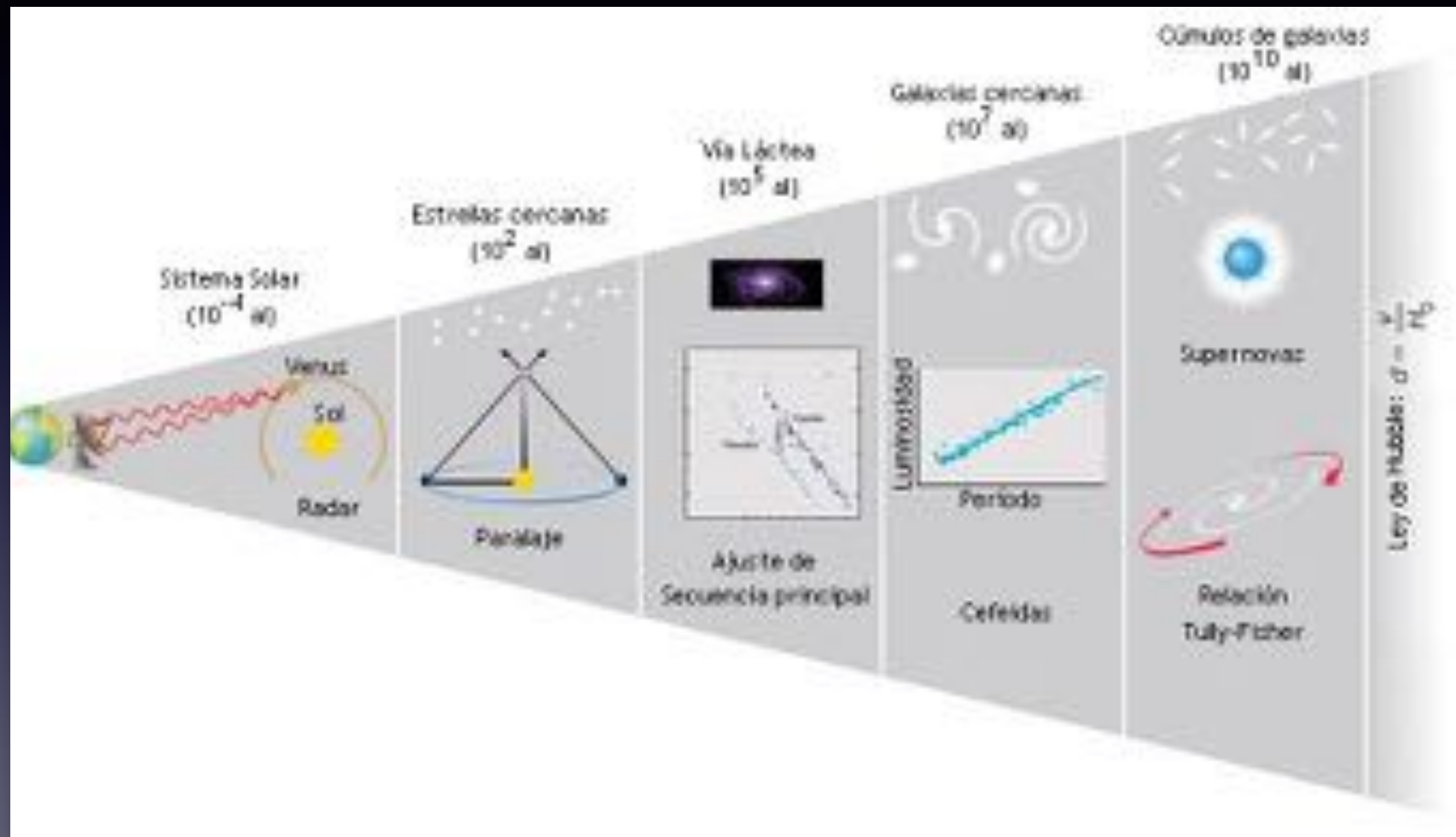


L'Univers pas a pas



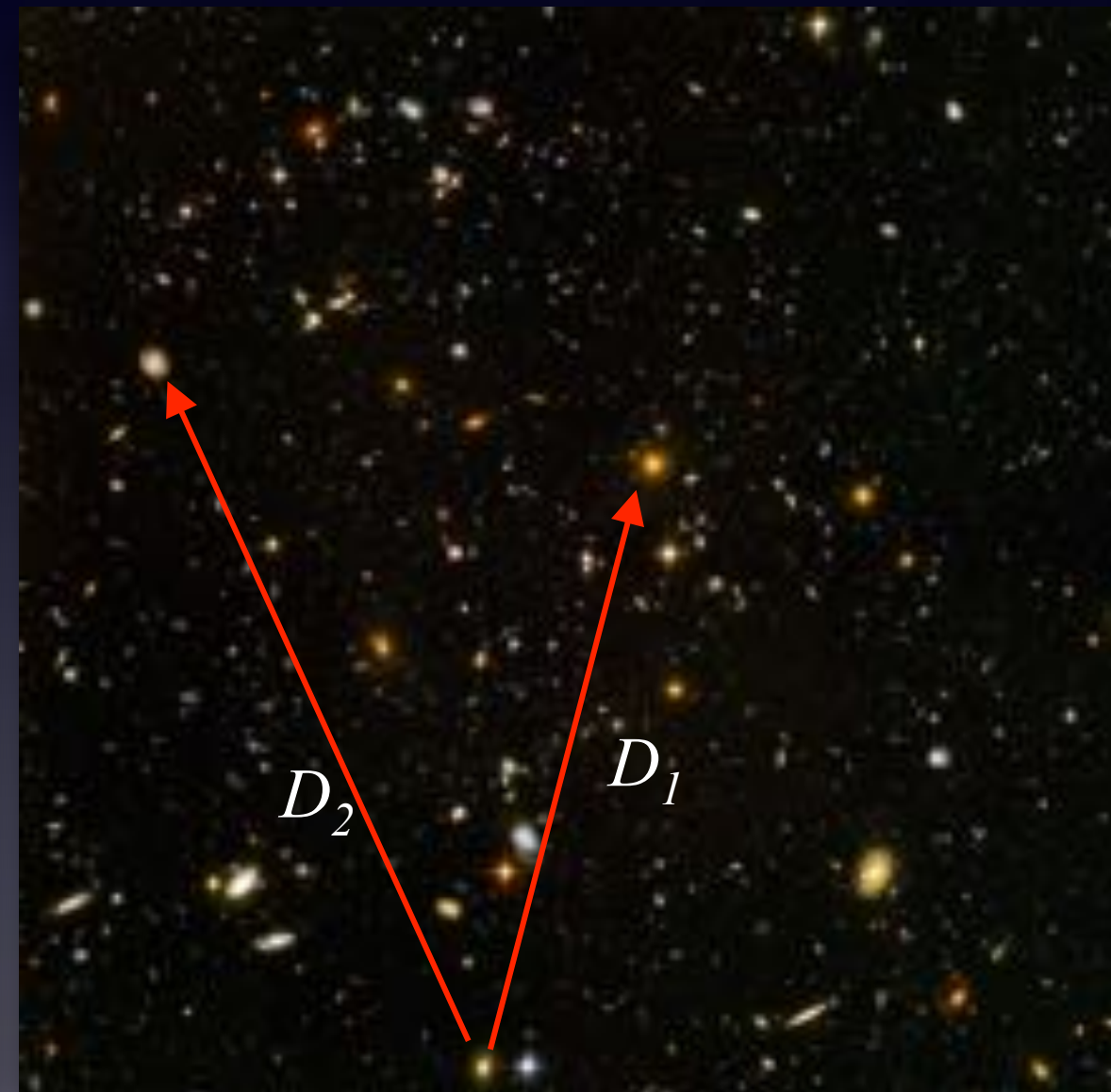
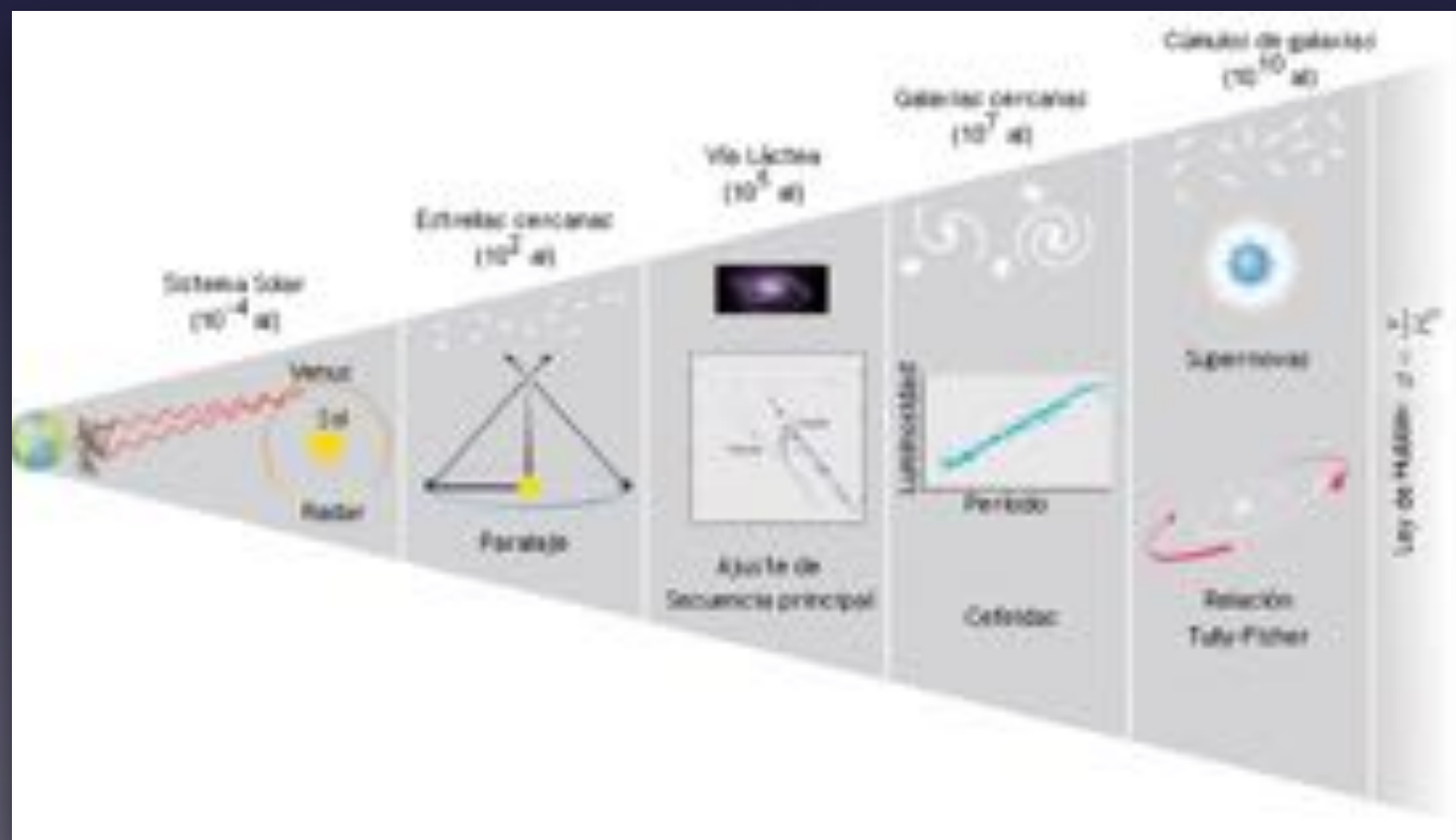
Eduardo Gallego
Universitat Autònoma de Barcelona

Dissabte de les Matemàtiques
8 març 2014

- Passejada al llarg de 2000 anys.
- Matemàtiques, Física, Astronomia i Història.
- *Astrometria*: part de l'Astronomia que estudia la posició i el moviment dels cossos celestes.
- Qüestions típiques: *distàncies entre Terra i Lluna, Terra i Sol, Sol i Planetes, Sol i estrelles properes, Sol i estrelles llunyanes.*

- Els **mètodes indirectes** controlen grans distàncies en funció de distàncies més petites.
- Les distàncies més petites les expressem en funció d'altres distàncies encara menors.
- ... així successivament fins a trobar distàncies que podem mesurar **directament**.

Distàncies massa llunyanes per mesurar **directament**.



Aquesta és l'**escala de distàncies còsmiques**.

PRIMER ESGLAÓ

La Terra

Avui sabem:

- la Terra és aproximadament **esfèrica**,
- el **radi** en l'equador és 6378 km,
- el **radi** en el pol és 6356 km.

Disposem de prou tecnologia per verificar-ho.
Per exemple, satèl.lits.

PRIMER ESGLAÓ

La Terra

Suposem:

- **NO** naus espacials
- **NO** avions
- **NO** vaixells grans
- **NO** telescopis
- **NO** sextants
- **NO** trigonometria (o molt poca)

com a GRÈCIA 320 a.C.

Es pot demostrar que la Terra és esfèrica?

Es pot trobar el seu radi?

PRIMER ESGLAÓ

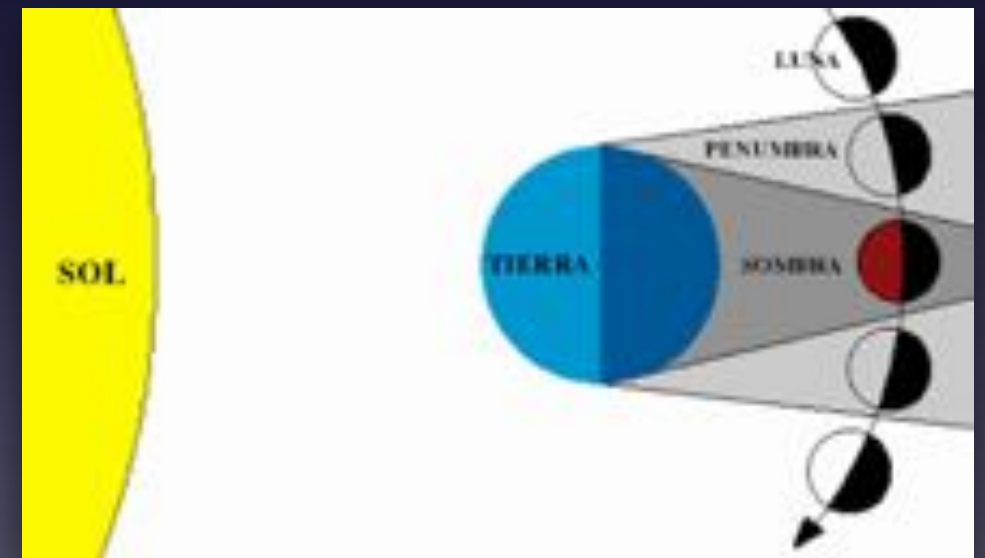
La Terra

Aristòtil va fer servir la Lluna per demostrar que la Terra és **esfèrica**.

Eclipsis de Lluna: el Sol i la Lluna estan en **oposició** respecte la Terra.



Aristòtil (384-322 a.c.)



Eclipsi de Lluna

Eclipsi: la Lluna passa per l'ombra de la Terra. La forma de l'ombra és sempre un **arc** de circumferència sobre la Lluna.

La **geometria** a l'època demostrava que l'únic cos que totes les seves ombres donen arcs de circumferència ha de ser una **esfera**.

PRIMER ESGLAÓ

La Terra



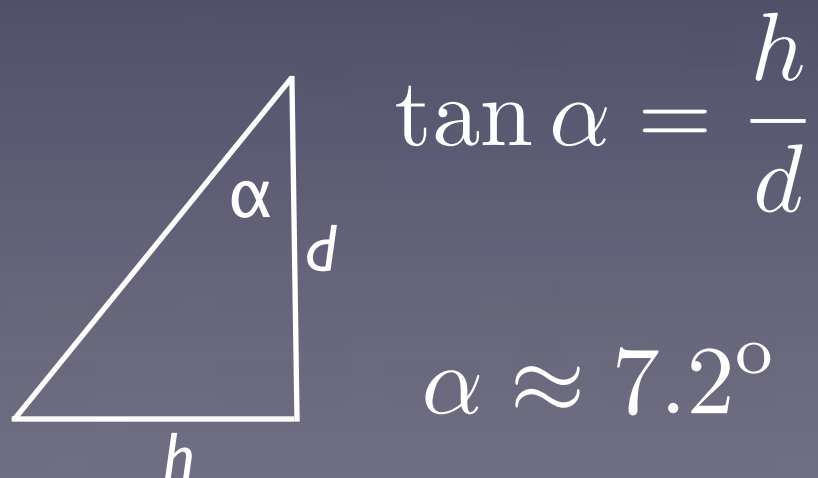
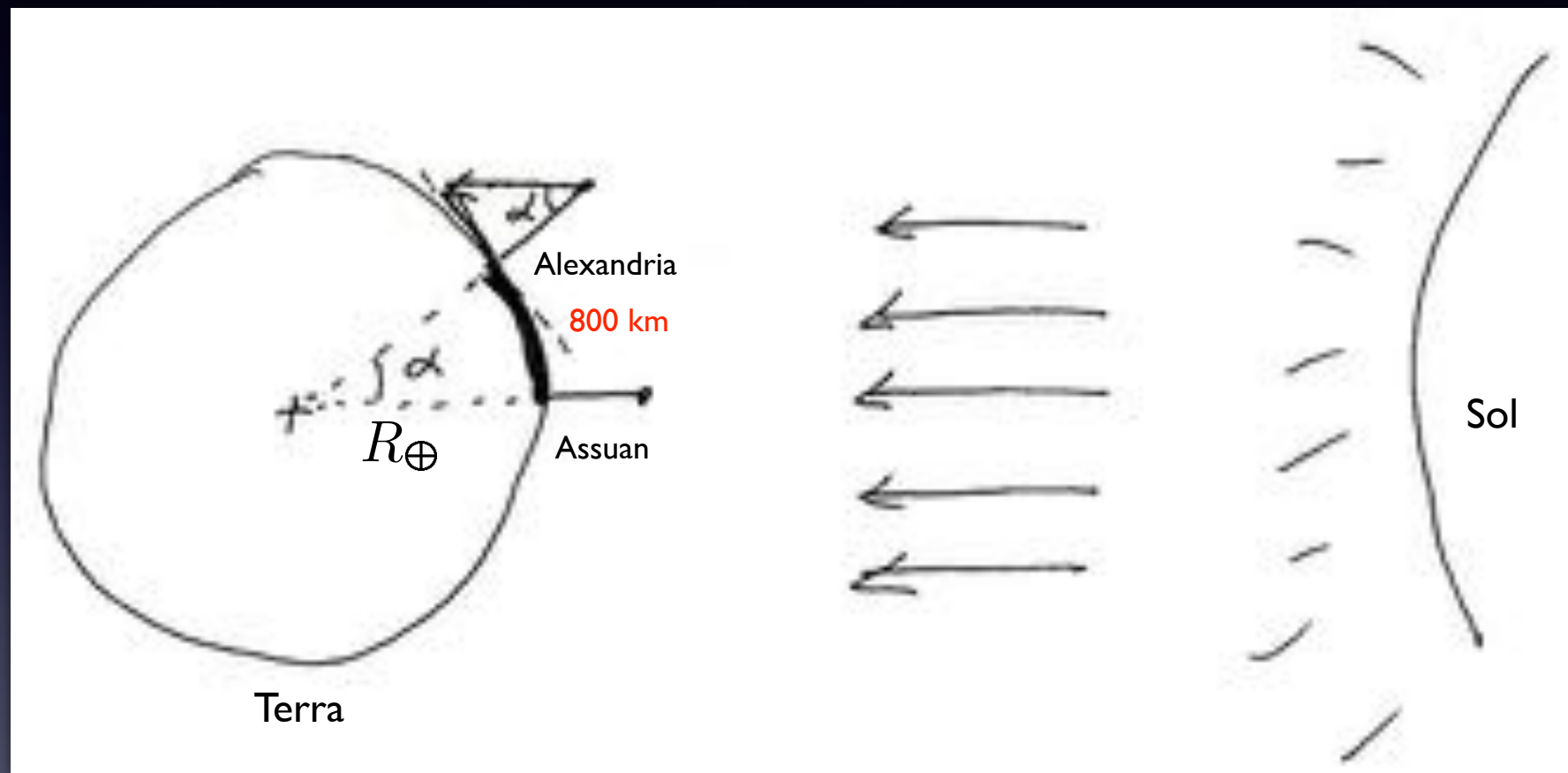
Eratòstenes (276-194 a.c.)

A Assuan, el dia del solstici d'estiu
no hi ha ombra. A Alexandria si.



PRIMER ESGLAÓ

La Terra



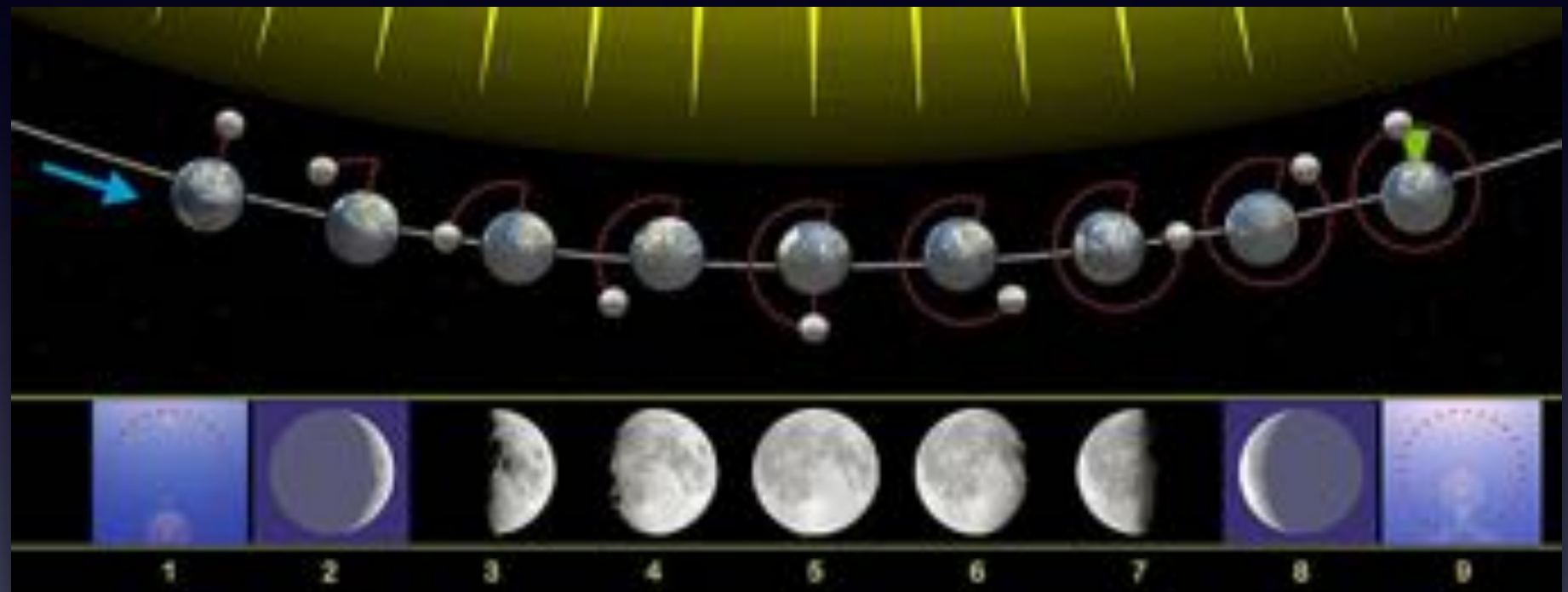
$$\alpha \approx 7.2^\circ$$

$$800 = R_{\oplus} \cdot \alpha \cdot \frac{2\pi}{360}$$

$$R_{\oplus} \approx 6366.19 \text{ km}$$

SEGON ESGLAÓ

La Lluna



Qüestions

- Forma
- Tamany
- Distància a la Terra

Forma **esfèrica**

La vora de les fases de la Lluna sempre és arc d'el.lipse

Geometria: tota figura amb aquesta propietat ha de ser una esfera.

SEGON ESGLAÓ

La Lluna



Aristarc (312-230 a.C.)

Aristarc va utilitzar un mètode enginyós per calcular la distància Terra-Lluna en funció del radi de la Terra (**càlcul indirecte**).



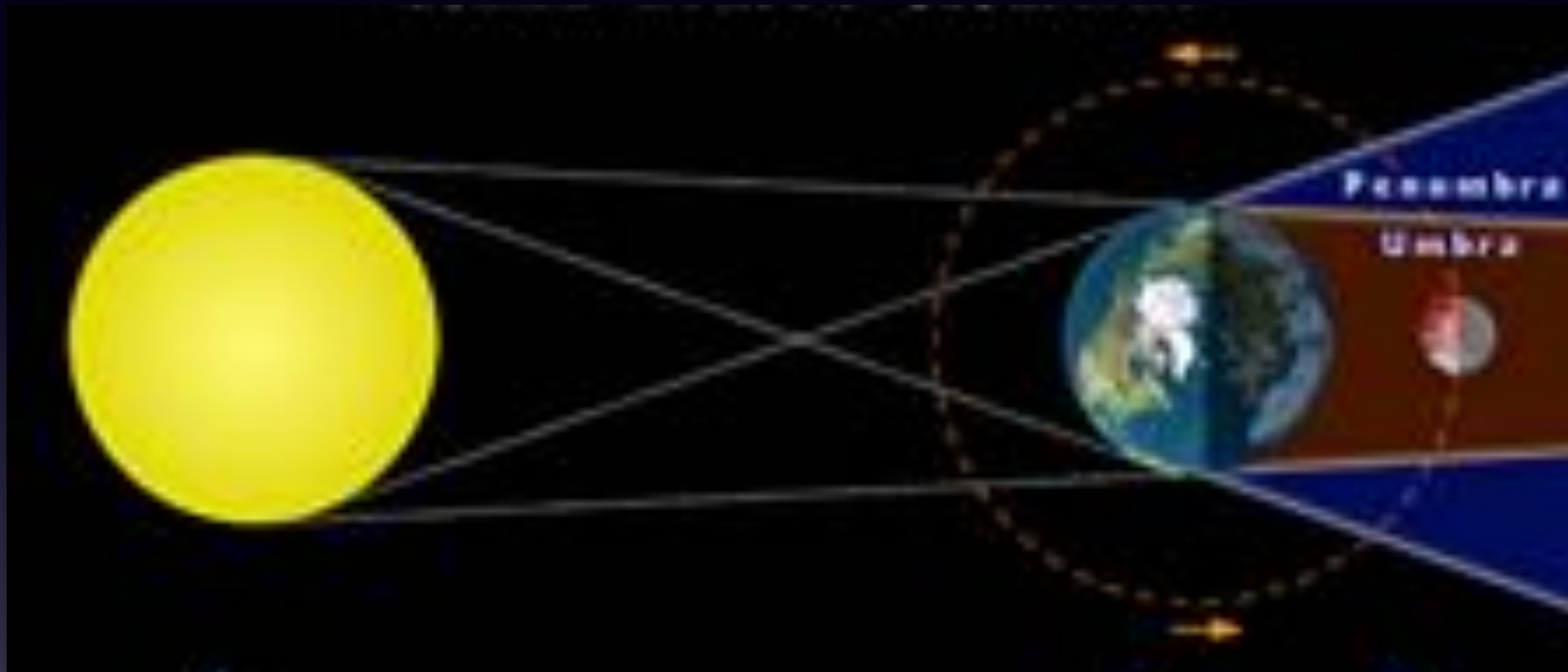
L'ombra (umbra) medeix $2R_{\oplus}$

La lluna triga **3 hores** a passar l'ombra

La lluna triga **1 mes** (29 d 12 h 44 min 2,78 s)

SEGON ESGLAÓ

La Lluna



$$v_{\text{L}} = \frac{2R_{\oplus}}{3h} = \frac{2\pi d_{\oplus\text{L}}}{1\text{mes}}$$

$$d_{\oplus\text{L}} \approx 60R_{\oplus}$$

SEGON ESGLAÓ

La Lluna



La lluna triga 2 minuts a posar-se

La lluna triga 24 hores a fer una volta (aparent) a la Terra

$$v_{\mathcal{C}} = \frac{2R_{\mathcal{C}}}{2\text{min}} = \frac{2\pi d_{\oplus\mathcal{C}}}{24\text{h}}$$

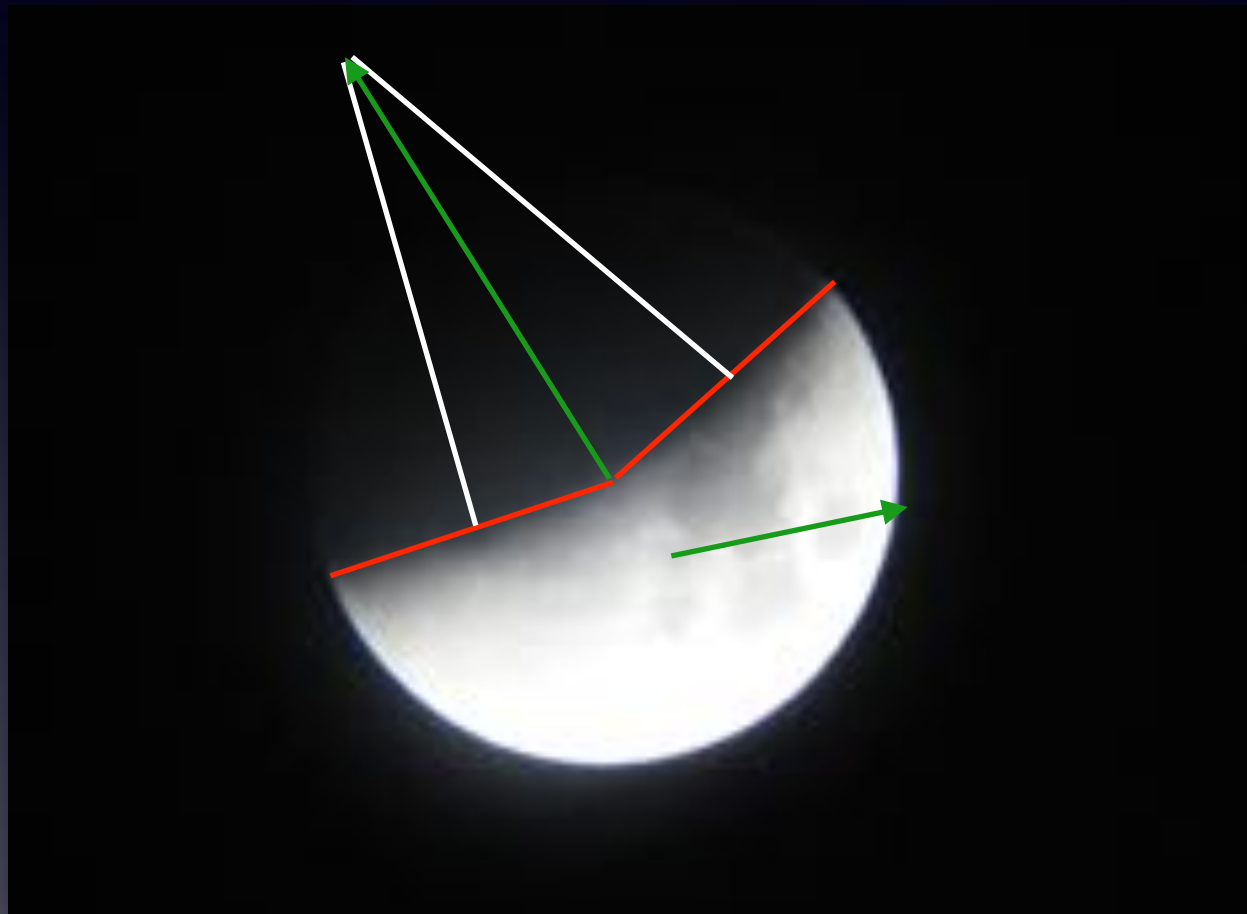
El valor de la distància de la Terra a la Lluna ja el coneixem. Per tant:

$$R_{\mathcal{C}} \approx \frac{R_{\oplus}}{3}$$

(En realitat és 0.27 vegades el radi terrestre)

