



ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Treball de recerca



"Mesura el que és mesurable, i fes mesurable el que no ho és".
— Galileo Galilei

Índex

1. Introducció	4
2. Objectius generals	8
3. Marc teòric	9
3.1. El Sol	9
3.1.1. <i>Característiques generals</i>	10
3.1.2. <i>Tipus d'estels</i>	11
3.1.3. <i>Com genera energia?</i> ^[8]	13
3.1.4. <i>Cicle de la vida del Sol</i>	15
3.2. Estructura i composició del Sol	17
3.2.1. <i>Estructura del Sol</i>	17
3.2.2. <i>Composició química del Sol</i>	19
3.3. Activitat Solar	19
3.3.1. <i>Camp magnètic</i>	19
3.3.2. <i>Taques solars</i>	20
3.3.3. <i>Protuberàncies</i>	21
3.3.4. <i>Fulguracions</i>	22
3.3.5. <i>Vent solar</i>	23
4. Determinació experimental del període de rotació solar a partir de les taques solars	24
4.1. Història taques solars	24
4.2. Objectius parcials.....	25
4.3. Observació.....	25
4.4. Utilitatge.....	29
4.5. Descripció de l'experiment	30
4.6. Procediment.....	32
4.7. Resultats obtinguts, anàlisi i discussió	35
4.8. Conclusions parcials	36
5. Estimació experimental de la distància de la Terra al Sol	38
5.1. Objectius parcials.....	38

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

5.2. Descripció de l'experiment	38
5.3. Utilatge.....	39
5.4. Dibuix del muntatge	39
5.5. Procediment.....	39
5.6. Resultats, anàlisi i discussió	41
5.7. Conclusions	43
5. Estimació experimental de la constant solar	44
5.1 Objectius parcials.....	44
5.2. Descripció de l'experiment	44
5.3. Utilatge.....	45
5.4. Dibuix del muntatge	46
5.5. Procediment.....	46
5.5.1. Preparació del material.....	46
5.5.2. Experiment	48
5.6. Resultats, anàlisi i discussió	50
5.7. Conclusions parcials	55
6. Estimació experimental de la lluminositat del Sol	56
6.1. Objectius parcials.....	56
6.2. Lluminositat a partir de la potència d'una bombeta	56
6.2.1. Descripció de l'experiment.....	56
6.2.2 Utilatge	56
6.2.3. Dibuix del muntatge	57
6.2.4. Procediment	57
6.2.5. Resultats, anàlisi i discussió	59
6.3. Estimació experimental de la lluminositat del Sol a partir de la constant solar	60
6.4. Conclusions parcials	61
7. Estimació experimental de la temperatura del Sol	62
7.1. Objectius parcials.....	62
7.2. Descripció dels càlculs.....	62
7.3. Resultats, anàlisi i discussió	62
7.4. Conclusions	63
8. Estimació del temps de vida del Sol.....	64

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

8.1. Objectius parcials.....	64
8.2. Descripció dels càlculs.....	64
8.3. Conclusions parcials.....	69
9. Estimació experimental de la massa del Sol	70
9.1. Objectius parcials.....	70
9.2. Explicació dels càlculs	70
9.3. Resultats, anàlisi i discussió	72
9.4. Conclusions parcials.....	72
10. Càlcul de la intensitat del camp gravitatori del Sol	73
10.1. Objectius parcials.....	73
10.2. Fonaments teòrics	73
10.3. Resultats, anàlisi i discussió.....	74
10.4. Conclusions parcials	74
11. Càlcul de la velocitat de les ejeccions de la massa coronal del Sol.....	75
11.1. Introducció	75
11.2. Objectius parcials.....	76
11.3. Observació de la cromosfera solar.....	76
11.3.1. <i>Material</i>	76
11.4. Estimació de la velocitat de les ejeccions de massa coronal del Sol (ECMS)	78
11.4.1. <i>Mètode 1 per calcular la velocitat inicial d'una ECM</i>	78
11.4.2. <i>Mètode 2 per calcular la velocitat inicial d'una ECM</i>	83
11.5. Conclusions parcials	88
12. Conclusions.....	90
13. Agraïments.....	94
14. Referències bibliogràfiques	95
15. Annexes	100
15.1. Annex 1. Muntatge de la cambra fosca.....	100

1. Introducció

Abstract

I do not know anyone who has at least once in his life been fascinated by the splendour of the Sun. Since the first civilizations and cultures, the Sun has been very present and relevant in them. The Sun, being the closest star to Earth, allows us to study its operation and structure. Like all stars, it is in constant activity and evolution, and these, when they arrive in Earth, go a little unnoticed, but it does not take away the fact that they are very important. For this reason, my work tutor [REDACTED], and I, a student, [REDACTED], have carried out an astrophysical study where we have study some phenomena that take place in the Sun, as well as some of its magnitudes. The entire study has been carried out with the simplest possible material available to everyone and using methods as simple as the darkroom. In this work we have studied and estimate the rotation period, the solar constant, the luminosity, the distance from the Earth to the Sun, the temperature, the gravitation field, the mass, the life cycle and the CME's speed. In addition, we observed the Sun with different methodologies.

Resumen

No conozco a nadie que no se haya quedado fascinado al menos una vez en su vida por el esplendor del Sol. Desde las primeras culturas, el Sol ha estado muy presente y relevante en ellas. El Sol, al ser la estrella más cercana a la Tierra, nos permite estudiar su funcionamiento y estructura. Como todas las estrellas, está en constante actividad y evolución, y estas, cuando llegan a la Tierra, pasan un poco desapercibidas, pero no quita que sean muy importantes. Por ello, mi tutor de trabajo [REDACTED], y yo, alumna, [REDACTED], hemos realizado un estudio astrofísico donde estudiamos algunos fenómenos que ocurren en el Sol, así como algunas de sus magnitudes. Todo el estudio se ha realizado con el material más sencillo posible al alcance de todos y utilizando métodos tan sencillos como el cuarto oscuro. En este trabajo, hemos estudiado y estimado el período de rotación, la distancia de la Tierra al Sol, la constante solar, la luminosidad, la temperatura, el campo gravitatorio, la masa y la velocidad de las eyecciones de masa coronal.

Des de ben petita, sempre m'han agradat totes aquelles activitats que tinguessin a veure amb el Sol, com el fet d'anar a la platja o prendre el Sol. Totes aquestes activitats tan agradables les tenia tan normalitzades, que no va ser fins que les "van treure", que em vaig adonar del molt que necessitem el Sol. Em vaig adonar que, quan van declarar l'estat d'alarma i ens vam haver de confinar, estava menys

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

enèrgica i em sentia amb menys força. Aquesta feblesa fou deguda a l'escassetat d'admirar l'esplendor del Sol i, sortir al balcó, era un petit raig d'energia. El confinament em va fer rumiar sobre el valuós que era el Sol i que passaria si algun dia no estigués...

Com sóc una persona molt curiosa, vaig decidir parlar amb [REDACTED] per fer el treball de recerca i em va proposar fer un estudi astrofísic del Sol. D'entrada, em feia una mica de por pel fet que es veia un treball complex, però, a mesura que em vaig endinsar en ell i [REDACTED] em va guiar, em vaig quedar meravellada per la quantitat de coses que podia treballar sobre el Sol, estant a casa.

Però aquesta importància del Sol que jo vaig descobrir aquest any, ja era present des de l'origen de tot. Sense el Sol no podríem viure, puix que els éssers vius necessitem la seva llum, calor i energia que ens arriben a la Terra. El Sol ha estat present en totes les generacions i civilitzacions amb un cert grau d'importància condicionant fets que avui en dia considerem habituals com la fotosíntesi, l'obtenció de vitamina D o el metabolisme. Per exemple, per als egipcis el sol representava la germinació, la calor i la llum. Això va fer que les deïtats solars fossin importants. A Egipte, el culte a el Sol va prevaler durant segles i es va associar el seu poder a molts déus, com Horus, Ra, Uadyet, Sejmet, Hathor, Nut, Isis, Bat i Menhit; per tant, el Sol estava associat amb la divinitat.

En aquest treball, hem volgut donar-li el prestigi que mereix el Sol i hem realitzat un estudi astrofísic, on s'han fet estimacions de diferents magnituds físiques relacionades amb el Sol utilitzant estris senzills (cambra fosca, telescopi, reflector, sensor de temperatura, etc.), que estan a l'abast de qualsevol centre docent, dissenyant els experiments adients que han permès l'obtenció de moltes dades.

El treball està estructurat en dos grans parts: una part pròpiament teòrica, que després la utilitzarem per redactar la segona, la pràctica. En aquesta s'estudien i s'estimen algunes de les magnituds del Sol: el període de rotació, la distància del Sol a la Terra, la constant solar, la lluminositat, la temperatura el temps de vida restant del Sol, la seva massa, la intensitat del camp gravitatori i la velocitat de les ejeccions de la massa coronal.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

En la primera part, la teòrica, hem conegut l'estructura interna i externa del Sol, així com produeix energia. A més, hem sigut capaços de classificar-lo dins dels tipus d'estrelles i hem tractat alguns dels seus fenòmens i magnituds més importants.

Galileu va estudiar durant tres dies consecutius el canvi de posició de les taques del Sol el 1612 i demostrava que la superfície del Sol girava sobre si mateixa. A més, Richard Christopher Carrington va estudiar el període de rotació en funció de la latitud a partir de les taques solars. Inspirats en aquests dos astrònoms, hem estudiat el període de rotació del Sol a través de les taques solars. Per fer-ho, hem utilitzat programa Tracker, el qual ens permet fer l'anàlisi d'un vídeo del Sol proporcionat pel satèl·lit SOHO. D'aquesta manera, hem fet una estimació dels períodes de rotació sinòdic i sideri. A més, també vam observar el Sol en una fase d'activitat solar mínima i en una altra on es trobava al principi d'un nou cicle solar.

A continuació, hem fet una estimació de la distància del Sol a la Terra a través del muntatge d'una cambra fosca i establint un teorema de Tales amb les mesures que sabíem.

Tenint en compte que les energies renovables són cada vegada més rellevants en la nostra societat, vam decidir estudiar la constant solar. Gairebé tota la nostra energia prové del Sol i la seva calor i llum són la base de moltes reaccions químiques necessàries, les quals han produït combustibles fòssils com el carbó o el petroli durant centenars d'anys. La radiació solar és important per aconseguir altres formes d'energia renovable com el vent, les onades o la biomassa. La potència subministrada per una instal·lació amb aparells solars depèn de la radiació solar que incideix perpendicularment per unitat de superfície. Aquesta dada és molt important per als dissenyadors d'un parc solar, ja que està relacionada amb la constant solar. Tenint en compte el seu valor, vam dissenyar un calorímetre, amb el qual hem exposat un cilindre de ferro durant 15 minuts al Sol i 15 a l'ombra, tota l'estona connectat a un sensor de temperatura que enviava dades a un ordinador creant un gràfic temperatura – temps. Amb aquestes dades, hem pogut fer una estimació de la quantitat d'energia calorífica rebuda per la Terra procedent del Sol i de la constant solar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

A continuació, hem realitzat una estimació experimental de la lluminositat i la temperatura del Sol. Hem determinat la lluminositat de dues formes: a partir d'una bombeta de potència coneguda i de la constant solar (calculada en l'apartat anterior). Un cop calculada la lluminositat de les dues maneres, hem calculat la temperatura amb les dues a partir de la llei de Stefan-Boltzmann.

A més, hem realitzat una estimació experimental del temps de vida del Sol a través de l'equivalència entre massa i energia ($E=mc^2$). Coneixent la lluminositat del Sol i la seva massa, es pot fer una estimació del seu temps de vida.

En penúltim lloc, estudiant les lleis del camp gravitatori, hem realitzat una estimació de la massa del Sol amb la llei de la gravitació universal i, a més, hem calculat la intensitat del seu camp gravitatori amb la seva fórmula.

Finalment, hem estimat la velocitat d'una ECM d'una imatge i un GIF. Per fer-ho, hem utilitzat dues metodologies diferents, ambdues amb ajuda del programa Tracker, el qual ens permet fer un anàlisi d'aquests arxius. A més, també vam observar la cromosfera solar amb un telescopi amb un filtre H-alfa.

2. Objectius generals

1. Conèixer l'estructura interna del Sol, així com produeix energia.
2. Determinar experimentalment el període de rotació solar a partir de les taques solars.
3. Fer una estimació experimental de la distància de la Terra al Sol.
4. Fer una estimació experimental de la constant solar.
5. Fer una estimació experimental de la lluminositat del Sol.
6. Fer una estimació experimental de la temperatura del Sol.
7. Fer una estimació experimental de la vida del Sol.
8. Fer una estimació experimental de la massa del Sol.
9. Calcular la intensitat del camp gravitatori del Sol.
10. Calcular la velocitat de les ejeccions de massa coronal.

3. Marc teòric

3.1. El Sol

El Sol es troba situat en un braç de la galàxia Via Làctia anomenat Orió, al supercúmulo denominat Local i al cúmulo del Grup Local, a 27.000 anys llum del centre de la galàxia.

És el responsable principal de l'existència de vida a la Terra, del clima, la situació i la composició de qualsevol planeta del Sistema Solar i també de nombrosos efectes a la Terra (tempestes electromagnètiques, aurores boreals...) i en altres planetes. Encara que no destaca dins d'una galàxia com és la Via Làctia, és indispensable per al Sistema Solar, format per vuit planetes, diversos planetes nans, varis milers de milions d'asteroides, nombrosos satèl·lits i milions de cometes, amb una grandària de 18 bilions de km (121 AU¹) des del Sol fins a l'heliopausa².

El Sol constitueix el 99,8% de la massa del Sistema Solar, i a causa de la seva elevada força gravitatòria atreu tots els altres astres propers a ell, que orbiten al seu voltant, constituint el centre del Sistema Solar, el punt més fonamental del nostre món.

Es calcula, no obstant això, que en la Via Làctia hi ha aproximadament 200.000 milions d'estels i que existeixen milers de milions de galàxies, la qual cosa ens dóna una idea de la immensitat de l'univers.

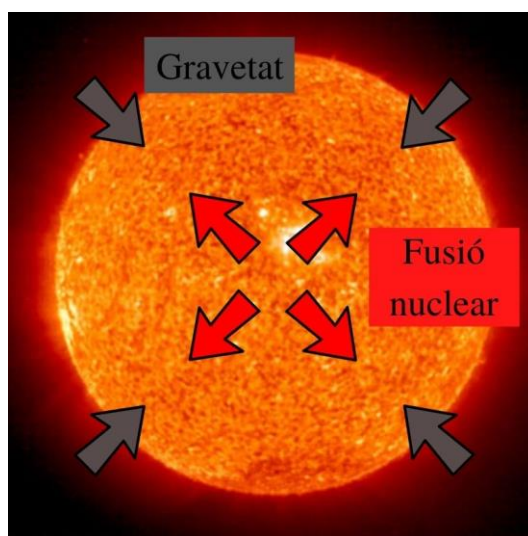
¹ Una UA (Unitat astronòmica) és la distància mitjana entre la Terra i el Sol la qual equival a 149.597.870.700m.

² Frontera entre el Sistema Solar i l'espai interestel·lar, on el vent solar s'uneix al mitjà interestel·lar o al vent solar procedent d'altres estels, aproximadament a 120AU.

3.1.1. Característiques generals

- El Sol és un estel de mida mitjana, del tipus G2 i classe V. Això significa que té un espectre groguenc, no és molt calent i està situat en la seqüència principal (vegeu punt 3.1.2.).
- Gràcies a l'espectroscopi, inventat per Robert Bunsen i Gustav Kirchoff³, es coneix la seva composició: 70-74% d'hidrogen, 27-23% d'heli i 3% d'altres elements (conté 80 dels 90 elements naturals restants), gairebé tots ells en estat de plasma.
- El Sol, i amb ell tot el Sistema Solar, té un moviment propi en relació a la galàxia, desplaçant-se a 20km/s (72.000 km/h) cap a la constel·lació d'Hèrcules, a prop de l'estrella Vega.

En el Sol es produeix un equilibri, denominat *equilibri hidrostàtic*, entre la pressió del nucli i la força de la gravetat, ja que sinó explotaria. Es produeix quan la compressió (produïda per la força de la gravetat, cap a l'interior) s'equilibra amb les forces de pressió i radiació (resultat de l'energia tèrmica creada per fusió nuclear, que actuen cap a l'exterior).



Imatge 1. Equilibri hidrostàtic.

³ Robert Bunsen (1811 - 1899) i Gustav Kirchoff (1824 – 1877), científics alemanys.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

A la següent taula es detallen les característiques generals del Sol, i es comparen amb les de la Terra:

Magnitud	Sol	Comparació Sol – Terra
Massa	$2 \cdot 10^{30}$ kg	x333.000 massa Terra
Volum	$1,41 \cdot 10^{18}$ m ³	x1.000.000 volum Terra
Radi	695.000km	x109,3 radi Terra
Temperatura superficial	6.000 °C	14,04 °C a la Terra
Temperatura del nucli	15.000.000 °C	6.700 °C a la Terra
Rotació	25 dies equador/ 30 dies pols	23h 56m 4s
Distància a la Terra	149.600.000 km	
Tipus espectral	G2 de la seqüència principal	
Magnitud aparent	-26,8	
Magnitud absoluta	4,8	

Taula 1. Principals magnituds del Sol i en comparació a la Terra.

3.1.2. Tipus d'estels

Les dues classificacions més utilitzades en astronomia per agrupar els estels segons les seves característiques són la classificació espectral i el diagrama Hertzsprung – Russell (HR).

- **Classificació espectral:** Segons la temperatura i el color que emeten.

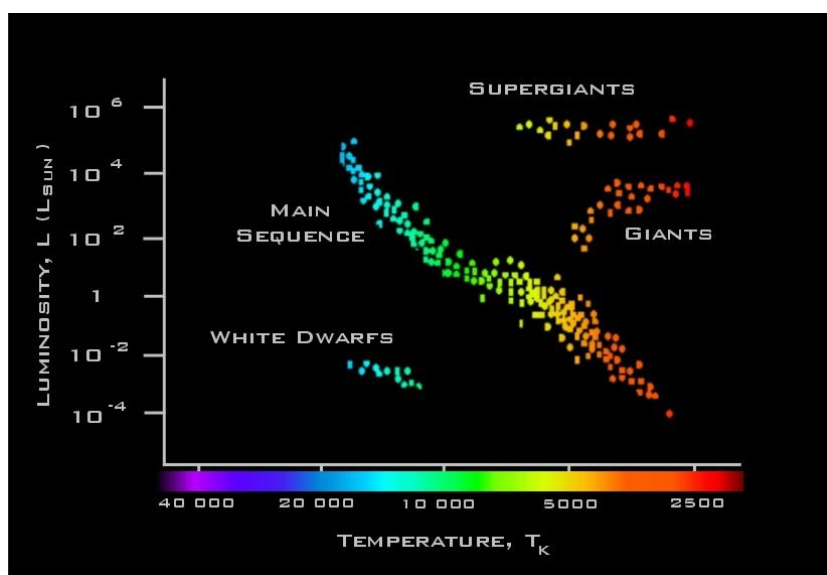
Tipus	Color	Temperatura (°C)
O	Blau	30.000 – 50.000
B	Blanc-blau	12.000 – 30.000
A	Blanc	8.000 – 12.000
F	Blanc-groc	6.500 – 8.000
G	Groc	5.000 – 6.500

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

K	Taronja	3.500 – 5.000
M	Vermell	2.500 – 3.500

Taula 2. Classificació espectral.

- **Diagrama Hertzsprung – Russell (HR):** Segons la massa, grandària, lluminositat i temperatura.



Imatge 2. Diagrama HR. Font: Geofrik's.

En aquest diagrama, es poden agrupar els estels en tres tipus:

- **Estels de la seqüència principal Estels de la seqüència principal Estels de la seqüència principal (tipus V):** Situats en la diagonal que va des de dalt a l'esquerra (estels blaus, molt calents i molt brillants) fins a baix a la dreta (estels vermells, poc calents i poc brillants). El 90% dels estels que veiem es localitzen en la seqüència principal (entre ells el Sol). En ella es mantenen estables durant la major part de la seva vida (la pressió de les reaccions nuclears s'equilibra amb la força de la seva gravetat) fins que augmenta el seu radi i disminueix la seva temperatura, evolucionant a gegants vermells o supergegants.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- **Gegants vermells Gegants vermells Gegants vermells (tipus II):** Són estels de grans dimensions, poc calents però molt lluminosos. Tenen un ritme de fusió molt ràpid (solament viuen uns milions d'anys) i acaben convertits en supergegants o supernoves, i finalment en estels de neutrons o forats negres.
- **Nans blancs (tipus VI):** Són estels petits, molt ca Nans blancs lents però poc lluminosos. Es van apagant i refredant lentament (viuen centenars de milers de milions d'anys) i acaben convertits en un nan negre.
- **Estels cefeides:** Estels de diferents colors i grandàries i lluminositat variable.

3.1.3. Com genera energia?^[8]

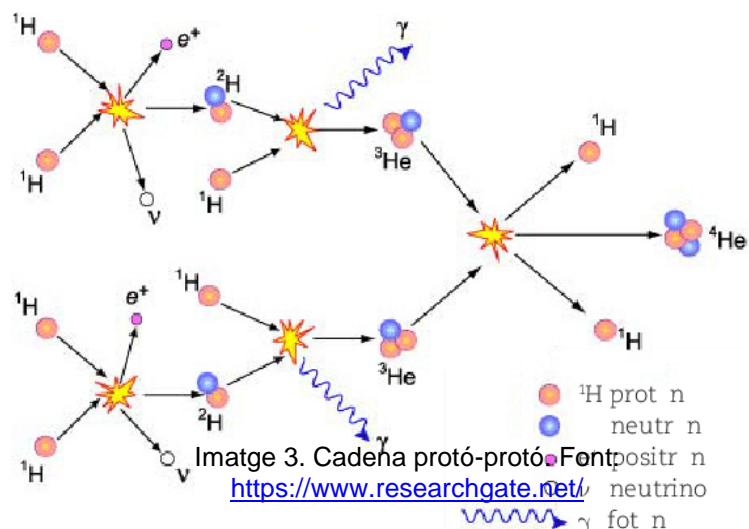
El sol està dividit en tres parts principals: el nucli, la zona radioactiva i la zona convectiva (de més intern a més superficial). La gravetat exerceix molta pressió sobre el nucli de el Sol, el que fa que les temperatures també siguin altes.

