmateix, aquest fet em va oferir l'oportunitat de reorientar el treball cap a l'estudi i anàlisi de dades sobre els canvis en la intensitat de la llum causats pel trànsit d'un exoplaneta. Així vaig poder conèixer de primera mà com treballen els astrofísics o astrònoms que es dediquen a aquest camp.

Les millores que aplicaria al treball seria intentar aplicar una part de càlcul, encara que fos de mecànica newtoniana, ja que considero que hagués enriquit més el resultat del treball. Considero, també, que haver fet una observació pròpia i analitzar-ne les dades amb el programa utilitzat hagués aportat quelcom més atractiu al treball, ja que no seria material cedit, sinó aconseguit.

En la meva opinió, fer aquest treball m'ha enriquit, tant acadèmicament com personalment. El fet de tenir la responsabilitat que comporta el treball m'ha ajudat a polir tècniques d'organització, ja que havia de continuar estudiant el batxillerat mentre treballava en aquest projecte. M'agradaria poder donar continuïtat al meu treball de manera que, si aconsegueixo els meus objectius acadèmics i arribo a estudiar un grau en física, sens dubte un dels meus objectius de l'aprenentatge abans d'acabar el grau seria fer els càlculs que no he arribat a fer en aquest treball.

Bibliografía/webgrafia

- *Clasificación de las Estrellas* [en línea]. Astronomía.
<https://www.astromia.com/universo/clasestrellas.htm> [consulta: 13.3.2021]
- *Corona solar* [en línea]. Astronomía.
<https://www.astromia.com/glosario/coronasolar.htm> [consulta: 07.2.2021]
- *Les òrbites dels planetes* [en línea]. Astronomia.
<https://www.astromia.com/edu/textos/planeta02.htm> [consulta: 10.4.2021]
- *Forats negres* [en línea]. Astronomia.
<https://www.astromia.com/edu/univers/negres.htm> [consulta: 13.3.2021]
- BRAVO, Roberto. *¿Qué es una nebulosa? Tipos de nebulosas* [en línea]. Astroafición.
<https://astroaficion.com/2019/11/18/que-es-una-nebulosa-tipos-de-nebulosas/>
[consulta: 13.3.2021]
- CAMPBELL, Bruce; WALKER H.A., Gordon; YANG, S. (1988). *A search for substellar companions to solar-type stars*.
<http://adsabs.harvard.edu/pdf/1988ApJ...331..902C> [consulta: 17.5.2021]
- CASANOVA, Verónica (2015). *¿Qué es una estrella Wolf-Rayet?* [en línea]. Astrofísica y Física.
<https://www.astrofiscayfisica.com/2015/05/que-es-una-estrella-wolf-rayet.html>
[consulta: 13.3.2021]
- *Atmósfera* [en línea]. Concepto. <https://concepto.de/atmosfera/> [consulta: 5.4.2021]
- *Radiación UV* [en línea]. Centro Nacional de Salud Ambiental.
https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html?CDC_A

[A_refVal=https%3A%2F%2Fwww.cdc.gov%2Fspanish%2Fespecialescdc%2Fradiacionuv%2Findex.html](https://www.cdc.gov/spanish/especialescdc/radiacionuv/index.html) [consulta: 21.3.2021]

- CIRTAIN, Jonathan; GOLUB, L.; WINEBARGER B., A.; KOBAYASHI, Kazuyoshi. (2013). *Energy release in the solar corona from spatially resolved magnetic braids*.
https://www.researchgate.net/profile/Robert-Walsh-23/publication/235367018_Energy_Release_in_the_solar_corona_from_spatially_resolved_magnetic_braids/links/5bf29be592851c6b27c9c552/Energy-Release-in-the-solar-corona-from-spatially-resolved-magnetic-braids.pdf [consulta: 7.2.2021]
- DA COSTA, Alexandre; DEUSTUA, Susana; FIERRA, Julieta; GARCÍA, Beatriz; MORENO, Ricardo; PERCY, John; M. ROS, Rosa. *Luces del cosmos: más de 1000 años en el estudio físico de la luz*. 1a ed. Impresión a la Unión Europea: NASE, 2014.
- DAVIS, M.; HUT, P.; MULLER, R.A. (1984). *Extinction of Species by Periodic Comet Showers*. <https://escholarship.org/uc/item/9gm5c682#page-2> [consulta: 27.6.2021]
- DjSadhu. (2012, agosto 25). *The helical model - our solar system is a vortex*. [vídeo]. https://www.youtube.com/watch?v=0jHsq36_NTU
- *Teoría geocéntrica* [en línea]. EcuRed.
https://www.ecured.cu/Teor%C3%ADa_geoc%C3%A9ntrica [consulta: 20.6.2021]
- *Teoría heliocéntrica* [en línea]. EcuRed.
https://www.ecured.cu/Teor%C3%ADa_helioc%C3%A9ntrica [consulta: 20.6.2021]
- EINSTEIN, Albert. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*. 3a. Madrid: Alianza Editorial, 2019.

- Sistema planetari (s.d). En *Enciclòpedia: el cercador de referència en català*. [consulta: 15.5.2021]

- ESA. *Rosetta's frequently asked questions*.
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Frequently_asked_questions [consulta: 17.5.2021]

- FARRÉS, Lourdes (2020). *El nostre lloc a l'univers: Planetes*. [Apunts acadèmics] Ciències del món contemporani.

- FERNÁNDEZ L., José. *Leyes de Kepler* [en línia]. Fisicalab.
<https://www.fisicalab.com/apartado/leyes-kepler> [consulta: 10.4.2021/28.4.2021]

- *¿Qué son las partículas elementales?* [en línia]. Foro nuclear
<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-son-las-particulas-elementales/> [consulta: 14.3.2021]

- *Supergigants vermells: grans, calents i cap a la mort de les estrelles* [en línia]. Greenlane.
<https://www.greelane.com/ca/science-tech-math/v%c4%9bda/red-supergiant-stars-3073597/> [consulta: 13.3.2021]

- International Astronomic Union (2006). *IAU 2006 General Assembly: Result of the IAU resolution votes*.
<https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/> [consulta: 17.5.2021]

- International Astronomic Union (2006). *Draft resolution 5 for GA-XXVI: Definition of a Planet*.
https://web.archive.org/web/20060822191830/http://www.iau2006.org/mirror/www.iau.org/iau0601/iau0601_resolution.html [consulta: 17.5.2021]

- International Space Science Institute. (2003). *Cosmic rays*.
http://www.issibern.ch/PDF-Files/Spatium_11.pdf [consulta: 21.3.2021]

- *Introducció a les radiacions ionitzants* [en línia]. IOC.
https://ioc.xtec.cat/materials/FP/Recursos/fp_prp_c03_/web/fp_prp_c03_htmlindex/WebContent/u7/a1/continguts.html [consulta: 21.3.2021]

- Isaac Physics. *Centre of Mass* [en línia]. University of Cambridge.
https://isaacphysics.org/concepts/cp_centre_mass?stage=all [consulta: 27.6.2021]

- KAULEN, María. *¿Cómo se forman las estrellas binarias?* [en línia]. Portal astronómico.