SEGON ESGLAÓ

La Lluna



Dos segles més tard

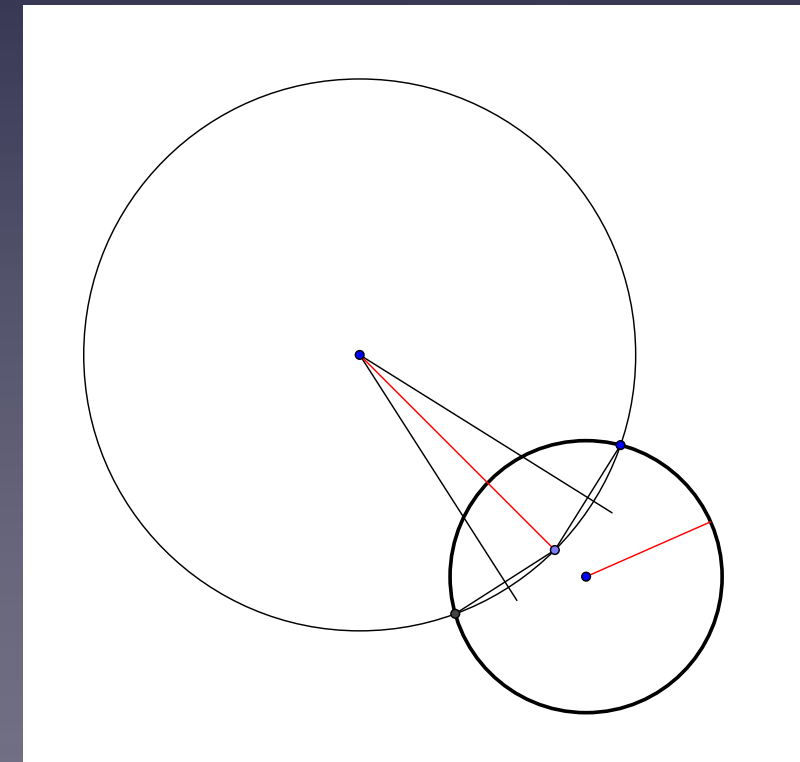
Hiparc de Nicea (190-120 a.C.)

va fer servir

una altre mètode

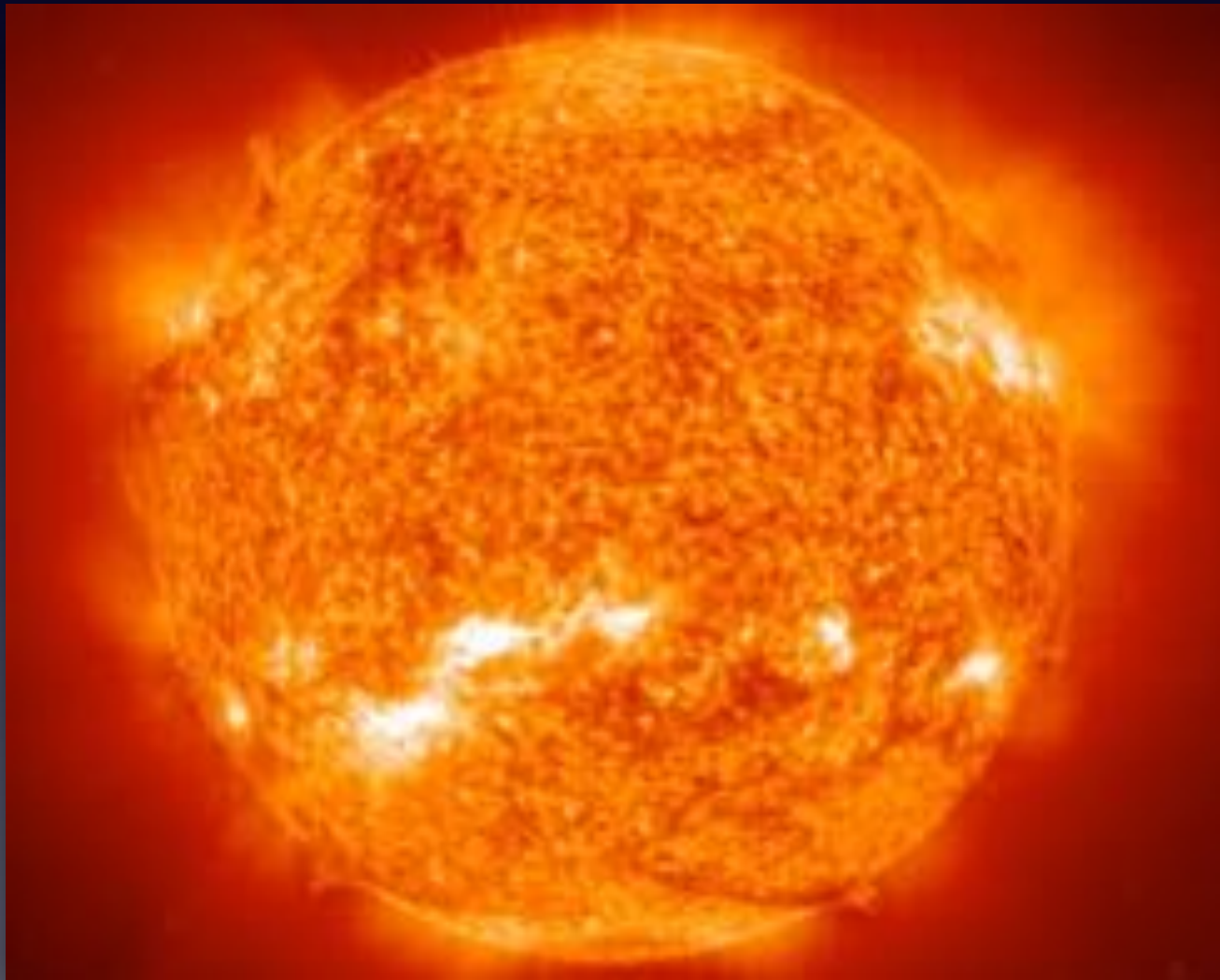
$$R_{\text{L}} \approx \frac{R_{\oplus}}{3.7}$$

Dona un valor més bo: 1719 km



TERCER ESGLAÓ

El Sol



- Tamany
- Distància a la Terra

Van tenir certs **problemes de precisió**

El mètode de càlcul es va basar en les mesures de la lluna i en els **eclipsis** de sol.

TERCER ESGLAÓ

El Sol



Eclipsi solar a Zimbabwe, desembre 2002

En un eclipsi de Sol la Lluna
cobreix perfectament el Sol

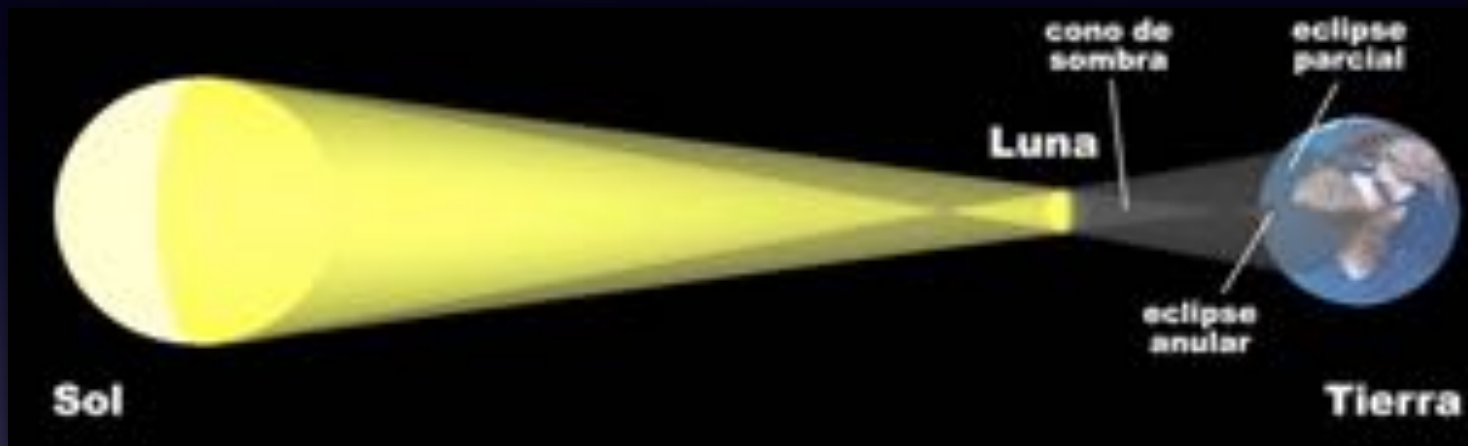
Fent servir triangles semblants
i el teorema de Tales, Aristarc
va demostrar que

$$R_{\odot} = \frac{d_{\oplus\odot}}{180}$$

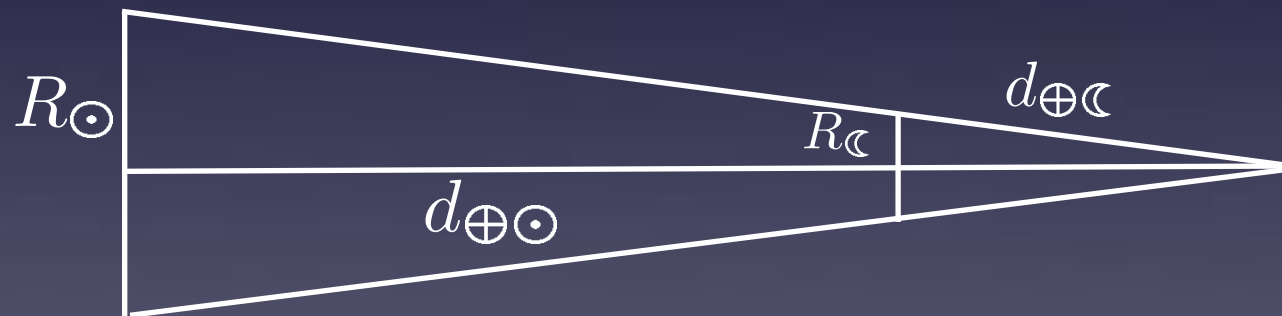
Vegem com!

TERCER ESGLAÓ

El Sol



La distància Terra-Sol és
180 vegades el radi de Sol



$$\frac{R_{\odot}}{d_{\oplus\odot}} = \frac{R_{\lrcorner}}{d_{\oplus\lrcorner}} = \frac{R_{\lrcorner}}{180R_{\lrcorner}} \implies$$

$$R_{\odot} = \frac{d_{\oplus\odot}}{180}$$

Conèixer la distància Terra-Sol **equivale** a conèixer el radi del Sol

TERCER ESGLAÓ

El Sol

Quart minvant

Lluna Plena



Terra

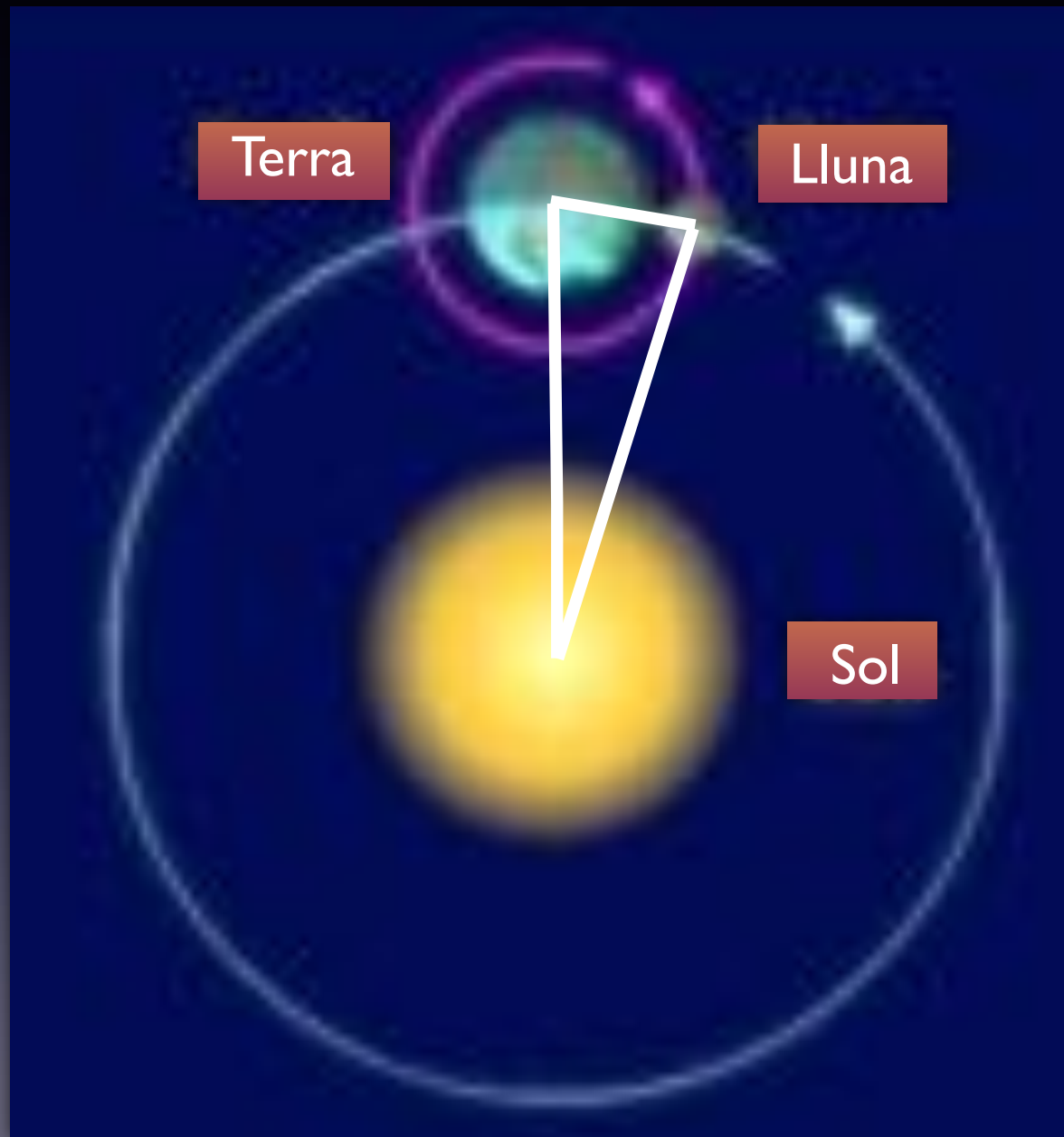
Lluna

Quart creixent

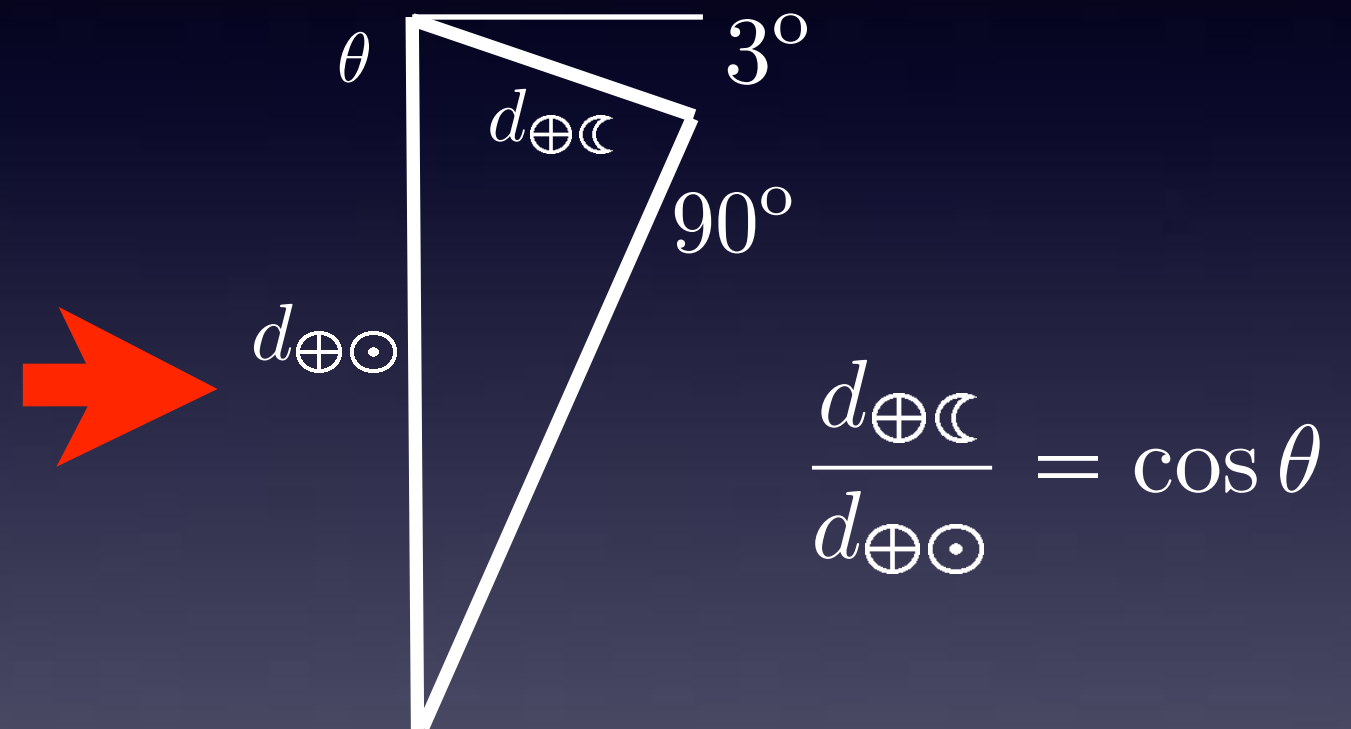
Lluna Nova

Sol

TERCER ESGLAÓ



El Sol



Si en 1 mes recorre 360° en 6 hores recorre 3° (exercici). Llavors

$$\theta = 90^\circ - 3^\circ = 87^\circ$$

$$d_{\oplus\odot} \approx 20 \cdot d_{\oplus\lrcorner}$$

Els quarts es donen **més a prop** de la lluna nova que la plena. Aristarc: **6 hores** de diferència entre el quart i el punt mig entre lluna nova i lluna plena

TERCER ESGLAÓ

El Sol

$$d_{\oplus\odot} \approx 20 \cdot d_{\oplus\text{C}}$$

Aristarc no tenia bons rellotges ni telescopi.
Es va equivocar! El temps real entre el quart
i el punt mitjà és de 1/2 hora!

$$d_{\oplus\odot} \approx 390 \cdot d_{\oplus\text{C}}$$

El raonament i la
matemàtiques eren correctes

TERCER ESGLAÓ

El Sol

A partir de $d_{\oplus\odot} \approx 20 \cdot d_{\oplus\lrcorner}$

Aristarc va deduir una cosa MOLT IMPORTANT

El Sol és molt més gran que la Terra

$$R_{\odot} \approx 7 \cdot R_{\oplus} \quad (\text{Exercici!})$$

En realitat és $R_{\odot} \approx 109 \cdot R_{\oplus}$

Va dir: *‘És absurd que el Sol giri al voltant de la Terra’*

La teoria heliocèntrica d'Aristarc de Samos **no va ser acceptada** pels grecs. Copèrnic li va donar crèdit
1700 anys després

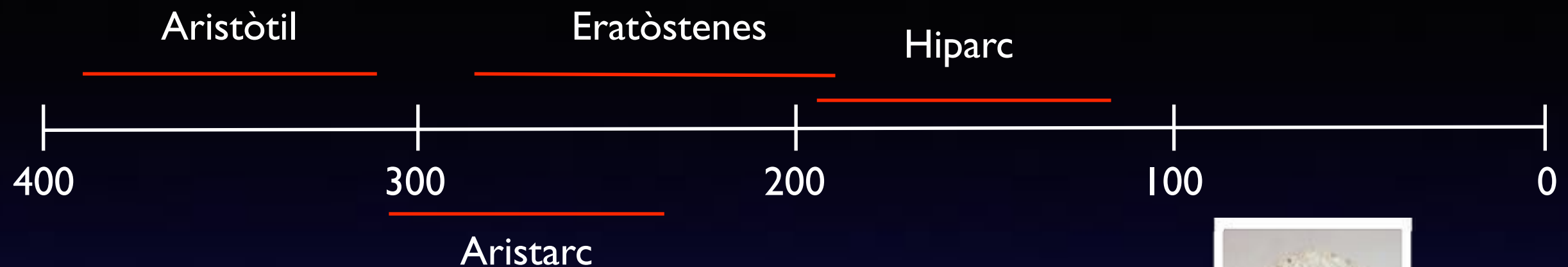
TERCER ESGLAÓ

El Sol

Distancia Terra-Sol
| 49.597.871 km

Unitat Astronòmica UA





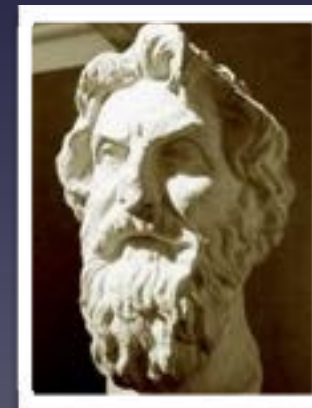
Aristòtil: la Terra i la lluna són esfèriques

Treballs en lògica, física, metafísica, ètica, retòrica etc.



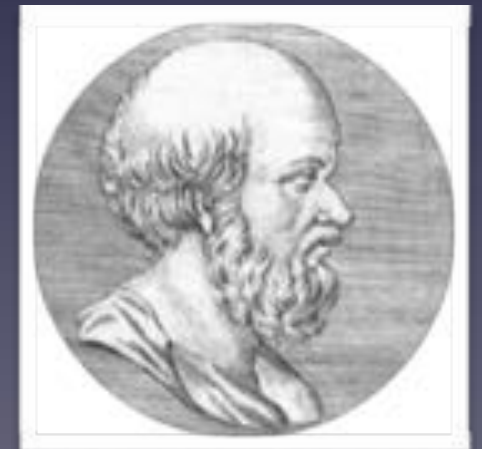
**Aristarc: distàncies al sol i la lluna,
model heliocèntric.**

Astrònom i matemàtic



Eratòstenes: radi de la Terra

Matemàtic, astrònom i geògraf



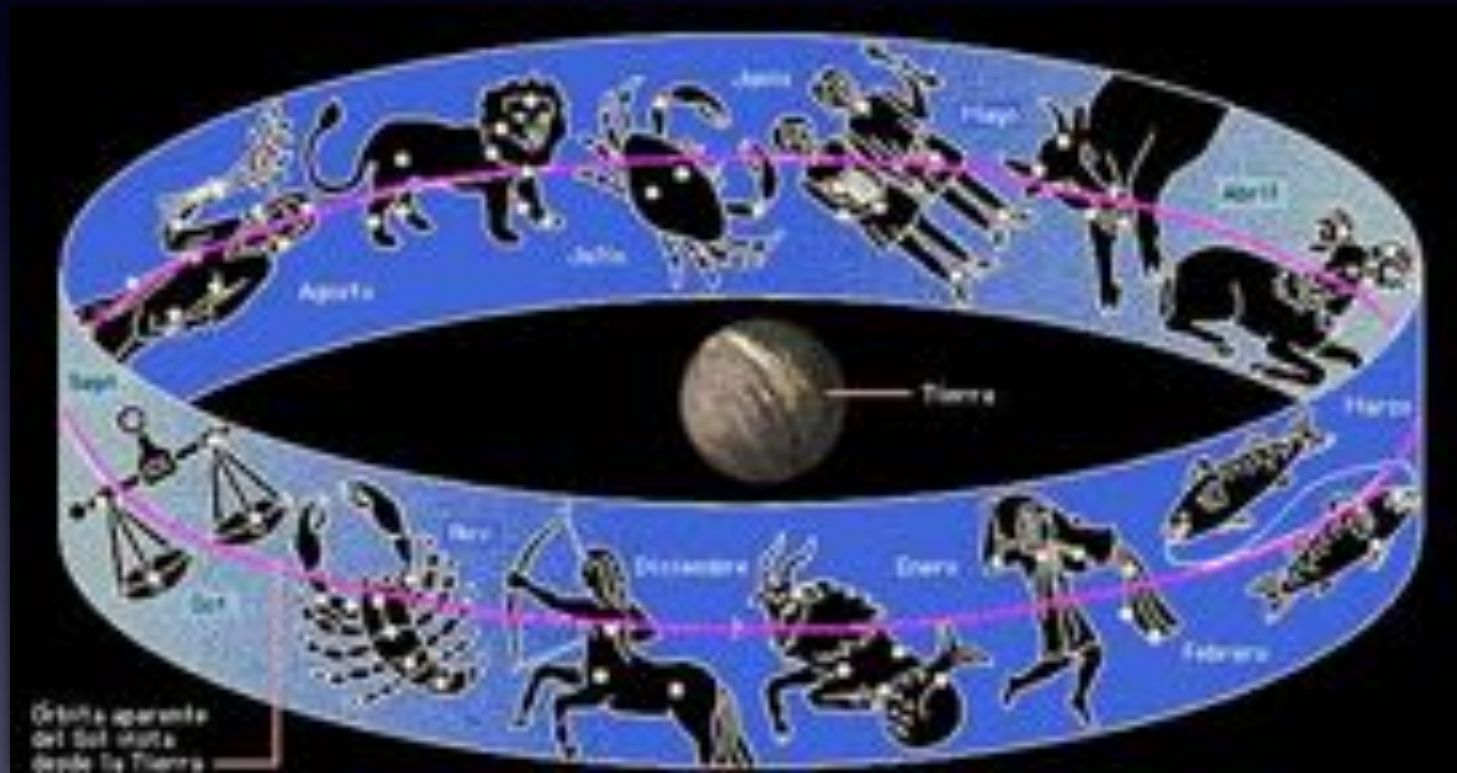
Hiparc: millora la distància a la lluna

Matemàtic, astrònom i geògraf



QUART ESGLAÓ

Els Planetes



Els astròlegs antics sabien que els planetes es movien en un pla (determinat per l'eclíptica). Es movien al voltant del **Zodiàc**.

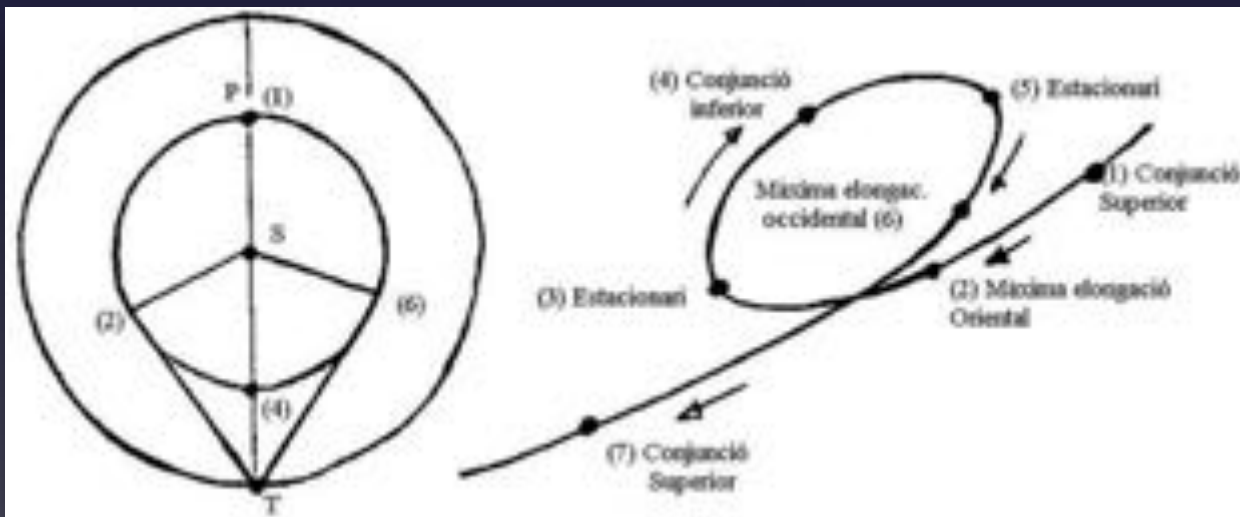
Problema bidimensional

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Qüestions

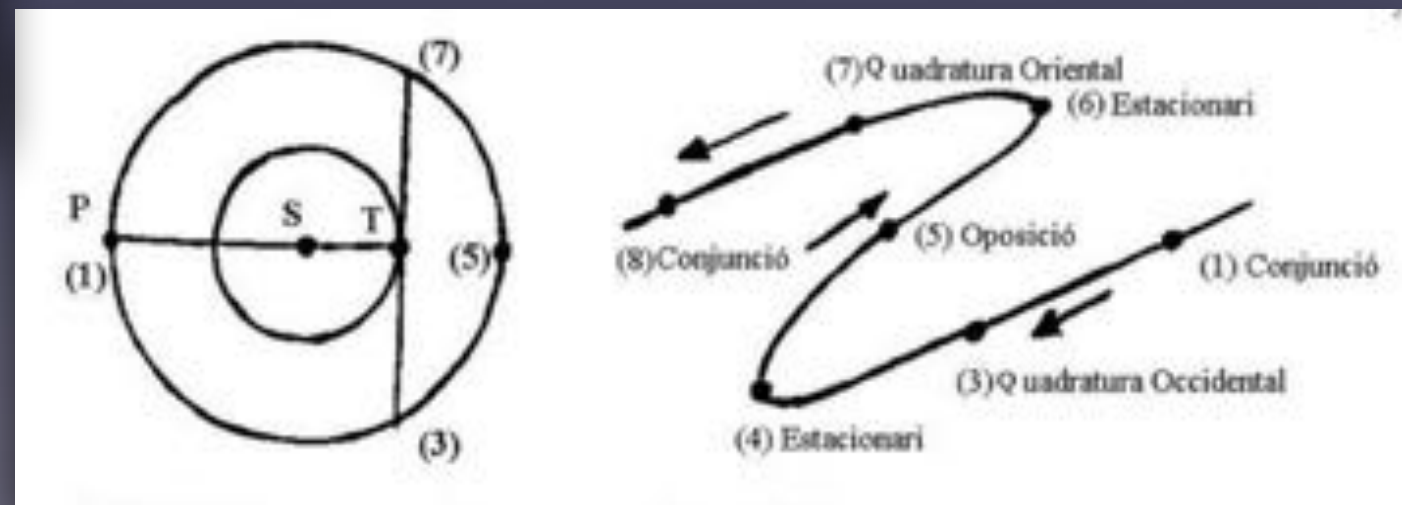
- Quina distància hi ha els planetes?
- Com són les seves òrbites?
- Quant triguen a completar una òrbita?



Moviment d'un planeta *interior*

**Salt en el temps.
Anem al segle XV d.C.
(passant pel II d.C.)**

El moviment dels planetes és molt estrany: ara van a l'est, ara a l'oest, s'aturen ...