El Sol està fet d'hidrogen. L'energia es produeix quan dos àtoms d'aquest gas xoquen entre si, sota aquestes altes pressions i temperatures en el nucli i, es fusionen formant un altre element químic: l'heli (**cadena protó-protó**) (Imatge 3). La cadena protó-protó es basa en la **fusió nuclear**, utilitzant la famosa fórmula d'Einstein $E=mc^2$. La fusió d'àtoms d'hidrogen en el Sol allibera molta energia en forma d'ones de llum i calor. Algunes d'aquestes ones (rajos γ , rajos X, ones de ràdio, etc.) s'han de filtrar per

fer possible la vida a la Terra. No obstant això, nosaltres només percebem directament la llum visible.

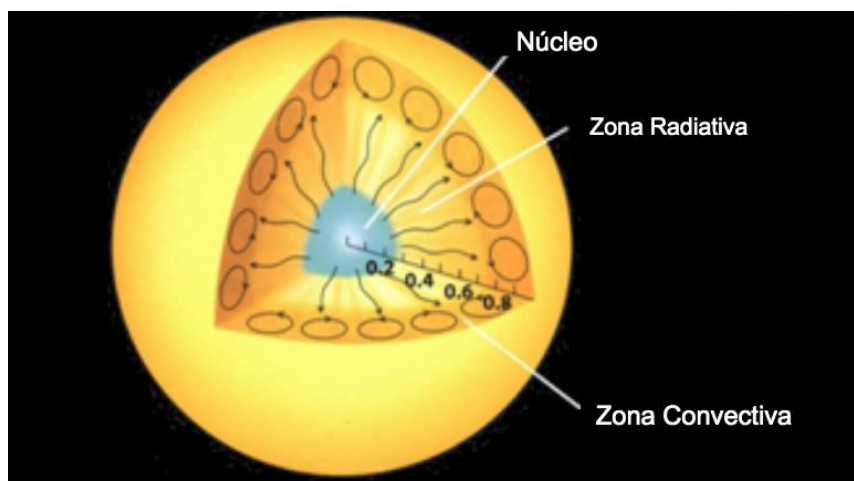
L'energia generada ascendeix a **la zona de radiació** i la **zona de convecció** fins arribar a la fotosfera (imatge 4). Aquest

procés dura uns deu milions d'anys, per la qual cosa és molt lent. Aquesta energia



ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

passa per la zona de radiació on s'eleven els raigs X i els raigs γ . Són invisibles i molt lents, i viatgen una distància curta perquè són absorbits per àtoms d'hidrogen i remesos en una altra direcció. Quan es refreda, aquesta energia es converteix en radiació ultraviolada i llum visible. La zona de convecció passa per convecció: els raigs de calor interns es dirigeixen cap a la fotosfera en files, mentre que els raigs de calor externs disminueixen a causa de la major densitat.



Imatge 4. Transmissió d'energia en les capes del Sol. Font: <http://slideplayer.es/slide/5498120/>

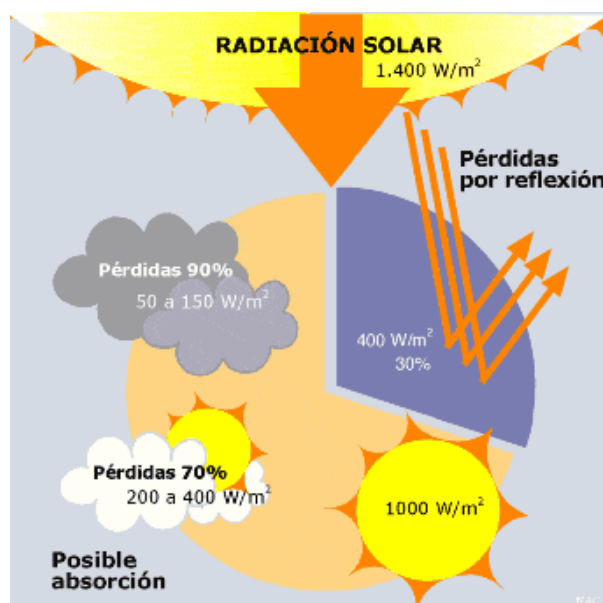
3.1.3.1. Constant solar^[7]

Gairebé tota la nostra energia prové de el Sol. És la causa de el vent, l'evaporació de les aigües superficials, la formació de núvols, etc. La seva calor i llum són la base de moltes reaccions químiques necessàries, les quals han produït combustibles fòssils com el carbó o el petroli durant centenars d'anys. La radiació solar és important per aconseguir altres formes d'energia renovable com el vent, les onades o la biomassa.

L'energia solar arriba a la superfície de la Terra de dues formes diferents: incidint en objectes il·luminats pel sol (**radiació directa**) o reflectint la radiació solar absorbida per l'aire i la pols atmosfèrica (**radiació difusa**). El primer tipus es pot utilitzar directament, mentre que el segon tipus es pot utilitzar per a cèl·lules fotovoltaïques.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

La radiació solar fa referència als valors d'irradiació solar, és a dir, la quantitat d'energia rebuda per unitat de superfície en un temps determinat (**constant solar**). Aquests valors normalment expressen l'energia que prové de la radiació directa del disc solar i la radiació difusa que, escampada per l'atmosfera, prové de la resta de cel. La relació entre la radiació directa i la difusa varia segons les condicions meteorològiques, fins i tot en dies ennuvolats es pot arribar a anul·lar la segona. Sobre la superfície de la Terra, el valor de la constant Solar oscil·la entre 1300 i 1400 W/m². No obstant això, dins de la Terra aquest valor és menor a causa de les pèrdues per reflexió, absorció i dispersió a l'atmosfera i aquest valor es redueix un 30% aproximadament.



Imatge 5. Radiació solar incidint sobre la Terra. Font:

https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/img/sol-fuente-basica2.gif

3.1.4. Cicle de la vida del Sol

La durada de la vida d'una estrella depèn de quant combustible nuclear tingui (massa), i com de ràpid el consumeixi (potència). Aquestes, com qualsevol ésser viu, neixen, evolucionen i moren. Pel seu estudi, és important saber en quin part del cicle estan, ja que en cada fase es comporten diferent, i el tipus d'estrella (petita, mitjana o gran), perquè varien les etapes d'evolució i mort.

En el Sol, podem observar aquestes tres etapes de la següent manera:

- **Naixement:** Al llarg dels anys s'han desenvolupat diferents teories, però la més acceptada actualment és la de la teoria de la nebulosa primitiva,

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

proposada per Kant i Laplace l'any 1796. Aquesta teoria ens diu que la formació de sistema Solar es va deure al col·lapse gravitacional dels núvols de gas i pols interestel·lar que giren lentament, fins que van formar el sol i els planetes. La nebulosa gira a causa de l'acció de la gravetat, aplanant-la en forma de disc, el que ajudarà a explicar el naixement de planetes i sistemes estel·lars, que després produiran galàxies com la Via Làctia.

- **Evolució:** El Sol es troba actualment en aquesta fase, en la meitat de la seva vida (va néixer fa uns 4.600 milions d'anys i es calcula que continuarà evolucionant uns 5.000 milions més). Aquest evoluciona gràcies a la fusió nuclear que té lloc al nucli. Es troba en la seqüència principal que, és on es troben els estels que evolucionen consumint hidrogen. Quan l'heli s'esgoti, el sol sortirà de la seqüència principal i començarà a desaparèixer (mort).
El Sol és una estrella mitjana, de tipus G i, com és molt petita per esdevenir una gran supernova i esclatar, en el seu lloc, s'anirà desgastant a poc a poc. Primer, es convertirà en una gegant vermella i finalment s'esgotarà com una feble nana blanca.
- **Mort^[9]:** Dins de 5.000 milions d'anys, el Sol hi haurà consumit tot el combustible del seu nucli, (hidrogen). Llavors, començarà a fusionar heli. Es farà deu vegades més gran i es tornarà vermell i Es s'empassarà a tots els planetes del Sistema Solar interior (Mercuri, Venus, la Terra i potser Mart) i els altres es cremaran per la calor i la radiació. Aquesta durarà milions d'anys. Quan l'heli també s'esgoti, fusionarà carboni per algun temps. Però quan ja no quedi combustible, la gravetat del seu nucli farà tota la massa de el Sol quedi aixafada en el seu nucli i es convertirà en una nana blanca. Per llavors tot just quedarà ja res de el sistema solar, ja que la radiació haurà acabat amb tot.



Imatge 6. Cicle de la vida del Sol. Font: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sol>

3.2. Estructura i composició del Sol

3.2.1. Estructura del Sol

El Sol està format per diverses capes de ordenades de forma concèntrica de la més interior fins la més exterior:

- **Nucli:** És la zona de el Sol on es produeix la fusió nuclear causa de l'alta temperatura, és a dir, la generació d'energia del Sol pràcticament sense variació de brillantor i calor. La seva temperatura alta i la seva gran densitat generen un ambient idoni per a les reaccions químiques, que després generen elements pesats en la taula periòdica. La temperatura és de 15.000.000 ° C.
- **Zona Radioactiva:** Les partícules que transporten l'energia (fotons) intenten sortir cap a les capes externes en forma de radiació, fet que els pot costar fins a 100.000 anys pel fet que aquests fotons són absorbits contínuament i remesos en una altra direcció diferent de la que tenien. Algunes partícules es mantenen intactes davant les temperatures (inferiors a les del nucli), mentre que altres absorbeixen l'energia per emetre-la en forma de radiació de nou. D'aquesta manera, l'energia puja entre els àtoms de la mateixa capa.
- **Zona convectiva:** Com l'energia generada en el nucli necessita sortir a l'exterior en aquesta capa, es produeix el fenomen de la convecció, és a dir, es generen columnes de gas calent que ascendeixen fins a la superfície i quan es refreden, tornen a baixar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- **Fotosfera:** És una capa prima, d'uns 300 km, que és la part del Sol que nosaltres veiem, també coneguda com la superfície. Des d'aquí s'irradia llum i calor a l'espai. La temperatura és d'uns 5.000 ° C. A la fotosfera, apareixen les taques solars i les fàcules, que són regions brillants al voltant de les taques, amb una temperatura superior a la normal de la fotosfera i que estan relacionades amb els camps magnètics de el Sol.
- **Cromosfera:** Només la podem observar durant un eclipsi de Sol o amb filtres de banda. És de color vermellós, d'un gruix superior a la fotosfera, de densitat molt baixa i de temperatura altíssima, de mig milió de graus. Està formada per gasos enrarits i en ella hi han camps magnètics molt forts.
- **Corona:** És la part més gran i menys densa de tot el Sol, amb temperatures altes i densitat molt baixa. Està formada per gasos enrarits i gegantins camps magnètics que varien la seva forma d'hora en hora, és a dir, el plasma que fuig del seu interior. Aquesta capa només es pot veure durant un eclipsi total de Sol.



Imatge 3. Capes del Sol. Font: www.astromia.com

3.2.2. Composició química del Sol

El Sol està fet amb els mateixos materials que hi ha a la Terra i en els altres planetes, ja que tot el Sistema Solar es va formar al mateix temps en aquesta zona de la Via Làctia que ocupem. No obstant això, aquests materials no es distribueixen en les mateixes proporcions, ni es comporten igual.

Components químics	Símbol	%
Hidrogen	H	92,1
Heli	He	7,8
Oxigen	O	0,061
Carboni	C	0,03
Nitrogen	N	0,0084
Neó	Ne	0,0076
Ferro	Fe	0,0037
Silici	Si	0,0031
Magnesi	Mg	0,0024
Sofre	S	0,0015
Altres		0,0015

Taula 3. Components químics amb els que està fet el Sol ordenats dels més als menys abundants.

Font: www.astromia.com

3.3. Activitat Solar

3.3.1. Camp magnètic

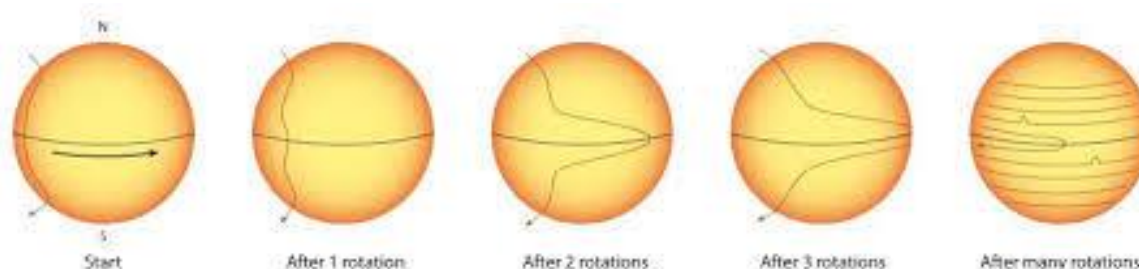
Un camp és una regió de l'espai amb unes propietats determinades, com que actua o no forces. la càrrega magnètica correspon a càrregues elèctriques (àtoms ionitzats) en moviment, i sent el camp magnètic la magnetosfera.

El Sol és molt actiu en magnetisme perquè té un fort camp magnètic intens i canviant, el qual canvia cada any. Canvia la direcció del seu pol cada vegada que arriba l'activitat màxima i es produeix un cop per cicle. Aquests períodes tenen una

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

durada d'uns 11 anys. A més, l'activitat magnètica de el sol produeix múltiples efectes, que se sumen com a activitat solar. Aquests efectes són flamarades, protuberàncies, taques solars i el vent solar. Alguns d'aquests efectes també es poden veure des de la terra com ara, l'aurora boreal.

El sol és una qüestió de plasma, que és bàsicament un gas a altes temperatures. I pel fet que és "gasós" en lloc de líquid, el que significa que tota l'estrella no girarà a la mateixa velocitat, i la conservació de moment angular fa que la velocitat de l'equador sigui molt més gran. Aquest moviment diferencial és la raó principal dels canvis del seu camp magnètic.



Imatge 4. La rotació del camp magnètic del Sol. Font: http://cesar.esa.int/upload/201807/el_sol_magnetico_booklet_es.pdf

3.3.2. Taques solars

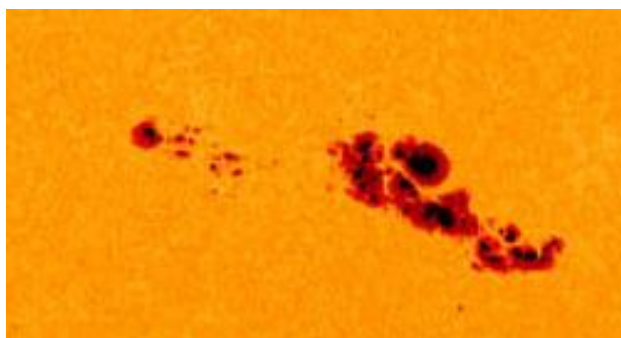
Les taques solars són regions de la fotosfera amb temperatures uns 2000 graus més baixes que l'entorn. La menor temperatura fa que emetin menys llum i, per contrast apareixen més fosques. Van ser observades per primera vegada en l'any 28 aC per astrònoms xinesos, i per Galileu en 1612.

Característiques:

- Una taca solar típica posseeix dues zones ben diferenciades: un interior més fred i fosc, anomenat umbra o ombra, envoltat d'una aurèola una mica més brillant anomenada penombra.
- El seu diàmetre oscil·la entre 10.000 i 30.000 km.
- Solen durar uns dies i són relativament inamovibles respecte a la fotosfera i participen de la rotació solar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Són un índex clar de l'activitat solar. Hi pot haver més de 200 en un màxim i cap al mínim.
- Se sap que l'origen de les taques està relacionat amb els intensos camps magnètics originats al seu interior. El camp magnètic inhibeix la transmissió d'energia des de l'interior de el Sol.
- L'origen de l'activitat solar i el seu comportament cíclic és un enigma. Sembla ser que el seu origen està relacionat en el canvi de polaritat que experimenta el camp magnètic de el Sol a causa de la rotació diferencial, en virtut de la qual el material proper a l'equador trencada més de pressa que el que està pròxim als pols. la rotació diferencial arrossega les línies de camp i les deforma. Quan el camp magnètic ha patit una compressió i deformació extrema, les línies de camp arriben a trencar-se i reordenar en un patró més regular però amb polaritat invertida. L'activitat solar decreix i comença un nou cicle.



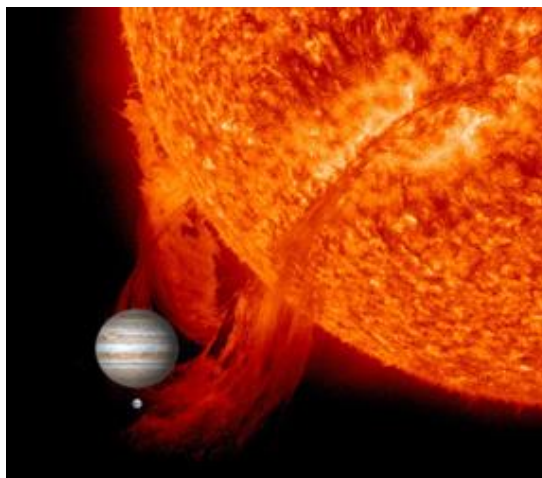
Imatge 5. Taques solars. Font: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>

3.3.3. Protuberàncies

Una protuberància solar és una gran flamarada situada sobre la fotosfera, sovint en una forma de llaç o arc. Aquestes emergeixen de la cromosfera, i s'estenen fins a aconseguir la corona solar. Mentre la corona és un gas extremadament calent i ionitzat (plasma), que emet tan poca llum visible com per quedar oculta per la fotosfera, les protuberàncies es componen d'un plasma molt més fred, similar en composició a el de la cromosfera (hidrogen elèctricament carregat i heli). El plasma de les protuberàncies és típicament cent vegades més fred i dens que el de la

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

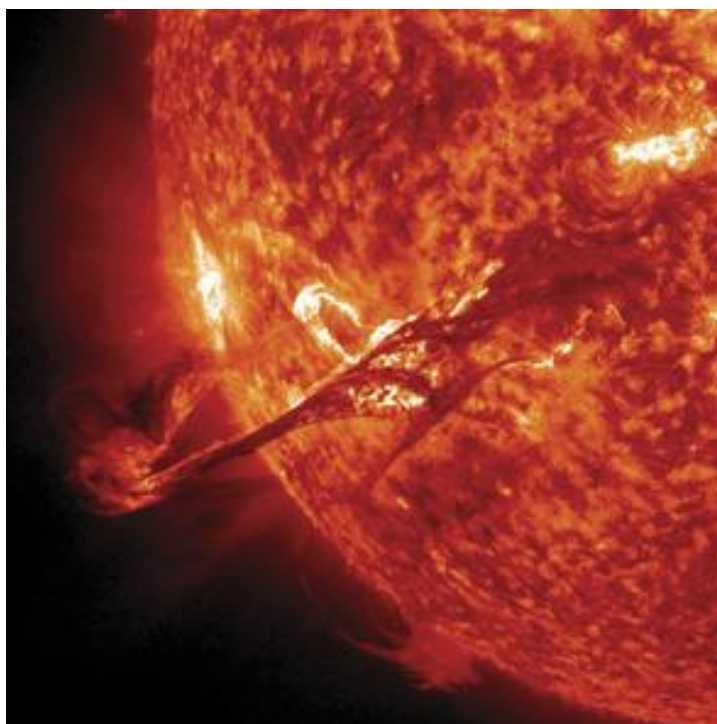
corona. Les protuberàncies solars poden tenir longituds variables de milers de quilometres; la més gran enregistrada fins al moment és de 800.000km.



Imatge 6. Protuberància solar comparada amb el tamany de Júpiter i la Terra. Font: https://es.wikipedia.org/wiki/Protuberancia_solar

3.3.4. Fulguracions

A les regions magnèticament actives l'energia s'acumula en un bucle magnètic inestable, i al final explota llançant una quantitat de matèria a l'espai que viatja a 4,3 milions de km/h, i per tant poden afectar la Terra. Llança rajos X i gamma, entre altres formes d'energia que es desplacen amb el vent solar i poden pertorbar el camp magnètic terrestre, causant tempestes geomagnètiques, amb alteracions a l'electricitat, el voltatge i el corrent elèctric. També s'intensifica, en latituds més baixes, i causa l'aparició d'aurores boreals. Richard Christopher Carrington (astrònom anglès) va ser el primer astrònom a observar una fulguració l'any 1859.

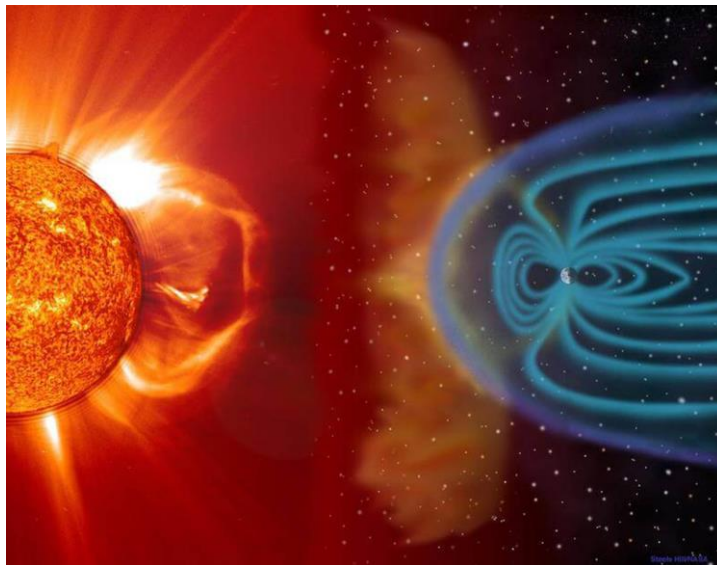


Imatge 7. Fulguració solar. Font: <https://www.investigacionyciencia.es/>

3.3.5. Vent solar

El vent solar és un corrent de partícules (principalment protons de 500 keV d'alta energia) produïdes a partir de l'atmosfera estel·lar.

La composició de vent solar en el nostre sistema solar és la mateixa que la de la corona solar: el contingut d'hidrogen és del 75%, el contingut d'heli és del 25% i hi ha traces d'impureses. Les partícules estan completament ionitzades, formen un plasma molt fi. A prop de la Terra, la velocitat de vent solar varia entre 200 i 889 km/s, amb una mitjana d'uns 450 km/s. El sol perd uns 800 quilograms de material per segon en forma de vent solar.