- *What is center of mass?* [en línia]. Khan Academy.
<https://www.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/center-of-mass/a/what-is-center-of-mass> [consulta: 27.6.2021]

- *Espectroscòpia* [en línia]. Labvirtual. <http://labvirtual.iciq.es/espectroscopia/> [consulta: 14.3.2021]

- LAUGHLIN P., Gregory. *Extrasolar Planetary Systems: Observation of distant worlds are beginning to reveal how planetary systems form and evolve* [en línia]. <https://www.americanscientist.org/article/extrasolar-planetary-systems> [consulta: 17.5.2021]

- MONDRAGÓN, Tatiana. *La vida de una estrella* [en línia]. Academia Play.
<https://academiaplay.es/vida-estrella/> [consulta: 13.3.2021]

- MULLANEY, James. *Double and Multiple Stars: and How to Observe Them*. 1a. Londres: Springer, 2005.

- NASA. (12 de febrer de 2014). *What is a Satellite?*
<https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html> [consulta: 17.5.2021]

- PARSONS, Paul. *Einstein: Su vida, sus teorías y su influencia*. 1a. Barcelona: Blume, 2012.

- PLANAS, Oriol. *Què és la fusió nuclear?* [en línia]. Energia nuclear.
<https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/fusio-nuclear>
[consulta: 14.3.2021]

- PLANAS, Oriol. *Què és un isòtop?* [en línia]. Energia nuclear.
<https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/atom/isotop> [consulta: 14.3.2021]

- PLANAS, Oriol. *Què és un neutró?* [en línia]. Energia nuclear.
<https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/atom/neutro> [consulta: 14.3.2021]

- PLANAS, Oriol. *Què és un protó?* [en línia]. Energia nuclear.
<https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/atom/proto> [consulta: 14.3.2021]

- PORTILLO, Germán. *Nana marró: característiques, origen i curiositats* [en línia]. Meteorologia en xarxa.
<https://www.meteorologiaenred.com/ca/nana-marr%C3%B3.html> [consulta: 13.3.2021].

- PLANAS, Oriol. *Què són els raigs gamma?* [en línia]. Energia nuclear.
<https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/radioactivitat/raigs-gamma> [consulta: 21.3.2021]

- *Bosón de Gauge* [en línia]. Química
https://www.quimica.es/enciclopedia/Bos%C3%B3n_de_gauge.html [consulta: 14.3.2021]

- *Bosón de Higgs* [en línia]. Química
https://www.quimica.es/enciclopedia/Bos%C3%B3n_de_gauge.html [consulta: 14.3.2021]

- *Leptón* [en línia]. Química
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Lept%C3%B3n.html> [consulta: 14.3.2021]

- *Neutrino* [en línia]. Química
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Neutrino.html> [consulta: 14.3.2021]

- *Quark* [en línia]. Química <https://www.quimica.es/enciclopedia/Quark.html>
[consulta: 14.3.2021]

- RUIZA, M.; FERNÁNDEZ, T.; TAMARO, E. (2004). Biografía de Aristarco de Samos. En *Biografías y Vidas. La enciclopedia bibliográfica en línea*.
<https://www.biografiasyvidas.com/biografia/a/aristarco.htm> [consulta: 20.6.2021]

- SANCHEZ, Frederico. *Què són els neutrins?* [en línia]. Recerca en acció.
<http://www.recercaenaccio.cat/pregunta/que-son-els-neutrins/> [consulta: 14.3.2021]

- SINGH, Devendraa; SINGH, R. P. (2009). *The role of cosmic rays in the Earth's atmospheric processes*.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0908/0908.4156.pdf> [consulta: 5.4.2021]

- *El Sol* [en línia]. Tayabeixo.
http://www.tayabeixo.org/sist_solar/sol/estructura.htm [consulta: 07.2.2021]

- The Extrasolar Planet Encyclopaedia. (2016). K2-30b [Base de dades].
http://exoplanet.eu/catalog/k2-30_b/ [consulta: 28.9.2021]

- The StarChild Team, NASA. *What is a brown dwarf?* [en línia]. StarChild.
<https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/questions/question62.html>
[consulta: 13.3.2021]

- VARCÁRCEL, Pedro (2010). *El origen de los sistemas planetarios*.
https://elpais.com/sociedad/2011/02/17/actualidad/1297897210_850215.html
[consulta: 15.5.2021]

- *Albert Einstein* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein [consulta: 8.4.2021]

- *Anexo:Planetas extrasolares* [en línia]. Viquipèdia.
https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Planetas_extrasolares [consulta:
24.5.2021]

- *Camp magnètic terrestre* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Camp_magn%C3%A8tic_terrestre [consulta:
5.4.2021]

- *Estel* [en línia]. Viquipèdia. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Estel> [consulta:
25.1.2021]

- *Estel: generació de l'energia* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Estel#Generaci%C3%B3_de_l'energia [consulta:
14.3.2021]

- *Estel hipergegant* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Estel_hipergegant [consulta: 13.3.2021]

- *Estel hipergegant groc* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Estel_hipergegant_groc [consulta: 13.3.2021]

- *Estrella de neutrons* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Estrella_de_neutrons [consulta: 13.3.2021]

- *Estructura estel·lar* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Estructura_estel%C2%B7lar [consulta: 25.1.2021]

- *Evolució estel·lar* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Evoluci%C3%B3_estel%C2%B7lar [consulta: 13.3.2021]

- *Gravetat* [en línia]. Viquipèdia. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Gravetat> [consulta: 5.4.2021]

- *Magnetosfera* [en línia]. Viquipèdia. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Magnetosfera> [consulta: 5.4.2021]

- *Sistema planetari* [en línia]. Viquipèdia.
https://ca.wikipedia.org/wiki/Sistema_planetari [consulta: 15.5.2021]

- WALKER, H.A., Gordon; YANG, S.; WALKER R., Andrew; IRWIN I., Alan; LARSON M, Ana; YANG L.S., Stephenson; RICHARDSON C., Derek. (1995). *A Search for Jupiter-Mass Companion to Nearby Stars*. [A Search for Jupiter-Mass Companions to Nearby Stars - ScienceDirect](#) [consulta: 17.5.2021]