Moviment d'un planeta *exterior*

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Ptolomeu va obtenir respostes poc precises doncs treballava amb un model geocèntric (epicicles)

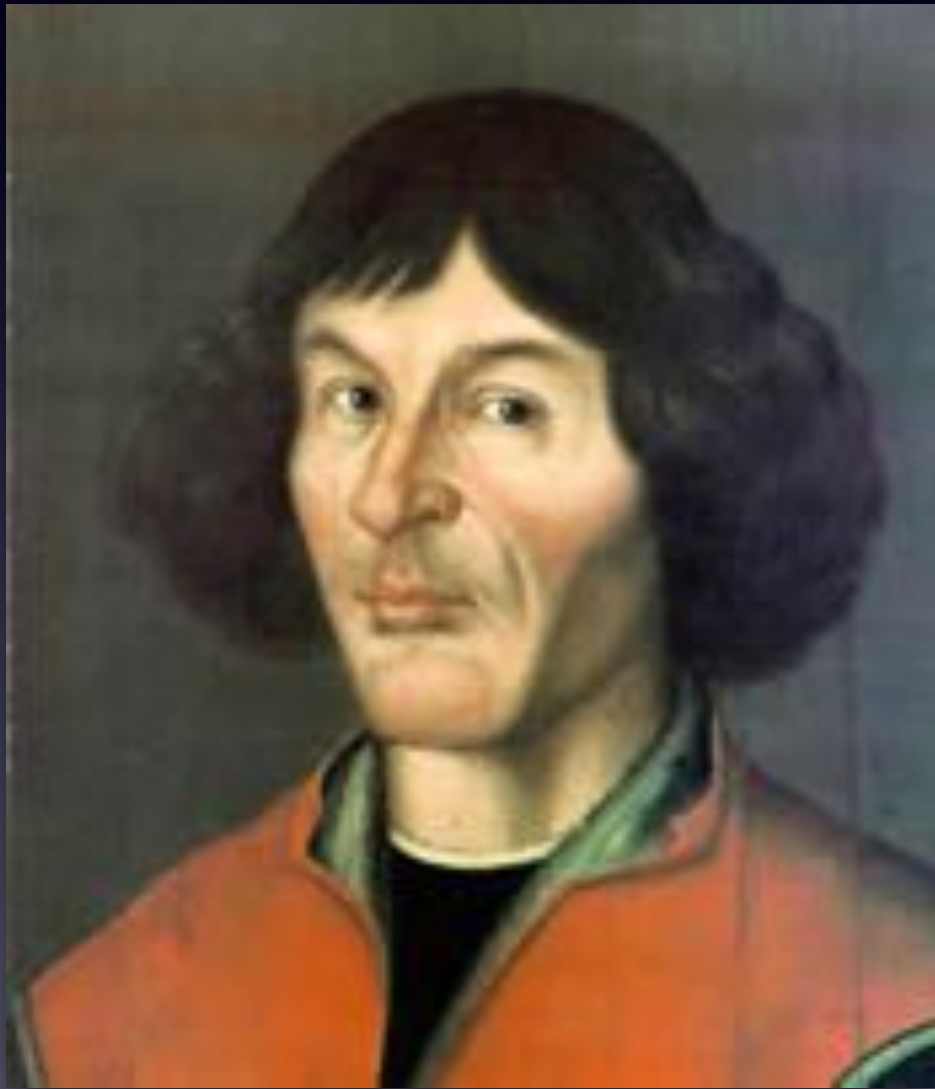


Claudi Ptolomeu (90-168 d.C.)
Astrònom, químic, geògraf i
matemàtic greco-egipci (Alexandria)



QUART ESGLAÓ

Els Planetes



La primera persona que va obtenir respostes precises va ser Nicolau Copèrnic (1473-1543).

Disposava de moltíssimes dades dels Babilonis. Sabia que el **moviment aparent** de Mart es repetia cada 780 dies

(Volta a la mateixa constel.lació)

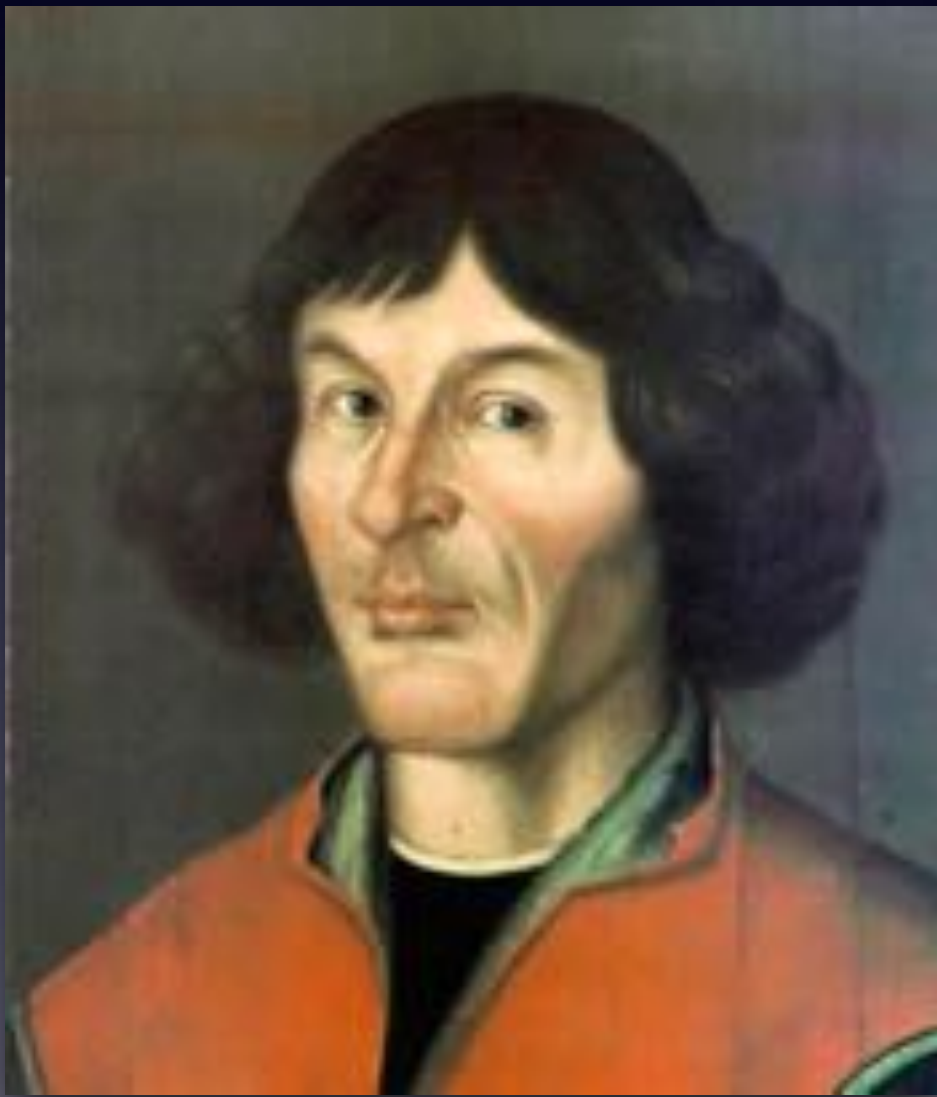
Babilonis → Grecs → Àrabs → Europa

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

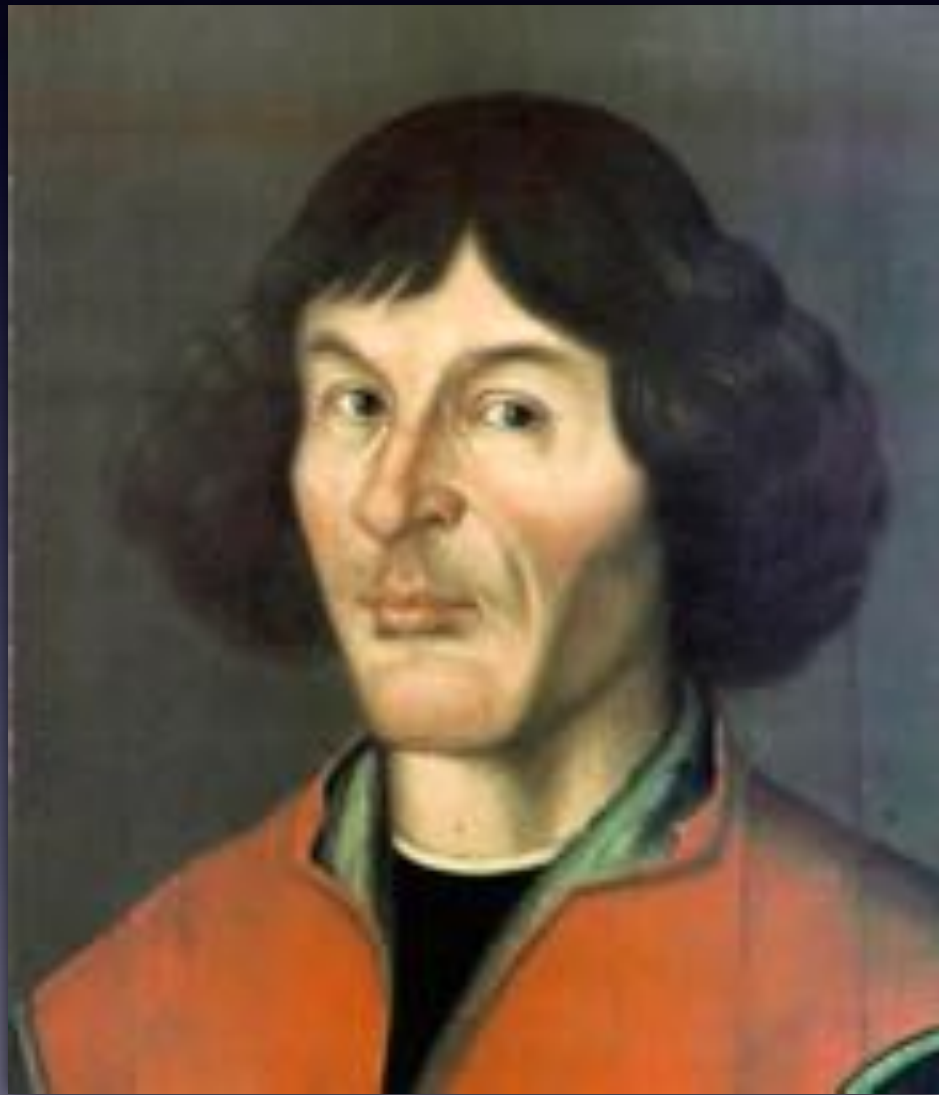
Va assumir els següents **postulats**

- El món és esfèric
- La Terra és esfèrica
- El moviment dels cossos celestes és uniforme, circular o compost de moviments circulars
- El moviment de la Terra d'oest a est s'observa com un moviment de la volta celeste en sentit contrari
- La Terra no és el centre del món, ho és el Sol



QUART ESGLAÓ

Els Planetes



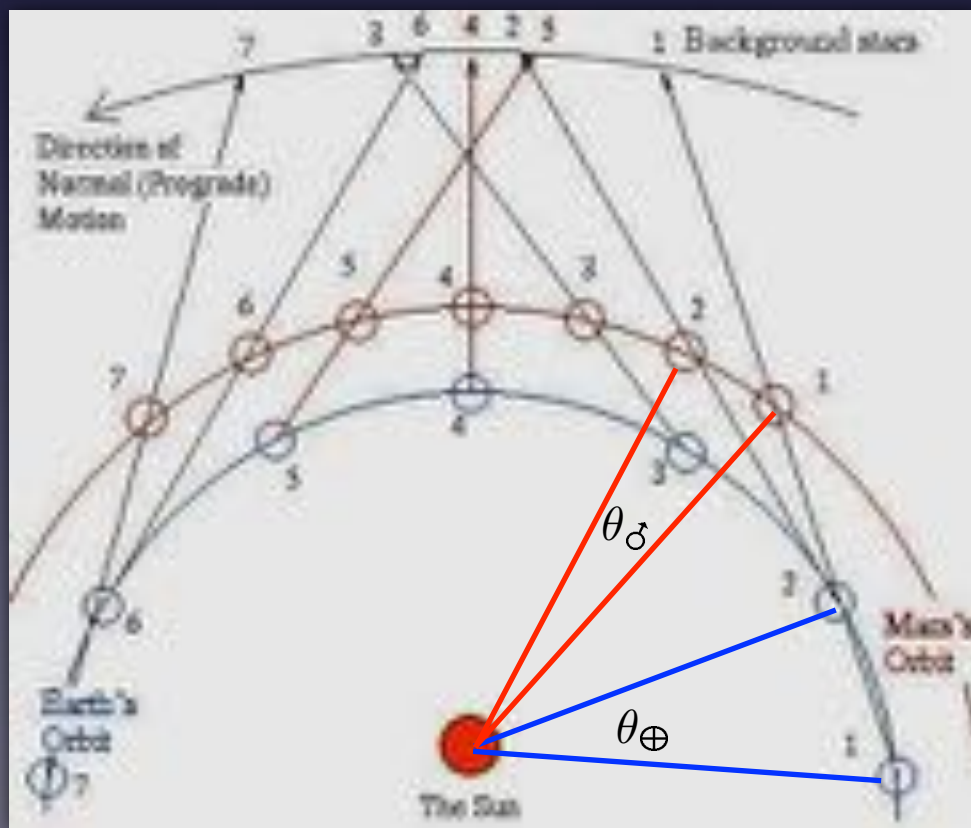
Va assumir els següents **postulats**

- El cel és immens en comparació amb la Terra
- Els moviments retrògrads dels planetes són aparents, són deguts al moviment de la Terra al voltant del Sol
- Els planetes es mouen de forma concèntrica al voltant del Sol en l'ordre: Mercuri, Venus, Terra, Mart, Jupiter i Saturn
- La Lluna gira al voltant de la Terra

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Velocitat angular de la Terra $\omega_{\oplus} = \frac{1}{365}$
(1/365 parts de circumferència per dia)



Velocitat angular de Mart $\omega_{\mars} ?$

Però $\omega_{\oplus} - \omega_{\mars} = \frac{1}{780}$ (1/per. **sinòdic**)

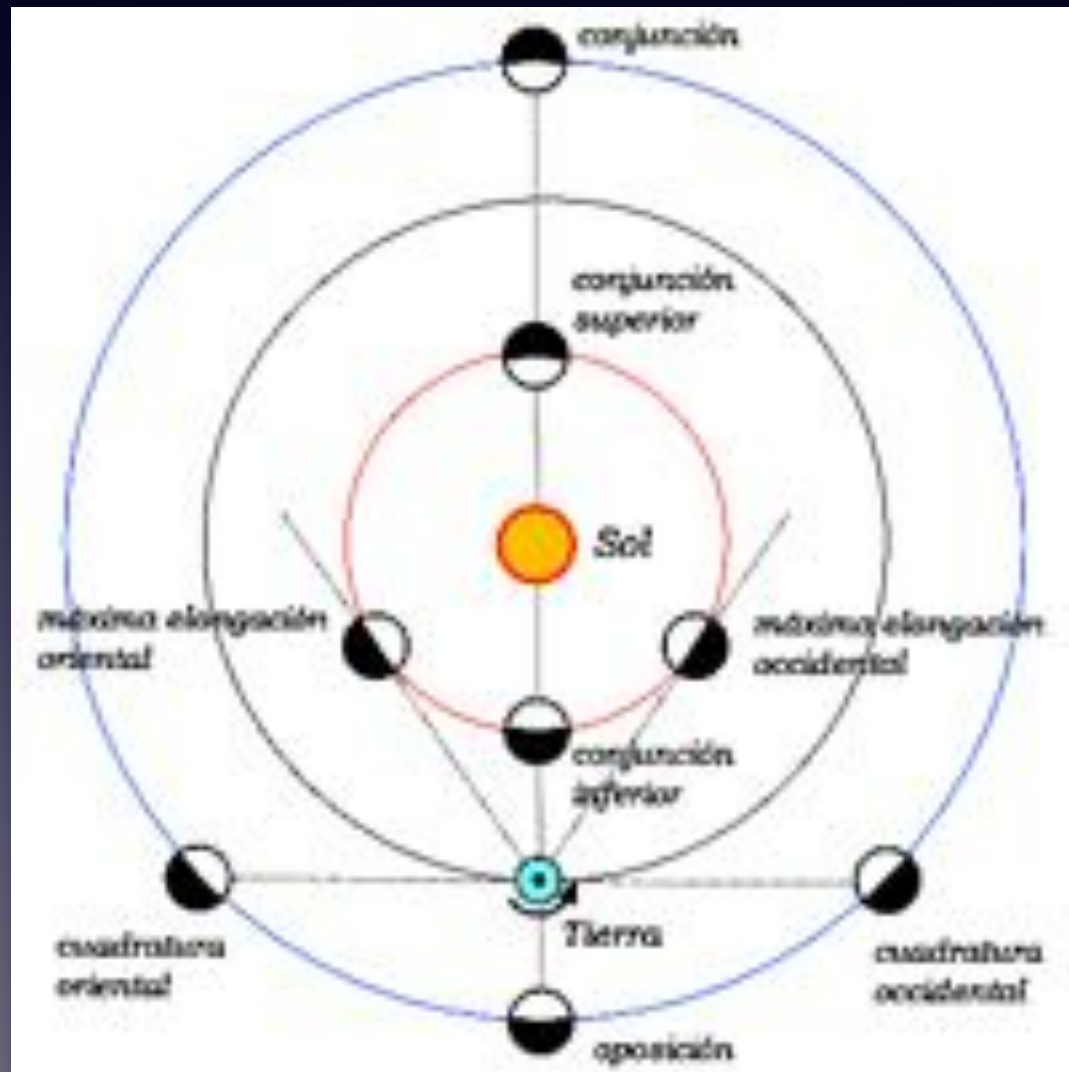
Lavors $\omega_{\mars} \approx \frac{1}{687}$ (1/per. **sideral**)

El període de Mart és 687 dies

$$(\theta_{\mars})' = \omega_{\mars} \quad (\theta_{\oplus})' = \omega_{\oplus} \quad \omega_{\oplus} - \omega_{\mars} = (\theta_{\oplus} - \theta_{\mars})'$$

QUART ESGLAÓ

Els Planetes



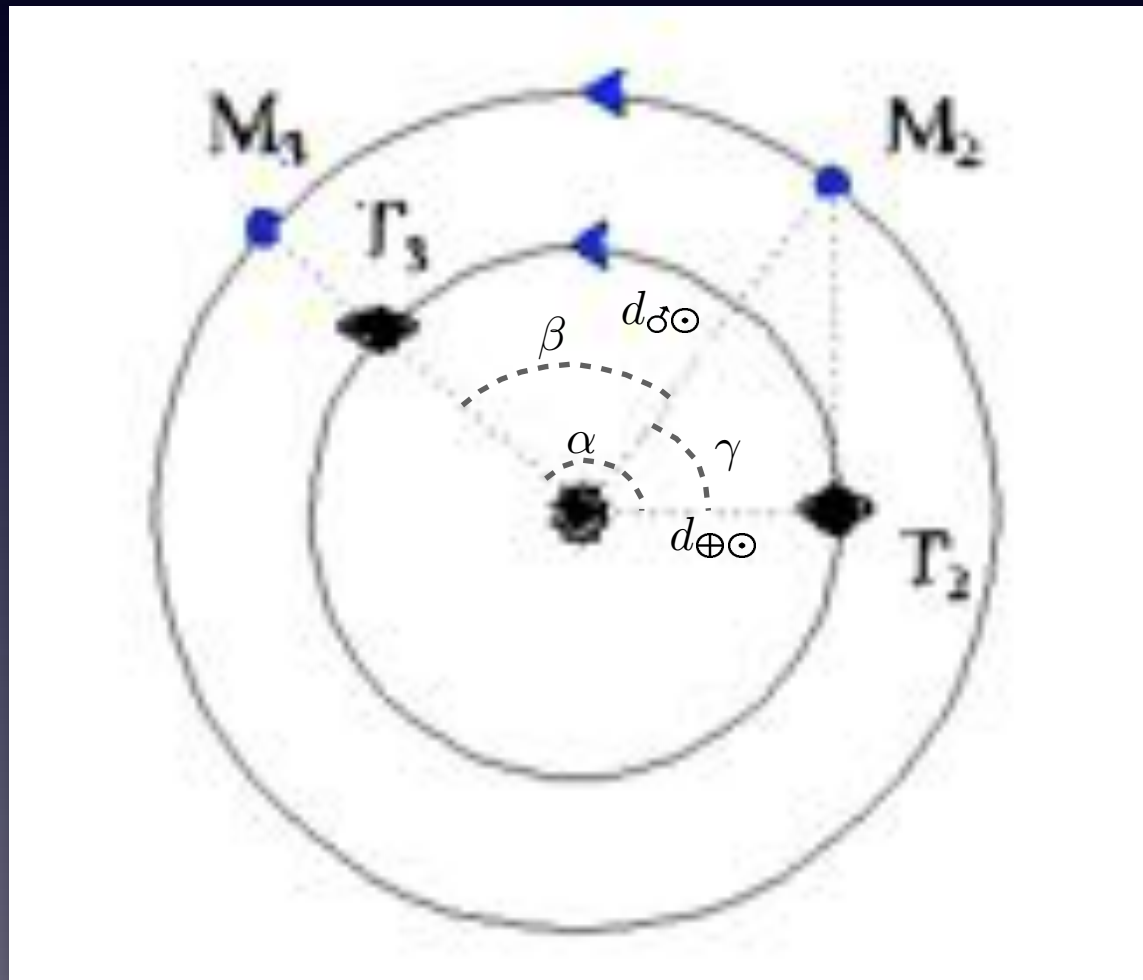
Posicions dels planetes respecte Terra i Sol

- Elongació: angle Planeta-Terra-Sol
- Conjunció: Sol entre Terra i Planeta
- Oposició: Terra entre Sol i Planeta
- Quadratura: elongació de 90°

Copèrnic sabia que Mart completa l'òrbita en **687**, la Terra en **365** i que de la quadratura a l'oposició passen **106** dies.

QUART ESGLAÓ

Els Planetes



$$\gamma = \alpha - \beta \quad \frac{d_{\oplus\odot}}{d_{\mars\odot}} = \cos \gamma$$

$$\alpha = \frac{106 \cdot 2\pi}{365.25} \approx 1.82$$

$$\beta = \frac{106 \cdot 2\pi}{687} \approx 0.97$$

$$\gamma \approx 0.85 \quad d_{\mars\odot} = \frac{d_{\oplus\odot}}{\cos \gamma}$$

$$d_{\mars\odot} \approx 1.52 \cdot d_{\oplus\odot}$$

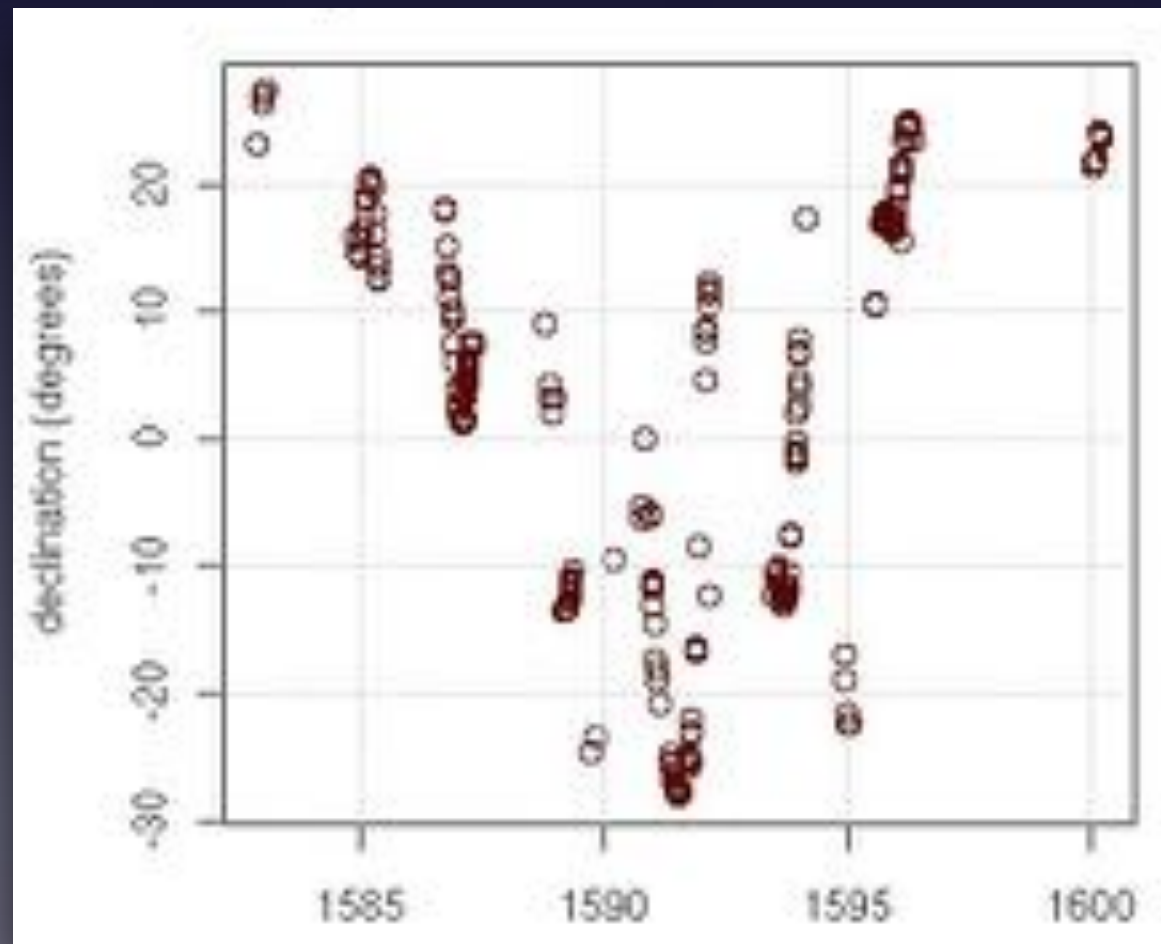
QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Declinacions de Mart de Brahe es **desviaven** de les de Copèrnic



Tycho Brahe (1546–1601)



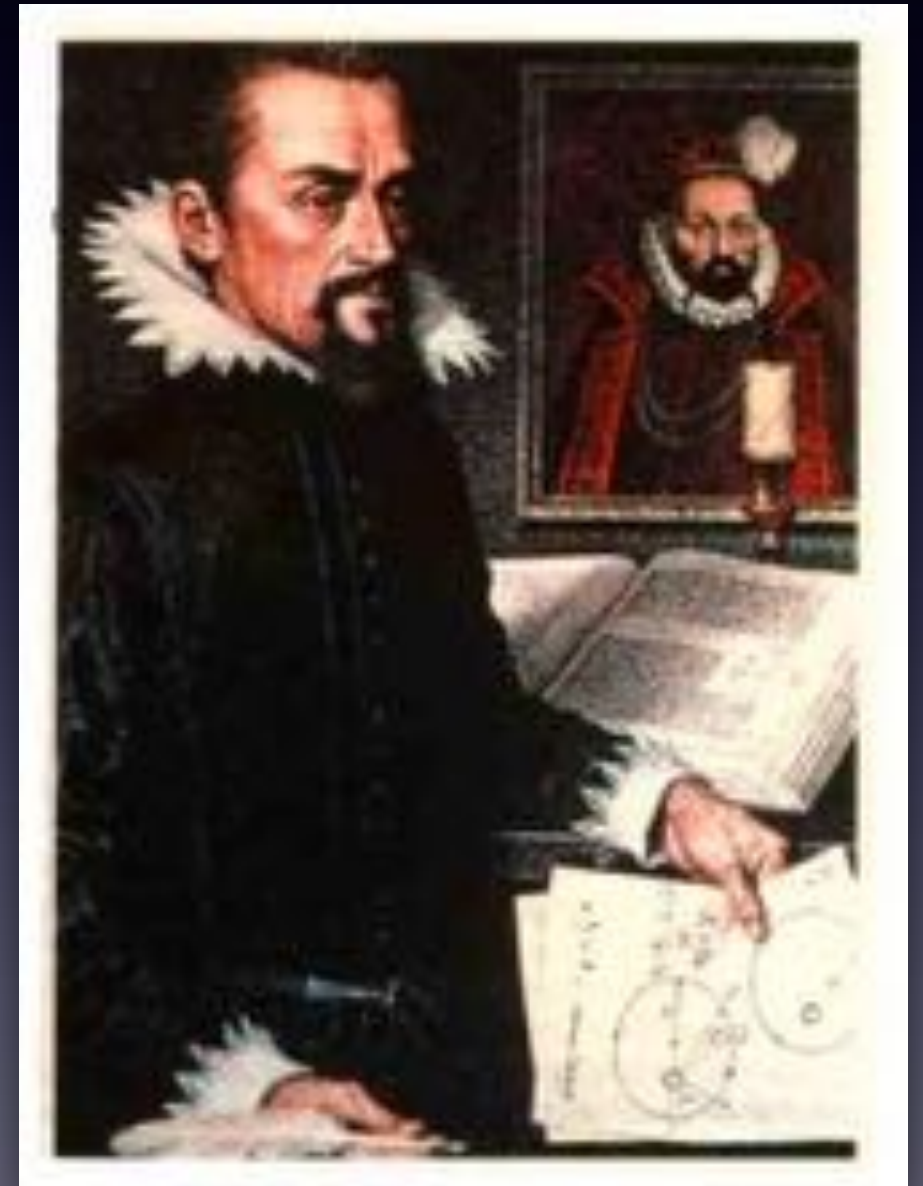
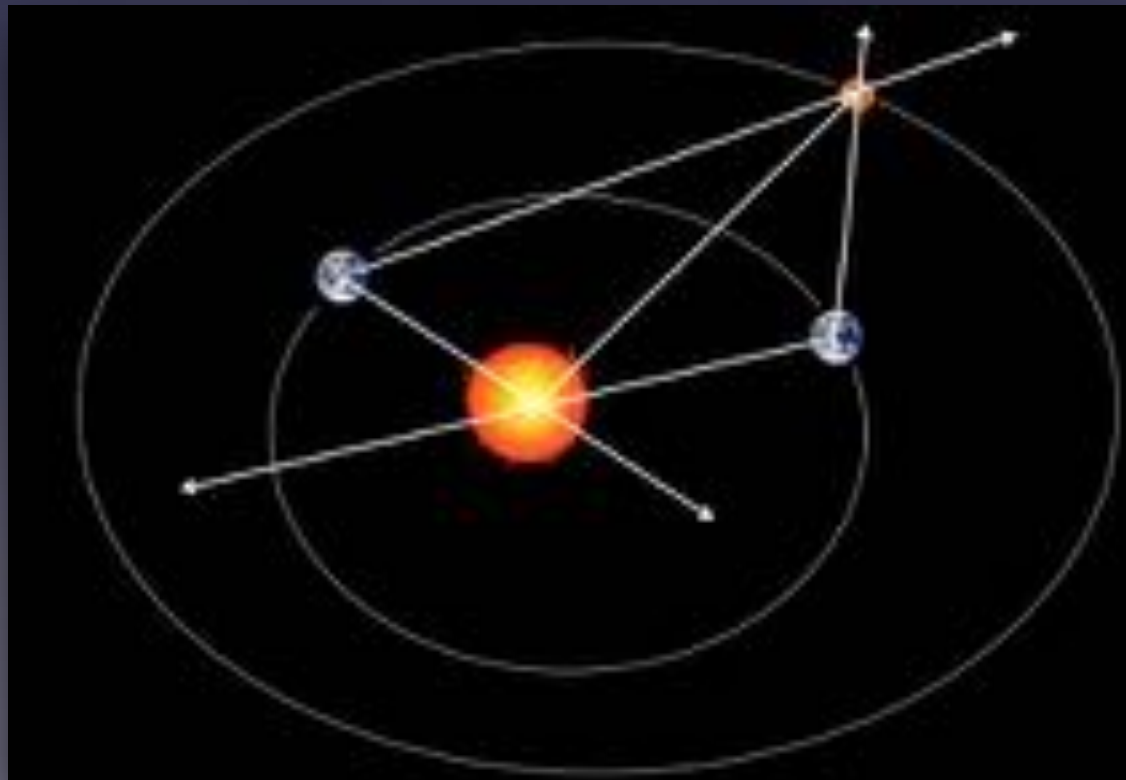
(Declinació ve a ser l'angle de les coordenades polars)

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Kepler utilitza el moviment de Mart i mètodes de **triangulació** (com el GPS) per deduir la forma de l'òrbita de la Terra:

No és perfectament circular!



