



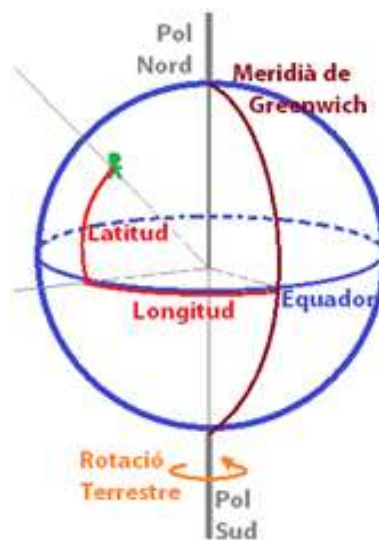
Universitat  
de Lleida



Universitat de Lleida  
Institut de Ciències  
de l'Educació

# Introducció a l'astronomia

Andreu Arbó Trabado





## Autor

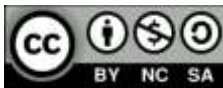
Andreu Arbó Trabado – [aarbo@xtec.cat](mailto:aarbo@xtec.cat)

## Resum

Introducció al món científic de l'astronomia. Fora de la divulgació astronòmica, aquests apunts serveixen per introduir-nos en aquest món amb l'ajuda d'eines matemàtiques, físiques i lògica.

## Context

Nivell educatiu recomanat: A partir de 4t de secundària.



Els textos i gràfics publicats en aquests materials estan subjectes a una llicència Creative Commons. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

## Amb el suport de:



Universitat de Lleida  
Vicerectorat d'Estudiants



Generalitat de Catalunya  
Departament  
d'Ensenyament

## Índex

<b>Introducció</b>	<b>pàgina 5</b>
<b>La volta celeste</b>	<b>pàgina 6</b>
<b>Breu història de l'astronomia</b>	<b>pàgina 9</b>
<b>Temps sideri</b>	<b>pàgina 14</b>
<b>Introducció de coordenades a l'esfera celeste</b>	<b>pàgina 17</b>
<b>Moviment aparent del sol</b>	<b>pàgina 19</b>
<b>Calendaris</b>	<b>pàgina 24</b>
<b>Precessió dels equinoccis</b>	<b>pàgina 27</b>
<b>Relotges de sol</b>	<b>pàgina 29</b>
<b>Moviment aparent del sol i dels planetes</b>	<b>pàgina 33</b>
<b>La lluna</b>	<b>pàgina 37</b>
<b>Distàncies</b>	<b>pàgina 40</b>
<b>Les galàxies i la via làctia</b>	<b>pàgina 46</b>
<b>Com és l'univers?</b>	<b>pàgina 47</b>
<b>Models cosmològics</b>	<b>pàgina 53</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>pàgina 55</b>

## Introducció

Aquests apunts són una introducció a l'astronomia en general. Ens centrarem sobretot amb aspectes de localització d'objectes astronòmics i càlculs essencials de l'astronomia. No obstant això, en els últims punts tracten les teories de l'astronomia moderna.

L'astronomia no només tracta dels planetes, localitzar objectes estel·lars... també tracta de temes tan importants com el temps, la possibilitat de sobrepassar les fronteres físiques de l'espai, com fer funcionals els nostres aparells de comunicació... Tot el que la imaginació pugui tractar de l'univers i l'espai, l'astronomia ho contempla i ho estudia.

Molts apunts d'introducció a l'astronomia intenten deixar bocabadat el lector, però sense ajudar-lo a entendre res. Aquests apunts no parlen de túnels de cucs, de forats negres massius... En aquests apunts donarem la base per entendre conceptes complicats i així assolir un nivell més sòlid que aquells que simplement divulguen dades espectaculars.

Cal mencionar que la física i la matemàtica són les bases de l'astronomia, sense elles l'astronomia no podria haver avançat. Aleshores, caldria també estudiar aquestes dues ciències per comprendre-ho tot.

Bé doncs, comencem?

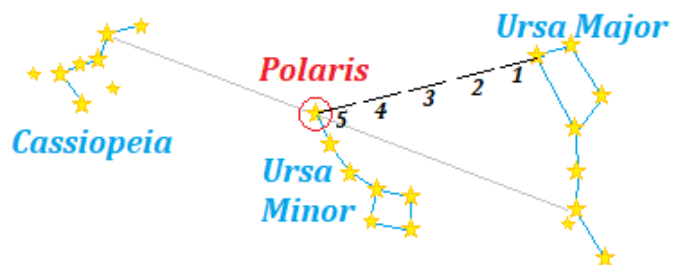
## La volta celeste

### Dues posicions importants

Abans de començar a explicar res hem de sortir i mirar al cel per localitzar uns punts importants per l'astronomia. Aquests punts vindran acompanyats de tres constel·lacions també molt importants (ja veurem que una constel·lació és un conjunt d'estrelles que formen una figura al cel).

- El primer punt és l'**estrella polar** (*Polaris*). Aquesta estrella, tot i ser molt petita, es pot veure fàcilment sense ajuda de cap aparell. Es troba a la cua de l'**Osa Menor** (*Ursa Minor*); però malauradament aquesta constel·lació és molt petita i té poca lluminositat.

Per tant com la podem localitzar? Tenim dues opcions (sempre és visible al mínim una de les dues opcions). En els dos casos haurem de mirar cap al nord.

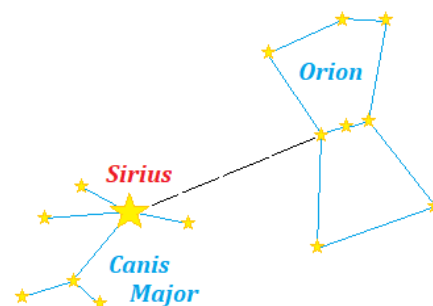


1 - Constel·lacions importants

La primera opció és buscar la constel·lació de l'**Osa Major** (*Ursa Major*) anomenada també *el Carro*. Es troba a l'est mirant al nord. Doncs l'estrella polar es troba cinc cops la distància que separa les dues estrelles de l'extrem superior d'aquesta constel·lació.

La segona forma de trobar-la és buscar **Cassiopea** (*Cassiopea*). Aquesta constel·lació forma una doble ve al cel i està cap a l'oest però molt a prop del nord. L'estrella polar es troba en línia recta a la recta que formen les dues estrelles de l'esquerra de Cassiopea.

- L'altre punt important és l'estrella més brillant del firmament (l'estrella més brillant, no pas l'objecte més brillant). Aquesta estrella és **Sírius**, la podem localitzar al oest de la constel·lació d'**Orió** (*Orion*), just en línia recta al cinturó d'Orió.



2- Estrella més brillant (Sírius)

## La volta celeste

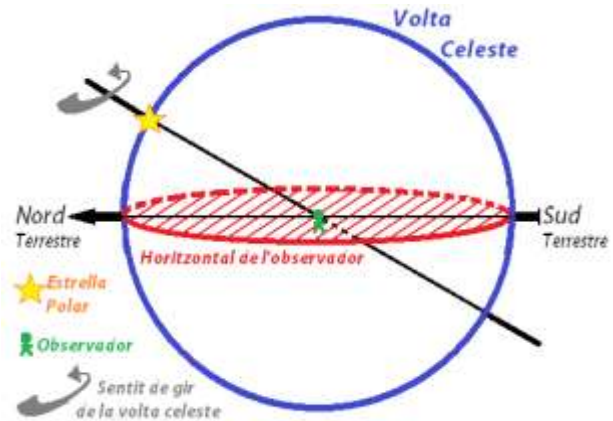
Fixem-nos en el cel al llarg de la nit. Podràs observar que a poc a poc la majoria de les estrelles es van movent uniformement com si totes estesen enganxades en una esfera molt gran.

Aquesta esfera no real s'anomena **volta celeste**. Tot i no existir, la volta celeste, ens serveix de gran ajuda per comprendre el funcionament de tot plegat. Per definir-la bé, podem dir que

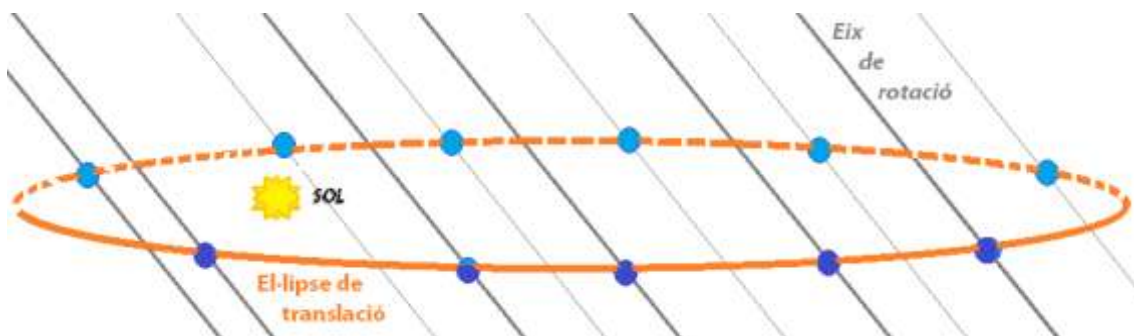
la volta celeste és una esfera imaginària de radi infinit, centre l'observador i amb un eix de rotació que passa pel centre de l'esfera i un punt molt pròxim a l'estrella Polar. Totes les estrelles estan "enganxades" a la bora d'aquesta esfera (per això s'anomenen les estrelles fixes).

La rotació d'aquesta esfera és d'oest a est. Podem observar que l'estrella polar és aproximadament un punt fix; és a dir, que la *Polaris* no es mou mai del seu lloc. Tenir un punt fix és molt bo per poder localitzar altres estrelles i objectes.

On es troba exactament aquest punt fix? Com hem dit, la volta celeste gira al voltant d'un eix de centre l'observador. Aquest eix és el mateix que l'eix de rotació de la Terra.



3 - Volta celeste



4 - On apunta la rotació terrestre = Polaris

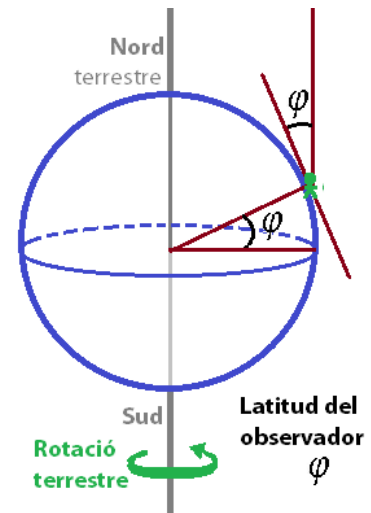
L'eix de rotació terrestre és invariant respecte a la translació (la translació és el moviment de la Terra al voltant del Sol). Si fem tendir a infinit totes les rectes de l'eix al llarg de tota una translació, podem veure que tots tallen a un punt pròxim a l'estrella

Polar cap al nord; exactament aquest és el punt fix de la volta celeste. També podríem veure que en el sud totes les rectes interaccionen a un punt.

**Incís:** Les estrelles es van movent, no només sobre l'esfera celeste, sinó que la posició entre estrelles varia, més endavant explicarem com i perquè es mouen. Així doncs, no sempre hi ha estrelles que assenyalin els punts fixos.

L'estrella polar s'està acostant actualment al pol celeste; al punt fix. En canvi a l'hemisferi sud no existeix, actualment, cap estrella que ens guïï on està aquest punt fix, no obstant no vol dir que en el futur n'hi hagi alguna.

**Incís:** Sabem tots que per localitzar un punt a la terra ens fa falta la latitud i la longitud. Doncs fixem-nos que la latitud terrestre d'un observador és l'angle d'inclinació de la Polar respecte l'horitzontal de l'observador. És a dir, si ens trobem a una latitud  $\varphi = 41^{\circ}30'$  trobarem l'estrella polar mirant al nord i elevada a  $41^{\circ}30'$  des de l'horitzó (des del terra).



5 - Latitud = Angle inclinació Polaris

## Breu història de l'astronomia

### Les antigues civilitzacions

El moviment aparent de les estrelles ha portat l'ésser humà a explicar-ho amb teories complicades i extreure conclusions molts cops absurdes. No obstant això, en cada moment de l'història foren assumides com a certes.

Els antics egipcis ja van observar el moviment cíclic de les estrelles i les constel·lacions. Per posar un exemple, s'especula que les piràmides dels faraons estan en la posició exacta de les estrelles que hi ha al cinturó d'Orió en aquella època.



6 - Especulació piràmides i Orió

A més, els egipcis ja van predir l'aproximació de l'any en dies.

No obstant això, no van poder donar explicació als eclipsis, ni als cometes; i donaven aquests fets una explicació teològica.

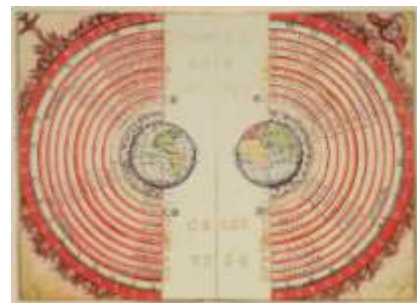
Fou sobretot a Babilònia, una ciutat fundada fa cinc mil anys a la riba d'Eufrates, on l'astronomia va conèixer el seu moment de glòria, ja que els babilonis sabien predir els moviments del Sol, de la Lluna i dels planetes que llavors coneixien. Empraven un calendari lunar, al qual afegien dies per fer-lo coincidir amb l'any solar.

L'aportació dels romans a l'astronomia va ser més aviat escassa, però gràcies a Juli Cessar i els tractes amb la dinastia d'Egipte i Cleòpatra, va poder recopilar molta informació i dades dels anys solars i així incorporar els anys de traspàs.

### Els grecs. Concepció aristotèlica de l'univers

A l'època grega la volta celeste era un fet indiscutible; així doncs, les estrelles estaven enganxades a la bora d'una esfera gegant de vidre.

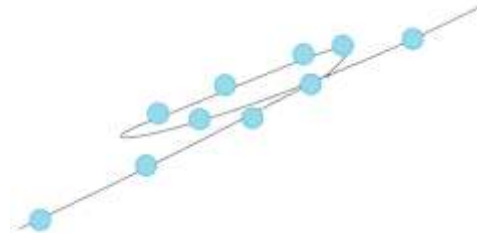
A més d'aquesta esfera existien d'altres. Els grecs van poder explicar el moviment aparent dels planetes gràcies a més esferes. S'ha de dir que planeta en grec significa errant, i exactament per ells això eren;



7 - Univers Aristotèlic

[https://en.wikipedia.org/wiki/Geocentric\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Geocentric_model)

els planetes eren estrelles que es movien erradament en el firmament. Això vol dir que no es movien com les altres estrelles, hi havia moments que les seguien, es paraven, tiraven endarrere i tornaven a moure's normal. Per això van deduir que els planetes es movien sobre altres esferes.



8 - Moviment aparent Venus (esquema)

Els planetes coneguts en aquella època eren Mercuri, Venus, Mart, Júpiter i Saturn (visibles a simple vista). Tots ells tenien explicacions teològiques pels colors o l'aparició propera al Sol.

Així doncs, la majoria dels grecs opinaven que la Terra estava al centre de l'univers, les estrelles a la bora de l'esfera celeste i el Sol, la Lluna i els cinc planetes coneguts tenien cada un d'ells una esfera independent de la de les estrelles fixes; *i.e.* al voltant de la Terra existien vuit esferes concèntriques.