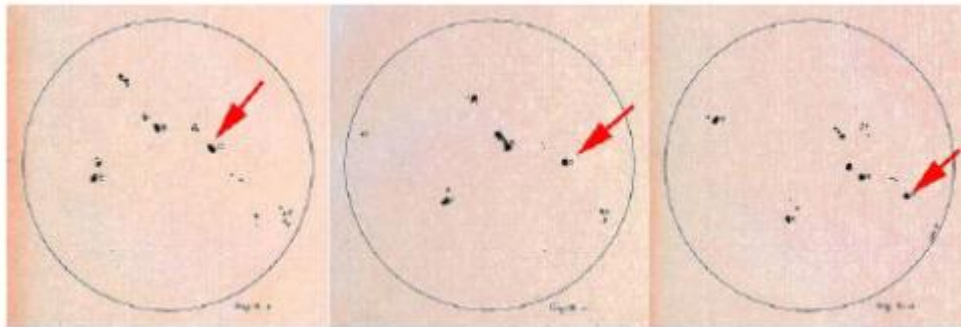


Imatge 8. Vent solar. Font: <https://www.milenio.com/>

4. Determinació experimental del període de rotació solar a partir de les taques solars

4.1. Història taques solars

El canvi de posició de les taques del Sol observades per Galileu^[10] el 1612 durant 3 dies consecutius demostrava que la superfície del Sol girava sobre si mateixa. Aquest fet proporciona un mètode per determinar el seu període de rotació^{[11][12][13]} (Imatge 9). Només caldrà mesurar el temps que triga una taca en donar un cicle sencer, o el temps que triga en recórrer una fracció coneguda de distància.



Imatge 9. Dibuixos de Galileu^[10] de les taques solars. 9, 10 i 11 de juny de 1612.

El valor determinat a partir de les imatges del Sol preses de la Terra s'anomena període de rotació sinòdic. Aquest, és el període de rotació aparent del Sol vist des de la Terra, i no és el "veritable" període de rotació del Sol. Cal tenir en compte que mentre el Sol gira, la Terra es desplaça orbitant el Sol d'oest a est. El "veritable" període de rotació del Sol, conegut com el període de rotació sideral, és el temps que triga un punt del Sol en donar una volta respecte a les estrelles llunyanes. Mentre un punt del Sol gira 360 graus respecte les estrelles, la Terra s'ha mogut per davant de la seva òrbita. El Sol haurà de girar una mica més ràpid per atrapar a la Terra. Per tant, el període sinòdic és lleugerament superior al sideral. Sortosament, podem corregir aquest temps afegit, si sa el temps que triga la Terra en orbitar el Sol (aproximadament una volta cada 365,25 dies). Si P és el període de rotació sideral en dies (aquest és el valor que volem determinar), i S és el període de rotació període sinòdic en dies (aquest és el valor que ha mesurat), llavors:

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

$$P = (S \times 365.25) / (S + 365.25)$$

(equació 1)^[14]. Període sinòdic.

4.2. Objectius parcials

- Observar amb telescopi l'evolució de les taques solars a partir de fotografies enregistrades en un període llarg de temps (uns 40 dies).
- Determinar la trajectòria de les taques.
- Fer una estimació dels períodes de rotació sinòdic i sideri del Sol amb tecnologia que estigui a l'abast de tothom.

4.3. Observació

L'observació del Sol es pot fer amb qualsevol telescopi col·locant a l'objectiu un filtre per protegir l'ull de la persona que observa. També es pot fer l'observació de manera més segura recollint la imatge sobre d'una pantalla que es col·loca darrera de l'ocular. Una altra manera de fer l'observació és acoblant una càmera al focus primari del telescopi. En cas que no es facin fotos, caldrà dibuixar les taques, i anotar la data i l'hora de l'observació.

Aquesta pràctica la vam començar a realitzar durant el mes de març de 2020 i, com estàvem al començament de la pandèmia i en ple estat d'alarma, vam haver d'agafar les imatges proporcionades pel satèl·lit SOHO de la NASA. El 7 de juliol, quan es va aixecar l'estat d'alarma, vam realitzar una observació del Sol (imatges 12 i 13) amb el telescopi MEADE LX90GPS (amb la càmera Canon EOS 1000D adherida) i un filtre solar per evitar danyar-nos la visió.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatges 10 i 11. Telescopi MEADE LX90GPS, càmera Canon EOS1000D i filtre solar.



Imatges 12 i 13. Fotografies del Sol realitzades el 7 de juliol de 2020 on s'observa que l'activitat Solar és mínima.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 14. [redacted] (professor) i [redacted] amb el telescopi MEADE LX90GPS.

El fet que en les imatges 12 i 13 no s'observin taques a la fotosfera solar, indica que en l'actualitat l'activitat solar és mínima, o el que és el mateix, estem en un final de cicle o a el principi d'un cicle nou. Segons la NASA, el 25è Cicle Solar havia de començar a l'abril de 2020, amb un marge d'error de 6 mesos.

El 14 de novembre de 2020, després que el satèl·lit SOHO mostrés una nova taca al Sol indicant l'inici del 25è cicle solar, vam anar a l'observatori de l'Institut Maria Rúbies, on vam fer una observació del Sol amb el telescopi MEADE LX200 EMC (amb la càmera Canon EOS 4000D adherida) i un filtre solar per no danyar-se la visió.



Imatge 15. Telescopi MEADE LX200 EMC amb el filtre solar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 16. Fotografia del Sol realitzada el 14 de novembre de 2020, on s'observa el començament del 25è Cicle Solar.

En la imatge 16, podem observar que hi ha una taca solar al nordoest del Sol. Aquesta taca representa el començament del 25è Cicle Solar i, per tant, l'activitat solar està començant.

També vam utilitzar un Solarscope, el qual és un aparell per observar el Sol i la seva activitat solar. Per fer-ho, s'ha d'orientar la seva lent cap al Sol i sobre la pantalla es veurà reflexada la superfície del Sol (fotosfera) amb la seva activitat solar (si n'hi ha) (imatge 17).



Imatge 17. Observació de la fotosfera solar a través d'un Solarscope.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 18. Pantalla del Solarscope sobre la qual es reflexa la fotosfera solar. Imatge realitzada el 14 de novembre de 2020.

En la imatge 18, podem observar a la part sudoest del Sol, una petita taca solar, la qual és la mateixa que hi ha a la imatge 16.

Una altra opció és agafar les imatges diàries que envia el satèl·lit SOHO^{[6][7]}, una missió de les agències espacials americana i europea.

S'observaran les diferències entre les taques^[8]: isolades, grups de taques, grans, petites, només amb nucli, amb nucli i penombra.

A l'hora de triar les taques per dibuixar i per analitzar és recomanable triar taques més aviat grans perquè són les que perduren més amb el temps i pràcticament ens assegurem que els següents dies d'observació les tornarem a trobar.

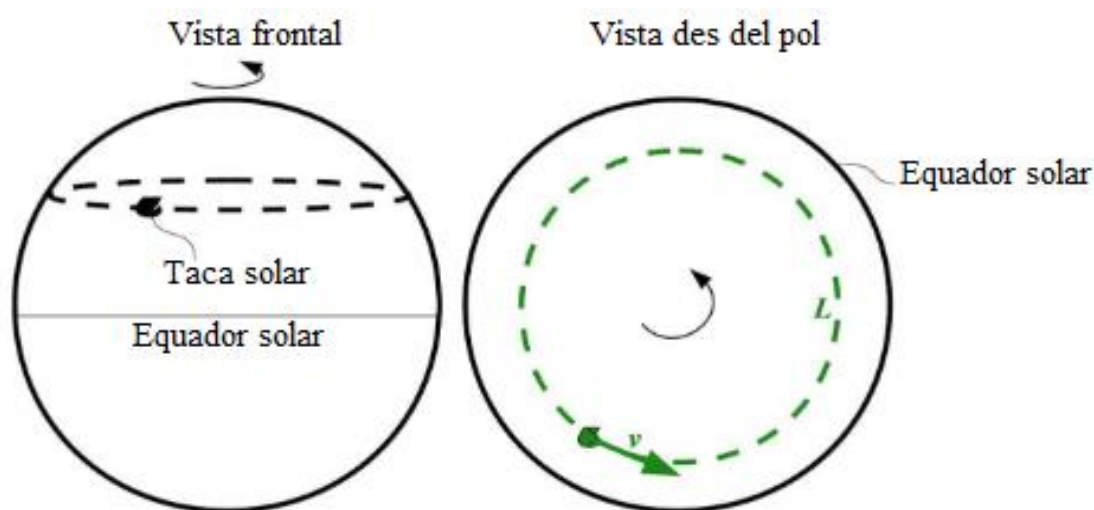
4.4. Utilitatge

- Programa Tracker ^[30]
- Videoclip del moviment de les taques solars entre els dies 27/03/2001 01/04/2001: spotfull.mpg^[19]

4.5. Descripció de l'experiment

Suposarem que el Sol és una esfera perfecta que gira com un sòlid rígid a una velocitat angular constant. Amb aquest supòsit les taques solars també es mouren amb una velocitat constant. Segons aquest model, la determinació del període de rotació del Sol (T) es equivalent a mesurar el temps que triga una taca en donar una volta sencera al voltant del Sol.

El moviment d'una taca vist des de la Terra és una trajectòria recta, mentre que si la podéssim observar des del pol seria circular (en verd). (Imatge 19)



Imatge 19. Moviment aparent d'una taca solar amb el temps.

Es determinarà la velocitat lineal mitjana (v) de desplaçament de les taques del Sol paral·leles a l'equador solar. Per fer això caldrà conèixer l'evolució de la posició (d) de cadascuna de les taques en el decurs del temps (t) a partir de l'anàlisi de dues imatges consecutives:

$$v = \frac{d}{t}$$

Equació 2. Velocitat lineal mitjana.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

La distància recorreguda per la taca en un període (T) és equivalent a longitud de la circumferència (L).

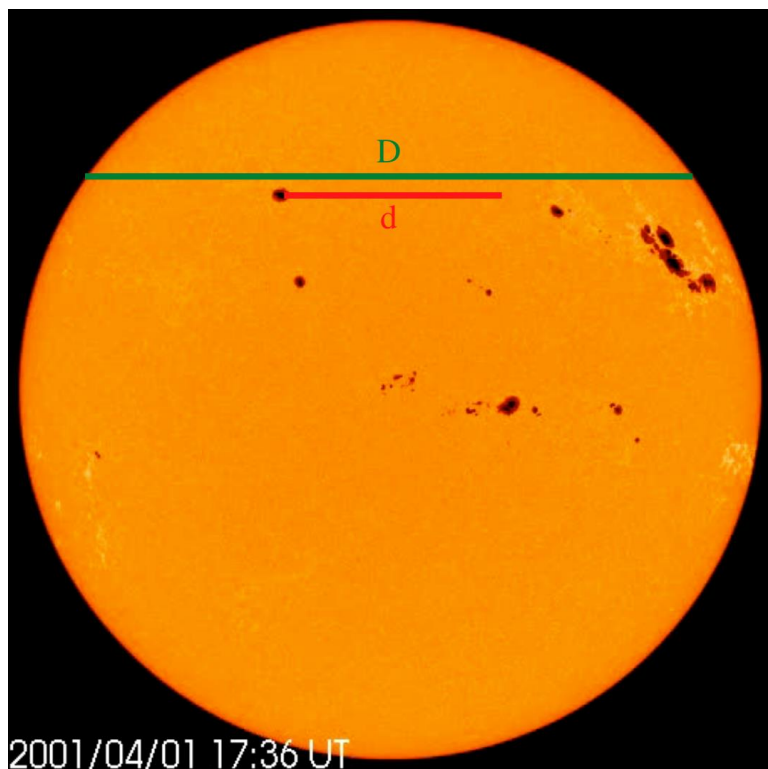
$$L = \pi D, \text{ essent, } D, \text{ el diàmetre.}$$

Equació 3. Longitud de la circumferència.

El període serà el temps que triga la taca en donar una volta, es a dir:

$$T = \frac{L}{v}$$

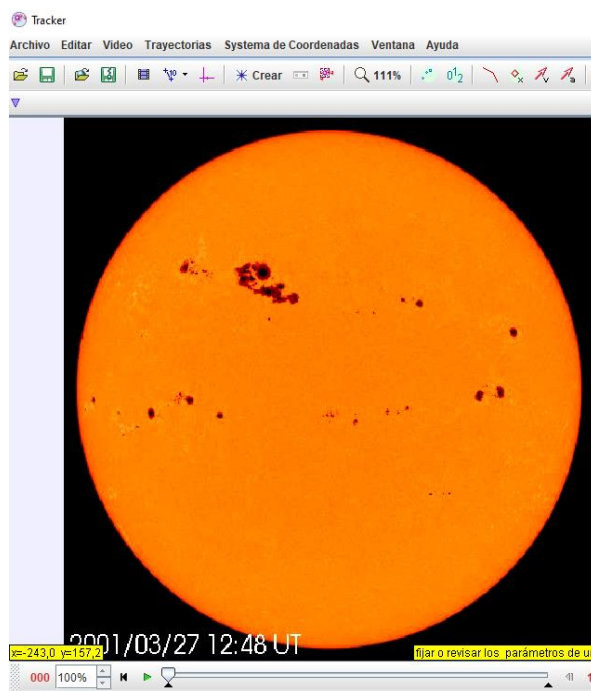
Equació 4. Període.



Imatge 20. Mesura del desplaçament (d) d'una taca entre dos fotogrames.

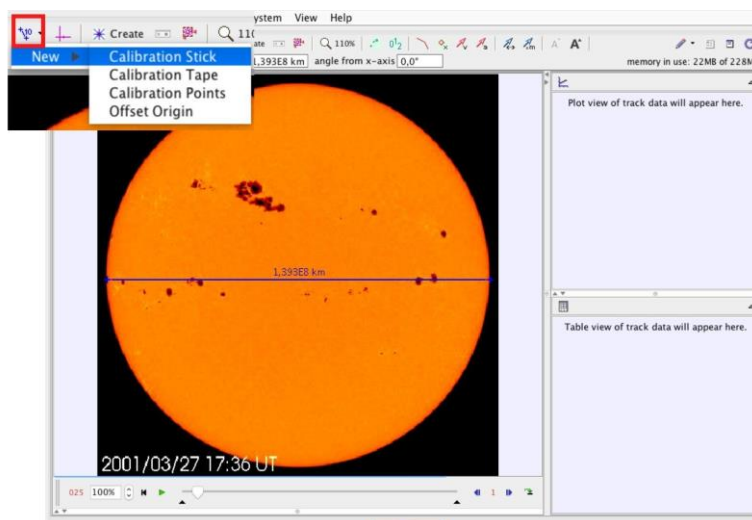
4.6. Procediment

- Obre el videoclip “spotfull.mpg” amb el programa Tracker, i selecciona el fotograma número 25 corresponent a les 17:36 h (UT) del dia 27/03/2001. (imatge 21).



Imatge 21. Video “spotfull.mpg”, al fotograma 25 corresponent a les 17:36 h (UT) del dia 27/03/2001.

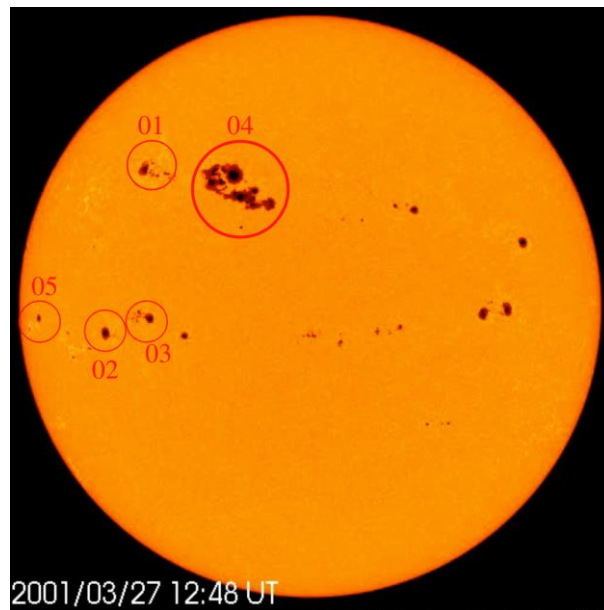
- Calibra la “regla de mesurar” assignant-li a la longitud de l’equador solar el valor de 1.393.000 km. (Imatge 22).



Imatge 22. Calibratge de la vara de mesurar.

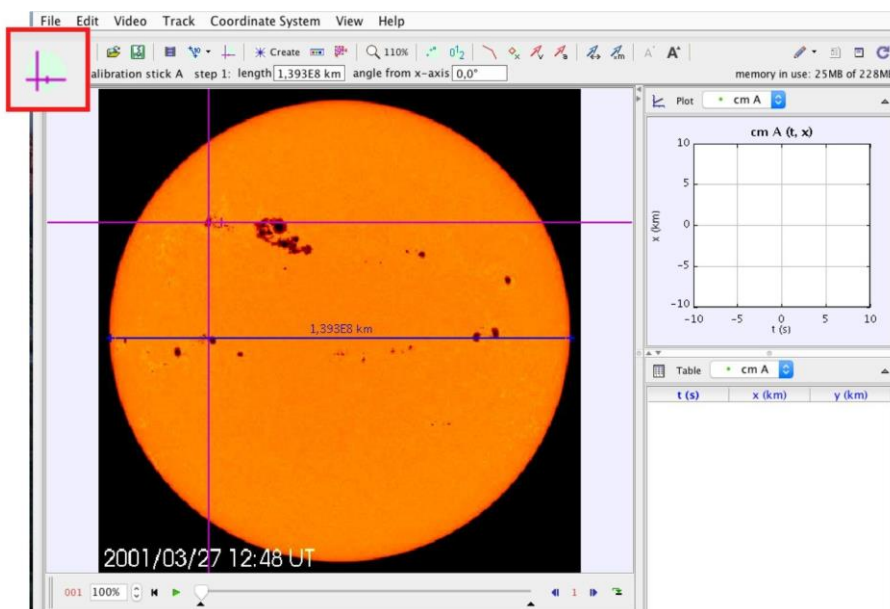
ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Selecciona una taca, numera-la, i anota la data i l'hora (UT) en que es va fer la fotografia. (Imatge 23).



Imatge 23. Taques del Sol numerades.

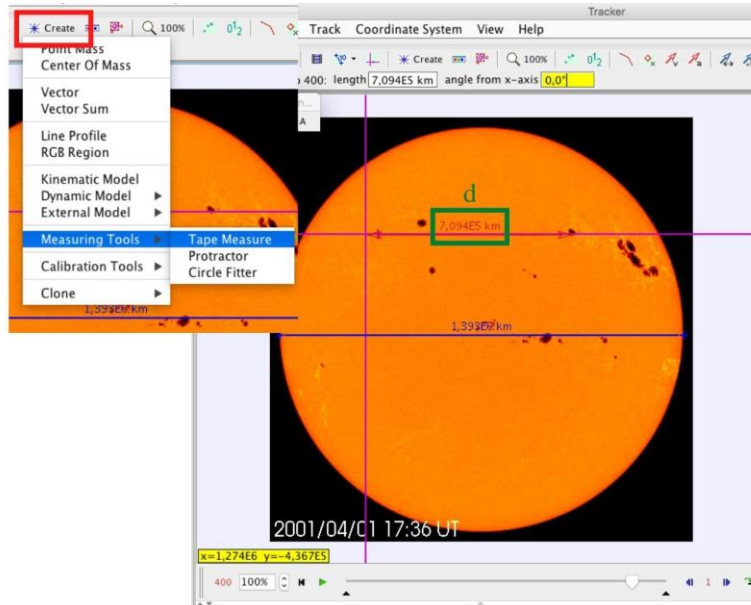
- Situa l' origen del sistema de coordenades en el centre de la taca. (Imatge 24).



Imatge 24. Sistema de coordenades en el centre de la taca observada.

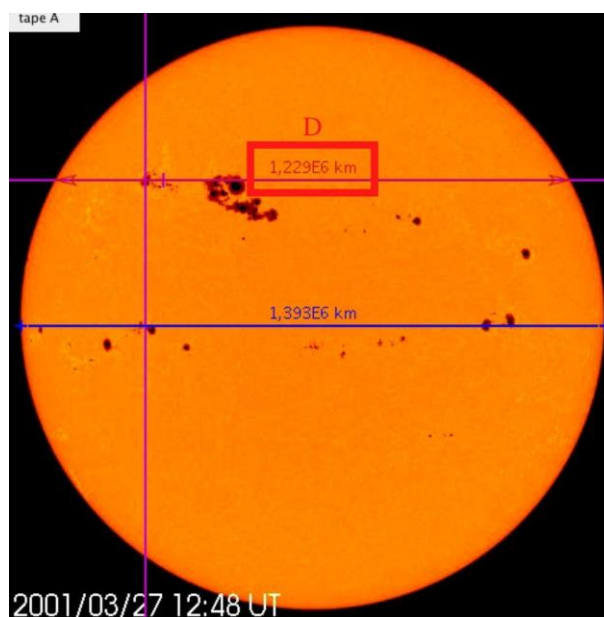
ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Avança el videoclip fins una altre fotograma (en el nostre cas al fotograma 400 corresponent a les 17:36 h (UT) del dia 01/04/2001), i mesura la distància (d) recorreguda per la taca en aquests 4 dies (120 h). (Imatge 25).



Imatge 25. Mesura de la distància (d) recorreguda per la taca) en 120 hores.

- Mesura el diàmetre, D, de la circumferència descrita per la taca. En el cas de la taca seleccionada, $D = 1,229 \cdot 10^6$ km. (Imatge 26).



Imatge 26. Mesura del diàmetre de la circumferència recorreguda per la taca observada (D).

4.7. Resultats obtinguts, anàlisi i discussió

Nombre de taca	$d \cdot 10^5$ (km)	t (h)	$v = \frac{d}{t}$ $10^3(\text{km/h})$	$D \cdot 10^6$ (km)	L = $\pi D \cdot 10^6$ (km)	$T = \frac{L}{v}$ (h)	T (dies)
01	7,09	120	5,91	1,30	4,08	690	28,8
02	7,40	120	6,16	1,388	4,36	708	29,4
03	7,85	120	6,64	1,393	4,38	659	27,5
04	6,67	120	5,56	1,258	3,95	710	29,6
05	6,88	120	5,73	1,399	4,39	766	31,9
							29,4

Taula 4. Dades agafades de l'anàlisi del vídeo spotfull.mpg

Les taques 1 i 4 tenen latitud (nord) semblant, i la 2, 3 i 5 es desplacen gairebé per l'equador del Sol (latitud 0). Amb els valors determinats no podem concloure que hi hagi una diferència significativa en el període sinòdic entre els dos grups de taques com afirma la comunitat científica internacional. Es a dir, no estem en condicions d'afirmar que el període sinòdic depengui de la latitud de la taca. El que farem doncs, és fer una estimació del període sinòdic fent la mitjana aritmètica dels 5 valors determinats.

El valor mitja del **període sinòdic (S)** és 29,4 dies, i la desviació mitjana de les determinacions és 0,98 dies. Amb la qual cosa, podem expressar el resultat com:

$$\mathbf{S = (29,4 \pm 1,0) \text{ dies}}$$

Si comparem aquest resultat amb el valor real del període sinòdic a l'equador (27,3 dies), hi ha una diferència de 2,1 dies, equivalent a un **error relatiu del 8%**.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

El període sideri (P) el calcularem a partir de l' equació 1.