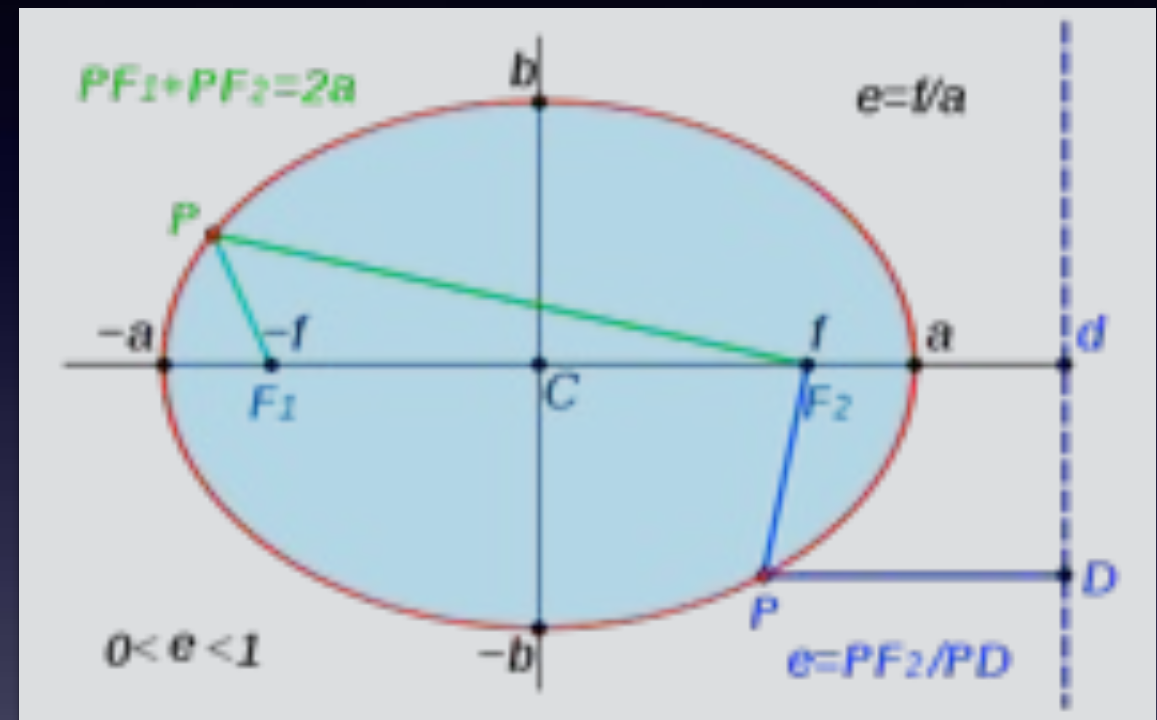
Johannes Kepler (1546–1601)
(Tycho Brahe al fons)

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

A partir de
l'òrbita de la
Terra dedueix la
forma de l'òrbita
de Mart

El.lipse

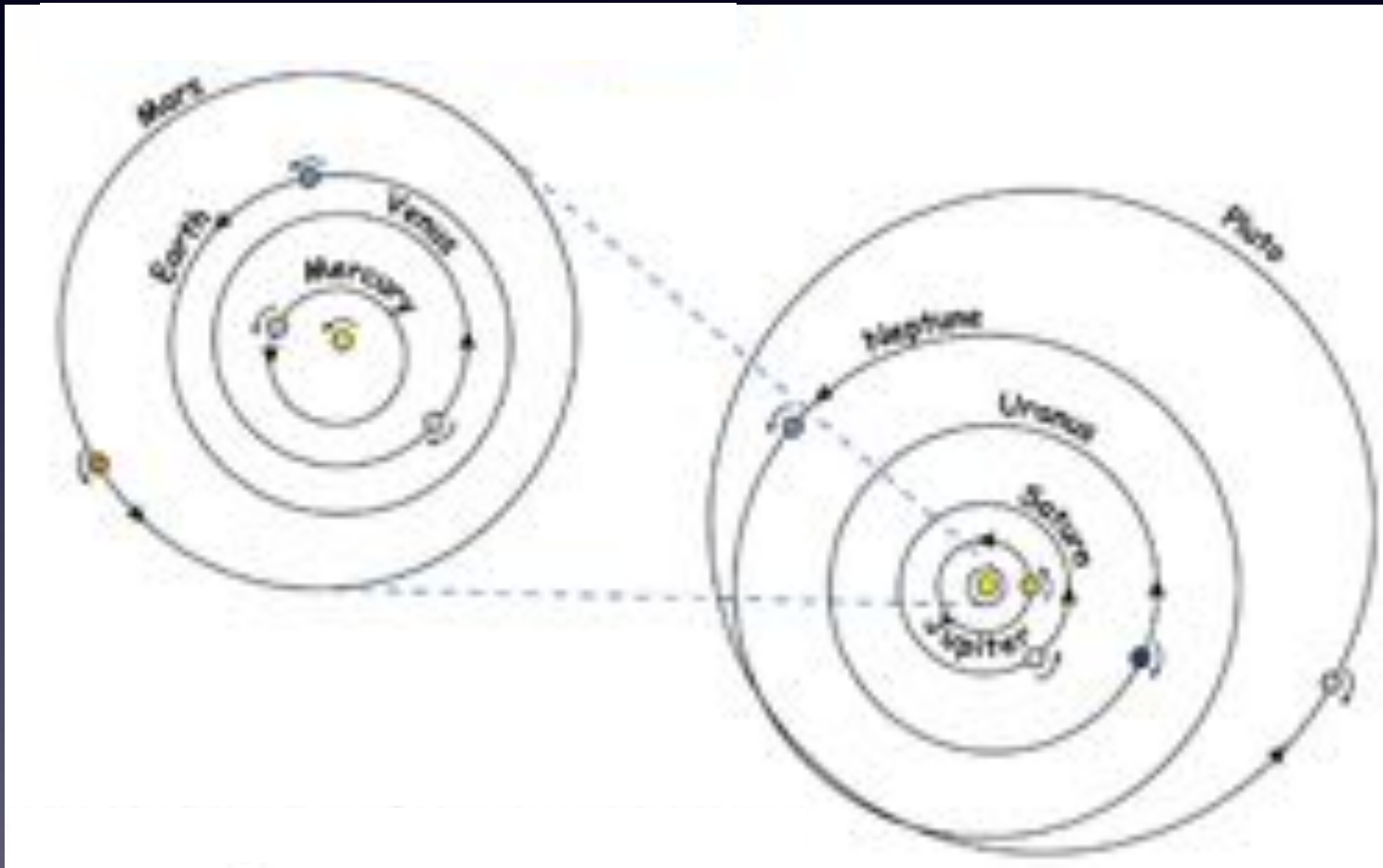


Punts tals que la suma de les distàncies a dos punts fixos (**focus**) és constant

Excentricitat indica la forma d'una el·lipse. Si **e** cap a zero, més arrodonida

QUART ESGLAÓ

Els Planetes



L'excentricitat de l'òrbita de la Terra és molt petita, de manera que l'òrbita és gairebé circular.

L'excentricitat orbital de la Terra és menor a 0.2.

L'òrbita de Plutó és la **més excèntrica**.
Excentricitat 0.25.

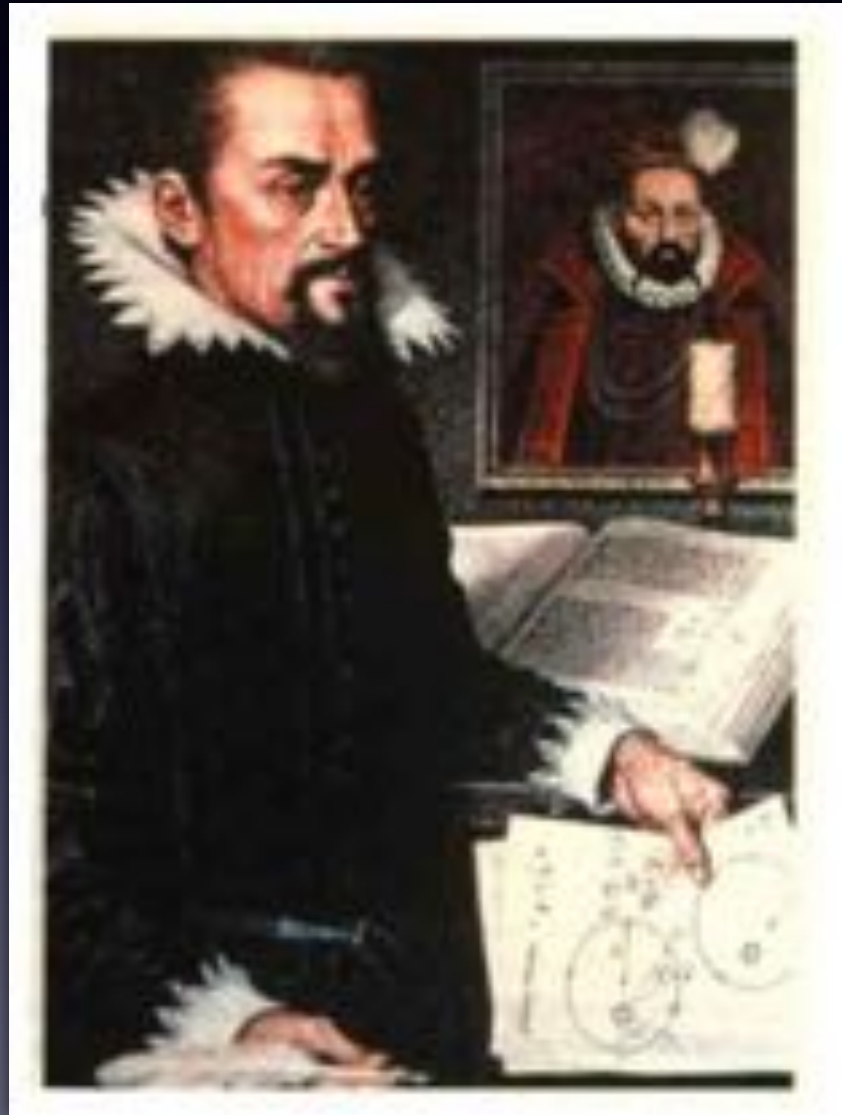
Molts objectes tenen òrbites extremadament excèntriques. Per exemple, el cometa Halley, té una excentricitat orbital de gairebé 0.97!

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Lleis de Kepler (1609-1618)

1. Les òrbites dels planetes són **el.lipses** i el Sol està en un dels focus
2. El radi vector que uneix un planeta i el Sol escombra **àrees iguals en temps iguals**
3. Per a qualsevol planeta, el quadrat del seu període orbital és directament proporcional al cub de la longitud del semieix major de la seva òrbita el.líptica



$$m \cdot r \cdot v = L$$

En **l'afeli** la velocitat és menor que en el **periheli**

$$\frac{T^2}{D^3} = k$$

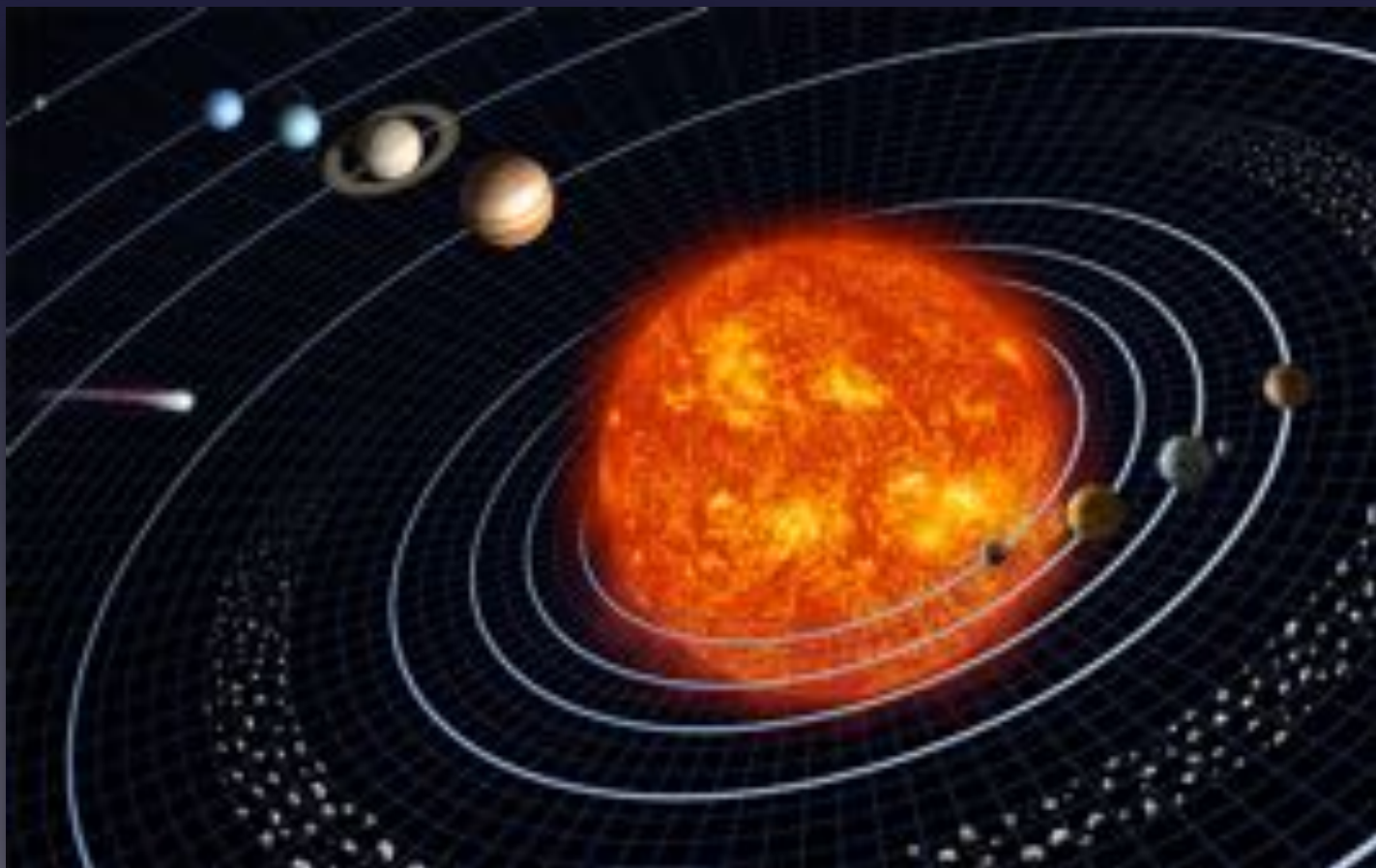
Període i distància al sol estan relacionats

La constant **k** només depèn de la massa central, el Sol. Podem trobar les distàncies en el sistema solar només coneixent una d'elles.

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Això va permetre a Isaac Newton
(1643-1727) formular la
Llei de la Gravetat



‘Tot parell de masses són **atretes** amb una força proporcional a les seves masses i inversament proporcional al **quadrat** de la seva distància ’

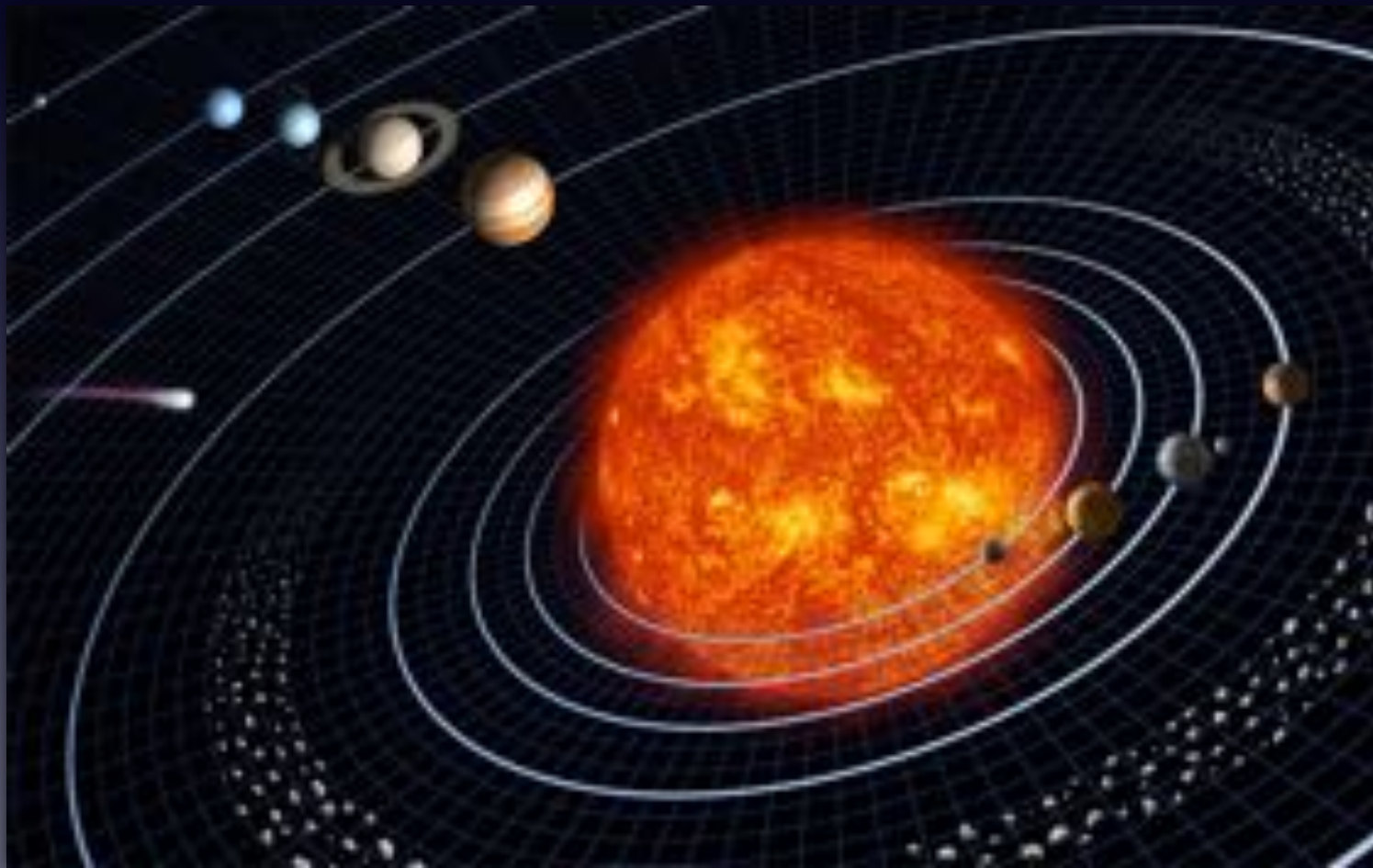
$$|F| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

m_1 — r — m_2

(Les lleis de Kepler es dedueixen de la Llei de Gravitació Universal)

QUART ESGLAÓ

Els Planetes



Va ser possible
determinar fàcilment
les distàncies dels
planetes al Sol

Mercuri: 0.307-0.466 UA
Venus: 0.718-0.728 UA
Mart: 1.36-1.66 UA

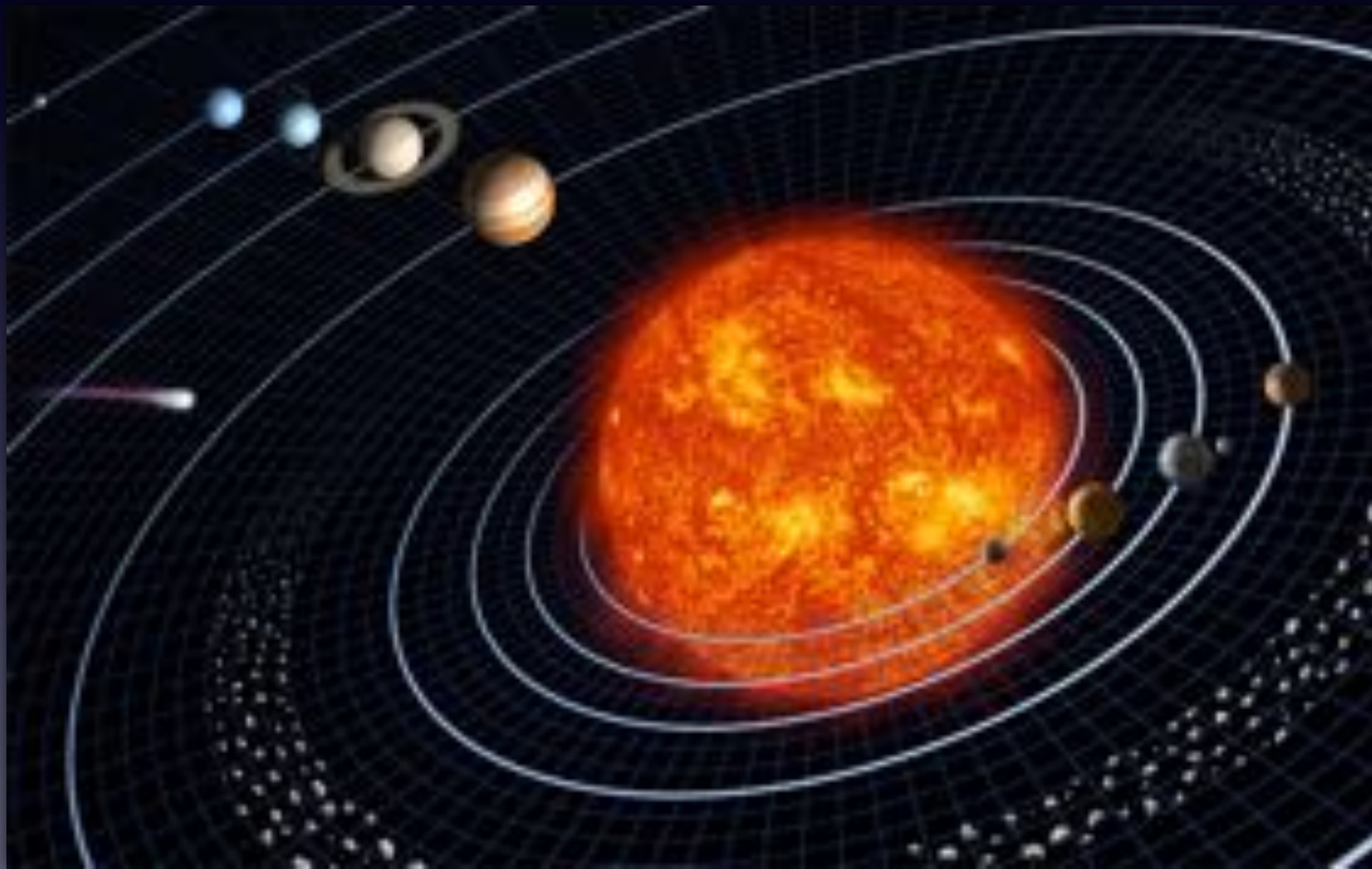
Terra: 0.98-1.1 UA

Júpiter: 4.95-5.46 UA
Saturn: 9.05-10.12 UA
Urà: 18.4-20.1 UA
Neptú: 29.8-30.4 UA

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Llei de Bode
(imprecisa, casuística)



Planeta	k	Distància llei T-B	Distància real
Mercuri	0	0,4	0,39
Venus	1	0,7	0,72
Terra	2	1,0	1,00
Mart	4	1,6	1,52
Cinturó d'asteroides ^[1]	8	2,8	2,77
Júpiter	16	5,2	5,20
Saturn	32	10,0	9,54
Urà	64	19,6	19,2
Neptú	n/a ^[2]		30,06
Plutó	128	38,8	39,44

$$d_n = \frac{4 + 3n}{10}, \quad n = 0, 1, 2, 2^2, 2^3, \dots$$

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum



Encara que no és una unitat d'espai, la velocitat de la llum c és fonamental en l'escala de distàncies còsmiques

Com es va calcular?

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

A principis del segle XVII molts científics pensaven que la llum viatjava a qualsevol distància de forma **instantània**

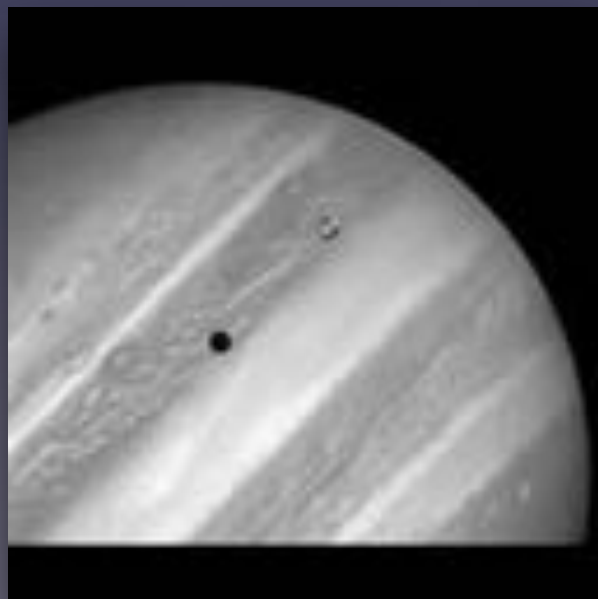


Galileu no s'ho va creure i va voler mesurar-la. El mètode que va proposar no va funcionar.

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

El primer càlcul que va demostrar que la llum no viatja de forma instantània ho va fer Ole Roemer en 1670



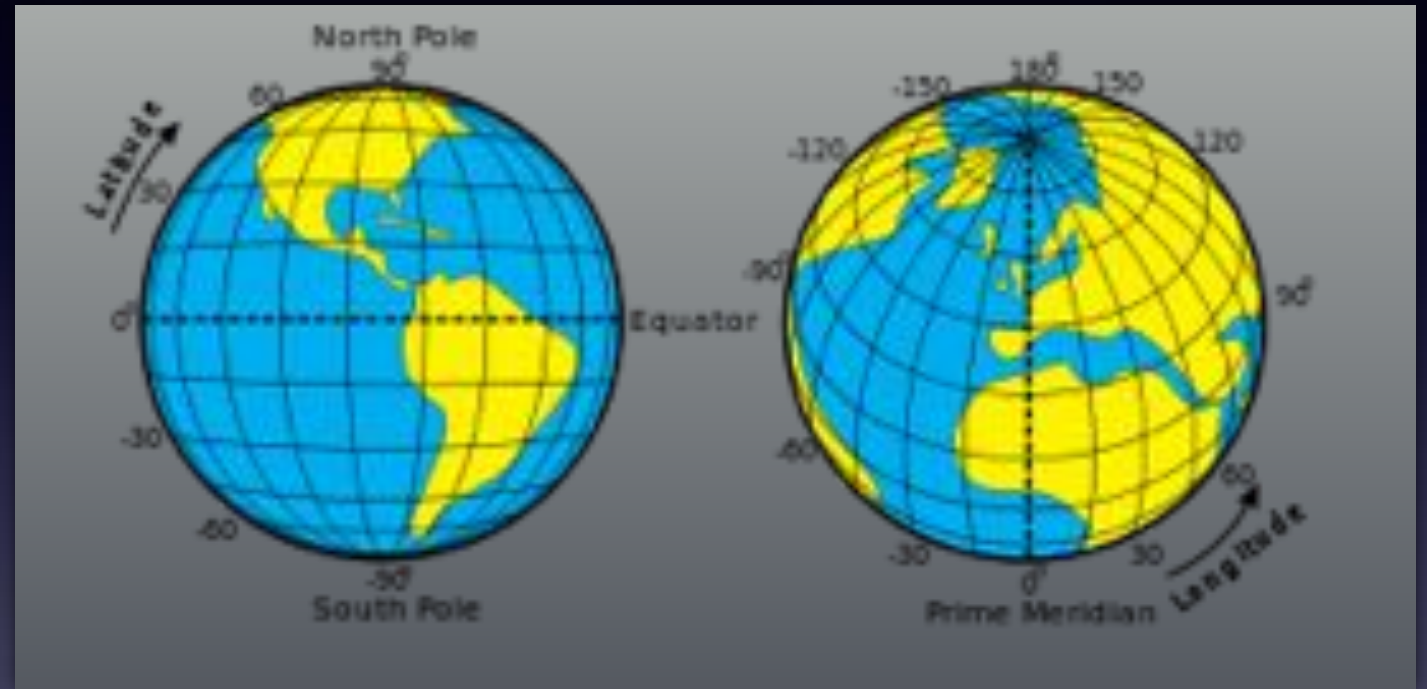
Va estudiar
l'ocultació del
satèl.lit **Io** de Júpiter

- Rellotges
- Telescopis
- Instruments de mesura

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

Gran problema de l'època: calcular la **longitud geogràfica** (en un vaixell).



Cal conèixer: l'hora en el punt de longitud desconeguda i l'hora en el meridià de referència.
La diferència ens donarà la longitud.

Rellotges sense **precisió**

Mètodes astronòmics

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

Procediment:

observar un

esdeveniment còsmic →

que es pogués veure des de
diferents punts de la Terra.

- **Eclipsis** de la lluna (pocs)
- **Ocultació** d'estrelles per la lluna
- Eclipsis de les llunes de **Júpiter**
- **Distància** de la lluna: angle entre lluna i objecte de referència, alçada a l'horitzó

Sabent l'hora a la que succeïa
l'esdeveniment en el **meridià de referència**
és possible conèixer la diferència horària
entre aquest punt i el punt del qual volem
conèixer la longitud.



Cal: estabilitat, taules i equacions trigonomètriques

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

Eclipsis de lluna: **POCS**

Eclipsis d'Ío: cada **42 hores** i mitja

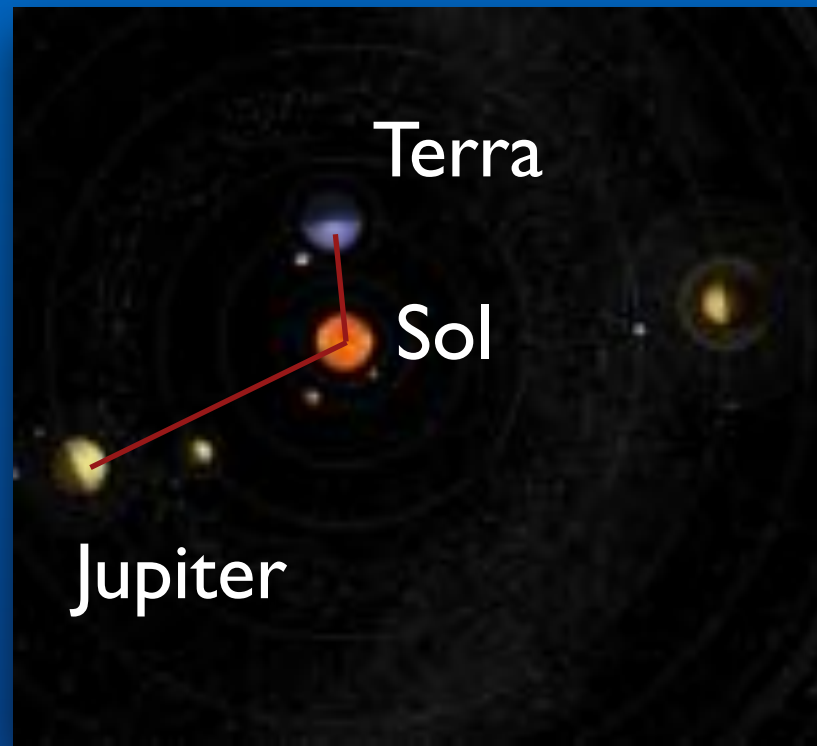
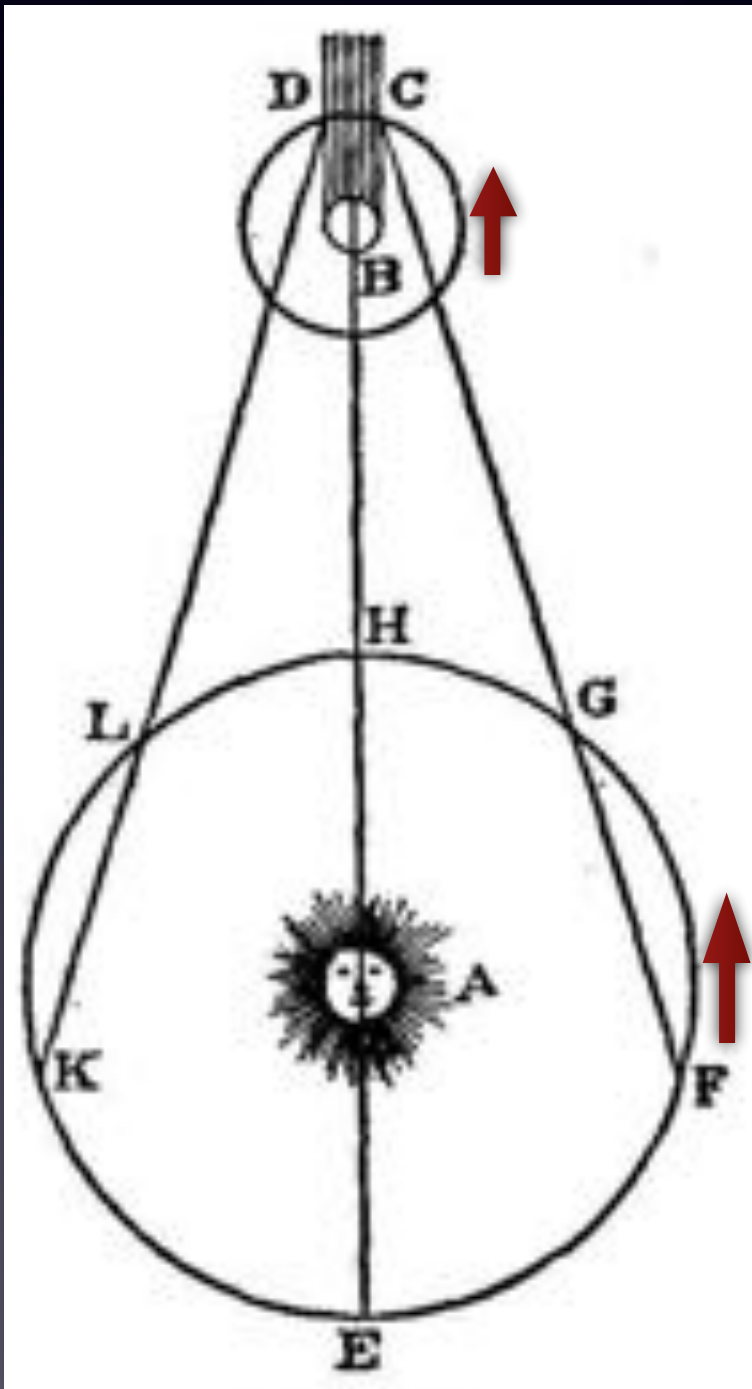


Es tenien taules dels eclipsis al meridià de referència.