- *Cosmic ray* [en línia]. Wikipedia anglesa.
https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray [conslluta: 21.3.2021]

- *Estrella binaria* [en línia]. Wikipedia en espanyol.
https://es.wikipedia.org/wiki/Estrella_binaria [consulta: 27.6.2021]

- *Fotosfera* [en línia]. Wikipedia en espanyol.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Fotosfera> [consulta: 07.2.2021]

- *Sistema planetario* [en línia]. Wikipedia en espanyol.
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_planetario#Sistema_planetario_extrasolar [consulta: 17.5.2021]
- WILLIAMS R., David. (2019). *Planetary Fact Sheet* [en línia]. NASA.
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/> [consulta: 19.9.2021]

Webgrafia visual

- **Fig. 1:** Earth Science for High School. En aquesta figura es mostren les diferents parts internes del Sol (estructura estel·lar). Extret de <https://courses.lumenlearning.com/sanjac-earthscience/chapter/the-sun/#x-ck12-SFMtRVMtMjQtMTYtU3VuLWludGVybmFs>
- **Fig. 2:** OLIVER, Carlos. En aquesta figura es pot observar una taca solar. Extret de <http://gt.tiching.com/les-taques-solars/recurso-educativo/728637>
- **Fig. 3:** MERRILL, Christian; ONDUS, Nikolas. En aquesta figura es pot observar la granulació solar. Extret de <https://www.sutori.com/es/historia/the-sun--ggEVx6gRQugxjbJexZmQDWVn>
- **Fig. 4:** Kazatormentas (2013). En aquesta figura es pot observar una protuberància solar. Extret de <https://nuestroclima.com/protuberancia-solar-vista-por-soho/>
- **Fig. 5:** Astronomía. En aquesta figura es diferencien els tipus d'estrelles en funció del seu tamany i temperatura. Extret de <https://www.astromia.com/universo/clasestrellas.htm>
- **Fig. 6:** font pròpia. En la figura es compara el tamany del Sol amb el de BAT 99-98 (226 vegades la massa del Sol).
- **Fig. 7:** Agrupación astronómica Perseo. En la figura es comparen les dimensions del Sol, Rigel i Betelgeuse. Extret de <http://luvifran.blogspot.com/2015/05/las-estrellas-y-sus-tamanos.html>

- **Fig. 8:** Viquipèdia. En la figura es compara el Sol amb la hipergegant groga VY Canis Majoris. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_and_VY_Canis_Majoris.svg
- **Fig. 9:** HERAS, Antonio (2013). La figura és un diagrama Hertzsprung-Russell que diferencia els tipus d'estrella per tipus espectral, temperatura, lluminositat i magnitud. Extret de https://antonioheras.com/el_sol_y_las_estrellas/diagrama_hertzsprung_russell.htm
- **Fig. 10:** Wikipedia en espanyol. En la figura es mostra la nebulosa planetària M57. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M57_The_Ring_Nebula.JPG
- **Fig. 11:** Wikipedia en espanyol. En la figura es mostra la supernova SN 1604. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Keplers_supernova.jpg
- **Fig. 12:** PEREYRA, Jordi (2018). En la figura s'observa una estrella de neutrons. Extret de <https://cienciadesofa.com/2018/10/que-pasaria-si-trajesemos-un-trozo-de-estrella-de-neutrones-a-la-tierra.html>
- **Fig. 13:** ServiPartícules (2019). En la figura s'observa el primer forat negre fotografiat M87. Extret de <https://serviparticules.ub.edu/noticies/noticies-iccub/la-imatge-del-forat-negre-de-la-galaxia-m87>
- **Fig. 14:** PLANAS, Oriol (2019). En la figura s'observa el nucli d'un àtom. Extret de <https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/atom/proto>
- **Fig. 15:** Viquipèdia. En la figura s'observen els isòtops de l'hidrogen. Extret de

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen_Deuterium_Tritium_Nuclei_Schmatic-nl.svg

- **Fig. 16:** MOOK, William (2012). En la figura s'observa la reacció de fusió en cadena de l'hidrogen. Extret de <https://www.quora.com/How-much-pressure-is-done-in-nuclear-fusion-in-the-Sun-per-each-two-atoms-that-reach-fusion>
- **Fig. 17:** UDIT, Shashwat (2017). En la figura s'observa la reacció de fusió en cadena de l'heli. Extret de <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/udit2/>
- **Fig. 18:** BERCIANO BLANCO, Isabel (2017). En la figura s'observa el prisma de Newton, en el qual la llum blanca passa a tots els colors de l'espectre visible. Extret de <http://www.csicenlaescuela.csic.es/proyectos/optica/experiencias/cantabria/isabelblanco/DeNewtonaPinkFloyd.pdf>
- **Fig. 19:** Freepik (2019). En la figura s'observa l'espectre de la llum visible i la longitud d'ona de les diferents ones. Extret de https://www.freepik.es/vector-premium/diagrama-luz-visible-espectro-electromagnetico-color-frecuencia-onda-luz_6625300.htm
- **Fig. 20:** Viquipèdia. En la figura s'observa la tendència de la temperatura en relació terra-oceà des de 1880 fins al 2020. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Temperature_Anomaly.svg
- **Fig. 21:** Wikipedia en espanyol. En la figura s'observa, de manera artística, l'acció de la magnetosfera. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetosphere_rendition.jpg
- **Fig. 22:** Wikipedia en espanyol. Retrat d'Isaac Newton. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Portrait_of_Sir_Isaac_Newton,_1689.jpg

- **Fig. 23:** Wikipedia en espanyol. Representació gràfica de la llei de gravitació universal. Extret de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NewtonsLawOfUniversalGravitation.s
vg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NewtonsLawOfUniversalGravitation.svg)

- **Fig. 24:** ESA (2015). Representació del teixit del camp gravitatòri. Extret de https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime_curvature

- **Fig. 25:** MUÑOZ MENGUAL, Alberto. Diferents parts d'una el·lipse. Extret de <https://www.urbipedia.org/hoja/Elipse>

- **Fig. 26:** FERNÁNDEZ L., José. Representació de les àrees i velocitats que arrossegueu els planetes en diferents punts de l'òrbita. Extret de <https://www.fisicalab.com/apartado/leyes-kepler>

- **Fig. 27:** FERNÁNDEZ L., José. Representació tant matemàtica com gràfica de l'àrea que arrossega un planeta en punts de la seva òrbita. Extret de <https://www.fisicalab.com/apartado/leyes-kepler>