## L'edat mitjana

L'astronomia grega es va transmetre cap a l'Est als sirians, indis i àrabs després de la caiguda de l'Imperi Romà. Els astrònoms àrabs van recopilar nous catàlegs d'estrelles en els segles IX i X, i van desenvolupar taules del moviment planetari. L'astrònom àrab Azarquiel, màxima figura de l'escola astronòmica de Toledo del segle XI, va ser el responsable de les Taules toledanes, que van influir notablement a Europa.

L'any 1085, any de la conquesta de la ciutat de Toledo pel rei Alfonso VI, es va iniciar un moviment de traducció de l'àrab al llatí, que va despertar l'interès per l'astronomia (entre altres ciències) a tot Europa. Durant aquest llarg període, a Europa, va "dominar" la teoria de Ptolomeu, el geocentrisme.

No es va presentar cap desenvolupament important a l'astronomia (i a la majoria de ciències) sobretot pel temor d'oposar-se a les lleis establertes per la inquisició.



9 - Teoria Ptolomeu

[https://es.wikipedia.org/wiki/Materialismo\\_eliminatorio#/media/Archivo:Cellarius\\_ptolemaic\\_system.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Materialismo_eliminatorio#/media/Archivo:Cellarius_ptolemaic_system.jpg)

Al segle XV van començar a sorgir dubtes sobre la teoria de Ptolomeu: el filòsof i matemàtic alemany Nicolau de Cusa, i l'artista i científic italià Leonardo da Vinci van qüestionar els supòsits bàsics de la posició central i la immobilitat de la Terra. Havia començat el Renaixement.

## El renaixement

El 1492 es va descobrir Amèrica, fet que va comportar el creixement de la navegació, i per això va haver-hi un creixement en la creació de millors instruments navals, i en les tècniques de cartografia terrestre i estel·lar. Tot això va significar un important estímul per a l'estudi de la geografia, l'astronomia i les matemàtiques.

Al començament del segle XVI, la volta al món de Magallanes va aportar la prova definitiva que la terra és esfèrica. En canvi, la gent, encara creia que el seu planeta es trobava al centre de l'univers.

No fou fins 14 segles més tard de Ptolomeu que, en el 1543, Nicolau Copèrnic va fer un canvi radical i un nou impuls per la ciència que estava adormida. Copèrnic va analitzar críticament la teoria de Ptolomeu; la d'un Univers geocèntric, i va demostrar que els moviments planetaris es poden explicar atribuint-los una posició orbital d'un centre que era el Sol, no pas de la Terra.

Al principi no es va donar gaire importància al sistema de Copèrnic, el heliocentrisme, sobretot perquè no el va publicar fins que va estar a les portes de la mort (tot pel temor a la inquisició). Cal mencionar, que al segle III a.C., Aristarc de Samos ja havia proposat aquest model, però es va rebutjar per la poca "lògica" d'aquell moment.

Aquesta incredulitat del sistema heliocèntric va acabar-se quan a Holanda es va inventar el telescopi per Galileu.

Galileu va construir un petit telescopi de refracció, el va enfocar cap al cel i va descobrir les fases de Venus, que indicava que aquest planeta girava al voltant del sol. També va descobrir quatre llunes girant al voltant de Júpiter.



10 - Nicolau Copèrnic

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Nicolaus\\_Copernicus.\\_Reproduction\\_of\\_line\\_engraving\\_after\\_J.\\_Wellcome\\_V0001267.jpg](https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Nicolaus_Copernicus._Reproduction_of_line_engraving_after_J._Wellcome_V0001267.jpg)

Des del punt de vista científic la teoria de Copèrnic només era una adaptació de les òrbites planetàries, tal com veia Ptolomeu.

Un dels últims astrònoms que pensava que la Terra era al centre de l'univers va ser Tycho Brahe, l'astrònom del rei de Dinamarca. Va ser l'observador més important del segle XVI, que tenia el do de l'observació i els diners necessaris per construir els equips més avançats i precisos de la seva època.

Però el fet més transcendent del Renaixement no van ser aquests descobriments, sinó el canvi d'actitud i mentalitat en els científics. L'experimentació va començar a fer-se filosòficament respectable a Europa, i va ser Galileu qui va acabar amb la teoria dels grecs i va efectuar la revolució (no sense posar la seva vida en risc, doncs va haver de passar per un tribunal de la inquisició, abdicar de la seva teoria i es va veure obligat a viure fins els seus últims dies tancat a casa seva).

Galileu va ser el primer a realitzar experiments cronometrats i en utilitzar la mesura d'una forma sistemàtica. La seva revolució va consistir a situar la inducció per sobre de la deducció, com el mètode lògic de la ciència.

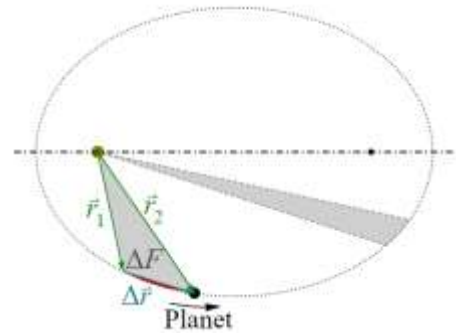
## De Kepler a Newton

Utilitzant les dades recopilades per Brahe, el seu ajudant, Johannes Kepler, va formular les lleis del moviment planetari, afirmant que els planetes giren al voltant del Sol i no en òrbites circulars amb moviment uniforme, sinó en òrbites el·líptiques a diferents velocitats, i que les seves distàncies relatives pel que fa al Sol estan relacionades amb els seus períodes de revolució.

Després de provar, sense èxit, amb infinitat de formes geomètriques "perfectes", ho va intentar amb variacions del cercle. Aquest experiment ja va ser fet per Hipàtia, gran filòsofa d'Alexandria i filla del matemàtic-filòsof Teò. Els seus escrits van ser cremats i destruïts després de ser assassinada. Però altres filòsofs van escriure sobre ella i defensava una idea de Terra esfèrica, que no estava al centre de l'univers i que els planetes (inclosa la Terra) giraven entorn del Sol amb òrbites no perfectes (*i.e.* el·líptiques).

Les lleis de Kepler, demostrades no tan sols empíricament sinó que també matemàticament des del segle XIX amb el descobriment del càlcul de derivades, es poden resumir així:

- Els planetes giren al voltant del Sol en òrbites el·líptiques. I el Sol és un dels focus.
- Els planetes i el Sol escombren àrees iguals en temps iguals.
- El cub de la distància mitjana de cada planeta al Sol és proporcional al quadrat del temps que triga a completar una òrbita.



11 - Lleis de Kepler (1 i 2)

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Kepler\\_second\\_law\\_diagram.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Kepler_second_law_diagram.svg)

Però la victòria de la ciència moderna no va ser completa fins que es va establir un principi més essencial: l'intercanvi d'informació lliure i cooperació entre els científics.

És aquest canvi, i l'evolució de les matemàtiques sobre la física, que van aportar el canvi de l'astronomia clàssica a l'astrofísica, la relativitat, la quàntica... Però aquests temes surten d'aquests apunts d'introducció a l'astronomia.

## Temps sideri

**Incís:** Fem un experiment: localitzem una estrella qualsevol. Int entem fixar el punt exacte on es troba a una hora fixada; per exemple *Sírius* i fixem el “meridià” del cel per on passa avui a les 23h. Doncs bé, demà passarà aproximadament quatre minuts abans per aquell “meridià”.

**Definició:** Definim un **dia sideri** com l'interval de temps entre dos passos consecutius d'una determinada estrella pel mateix meridià.

Igual que el nostre dia, un dia sideri té 24h, cada hora té 60' i cada minut té 60''...

Aleshores, pel que hem pogut comprovar empíricament, un dia sideri dura quatre minuts menys, aproximadament, que un dia normal.

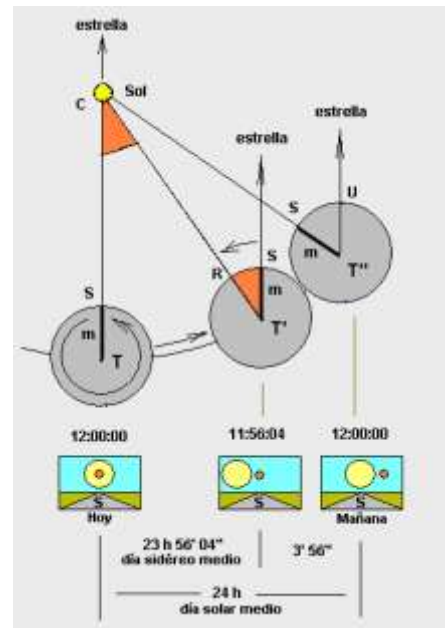
**Dada:**  $1 \text{ dia sideri} \cong 23\text{h } 56' 4,0954''$ . És a dir, un rellotge sideri corre més ràpid que un “rellotge normal”.

- Això ens porta a qüestionar-nos: Quina és l'hora 0 sidèria?

Per fixar l'hora 0 sidèria s'ha de fixar primer de tot una estrella i el meridià de l'observador. Un cop fixats aquests dos paràmetres, quan l'estrella passa pel meridià s'inicia el dia sideri un altre cop.

Aleshores, cada meridià té una hora zero sidèria diferent (igual que en cada meridià terrestre el dia comença en una hora diferent, tot i començar a les 12 de la nit en tots; per exemple a Canàries les 12 són la 1 d'aquí).

Però quina estrella o objecte s'agafa com a origen? Doncs curiosament no s'agafa cap estrella, s'agafa un punt que ja explicarem com es localitza. Aquest punt s'anomena punt àries;  $\Upsilon$ . Així doncs, quan aquest punt àries passa pel nostre meridià inicia el dia sideri un altre cop.



12 - Dia sideri VS solar

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Tiem\\_po\\_sid%C3%A9reo.png](https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Tiem_po_sid%C3%A9reo.png)

**Dada:** El 31/12/2008 a les 24h de temps universal eren les  $6h\ 39'\ 9,766''$  de temps sideri en el meridià de Greenwich (passat a decimal:  $6,652713h_S$ ).

La relació que hi ha entre sideri i temps mitjà solar és:

$$1 h_{TEMPS-SOLAR} \simeq 1,00273790943 h_{SIDERIES}$$

**Incís:** Des d'ara anomenarem  $h_{TU}$  a les hores de temps universal,  $h_{TS}$  a les de temps solar i  $h_S$  a les sidèries; ja veurem les diferències entre aquests temps més endavant.

**Exemple:** Amb les dades anteriors, quina hora sidèria va ser el 4/3/2009 a les 13h a Greenwich?

Contem els dies que hi ha des de la data donada fins la que volem calcular:

$$\left. \begin{array}{l} 31 \text{ dies gener} \\ 28 \text{ dies febrer} \\ 4 \text{ dies de ,març} \end{array} \right\} \rightarrow 63 \text{ dies} \rightarrow \text{Passem-ho a hores i sumem-li les } 13h \text{ corresponents:}$$

$63 \text{ dies} \cdot 24 \text{ h/dia} + 13h = 1525 \text{ h} \rightarrow \text{Passem-ho a sideris}$

$$1525 h_{TU} \cdot \frac{1,0027 \dots h_S}{1 h_{TU}} \simeq 1529,175311 \dots h_S$$

Sumem les  $6,652713 h_S \rightarrow 151535,828024 \dots h_S$ . Passem-ho a dies (fent una divisió exacta, sense decimals).

$151535,828024 \dots h_S \rightarrow 1512 h_S = 63 \text{ dies}_S$  Aleshores el 4/3/2009 a les 13h a Greenwich seran les  $23h\ 49'\ 40,89''_{sideris}$ .

**Exemple:** Amb l'exemple anterior, quin temps sideri serà a longitud est de  $2^\circ 6' 26,78''$ ?

Passem els graus a hores sabent que per fer un dia sideri la volta celeste fa tota una volta ( $360^\circ$ ).

$$2^\circ 6' 26,784'' \cdot \frac{24 h_S}{360^\circ} = 0,140496 h_S \rightarrow 8' 25,78'' \text{ sideris}$$

Com que la volta celeste va d'oest a est, aquests minuts els hem de sumar. Aleshores el dia 4/3/2009 a les 13h a la longitud est de  $2^\circ 6' 26,784''$  serà  $23h\ 58' 6,678''_S$ .

**Incís** : Podem trobar per internet o bé als nostres mòbils moltes pàgines i apps que calculen directament el temps sideri, però va bé saber com es calcula. Així reforcem el nostre aprenentatge amb factors de conversió (el que vulgarment anomenem “regles de tres”).

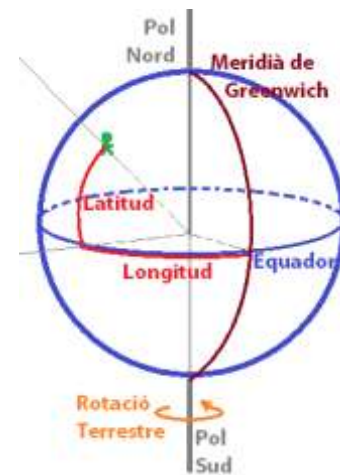
## Introducció de coordenades a l'esfera celeste

### Recordem: latitud i longitud de la terra

**Definició:** L'**equador** de la terra és la circumferència creada per la intersecció de l'esfera terrestre amb el pla que passa pel centre de la Terra i és perpendicular a l'eix que va des del pol nord al pol sud geogràfics.

**Definició:** Un meridià és qualsevol semicircumferència sobre l'esfera terrestre que va des del pol nord al pol sud.

**Definició:** S'agafa per conveni com a punt d'origen de coordenades a la Terra el punt que es troba a l'equador i passa pel meridià de Greenwich.



13 - Longitud / Latitud

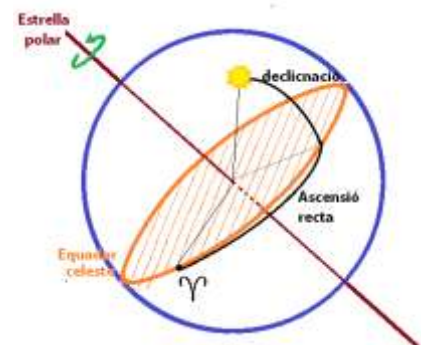
Per localitzar un objecte o lloc a la terra només et fa falta donar dues coordenades, aquestes coordenades s'anomenen:

- **Latitud:** La latitud va de nord a sud des de l'equador. Cada angle cap al nord és un grau positiu i cada grau cap al sud és negatiu.  $Latitud \in [-90^\circ, 90^\circ]$  (*Nord//Sud*).
- **Longitud:** La longitud va d'est a oest iniciant el seu càlcul des de Greenwich. Cada angle cap a l'oest és un angle positiu.  $Longitud \in [0, 180]$  (*Est//Oest*).

### Coordenades a l'esfera celeste

Com ja hem comentat, agafarem com a origen un punt anomenat punt àries,  $\Upsilon$ . Per poder saber on es troba un objecte en una esfera fa falta dos punts, igual que a la Terra. Aleshores per localitzar un objecte a l'esfera celeste definim:

- **Ascensió recta:** És la longitud en l'esfera celeste, i es mesura en temps sideri. És l'hora sidèria local que marca el rellotge de temps sideri de l'observador quan l'estrella passa el meridià. Es simbolitza amb  $\alpha$ .