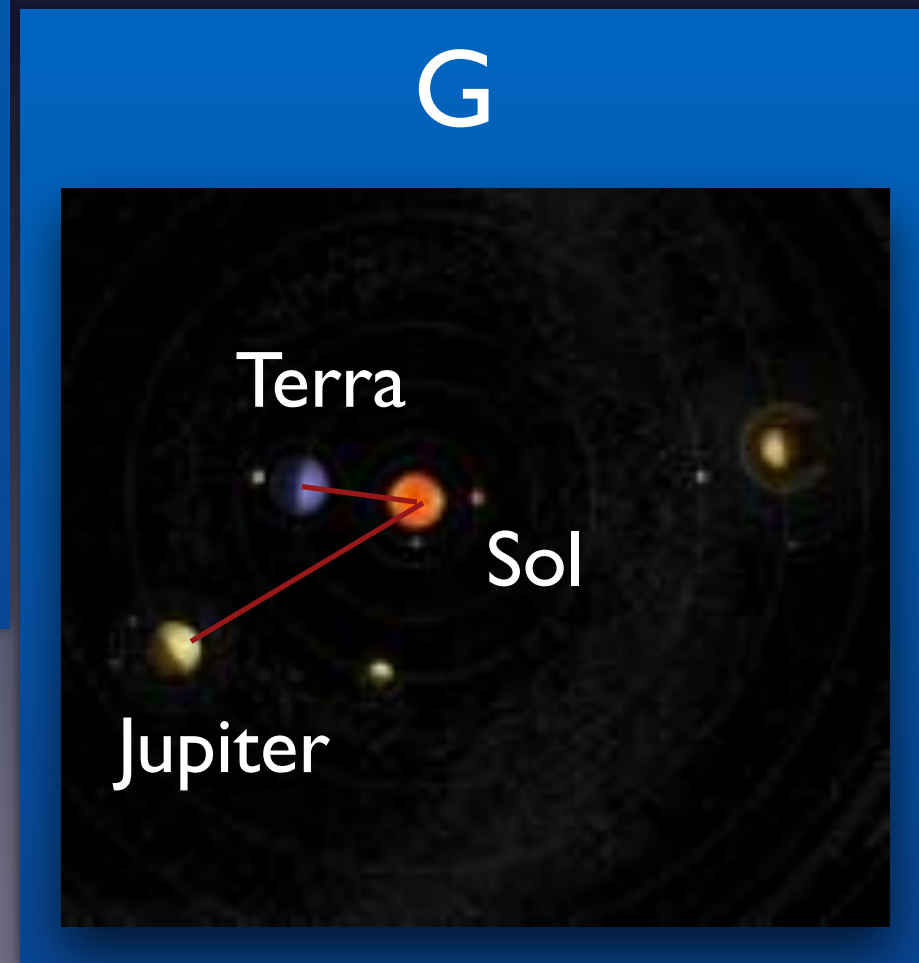
Impossible observacions en un vaixell

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum



F



CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

- Emergència a L: t
- Emergència a K: $t + nT + \frac{LK}{c}$

Diferència $\Delta_1 = nT + \frac{LK}{c}$

- Immersió a F: t'
- Immersió a G: $t' + nT - \frac{GF}{c}$

Diferència $\Delta_2 = nT - \frac{GF}{c}$

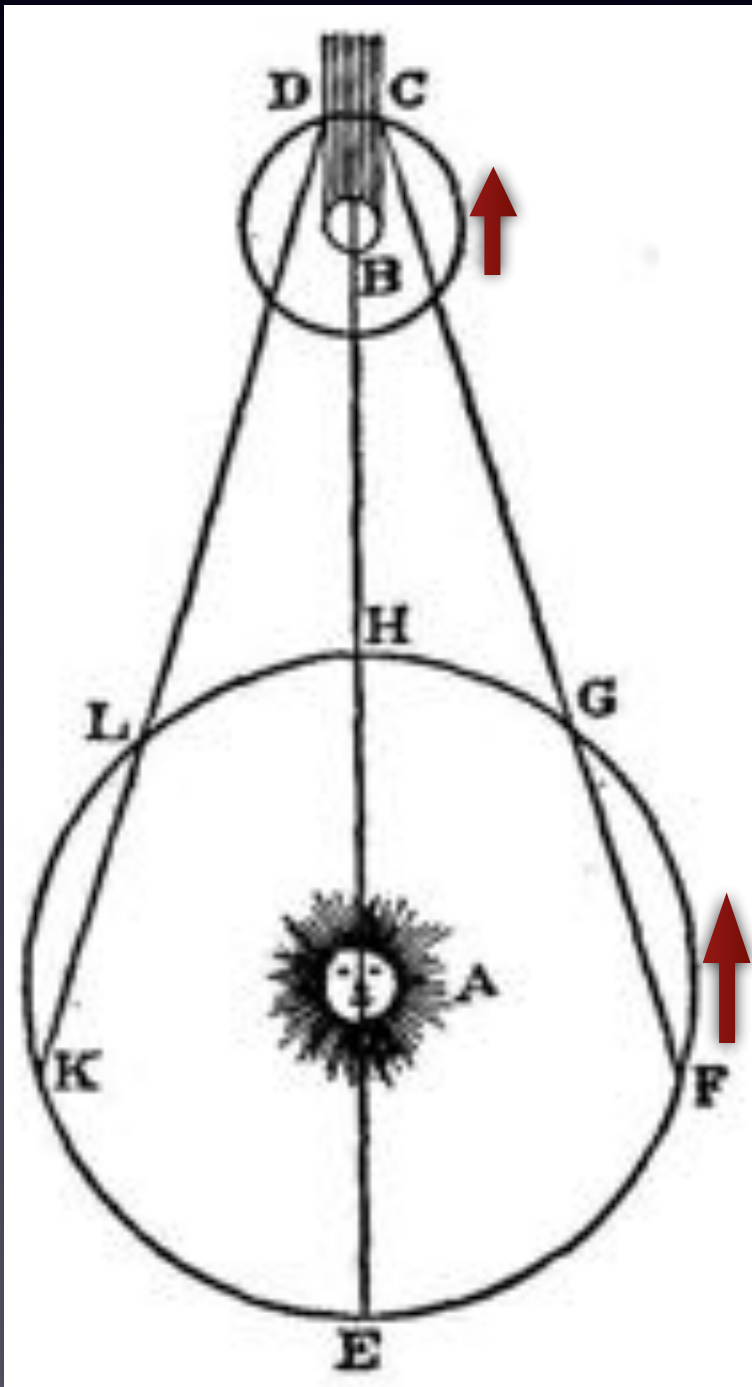
$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{2 \cdot GF}{c} = 7'$$

MOLT GRAN!!

$$c = 1d_{\oplus}/s$$

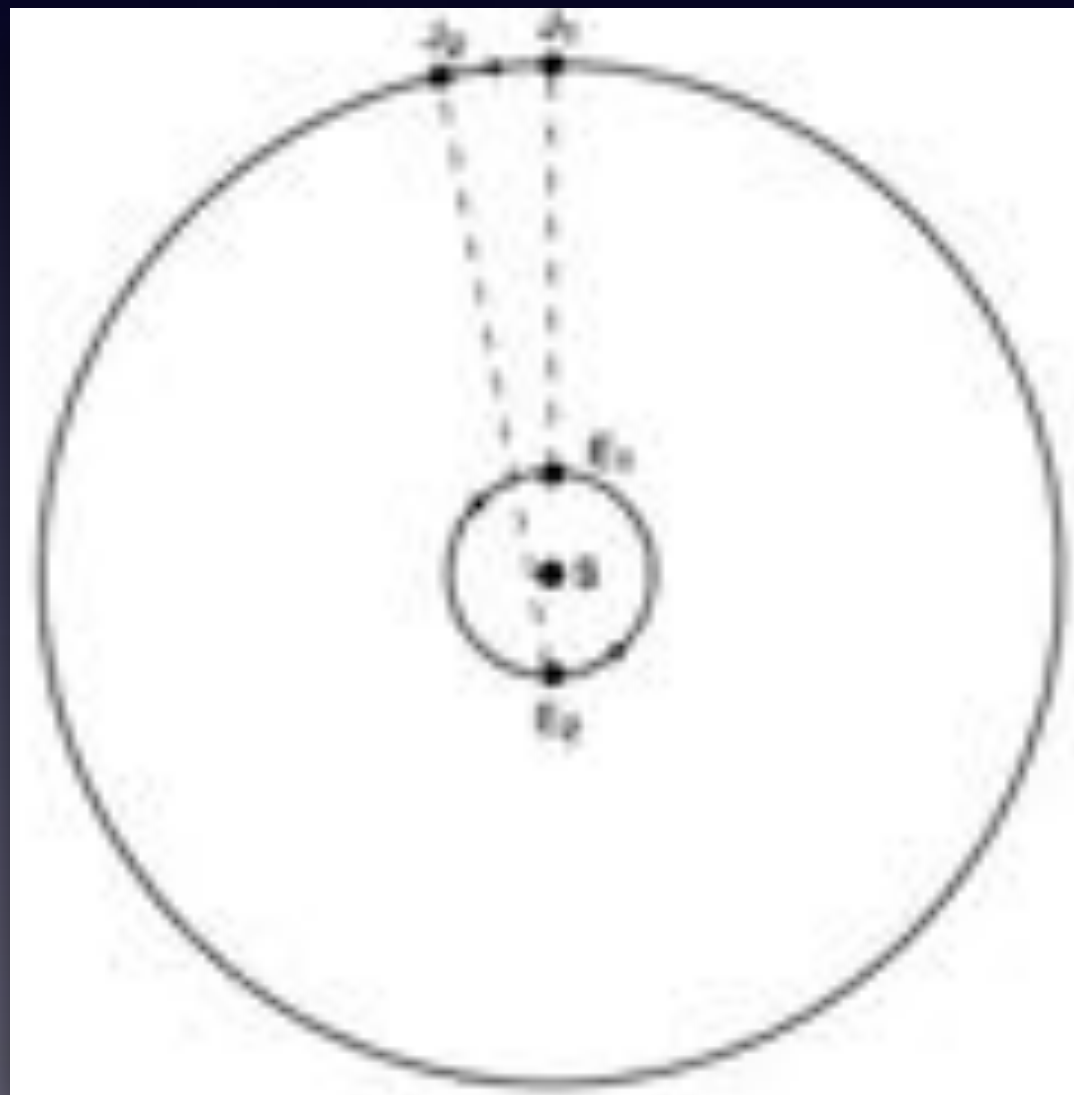
$$GF = 210d_{\oplus}$$

$$c \gg 1d_{\oplus}/s$$



CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum



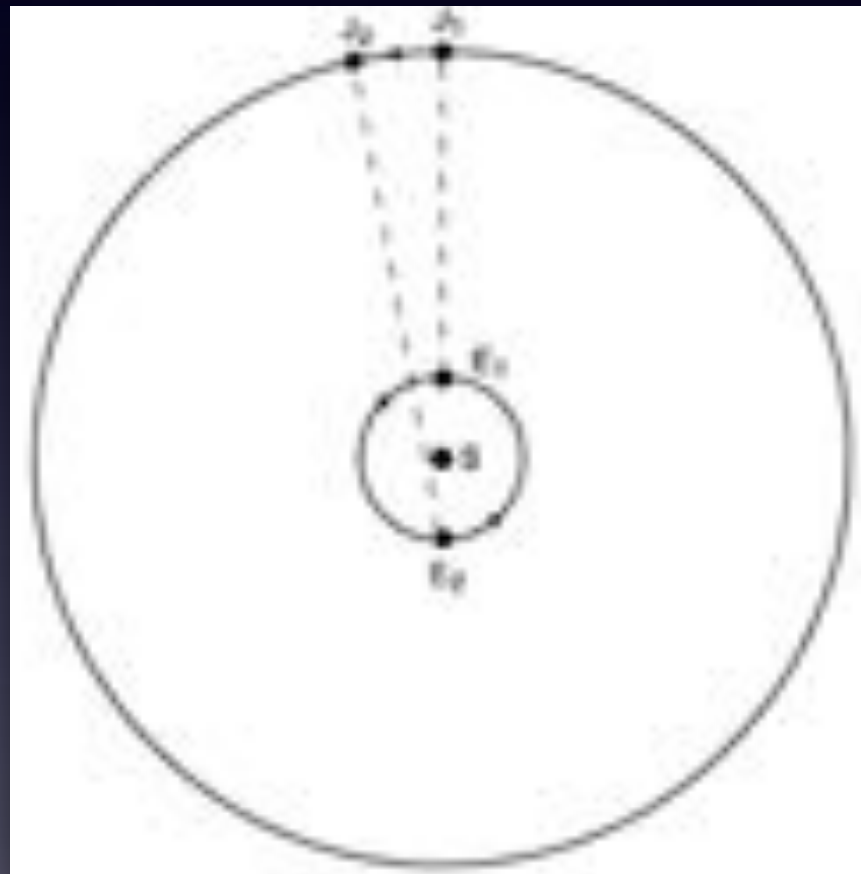
Una òrbita de lo voltant de Júpiter triga 1.76 dies terrestres

Roemer va observar que el temps entre eclipsis consecutius era més petit quan la Terra estava més a prop de Júpiter i més llarg quan estava més lluny. Aquests intervals s'acumulaven.

En la **conjunció** els eclipsis tenien lloc **11 minuts abans** del que s'esperava i a l'**oposició 11 minuts més tard**.

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum



Per tant la llum trigava

22 minuts

en recórrer 2 UA!

$$c \approx \frac{2\text{UA}}{22\text{min}} = \frac{2 \cdot 1.49^9}{22 \cdot 60} \text{km/s} = 225757 \text{km/s}$$

Huygens (1629-1695) va millorar el càlcul

Actualment:

299.792.458 m/s ~ 300.000 km/s

CINQUÈ ESGLAÓ

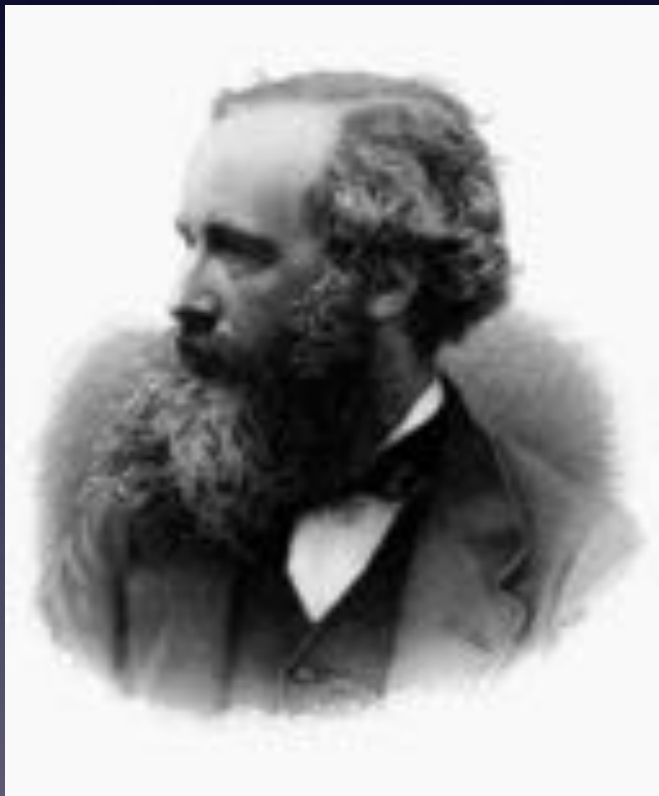
La velocitat de la llum

El càlcul de c va ser fonamental per al futur de la Física

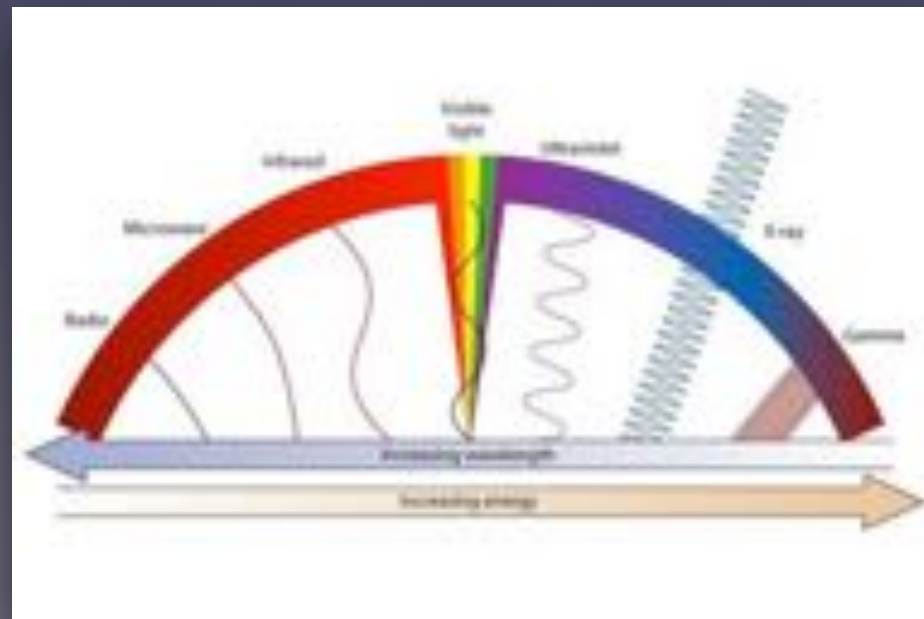
Maxwell observà que c era igual a la velocitat de les ones electromagnètiques predita per les seves equacions

Va arribar a la conclusió que la llum
és una forma de

radiació electromagnètica



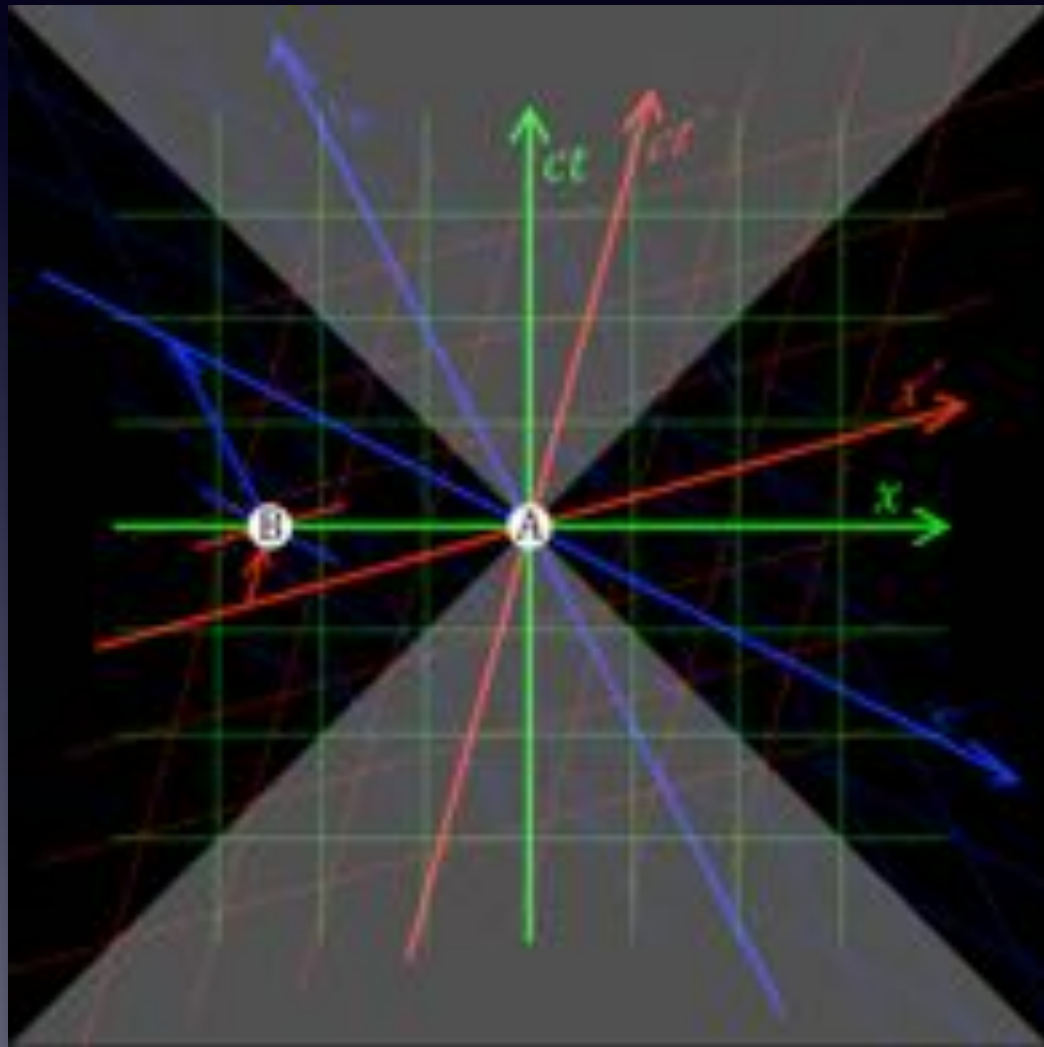
James Clerk Maxwell (1831- 1879)



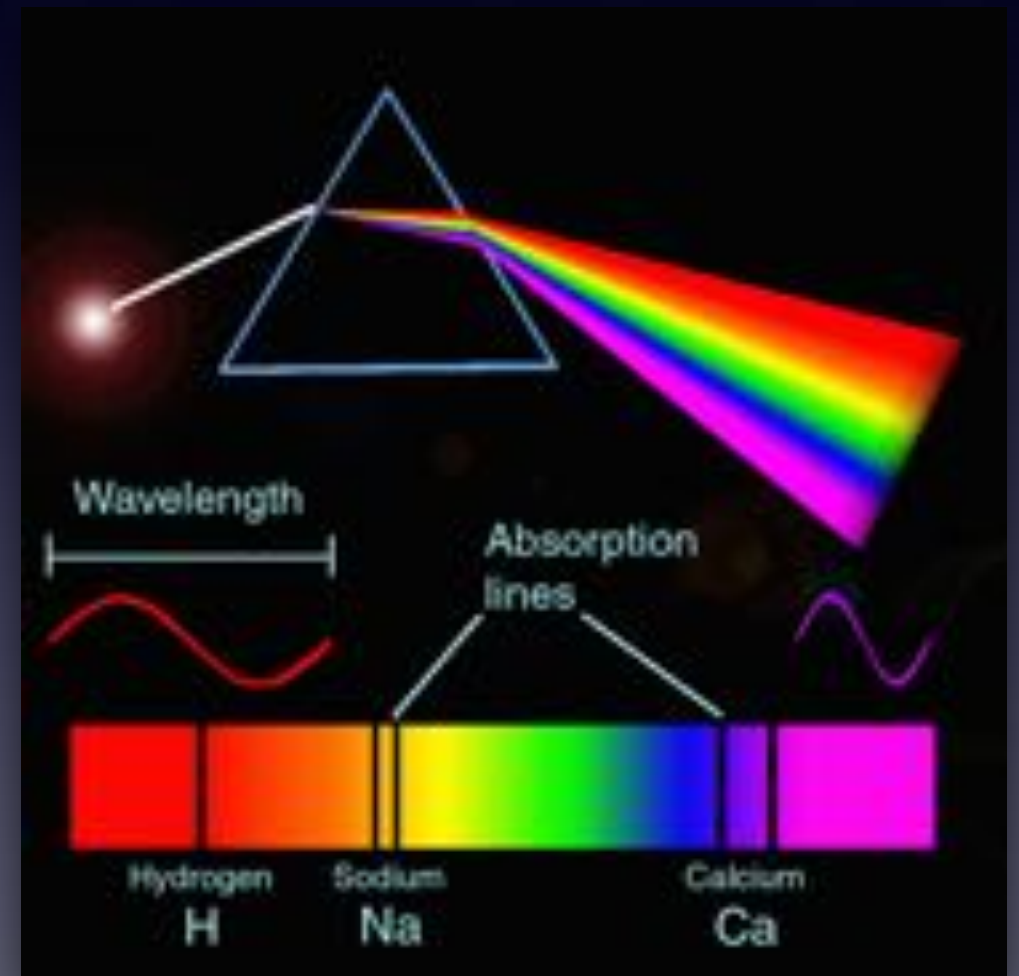
Espectroscòpia
Relativitat

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum



Relativitat especial
(1905)

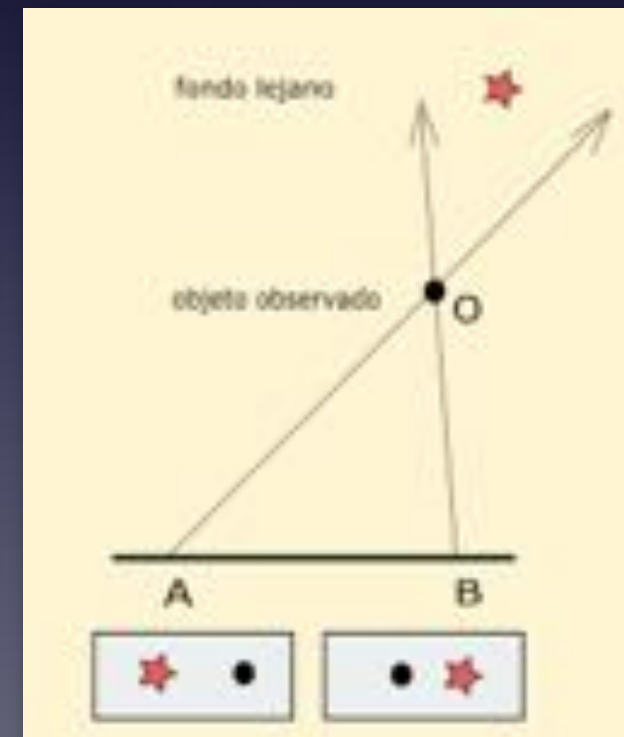
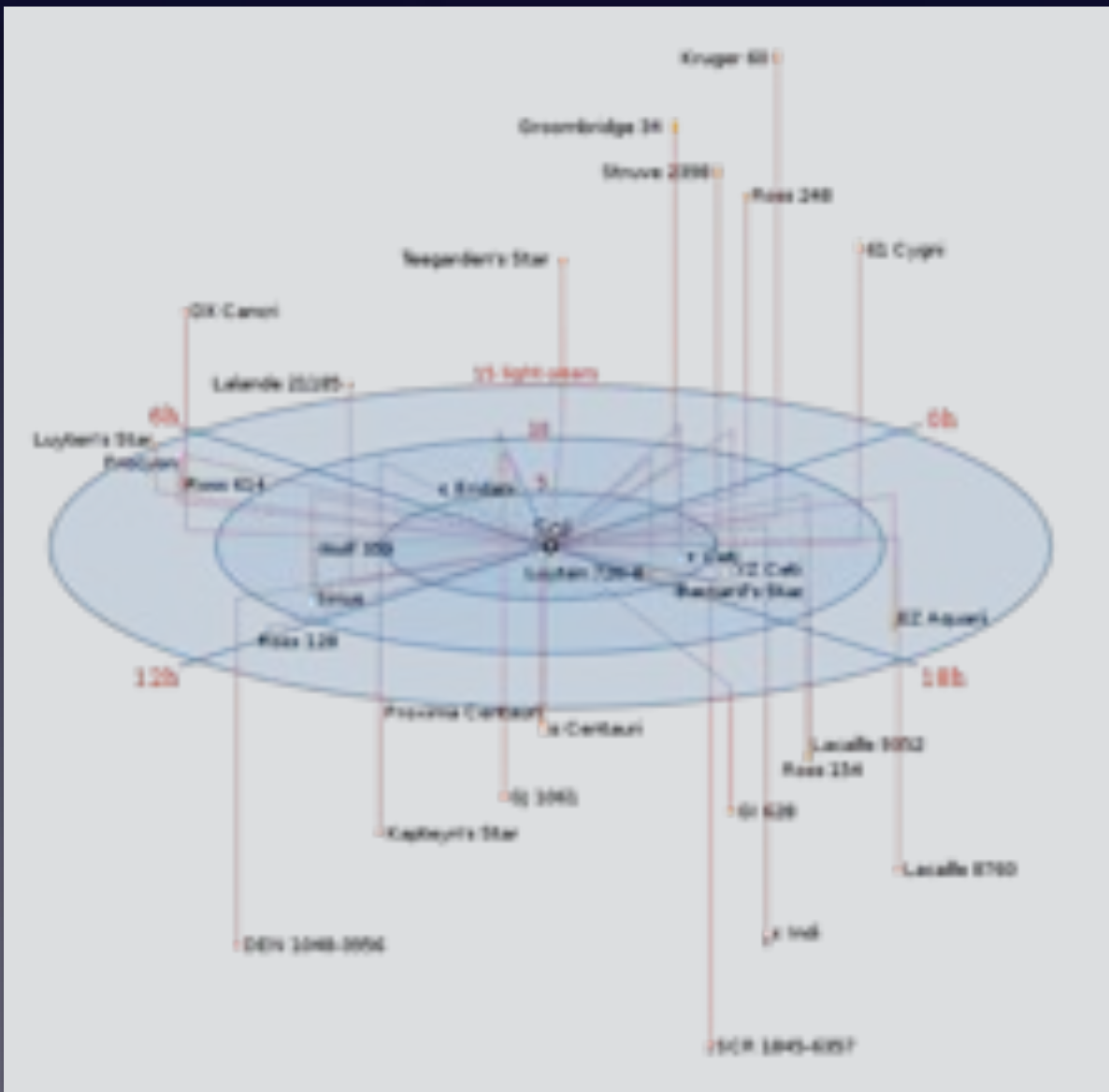


Espectroscòpia
(composició química)

SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'

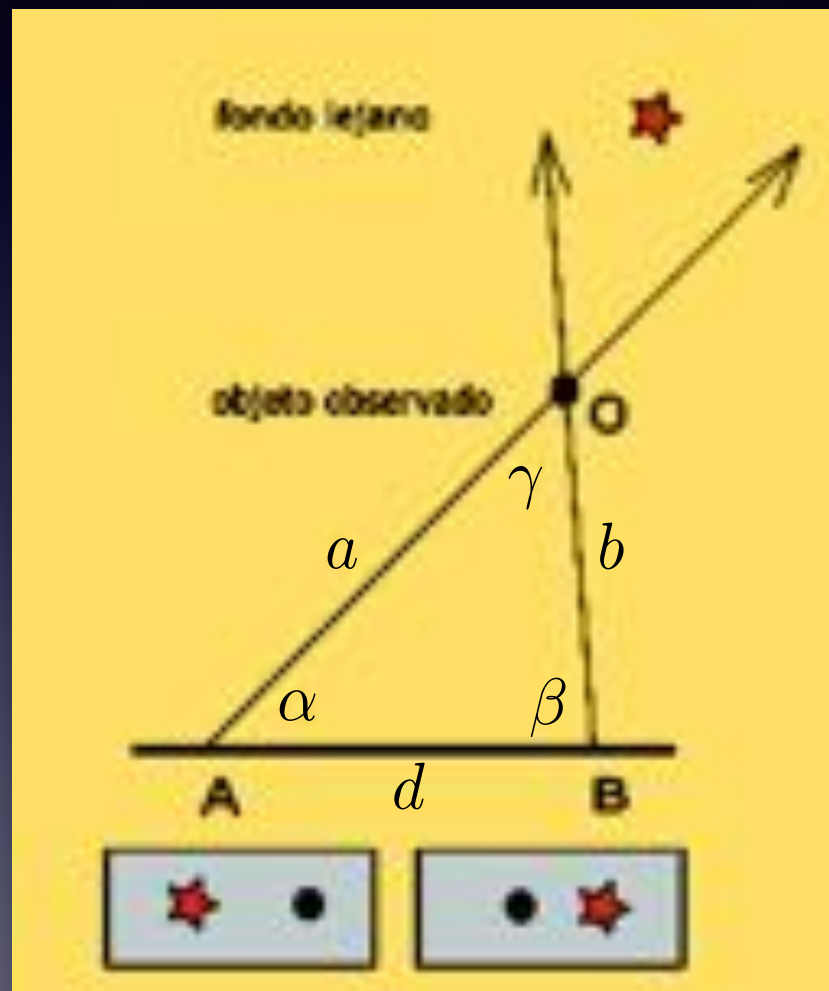
La paral.laxi permet calcular distàncies a planetes



Coneguts els angles i la distància entre
diferents punts d'observació es pot
calcular la distància

SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'



$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$

Fórmula del sinus

$$\frac{\sin \alpha}{b} = \frac{\sin \beta}{a} = \frac{\sin \gamma}{d}$$

Coneguts els angles α, β
i la distància d podem
calcular a, b

Per planetes els angles són
molt petits però encara es
poden mesurar

Per estrelles els angles són
massa petits a la terra
(0.000065 segons d'arc p. ex.)