S (dies)	P= (S × 365.25) / (S + 365.25) (dies)
28,8	26,7
29,4	27,2
27,5	27,5
29,6	25,4
31,9	29,3
	27,2

Taula 5. Període sideri.

El valor mitjà del període sideri és 27,2 dies amb una desviació mitjana de 0,94 dies.

El resultat l' expressarem com:

$$P = (27,2 \pm 1) \text{ dies}$$

4.8. Conclusions parcials

- El primer objectiu no s' ha aconseguit per dos motius: Aquest treball es va iniciar a mig més març, tot just quan es va declarar l' estat d' alarma pel COVID-19 i es van suspendre les classes, amb la qual cosa no vàrem poder fer les observacions amb el telescopi del centre. D'altra banda, l'activitat del solar des de fa uns mesos és mínima i no s'observen taques. Malgrat tot això, s'ha continuat la recerca utilitzant imatges antigues del Sol proporcionades pel satèl·lit SOHO. Després d'haver realitzat la pràctica, vam realitzar dues observacions de la fotosfera solar el 7 de juliol i el 14 de novembre de 2020; la primera va ser en una etapa d'activitat solar mínima i, la segona, va ser al principi d'un cicle solar i hi havia una taca.
- S' observa que el moviment de les taques és rectilini amb una direcció paral·lela l'equador.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- S' ha pogut fer experimentalment una estimació el període sinòdic del Sol. El seu valor és:

$$\mathbf{S = (29,4 \pm 1,0) \text{ dies}}$$

- A partir del període sinòdic s' ha calcular el període sideri. El seu valor és:

$$\mathbf{P = (27,2 \pm 1) \text{ dies}}$$

- No s' ha trobat una diferència significativa del període sinòdic en funció de la latitud de les taques solars.
- El programari lliure d' anàlisi de videoclips "Tracker" és una excel·lent eina per fer un estudi cinemàtic del moviment de les taques solars.

5. Estimació experimental de la distància de la Terra al Sol

5.1. Objectius parcials

- Realitzar una estimació experimental de la distància de la Terra al Sol utilitzant una cambra fosca.

5.2. Descripció de l'experiment

En aquest experiment, orientarem la nostra cambra fosca cap al Sol amb l'orifici més petit possible. Sobre la nostra pantalla, es projectarà un punt blanc (el Sol), el qual mesurarem amb un peu de rei i farem un teorema de Tales per determinar la distància de la Terra al Sol.

Tenint en compte que la llum del Sol es propaga en línia recta, es pot realitzar una estimació de la distància de la Terra al Sol mesurant el diàmetre de la imatge projectada d'aquest astre sobre la pantalla d'una cambra fosca (vegeu imatge 17), fent que:

- D_1 → Diàmetre del Sol
- L_1 → Distància entre la Terra i el Sol
- D_2 → Diàmetre de la projecció del Sol en la pantalla
- L_2 → Longitud de la cambra fosca a la qual es projecta la imatge.

Mesurant D_2 i L_2 , i sabent que el diàmetre del Sol (D_1) és de 1.392.680km, podem fer una estimació de la distància de la Terra al Sol (L_1) aplicant el teorema de Tales:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \rightarrow \frac{D_1}{L_1} = \frac{D_2}{L_2}$$

Equació 5. Teorema de Tales de distàncies i diàmetres.

La cambra fosca és un instrument òptic que consisteix en una caixa tancada en la qual els raigs solars només poden entrar per un petit forat, anomenat estenop. Dins, hi ha una superfície translúcida, en el nostre cas feta amb paper vegetal, que actua

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

com a pantalla sobre la qual es projecta la imatge de l'objecte observat. Si l'objecte s'observa des d'un orifici petit, es crea una imatge definida. En canvi, a mesura que fem el forat més gran, la imatge es veu menys pel fet que entra molta claror.

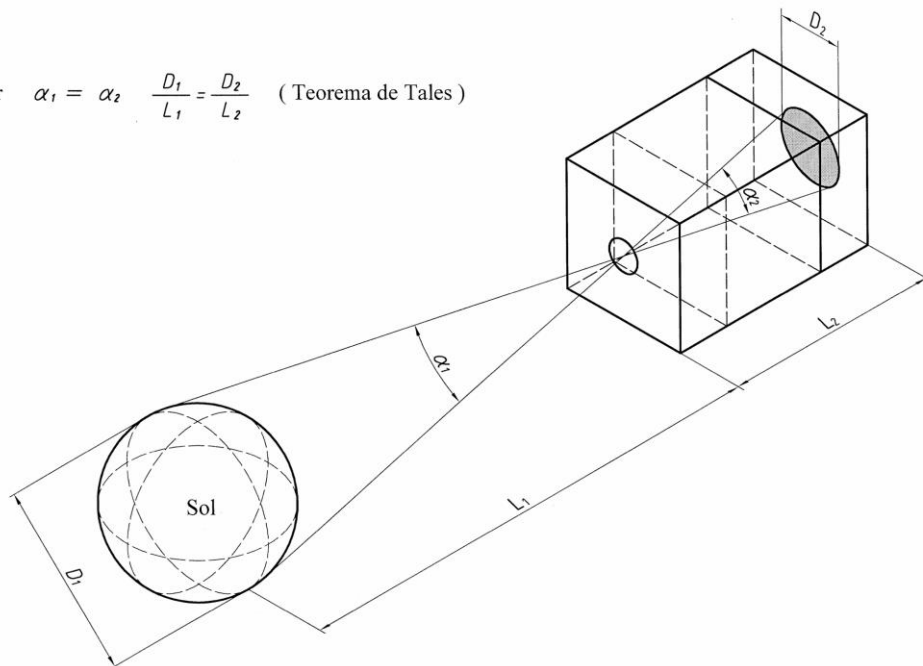
5.3. Utiltatge

- Cambra fosca (muntatge a l'annex 1)
- Peu de rei
- Cinta mètrica
- Suport
- Cinta adhesiva

5.4. Dibuix del muntatge

DETERMINACIÓ DE LA DISTÀNCIA TERRA-SOL AMB UNA CAMBRA FOSCA

En ser $\alpha_1 = \alpha_2$ $\frac{D_1}{L_1} = \frac{D_2}{L_2}$ (Teorema de Tales)



Imatge 27. Muntatge experimental de la cambra fosca.

5.5. Procediment

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Ens col·loquem en una zona il·luminada pel Sol i orienta el suport cap al Sol. Per ajudar-te, utilitza el programa Stellarium, el qual et donarà la latitud exacta del Sol per la teva ubicació, o bé, col·loca la cambra fosca de manera que la seva ombra sigui mínima.



Imatge 28. Cambra fosca encarada al Sol.

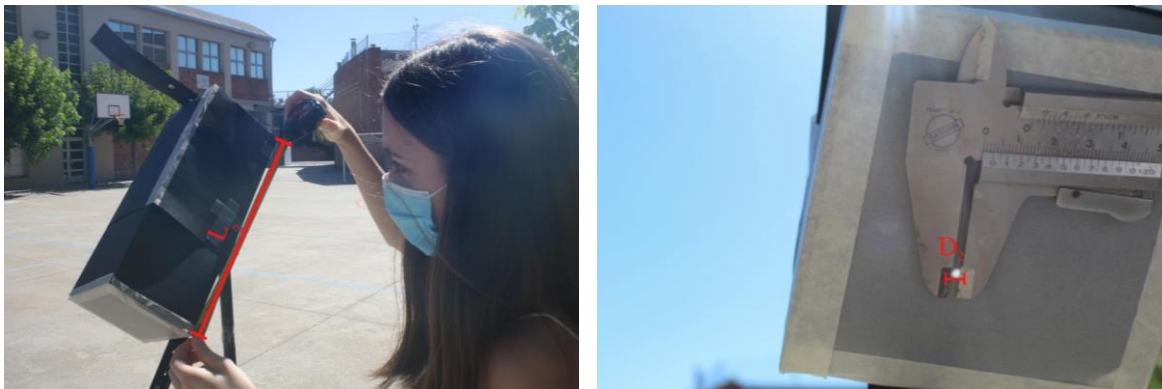
- Col·loquem la cambra fosca en direcció al Sol, de tal forma que els raigs solars incideixin perpendicularment sobre l'orifici d'entrada. Cal que la imatge del Sol projectada sobre la pantalla sigui el més nítida possible. Això s'aconsegueix regulant el diàmetre de l'orifici d'entrada, en aquest cas, l'orifici més petit.



Imatge 29. Cambra fosca fixada amb cinta adhesiva.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Fixem la cambra fosca amb cinta adhesiva. Mesurem la longitud de la cambra fosca (L_2) amb la cinta mètrica i el diàmetre de la projecció del Sol sobre la pantalla de la cambra (D_2) amb el peu de rei.



Imatges 30 i 31. Procés de mesurament de la longitud de la cambra fosca i el diàmetre de la projecció del Sol sobre la pantalla de la cambra fosca.

- Al mateix temps que prenem mesures, omplim la taula següent:

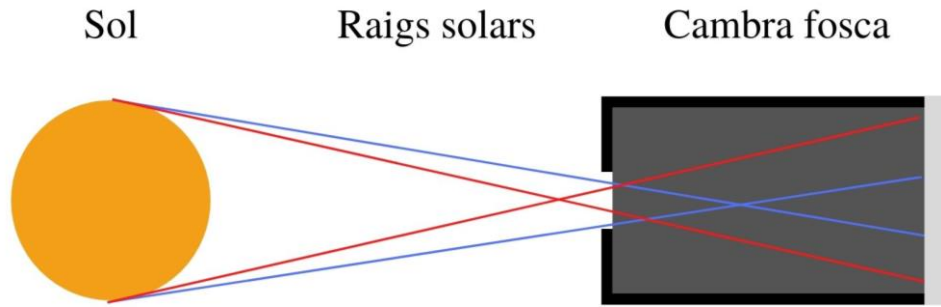
Mesura	L_2 (mm)	D_2 (mm)	$L_1 = \frac{L_2 \times D_1}{D_2}$ km
1			
2			
3			
4			

- Repetim aquest procediment un mínim de cinc cops variant la longitud de la cambra fosca (L_2). Finalment, per establir el resultat final, calculem la mitjana aritmètica de les mesures obtingudes i l'error de mesura.

5.6. Resultats, anàlisi i discussió

Experimentalment s'observa que només s'aconsegueixen imatges nítides si l'orifici d'entrada és petit. Això és a causa que, com més petit és l'obertura per la qual incideix la llum a la cambra fosca, menys possibilitats hi ha que es propagui i es dupliqui la llum sense deixar clara la seva delimitació (vegeu imatge 32).

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 32. Projecció errònia del diàmetre del Sol (D_2) en la pantalla de la cambra fosca.

Les dades de la següent taula han estat obtingudes utilitzant un orifici fet amb un punxó.

Diàmetre del Sol: $1,39 \cdot 10^6$ km

Mesura	L_2 (mm)	D_2 (mm)	$L_1 = \frac{L_2 \times D_1}{D_2} \times 10^8$ km
1	265	2,7	1,4
2	306	2,9	1,5
3	361	3,2	1,6
4	394	4,0	1,4
5	265	2,2	1,7
6	284	3,05	1,3
7	360	3,05	1,6
			1,5

Taula 6. Taula de seguiment i resultats obtinguts.

Càlcul de l'error relatiu de la desviació mitjana dels resultats obtinguts.

- Obté la mitjana:

$$L_i = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} = \frac{10,5 \times 10^8}{7} = 1,5 \times 10^8 \text{ km}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- I la desviació mitjana (d):

$$d = \frac{d_i}{n} = \frac{0,8 \times 10^8}{7} \cong 0,1 \times 10^8 \text{ km}$$

- Amb la mitjana i la desviació mitjana calculades, calcula l'error relatiu:

$$E_r = \frac{d}{L_i} \times 100 = \frac{0,1 \times 10^8}{1,5 \times 10^8} \times 100 \cong 6,6\%$$

- Resultat:

$$(L_i \pm d) \text{ km} = (1,5 \times 10^8 \pm 0,1 \times 10^8) \text{ km}$$

5.7. Conclusions

- Hem pogut realitzar una estimació de la distància Terra-Sol mitjançant material senzill i al nostre abast. En aquest experiment, una cambra fosca.
- La distància de la Terra al Sol obtinguda a partir de la utilització d'una cambra fosca és: $(1,5 \times 10^8 \pm 0,1 \times 10^8) \text{ km}$.
- El percentatge d'error relatiu comés en la determinació de la distància Terra-Sol és d'un 7% aproximadament.

5. Estimació experimental de la constant solar

5.1 Objectius parcials

- Mesurar la quantitat d'energia calorífica rebuda per la Terra procedent del Sol.
- Fer una estimació experimental de la constant solar.

5.2. Descripció de l'experiment

La constant solar és la quantitat d'energia solar rebuda en una superfície de 1 m^2 situada a una distància d'una unitat astronòmica (UA) (que és la distància mitjana entre la Terra i el Sol), i exposada perpendicularment als raigs de sol en absència d'atmosfera. Per tant, per la Terra és la quantitat d'energia que arriba a les parts altes de l'atmosfera.

Per poder fer una mesura d'aquesta constant proposem el següent experiment:

Es farà incidir la radiació del Sol perpendicularment a la cara superior d'un disc de ferro de massa, m , i superfície, S . El disc està envoltat, per la superfície lateral i per la cara posterior, de llana mineral de vidre (aïllant tèrmic), i es comporta com un calorímetre. Cal dir que la superfície frontal del disc està pintada de negre actuant com un cos negre. A la superfície lateral hi ha un petit orifici on s'hi ha introduït un sensor de temperatura connectat a una interfície, i aquesta a un PC.

Durant els 15 minuts que el disc està exposat a la radiació solar, rep energia que incrementa la seva temperatura. Però al mateix temps durant aquests 15 minuts, en no estar completament aïllat tèrmicament perd una part de l'energia rebuda principalment per radiació de cos negre. Per quantificar aquesta pèrdua d'energia es deixarà que el disc es refredi posant-lo a l'ombra durant el mateix període de temps i es mesurarà el descens de temperatura.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Per calcular la quantitat de calor (Q), utilitzem la següent fórmula:

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Equació 6. Quantitat de calor.

On m és la massa del disc de ferro, C_e és la calor específica del ferro (en aquest cas $475 \text{ J/kg}\cdot^\circ$) i ΔT és l'increment de la temperatura ($T_f - T_i$). El resultat s'expressa en Joules (J).

Un cop tinguem la quantitat de calor, podem calcular la constant solar (P), utilitzant la següent fórmula:

$$P = \frac{Q}{\Delta T \times S}$$

Equació 7. Constant solar.

On Q és la quantitat de calor, ΔT és l'increment de temperatura i S és la superfície de la cara del cilindre exposada al Sol (en aquest cas, $0,0032 \text{ m}^2$). El resultat s'expressa en watts partit per metre quadrat (W/m^2).

En aquest experiment, orientarem la cara del cilindre de ferro cap al Sol. Aquest cilindre tindrà connectat un sensor de temperatura que ens anirà donant les dades de temperatura. L'experiment durarà 30 minuts: durant els primers 15 minuts, el cilindre estarà exposat al Sol i durant la resta de temps, estarà l'ombra. En aquests dos períodes de temps, veurem dos increments de temps, els quals necessitarem per calcular la constant solar.

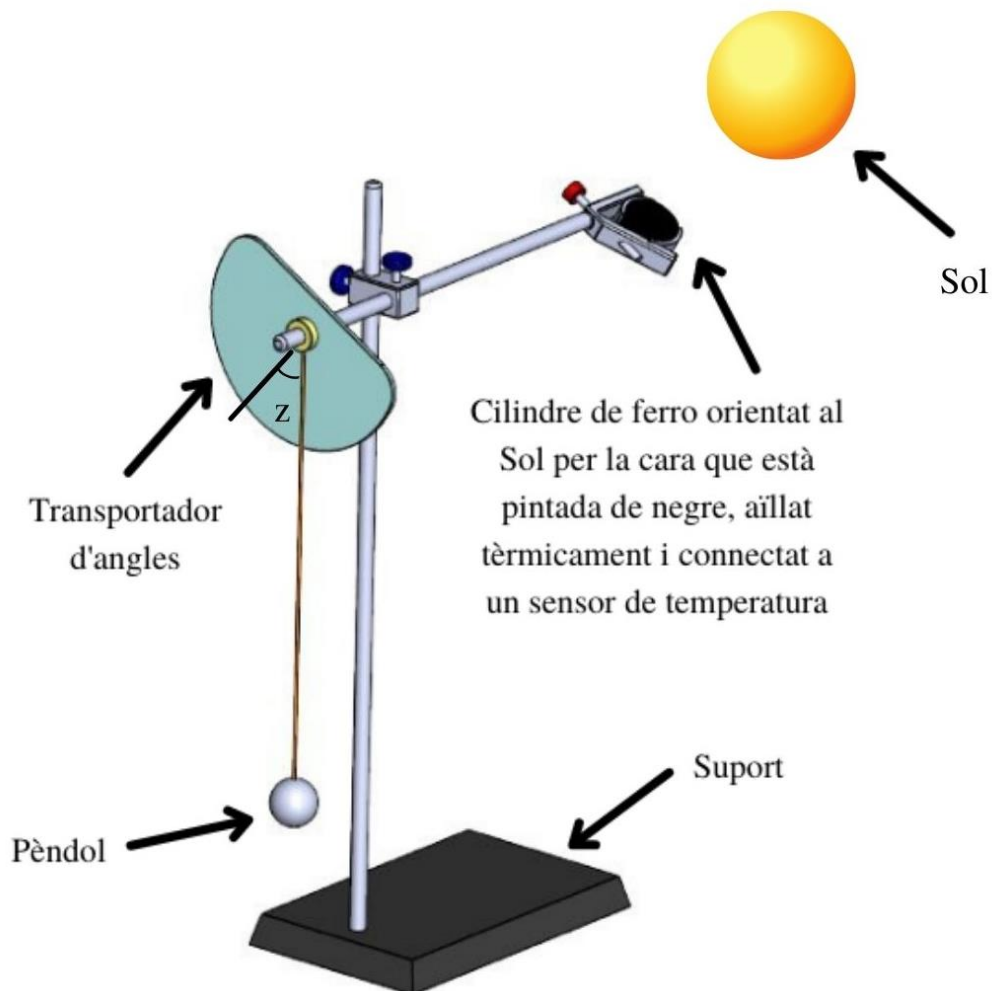
5.3. Utilitatge

- Suport
- Sensor de temperatura
- Transportador
- Disc de ferro
- Pèndol
- Trepant de taula
- Programa Stellarium
- Programa Multilab
- Aïllant: recipient de porexpan i llana mineral de vidre
- Pintura negra

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Interfície (USB Link)
- Balança de precisió

5.4. Dibuix del muntatge



Imatge 33. Esquema de muntatge per mesurar la constant solar. Esquema realitzat per Carles Hernández.

5.5. Procediment

5.5.1. Preparació del material

- Amb ajuda d'un trepant de taula, fem dos forats: un a la part inferior central del transportador i un altre a la part lateral del disc de ferro. D'aquesta manera, podrem adaptar el transportador al suport i el sensor de temperatura al disc.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatges 34 i 35. Trepant de taula fent un forat del corresponent diàmetre al disc de ferro i al transportador.

- Mesurem la massa del disc amb la balança. En aquest cas, la massa és de 0'25kg. Seguidament, pinta la part superior del disc de color negre. Amb l'objectiu que els raigs solars incideixin més sobre la superfície del cilindre i absorbeixi millor l'energia solar.



Imatge 26. Bàscula mesurant el disc de ferro.

- Per fixar el transportador al suport, utilitzem brides i gomes. Quan ja tenim ben col·locat el transportador, posem el pèndol al cantó per mesurar els angles.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- El cilindre no està exposat al Sol, ha d'estar el més aïllat possible. Per aïllar-lo, utilitzem llana mineral de vidre, la qual és un aïllant tèrmic, i un recipient de porexpan.



Imatge 37. Disc de ferro aïllat amb làmina mineral de vidre i un cargol pel forat lateral.

5.5.2. Experiment

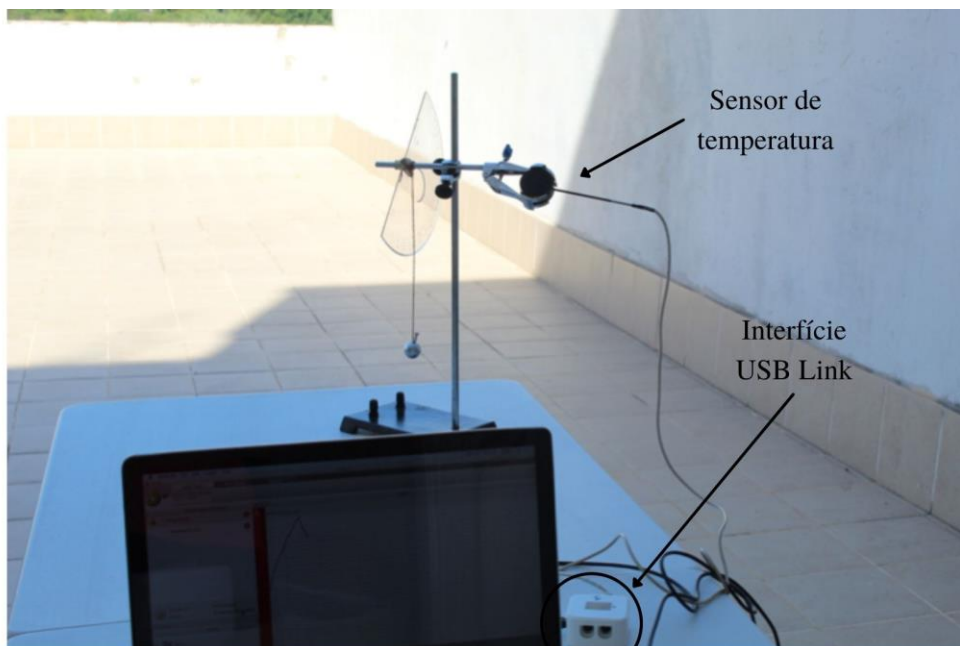
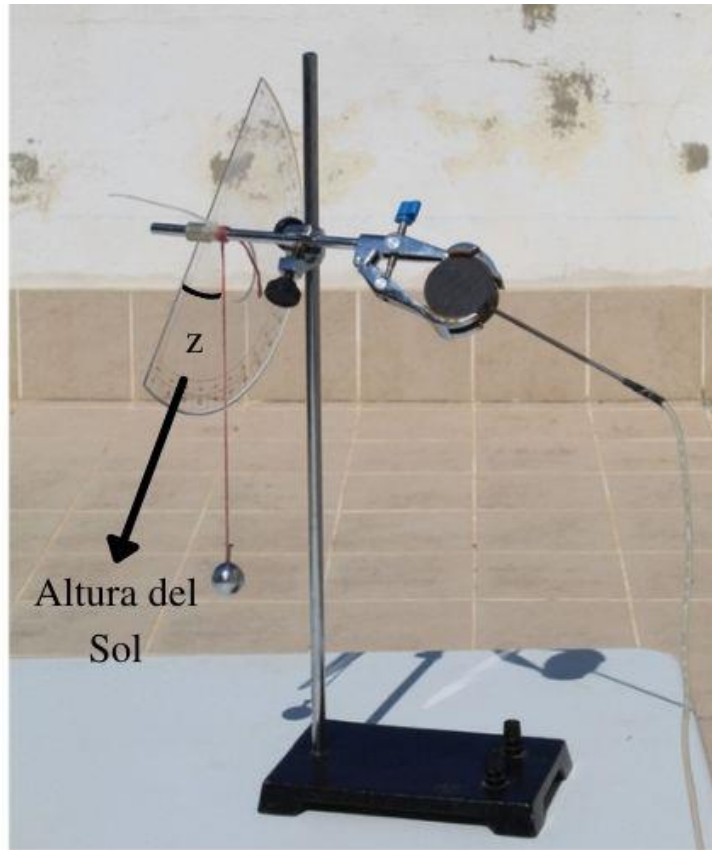
- Orientem l'aparell de manera que, els raigs solars incideixin perpendicularment a la superfície del disc pintada de color negre. Per fer-ho, utilitzem el programa Stellarium, el qual ens donarà la l'altura exacta del Sol en graus per la nostra ubicació. Mesurem tots els paràmetres necessaris per determinar la constant solar (taula 7).
- Mesurem l'angle que forma l'aparell amb l'horitzontal. Aquest és l'altura del Sol sobre l'horitzó.