- **Fig. 28:** Eugenio (2010). Evolució d'un sistema planetari. Extret de [http://latierranuestroplaneta.blogspot.com/2010/01/formacion-del-sistema-sola
r.html](http://latierranuestroplaneta.blogspot.com/2010/01/formacion-del-sistema-solar.html)

- **Fig. 29:** Stringfixer. Júpiter. Extret de <https://hmong.es/wiki/Jupiter>

- **Fig. 30:** Toni (2018). Plutó. Extret de <https://www.curiositats.cat/perque-pluto-es-planeta/>

- **Fig. 31:** Viquipèdia. Lluna. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Full_Moon_Luc_Viatour.jpg

- **Fig. 32:** ELFFMAN, Julieta (2021). Asteroide deixant rastre de pols. Extret de [https://chequeado.com/el-explicador/por-que-no-hay-que-preocuparse-cada-v
ez-que-un-asteroide-pasa-cerca-de-la-tierra/](https://chequeado.com/el-explicador/por-que-no-hay-que-preocuparse-cada-vez-que-un-asteroide-pasa-cerca-de-la-tierra/)

- **Fig. 33:** SÁNCHEZ, Rocío (2020). Cometa Halley. Extret de <https://www.muyinteresante.es/ciencia/articulo/datos-curiosos-sobre-el-cometa-halley-221604485544>

- **Fig. 34:** MULLANEY, James (2005). Dibuix dels dos tipus d'òrbites planetàries en un sistema binari. Extret de *Double and Multiple Stars: and How to Observe Them*.

- **Fig. 35:** HARLEY, Charis (2018). Representació de les òrbites planetàries en un sistema de 3 estrelles. Extret de https://www.researchgate.net/publication/327730665_Stability_of_planets_in_triple_star_systems

- **Fig. 36:** Ingeniería de mapas (2013). Representació del model geocèntric. Extret de <https://ingenieriademapas.wordpress.com/2013/06/06/cartografos-ilustres-i-claudio-ptolomeo-3/>

- **Fig. 37:** CALAVERA, Josep. Representació del model heliocèntric. Extret de <https://sites.google.com/site/josepcalavera2deso/3a-avaluacio/3-1---apunts-classe>

- **Fig. 38:** MAJOR, Jason (2013). Representació del model d'hèlix del sistema solar. Extret de <https://www.universetoday.com/107322/is-the-solar-system-really-a-vortex/>

- **Fig. 39:** MULLANEY, James (2005). Formació d'un sistema doble. Extret de *Double and Multiple Stars and How to Observe Them*.

- **Fig. 40:** OpenStax CNX. Evolució d'un sistema doble. Extret de <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-evolution-of-binary-star-systems/>

- **Fig. 41:** Rascto. Representació d'una binària òptica. Extret de <https://rascto.ca/content/unnoticed-treasures-double-stars>

- **Fig. 42:** JANKOV, Slobodan (2010). Detecció de binàries mitjançant interferometria. Extret de https://www.researchgate.net/figure/Heterodyne-interferometer-arrangement-The-light-from-an-infrared-laser-together-with_fig1_49593543

- **Fig. 43:** ATNF. Binària astromètrica. Extret de https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/binary_types.html

- **Fig. 44:** Cambridge university (2017). Binàries espectroscòpiques. Extret de <https://www.cambridge.org/core/books/abs/spectral-atlas-for-amateur-astronomers/spectroscopic-binaries/D2F18005BEF39BE0FED3F2E095E102C8>

- **Fig. 45:** Observatory Open House. Binàries eclipsants i la seva corba lumínica. Extret de <https://www.physast.uga.edu/~rls/astro1020/ch16/ovhd.html>

- **Fig. 46:** La Grange (2018). Binària tipus Beta Lyrae transferint massa i creant un disc d'acreció al voltant de la seva companya. Extret de <https://www.oca.eu/en/esom-news/2100-beta-lyrae-a-system-of-binary-stars-in-contact-and-eclipses-2018>

- **Fig. 47:** KALPANA, Kalpana (2018). Binària tipus W Ursae Majoris. Extret de <https://alchetron.com/W-Ursae-Majoris>

- **Fig. 48:** PlanetPlanet. Sistema estel·lar de 4 estrelles estable. Extret de <https://planetplanet.net/2016/04/13/building-the-ultimate-solar-system-part-6-multiple-star-systems/>

- **Fig. 49:** Viquipèdia. Binària cataclísmica transferint massa a la seva companya. Extret de

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_of_a_Cataclysmic_Variable.png

- **Fig. 50:** Swinborn University. Representació gràfica del centre de masses en un sistema binari. Extret de <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/b/binary+star>
- **Fig. 51:** iSoul (2017). Representació matemàtica del centre de masses d'un sistema de dos cossos. Extret de <https://www.isoul.org/center-of-vass/>
- **Fig. 52:** STROBEL, Nick (2021). Representació de la paral·laxi trigonomètrica. Extret de <https://www.astronomynotes.com/starprop/s2.htm>
- **Fig. 53:** Viquipèdia. Representació de la llei de l'invers al quadrat. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverse_square_law.svg
- **Fig. 54:** font pròpia (2021). Sistema binari de tipus P (simulació).
- **Fig. 55:** font pròpia (2021). Resultats de la simulació amb sistema binari de tipus P.
- **Fig. 56:** font pròpia (2021). Sistema binari de tipus S (simulació).
- **Fig. 57:** font pròpia (2021). Planetes interiors i la zona habitable del Sol en un sistema binari S.
- **Fig. 58:** font pròpia (2021). Resultats de la simulació amb sistema binari de tipus S.
- **Fig. 59:** font pròpia (2021). Seu d'AstroGirona i de l'observatori Can Roig.
- **Fig. 60:** font pròpia (2021). Cúpula observatori Can Roig.