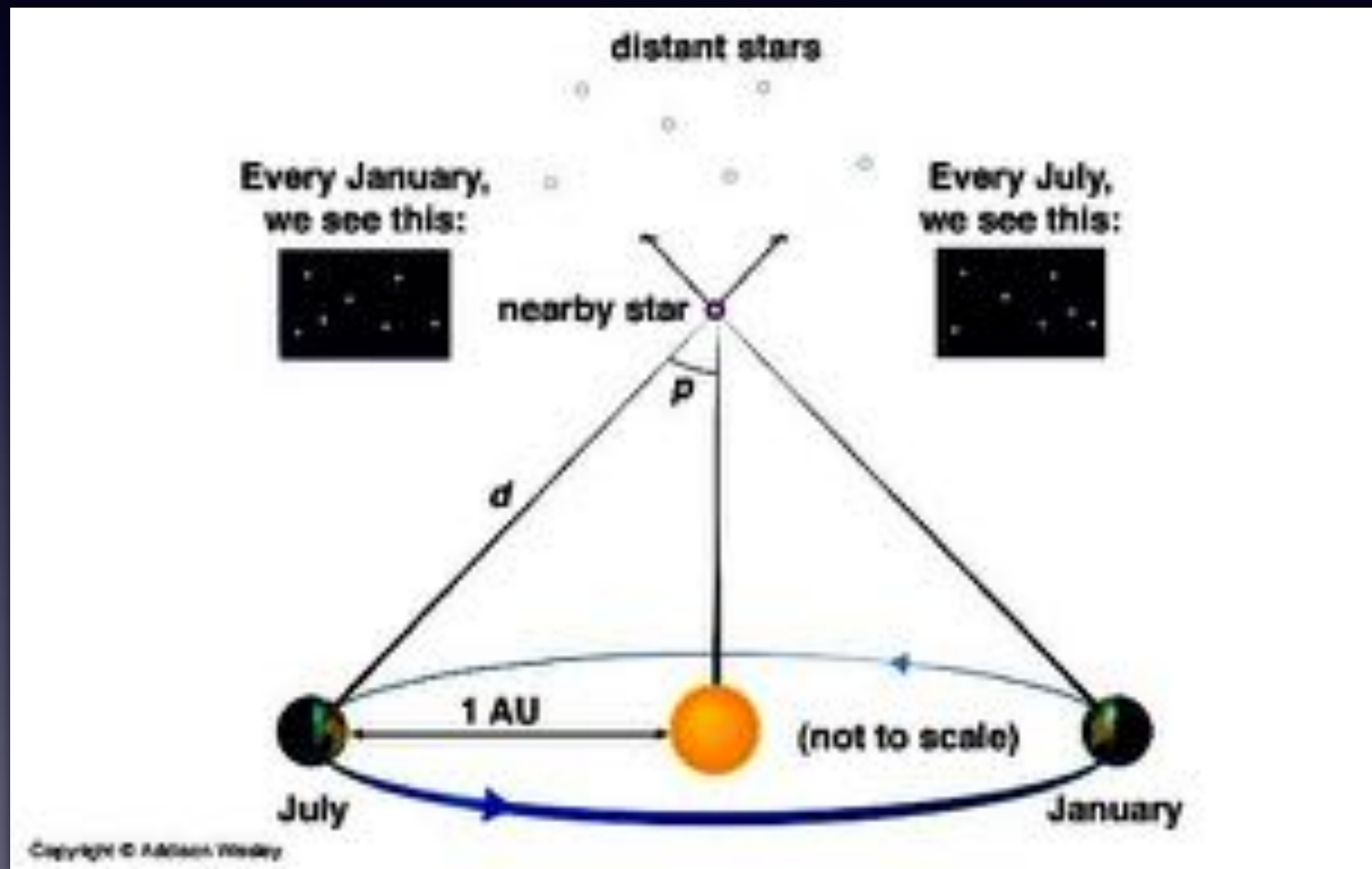
SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'

TRUC:

fer mesures en
diferents
moments.

La distància *base*
serà llavors molt
gran i els angles es
podran calcular

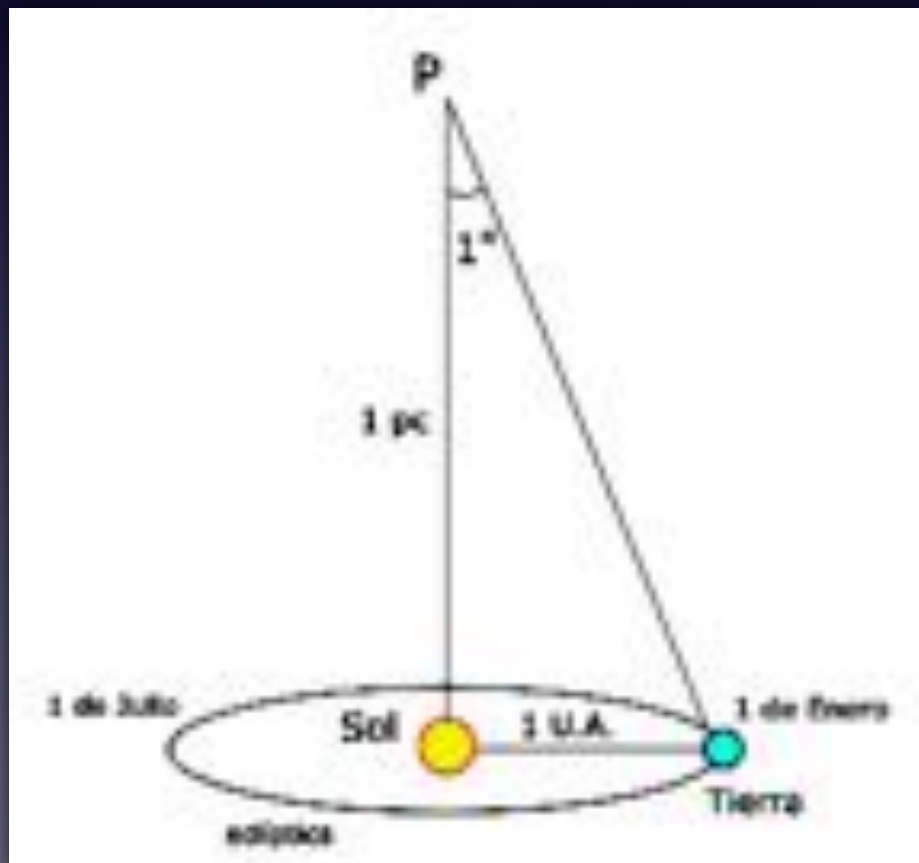


Es poden mesurar distàncies fins a 100 anys llum!

SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'

Nova unitat de mesura: el *parsec*



La distància a la qual una unitat astronòmica (UA) subteixeix un angle d'un segon d'arc (1"). Un estel dista una parsec si la seva paral·laxi és igual a 1 segon d'arc.

60' arc = 1°, 60" = 1'
Lluna 0,5°



1" = dividir la
lluna en 1800

$$1 \text{ parsec} = 206.265 \text{ UA} = 3,2616 \text{ anys llum} = 3,0857 \times 10^{16} \text{ m}$$

SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'

El mètode de la paral.laxi ens permet calcular la distància a **desenes de milers** d'objectes (Sírius, Arcturus, Capella, Regulus, Càstor etc.). Dades fonamentals en el següent esglaó.



Friedrich Wilhelm Bessel
(184-1846)

va fer la major part dels càlculs

Els grecs van rebutjar
l'heliocentrisme ja que **no**
detectaven paral.laxi i rebutjaven
que els estels poguessin estar a
distàncies tan grans

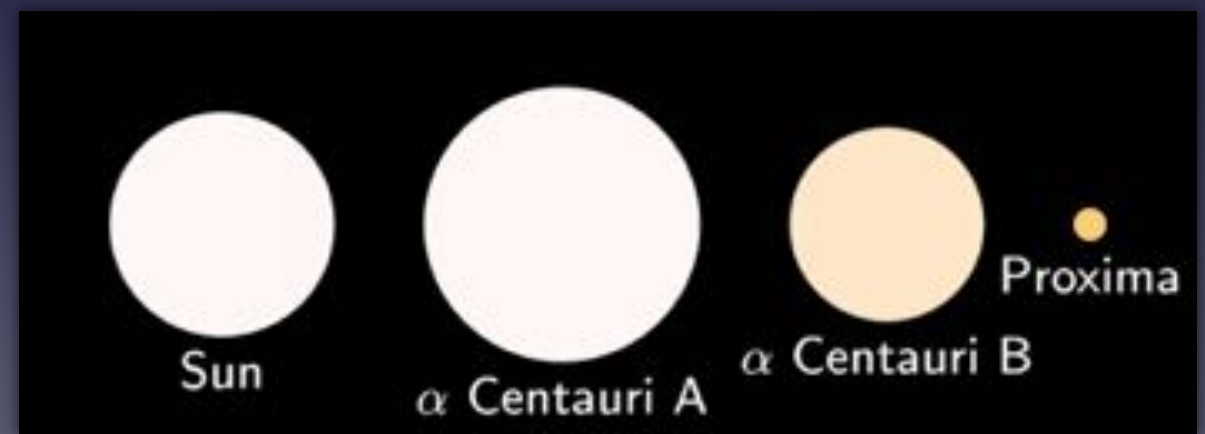
SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'

Estel més proper al sol:
alfa Centaurus 4.3 anys llum



A l'hemisferi sud



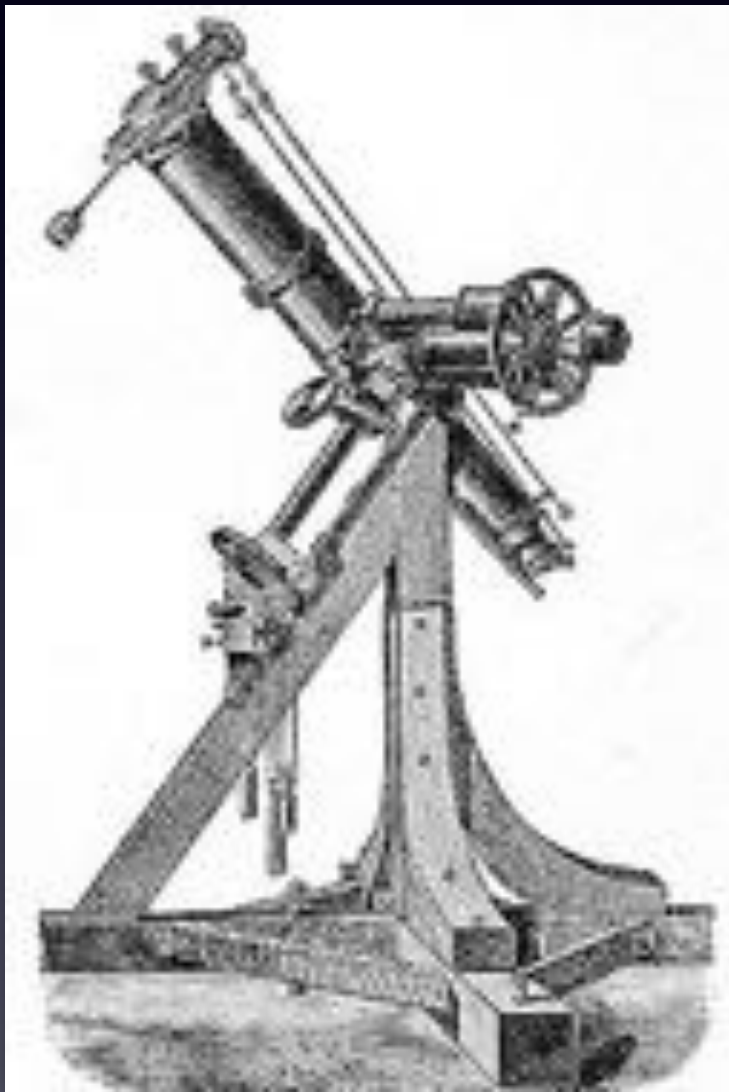
Estel binari

42.000.000.000.000 km

$$d_{\oplus} = 1\text{cm}, \quad d_{\odot} = 1,09\text{m}, \quad d_{\oplus\odot} = 117\text{m}, \quad d_{\odot\alpha} = 56000\text{km}$$

SISÈ ESGLAÓ

Estrelles 'properes'



Heliòmetre de Bessel

La primera mesura amb èxit de la paral.laxi estel.lar va ser realitzada per Friedrich **Bessel** el 1838 per l'estrella **61 Cygni** amb un heliòmetre Fraunhofer a **Königsberg**.



SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia



Podem fer servir les
observacions
detallades d'estrelles
properes per donar
un mètode de càlcul
de les distàncies a
estrelles més
llunyanes

Les estrelles properes són a la Via Làctia però no totes les
estrelles de la Via Làctia (entre 200 mil milions i 400 mil
milions!) són properes

SETÈ ESGLAÓ

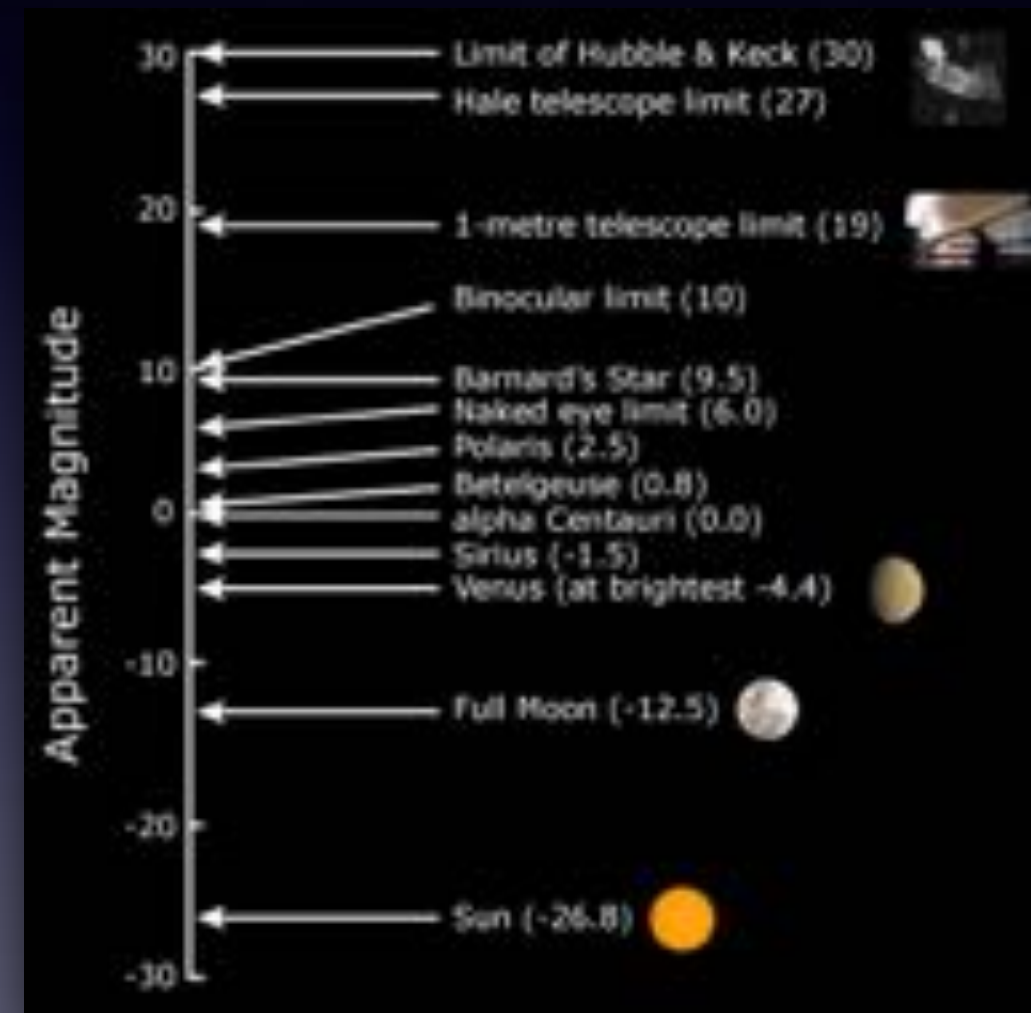
La Via Làctia

La **magnitud aparent** o **brillantor aparent** és una mesura de la lluminositat aparent vista per un observador a la Terra. És la quantitat de llum rebuda de l'objecte.

Mesura logarítmica

La **magnitud absoluta** és la magnitud que tindria si estigués situat a **10 parsecs** de la Terra.

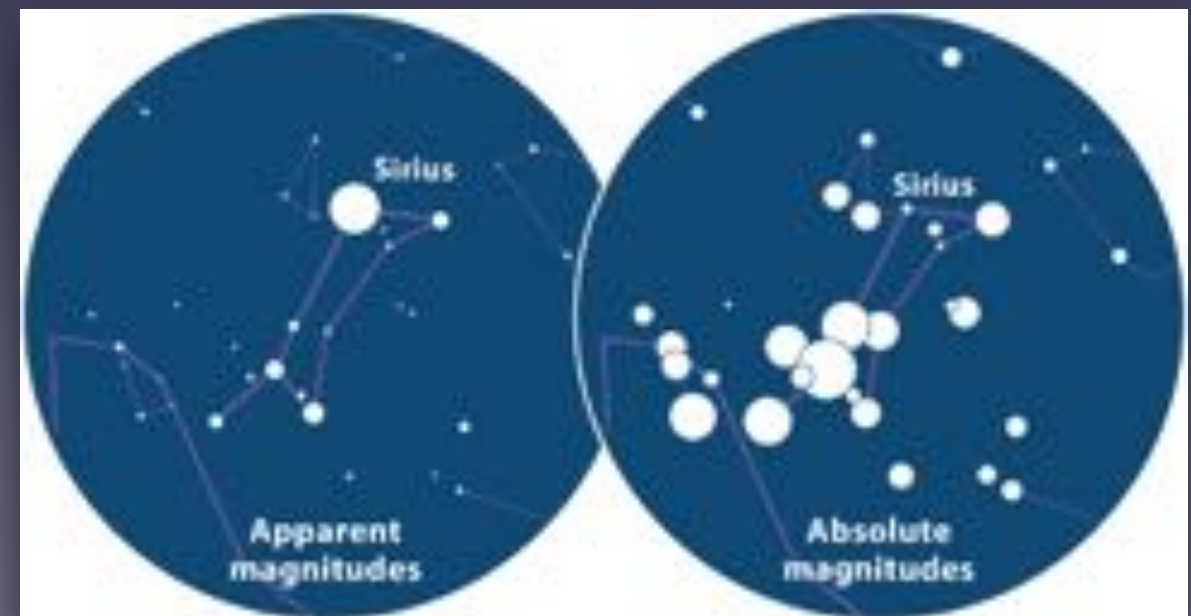
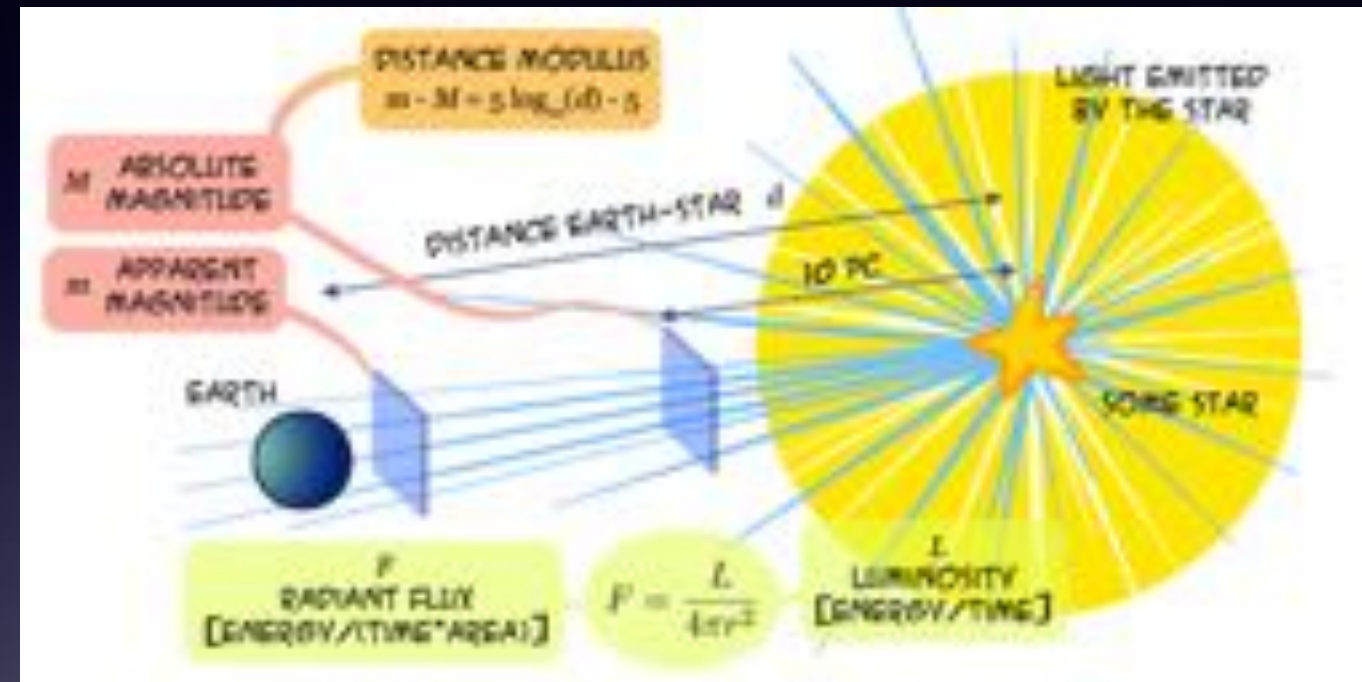
(La **magnitud absoluta** o **brillantor absoluta** és la mesura de la brillantor d'un astre proporcional al logaritme de la seva lluminositat.)



SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Escala de magnituds aparents	
Mag. Ap.	Objectes celestes
-26.8	Sol
-12.6	Lluna plena
-4.4	Màxima brillantor de Venus
-2.8	Màxima brillantor de Mart
-1.5	Estel més brillant: Sirius
-0.7	Segon estel més brillant: Canopus
0	El punt zero per definició: Vega
+3.0	Estels més febles visibles des d'una ciutat
+6.0	Estel més feble observable a ull nu
+12.6	Quàssar més brillant
+30	Objectes més febles observables amb el Telescopi espacial Hubble



SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Per mesurar distàncies majors farem servir

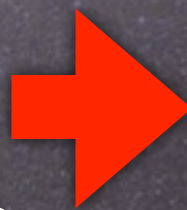
- COLOR (espectroscòpia)
- BRILLANTOR APARENT (fotografia)

Estrella pot tenir **brillantor aparent gran** per

- A. estar molt a prop
- B. ser molt brillant

- Brillantor aparent (m)
- Distància (D_L) en pcs
- Llei del quadrat invers

(la brillantor disminueix amb el quadrat de la distància)



BRILLANTOR
ABSOLUTA (M)

$$M = m - 5(\log_{10} D_L - 1)$$

SETÈ ESGLAÓ

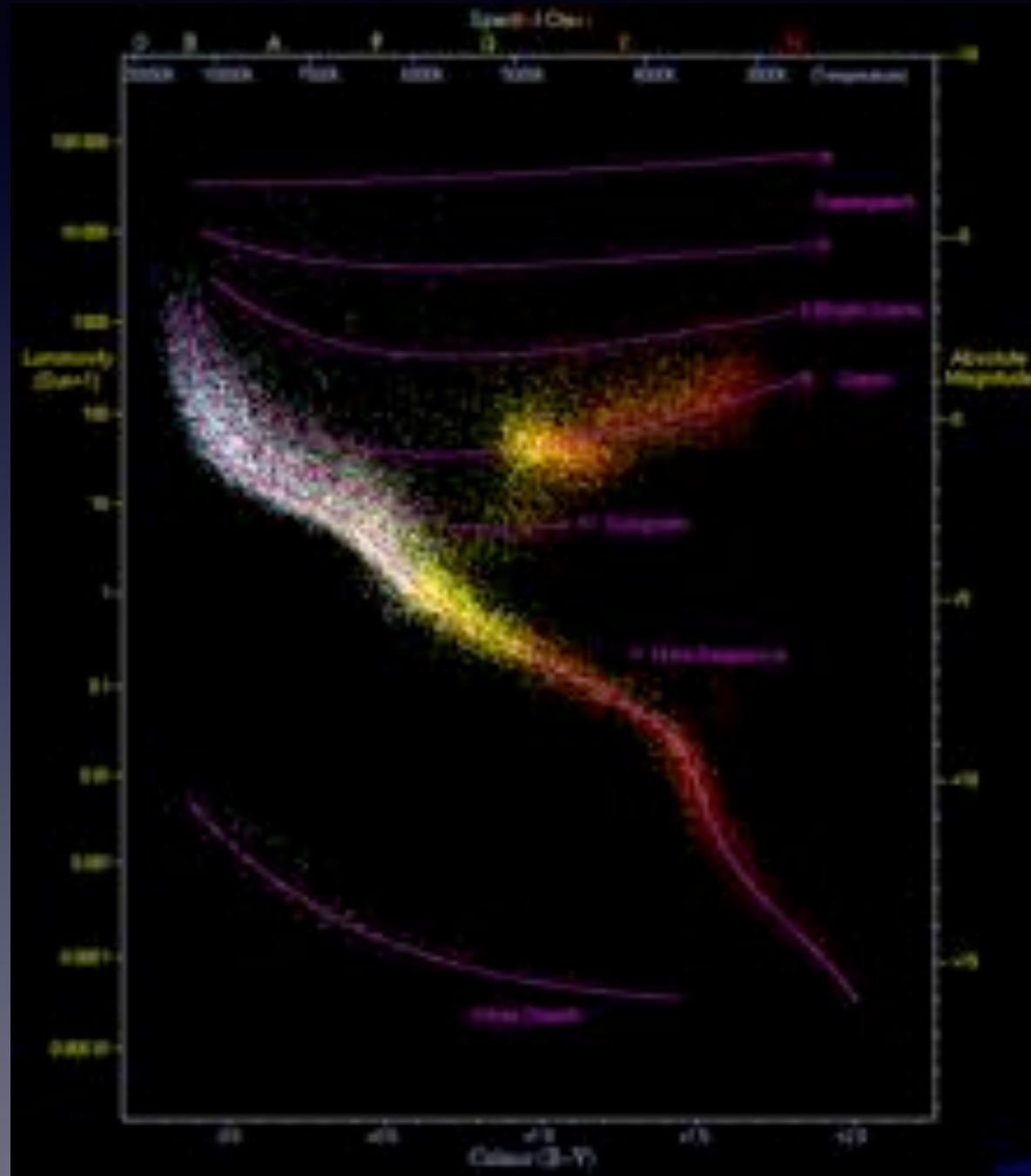
La Via Làctia



Ejnar Hertzsprung
(1873-1967)



Henry Russell
(1877-1957)



Hertzsprung i Russell van fer la **gràfica** Color-Brillantor absoluta per les estrelles ja conegudes (1905-1915).