Imatge 38. Pèndul marcant l'altura del Sol sobre l'horitzó en graus.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Col·loquem l'estructura amb el sensor de temperatura connectat a l'interfície (USB Link) i aquesta al portàtil. L'estructura estarà 15 minuts exposada al Sol. Seguidament, traslladem l'estructura a l'ombra sense desconnectar el sensor de temperatura de l'ordinador.



Imatges 39 i 40. Esquema de muntatge de l'estructura de la constant solar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Per prendre les mesures, farem una taula com la següent:

Mesura		Inicial		Final		ΔT (°C)
		Hora (UTM)	T ₀ (°C)	Hora (UTM)	T (°C)	
1	Sol	12:00		12:15		
	Ombra	12:15		12:30		
2	Sol	13:00		13:15		
	Ombra	13:15		13:30		
3	Sol	14:00		14:15		
	Ombra	14:15		14:30		

Taula 7. Dades de les temperatures inicial i final del ferro al Sol i l'ombra i el seu increment.

- Repetim l'experiment a una àrea a l'ombra.
- A mesura que repetim l'experiment, entrem els valors mesurats a la taula.

5.6. Resultats, anàlisi i discussió

Mesura		Inicial		Final		ΔT (°C)
		Hora (UTM)	T ₀ (°C)	Hora (UTM)	T (°C)	
1	Sol	12:00	35,75	12:15	43,76	8,01
	Ombra	12:15	43,76	12:30	37,48	6,28
2	Sol	13:00	31,46	13:15	39,64	8,18
	Ombra	13:15	39,64	13:30	35,37	4,27
3	Sol	14:00	32,40	14:15	43,44	11,02
	Ombra	14:15	43,44	14:30	39,55	3,9
4	Sol	15:00	34,53	15:15	43,1	8,69
	Ombra	15:15	43,10	15:30	39,79	3,31
5	Sol	16:00	37,79	16:15	43,3	5,5
	Ombra	16:15	43,3	16:30	38,73	4,37

Taula 8. Dades de les temperatures inicial i final del cilindre de ferro al Sol i l'ombra i el seu increment. Les mesures van ser preses l'11 de juliol de 2020. (Lleida, latitud: 41° 36, 7859' N, 0° 36, 5865' E, altitud: 184 m).

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

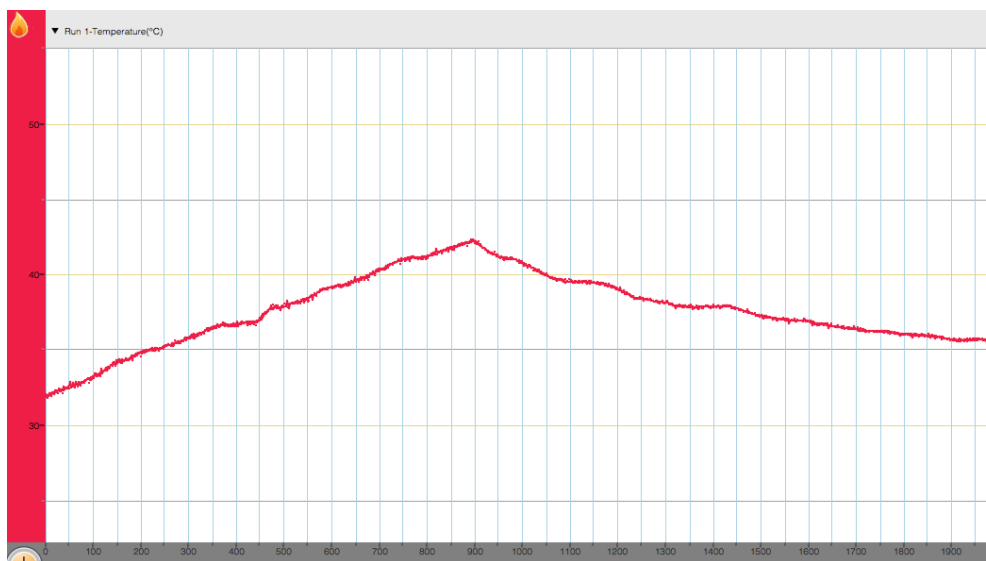
Mesura	Temps (s)	Altura del sol (z) (°)	Q (J)	P (W/m ²).
1	1800	71	1697	589
2	1800	61	1478	513
3	1800	53	1772	615
4	1800	42	1772	495
5	1800	29	1425	407

Taula 9. Dades de temps, altura, quantitat de calor i constant solar. Les mesures van ser preses l'11 de juliol de 2020.

Com més gran sigui l'altura del Sol (z), més gran és el valor de l'energia per metre quadrat que incideix en la superfície del disc. De tota manera, hi ha un valor anòmal en la mesura 3, possiblement degut a un error experimental. Si exceptuem la tercera dada, el valor mitjà de l'energia per unitat que incideix a la superfície de la Terra és de $501 \frac{W}{m^2}$, resultant de:

$$\bar{P} = \frac{589 + 513 + 495 + 407}{4} = 501 \frac{W}{m^2}$$

A l'hora de realitzar l'experiment, podem veure com hi ha una crecuda de temperatura pronunciada en els primers 15 minuts (900 s) que corresponen a l'interval de temps que el cilindre de ferro està exposat al Sol. No obstant, en els pròxims 15 minuts la temperatura disminueix poc a poc pel fet que el cilindre és a l'ombra i no li incideixen els raigs solars (imatge 41).



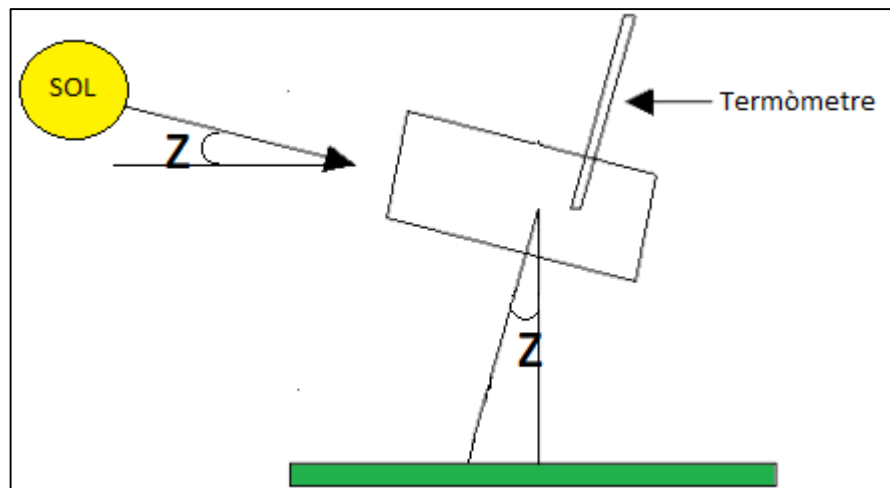
Imatge 41. Gràfic temperatura (°C) - temps (s).

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

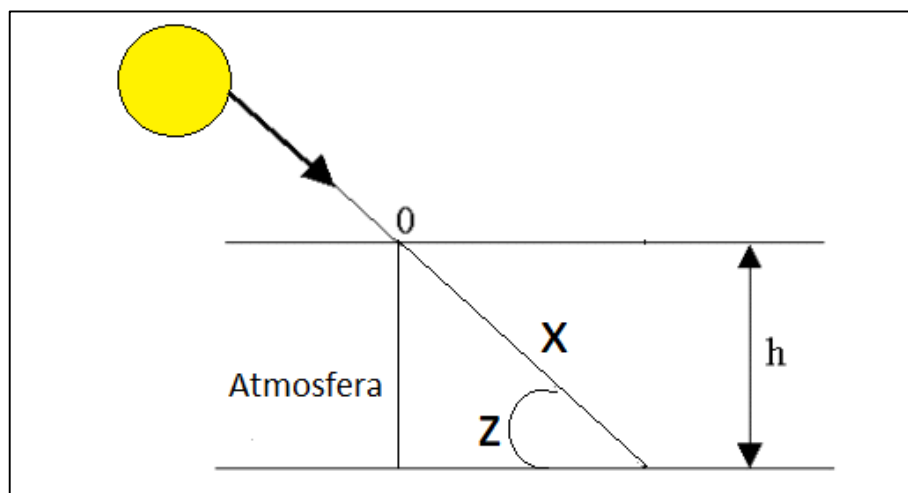
Influència de l'atmosfera^{[21][22]}

Si volem fer una estimació de la constant solar cal tenir en compte que l'atmosfera absorbeix una part de l'energia del Sol, que està relacionada amb la distancia recorreguda pels rajos i per la transparència de l'atmosfera. Suposarem que l'atmosfera té un espessor h i una transparència uniforme. Com més gran sigui l'altura (z) del Sol, més petita és la distancia x recorreguda pels raigs a l'atmosfera.

Per fer una estimació de l'energia rebuda en la unitat de temps i per unitat de superfície fora de l'atmosfera (constant solar) cal fer diferents mesures a diferents altures (z) del Sol i alguns tractaments matemàtics (Imatges 42 i 43).



Imatge 42. Representació gràfica dels raigs solars incidint en el disc de ferro.



Imatge 43. Representació gràfica dels raigs solars incidint sobre l'atmosfera.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Primer de tot farem, una aproximació matemàtica. L'energia que incideix perpendicularment sobre l' unitat de superfície en la unitat de temps a l'abscissa x és $P(x)$.

Assumim que la pèrdua d'energia per segon entre x i $x+dx$ és proporcional a $P(x)$

$$dP(x) = -kP(x)dx \rightarrow \frac{dP(x)}{P(x)} = -kdx$$

$$\int_0^x \frac{dP(x)}{P(x)} = - \int_0^x kdx \rightarrow \ln P(x) - \ln(0) = -kx \rightarrow \ln P(x) = \ln P(0) - kx$$

Equació 8. Aproximació matemàtica a un logaritme neperià.

On :

- $P(0)$ correspon a $x= 0$, fora de l'atmosfera.
- x depèn de l'altura del Sol (z) i del seu espessor (h), de tal manera que:

$$x = \frac{h}{\sin(z)}$$

- $1/\sin(z)$ estaria relacionat amb la "massa d' aire" que els raigs de llum han de travessar per l'atmosfera.
- k depèn del grau de transparència de l' atmosfera.

$\ln(Px)$ és una funció lineal de $h/\sin(z)$:

$$y = a + bx \Rightarrow \ln P(x) = \ln P(0) - kh/\sin(z)$$

Equació 9. Funció lineal.

- h té un valor desconegut, però el mateix per a totes les mesures, amb la qual cosa només modifica l'escala d'abscissa

Si extrapolem a $h/\sin(z) = 0$ trobem el valor de la constant solar fora de l'atmosfera:

$$\ln P(0)$$

Equació 10. Logaritme neperià de la constant solar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

$$\text{Constant Solar} = P(0) = e^{\text{Ln } P(0)}$$

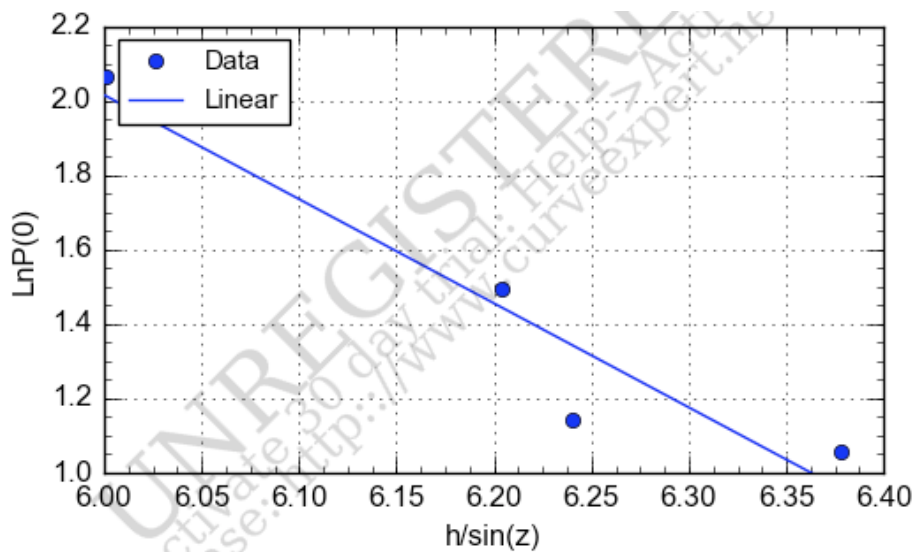
Equació 11. Número e elevat al logaritme neperià de la constant solar.

Mesura	LnP(0)	h/sin(z), on h=1
1	6,378	1,058
2	6,240	1,143
3	6,204	1,494
4	6,001	2,063

Taula 10. Taula de dades Ln(P) - h/sin(z).

Si representem Ln (P) en funció de h/sin(z), obtenim un conjunt de punts que es poden ajustar a una línia recta d'equació (imatge 44):

$$y = a + bx = 6,674 - \frac{0,325}{\sin(z)}$$



Imatge 44. Gràfic Ln(P) - h/sin(z)

Aquesta equació és equivalent a: $\text{Ln } P = 6,674 - \frac{0,325}{\sin(z)}$, on l'ordenada a l'origen és

$\text{Ln } P(0) = 6,674$. Per tant el valor el valor de la constant solar és:

$$P(0) = e^{\text{Ln } P(0)} = e^{6,674} \Rightarrow P(0) = 791 \frac{W}{m^2}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Aquest valor no coincideix amb el valor de la constant solar mesura els satèl·lits. El valor acceptat actualment és de 1361 W/m^2 . La diferència pot ser deguda al mètode d'extrapolació utilitzat en la seva determinació en el que hem suposat que la transparència de l'atmosfera és uniforme.

També caldria repetir l'experiment més vegades i en diferents èpoques de l'any i esbrinar si el valor de la constant solar canvia amb les estacions. Atès que l'activitat del Sol és cíclica amb màxims i mínims cada 11 anys aproximadament, seria interessant estudiar la relació entre la constant solar i l'activitat del Sol.

De tota manera, és molt difícil trobar el valor real de la constant solar pel fet que, la radiació del Sol que ens arriba a l'interior de la Terra és escampada per l'atmosfera i difusa per les condicions meteorològiques. Per tant, la mesura de la constant solar real només s'aconsegueix a partir de les mesures enregistrades pels satèl·lits.

5.7. Conclusions parcials

- Hem determinat la quantitat d'energia calorífica que rep la Terra procedent del Sol, que correspon a 501 W/m^2 .
- Hem fet una estimació experimental de la constant solar, la qual és de 791 W/m^2 .

6. Estimació experimental de la lluminositat del Sol

6.1. Objectius parcials

- Fer una estimació experimental la lluminositat del Sol utilitzant una bombeta de potència coneguda.
- Estimar experimentalment la lluminositat del Sol a partir de la constant solar.

6.2. Lluminositat a partir de la potència d'una bombeta

6.2.1. Descripció de l'experiment

Construirem fotòmetre que ens permeti comparar la lluminositat de dues fonts de llum diferents: una bombeta i el Sol. Per fer-ho, col·locarem una bombeta orientada cap al Sol i, entre mig d'aquestes dues fonts, la cara d'una persona. El suport de la bombeta tindrà un regle adherit, el qual ens marcarà la distància a la que ens hem de parar. Per fer l'experiment, haurem de sentir la mateixa escalfor a les dues galtes (una exposada al Sol i l'altra a la bombeta). La distància entre la galta i la bombeta correspon a d_2 i la potència del Sol serà L_1 (equació).

$$L_1 \times d_2^2 = L_2 \times d_1^2$$

Equació 12. Igualació de distàncies i potències del Sol i una bombeta.

On:

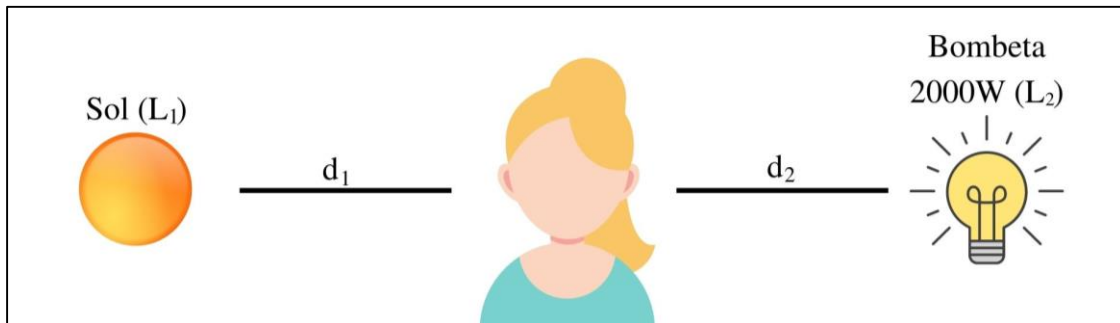
- L_2 : Potència de la bombeta (2000 W)
- d_1 : Distància de la Terra al Sol ($1,5 \cdot 10^8$) km.

6.2.2 Utilatge

- Bombeta 2000 W
- Regle 1m
- Transportador
- 2 vares de ferro
- 2 cargols de taula
- Pèndul

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

6.2.3. Dibuix del muntatge



Imatge 45 i 46. Dibuix del muntatge de l'experiment per determinar la lluminositat del Sol a partir d'una bombeta.

6.2.4. Procediment

- Preparem l'estructura tal i com es mostra a la imatge 47.
- Orientem el suport cap al Sol. Per ajudar-nos, utilitzem el programa Stellarium per saber l'altura del Sol a la nostra posició. El regle ha d'estar perpendicular a la bombeta.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 47. Estructura per prendre mesures per estimar la lluminositat del Sol.

- Ens col·loquem de tal manera que el regle sigui perpendicular al pla de la nostra cara entre la bombeta i el transportador. (Imatges 45 i 46).
- Anotem la mesura del regle en la que sentim la mateixa escalfor a la galta esquerra (per part de la bombeta) com a la dreta (per part del Sol). Utilitza una taula com la següent:

Mesura	Altura (°)	Hora (UTM)	d_1 (cm)	$L_1 = \frac{L^2 \times d_1^2}{d_2^2}$ (W)
1				
2				
3				
4				

- Repetim l'experiment un mínim de 4 vegades a cada altura a diferents hores del dia.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

6.2.5. Resultats, anàlisi i discussió

Mesura	Altura (°)	Hora (UTM)	d ₁ (cm)	$L_1 = \frac{L^2 \times d_1^2}{d_2^2}$ (W)
1	33	10:00	61	$1,2 \times 10^{26}$
2			63	
3			60	
4			61	
5	25	11:00	55	$1,6 \times 10^{26}$
6			52	
7			53	
8			54	
9	24	12:00	45	$2,1 \times 10^{26}$
10			47	
11			44	
12			49	
13	32	13:00	53	$1,8 \times 10^{26}$
14			49	
15			50	
16			48	

Taula 11. Mesures per estimar la lluminositat del Sol. Les mesures van ser preses el 30 de juliol de 2020.

- Obté la mitjana:

$$L_i = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} = \frac{6,7 \times 10^{26}}{4} = 1,7 \times 10^{26} \text{ W}$$

- I la desviació mitjana:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{1,1 \times 10^{26}}{4} \cong 0,3 \times 10^{26} \text{ W}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Amb la mitjana i la desviació mitjana calculades, calcula l'error relatiu:

$$E_r = \frac{d}{L_i} \times 100 = \frac{0,3 \times 10^{26}}{1,7 \times 10^{26}} \times 100 \cong 17,64\%$$

- Resultat:

$$(L_i \pm d) \text{ km} = (1,7 \times 10^{26} \pm 0,3 \times 10^{26}) \text{ W}$$

- Càlcul de l'error relatiu comés entre la nostra mesura i la mesura real:

$$E_r = \frac{|L_i - L_{real}|}{L_{real}} \times 100 = \frac{|1,7 \times 10^{26} - 3,8 \times 10^{26}|}{3,8 \times 10^{26}} \times 100 \cong 55\%$$

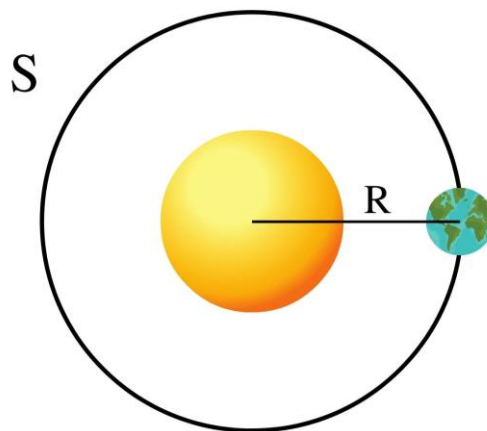
Resultat: L'error relatiu comés és al voltant d'un 55%.

El resultat és elevat perquè no és fàcil percebre la mateixa escalfor amb dues galtes.

Cal estar molt entrenat per sentir la mateixa sensació tèrmica en cada galta.

6.3. Estimació experimental de la lluminositat del Sol a partir de la constant solar

Per fer una estimació de l'energia total produïda pel Sol el un segon, cal que considerem una esfera al voltant del Sol, de radi R, igual a la distància Sol – Terra ($1,5 \cdot 10^{11}$ m).