- **Fig. 61:** font pròpia (2021). Telescopi encarregat de l'observació i telescopi solar.
- **Fig. 62:** font pròpia (2021). Telescopi encarregat de fer les fotografies.
- **Fig. 63:** PEREA FERNÁNDEZ, Mónica (2002). Gràfica de la corba lumínica d'una estrella variable. Extre de
http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/Documentos/FernandezPMonica_Variables_2002.pdf
- **Fig. 64:** font pròpia (2021). Menú FotoDif.
- **Fig. 65:** font pròpia (2021). Opció per triar imatges a l'hora de fer l'anàlisi de dades.
- **Fig. 66:** font pròpia (2021). Selecció d'imatges.
- **Fig. 67:** font pròpia (2021). Opció per seleccionar estrelles de fotografies.
- **Fig. 68:** font pròpia (2021).
- **Fig. 69/70:** font pròpia (2021). Selecció d'estrelles variables i de calibració.
- **Fig. 71:** font pròpia (2021). Opció per iniciar el procés per obtenir els resultats.
- **Fig. 72:** font pròpia (2021). Resultats obtinguts en K2-30b.
- **Fig. 73:** font pròpia (2021). Resultats obtinguts en WASP-10b.
- **Fig. 74:** Viquipèdia (2021). Representació de les òrbites en el model geocèntric. Extret de
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ptolemaic_elements.svg

- **Fig. 75:** STASSLER, Matt (2013). Partícules elementals que formen els protons i els neutrons. Extret de <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/the-structure-of-matter/protons-and-neutrons/>
- **Fig. 76:** Wikipedia anglesa. Model estàndard de partícules elementals. Extret de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_Anti.svg
- **Fig. 77:** font pròpia (2021). Escenari principal quan obres el simulador (sistema solar complet).
- **Fig. 78:** font pròpia (2021). Opció del simulador en *chart*.
- **Fig. 79:** font pròpia (2021). Zona habitable del Sol.

Annexos

Annex 1. Glossari

1. **Astre**^[1]: cos celeste amb forma definida i que pot individualitzar-se dels altres cossos de l'Univers.
2. **Conducció tèrmica**^[2]: mecanisme entre dos sistemes basat en el contacte directe de les seves partícules que tendeixen a igualar la seva temperatura o estat d'excitació tèrmica.
3. **Deferents**^[3]: el concepte deferent és com es coneixia en el model geocèntric del sistema solar a les òrbites.
4. **Epicycle**^[4]: en el model geocèntric del sistema solar es creia que els planetes, a part de donar voltes al voltant de la Terra, el punt cèntric del sistema, aquests també rotaven formant una circumferència, rotant a un punt cèntric imaginari, l'equant.
5. **Equant**^[5]: concepte introduït en el model geocèntric del sistema solar que designava el punt cèntric al qual girava el planeta.

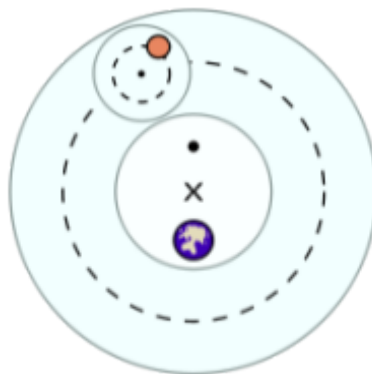


Fig. 74

Annex 2. Demostracions matemàtiques

- **Demostració 1. Intensitat de camp gravitatori**

Primer de tot cal saber que la intensitat d'un camp és la següent:

$$\text{Intensitat del camp} = \frac{\text{Força}}{\text{Magnitud física de la partícula}}$$

Per tant, la intensitat d'un camp gravitatori és la següent:

$$g = \frac{F}{m}$$

La força que s'aplica en un camp gravitatori és la força gravitatòria. Per tant, l'equació serà la següent:

$$g = (G \frac{Mm}{r^2})/m \rightarrow \left[g = G \frac{M}{r^2} \right]$$

- **Comprovació llei de gravitació universal**

En aquest apartat procedirem a comprovar que aquesta llei serveix per comprovar forces d'atracció, tant entre una estrella i un planeta, com entre dos planetes o un planeta i un satèl·lit artificial.

- **Força gravitatòria entre un planeta i el Sol**

Calculem, segons la mecànica newtoniana, la força d'atracció entre el Sol i la Terra. Necessitem les dades necessàries. La massa del Sol (M) són $1,989 \cdot 10^{30}$ kg. La massa de la Terra (m) són $5,972 \cdot 10^{24}$ kg. La distància entre aquests dos cossos (r) és de $1,496 \cdot 10^{11}$ m. Ens falta la dada clau, la constant gravitatòria (G), que és igual en qualsevol cas, $6,67 \cdot 10^{-11}$ m³/kg·s². Desenvolupem els càlculs:

$$\left[F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(1,989 \cdot 10^{30} \cdot 5,972 \cdot 10^{24})}{(1,496 \cdot 10^{11})^2} = 3,54 \cdot 10^{22} N \right]$$

- Força gravitatòria entre dos planetes

Calculem, de la mateixa manera, la força d'atracció entre, per exemple, la Terra i Mart. Aquest no pot ser major a l'anterior.

Les dades són les següents: massa de la terra (M) són $5,972 \cdot 10^{24}$ kg. La massa de Mart (m) són $6,39 \cdot 10^{23}$ kg. La distància mitjana (r) entre aquests dos són $5,46 \cdot 10^{10}$ m. Desenvolupem els càlculs:

$$\left[F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(5,972 \cdot 10^{24} \cdot 6,39 \cdot 10^{23})}{(5,46 \cdot 10^{10})^2} = 8,538 \cdot 10^{16} N \right]$$

- Força gravitatòria entre la Terra i un satèl·lit artificial

Posem per exemple el cas de l'estació espacial internacional, la ISS.

Les dades són les següents: massa de la terra (M) són $5,972 \cdot 10^{24}$ kg. La massa de la ISS (m) són 419.700 kg. La distància entre els dos cossos (r) són $6,785 \cdot 10^8$ m.

Desenvolupem els càlculs:

$$\left[F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(5,972 \cdot 10^{24} \cdot 4,197 \cdot 10^5)}{(6,785 \cdot 10^8)^2} = 3,632 \cdot 10^6 N \right]$$

A part d'aquests últims casos, l'equació de càlcul pot ser utilitzada en el moviment d'asteroides o qualsevol cos en l'espai o en el planeta Terra, com el famós exemple de la poma.