Un 90% de les estrelles es troben a la **sequència principal**

22000 estrelles en aquest diagrama HR

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia



EXTRAPOLACIÓ

Donada una estrella:

Color
(espectroscòpia)



Brillantor absoluta



DISTÀNCIA

Brillantor aparent
(fotografia)



Fent servir la fórmula

$$M = m - 5(\log_{10} D_L - 1)$$

s'obté la distància

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

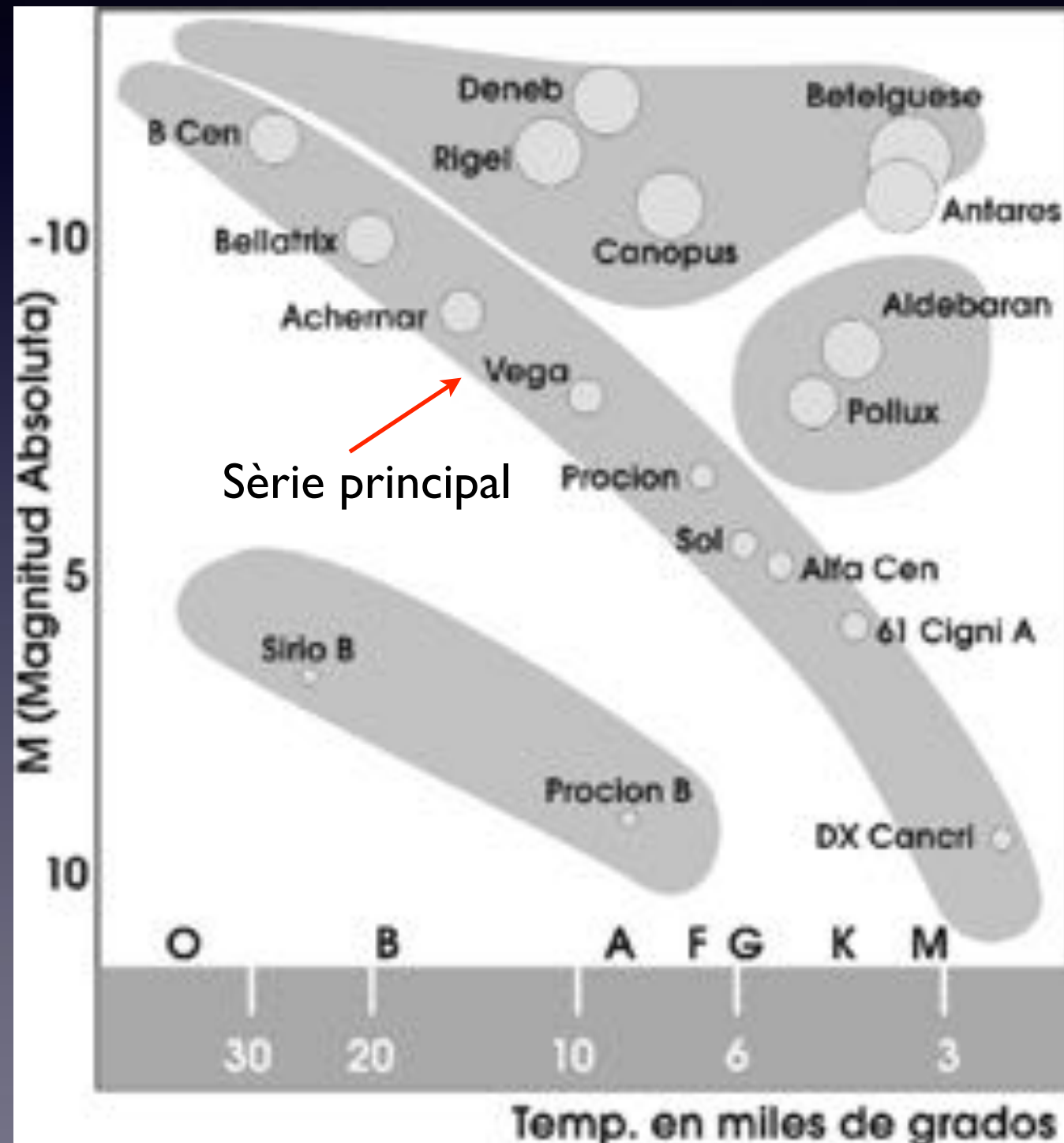


Diagrama de
Hertzsprung-Russell
simplificat (90% a SP)

Lluminositat (ener./temps):
Classes Ia (+), Ib, II,
III, IV, V, VI, VII (-)

Temperatura:
Oh **B**e **A** Fine **G**irl
(Guy) **K**iss **M**e

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Aquesta tècnica (ajust a la **seqüència principal**) va permetre trobar distàncies fins a **300.000 anys / llum**

Més enllà d'aquesta distància els estels són massa febles com per tenir mesures precises

Diàmetre de la Via Làctia: **100.000 anys llum**

Amplada de la Via Làctia: **1.000 anys llum**

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Una mica d'història

- **Demòcrit** (384-322 a.C.): eren estrelles llunyanes molt juntes.
- **Aristòtil** (384-322 a.C.): l'encesa de la exhalació de foc d'algunes estrelles que eren grans, nombrosos i molt juntes
- **Avempace** (1138 d.C.): formada per moltes estrelles que gairebé es toquen i semblen ser una imatge contínua, causa de l'efecte de la refracció d'un material sublunar.
- **Galileu** (1610): va fer servir un telescopi i va descobrir que està **composta d'un gran nombre d'estrelles febles**

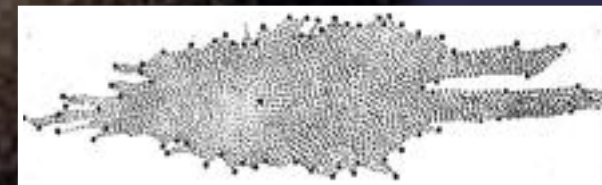
SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Una mica d'història

- Kant (1755): va especular (correctament) que podria ser un **cos en rotació** d'un gran nombre d'estrelles, unides per forces gravitacionals similars a la del Sistema Solar, però en escales molt més grans.
- Herschel (1785): va fer un dibuix amb la forma
- Lord Rosse (1845): distinció entre **nebuloses espirals** i **el.líptiques**.
- Curtis (1917): Andròmeda està **MOLT** lluny, 150.000 pc
- Hubble (1920): observatori Wilson, Andròmeda a 250.000 pc **fora** de la Via Làctia

Dibuix de Herschel



VUITÈ ESGLAÓ

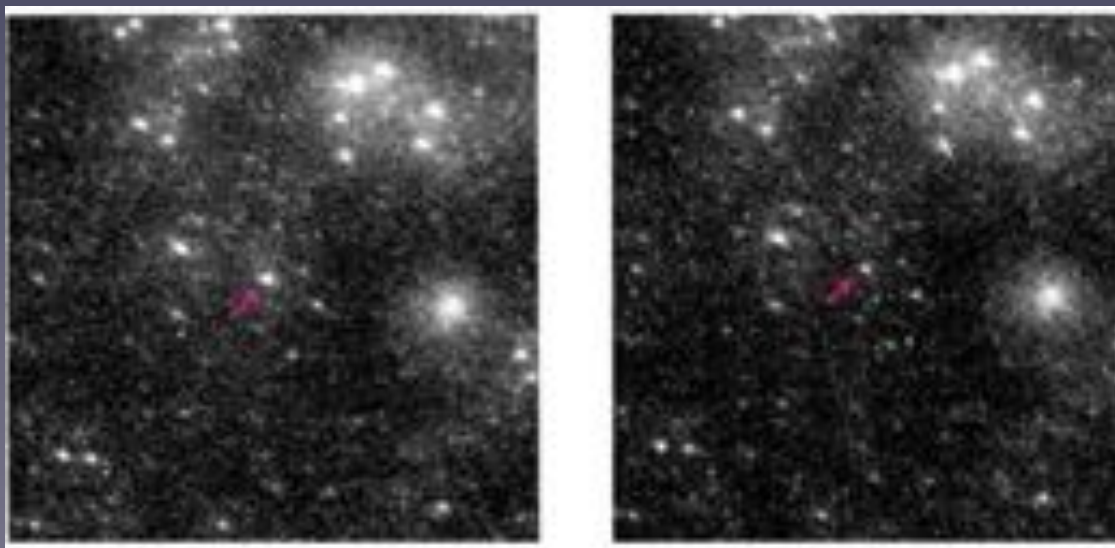
Altres galàxies



Henrietta Swan Leavitt (1868–1921)

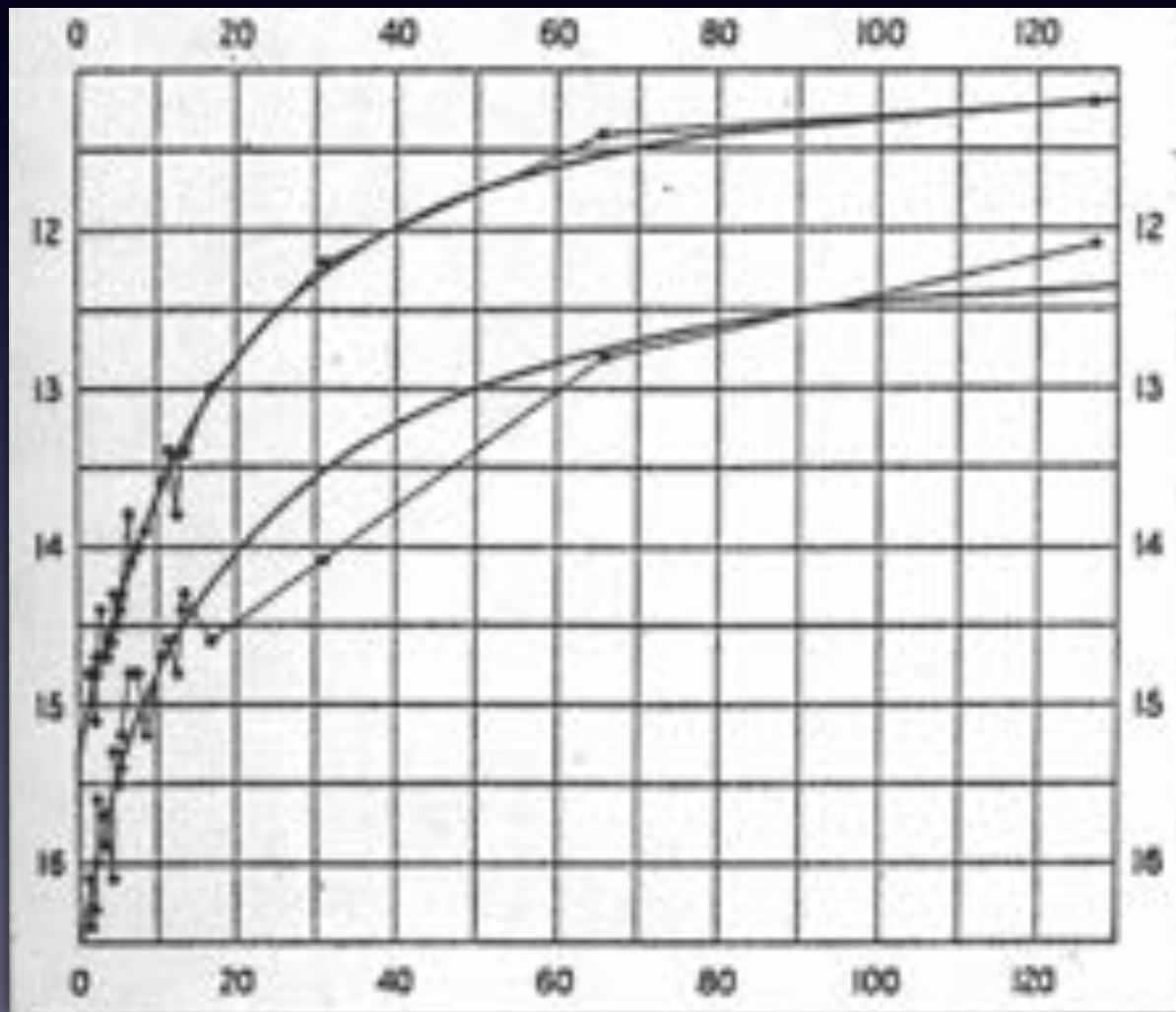
Henrietta Swan Leavitt (1912) va notar que algunes estrelles (les **Cefeïdes**) tenien **brillantor oscil·lant** (variable periòdicament)

Molt brillants amb un període de 40 dies



VUITÈ ESGLAÓ

Altres galàxies



X: període en dies, l: magnitud màxima i mínima

Hi ha una relació empírica (corba) entre el **període de pulsació** i les brillantors absolutes màxima i mínimes de les estrelles polsants properes

Per **extrapolació** podem determinar la brillantor absoluta d'altres estrelles variables i per la fórmula logarítmica trobem la distància

VUITÈ ESGLAÓ

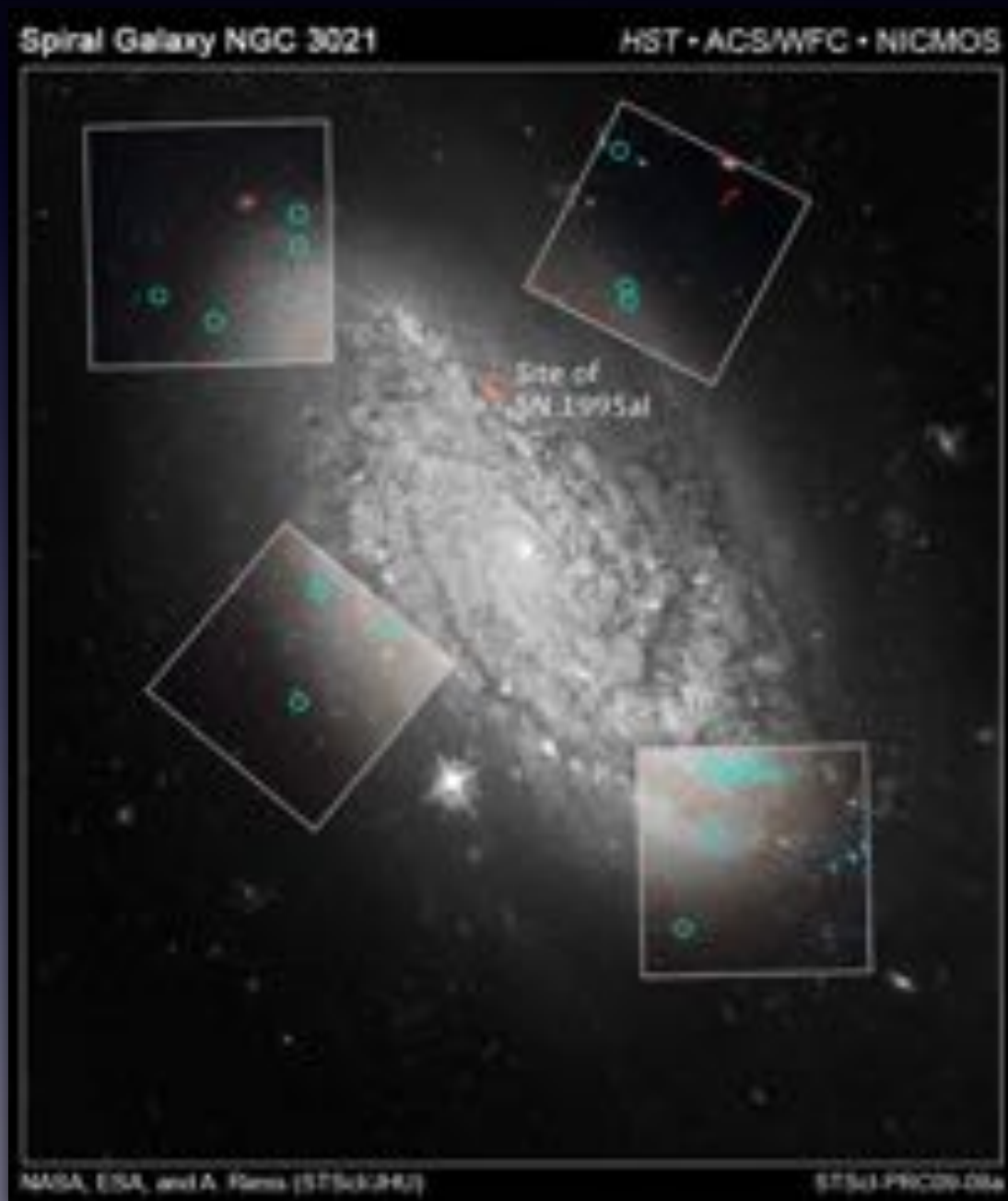
Altres galàxies

Per ser les **Cefeides** tan brillants el mètode permet determinar distàncies a objectes fins

100.000.000 anys llum

Identificar una Cefeida en una galàxia permet conèixer la distància a aquesta Galàxia

- Diàmetre de la Via Làctia:
100.000 anys llum
- Distància a la Cefeida més llunyana
108.000.000 anys llum



Diàmetre de l'Univers > 76.000.000.000 a.ll.

VUITÈ ESGLAÓ

Altres galàxies



Supernova del Cranc va ser detectada a la Terra l'any 1054
És a la Via Làctia

Mètodes similars aplicats a
SUPERNOVES permeten
determinar distàncies a objectes
més llunyans

(Una supernova és una explosió
estel·lar de magnitud màxima molt gran.
Poden durar des de setmanes fins a
mesos. No ocorren sovint)

Supernova **més llunyana** (1997):
11.000.000.000 a.l.

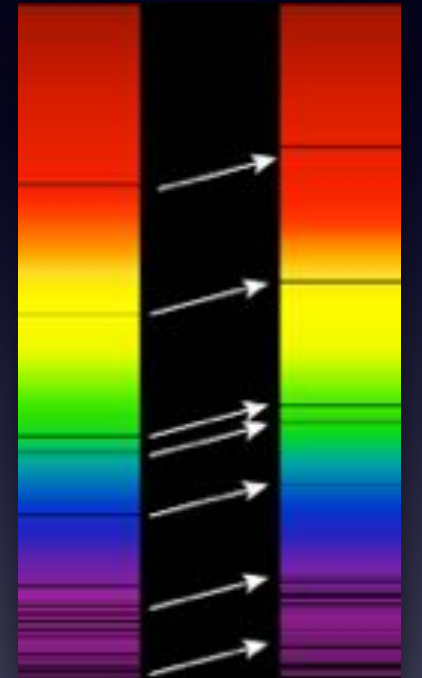
Diàmetre de l'Univers > 76.000.000.000 a.l.

NOVÈ ESGLAÓ

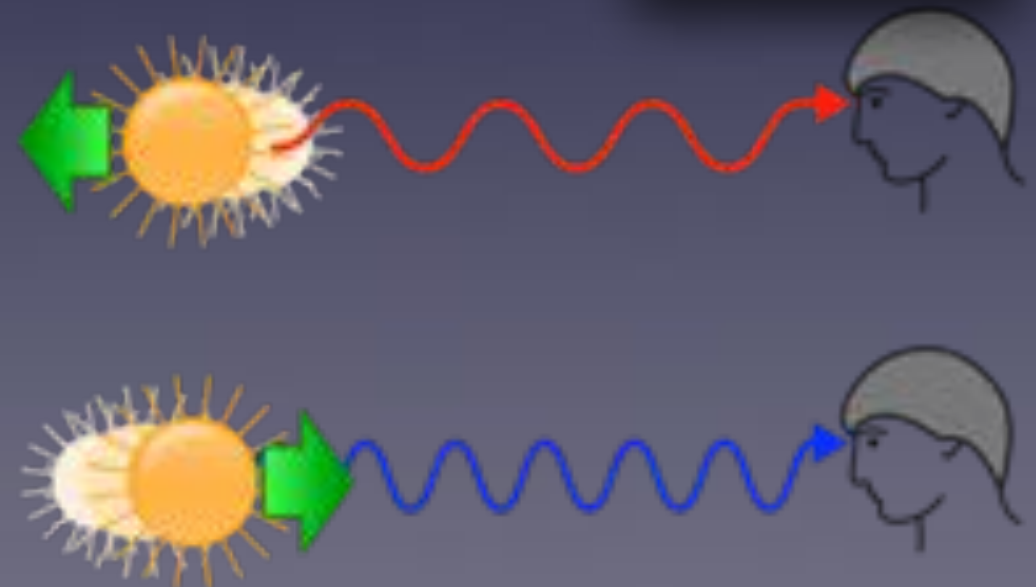
L'Univers

Espectre d'una mateix compost. A l'esquerra del Sol,
a la dreta d'un altre cos celeste.

Es detecta desplaçament cap al roig



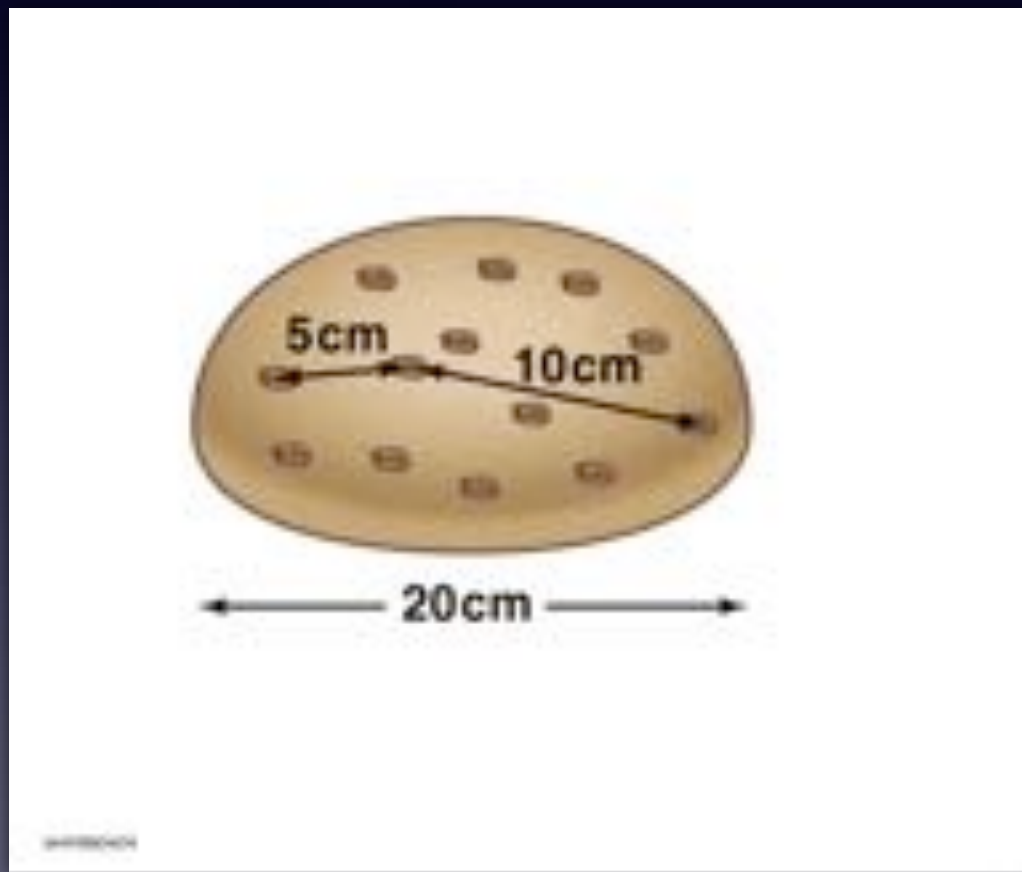
Edwin P. Hubble (1889 - 1953)



Efecte Doppler / Desplaçament al roig

NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers



Com més lluny més desplaçament al roig

A que es deu el desplaçament al roig?

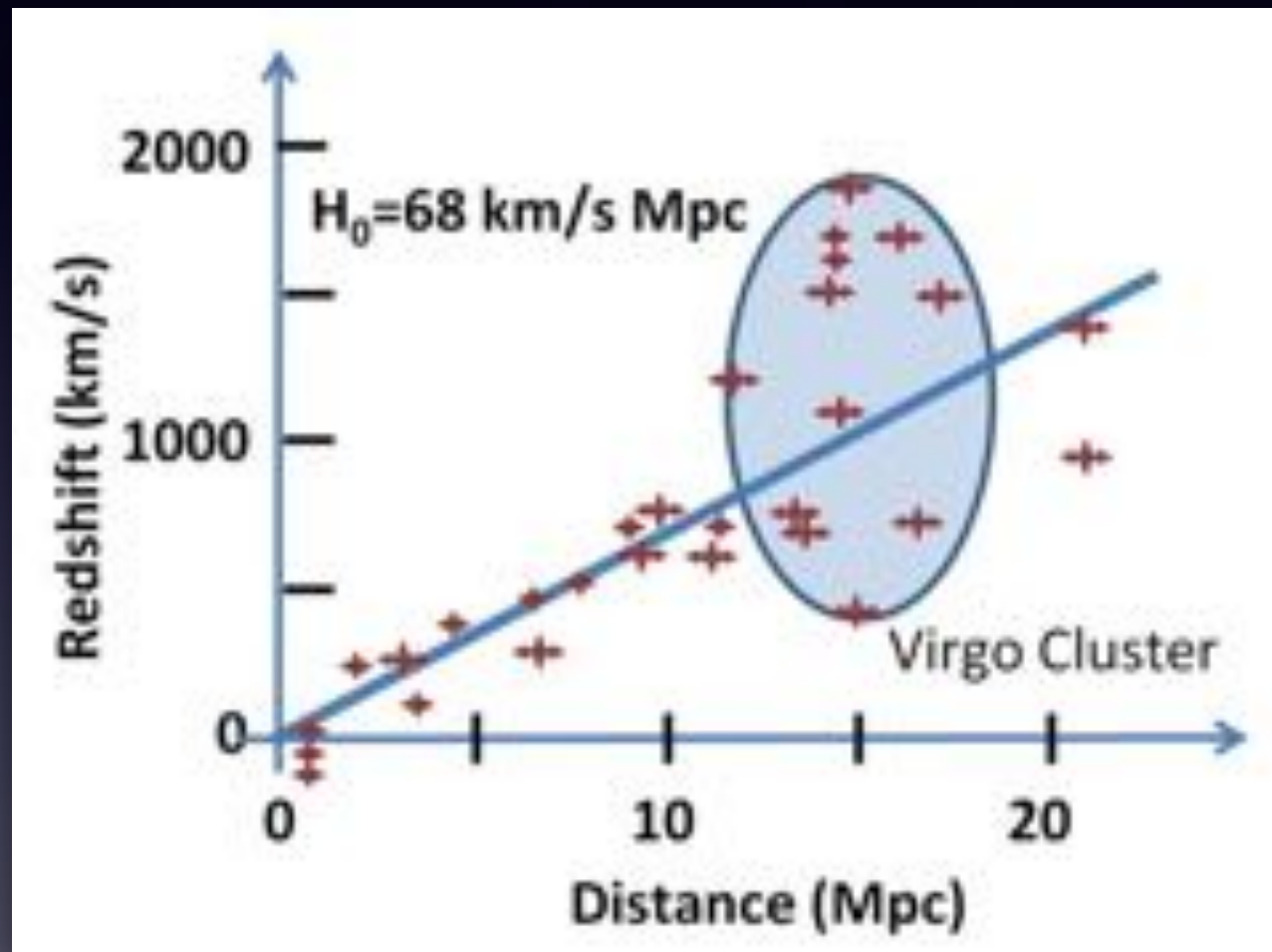
EXPANSIÓ DE L'UNIVERS

Model cosmològic derivat de la Teoria de la **Relativitat General** d'Einstein (model estàndard, Big-Bang)

NOVÈ ESGLAÓ

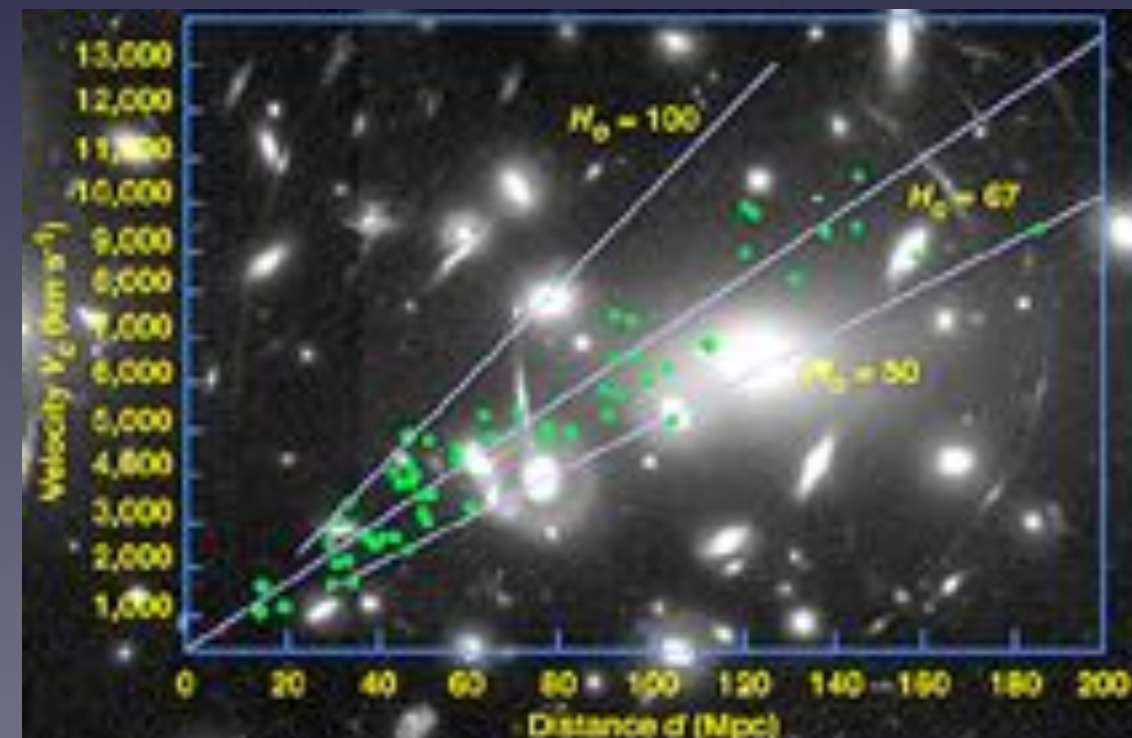
L'Univers

Hubble va fer com Hertzsprung, Russell i Leavitt. Va recopilar un munt de dades i va dibuixar un **núvol de punts**.



La recta de regressió va portar a enunciar la famosa Llei de Hubble

$$v = H \cdot d$$



NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

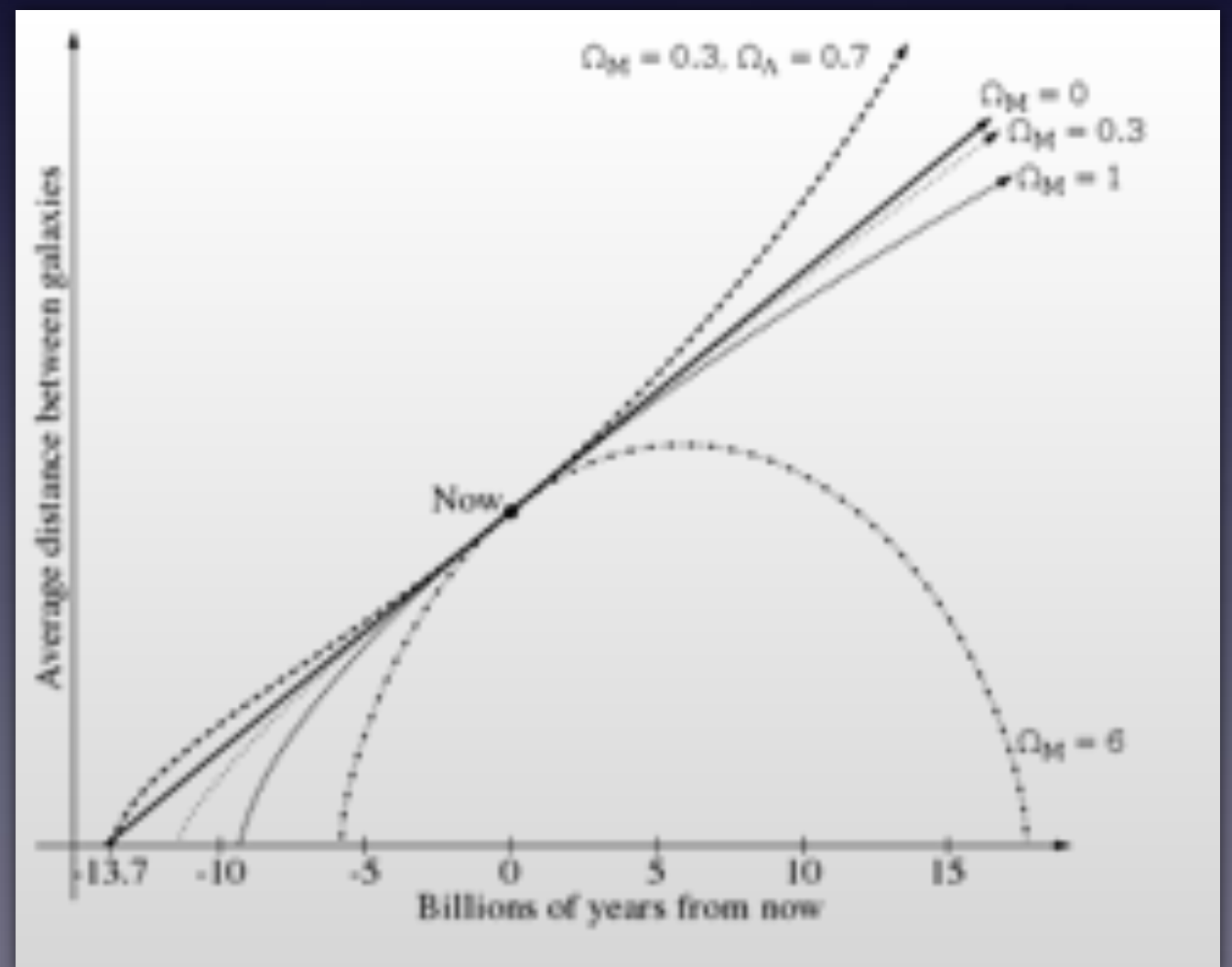
Llei de Hubble

$$v = H \cdot d$$

- ▶ La constant d'Hubble H denota el **creixement** de l'Univers
- ▶ 10 anys d'observacions per enunciar la Llei (es van mesurar 46 galàxies)
- ▶ El 1920 encara es debatia si l'Univers era de la mida de la Via Làctia o era molt més gran (**debat Shapley-Curtis**)

$$H \approx 70(\text{km/s})/\text{Mpc}$$

- Com calcular v ?
- Com calcular H ?