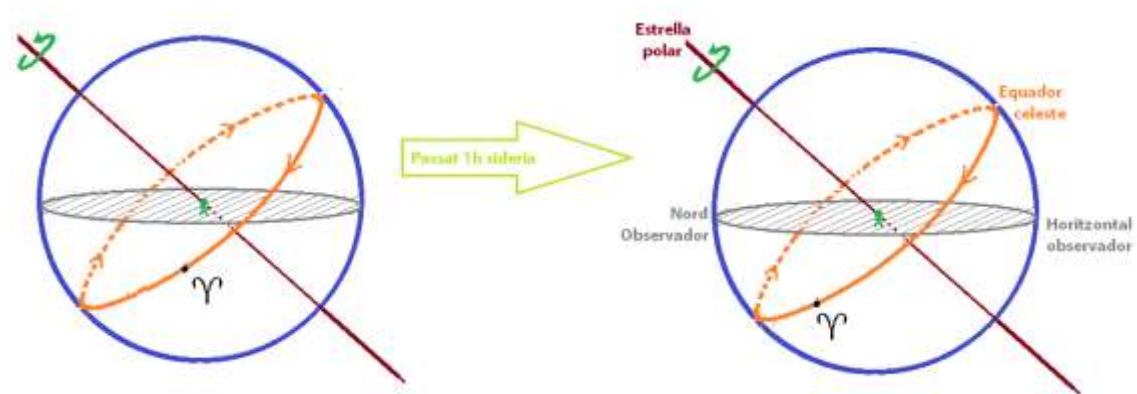
14 - Coordenades esfera celeste

- **Declinació:** És la latitud en l'esfera celeste i es mesura en graus. Es simbolitza amb  $\delta$ .

L'ascensió recta augmenta en direcció est (a mesura que van passant les hores sidèries). L'equador celeste no té perquè coincidir amb l'horitzontal de l'observador.

**Incís:** Cal destacar l'existència d'"anuaris astronòmics" per localitzar planetes.

Observem que passa transcorreguda una hora sidèria:



15 - Moviment després d'1 hora sidèria

Així doncs, repetim que l'ascensió recta,  $\alpha$ , coincideix amb l'hora sidèria de l'observador al moment que l'estrella travessa el meridià de l'observador.

**Exemple:** El dia 26/2/2009 Saturn va passar a les  $0 h_{TU}$  :  $\begin{cases} \alpha = 11h 25'58,227'' \\ \delta = +6^{\circ}19'680'' \end{cases}$ .

Aleshores, a quina hora de temps universal passarà Saturn pel nostre meridià?

Suposem que estem al meridià dels exemples anteriors,  $2^{\circ}6'26,784'' Est$ . Per tant l'hora sidèria local que passarà Saturn és  $11h_S 23'58,227''$ .

Passem-ho a temps universal:

$$11h_S 23'58,227'' \cdot \frac{23,9346959 \dots h_{TU}}{24 h_S} = 11,270043 \dots h_{TU}$$

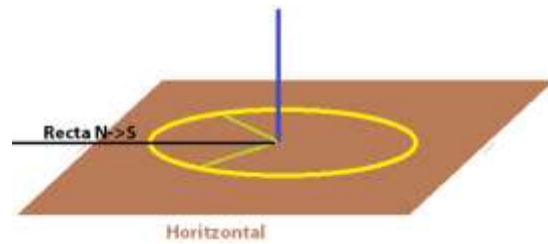
Aleshores a les  $11h 22'12,15 \dots''$  Saturn va passar pel nostre meridià.

**Incís:** L'any 1930 es va decidir dividir l'esfera celeste en les 88 constel·lacions actuals. Cada constel·lació té assignada una regió de l'esfera (no totes amb la mateixa àrea).

## Moviment aparent del sol

**Experiment:** Anem a realitzar un experiment. Anem a localitzar la recta  $N \rightarrow S$  (Nord - Sud) al pla horitzontal. Una brúixola no ens serveix, no és exacta; ella ens indica el nord magnètic de la Terra i no pas el pol nord celest.

Primer de tot, alcem una recta perpendicular al terra horitzontal. Marquem la seva ombra a una certa hora. Retirem la recta perpendicular, i tracem una circumferència de radi l'ombra que hem marcat, i amb centre el punt on estava la recta perpendicular.



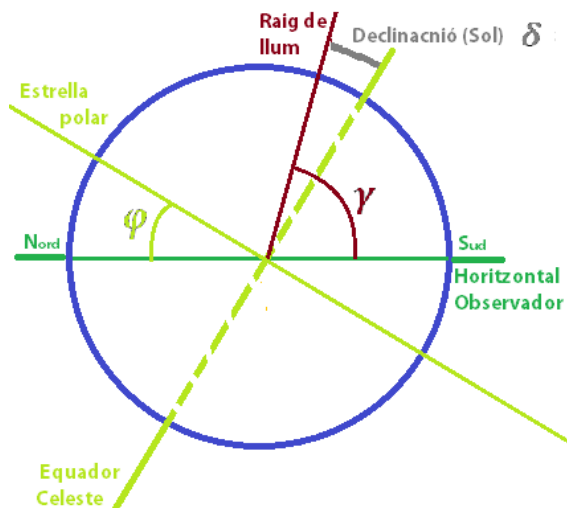
16 - Trobar el nord amb el Sol

Tornem a posar el pal perpendicular, i mirem com poc a poc l'ombra es va movent. En el precís moment que l'ombra torni a tocar la circumferència marquem una nova marca.

Trèiem el pal i amb les dues marques cerquem la bisectriu. Aquesta bisectriu és la recta  $N \rightarrow S$ .

**Incís:** En el moment que l'ombra del pal passa per la recta  $N \rightarrow S$  el Sol passa pel nostre meridià.

**Proposició:** Per saber la declinació,  $\delta$ , podem buscar l'angle que forma el raig de llum en l'instant que el sol passa pel meridià i fer el següent càlcul  $\delta = \varphi + \gamma - 90^\circ$  on  $\varphi$  és la nostra latitud i  $\gamma$  l'angle que forma el raig de llum del Sol.



17 - Com saber la declinació

## L'eclíptica

Definim com **eclíptica** la circumferència que recorre el Sol en un any sobre l'esfera celeste. Aquesta circumferència talla l'esfera celeste pel centre, per tant, és una circumferència màxima.

L' inclinació aproximada de l'eclíptica respecte l'equador celeste és de  $23,44^\circ$ .

Observem que l'eclíptica intersecciona amb l'equador celeste en dos punts.

- El primer punt és quan el Sol passa de l'hemisferi sud celeste al nord.
- El segon, és quan passa del nord al sud.

Així doncs, definim el **punt àries**,  $\Upsilon$ , com el punt d'intersecció entre l'equador celeste i l'eclíptica quan el Sol passa de l'hemisferi sud a l'hemisferi nord. Com que està a l'equador la seva declinació és  $\delta = 0^\circ$  i com que té també ascensió recta  $\alpha = 0$  obtenim que efectivament el punt àries és l'origen de coordenades en la volta celeste.



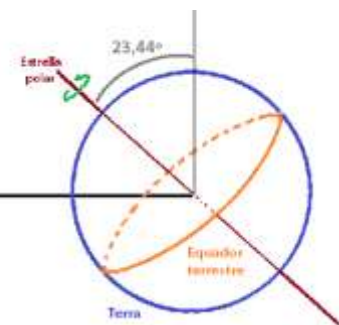
18 - Eclíptica

**Incís:** La primavera comença a l'hemisferi nord i la tardor a l'hemisferi sud quan el Sol passa pel punt àries. L'any relacionat amb les estacions s'anomena **any tròpic** i és defineix com el període de temps del Sol que recorre l'eclíptica des del punt àries fins un altre cop aquest punt.

Podríem calcular la durada de l'any i més concretament determinar l'entrada de les estacions.



L'eclíptica està amb un angle de  $23,44^\circ$  com ja hem dit, aproximadament.



19 - Any tròpic

## Les estacions del any

L'eclíptica té quatre punts importants, els dos punts de tall amb l'equador celeste i també el seu màxim i mínim. Així, es defineix:

- La **primavera** com l'interval que va des del punt àries fins el màxim punt de l'eclíptica.
- L'**estiu** com l'interval de temps que va des del punt més alt al segon punt de tall amb l'equador celeste.

- La **tardor**, l'interval quan l'eclíptica està al sud de l'esfera celeste i va fins el mínim.
- L'**hivern** és l'interval de temps on l'eclíptica ve des del mínim fins al punt àries.

Aquests quatre punts importants que defineixen l'inici o final d'una estació reben el següent nom:

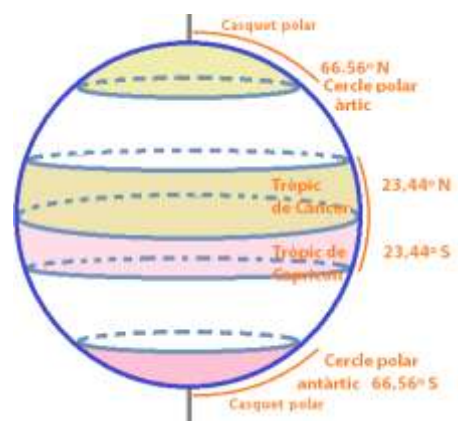
- **Equinocci de primavera**: quan comença la primavera. Quan l'eclíptica talla el punt àries.
- **Equinocci de tardor**: quan comença la tardor. Quan l'eclíptica està oposada al punt àries.
- **Solstici d'hivern**: quan comença l'hivern. Quan l'eclíptica assoleix el seu mínim.
- **Solstici d'estiu**: quan comença l'estiu. Quan l'eclíptica assoleix el seu màxim.

Observem que depenent de l'hemisferi on es troba l'observador serà un solstici o l'altre; i el mateix amb els equinoccis.

## El Sol en els diferents indrets de la terra

Ara cal definir uns indrets a la terra que ens marca l'eclíptica.

- **Cercle polar àrtic**: és la zona de la terra que està a  $66,56^\circ N$  (fixat  $66,56^\circ = 90^\circ - 23,44^\circ$ ). La zona que va des del pol nord fins al cercle polar àrtic s'anomena **casquet polar àrtic**.
- **Cercle polar antàrtic**: és la zona de la terra que està a  $66,56^\circ S$ . La zona que va des del pol sud fins al cercle polar antàrtic s'anomena **casquet polar antàrtic**.
- **Tròpic de Càncer**: és la zona de la terra que està a  $23,44^\circ N$ .
- **Tròpic de Capricorn**: és la zona de la terra que està a  $23,44^\circ S$ .



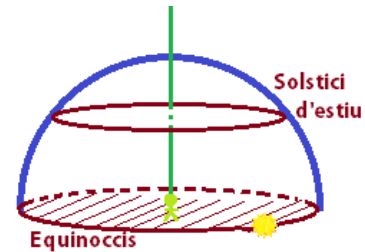
20 - Divisió terra segons eclíptica

**El Sol des del pol nord/pol sud**: Quan estem al pol nord, és a dir a  $90^\circ$  al nord, el pla horitzontal és el mateix que l'equador celeste. Quan el Sol està a l'equador, és a dir,

en els equinoccis, el sol al llarg del dia frega l'horitzó, recorrent-lo de punta a punta (fent els 360°).

Quan passen els dies des de l'equinocci de primavera el sol és va elevant, però segueix fent una volta completa al firmament. Aquesta elevació arriba al seu màxim al solstici d'estiu amb una inclinació de 23,44°.

Després del solstici tornarà a baixar fins arribar a l'horitzó just en l'equinocci de tardor. Per tant, fixem-nos, hem tingut sis mesos de dia no interromput, cap segon de nit. Però a partir de l'equinocci de tardor i fins tornar a l'equinocci de primavera passaran sis mesos de nit perpetua, sense un segon de llum.



21 - Sol al pol

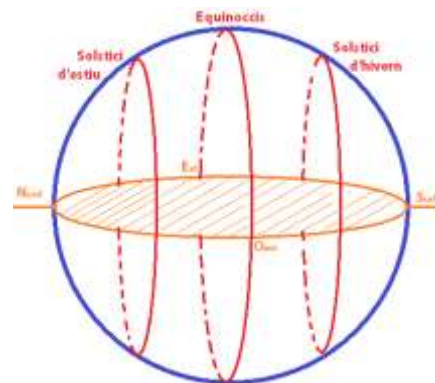
Des del pol sud passarà el mateix però en temps contrari, quan al pol nord és de dia allà serà de nit i viceversa.

Fixem-nos que ens estem centrant en el punt exacte del pol nord i del pol sud, exactament a 90° des de l'equador.

**El Sol des de l'equador:** Observem ara que l'horitzontal és perpendicular al equador celeste. Aquí les nits i els dies tenen sempre les mateixes hores i al mig dia el sol passa just per la vertical de l'observador (passa per damunt del cap).

Des de l'equinocci de primavera fins el de tardor es desvia cap el nord, amb una màxima desviació de 23,44°. A l'altra meitat d'any el contrari.

En l'equinocci si mirem cap al nord, el sol surt de la teva dreta i s'amaga a la teva esquerra. Si mires des del sud viceversa.



22 - Sol a l'equador

Així doncs, que en l'equador és l'únic lloc on sempre hi ha un instant al dia que el sol passa per sobre el teu cap. També és l'únic lloc on el sol surt de l'est i s'amaga a l'oest.

**Incís:** Des del tròpic de Càncer fins al pol nord si mires el Sol surt de la teva esquerra i s'amaga per la teva dreta. A l'equador i entre els dos tròpic depèn del dia sortirà per

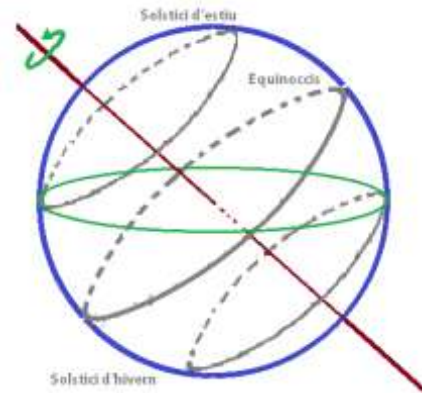
l'esquerra o per la dreta. Des del tròpic de Capricorn fins el pol sud el sol surt per la teva dreta i s'amaga per la teva esquerra.

Ara que hem vist els punts clau de les seccions de la terra, anem a mirar com veuen el sol entre aquests punts.

**El Sol en el cercle polar àrtic i antàrtic:** En el cercle polar àrtic en el solstici d'estiu no hi ha nit (ni un segon de foscor). En els equinoccis el dia i la nit duren les mateixes hores. I en el solstici d'hivern no hi ha ni una hora de dia.

Així doncs entre el pol nord i el cercle polar àrtic, i.e. en el casquet àrtic, hi ha dies que no es fa de nit i dies que no es fa de dia.

En el cercle polar antàrtic passa el mateix però en èpoques oposades.