• Demostració 2. Equivalència entre massa i energia

Partim d'un cos al qual s'aplica una força, experimentant així un desplaçament i desenvolupant un treball. El treball es pot expressar de la següent manera:

$$W = \int_{x_0}^{x_1} F dx$$

Si hi ha un desplaçament vol dir que s'hi haurà aplicat una certa velocitat, així que aquest treball és en si energia cinètica.

$$Ec = \int_{x_0}^{x_1} F dx$$

La força pot ser expressada com el quocient entre la quantitat de moviment i el temps que s'aplica la força, és a dir:

$$F = \frac{dp}{dt}$$

Per tant, l'energia cinètica quedaria escrita de la següent manera:

$$Ec = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dp}{dt} dx$$

En el següent pas modificarem la fórmula de la manera que necessitem, així que canviarem el desplaçament per la quantitat de moviment.

$$Ec = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{dt} dp$$

Com el desplaçament partit pel temps és igual a la velocitat, l'equació ens quedarà de la següent manera:

$$Ec = \int_{x_0}^{x_1} v dp$$

La quantitat de moviment, en termes no relativístics, s'escriu de la següent manera:

$$p = mv$$

Però, en termes relativístics la massa es pot calcular, ja que, segons Einstein, la velocitat de la llum pot canviar una massa. En aquest cas, necessitem introduir la transformació Einstein-Lorentz, el també anomenat, factor gamma o factor Lorentz.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La massa, segons Einstein, pot ser expressada de la següent manera.

$$m = \gamma m_0$$

Així doncs, la quantitat de moviment ens quedaria de la següent manera:

$$p = \gamma m_0 v$$

Així doncs, l'equació final ens quedaria de la següent manera:

$$p = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} m_0 v = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

De manera derivada quedaria de la següent manera:

$$dp = m_0 \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} dv$$

Així doncs, l'equació d'energia cinètica queda de la següent manera:

$$Ec = \int_0^{v_1} v dp = \int_0^{v_1} v m_0 \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} dv = \int_0^{v_1} m_0 \frac{v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} dv$$

Podem observar que, en comptes d'una integral del desplaçament, tenim una integral de la velocitat, ja que la variant dependent és la velocitat.

La integral ens mostra el límit entre la velocitat 0 i una velocitat determinada (v_1).

Així doncs, si resollem el límit per a v_1 i per a la velocitat 0 ens queda:

$$Ec = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_1^2}{c^2}}} m_0 c^2 - \frac{1}{\sqrt{1-\frac{0}{c^2}}} m_0 c^2$$

Podem simplificar l'equació de la següent manera:

$$Ec = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2$$

Com hem dit abans, la massa pot ser escrita de la següent manera:

$$m = \gamma m_0$$

Així doncs, l'equació ens queda de la següent manera:

$$Ec = mc^2 - m_0 c^2 \rightarrow Ec = (m - m_0) c^2$$

Per una massa en repòs la seva energia és la següent:

$$E_0 = m_0 c^2$$

Però, i per trobar l'energia total d'un cos? Si sumem l' Ec i l' E_0 la podem trobar.

$$E = (m - m_0) c^2 + m_0 c^2 = (m - m_0 + m_0) c^2 = mc^2$$

És a dir, $E = mc^2$.

- **Demostració 3. de l'equació d'una el·lipse**

$$d(P, F') + d(P, F) = 2a$$

$$\sqrt{(x+c)^2 + y^2} + \sqrt{(x-c)^2 + y^2} = 2a$$

$$\sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2} + \sqrt{x^2 - 2xc + c^2 + y^2} = 2a$$

$$(\sqrt{x^2 - 2xc + c^2 + y^2})^2 = (2a - \sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2})^2$$

$$x^2 - 2xc + c^2 + y^2 = 4a^2 - 4a\sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2} + x^2 + 2xc + c^2 + y^2$$

$$x^2 - 2xc + c^2 = 4a^2 - 4a\sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2} + x^2 + 2xc + c^2$$

$$- 2xc - 2xc - 4a^2 = - 4a\sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2}$$

$$- 4xc - 4a^2 = - 4a\sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2}$$

$$(xc + a^2)^2 = (a\sqrt{x^2 + 2xc + c^2 + y^2})^2$$

$$x^2 c^2 + 2a^2 xc + a^4 = a^2 x^2 + 2a^2 xc + a^2 c^2 + a^2 y^2$$

$$a^4 - a^2 c^2 = a^2 x^2 - x^2 c^2 + a^2 y^2$$

$$a^2(a^2 - c^2) = x^2(a^2 - c^2) + a^2 y^2$$

$$a^2 b^2 = x^2 b^2 + a^2 y^2$$

$$\frac{a^2 b^2}{a^2 b^2} = \frac{x^2 b^2}{a^2 b^2} + \frac{a^2 y^2}{a^2 b^2}$$

$$1 = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$$

- **Demostració 4. 3ra llei de Kepler M.C.U (Moviment Circular Uniforme)**

Com a curiositat sabem que mitjançant la segona llei de Newton, la llei de gravitació universal i considerant un sistema de moviment circular uniforme podem arribar a trobar l'equació de la tercera llei de Kepler.

Segona llei de Newton: $F = ma$

Llei de gravitació universal: $F_g = G \frac{Mm}{r^2}$ Igualem les dues equacions

$$ma = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$a = \frac{GM}{r^2}$$

Ens ha donat una equació per a l'acceleració gravitacional. La velocitat d'un moviment circular uniforme, com que no hi ha acceleració tangencial, acceleració que permet un canvi en el mòdul de la velocitat, sabem que la velocitat és igual al quocient entre el desplaçament i el temps que tarda a fer aquest desplaçament. En el cas d'una circumferència, el desplaçament es pot expressar com a $2\pi r$ i el temps amb el període (temps que es tarda a fer una volta).

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

Els moviments circulars uniformes tenen una acceleració predeterminada i constant, l'acceleració normal. També sabem que en aquests moviments la velocitat canvia de direcció però no de mòdul. L'equació d'aquesta acceleració és la següent:

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

Com es veu, podem relacionar la velocitat amb aquesta equació:

$$a_n = \frac{(2\pi r)^2}{T^2 r}$$

$$a_n = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2 r}$$

$$a_n = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Com podem veure, ja hem trobat un dels elements de l'equació dels períodes, la incògnita T (període). Ara que tenim dues equacions per les acceleracions podem fer un sistema d'equacions igualant-les.

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

$$\frac{T^2}{r^2} = \frac{4\pi^2}{GM} r$$

Encara no completa l'equació podem observar que hem trobat l'element més important de l'equació, la constant de kepler (k), representada per $\frac{4\pi^2}{GM}$. Finalment resollem l'equació.

$$[T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3]$$

Annex 3. Partícules elementals

En aquest annex passem a descriure les diferents partícules elementals descobertes fins al dia d'avui. Primer de tot hem de definir què és una partícula elemental. Podem definir una partícula elemental com aquella partícula que no es pot compondre d'altres partícules. Aquestes són partícules subatòmiques, és a dir, més petites que els àtoms. Podem diferenciar 3 tipus de partícules elementals: els **quarks**, els **leptons**, els **bosons de gauge** o intermediaris i els **bosons escalars**.

Podem diferenciar els quarks i els leptons dels bosons per una característica fonamental: els quarks i els leptons constitueixen la matèria. Diferenciem els quarks dels leptons.