Imatge 48. Representació gràfica d'una esfera al voltant del Sol de radi igual a la distància del Sol.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Tota l'energia produïda pel Sol en un segon travessa en aquest temps la superfície de l'esfera: $S = 4\pi R^2$ (equació 13). Coneixent el valor de la constant solar $P(0)$, es pot calcular la potència o lluminositat del Sol L :

$$L = S \times P(0) = 4\pi R^2 \times P(0) = 4\pi(1,5 \times 10^{11})^2 \times 791 = 1,4 \times 10^{26} \text{ W}$$

Tenint en compte que la lluminositat del Sol és $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$, l'error relatiu comés és del 63%.

6.4. Conclusions parcials

- La lluminositat del Sol obtinguda a partir de la utilització d'una bombeta és de: $(1,7 \times 10^{26} \pm 0,3 \times 10^{26}) \text{ W}$, amb un error relatiu comés del 55%.
- La lluminositat del Sol obtinguda a partir de la constant solar és de: $1,4 \times 10^{26} \text{ W}$, amb un error relatiu comés del 63%.

7. Estimació experimental de la temperatura del Sol

7.1. Objectius parcials

- Estimar la temperatura absoluta del Sol a partir de la llei de Stefan-Boltzmann.

7.2. Descripció dels càlculs

Atès que l'espectre de radiació del Sol és molt semblant al d'un cos negre a la mateixa temperatura, d'acord amb la llei de Stefan-Boltzmann la seva lluminositat és directament proporcional a la quarta potència de la seva temperatura. Per tant, aquesta possibilita fer una estimació de la temperatura de la fotosfera solar, de la següent manera:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Equació 14. Llei de Stefan-Boltzmann, on s'aïlla la temperatura absoluta.

On:

- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ és la constant de Stefan-Boltzmann
- T = Temperatura absoluta (K)
- L = Lluminositat del Sol (W)
- R = Radi del Sol ($6,96 \times 10^8 \text{m}$)

7.3. Resultats, anàlisi i discussió

Seguint la llei de Stefan-Boltzmann, calcularem la temperatura absoluta del Sol a partir de les lluminositats que hem estimat experimentalment a l'apartat 6. Per tant:

- Càlcul de la temperatura absoluta del Sol a partir de la lluminositat aconseguida a través d'una bombeta de potència coneguda:

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1,7 \times 10^{26}}{4\pi(6,96 \times 10^8)^2 \times 5,67 \times 10^8}} = 4711 \text{ K}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Càlcul de la temperatura absoluta del Sol a partir de la lluminositat aconseguida a través de la constant solar:

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1,4 \times 10^{26}}{4\pi(6,96 \times 10^8)^2 \times 5,67 \times 10^8}} = 4488 \text{ K}$$

Els errors relatius comesos són d'un 19% i d'un 23% respectivament, pel fet que partim d'uns valors amb uns errors relatius grans, els quals ja hem explicat.

7.4. Conclusions

- Hem estimat la temperatura absoluta del Sol a través de la llei de Stefan-Boltzmann, a través de dos mètodes diferents:
 - Mitjançant el valor de la lluminositat d'una bombeta, hem determinat que la temperatura de la fotosfera solar és de 4711 K, amb un error relatiu comès del 19%.
 - A partir de la constant solar, hem determinat que la temperatura de la fotosfera solar és de 4488 K, amb un error relatiu comès del 23%.

8. Estimació del temps de vida del Sol

8.1. Objectius parcials

- Fer una estimació experimental del temps de vida del Sol a través de l'equivalència entre massa i energia.

8.2. Descripció dels càlculs

Si es coneix la lluminositat^[22] del Sol ($3,8 \cdot 10^{26}$ W), i la seva massa ($2,00 \cdot 10^{30}$ kg), es pot fer una estimació del seu temps de vida^{[23][24]}.

Sabem que el Sol emet cada segon $3,8 \cdot 10^{26}$ J d'energia (malgrat que la lluminositat del Sol ha sofert lleugeres variacions en el decurs del temps, considerarem que aquest és el valor mitjà i és manté constant) , degut a la pèrdua de massa en el procés de fusió nuclear, que ve donada per l' expressió:

$$E = \Delta m \times c^2$$

Equació 15. Equivalència entre massa i energia d'Einstein.

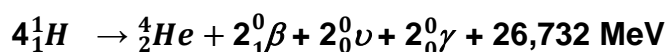
On:

- E = energia
- Δm = pèrdua de massa (kg)
- c= velocitat de la llum al buit (m/s)

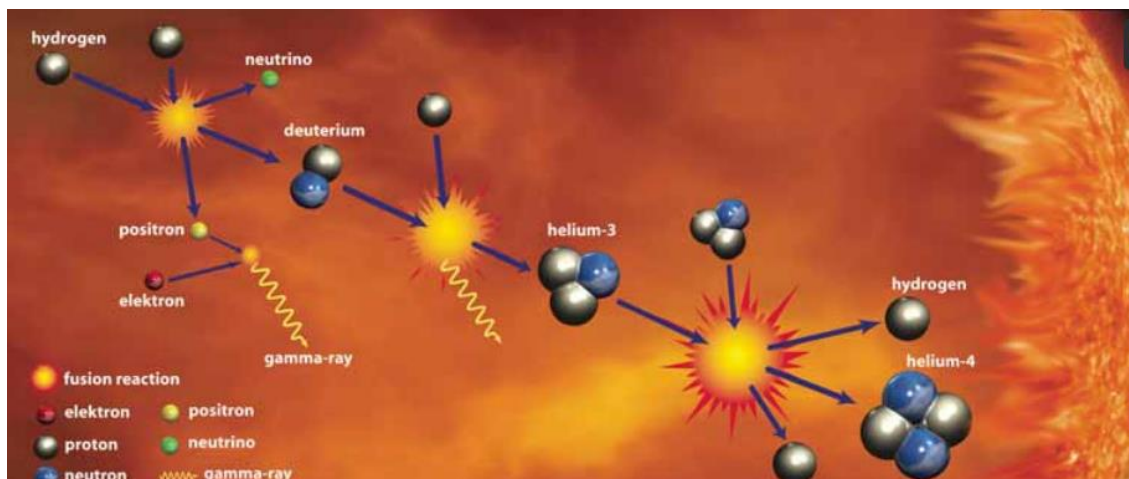
La quantitat d'hidrogen^[25] (Δm) que el Sol transforma en energia cada segon és:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{3,8 \cdot 10^{26}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4,37 \cdot 10^9 \text{ kg (4,37 milions de tones de H cada segon)}$$

En un principi, suposarem que tota aquesta energia que es produeix prové de la reacció nuclear de fusió nuclear del cicle protó-protó que té lloc al Sol.^{[26][27]} (Imatge 39).



ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 49. Fusió nuclear. Cadena protó-protó. Cortesia de Mark Tiele Westra.

En les reaccions nuclears no s'acompleix el principi de conservació de la massa perquè la massa dels reactius no coincideix amb la massa dels productes de la reacció. Aquesta diferència (Δm) es transforma en energia (E).

- $m({}_1^1H) = 1,00784 \text{ u}$
- $m({}_2^4He) = 4,002602$

En efecte:

$$\Delta m = m_o - m = 4m({}_1^1H) - m({}_2^4He) = 4 \times 1,00784 - 4,002602 = 4,030136 - 4,002602 \\ = \mathbf{0,028758 \text{ u}}$$

Per tant, la massa de l'àtom d'He és inferior a la massa dels 4 àtoms d'H.

El percentatge de la massa inicial d'hidrogen (m_o) que es transforma en energia és:

$$\% m_o = \frac{0,028758}{4,030136} \times 100 = \mathbf{0,713\%}$$

El 0,713% de la massa inicial del nucli del Sol ha "desaparegut". La "massa desapareguda" es transforma en energia, i aquesta energia és la responsable de fer brillar el Sol. Es a dir, si cada segon desapareixen 4,37 milions de tones d'H per convertir-se en energia ($E = \Delta m c^2$), i aquesta quantitat representa el 0,713% de la massa total d'H que el Sol crema en un segon, es pot calcular la massa total de H cremada en un segon:

$$4,37 \cdot 10^6 \text{ tones de H} \cdot \frac{100}{0,713} = 612 \cdot 10^6 \text{ tones de H cada segon.}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Per tant, a cada segon, el Sol crema aproximadament al voltant de 612 milions de tones de H que es converteixen en 608 de tones d'He.

Se sap que el Sol i el seu sistema planetari es van formar gairebé simultàniament a partir del mateix núvol de gas i pols, amb la qual cosa podem assignar-li una edat similar a la Terra. L'edat de la Terra es coneix a partir de la datació radioactiva de les roques i és de 4.600 milions d'anys.

Podem fer una estimació de la massa del Sol transformada en energia durant aquests 4600 milions d' anys. Tenint en compte que un any té 31.557.600 s, llavors:

$$4,6 \cdot 10^9 \times 31.557.600 \times 4,37 \cdot 10^9 = \mathbf{6,34 \cdot 10^{26} \text{ kg d'H}}$$

Aquest valor és enorme, però menyspreable respecte a la massa del Sol. La pèrdua de massa durant aquests 4600 milions d' anys representa un **0,03% del valor de la massa actual.** Amb la qual cosa considerarem que la massa del Sol s'ha mantingut pràcticament constant des dels seus inicis.

Suposant que el ritme de fusió nuclear s'ha mantingut constant ($6,12 \cdot 10^{11}$ kg d'H/s) des que el Sol va ingressar a la seqüència principal i va a començar a fusionar H, podem escriure:

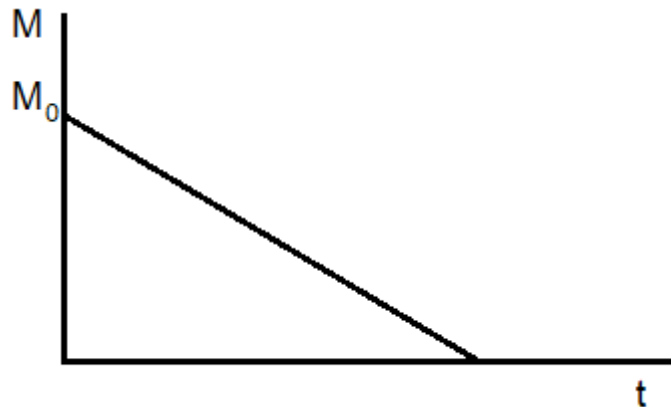
$$\mathbf{M = M_0 - 6,12 \cdot 10^{11} t}$$

On:

- M= massa final del Sol (kg)
- M_0 = massa inicial del Sol (kg)
- t= temps (s)

Si representem M en funció de t (imatge 50), s'obté una línia recta que talla l'eix d'abscissa a l' instant, t, en el qual $M = 0$ (final de la vida del Sol). D'aquesta manera es pot fer una estimació del seu temps de vida.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 50. Gràfic massa d'H - temps.

$$0 = 2,00 \cdot 10^{30} - 6,07 \cdot 10^{11} t \quad \rightarrow t = \frac{2,00 \cdot 10^{30}}{6,12 \cdot 10^{11}} = 3,27 \cdot 10^{18} \text{ s} \quad \rightarrow t = 1,04 \cdot 10^{11} \text{ anys.}$$

→ **104.000 milions d' anys**

El valor calculat d' aquesta manera ens dona un **resultat aberrant** i no concorda amb el valor estimat per la comunitat científica que li atorga una vida aproximada de 10000 milions d'anys. L' error principal que hem comés ha sigut suposar que tota la massa del Sol és H , i que tot l'H es converteix en Heli.

Cal dir, que el Sol, al igual que totes les estrelles que tenen una massa inferior a 8 masses solars, evolucionen i en les seves etapes finals esdevenen una estrella gegant vermella que acaba alliberant a l'espai les seves capes externes formant un bonic embolcall de gas: una nebulosa planetària amb una nana blanca massiva al centre. Amb la qual cosa, no tota la massa d'hidrogen del Sol es transforma en energia.

Per trobar el **temps de vida del Sol** i evitar l' errada comesa anteriorment, hem de fer una estimació de la quantitat d'H que hi ha al nucli del Sol que es pot convertir en energia. Per fer dur a terme tot això, hem de fer les següents consideracions:

- Només el **79,4% de la massa del Sol primitiu** era hidrogen. Aquest valor s'obté a partir de la massa actual del Sol, del percentatge^[28] actual d'H (73,4%), i de la quantitat d'H que el Sol ha cremat des del seu inici.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

$$2,00 \cdot 10^{30} \text{ kg d'H} \times 0,734 = 1,468 \cdot 10^{30} \text{ kg d'H}$$

$$6,12 \cdot 10^{11} \frac{\text{kg H}}{\text{s}} \times 4600 \cdot 10^6 \text{ anys} \times 365,25 \text{ dies} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} = 8,88 \cdot 10^{28} \text{ kg de H}$$

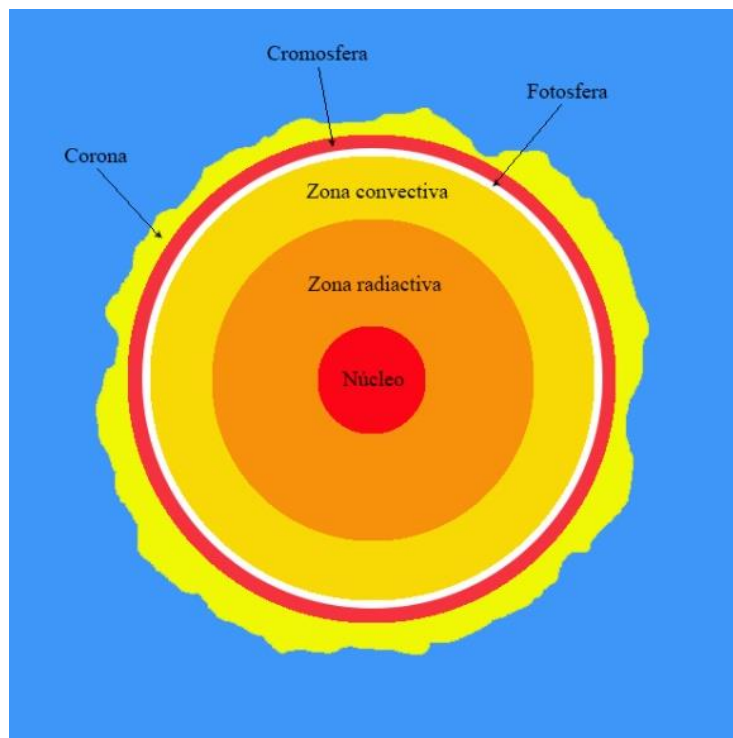
La massa total d'H a l'inici va ser:

$$468 \cdot 10^{30} + 8,88 \cdot 10^{28} = 1,5568 \cdot 10^{30} \text{ kg de H}$$

El percentatge d'H a l'inici va ser:

$$\%m(H) = \frac{1,5568 \cdot 10^{30}}{2,00 \cdot 10^{30}} \times 100 = \mathbf{77,8\%}$$

- De tot l' hidrogen del Sol, tan sols el **12,5% es troba al nucli**, on hi ha la temperatura suficient perquè tingui lloc la fusió nuclear^{[26][27]}. (Imatge 51)



Imatge 51. Estructura del Sol. Font: <https://astronomiaparatodos.com/2018/02/21/la-estructura-del-sol/>

Tenint en compta tot això, la massa disponible d'hidrogen és:

$$\text{Massa disponible d'H} = 2,00 \cdot 10^{30} \times 0,778 \times 0,125 = 1,94 \cdot 10^{29} \text{ kg}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

El nou temps de vida del Sol serà:

$$\text{Temps de vida} = \frac{\text{massa disponible H}}{\text{massa que crema en 1 s}} = \frac{1,94 \cdot 10^{29}}{6,12 \cdot 10^{11}} = 3,17 \cdot 10^{17} \text{s} \rightarrow \mathbf{10.045 \text{ milions d'anys}}$$

Sabent que la seva antiguitat és semblant a l'edat de la Terra (4600 milions d'anys), el temps de vida que li resta al Sol és de **5445 milions** d' anys aproximadament.

8.3. Conclusions parcials

- Hem realitzat una estimació experimental del temps de vida del Sol a través de l'equivalència entre massa i energia. Ens ha donat un resultat de **10.045** milions d'anys i, per tant, la vista que li resta al Sol és de **5445** milions d'anys.

9. Estimació experimental de la massa del Sol

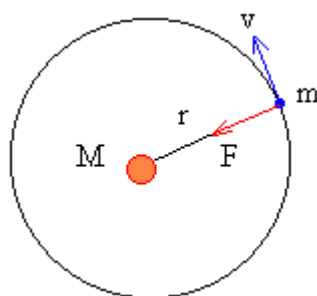
9.1. Objectius parcials

- Realitzar una estimació experimental de la massa del Sol.

9.2. Explicació dels càlculs

La llei de la gravitació universal ens permet determinar una nova dada astronòmica: la massa M del Sol.

Per fer-ho, únicament hem de conèixer el radi r de la Terra ($6,371 \cdot 10^6$ m), el seu període T ($3,154 \cdot 10^7$ s), i la constant de gravitació universal G ($G = 6.67 \cdot 10^{-11}$ $\text{Nm}^2 / \text{kg}^2$). Aplicarem una fórmula que anem a deduir a continuació i, anomenarem m a la massa de la Terra, v a la seva velocitat, i M a la massa de Sol. (Imatge 52).



Imatge 52. Força que actua sobre un satèl·lit que orbita el Sol.

La Terra gira al voltant del Sol descrivint òrbites circulars per als quals la força d'atracció gravitatòria:

$$F = G \times \frac{Mm}{r^2}$$

La força d'atracció gravitatòria proporciona una força centrípeta o normal:

$$F_n = m \times a_n = m \times \frac{v^2}{r}$$

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Aquesta és necessària perquè produeixi un moviment circular uniforme (MCU). El tractament matemàtic que hem fet és vàlid perquè l'excentricitat de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol és gairebé zero, amb la qual cosa, la seva òrbita és pràcticament una circumferència, i es pot assimilar el seu moviment a un moviment circular uniforme. És a dir:

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

A partir de la igualtat anterior, podem trobar la velocitat a la qual orbita la Terra. Haurem d'eliminar la massa m , ja que no influeix a l'estar multiplicant en els dos membres:

$$v^2 = \frac{GM}{T}$$

Equació 15. Velocitat a la que orbita un satèl·lit.

D'altra banda, sabem que la relació entre la velocitat lineal v , i la velocitat angular ω , ve donada per l'expressió:

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

Elevant la velocitat v al quadrat:

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

Equació 16. Velocitat lineal elevada al quadrat.

Iguallem les equacions (15) i (16), i aïllem la massa M del Sol:

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

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

Equació 17. Massa del Sol.

9.3. Resultats, anàlisi i discussió

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \times (1.496 \times 10^{11})^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (3,154 \times 10^7)^2} = 1,992 \times 10^{30} \text{ kg}$$

El valor de la **massa del Sol és de $1.992 \cdot 10^{30} \text{ kg}$** i, comparat amb el valor real ($M = 1,989 \cdot 10^{30}$), hem comés un error relatiu del 1%.

9.4. Conclusions parcials

- Hem realitzat una estimació de la massa del Sol, la qual ens ha donat $1,992 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, amb un error relatiu del 1%.

10. Càlcul de la intensitat del camp gravitatori del Sol

10.1. Objectius parcials

- Calcular la intensitat del camp gravitatori del Sol.

10.2. Fonaments teòrics

Es defineix la intensitat del camp gravitatori del Sol com la força gravitatòria específica que actua sobre la unitat de massa del cos que l'experimenta. Es representa amb la lletra g i les unitats al sistema internacional són N/kg:

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

Equació 18. Intensitat de camp gravitatori.

On:

- g = Intensitat de camp gravitatori (N/kg)
- F = Força (N)
- m = Massa (kg)

Aplicant la segona llei de Newton en la força obtenim la següent fórmula:

$$g = \frac{\frac{GMm}{R^2}}{m} \rightarrow g = \frac{GM}{R^2}$$

On:

- M = massa del Sol (kg)
- R = radi del Sol (m)
- G = constant de gravitació universal ($G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$)

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

10.3. Resultats, anàlisi i discussió

$$g = \frac{GM}{R^2} = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30}}{(6,9 \times 10^9)^2} = 279 \frac{N}{kg}$$

El valor de la intensitat del camp gravitatori del Sol és de $g = 279 \frac{N}{kg}$, i si ho comparem amb el valor real ($g = 274 \frac{N}{kg}$), hem comés un error relatiu d'un 2%. Aquesta petita diferència és possiblement a causa del truncament dels decimals.

10.4. Conclusions parcials

- Hem pogut calcular la intensitat del camp gravitatori del Sol a partir de la seva fórmula, la qual ens ha donat $g = 279 \frac{N}{kg}$, amb un error relatiu del 2%.

11. Càlcul de la velocitat de les ejeccions de la massa coronal del Sol

11.1. Introducció

Al mirar el Sol amb un telescopi solar proveït d'un filtre H – alfa, s'observa la seva cromosfera. S'hi solen observar les fulguracions solars, que són filaments de matèria solar, projectada per sobre de la seva superfície a causa de la intensa activitat de Sol. Les fulguracions que arriben les zones més altes es diuen protuberàncies i poden arribar a llançar-se a l'espai en forma de vent solar. Quan això passa, se'ls crida ejeccions de massa coronal. (CME en les seves sigles en anglès). Aquest succés té lloc a la corona de el Sol.

Quan el Sol ejecta massa coronal, una gran quantitat de massa (plasma dens i fred o gas ionitzat) és expulsada a gran velocitat, desafiant l'enorme gravetat i, viatja per l'espai interplanetari fins a aconseguir la Terra.

En el moment en que les erupcions solars intercepten el camp magnètic de la Terra, es produeixen tempestes geomagnètiques, que poden produir danys en els sistemes electrònics dels satèl·lits, interferint les comunicacions, els sistemes de navegació, i fins i tot les xarxes elèctriques. També representen un autèntic risc per als astronautes de la ISS, i per als cosmonautes de el futur que viatgessin a la Lluna o a Mart.

Per minimitzar els riscos, cal disposar d'un sistema d'alertes que detecti les ECMS, perquè es pugui pronosticar el temps d'arribada a la Terra. Això s'aconsegueix amb el coronògraf espectromètric LASCO C2 del satèl·lit SOHO que permet determinar, no només la velocitat de propagació de les ejeccions, sinó que també la seva direcció i l'extensió. Per aquesta raó, la captura en intervals regulars de temps, imatges de la corona solar, detectant l'evolució de el moviment de les EMCS.