23 - Sol en el cercle polar

**El Sol en els tròpics:** Al tròpic de Càncer existeix un únic dia que el Sol passa per sobre la vertical de l'horitzontal (per sobre el cap de l'observador) i coincideix amb el solstici d'estiu.

Entre els dos tròpics existeix almenys un dia a l'any que el Sol passa per sobre la vertical de l'horitzontal.

**Incís:** Entre els tròpics i els cercles es fa sempre de dia i de nit i mai el Sol passa per damunt de l'horitzontal.

## Calendaris

**Incís:** L'any tròpic, és a dir el que tarda el punt àries a recorre tota una volta a l'esfera celeste dura 365,24219... dies.

Aquest punt és important per entendre millor altres temes com els eclipsis, rellotges solars...

### Una mica d'història

El calendari egipci començà el 2773 aC i tenia 365 dies. Aquesta xifra és va fixar gràcies a la repetició observable que hi ha entre les estacions, les crescudes dels rius, el moviment de les estrelles...

Aquest any, com veiem, era més curt que l'any tròpic. Així que les estacions es desfasaven.

En el 2773 aC Sirius, l'estrella més brillant del firmament, es veia molt a prop de l'horitzó abans que sortís el sol. Però poc a poc s'anava desplaçant, anava recurrent i pujant la volta celeste. Fins que 1508 anys després va tornar estar al mateix lloc.

$$\begin{aligned}1508 \text{ anys} \cdot 365 \text{ dies} &= 550.420 \text{ dies} \\1507 \text{ anys} \cdot 365,24219 \dots \text{ dies} &= 550.419,988 \dots \text{ dies}\end{aligned}$$

Així que amb 1508 anys és va desfasar un any exacte el calendari oficial amb el calendari tròpic. Els egipcis van observar aquest fet i van arxivar totes les dades obtingudes.

El calendari Romà començà amb Pompili al 705 aC adoptant el calendari egipci de 365 dies per any. Però Juli Cèsar al 47 aC va recopilar les dades d'Egipte i va afegir un dia al any cada quatre anys. Gràcies aquesta mesura l'any durava 365,25 dies (una aproximació prou bona amb l'any tròpic).

No va ser fins al 1582 amb la reforma Gregoriana que és va modificar aquests calendari. El papa Gregori XVIII reformà el calendari i va imposar unes normes:

- Un any ordinari té 365 dies.
- Excepte els múltiples de quatre que seran de traspàs i duraran 366 dies.

- Excepte els múltiples de 100 que també seran de 365 dies.
- I finalment, excepte els múltiples de 400 que seran de 366 dies.

**Incís:** Què guanyem amb tanta excepció de l'excepció?

En 400 anys hi ha 146096,8795 dies segons l'any tròpic.

Anem a veure quants dies hi ha en 400 anys gregorians:

- Segons els calendari gregorià →  $400 \text{ anys} \cdot 365 \text{ dies} = 146.000 \text{ dies}$
- D'aquí hem de sumar els múltiples de 4 →  $100 \text{ dies de traspàs} = +100 \text{ dies}$
- Però ara restem els múltiples de 100 →  $4 \text{ dies multiples de } 100 = -4$
- Finalment, li hem de sumar el múltiple de 400 →  $1 \text{ dia multiple de } 400 = +1$

Ens queda doncs 146.097 dies.

Fixem-nos doncs que amb 400 anys l'error és ínfim. Té una diferència de 0,124 dies; i.e. 3225,8 anys és retardada un any.

**Incís:** El papa Gregori a més a més de la reforma va excloure 11 dies del calendari. Per què?

Al segle XI, Dionisi el Petit va proposar contar els anys a partir del naixement de Crist. 753 anys després de la fundació de Roma van determinar que era l'any del naixement de Crist (el 25 de desembre). No obstant, investigadors recents han descobert que va néixer a l'any -6.

Segons els jueus el mes començava quan la lluna començava a néixer, per tant un mes anava de lluna nova a lluna nova ; 29,5 dies.

La pasqua jueva és la primera lluna plena de primavera i Crist va morir durant la pasqua jueva. Els cristians van començar a celebrar la Pasqua el diumenge següent.

Al 325 dC; en el concili de Nicea, van decidir que la pasqua Cristiana fos el diumenge següent de la primera lluna pela de primavera. La primera va ser el 21 de març.

No obstant observem que amb aquests càlculs és desfasa lentament i per tant el papa Gregori va tenir que eliminar 11 dies per retornar al inici establert.

## Els grecs

En el segle V aC els grecs calculaven els anys de forma diferent, utilitzaven el que s'anomena cicle de Motó.

El període de la lluna és de 29,530588 dies (aquesta dada és actual, lentament és va frenant). Per tant 12 mesos en mesos lunars són 364 dies.

Els babilonis resolien aquest desfàs afegint cada tres anys un any de tretze mesos. Així doncs, cada tres anys tenien 1092 dies, quan realment hauria de ser de 1095,8 dies.

El cicle de Motó és un cicle de 19 anys lunars:

- 19 anys astronòmics  $\equiv 6939,601777$  dies
- 235 llunacions (mesos de lluna)  $\equiv 6939,68818$  dies

Observem que la diferència del cicle de Motó amb els anys astronòmics és molt petita.



24 - Cicle de la Lluna

<https://www.flickr.com/photos/vanamonde81/41464804964>

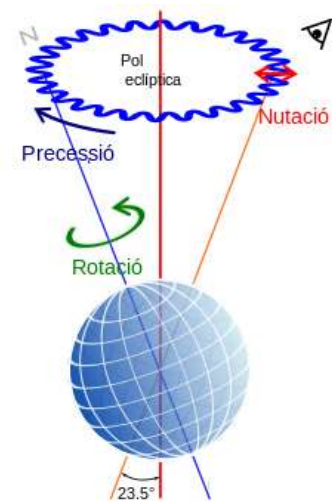
## Precessió dels equinoccis

En els punts anteriors hem dit que l'obliquïtat de l'eclíptica de  $23,44^\circ$  no era constant. Aquest angle va rotant entorn un con amb eix central la perpendicular al pla de l'eclíptica. El període de rotació del con és de 96.000 anys.

A més l'angle va variant entre  $22,1^\circ$  i  $24,5^\circ$  amb un període de 42.000 anys. En aquest moment l'angle està disminuint. Al 8700 aC aquest angle era de  $24,5^\circ$  i al 11.800 serà de  $22,1^\circ$ .

Així doncs, com ja vam dir, l'estrella polar va canviant segons l'any que estem. Per exemple:

- Al 2800 aC l'estrella polar era Thuban  $\alpha$  –Draconis.
- Actualment és l'  $\alpha$ -Ursa Minoris.
- Al 3500 serà Enrai  $\gamma$ -Cophei.
- Al 6000 serà Alfink  $\beta$ -Caphei.
- Al 7400 serà Sadrio  $\gamma$ -Cygni.
- Al 13800 l'estrella polar serà Vega  $\alpha$ -Lyrae.



25 - Moviments

Observem que el pla de l'equador celeste també va variant segons el moviment de l'eix de la volta celeste. Per tant el punt àries varia. Fixat, doncs, que les coordenades de les estrelles varien en el temps.

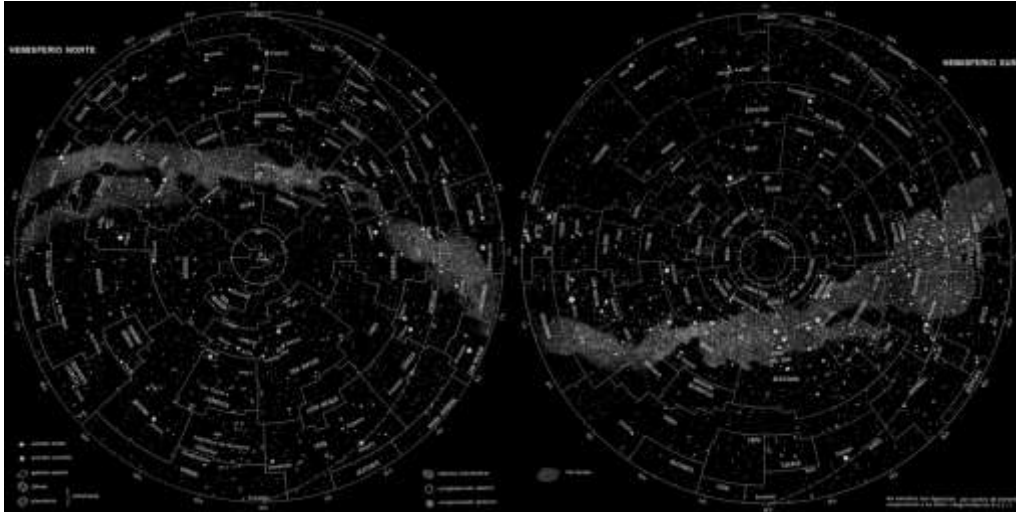
## Nutació

El moviment de nutació és el canvi, d'ordre de segons, que fa l'eix de la terra cada dia. Per això en els anuaris astronòmics hi ha coordenades de cada dia.

## Signes del zodíac i constel·lacions zodiacals

Anteriorment s'ha mencionat que existeixen 88 constel·lacions en l'esfera celeste. No obstant, existeixen unes quantes constel·lacions especials. Una constel·lació és un grup d'estrelles fixes que "formen" una figura.

Tot i que la divisió en 88 és recent, des del 1928, la majoria venen des de l'antiga Grècia i per tant de la seva mitologia.

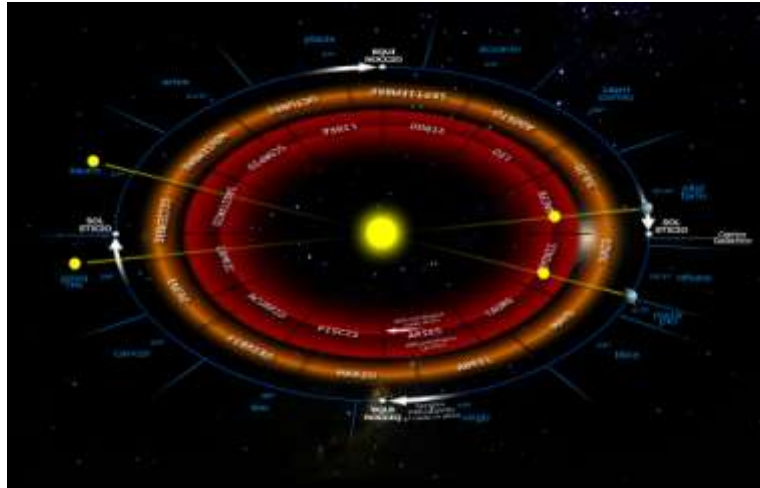


26 - Distribució de les constel·lacions

[https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Celestial\\_chart\\_\(only\\_areas\)\\_ \(esp\).png](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Celestial_chart_(only_areas)_ (esp).png)

Si dividim en 12 parts l'eclíptica; 30° per part. Obtenim una part per cada constel·lació zodiacal:

- Àries
- Taurus
- Gemini
- Cancer
- Leo
- Virgo
- Scorpius
- Capricornus
- Aquarius
- Pisces



27 - Recorregut zodiacal

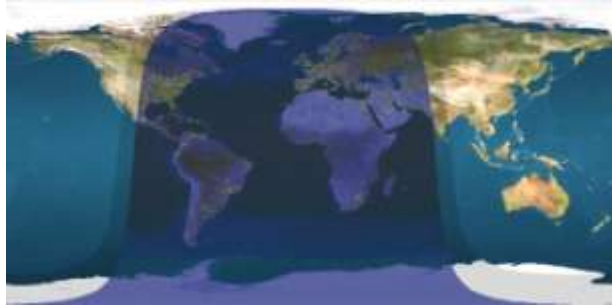
[https://es.wikipedia.org/wiki/Zodiaco#/media/Archivo:Signos\\_astrol%C3%B3gicos\\_durante\\_el\\_mes\\_civil\\_de\\_Junio.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Zodiaco#/media/Archivo:Signos_astrol%C3%B3gicos_durante_el_mes_civil_de_Junio.jpg)

No obstant, existeixen altres constel·lacions que toquen aquesta divisió de la eclíptica. Per exemple entre Scorpius i Sagittarius passa per un extrem la constel·lació d'Ophiucus, així que tot i no ser-ho oficialment, també podria ser considerada una constel·lació zodiacal.

## Relotges de sol

Un **dia solar verdader** és l'interval de temps que el Sol passa per sobre el nostre meridià i fins que torna a passar. Així doncs, un rellotge de sol tradicional mesura el temps solar verdader.

Un dia solar verdader no és uniforme al llarg de l'any. La diferència entre un dia i un altre són acumulatius, per tant no és un temps uniforme; així que els rellotges mecànics no poden mesurar el temps solar verdader.



28 - Dia i nit a la Terra

[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Daylight\\_Map\\_nonscientific\\_\(0100\\_UTC\).jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Daylight_Map_nonscientific_(0100_UTC).jpg)

Els astrònoms van introduir el concepte de **dia solar mitjà**; és una mitjana de la duració dels dies solars veritables.

Així doncs els rellotges mecànics marquen el temps solar mitjà. Existeix una altra mesura que és el temps oficial universal, aquest temps s'ha de sumar una o dues hores.

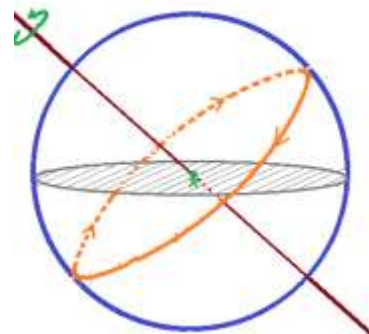
El temps oficial en el nostre meridià ve donat per l'hora de Greenwich. Per tant, haurem de restar aproximadament 8 minuts a l'hora solar que obtinguem (s'ha de restar exactament els graus que ens separa).

## Introducció a la construcció de rellotges solars

Situem-nos a l'esfera celeste.

El primer rellotge solar que construïrem serà un **rellotge de sol equatorial**.

1. Dibuixem un cercle en un full i el dividim en 24 parts iguals;  $15^\circ$  els pertoca a cada part. Cada hora correspon a una d'aquestes marques.
2. Fem el mateix per l'altra cara del full.
3. Clavem un pal que travessi el cercle de manera perpendicular; aquest pal s'anomena **gnòmon**.



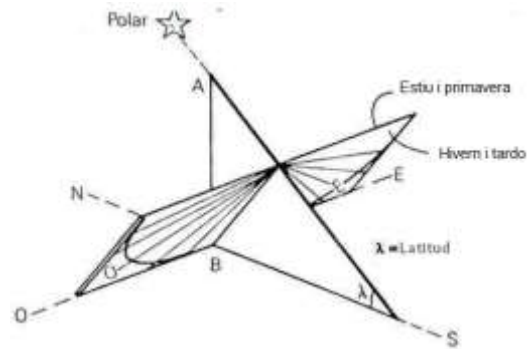
29 - Inclinió rellotge solar equatorial

4. Posem el rellotge tal que l'extrem del pal apunti a l'estrella polar (té la mateixa rotació que l'esfera celeste).

Recordem que ja sabem trobar el nord; aquesta marca seria la de les 12.

Aquest rellotge equatorial marca el Temps Solar Verdader de Greenwich. No obstant això, nosaltres volem el temps universal, per tant haurem de desplaçar-ho uns graus (els mateixos que ens separen de Greenwich).