- **Quarks:** els quarks poden interactuar amb les quatre forces fonamentals, electromagnetisme, la força nuclear forta i dèbil i la gravetat. Aquestes partícules són conegudes per constituir protons i neutrons i tenen un spin $\frac{1}{2}$, així aclarint que pertanyen al grup de fermions. Existeixen 6 tipus de quarks: up, down, charm, strange, top i bottom. Per exemple, 2 quarks up i 1 quark down formen un protó. En canvi, 2 quarks down i 1 quark up formen un neutró.

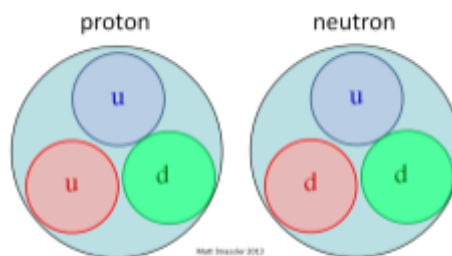


Fig. 75

- **Leptons:** els leptons, al contrari que els quarks, no poden interactuar amb totes quatre de les quatre forces fonamentals. No poden interactuar amb la força nuclear forta. Aquests també pertanyen al grup de fermions, ja que tenen un spin de $\frac{1}{2}$. Existeixen, també, 6 tipus de leptons: l'electró, el muó, el tau o tauó i els seus respectius neutrins (neutrí electrònic, muònic i tau o tauònic). Per exemple, l'electró forma juntament amb els protons i neutrons l'estructura atòmica.

Dins aquest grup hi ha una partícula que s'ha de tenir en compte en les fusions d'hidrogen, el neutrí, especialment el neutrí electrònic. El neutrí és una partícula semblant a un fotó. La seva velocitat és pròxima a la velocitat de la llum, per tant la seva massa és aproximada a la del fotó, és a dir, 0. La massa del neutrí pot ser com a màxim 1 milió de vegades més petita a la de l'electró, d'aquí la seva alta velocitat. També, els neutrins no interaccionen amb la matèria.

Cal aclarir que totes les partícules que hem mencionat fins ara tenen una respectiva antipartícula.

- **Bosons de gauge:** els bosons de gauge són partícules que actuen com a portadors d'una força fonamental. Existeixen 4 tipus de bosons de gauge: els fotons, els gluons i els bosons W i Z. Com hem dit, aquestes partícules actuen com a portadors d'una força fonamental. Els fotons corresponen a la interacció electromagnètica, els gluons corresponen a la força nuclear forta i els bosons W i Z corresponen a la força nuclear dèbil. Es pot veure que no s'hi inclou la gravetat. Això és així perquè encara no s'ha descobert una partícula que correspongui amb la interacció del camp gravitatori. En el camp de la física s'està investigant sobre la possible existència d'una partícula que compleixi aquesta característica, el gravitó.
- **Bosons escalars:** en aquest grup de bosons només hi pertany un tipus de bosó, però gairebé un dels més importants i únics, el bosó de Higgs, anomenat així pel seu teoritzador, Peter Higgs l'any 1964. Aquest bosó és la partícula que genera el camp conegut com a camp de Higgs, també teoritzat per Peter Higgs. Aquest camp és l'encarregat de proporcionar massa a les partícules que interaccionen amb aquest camp. És a dir, sense aquest camp, cap partícula tindria massa, cap àtom s'hauria format i la vida hauria estat impossible. Però, què és el que forma aquest camp? La resposta és senzilla, el bosó de Higgs.

En resum:

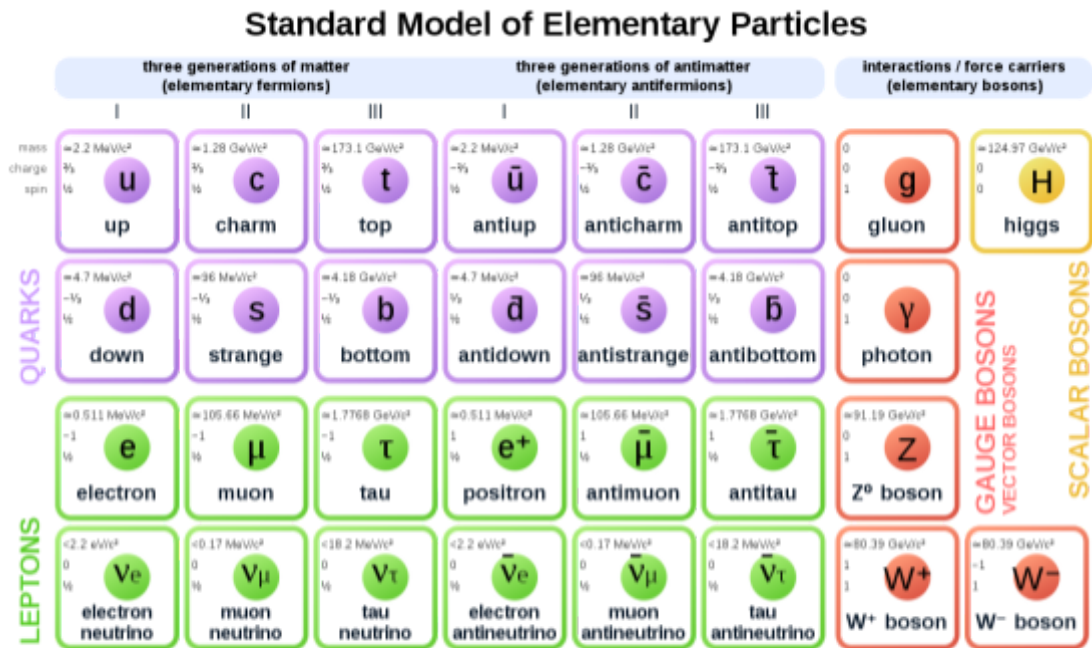


Fig. 76

Annex 4. Simulador

Totes les imatges i informació del programa que apareixen en l'annex són font pròpia

Universe Sandbox 2 és un simulador en el qual pots recrear situacions quasi inimaginables en l'univers. Té diverses funcions que podem aplicar tan en el sistema solar com en un espai buit.

El primer que trobarem en obrir l'aplicació és el sistema solar com a espai predeterminat.