En aquesta pràctica, proposarem dos mètodes senzills per fer una estimació de la velocitat d'ejecció de la massa coronal.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

11.2. Objectius parcials

- Observar i fotografiar la cromosfera solar a través d'un telescopi solar amb filtre H-alfa i detectar alguna protuberància.
- Calcular la velocitat inicial d'una ECM a partir de l'estudi de la imatge d'una flamarada solar.
- Fer una estimació de la velocitat inicial d'una ECM a partir de l'estudi cinemàtic de l'evolució d'una erupció solar, amb imatges captades pel coronògraf LASCO C2 del SOHO.
- Comparar la velocitat de les ECMS amb la velocitat d'escapament del Sol i preveure si arriben a la Terra.

11.3. Observació de la cromosfera solar

11.3.1. Material

- Telescopi solar: Lunt Solar Systems LS60T H-alfa de 60 mm (Imatge 53)
- Càmera rèflex Canon EOS 4000D amb adaptador a el focus primari del telescopi. (Imatge 54)



Imatges 53 i 54. Telescopi solar amb filtre H-alfa i càmera acoplada al telescopi solar.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

L'observació es va fer el 14 de novembre de 2010 a les 10:00 UT des de l'institut Maria Rúbies de Lleida. En l'observació visual no es va apreciar cap fulguració, i tampoc la va haver a la imatge del dia de SOHO realitzada pel coronògraf LASCO C2. A la foto de la cromosfera de el Sol (Imatge 55), realitzada per l'alumna [REDACTED], no s'observa cap indicatiu de fulguracions. L'activitat solar d'aquell dia va ser mínima, sense cap taca solar a la fotosfera.



Imatge 55. Cromosfera solar. No s'observen protuberàncies. Imatge realitzada el 14 de novembre de 2020.



Imatge 56. Cromosfera solar. No s'observen protuberàncies. Imatge realitzada el 14 de novembre de 2020. Font: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>

11.4. Estimació de la velocitat de les ejeccions de massa coronal del Sol (ECMS)

11.4.1. Mètode 1 per calcular la velocitat inicial d'una ECM

11.4.1.1. Fonaments teòrics

El camp gravitatori és un camp de forces conservatiu, amb la qual cosa l'energia mecànica E d'un cos de massa m que evolucioni en el si d'aquest camp, es conserva.

Apliquem el principi de conservació de l'energia a l'estudi d'un filament de matèria solar projectada per sobre de la seva superfície. La pregunta que ens plantejem és: ¿A quina velocitat v_1 surt projectada la massa coronal de la superfície del Sol?

Per resoldre la pregunta, disposem únicament com a dades, de la massa M de el Sol ($1,9 \cdot 10^{30}$ kg) del seu radi R . i de la constant de gravitació universal G . Suposarem que la velocitat final v_2 de la massa m ejectada en el punt més alt h és zero. (Imatge 1).

Si apliquem el principi de conservació de l'energia:

$$E_1 = E_2 \rightarrow E_c(1) + E_p(1) = E_c(2) + E_p(2)$$

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{GMm}{R} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{GMm}{R+h}$$

Si eliminem la massa m , ja que no influeix a l'estar multiplicants als dos costats, i si tenim en compte que $v_2 = 0$, podem aïllar la velocitat v_1 de la massa ejectada:

$$v_1 = \sqrt{2GM \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right]}$$

Equació 18. Velocitat v_1 de la massa ejectada.

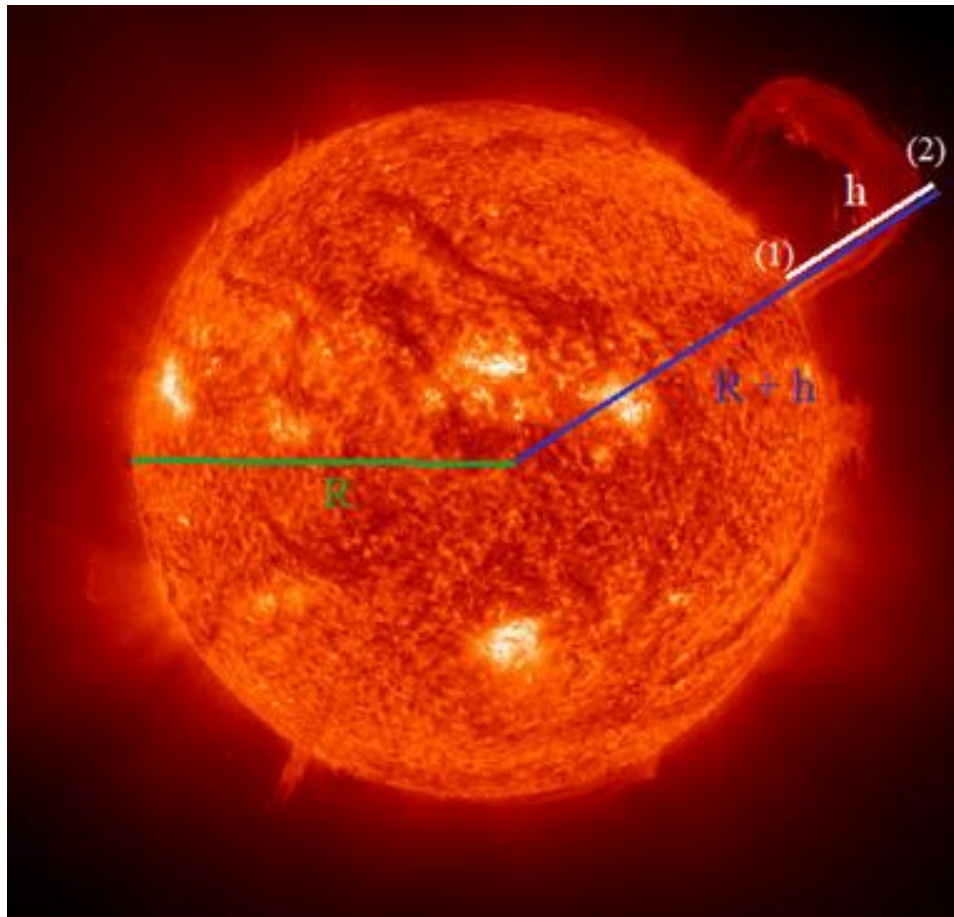
ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

11.4.1.2. Descripció de l'experiment

Es mesurarà la distància des del punt més alt d'una flamarada solar fins al centre del Sol. D'aquesta manera, es coneixerà la distància $r = R + h$. (Imatge 4). Per a això caldrà utilitzar la vara de calibratge i la cinta mètrica de el programa Tracker. (Imatge 5). La velocitat inicial de la ECM es calcularà aplicant l'equació 18.

11.4.1.3. Materials

- Foto de una fulguración solar: archivo superprom.jpg^[29] (Imagen 4)
- Programa libre Tracker^[30]

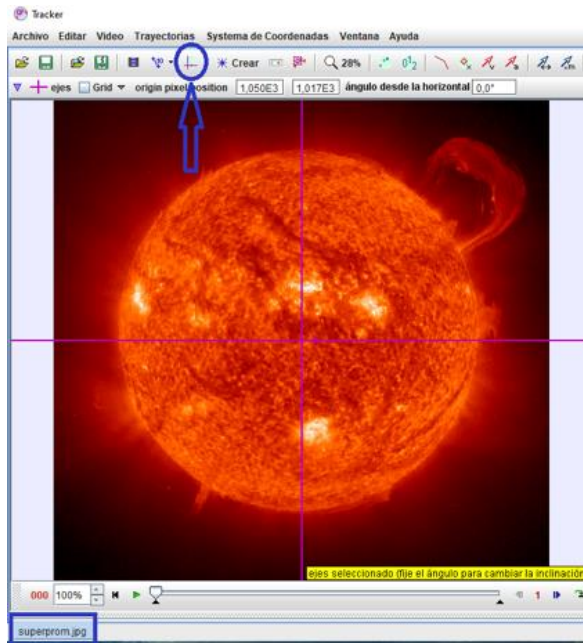


Imatge 57. Prominència solar en forma de mango realitzada el 14/09/1999. Descripció gràfica d'un filament solar d'altura h . Font: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

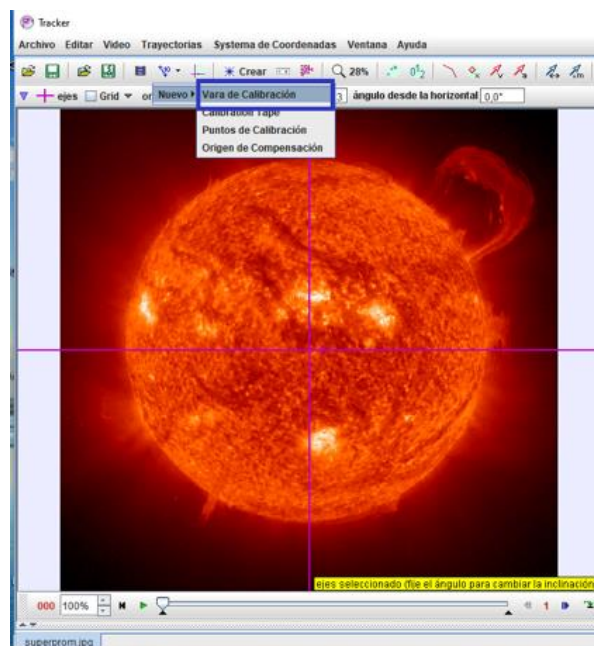
11.4.1.4. Procediment

- Obrim l'arxiu superprom.jpg^[1] amb el programa Tracker. Posteriorment, prenem la icona "Sistema de coordenades", que situa l'origen en el centre de el Sol (Imatge 58).



Imatge 58. Sistema de referència al centre del Sol.

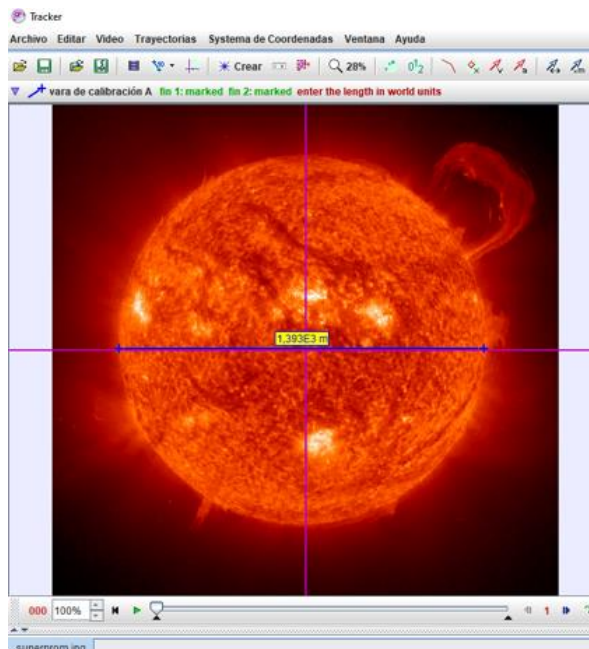
- Prenem la "Vara de Calibratge" (Imatge 59).



Imatge 59. Icona de la vara de calibració.

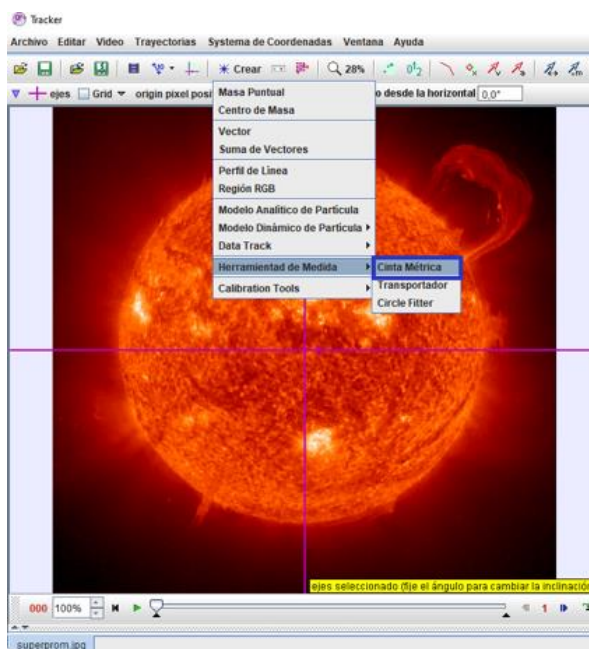
ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Mantenim premut SHIFT, i amb el ratolí es cliquem en l'inici i el final del diàmetre del Sol. Introduïm a continuació el valor numèric de la distància i la unitat: 1,393E9 m. (Imatge 60).



Imatge 60. Calibratge de la "Vara de Medir". Se li assigna a el diàmetre de la circumferència el valor de 1,393E9 m.

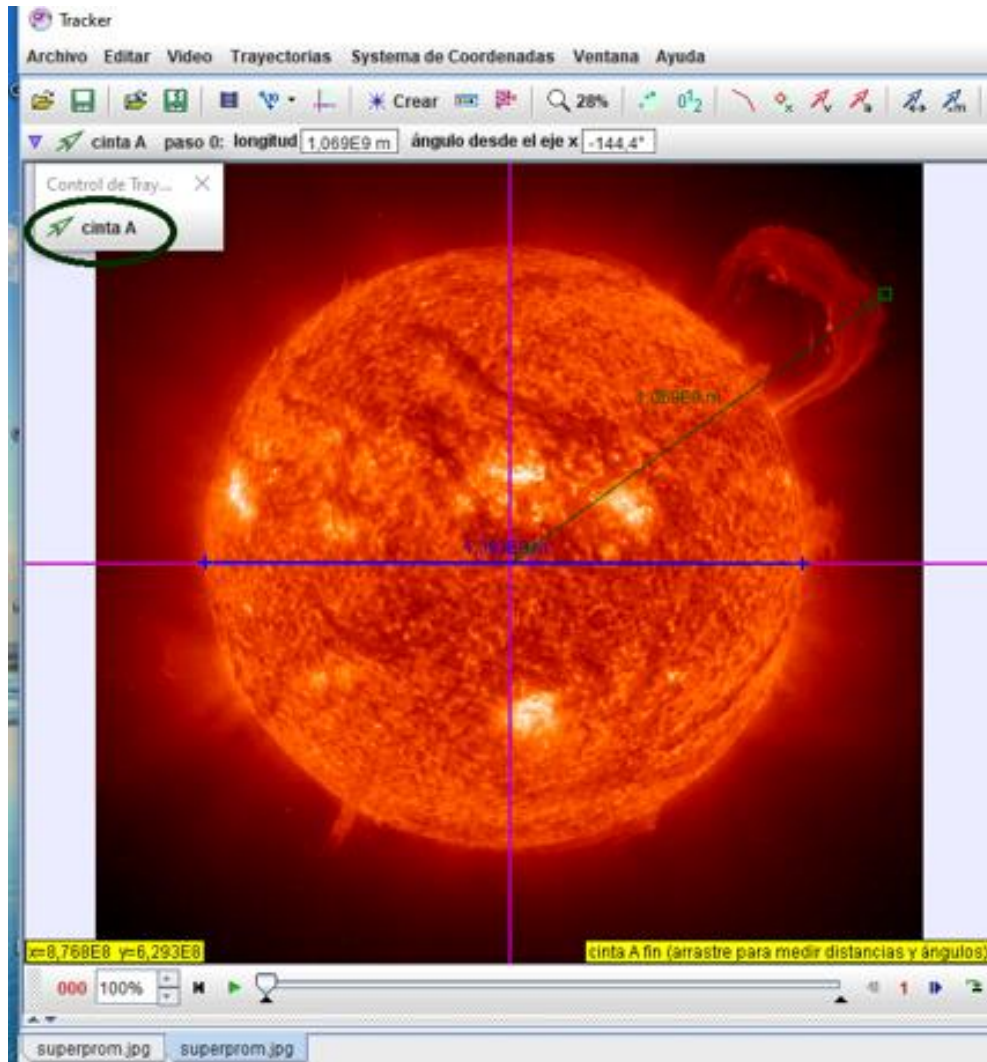
- Seleccionem la "cinta mètrica". (Crear/eines de mesura/ Cinta Mètrica). (Imatge 61).



Imatge 61. Cinta mètrica.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Cliquem la "Cinta Mètrica". A continuació, es manté premut SHIFT, i amb el ratolí es clica al centre de el Sol i, en la part més alta de la protuberància. La longitud entre aquests és la que hi ha sobre del segment (color verd). $R + h = 1,069E9$ m. Es pot seleccionar el color de la cinta si es clica a "Cinta". (Imatge 62).



Imatge 62. Mesura de la distància de la protuberància al centre del Sol.

11.4.1.5. Resultats, anàlisi i discussió

Si apliquem l'equació 18 amb la mesura de $R + h$ de la imatge 62, llavors:

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

$$v_1 = \sqrt{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30} \times \left[\frac{1}{6,96 \times 10^8} - \frac{1}{1,07 \times 10^9} \right]}$$
$$= 365 \text{ km/s}$$

Si comparem aquest valor amb la velocitat d'escapament v_e :

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30}}{6,96 \times 10^8}} = 618 \text{ km/s}$$

v_1 és inferior a la velocitat d'escapament de el Sol, el que justifica que la longitud del filament sigui finita.

Com més gran sigui la velocitat inicial de les ejeccions, més gran serà l'altura aconseguida, i major serà el risc que interceptin l'òrbita de la Terra. Coneixent la distància r de el Sol a la Terra ($r = R + h = 1 \text{ U. A.} = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$), farem una estimació de la velocitat mínima de les ejeccions perquè arribin a la Terra. Per fer-ho, no tindrem en compte la influència gravitatòria dels planetes i altres cossos celestes del sistema Solar:

$$v_1 = \sqrt{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30} \times \left[\frac{1}{6,96 \times 10^8} - \frac{1}{1,50 \times 10^{11}} \right]}$$
$$= 616 \text{ km/s}$$

La velocitat mitjana més alta d'una CME mesurada entre 1996 i 2012, fou de 3264 km/s^[5] (valor molt superior a la velocitat d'escapament) i que va arribar a la Terra en 12,76 h.

Com la velocitat de la protuberància no és superior a la d'escapament, l'impacte no va arribar a la Terra i, per tant, no es van produir aurores boreals o tempestes geomagnètiques.

11.4.2. Mètode 2 per calcular la velocitat inicial d'una ECM

11.4.2.1. Descripció de l'experiment

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

Es farà el seguiment i un estudi cinemàtic del moviment que descriu la massa coronal d'una ejecció. Per fer-ho, s'analitzaran els successius fotogrames del GIF animat d'una ejecció, confeccionat a partir de les imatges capturades pel coronògraf LASCO C2 del SOHO. L'anàlisi es realitzarà amb el programa Tracker.

11.4.2.2. Material

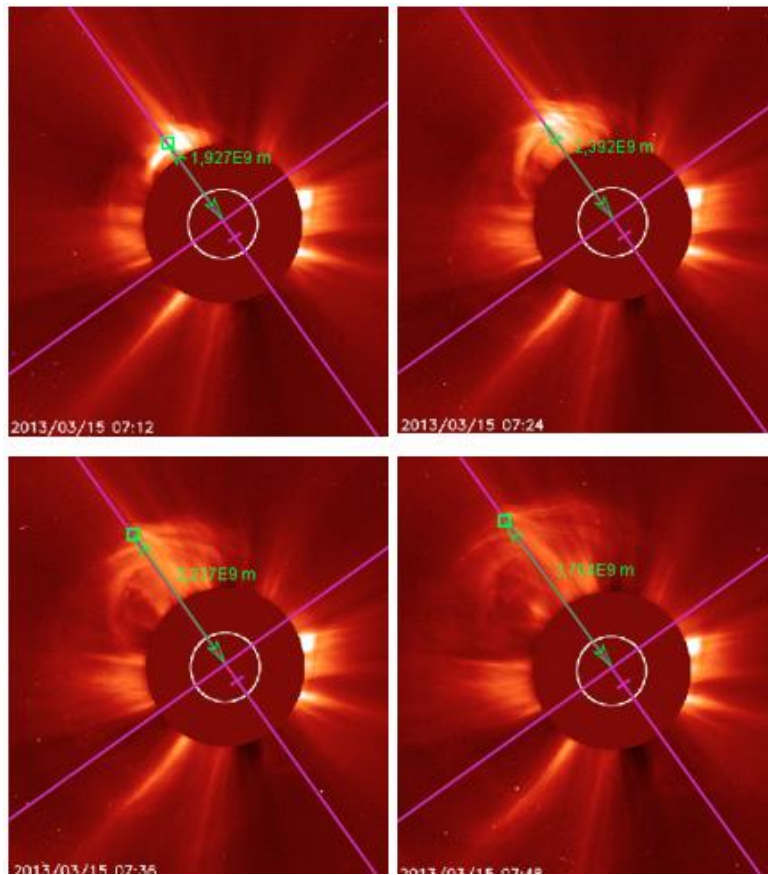
- GIF [4] animat de l'evolució d'una CME del dia 2013.03.15 entre les 07:12 i les 07:48 UT
- Programa Tracker

11.4.2.3. Procediment

Obrim l'arxiu GIF amb el programa Tracker, i amb la vara de calibratge se li assigna el valor de $1,393E9$ m al diàmetre del Sol. Amb la cinta de mesurar, es determina la posició del front d'ona de la CME respecte el centre de el Sol en els successius fotogrames. (Imatge 63). S'anoten els temps transcorreguts entre fotograma i fotograma i es construeix la taula de dades distància-temps. (Taula 12).

11.4.2.4. Resultats, anàlisi i discussió

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



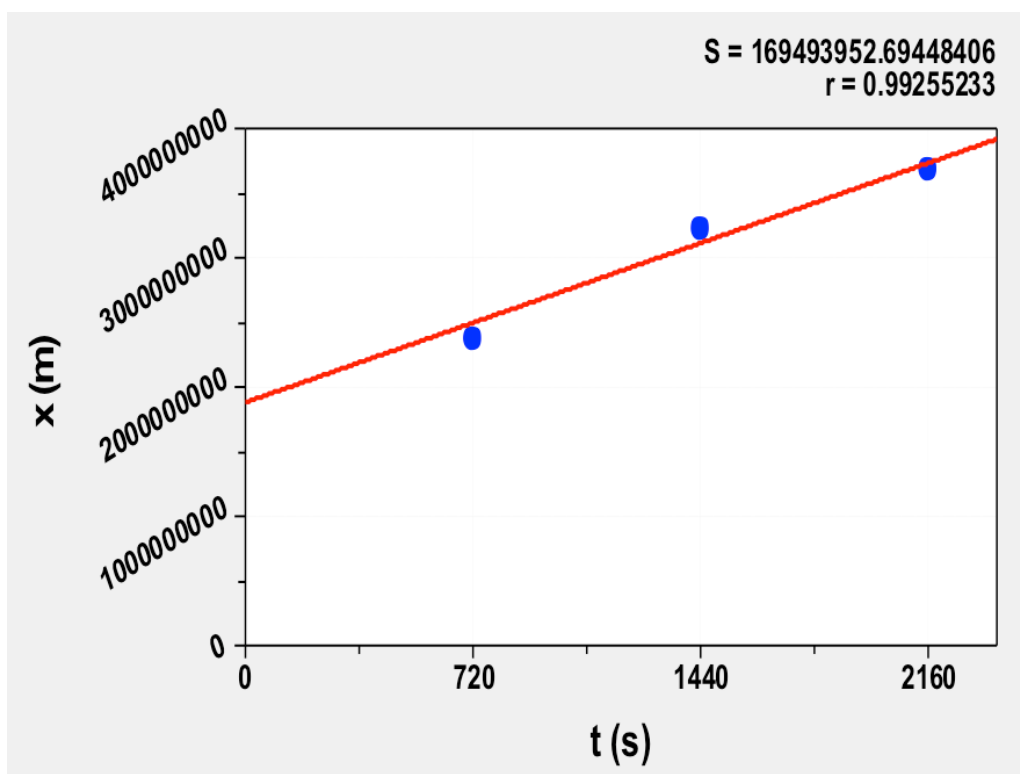
Imatge 63. Distància del front d'ona de l'expansió de la CME al Sol.