Aproximadament estarem (Catalunya) a  $2^{\circ}6' \approx 2,107^{\circ}$ . Això correspon a un retràs de  $2'107 \cdot \frac{1h}{15^{\circ}} = 0,1404 \text{ hores} \rightarrow 8,4 \text{ minuts}$ .



30 - Rellotge solar equatorial

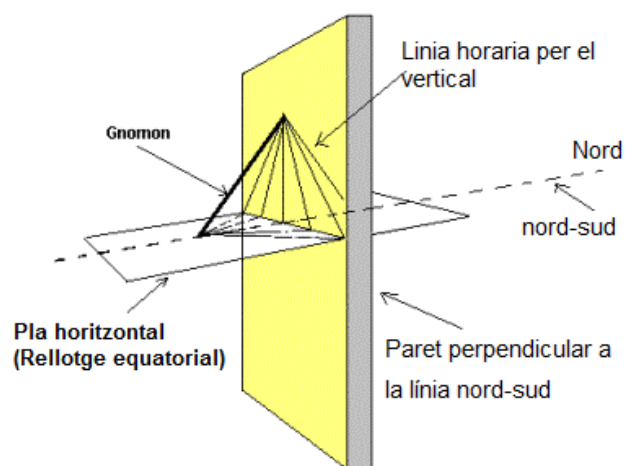
Per resoldre aquest problema només ens cal girar la nostra circumferència els  $2^{\circ}6'$  (a favor del sentit de les agulles del rellotge).

**Observació:** El full l'hem dibuixat per les dues carres perquè serveixi per tot l'any. A l'estiu i a la primavera el sol marcarà les hores a la cara del full que dona el nord. A l'hivern i a la tardor és marcaran a la cara que està al sud.

En el pol nord i en el sud amb una sola cara n'hi hauria prou, però recorda que només sis mesos hi ha llum solar.

### Rellotges horitzontal i vertical

Per construir un rellotge solar horitzontal o vertical s'ha de treballar una mica més. Els càlculs són complicats. Així que la millor forma és donar una primera marca i després intentar deduir totes les marques a partir d'un rellotge equatorial.



31 - Rellotges solars horitzontals / vertical

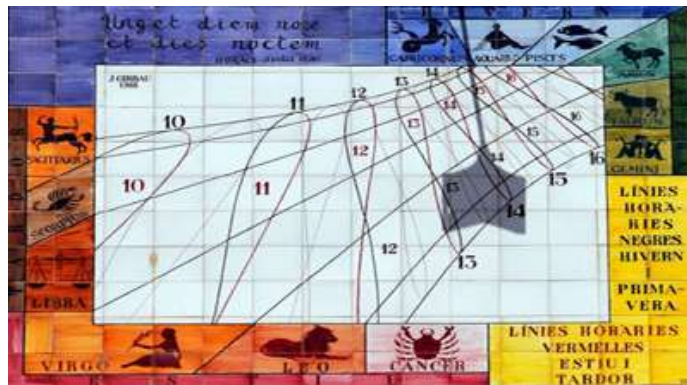
Per marcar l'hora de les dotze és molt senzill. Clavem el gnòmon amb la inclinació adequada, la latitud, i apuntant a l'estrella polar. Dibuixem la línia  $N \rightarrow S$ .

Ara recorda que has de girar els graus de la teva longitud a favor del sentit de les agulles del rellotge ( $2^{\circ}6'$  aproximadament).

Per fer les altres marques podem creuar les rectes d'un rellotge equatorial cap a la paret o cap al terra, és a dir, poses el full de l'equatorial horitzontal a la paret i les marques de les hores fins on el gnom xoca amb la paret és la marca de l'hora a la vertical.

### Marques de les estacions

Podem marcar també les estacions, i.e. els solsticis i els equinoccis. Només cal que recordem que en els solsticis el sol recorre el més alt i el més baix en l'eclíptica. En canvi, en els equinoccis passarà horitzontalment pel "centre" de les dues anteriors línies.

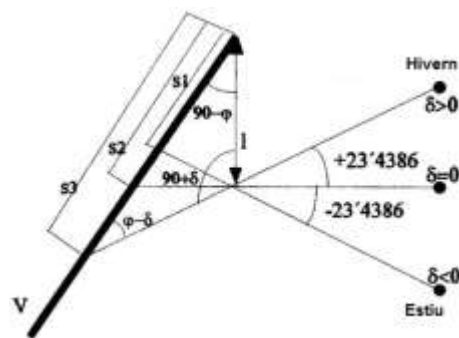


32 - Rellotge solar de la facultat de ciències de la UAB <https://www.uab.cat/web/el-departament/rellotge-de-sol-1236930466484.html>

El solstici d'hivern estarà a  $23,4^{\circ}$  de la línia dels equinoccis i la d'estiu a  $-23,4^{\circ}$ .

La dels equinoccis tenint el gnòmon clavat a la paret serà molt senzill, ja que ha de ser horitzontal a la vertical.

Cal mencionar que les rectes (en tots els casos) no són uniformes; no tenen la mateixa separació. També podríem marcar la resta de signes del zodíac.

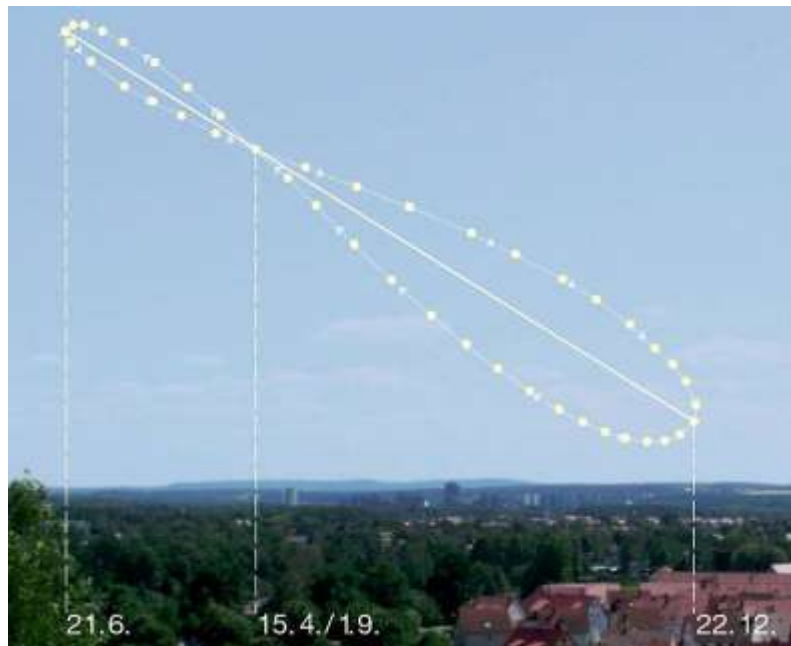


33 - Marques equinoccis i solsticis

## Relotges solars de temps solar mitjà

Recordem que fins ara calculàvem temps solar verdader, però els rellotges donen temps solar mitjà.

Aquest càlculs ja surten d'aquests apunts, però només dir-vos que passen de rectes a "vuits". Que exactament és la forma que fa el sol en el cel.



34 - Recorregut Sol per l'eclíptica 1 any

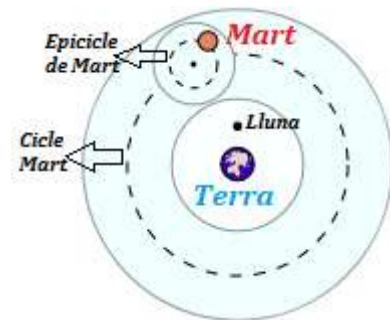
[https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Analemma\\_pattern\\_in\\_the\\_sky.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Analemma_pattern_in_the_sky.jpg)

## Moviment aparent del sol i dels planetes

Com ja vam comentar, el moviment dels objectes estel·lars és com si hi hagués esferes concèntriques de radi molt gran al firmament.

Una d'aquestes esferes ja l'hem estudiada, l'esfera celeste. Ara anem a estudiar les altres set esferes. Veurem teories dels moviments aparents d'aquestes set esferes i finalment arribarem a les teories demostrades i vàlides actuals.

**Teoria dels epicicles:** Apoloni de Perga, 262 aC -190 ac; va desenvolupar una de les primeres teories que explicava les errades del moviment aparent dels planetes. Aquesta teoria va ser recollida per Claudi Ptolomeu. L'explicació del moviment erràtic dels planetes era explicat per una doble moviment.



35 - Teoria epicicles

Els planetes és movien sobre una circumferència sobre la seva esfera.

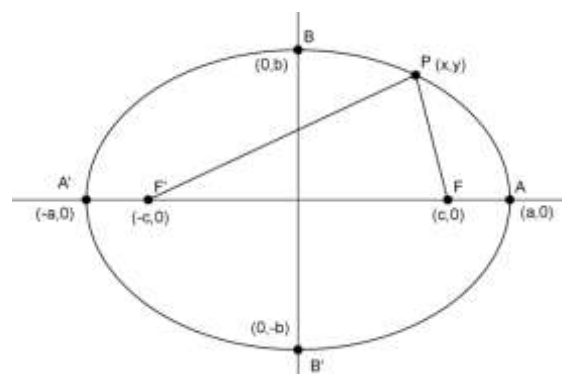
**Teoria de Nicolau Copèrnic:** Copèrnic va incloure les demostracions necessàries per acceptar els primers models heliocèntrics conseqüència de les lleis de Kepler.

**Teoria de la gravitació universal:** Dos cossos s'atrauen amb una força proporcional a les seves masses i inversament proporcional al quadrat de la distància que els separa. Amb aquesta teoria és va poder trobar nous planetes i explicar variacions en orbites com les de Neptú.

## Les lleis de Kepler

Kepler va poder revolucionar l'astronomia i la física amb les seves tres lleis.

**Incís:** Recordem, que una el·lipse és una corba tal que la suma de les distàncies a dos punts, anomenats focus, a un punt qualsevol és constant:  $d_1 + d_2 = C_t$ . Per fer



36 - El·lipse

una el·lipse de forma senzilla podem agafar un cordill d'una certa mida  $C_t$ . Clavem els dos extrems en punts fixos i movem un llapis amb la flexibilitat que et deixa la corda.

Definim **semieix major** al eix més gran d'una el·lipse,  $a$ . **Semieix menor** és el que té distància mínima al centre,  $b$ .

L'**excentricitat** d'una el·lipse és una mesura que ens dona la proporció de com d'allargada o com de semblant és a una circumferència:  $e = \frac{\sqrt{a^2+b^2}}{a} \in [0, 1]$ . Com més propera a zero, més semblant és a una circumferència.

### Les lleis de Kepler:

1. Els planetes es mouen en òrbites el·líptiques al voltant del Sol, el qual ocupa un focus de l'el·lipse.  
L'excentricitat de la terra és petita, quasi com una circumferència.
2. Els planetes escombren àrees iguals a temps iguals.  
Com que les àrees han de ser iguals respecte el focus Sol, com més a prop un planeta es troba del Sol, més ràpid va.
3. Si  $T$  és el període d'un planeta que té  $a$  com a semieix major, aleshores  $\frac{T^2}{a^3}$  és constant..

### Taula resum de característiques dels planetes

Anem a intentar classificar i explicar una mica tots els planetes del nostre sistema Solar.

	Semieix major*	Excentricitat	Inclinació	Període (dies)
Mercuri	0,3871	0,20560	7,0048°	87,9692
Venus	0,7233	0,00680	3,3947°	224,7008
Terra	1	0,01670	0°	365,2564
Mart	1,5237	0,09340	1,8561°	686,9297
Júpiter	5,2033	0,04839	1,3053°	4332,5901
Saturn	8,5371	0,05420	2,4845°	10764,9576
Urà	19,1913	0,04717	0,7692°	30588,9018
Neptú	30,0690	0,00860	1,7692°	59804,8121
Plutó**	39,4817	0,24880	17,1418°	90613,1760

\*agafem com unitat el semieix major Terra-Sol

Cal dir que inicialment es poden classificar els planetes en rocosos o gasosos; però també es poden classificar com planetes interns o externs.

Plutó no es considerà planeta (és un planeta nan, per això l'hem posat a la taula amb un color diferent), el motiu és que té multitud de dades diferents als altres. Segurament és un asteroide atret per la gravetat solar. Té un satèl·lit anomenada Charonte que és de la mateixa mida que ell. Plutó va ser descobert al 1930 i Charonte al 1985.

**Incís:** Observa que un any tròpic no és igual que un any orbital.

Les lleis de Kepler estan calculades com si no hi hagués altres cossos en el sistema solar. Així doncs si calculem amb algunes dades els valors de les altres obtindrem aproximacions de la realitat.

**Incís:** Quina és la distància de la Terra al Sol? Quan Venus i la Terra estan el més proper possible és fàcil saber la distància entre ells utilitzant trigonometria. Utilitzant aquesta dada podem calcular la distància entre la Terra i el Sol.

Gràcies a aquestes mesures podem incloure noves unitats de longitud que no siguin el metre:

- Definim una **Unitat Astronòmica**; 1AU (per les sigles en anglès), com la distància del sol a la Terra.  $1AU = 149.597.870 \text{ km}$ .
- Sabent que la velocitat de la llum és de  $299.792.458 \text{ km/s}$  podem definir un **any llum** com la distància que recorre un foto amb un any.

**Incís:** La llum del sol tarda  $8'19''$  a arribar a la terra aproximadament.

Els grecs, com ja hem dit, només coneixien cinc planetes. Aquests cinc planetes; Mercuri, Venus, Mart, Júpiter, Saturn són visibles a ull nu en una nit estrellada.

**Urà**, no obstant, va ser descobert el 1781. És va descobrir gràcies al telescopi; és l'últim dels planetes visibles amb tecnologia a l'abast de tothom (és de color verdós).

**Neptú** és descobrí al 1846; va ser descobert per les alteracions en l'orbita d'Urà. Els matemàtics van deduir que havia d'haver un cos que pertorbés l'orbita del planeta. Presenta anells, tot i que menys visibles que els de Saturn.

**Júpiter** té molts satèl·lits. És bastant brillant, casi tant com Venus. És un petit sistema solar en si mateix. És un planeta gasos. Els satèl·lits més importants són Ío i Europa.

L'astrònom Olé Chirstensen Römer al 1676 va observar Ío i amb això va poder acotar la velocitat de la llum (va ser la primera demostració empírica que la velocitat de la llum era finita).

Ío està en el mateix pla que Júpiter, cada 42h 30' li dóna una volta, i per tant és produeix un eclipsi d'Ío. Röer va observar els eclipses de Ío i anotava quan s'amagava i quan tornava a sortir. Amb els resultats teòrics de la seva velocitat i els resultats empírics va poder posar cota a la velocitat de la llum.

**Saturn**, és conegut pels seus anells. Aquests anells, restes de fragments d'asteroides, cometes... s'estan apropant al planeta i la seva inclinació va variant segons l'època.

**Mercuri**, es pot veure a simple vista tot i estar molt proper al Sol. Per veure'l s'ha d'estar en un lloc on és pugui veure l'horitzó i estar-hi just a la posta del sol.