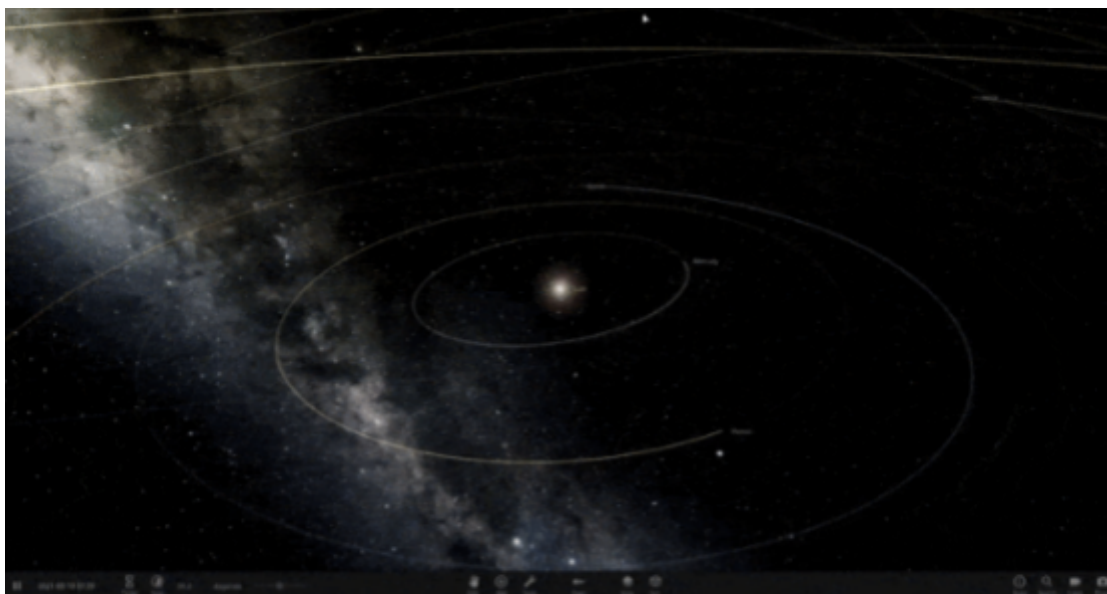


Fig. 77

A sota veiem una barra d'eines en la qual podem modificar les següents variants:

- **El temps:** aturar-lo o veure quant temps hem avançat. En aquest podem canviar la zona horària en la universal o local.
- **Timer/Step:** El *timer* serveix per determinar fins a quin punt determinat del temps vols avançar la simulació. L'*step* serveix per determinar la unitat en què avança el temps. També es pot accelerar o alentir el temps.
- **Edit:** en aquest apartat es poden canviar característiques (posició, rotació i vector de la velocitat) dels diversos cossos presents en la simulació. A part es veuen les coordenades que ocupa cada cos en aquell moment.
- **Add:** en aquest apartat es poden afegir cossos de l'univers.
Disposa de diferents tipus d'objectes per interaccionar amb l'espai:
 - **Estrelles**
 - **Planetes**
 - **Satèl·lits o llunes**
 - **Cossos menors** (planetes nans, asteroides i cometes)
 - **Objectes humans**
 - **Galàxies**

- **Forats negres**

Es pot modificar la funció que tindrà el cos en l'espai:

- **Cos immòbil** (velocitat = 0)
 - **Cos que orbita**
 - **Creació binària** d'aquest cos i un altre que es trobi en aquell espai
 - **Llançament** d'un cos sobre un altre
- **Tools:** és un apartat molt poc utilitzat del simulador. Les funcions més destacades són:
 - **Directori de sistema:** en aquest apartat es poden controlar diverses variants d'un cos com la seva òrbita, excentricitat...
 - **Moviment:** es poden controlar velocitats i temps d'un cos.

Aquests es poden trobar a l'apartat *More*.

- **Chart:** aquesta opció et permet veure el sistema solar segons l'ordre en el que està constituït.



Fig. 78

- **View:** en aquest apartat es pot modificar la vista del cos i sistema que s'estigui observant. Es poden activar i desactivar:
 - **Els noms d'identificació**

- El rastre que deixa l'òrbita del cos
- L'òrbita completa que defineix el cos
- Les zones habitables del sistema que s'estigui observant

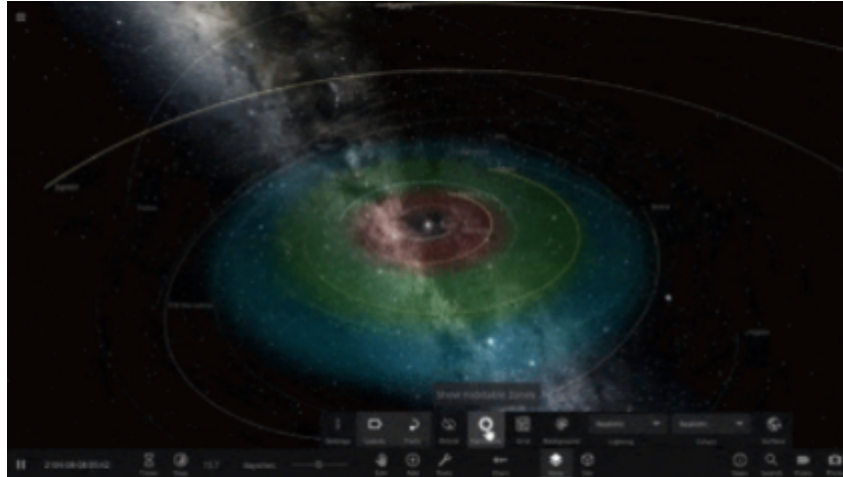


Fig. 79

- Una taula de distàncies
- Canviar el fons

A part d'aquestes modificacions visuals, hi ha més opcions per modificar la visió d'un cos o de tot un sistema.

- **Sim:** en aquest apartat es poden modificar elements d'una simulació com per exemple, partícules de col·lisió o de fragmentació i modificar la gravetat i la temperatura d'un cos o d'un sistema.

Cada cos pot ser modificat amb una sèrie de variants:

- **Visió general:** en aquest apartat es poden canviar diferents valors dels cossos.
 - Massa
 - Radi
 - Densitat
- **Moviment:** en aquest apartat es poden canviar valors cinètics del cos.

- Distància
 - Velocitat
 - Rotació
 - Efectes de marea
 - Atractor més potent, posició segons la càmera i accions
- **Composició:** en aquest apartat es pot modificar l'interior d'un cos i les seves propietats.
 - Materials
 - Propietats
 - Comparacions
 - Camp magnètic
 - **Temperatura:** modificar la temperatura del cos.
 - **Aparences:** aquestes segons la vista del simulador.
 - Color identificador
 - Vista
 - **Accions:** és a dir, accions que es poden aplicar al cos seleccionat.

Es pot accedir a aquestes opcions donant doble clic al cos que vulgui ser
modificat