Mesura	Temps (s)	Distància al centre del Sol x (m)
1	0	$1,301 \cdot 10^9$
2	720	$2,392 \cdot 10^9$
3	1440	$3,237 \cdot 10^9$
4	2160	$2,404 \cdot 10^9$

Taula 12. Taula de dades posició – temps.

Representem les dades en un gràfic x - t (Imatge 64) amb el programa CurveExpert^[6] i els ajustem a l'disposar de poques dades a una línia recta:

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL



Imatge 64. Gràfic posició – temps.

Linear Fit: $y=a+bx$

Coefficient Data:

$$a = 1.88860000000E+009 \text{ m}$$

$$b = 8.57777777778E+005 \text{ m/s}$$

Es pot concloure que el moviment de la CME a distàncies properes a el Sol es pot assimilar a un moviment uniforme amb una velocitat mitjana de **858 km/s**, velocitat superior a la d'escapament, i depenent de l'orientació, arribarà o no a la magnetosfera provocant en aquest cas, aurores boreals i tempestes geomagnètiques.

El GIF analitzat en aquest segon mètode, correspon al 15 de març de 2013. El 15 de març de 2013, a les 02:54, el sol va entrar en erupció amb una ejecció de massa coronal (CME).

Els Models experimentals de la NASA basats en les observacions de l'Observatori de Relacions Solars i Terrestres (STEREO) i de l'Observatori Solar i Heliosfèric

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

(SOHO), mostren que la CME va sortir de el sol a una velocitat d'uns 900 km/s, velocitat bastant alta per a aquest tipus de fenomen^[35].

Aquesta protuberància va provocar aurores boreals i tempestes geomagnètiques, les quals es van poder observar perfectament des d'Islàndia. (Imatge 65 i 66).





Imatges 65 i 66. Aurores boreals des de Rovaniemi, Islàndia. Les imatges van ser fetes el 17 de març de 2013. Font: <https://www.elblogdefinlandia.com/>

S'han analitzat altres videoclips, i s'han trobat en tots, velocitats mitjanes superiors als 700 km/s.

Es podria esperar, en cas de disposar de mesures més espaiades en el temps, que el moviment d'expansió fos desaccelerat, ja que la força de la gravetat del Sol frenaria les CMES, però no s'ha trobat cap GIF animat adequat per comprovar-ho.

11.5. Conclusions parcials

- Hem observat i realitzat fotografies de la cromosfera solar a través d'un telescopi solar amb filtre H-alfa, tot i que no vam poder detectar cap protuberància. De tota manera, vam contrastar les nostres imatges amb la del SOHO del mateix dia i, tampoc se n'apreciava cap.
- Hem calculat la velocitat inicial de dues ECM a partir de l'estudi d'una imatge i d'un GIF d'una flamarada solar. La v_1 de la primera flamarada és de 365 km/s i, la del GIF, de 858 km/s.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- Hem fet una estimació de la velocitat inicial d'una ECM a partir de l'estudi cinemàtic de l'evolució d'una erupció solar, amb imatges captades pel coronògraf LASCO C2 del SOHO, la qual és de 616 km/s.
- Hem observat una imatge i un GIF del Sol i hem comparat la velocitat de les ECMS amb la d'escapament:
 - En l'estudi de la imatge, la velocitat inicial no supera la velocitat d'escapament, i per tant, la ECM no va arribar a la Terra.
 - En l'estudi del GIF, la velocitat inicial supera la d'escapament, i per tant, la ECM va arribar a la Terra, provocant tempestes geomagnètiques i aurores boreals.

12. Conclusions

1. La recerca bibliogràfica ha possibilitat conèixer l'estructura interna del Sol, així com produeix energia.
2. Hem determinat el període de rotació del Sol a través de l'activitat solar (taques solars). Per determinar-lo, suposarem que el Sol és una esfera perfecta que gira a velocitat constant. En el treball, hem utilitzat el programa Tracker, el qual ens proporciona fer una anàlisi de el vídeo gravat pel Satèl·lit SOHO.

- A causa de la pandèmia, no es va poder fer l'anàlisi de les nostres pròpies imatges. Malgrat tot això, vam continuar la recerca utilitzant imatges antigues del Sol proporcionades pel satèl·lit SOHO. Després d'haver realitzat la pràctica, vam realitzar dues observacions de la fotosfera solar el 7 de juliol i el 14 de novembre de 2020; la primera va ser en una etapa d'activitat solar mínima i, la segona, va ser al principi d'un cicle solar i hi havia una taca.
- S' observa que el moviment de les taques és rectilini amb una direcció paral·lela l'equador.
- S' ha pogut fer experimentalment una estimació el període sinòdic del Sol. El seu valor és:

$$\mathbf{S = (29,4 \pm 1,0) \text{ dies}}$$

- A partir del període sinòdic s' ha calcular el període sideri. El seu valor és:

$$\mathbf{P = (27,2 \pm 1) \text{ dies}}$$

3. Hem realitzat una estimació experimental de la distància del Sol a la Terra a través de la cambra fosca.
- Hem pogut realitzar una estimació de la distància Terra-Sol mitjançant material senzill i al nostre abast. En aquest experiment, una cambra fosca.
 - La distància de la Terra al Sol obtinguda a partir de la utilització d'una cambra fosca és: $(1,5 \times 10^8 \pm 0,1 \times 10^8) \text{ km}$.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

- El percentatge d'error relatiu comés en la determinació de la distància Terra-Sol és d'un 7% aproximadament.
4. Hem realitzat una estimació experimental de la quantitat d'energia calorífica i de la constant solar a través d'un calorímetre.
 - Hem determinat la quantitat d'energia calorífica que rep la Terra procedent del Sol, que correspon a 501 W/m^2 .
 - Hem fet una estimació experimental de la constant solar, la qual és de 791 W/m^2 .
 5. Hem realitzat una estimació de la lluminositat del Sol a través de dues metodologies diferents:
 - La lluminositat del Sol obtinguda a partir de la utilització d'una bombeta és de: $(1,7 \times 10^{26} \pm 0,3 \times 10^{26}) \text{ W}$, amb un error relatiu comés del 55%.
 - La lluminositat del Sol obtinguda a partir de la constant solar és de: $1,4 \times 10^{26} \text{ W}$, amb un error relatiu comés del 63%.
 6. Hem realitzat una estimació de la temperatura absoluta del Sol a partir de llei de la llei de Stefan-Boltzmann:
 - Mitjançant el valor de la lluminositat d'una bombeta, hem determinat que la temperatura de la fotosfera solar és de 4711 K , amb un error relatiu comés del 19%.
 - A partir de la constant solar, hem determinat que la temperatura de la fotosfera solar és de 4488 K , amb un error relatiu comés del 23%.
 7. Hem realitzat una estimació del temps de vida que del Sol estimació experimental del temps de vida del Sol a través de l'equivalència entre massa i energia. Ens ha donat un resultat de **10.045** milions d'anys i, per tant, la vista que li resta al Sol és de **5445** milions d'anys.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

8. Hem realitzat una estimació de la massa del Sol, la qual ens ha donat $1,992 \cdot 10^{30}$ kg, amb un error relatiu del 1%.
9. Hem pogut calcular la intensitat del camp gravitatori del Sol a partir de la seva fórmula, la qual ens ha donat $g = 279 \frac{N}{kg}$, amb un error relatiu del 2%.
10. Hem calculat la velocitat de les ejeccions de massa coronal amb ajuda del programa Tracker:
 - Hem observat i realitzat fotografies de la cromosfera solar a través d'un telescopi solar amb filtre H-alfa, tot i que no vam poder detectar cap protuberància. De tota manera, vam contrastar les nostres imatges amb la del SOHO del mateix dia i, tampoc se n'apreciava cap.
 - Hem calculat la velocitat inicial de dues ECM a partir de l'estudi d'una imatge i d'un GIF d'una flamarada solar. La v_1 de la primera flamarada és de 365 km/s i, la del GIF, de 858 km/s.
 - Hem fet una estimació de la velocitat inicial d'una ECM a partir de l'estudi cinemàtic de l'evolució d'una erupció solar, amb imatges captades pel coronògraf LASCO C2 del SOHO, la qual és de 616 km/s.
 - Hem observat una imatge i un GIF del Sol i hem comparat la velocitat de les ECMS amb la d'escapament:
 - En l'estudi de la imatge, la velocitat inicial no supera la velocitat d'escapament, i per tant, la ECM no va arribar a la Terra.
 - En l'estudi del GIF, la velocitat inicial supera la d'escapament, i per tant, la ECM va arribar a la Terra, provocant tempestes geomagnètiques i aurores boreals.

Un cop acabat el treball, estic molt satisfeta per tot el treball i esforç realitzat i, m'he adonat que, la física és a tot arreu; qualsevol cosa que ens rodeja pot ser estudiada des d'una perspectiva física. M'ha agradat molt realitzar aquest treball pel fet que he après molt i, cada apartat suposava un nou repte i, per tant, l'ambició ha estat constant durant tot el treball. A més, m'ha fet rumiar sobre el fet que totes les

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

ciències estan relacionades; sí que és veritat que és un estudi pròpiament astrofísic però, sense altres ciències com la geologia o la química, no podria haver estat possible. Per tant, no només he après física, sinó que aquest treball m'ha ensenyat en un temari bastant més ampli.

A mesura que s'ha anat fent el treball, amb el seu inici al març de 2020, ens hem trobat amb algunes dificultats. La primera i principal fou que just va començar la pandèmia per la COVID19 i, per tant, vam haver d'ajornar l'observació del Sol i realitzar l'anàlisi de les taques solars amb imatges proporcionades pel SOHO. De tota manera, quan vam poder fer la primera observació del Sol al juliol de 2020, no hi havia activitat solar pel fet que no s'observaven taques a la fotosfera solar i, no disposar d'un telescopi propi amb filtre H-alfa, ens feia dependre de la generalitat.

Una altra dificultat amb la que ens vam trobar va ser a l'hora de realitzar els experiments de la constant solar i el de la lluminositat del Sol. Perquè els experiments sortissin amb la major precisió possible, vam haver de realitzar els experiments al juliol i, com s'havien de realitzar en períodes seguits d'entre 6 i 10 hores durant el dia, era complicat estar tant temps exposat al Sol perquè feia molta calor. Per l'experiment de la lluminositat, com no vam estar entrenats per la sensibilitat de les nostres galtes, hi ha un gran percentatge d'error.

Aquest treball és molt interessant, tot i que, com s'ha de fer en un període de deu mesos, hi han alguns estudis o seguiments que no s'han pogut realitzar i, per aquesta raó, proposem altres línies de recerca:

- Establir una relació entre la constant solar i els cicles solars.
- Estudiar quina relació hi ha entre els cicles solars i el clima de la Terra.
- Estimar la temperatura de la fotosfera solar a partir de l'anàlisi del seu espectre (utilitzant una espectròmetre i la llei de Wein).

13. Agraïments

Aquest és un treball dedicat a l'energia que ens proporciona el Sol, però jo no el podria haver realitzat sense l'energia i la força que m'han donat algunes persones.

Primer de tot i fonamentalment, vull agrair al meu tutor de treball [REDACTED] per guiar-me en aquest meravellós treball i ensenyar-me per què li agrada tant la física, especialment de l'astrofísica i l'astronomia. Sense ell, aquest treball no hauria estat possible.

Seguidament, vull expressar el meu agraïment al Čisko Xavier Benlliure i a l'institut Maria Rúbies de Lleida per deixar-nos els materials necessaris per realitzar una observació del Sol amb diferents metodologies.

També, vull agrair a la meva família pel seu suport incondicional, als meus amics i amigues, al meu professor de repàs Carles Hernández per l'ajuda en el treball i la realització de la imatge 33 i, al meu amic Pol Iglesias per l'ajuda a l'hora de realitzar l'experiment de la lluminositat del Sol. A més, agrair a tots aquells professors i professores i personal no docent que m'han ajudat a estimar cada dia més les ciències i, en especial, la física.

En conclusió, vull donar les gràcies a tothom que ha format part d'aquest trajecte que ha resultat ser un estudi astrofísic del Sol. Moltes gràcies per acompanyar-me, fer-me feliç i recolzar-me quan hi han hagut dificultats. Moltes gràcies!

14. Referències bibliogràfiques

1. Cesar's Booklet: "La estructura del Sol". Disponible a: http://cesar.esa.int/upload/201807/la_estructura_del_sol_booklet.pdf . Pàgina visitada el 19/08/20.
2. "Estructura y composición del Sol". Disponible a: <https://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm> . Pàgina visitada el 19/08/2020.
3. "Medición de la constante solar". Disponible a: <https://studylib.es/doc/5517789/medici%C3%B3n-de-la-constante-solar> . Pàgina visitada el 15/09/20.
4. F.Dahringer, R.C.Gaitzsch: "Luminosity and temperature of the Sun". Disponible a: <https://www.eaae-astronomy.org/workshops/luminosity-and-temperature-of-the-sun> . Pàgina visitada el 15/09/20.
5. J. Miró Ametller: "Paràmetres d'estels". Disponible a: <http://ima.udg.edu/infociencia/Lluminositat.pdf> . Pàgina visitada el 03/09/20.
6. "Constante de Stefan-Boltzmann". Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Stefan-Boltzmann . Pàgina visitada el 03/09/20.
7. "El Sol, Fuente básica de energía". Disponible a: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/el_sol_fuente_basica_de_energia.asp Pàgina visitada el 01/12/20.
8. Á. Velásquez Torres: "¿Cómo produce calor el Sol?" Disponible a: <https://www.eafit.edu.co/ninos/reddelaspreguntas/Paginas/como-produce-calor-elsol.aspx#:~:text=Ahora%2C%20el%20Sol%20est%C3%A1%20compuesto,de%20luz%20y%20m%C3%A1s%20calor> . Pàgina visitada el 01/12/20.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

9. “¿Cuándo morirá el sistema Solar?” Disponible a: <https://www.astromia.com/solar/muertesol.htm> Pàgina visitada el 01/12/20.
10. Laurence Marschall and Glenn Snyder (*CLEA PROJECT, Gettysburg College*) and Jeff Sudol (*GONG Project, National Solar Observatory*). “El periodo de rotación del Sol”. Disponible a: http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/clea_products/manuals/RotacionSolMonterde.pdf Pàgina visitada el 15/04/20.
11. Philippe Kobel, GalileoMobile; María Dasí Espuig, GalileoMobile; Deborah Scherrer, Stanford Solar Center. “Measure the Sun’s rotation period”. Disponible a: <https://astroedu.iau.org/en/activities/1801/measure-the-suns-rotationperiod/EduardTeruel>. Pàgina visitada el 15/04/20.
12. “Determinació del període de rotació solar”. Ús de Geogebra. Disponible a: <https://blocs.xtec.cat/eteruel/2017/11/27/determinacio-del-periode-de-rotacio-solar-us-de-geogebra/> Pàgina visitada el 15/04/20.
13. Stanford Solar Center. “Estimating the Sun’s rotation Rate”. Disponible a: <http://solar-center.stanford.edu/spin-sun/estimate.html> Pàgina visitada el 15/04/20.
14. Arlet Pi, 2016. “Estudi de l’activitat solar a partir de l’ànàlisi de les taques solars”. Disponible a: <http://www.telurium.net/PDF/sequimentsolar.pdf> Pàgina visitada el 15/04/20.
15. SOHO. “Solar and heliospheric observatory”. Disponible a: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html> Pàgina visitada el 15/04/20.
16. SOHO. “Nuevas vistas del Sol”. Disponible a: https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/Presentations/2002all_Sp.pdf
17. “Siguiendo las manchas solares”. Disponible a: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/classroom/docs/ExerSP.pdf>

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

18. *“Large sunspot moving across the Surface- MDI (Mar 27-April 2, 2001)”*.

Disponible a: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/Movies/sunspots.html>

Pàgina visitada el 15/04/20.

19. *“Imatges del Sol”*. Disponible a: <https://solarmonitor.org/> Pàgina visitada el

15/04/20.

20. *“Measuring the motion of a coronal mass ejection”*.

https://sohowww.nascom.nasa.gov/classroom/cme_activity.html Pàgina visitada el

15/04/20.

21. *“Prueba práctica: el sol, una fuente de energía única para el sistema solar”*.

Disponible a: <http://www.ieso-info.org/wp-content/uploads/2015/10/pt-2-spanish.pdf>

Pàgina visitada el 17/07/20.

22. EAAE: *“Luminosity and temperature of the Sun”*. Disponible a: [https://www.eaae-](https://www.eaae-astronomy.org/workshops/luminosity-and-temperature-of-the-sun)

[astronomy.org/workshops/luminosity-and-temperature-of-the-sun](https://www.eaae-astronomy.org/workshops/luminosity-and-temperature-of-the-sun) Pàgina visitada

el 04/10/20.

23. *“How do you calculate the lifetime of the Sun?”* Disponible a:

[http://curious.astro.cornell.edu/about-us/51-our-solar-system/the-sun/birth-death-](http://curious.astro.cornell.edu/about-us/51-our-solar-system/the-sun/birth-death-and-evolution-of-the-sun/167-how-do-you-calculate-the-lifetime-of-the-sun-advanced)

[and-evolution-of-the-sun/167-how-do-you-calculate-the-lifetime-of-the-sun-](http://curious.astro.cornell.edu/about-us/51-our-solar-system/the-sun/birth-death-and-evolution-of-the-sun/167-how-do-you-calculate-the-lifetime-of-the-sun-advanced)

[advanced](http://curious.astro.cornell.edu/about-us/51-our-solar-system/the-sun/birth-death-and-evolution-of-the-sun/167-how-do-you-calculate-the-lifetime-of-the-sun-advanced) Pàgina visitada el 04/10/20.

24. *“Estimating the Sun’s lifetime”*. Disponible a:

[https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=76151§ion=](https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=76151§ion=3.3)

[3.3](https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=76151§ion=3.3) Pàgina visitada el 04/10/20.

25. *“Curso básico de fusión nuclear”*. Disponible a:

[http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-](http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-CBFN-version_digital.pdf)

[CBFN-version_digital.pdf](http://www.jovenesnucleares.org/blog/wp-content/uploads/2017/10/Libro-JJNN-CBFN-version_digital.pdf) Pàgina visitada el 04/10/20.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

26. Mark Tiele Westra, 2006. *"Fusion in the Universe: the power of the Sun"*.

Disponible

a:

https://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserPdf/issue3_fusion.pdf

Pàgina visitada el 04/10/20.

27. Rafael Bachiller. El Sol: Nuestra estrella, nuestra energia. Disponible a:

<http://astronomia.ign.es/rknowsys->

[theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/elsolnuestraestrella.pdf](http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/elsolnuestraestrella.pdf)

Pàgina visitada el 04/10/20.

28. David Galadí y Jordi Gutiérrez, 2001. *"Astronomía General"*. Página 650.

Editorial Omega.

29. Protuberància solar. Disponible a:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fsoho.nascom.nasa.gov%2Fgallery%2Fimages%2Fsuperprom.html&psig=AOvVaw1gcEC2W7G6Wbe39-erXnWw&ust=1608571957439000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCMirjNOL3e0CFQAAAAAdAAAAABAD> Pàgina visitada el 17/12/20.

30. Programa Tracker video analysis and modeling tool. Disponible a:

<https://physlets.org/tracker/> Pàgina visitada el 17/12/20.

31. *"Medición del movimiento de una eyección de masa coronal"*. Disponible en:

<https://pwg.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/cmeposter/spmeasure.html>

32. GiF animado de una CME. Consultado el 17/12/2020. Disponible en:

<https://earthsky.org/upl/2013/03/m1cme_anim.gif Pàgina visitada el 17/12/20.

33. Guerrero Vásques Maribel S. 2014. *"Eyecciones coronales de masa solar a una unidad astronòmica"*. Disponible a:

https://www.researchgate.net/publication/301610427_Eyecciones_coronales_de_masa_solar_a_una_unidad_astronomica Pàgina visitada el 17/12/20.

ESTUDI ASTROFÍSIC DEL SOL

34. CurveExpert. Disponible a:
[CurveEXperthttps://es.freownloadmanager.org/Windows-PC/CurveExpert.html](https://es.freownloadmanager.org/Windows-PC/CurveExpert.html)
Pàgina visitada el 17/12/20.

35. “Eyección de tormenta solar impactó la Tierra el 17 de marzo de 2013”.
Disponible a: <https://www.fayerwayer.com/2013/03/eyeccion-de-tormenta-solar-impacto-la-tierra-el-17-de-marzo-de-2013/> Pàgina visitada el 03/01/21.

15. Annexes

15.1. Annex 1. Muntatge de la cambra fosca.

1. Introducció

Aquest annex està destinat al muntatge de la cambra fosca, la qual ens permet determinar experimentalment el diàmetre del Sol.

2. Utiltatge

- Cartolina negra (mínim dimensions 50 x 65cm)
- Plànol de referència
- Pegament (de barra, silicona freda o calenta, etc)
- Tisores
- Llapis
- Compàs
- Joc de regles
- Objectes de punxa fina i afilada
- Paper vegetal

3. Procediment

- Segueix les indicacions i les mesures del plànol de referència.
- Un cop tinguis totes les figures retallades, posa pegament a les pestanyes per on s'han d'enganxar la figura.
- Respecte les tires, fes cercles de diferents mides. Pels de mida mitjanament grans, ajuda't d'un compàs. En canvi, pels de mida petita, utilitza un objecte de punta fina i afilada com per exemple un agulla de cosir.
- Quan hagis acabat el muntatge, comprova si la teva cambra fosca funciona orientant-la cap al sol.



Imatge 67. Cambra fosca.

4. Plànol de la cambra fosca