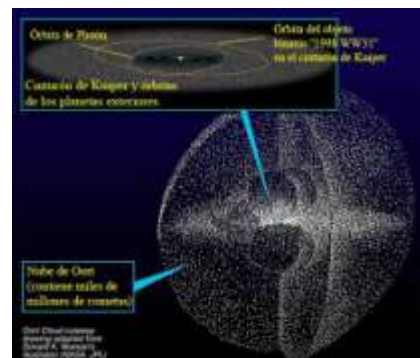
**Venus**, també és veu a simple vista. Venus és el més brillant. A més presenta fases.

**Mart**, és de color vermellós i pot brillar molt degut a l'aproximació de la Terra i ell. En el pol de Mart s'observa un casquet de gel.

Per acabar aquest apartat, cal mencionar alguns altres objectes del nostre sistema solar. El primer és el **cinturó d'asteroides** que hi ha entre la Terra i Mart. Va ser predit per Kepler. L'objecte més gran, Ceres, va ser descobert amb precisió per Gauss amb el seu càlcul de mínim quadrats.

Un altre objecte important és el **Cinturó de Kuiper**, la teoria de l'existència d'aquest cinturó és va formular al 1950, però no va ser fins a finals del segle XX que és va descobrir la regió. Aquest cinturó està creat, gairebé tot, per grans cossos de gel; els cometes procedeixen d'aquesta zona.

Finalment, cal mencionar el **núvol de Öort**, tot i haver trobat objectes que constaten la seva existència, encara és un enigma la seva forma i volum. Cada cop es descobreixen cossos amb grandàries semblants a Plutó, com per exemple Farout.



37 - Cinturó de Kuiper i núvol d'Öort  
<https://www.spacetelescope.org/images/op00204i/>

## La Lluna

Ara estudiarem el nostre satèl·lit, la Lluna. Cal dir que l'explicació de la formació de la Lluna encara avui és un misteri, tot i que hi ha una teoria bastant acceptada i avalada per simuladors informàtics.

Aquesta teoria del sorgiment de la Lluna explica que es va formar quan hi havia el prototipus de la terra; i.e, quan encara era "magma" i no estava del tot formada (segurament encara li faltava molta matèria per obtenir el pes actual).

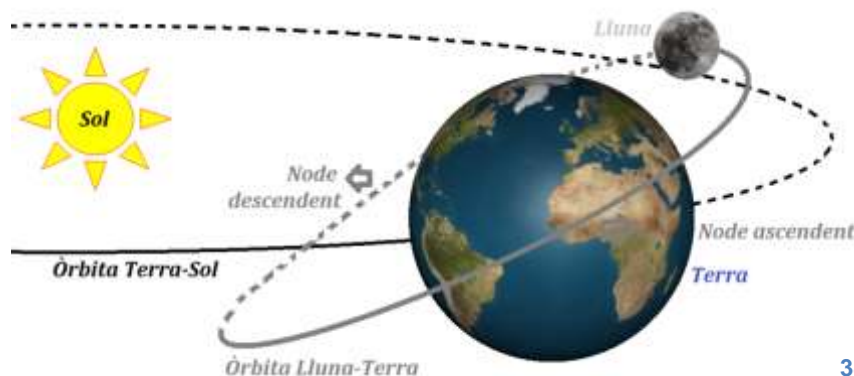
Un gran asteroide va impactar en aquesta prototerra, destruint-la en milers de trossos. Però, la destrucció no va dispersar els fragments per tot el sistema solar, com sí va passar en el cinturó d'asteroides (aquest últim ajudat per la gravetat de Júpiter). Els fragments es van quedar orbitant a la bora de la "Terra" i van tornar a fusionar-se (altres exemples d'aquest fenomen explica la majoria de formacions de satèl·lits dels planetes i dels anells).

La fusió d'aquests fragments van formar dues parts, la Terra i la Lluna. Encara actualment la Lluna es va separant gradualment de la Terra afectant així la velocitat de la rotació del planeta.

La distància mitjana de la Terra i la Lluna és de 384403 km (1s de llum). El diàmetre de la Lluna és de 3474 km (la de la terra 13000km). L'òrbita de la Lluna té una excentricitat de 0,0549. El pla de l'òrbita de la Lluna està inclinat respecte del de la Terra en  $5,145^\circ$ .

**Definició:** La intersecció dels plans de l'eclíptica i de l'òrbita lunar s'anomenen **nodes**. Quan la Lluna passa per la línia de nodes Sud-Nord es diu node ascendent, quan passa per la Nord-Sud descendent.

Quan la lluna està en un node, passa per l'eclíptica i per tant està en el pla sol-Terra.



38 - Esquema Sol - Terra - Lluna

### Períodes importants:

- **Període sinòdic:** de lluna plena a lluna plena → 29,5305881 dies.
- **Període sideri:** volta a l'esfera celeste → 27,3216609 dies.
- **Període draconític:** Temps que tarda la Lluna entre 2 passos consecutius per un node ascendent o descendent respectivament → 27,2122178 dies.

Perquè hi hagi un eclipsi s'han de donar les següents condicions:

- Eclipsi de lluna:
  - Lluna plena.
  - La lluna ha d'estar en un node.
- Eclipsi de sol:
  - Lluna nova.
  - La lluna ha d'estar en un node.

Busquem ara nombres naturals,  $\mathbb{N}$  tal que els períodes draconític coincideixi amb els períodes sinòdics; i.e. hem de resoldre l'equació diofàntica  $k \cdot S = n \cdot D$ ; on  $k$  i  $n$  són els nombres naturals,  $k, n \in \mathbb{N}$ .  $S$  és els dies que dura un període sinòdic i  $D$  els dies que tarda un període Draconític.

Resolent aquesta equació obtenim  $n = 242$  i  $k = 223$ . Per tant, cada 18 anys 11 dies i 7,71h és repeteix un eclipsi.

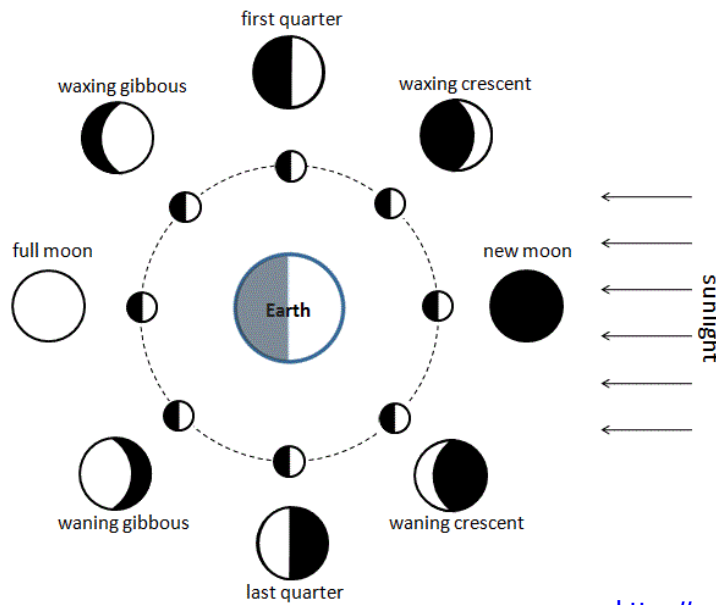
Però observem que  $7,71 \cdot \frac{15^\circ}{1h} = 120^\circ$ ; per tant, quan és repeteix un eclipsi aquest es troba desplaçat  $120^\circ$  a l'oest respecte l'anterior.

Podem concloure que els eclipses són cíclics, els babilonis ja ho sabien i van poder aproximar el temps dels cicles a 18 anys. Aquest cicle d'eclipsis de 18 anys 11 dies i 7,71 hores s'anomena **cicle de Sados**.

**Incís:** A sobre el tròpic de Càncer, quan la lluna té forma de  $C$  és decreixent, quan té forma de  $D$  és creixent (al tròpic de Capricorn és al contrari).

## Les fases de la Lluna

Com segurament sabràs, les fases de la lluna són causades per la superposició de l'ombra de la Terra sobre la superfície de la Lluna.



39 - Fases de la Lluna

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moon\\_Phase\\_Diagram\\_for\\_Simple\\_English\\_Wikipedia.GIF](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moon_Phase_Diagram_for_Simple_English_Wikipedia.GIF)

## Distàncies

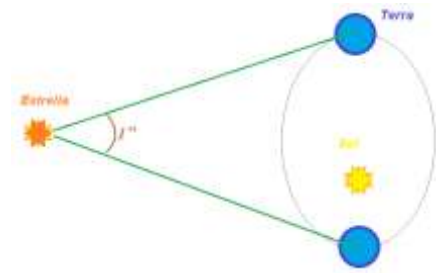
### Distància entre un estel i l'observador

En el sistema solar, amb les lleis de Kepler (en particular la tercera), podem saber com calcular distàncies.

Avui en dia ja coneixem la majoria de les distàncies necessàries del nostre sistema; en particular la distància mitjana del Sol a la Terra. Amb aquesta distància també podem calcular estels "propers".

### Una unitat astronòmica i un parsec

Definim **1 parsec** com la distància d'una estrella la qual es veu el radi de l'òrbita de la terra sota un angle d'un segon d'arc.



40 – Què és un parsec

Ja vam veure en apartats anteriors, quan explicàvem els planetes; com l'ajuda de la trigonometria i Kepler ens donava els resultats de distàncies de Venus, la Lluna...

La **unitat astronòmica**,  $UA$ , és la distància mínima del Sol a la Terra. Així doncs podem concloure:  $1 \text{ parsec} \equiv 3,26 \text{ a.ll} = 206.000 \text{ UA}$  ( $\text{a.ll} := \text{anys llum}$ )

Llistat d'estrelles i distàncies:

- **Pròxima centauri**, està a la vora de la constel·lació de *Centaurus*, és més visible des de l'hemisferi sud. Està a  $4,2 \text{ a.ll} \approx 1,2 \text{ parsecs}$ . Les seves coordenades celestes són  $\begin{cases} \alpha = 14h_s 26,5' \\ \delta = -62,29^\circ \end{cases}$ .
- **$\alpha$ -Centauri**, està també a la mateixa constel·lació de *Centaurus*. És més petita que *Pròxima Centauri*. Es troba a  $4,3 \text{ a.ll} \approx 1,3 \text{ parsecs}$ . Les seves coordenades celestes són  $\begin{cases} \alpha = 14h_s 36,5' \\ \delta = -60,38^\circ \end{cases}$ .

- **Munich**, és molt petita i es troba a la mateixa constel·lació. La distància que la separa del Sol és de  $6 \text{ a. ll} \approx 1,9 \text{ parsecs}$ . Les seves coordenades celestes són
 
$$\begin{cases} \alpha = 14h_545,5' \\ \delta = -61,28^\circ \end{cases}$$
- **Sirius A**. *Sirius*, com ja hem dit, és l'estrella més brillant del firmament, però de fet és una estrella doble (*Sirius-A*, *Sirius-B*), està a  $8,7 \text{ a. ll} \approx 2,9 \text{ parsecs}$ .

## Distància entre estels i galàxies

Una galàxia, com ja sabem, és una acumulació d'estrelles separada d'una altra clarament. La galàxia més propera és Andròmeda, està a dos milions d'anys llum.

Així doncs la proximitat entre galàxies no és un tema tan senzill de calcular i és per això que els càlculs anteriors no són els més òptims per calcular aquestes distàncies.

Entre altres mètodes per calcular distàncies trobem dos:

- El mètode de **variables cefeides**: la precisió és molt bona però poques estrelles es poden calcular així.
- El mètode d'**Hertzsprung-Rusell**: és vàlid per totes les estrelles però poc exacte.

Què és això de variables cefeides? Doncs bé, existeixen estrelles que s'anomenen variables perquè la seva brillantor varia de forma regular en un període temporal. L'exemple més típic són les estrelles de la constel·lació de *Cepheus* situada prop de Cassiopea; en concret l'estrella  $\delta$  – *Cephei*.

Per aquest motiu, una estrella amb brillantor variable s'anomena **variable cefeida** o simplement **cefeida**.

## Magnitud aparent de les estrelles

Al s. II aC, Hiparcus de Nicea classificava de més a menys la brillantor de les estrelles en una magnitud òptica utilitzant l'ull nu. Gràcies a l'ús i millora de càmeres i dels nous mètodes matemàtics objectius, aquesta classificació de les estrelles s'ha concretat molt.

La brillantor que rebem a la Terra d'una estrella no és res més que l'energia lluminosa per unitat de temps i superfície que desprèn aquesta estrella estigui allà on estigui i ens arriba a la Terra.

Per calcular la magnitud és defineix una unitat, aquesta unitat és tracta de la magnitud aparent d'una estrella, el seu valor és  $mag(1) = \sqrt[5]{100} cd \approx 2,511886432 \dots cd$ .

Per calcular una magnitud superior s'utilitza la fórmula:  $mag(n) = \frac{mag(1)}{100^{\frac{n-1}{5}}}$

Per tant, una estrella amb una magnitud superior brilla menys que una de menor magnitud.

### Exemples:

- Sirius:  $mag(-1,47)$ .
- Júpiter:  $mag(-2,01)$ .
- Venus:  $mag(-4,45)$ .



41 – Sirius

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Sirius#/media/File:Sirius\\_Mirzam\\_M41.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Sirius#/media/File:Sirius_Mirzam_M41.jpg)

Existeix una altra magnitud per mesurar la brillantor, és la **magnitud absoluta**. Aquesta es defineix com la magnitud aparent que tindria una estrella si es trobés a 10 parsecs de l'observador.

Donades dues brillantors,  $A$  i  $B$ , quina diferència de magnitud tenen?

Si tenim dos estels i comparem les brillantors i els volem convertir en magnituds comparables tenim:  $mag(B) = mag(A) + \frac{5}{2} \log \left( \frac{brillo(B)}{brillo(A)} \right)$ .

**Incís:** Suposem que un estel està a distància  $d$  de l'observador, mesurem la seva brillantor com:  $brillo_d(4\pi \cdot d^2) \equiv \{energia emesa per l'estel per unitat de temps\}$

El brillo des de  $d$  és l'energia rebuda per unitat de temps i superfície. Suposem que l'estel està al centre d'una esfera de radi  $d$ . Aleshores tots els observadors que són a la superfície de l'esfera reben la mateixa brillantor.

**Corol·lari:** Siguin dos observadors d'una estrella a distància  $d$  i  $d'$  respectivament. Aleshores:  $brillo_d \cdot d^2 = brillo_{d'} \cdot d'^2$ .

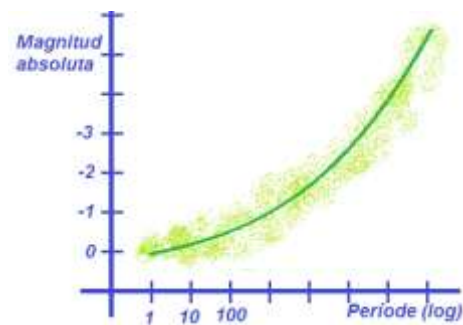
**Exemple:**

Magnitud aparent	Magnitud absoluta	Estrella
-1,47	1,3	Sirius
0,06	0,6	Vega de Lira
-5,67	4,9	Sol

**Mètode de variables cefeides**

Ja vam dir que les estrelles cefeides són aquelles amb un període de brillantor. El període de l'estrella  $\delta$ -cefeus és de 5 dies 8h 48'.

L'any 1912, Henrietta Learitt, va dibuixar una gràfica on les variables corresponien a les distàncies i les magnituds (la distància d'aquestes estrelles estaven calculades amb la trigonometria).



42- Esbós gràfica Henrietta Learitt

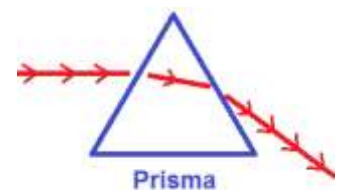
Aquesta gràfica va ajudar a saber la distància d'una estrella llunyana, només saben el seu període de lluminositat.

**Mètode d'Hertzsprung Russell**

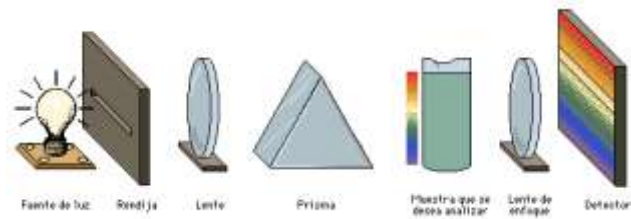
Abans d'introduir aquest punt repassem alguns conceptes per sobre:

**Espectroscòpia:**

- La reflexió de la llum és la desviació que produeix un obstacle amb un raig de llum.
- La llum està composta per ones electromagnètiques. Així la reflexió de la llum solar és la franja de llum visible.



**Espectrògraf:** Suposem que tenim dos elèctrodes connectats. Dins el “cràter” d'un d'ells es pot introduir pols d'un element de la taula periòdica.

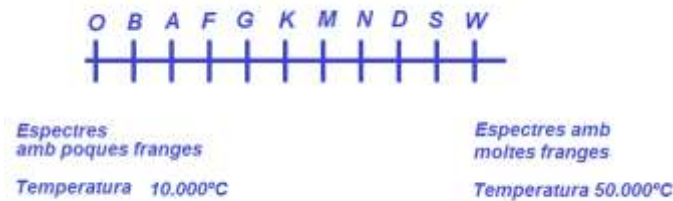


43 - Esbòs Spectrograph

Quan es produeix l'arc voltaic (per entendre una guspira o, dit en termes col·loquials, una “xispa”); la llum surt, passa pel prisma, es descompon i la placa fotogràfica recull l'espectre d'aquell element.

- Cada secció de l'espectre correspon a una determinada freqüència de la llum.
- Cada element té un espectre diferent i únic, i per tant, analitzant l'espectre podem saber el material del que ve.
- Com més fort és l'arc voltaic, més “franges” es poden diferenciar en l'espectre.

**Incís:** Si observem la llum que ve d'una estrella, podem saber la temperatura, la composició...



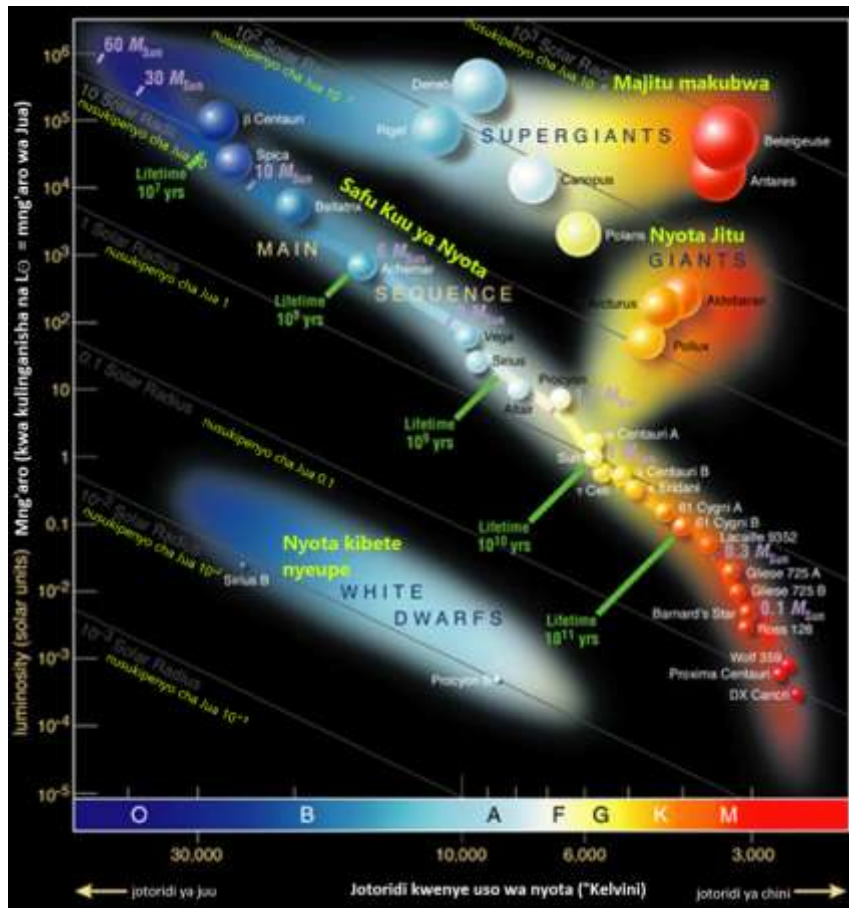
44 - Sigles llum d'una estrella

Els espectres de la llum de les estrelles van ser catalogats com:

**Diagrama d'Hertprung-Rusell:** Si marquem en un gràfic totes les estrelles que coneixem, tenint la seqüència principal, el tipus d'espectre, coneixent la magnitud absoluta (i per tant la relativa, i la distància) podem obtenir un gràfic on veurem que s'acumulen aquelles estrelles amb particularitats semblants.

Aleshores, les seqüències són estrelles amb un cert tipus de característiques. Aquestes seqüències s'anomenen:

- Banda de les **nanes blanques**.
- Banda de les estrelles **gegants**.
- Banda de les estrelles **supergegants**.



45 - Gràfica d'Hertsprung-Russell

[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=Hertsprung-Russell&title=Special%3ASearch&go=Go&ns0=1&ns6=1&ns12=1&ns14=1&ns100=1&ns106=1#/media/File:Mng'aro\\_na\\_joto.png](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=Hertsprung-Russell&title=Special%3ASearch&go=Go&ns0=1&ns6=1&ns12=1&ns14=1&ns100=1&ns106=1#/media/File:Mng'aro_na_joto.png)

### Com es mouen les estrelles en el diagrama d'Hertsprung-Russell

Les estrelles al llarg de la seva vida es van movent el diagrama d'Hertsprung-Russell. Així doncs, una estrella que està a la seqüència principal va refredant-se fins a arribar en un moment que esclata i passa a una de les altres bandes.

El Sol, actualment està a la banda principal, però d'aquí molt de temps passarà per la banda de les estrelles gegants i finalment estarà a la de nanes blanques per finalment desaparèixer.

## Les galàxies i la Via Làctia

**Definició:** Es defineix com a **galàxia** l'agrupació de moltes estrelles aïllades d'una resta. Aquesta agrupació pot assolir perfectament les cent mil milions d'estrelles.

Les galàxies vistes amb un telescopi són núvols aïllats de punts.

La nostra galàxia és la **Via Làctia** (*camí de llet*), anomenada així pel seu aspecte lletós al cel. En la mitologia grega, d'on ve el seu nom, es creia que la Via Làctia havia estat el vessament de la llet que duia la deessa Hera per alletar Hèrcules.



46 - Dos galàxies que es creuen semblants a la Via Làctia

Com podem veure a les imatges, la nostra galàxia té forma d'espiral de dos braços.

La distància entre el Sol i el nucli de la Via Làctia és de més de 30.000 anys llum. Nosaltres estem quasi al vèrtex exterior, ja que el radi de la galàxia és de 40.000 anys llum.

Vist en secció el gruix del nucli, on es condensen les estrelles més velles de la nostra galàxia, té un gruix de més de 15.000 anys llum. En canvi el gruix del braç en la que està el Sistema Solar és de poc més de 1000 anys llum. L'amplada d'aquest braç és dels voltants de 3.000 anys llum.

**Incís:** Les estrelles que veiem de forma individual són estrelles que estan a la mateixa franja de braç de la nostra galàxia.

Aleshores, com que la nostra galàxia té més de cent mil milions d'estrelles, aquestes que no estan a la nostra franja del braç formen el camí de llet que veiem en el nostre cel.

**Incís:** T'has preguntat quantes estrelles hi ha a l'univers? Fixat que només en una galàxia hi ha cent mil milions. I a més, hi ha un nombre ingent de galàxies i cúmuls de galàxies... Fes els números i veuràs que hi ha per donar i per vendre, d'estrelles.

## Com és l'univers?

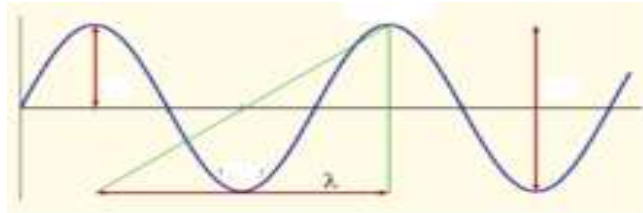
### La llei de Hubble i la llei de la relativitat general

#### Efecte Doppler

Tots sabem que el so d'un objecte que s'apropa es fa agut i greu a l'allunyar-se.

**Recordem:** Les ones són propagacions d'una pertorbació energètica en el medi on es troba. Les característiques que tenen són:

- Velocitat de propagació,  $v$ .
- $\lambda \equiv$  La longitud de l'ona (distància entre dues "crestes").
- $T \equiv$  Període de l'ona (temps que tarda a repetir-se).
- $\gamma \equiv$  Freqüència =  $1/T$  (nombre de "crestes" per segon).



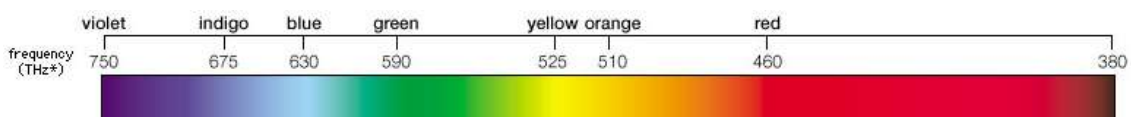
47 - Ona

**Lema:** La llum està constituïda per ones electromagnètiques.

Es compleix,  $\lambda = v \cdot T$  on  $v$  és la velocitat de propagació.

**Incís:** Les freqüències de les ones dels colors visibles van creixent a mesura que anem passant els colors de l'arc de Sant Martí:

$$\gamma_{\text{Vermell}} < \gamma_{\text{Taronja}} < \gamma_{\text{Groc}} < \gamma_{\text{Verd}} < \gamma_{\text{Blau}} < \gamma_{\text{Indi}} < \gamma_{\text{Violat}}$$



48 - Freqüència ones visibles

## Efecte Doppler

Sigui un cotxe amb el clàxon sonant en tot moment; si el cotxe està parat, les ones de so del clàxon es propaguen simètricament. Quan el cotxe està en moviment, les ones de davant s'ajunten i les de darrere se separen.

Així doncs, si estem a davant del cotxe, sentirem la freqüència augmentar (disminuir el període) quan s'apropa el cotxe i al contrari si s'allunya.

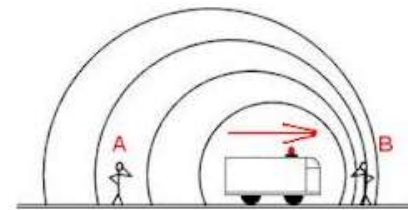
Anem-ho a explicar una mica més rigorosament:

A l'inici, temps  $t_0$ , el so del clàxon produeix una cresta. Si té un període  $T$ , a cada instant  $t = t_0 + n \cdot T$  (on  $n \in \mathbb{N}$ ) sortirà una altra cresta.

Suposem que estem davant del cotxe i a una distància  $d_0$ . Sabem la velocitat del cotxe,  $v_c$ , i del so,  $v_s$  podem deduir com ens arribarà les ones a nosaltres.

La primera cresta ens arribarà a  $t_1 = \frac{d_0}{v_0} + t_0$ . La segona ens arribarà a  $t_2 = \frac{d_1}{v_{s0}} + t_0 + T$  on ara la distància serà  $d_1 = d_0 + v_s \cdot T$ .

Així que l'interval de temps entre cresta i cresta és de  $T' = T \left(1 - \frac{v_s}{v_{s0}}\right)$ . Aquest és el període amb el qual sentim el so.



49 - Esquema efecte Doppler

La freqüència per tant serà:  $\gamma' = \frac{v_{s0}}{T(v_{s0} - v_s)} = \gamma \cdot \frac{v_{s0}}{v_{s0} - v_s}$ .

Si ara el cotxe ja hagués passat (s'allunya) els càlculs quedarien:  $T' = T \left(\frac{v_s}{v_{s0}} + 1\right)$  i

$$\gamma' = \gamma \cdot \frac{v_{s0}}{v_s + v_{s0}}$$

Per tant podem deduir que la sentirem el so més greu quan s'allunya i més agut quan s'apropa.

**Incís:** La velocitat de la llum es denota com  $c$ .

Estudiant els espectres de la llum procedents de les galàxies, s'observa que estan desplaçats a la dreta o a l'esquerra segons s'allunyen o s'apropen. Això és el principi de l'**efecte Doppler**.

Si l'espectre està desplaçat al vermell aleshores la galàxia s'allunya de la Via Làctia. Al contrari, si s'acosta, estarà desplaçada cap al violeta la llum procedent de la galàxia.

Així podem saber les velocitats en què una galàxia s'apropa o s'allunya de nosaltres.

**Edwin Hubble** (1889 – 1953), va observar les galàxies, en particular la d'Andròmeda. Va descobrir, dins d'aquesta galàxia, estrelles individuals cefeides.

Gràcies a aquestes estrelles va poder determinar la distància aproximada d'Andròmeda; aproximadament 2,5 milions d'anys llum i s'apropa.

Va construir un llistat de distàncies de galàxies i les seves velocitats d'apropament o allunyament. Va poder deduir que les que estan més lluny es separen més ràpidament que les que estan properes.

Aleshores, la distància és proporcional a la velocitat d'allunyament.

La **constant de proporcionalitat** de la llei de Hubble, és una constant estadística i per tant, sols tenim una aproximació del valor verdader:

$$k \approx \frac{1}{18 \cdot 10^9}$$

D'aquesta constant podem extreure:  $V_{\text{velocitat-allunyament}} = k \cdot D_{\text{distància}}$

## Teoria de la relativitat general

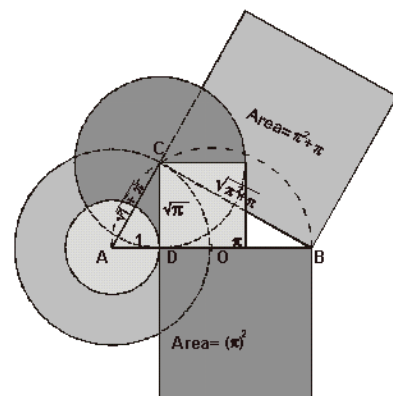
Per poder fer front a la relativitat hem de veure quins obstacles lògics ha trobat l'ésser humà a l'història de la geometria.

### Evolució de la geometria

El primer text de geometria que tenim és "Els Elements" d'**Euclides** (300 aC). Els filòsofs grecs introdueixen la pauta matemàtica i la geometria "euclidiana".

La construcció amb regla i compàs o la semblança de triangles, van ser les primeres eines d'ús més habitual de la matemàtica grega.

Tot i això, hi havia problemes grecs no resolubles geomètricament:

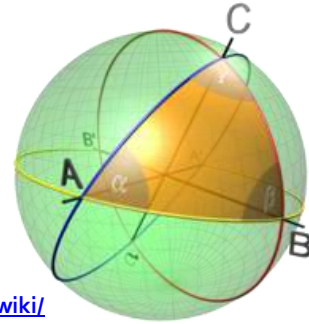


50 - La geometria Euclidia

- Trisecció de l'angle.
- Quadratura del cercle.
- Duplicació del cub.

Però van poder deduir algunes lleis tant “veritables” com que la suma dels angles d'un triangle és de  $180^\circ$ .

No obstant això, gràcies a un filòsof-matemàtic anomenat **Descartes** (1596 – 1650) vam poder avançar. Va escriure la introducció de l'àlgebra moderna en el seu text “La geometrie” (1637).



51 - Geometria esfèrica

[https://commons.wikimedia.org/wiki/](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical_triangle_with_central_angle.svg)

[File:Spherical triangle with central angle.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical_triangle_with_central_angle.svg)

**Gauss** va profunditzar en la teoria en “Investigacions generals sobre superfícies corbes” (1827). Va estudiar sobretot les geodèsiques, corbes sobre l'esfera que donen la distància mínima entre dos punts, podríem dir que són les rectes de l'esfera.

Vam poder iniciar una nova geometria, aquella que la suma dels angles d'un triangle sumen més de  $180^\circ$  (els triangles sobre una esfera).

Així Gauss va adonar-se que existien més geometries, tot es basava en l'estudi intrínsec de les superfícies.

**Riemann**, va escriure al 1854 “Hipòtesi en què descansa la geometria”. Aquí podem mencionar l'inici de la geometria Rimeniana. Més endavant, **Christoffel** va renovar-la i va donar peu a l'inici de les geometries hiperbòliques.

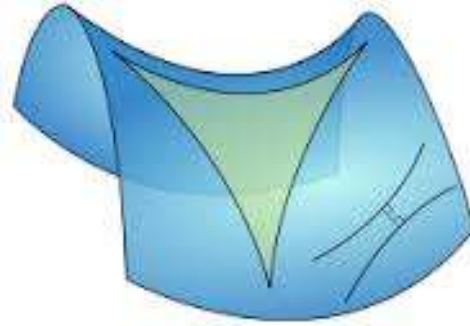
Podríem dir que tota la disputa de les geometries voltava sobre el cinquè postulat d'Euclides. Aquest deia:

- Donat un punt exterior a una recta donada, existeix una única recta paral·lela a la primera recta que passi per aquest punt.

Durant anys, aquest axioma va provocar disputes i intents fallits per demostrar tant la seva veracitat o la seva falsedat.

No va ser fins **Bolyai** (1802 – 1860) i **Lavachewski** (1792-1856) que es va acabar aquesta disputa. Van poder deduir o inventar, de forma independent, una nova geometria que complia els quatre primers postulats d'Euclides però no el cinquè. Van poder deduir la geometria hiperbòlica.

Finalment, **Poincarè** (1854-1912) va donar un model geomètric per la hiperbòlica.



52 - Visió geometria hiperbòlica

## Introducció a la relativitat

A començament del segle XX, apareixen petites incoherències a la teoria de la física clàssica. La mecànica clàssica era invariant pels canvis de variables inercials.

No obstant això, l'electromagnetisme no ho era en valor absolut. Això feia dubtar de tota la teoria de **Newton** i **Galileu**.

En un fet experimental, s'observà que la velocitat de la llum era constant. Tot i que dos cossos o partícules vagin a velocitats diferents tant en mòdul i/o sentit la velocitat de la llum,  $c$ , és invariant i insuperable.

**Einstein** admet aquest fet el 1903 i l'agafa com axioma. Modifica els canvis de variable de Galileu, els inercials; utilitzant els de **Leinitz**.

Aquest axioma portava a la contradicció que el temps fos absolut.

El 1905 la **relativitat restringida** o espacial d'Einstein ens assegura que l'energia i la massa estan relacionats, però no va poder incloure la llei de la gravitació.

Però el 1916, va poder desenvolupar la **teoria general de la relativitat**, introduint la llei de gravitació universal.

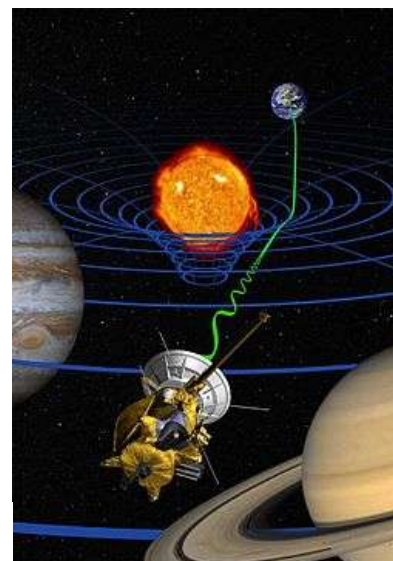
Resumint, el temps no és independent de l'observador, segueix els canvis de variable

$$ct' = \frac{ct}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

El 1908 Minkowski va presentar una forma geomètrica d'entendre la relativitat a  $\mathbb{R}^4$  amb una mètrica que s'explica amb els canvis de Leinitz.

Les lleis de Newton no contempen que els raigs de llum poden ser modificades per la gravetat. No obstant això, no va ser fins al 1929 que es va poder demostrar empíricament aquests fets.

53 - Imaginació de com la Cassini es sotmesa a la Relativitat  
<https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Cassini-science-br.jpg>



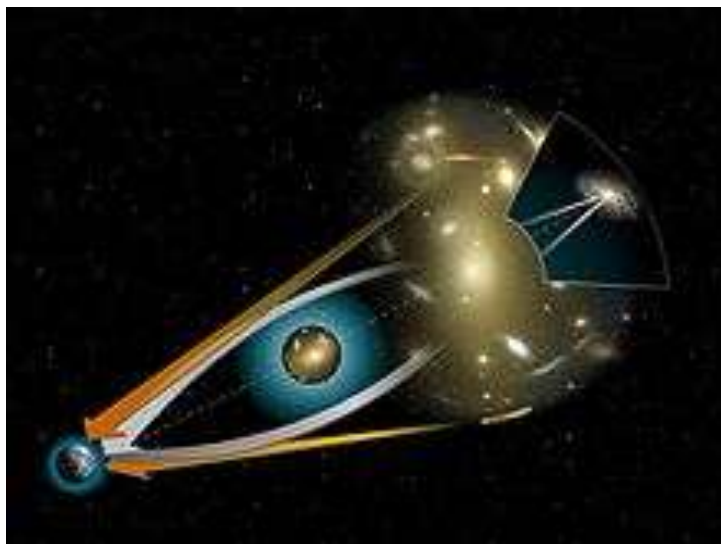
**Incís:** Els GPS utilitzen la relativitat: com que els satèl·lits van molt ràpids i els temps d'emissió de senyal són molt curts, s'ha d'utilitzar, perquè si no et donarien una localització amb un error de quilòmetres.

**Incís:** També podem trobar la relativitat per conèixer l'òrbita i posició de planetes/estrelles. Segons Newton, la posició i òrbita no canvia i segueix les lleis de Kepler, però no és així.

Mercuri, per exemple, té errors si utilitzem les lleis de Kepler, el seu periheli (distància mínima al Sol) varia. L'explicació ens la dona la relativitat: la velocitat i força de gravetat que influeix el Sol sobre ell en aquest punt, altera el temps, produint una desviació del seu període.

**Incís:** Gràcies a l'atracció de la llum per la gravetat podem veure objectes que el Sol ens podria tapar.

També existeix un fet, anomenat **lents gravitatòries**, que és el fenomen produït per una galàxia massiva i produeix la doble visió d'un objecte que té darrere d'ella (podem observar una mateixa galàxia dos cops simultàniament i al mig d'aquesta una galàxia massiva que produeix aquest fet).



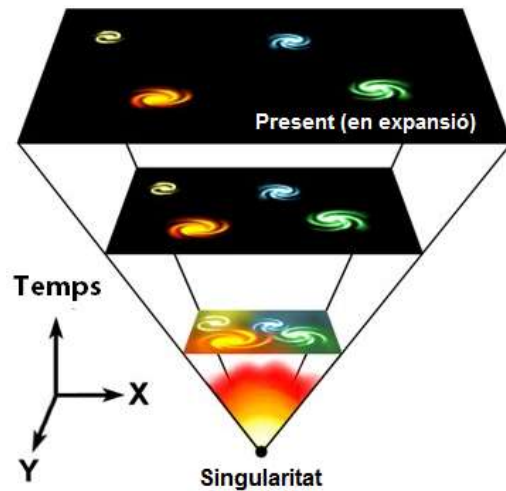
54 - Concepte de lents gravitatòries  
[https://ca.wikipedia.org/wiki/Lent\\_gravitat%C3%B2ria](https://ca.wikipedia.org/wiki/Lent_gravitat%C3%B2ria)

## Models cosmològics

El 1917, Einstein assegurava que una galàxia era com una sola partícula i que per tant no interessa el que passa dins. Estudiar l'actuació de galàxies és estudiar els camps gravitatoris.

El model d'Einstein no explica tota la realitat tot i ser una bona aproximació. En particular no explicava el fenomen Hubbel.

**Fridmann**, aplica la relativitat al moviment de l'univers i explica això l'expansió d'aquest.



55 - Expansió univers

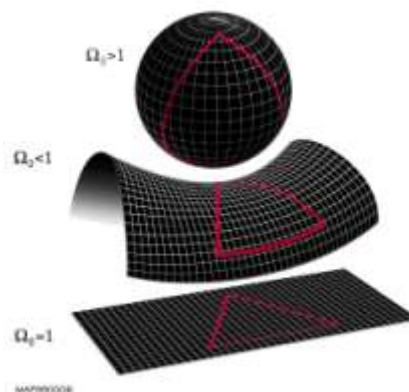
[https://ca.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang](https://ca.wikipedia.org/wiki/Big_Bang)

**Robertson & Walker**, modelitzen el model de Fridmann amb unes hipòtesis:

- L'univers està constituït per galàxies i aquestes es poden prendre com partícules.
- Les galàxies es distribueixen uniformement a l'espai (homogeneïtat de l'espai).
- Llei de Hubble: les galàxies llunyanes s'allunyen a més velocitat que les properes.

Les conclusions que van poder arribar foren: Poden haver-hi tres tipus d'univers, si han de tenir en comú les tres hipòtesis:

- **Univers de curvatura positiva.**
- **Univers de curvatura negativa.**
- **Univers de curvatura nul·la.**



56 - Concepte curvatura univers

[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=curvature+universe&title=Special%3ASearch&go=Go&nso=1&ns6=1&ns12=1&ns14=1&ns100=1&ns106=1#/media/File:End\\_of\\_universe.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=curvature+universe&title=Special%3ASearch&go=Go&nso=1&ns6=1&ns12=1&ns14=1&ns100=1&ns106=1#/media/File:End_of_universe.jpg)

A més, hi ha un temps galàctic a totes les galàxies i un espai en comú a totes elles.

**Incís:** En els universos de curvatura nul·la o negativa, l'univers és infinit. Tenen un temps inicial, i.e. existeix un principi però no hi ha un final.

La geometria global és la d'Euclides en la nul·la. Serà la hiperbòlica en la negativa.

En l'univers de curvatura positiva l'univers és finit, es pot parlar d'un radi. Té una dilatació i contracció fins a arribar al final / inici de l'univers.

No podem saber quin tipus d'univers tenim sense estudiar ben bé que és la matèria. Aquest estudi s'està iniciant ara gràcies als nous acceleradors de partícules.

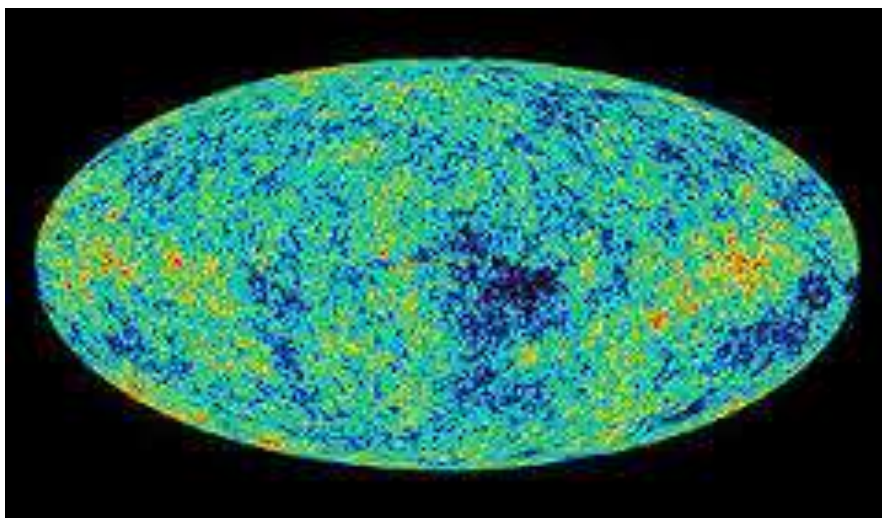
**Incís:** L'univers de curvatura positiva és el que té més massa.

Fixem-nos que sabem del nostre univers:

- Tenim una constant universal; la de Hubble.
- Tenim una densitat de massa en l'univers.

Podem saber el principi de l'univers? Depèn de l'univers en el qual estem, però s'estima que el nostre univers té uns setze mil milions d'anys.

Per acabar, una imatge del fons de microones que presenta l'univers. Una imatge que ens pot donar moltes pistes de quin tipus d'univers tenim.



57 - Fons de microones

[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=microwave+backgrounds&title=Special%3ASearch&go=Go&ns0=1&ns6=1&ns12=1&ns14=1&ns100=1&ns106=1#/media/File:WMAP\\_image\\_of\\_the\\_CMB\\_anisotropy.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=microwave+backgrounds&title=Special%3ASearch&go=Go&ns0=1&ns6=1&ns12=1&ns14=1&ns100=1&ns106=1#/media/File:WMAP_image_of_the_CMB_anisotropy.jpg)

## Bibliografia

- *Elements de física* – **Josep Antoni Grifols** – UAB Materials 134.
- *El universo en una càscara de nuez* – **Stephen Hawking** – Crítica.
- *Astronomia general: Teoria y pràctica* – **David Galadi** – Omega.

Mencionar que la gran part de la teoria d'aquesta breu introducció ha estat inspirada en l'assignatura "Introducció a l'astronomia"; impartida pel doctor Joan Girbau i Badó de la Universitat Autònoma de Barcelona.



Universitat  
de Lleida



Universitat de Lleida  
Institut de Ciències  
de l'Educació

# Introducció a l'astronomia

Andreu Arbó Trabado