Models cosmològics

NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

Càlcul de la constant de Hubble

- Amb dades del telescopi Hubble
- Amb dades de WMAP
- Fent servir l'observatori Chandra de raigs X
- Estudiant l'acceleració de l'expansió

$$v = H \cdot d$$

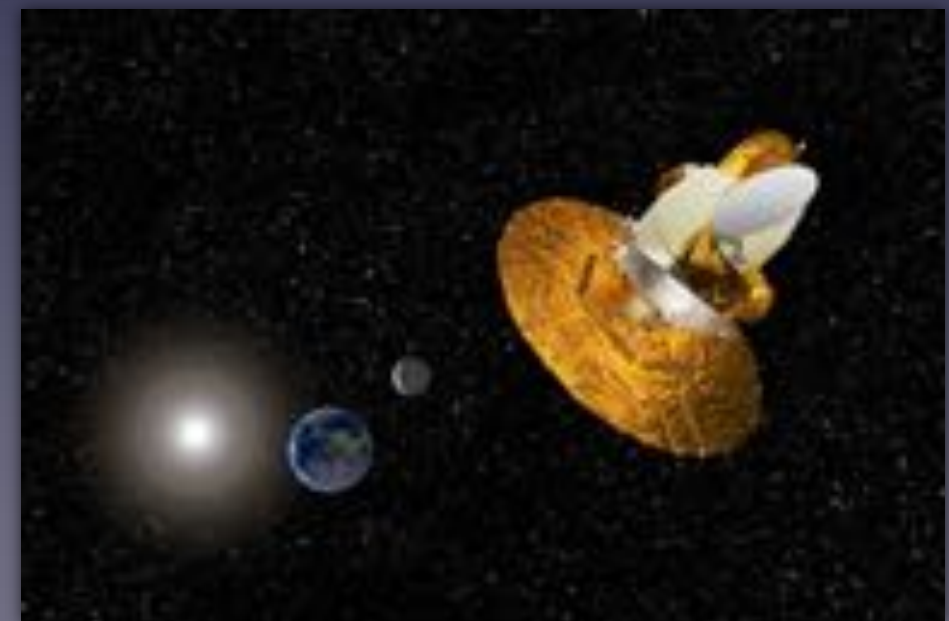
Calcular v i d i llavors H .
 v : per desplaçament al roig
 d : mètodes indirectes



Telescopi Hubble



Observatori de raigs-X Chandra



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)

NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

Càlcul de la distància mitjançant la Llei de Hubble

$$v = H \cdot d$$

Espectroscòpia



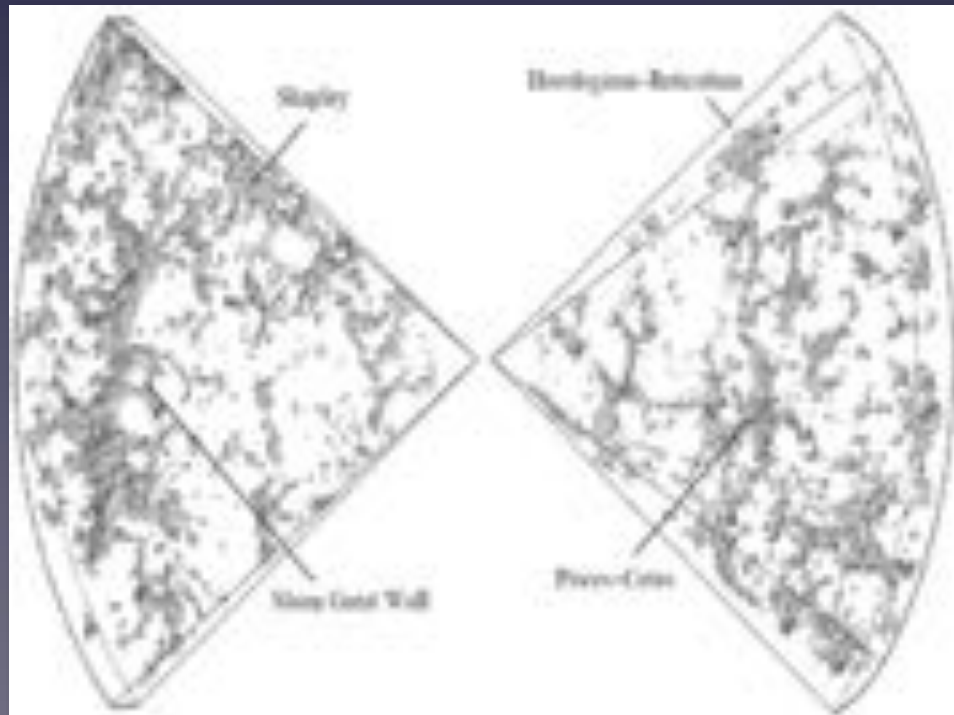
Despl. al roig



Vel. recessió



Distància



Vel. llum



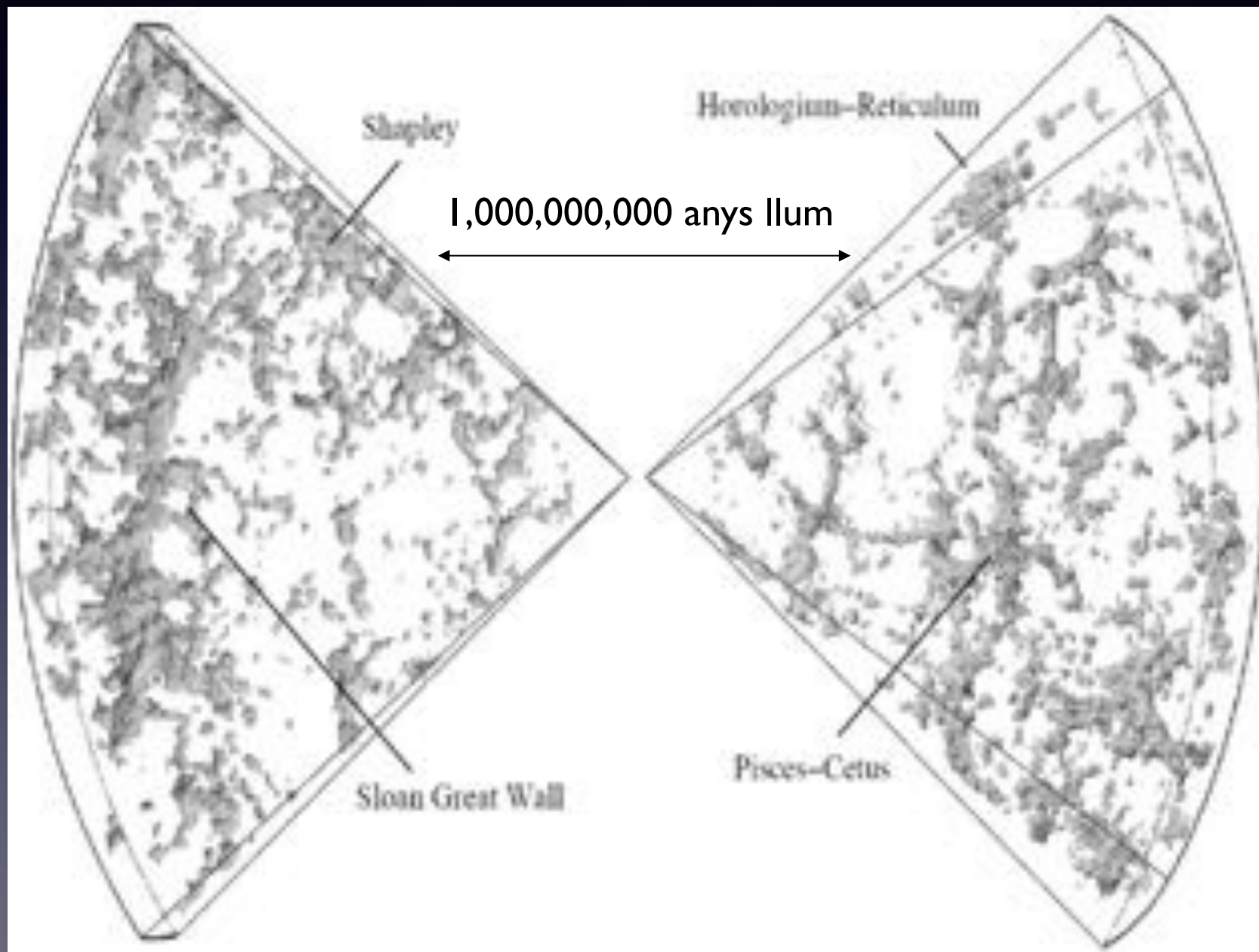
Llei Hubble

Aquestes mesures han donat
lloc a mapes molt precisos de
l'univers a gran escala ...

Sondeig del desplaçament roig de galàxies en
un camp de 2 graus

NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

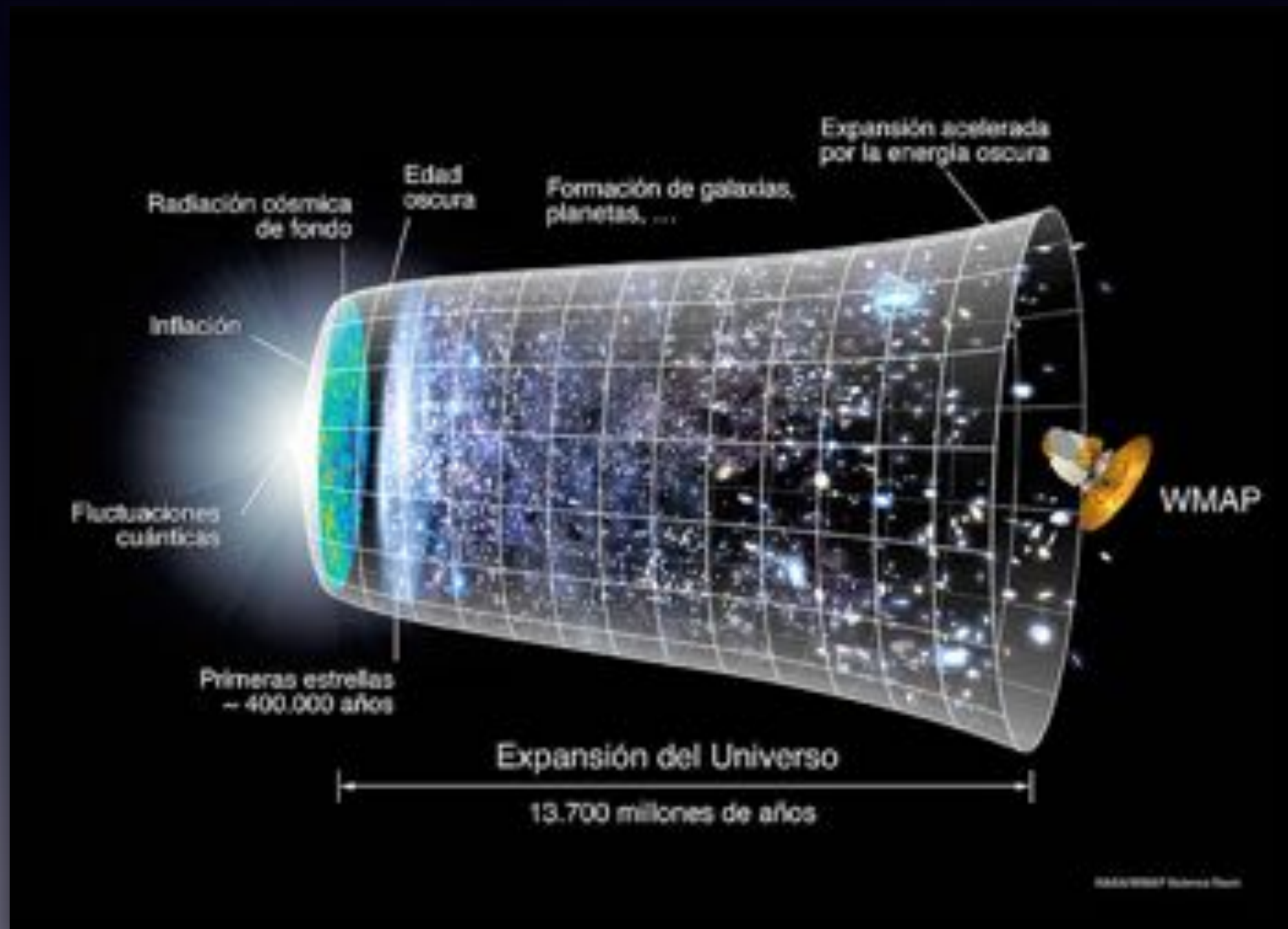


Aquesta inspecció va revelar l'estructura a gran escala en una secció de l'Univers local

Sondeig del desplaçament al roig de galàxies en un camp de 2 graus

NOVÈ ESGLAÓ

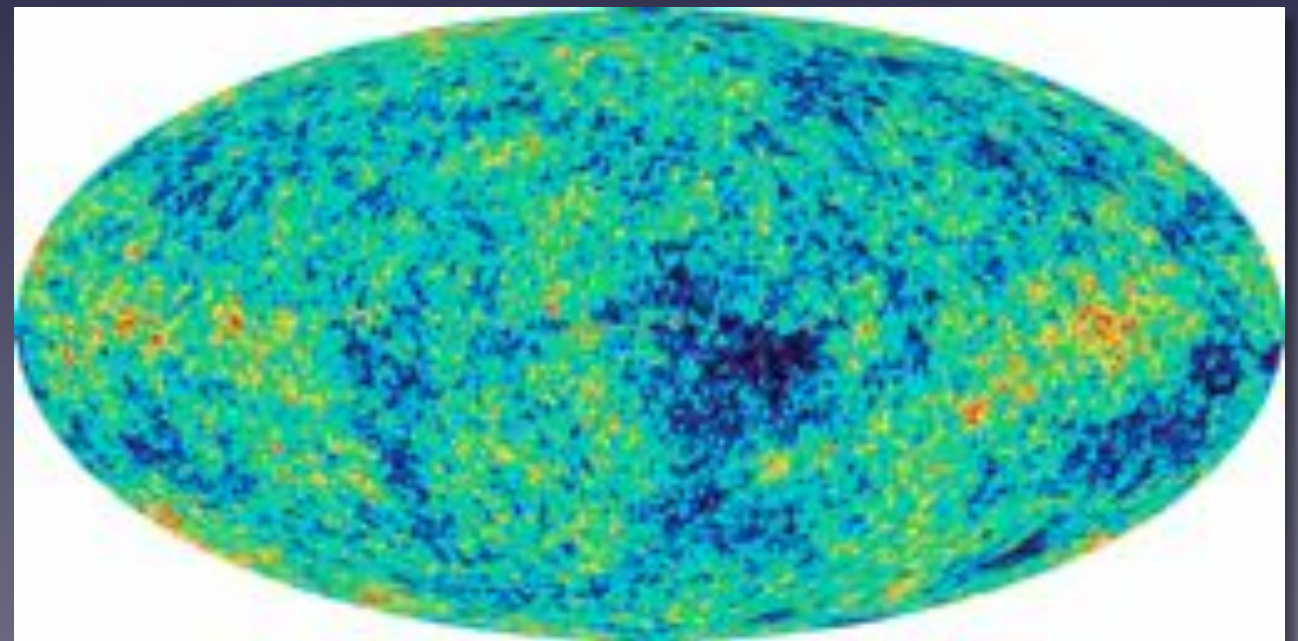
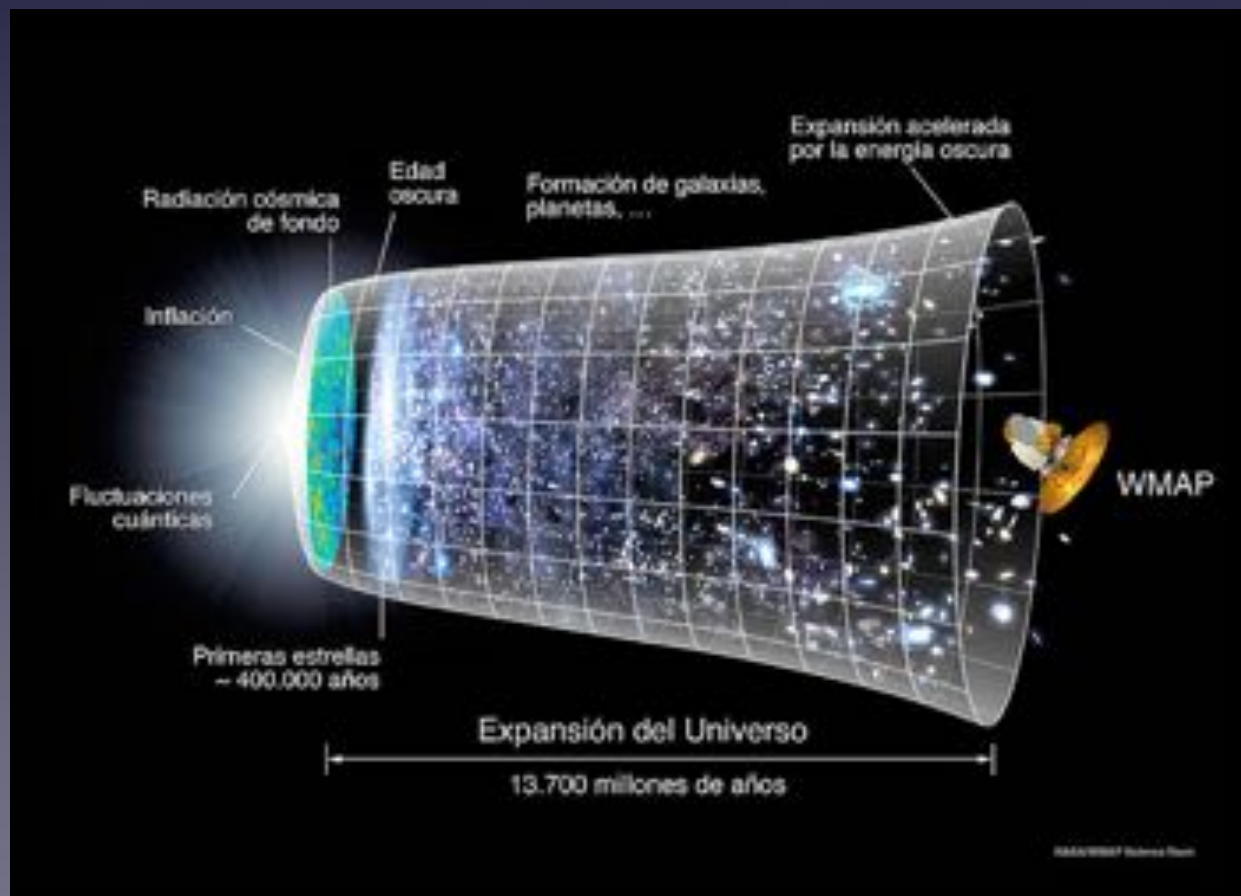
L'Univers



NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

- Objecte **més llunyà** detectat (brot de raigs gamma):
13 mil milions anys llum
- **Diàmetre** de l'univers observable = 28 mil milions anys llum
- **Diàmetre** de l'univers > 78 mil milions anys llum
- **Edat** de l'univers = 13700 milions d'anys



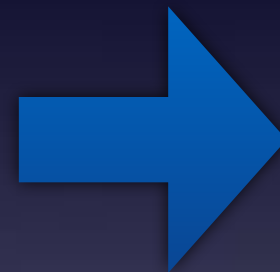
Cosmic microwave background fluctuation, WMAP

NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

Aquest esglaó és **molt actiu** actualment

- Relativitat General
- Quàntica, Cordes ...



Moltes Matemàtiques

$$R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}T g_{\mu\nu} \right)$$

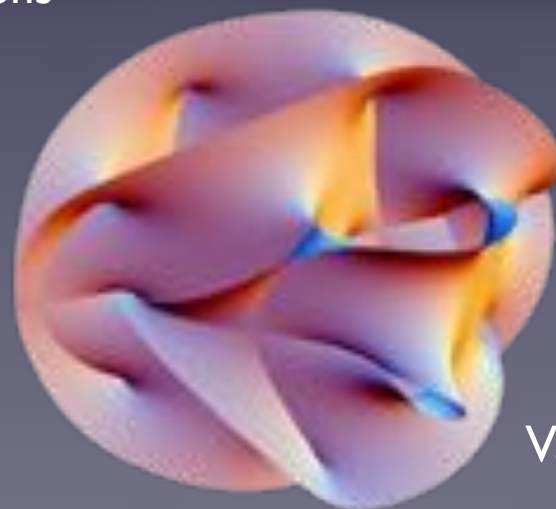
Forma matemàtica de les equacions
del camp d'Einstein

$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

Solució de Schwarzschild
(forat negre)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi$$

Equació de Schrödinger



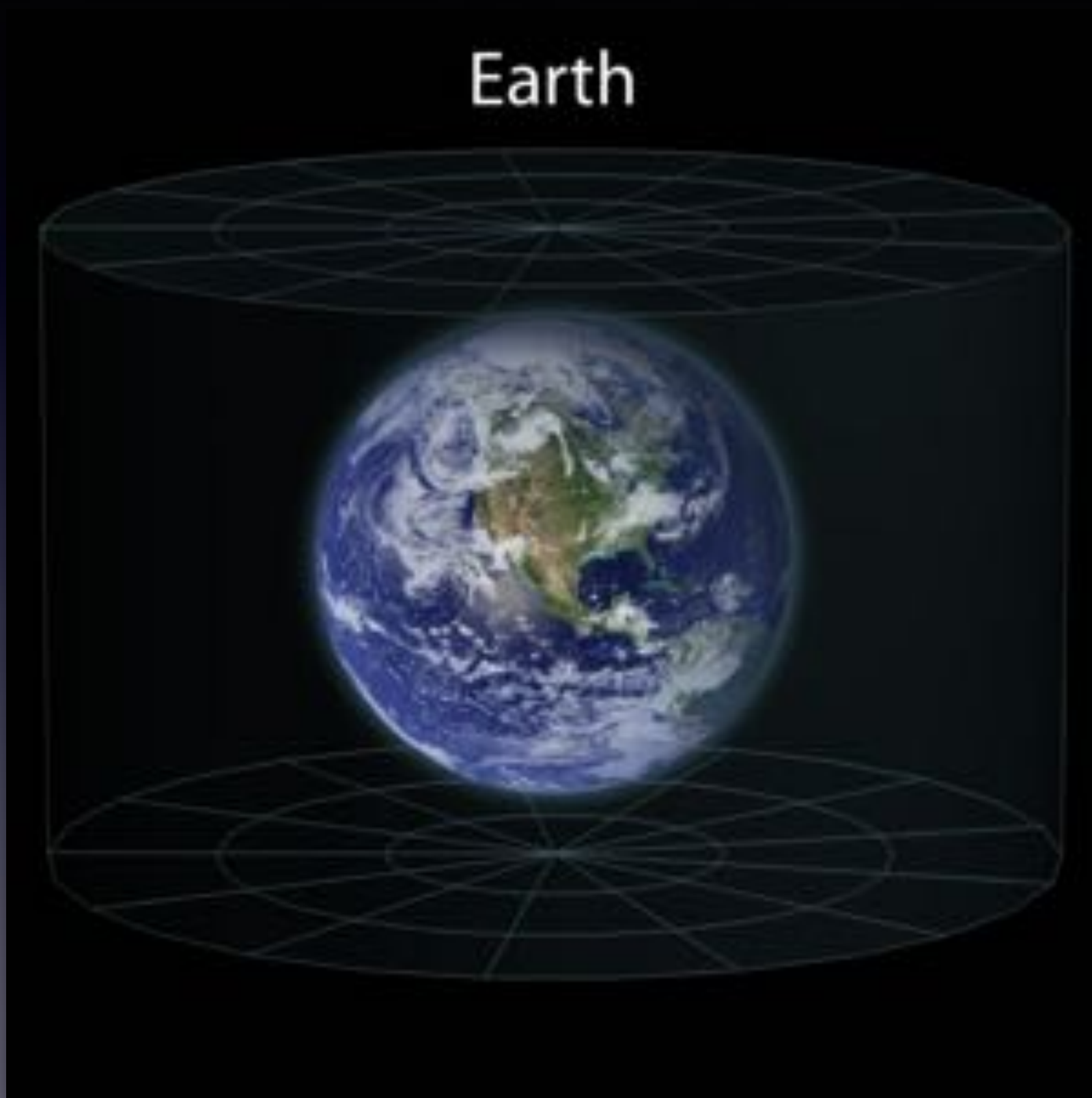
Varietat de Calabi-Yau, Teoria de
Supercordes

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Omega dJ + \Phi dQ$$

Primera Llei de un forat negre

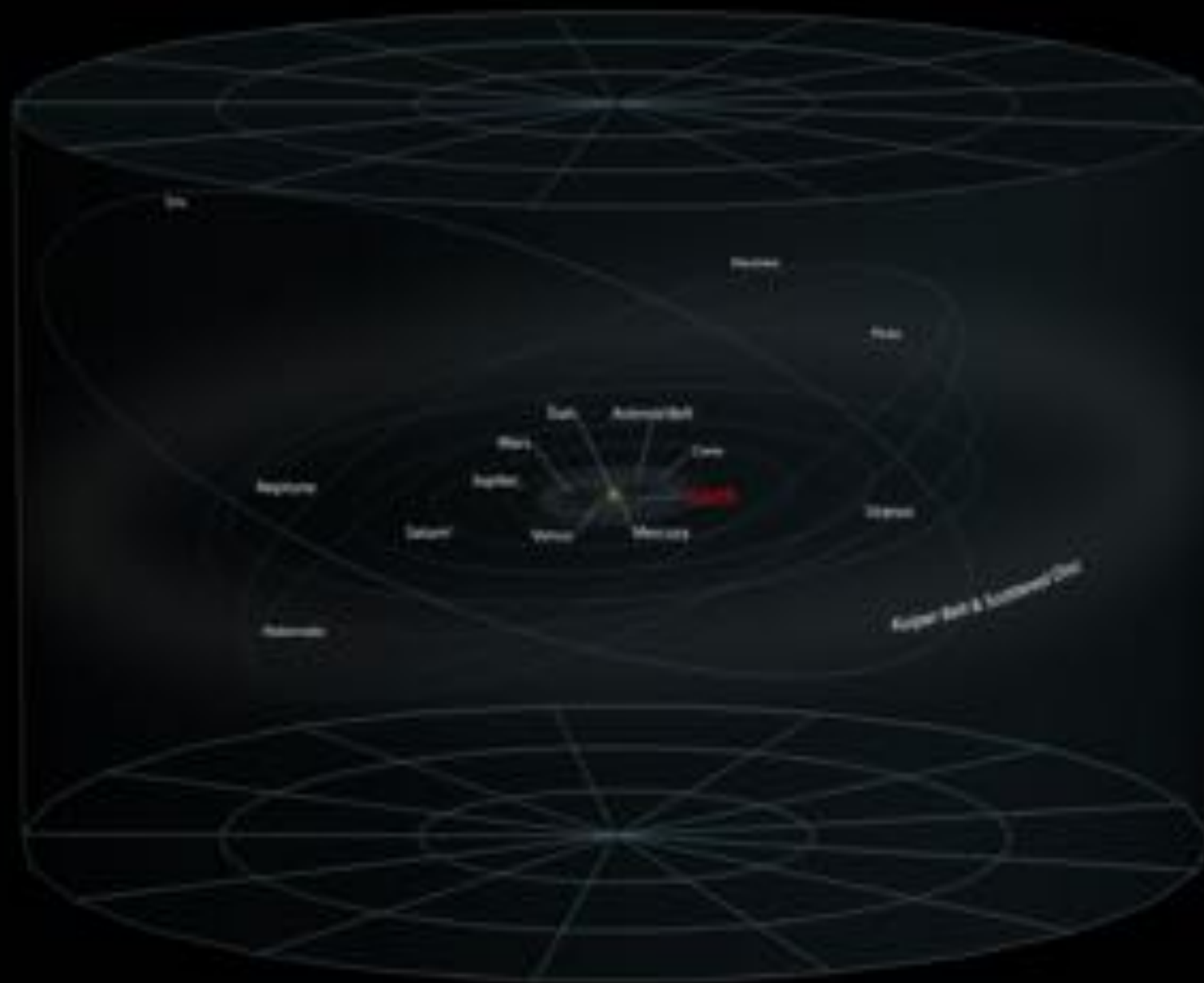
ELVIATGE

Earth



ELVIATGE

Solar System

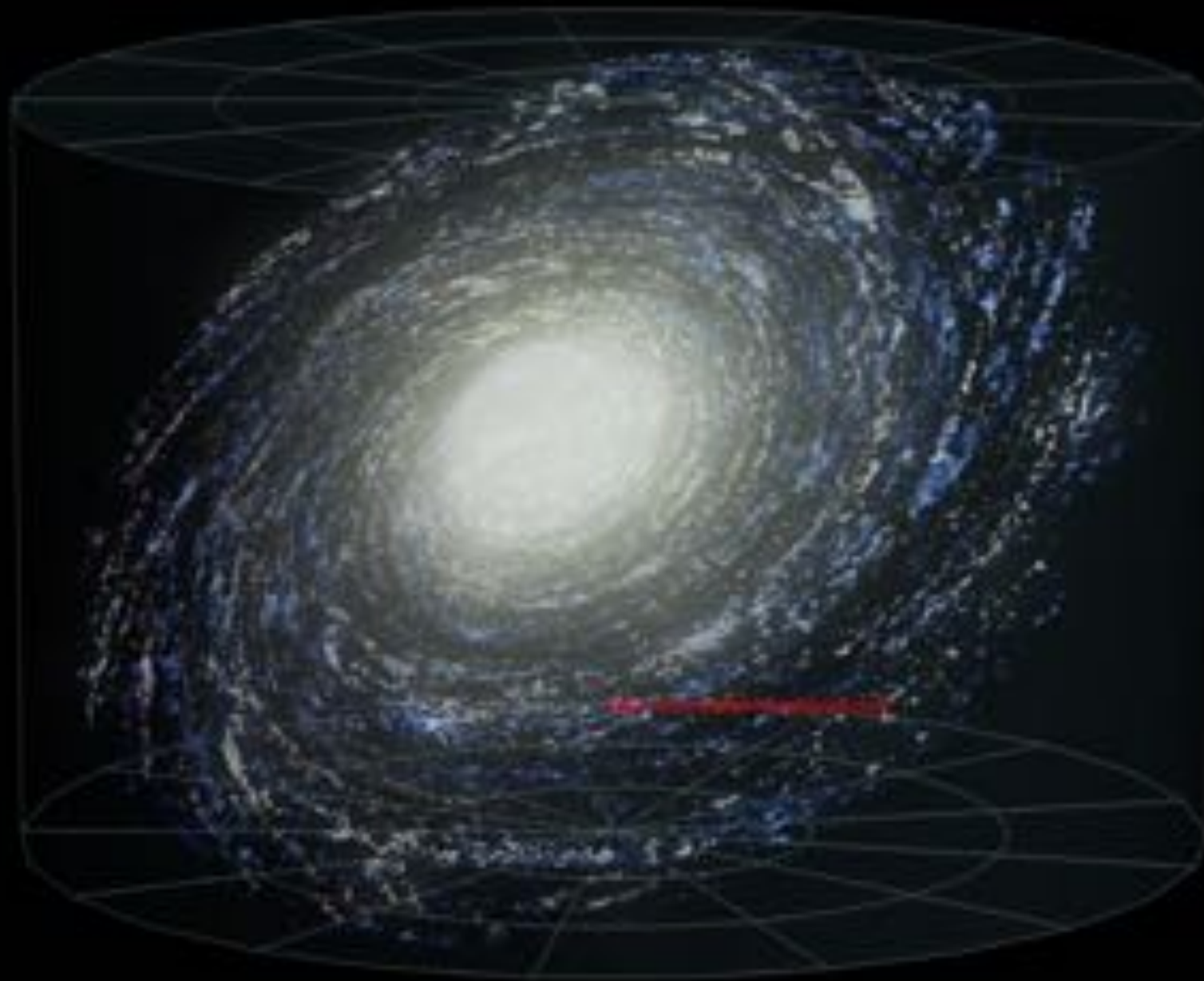


Solar Interstellar Neighborhood



ELVIATGE

Milky Way Galaxy



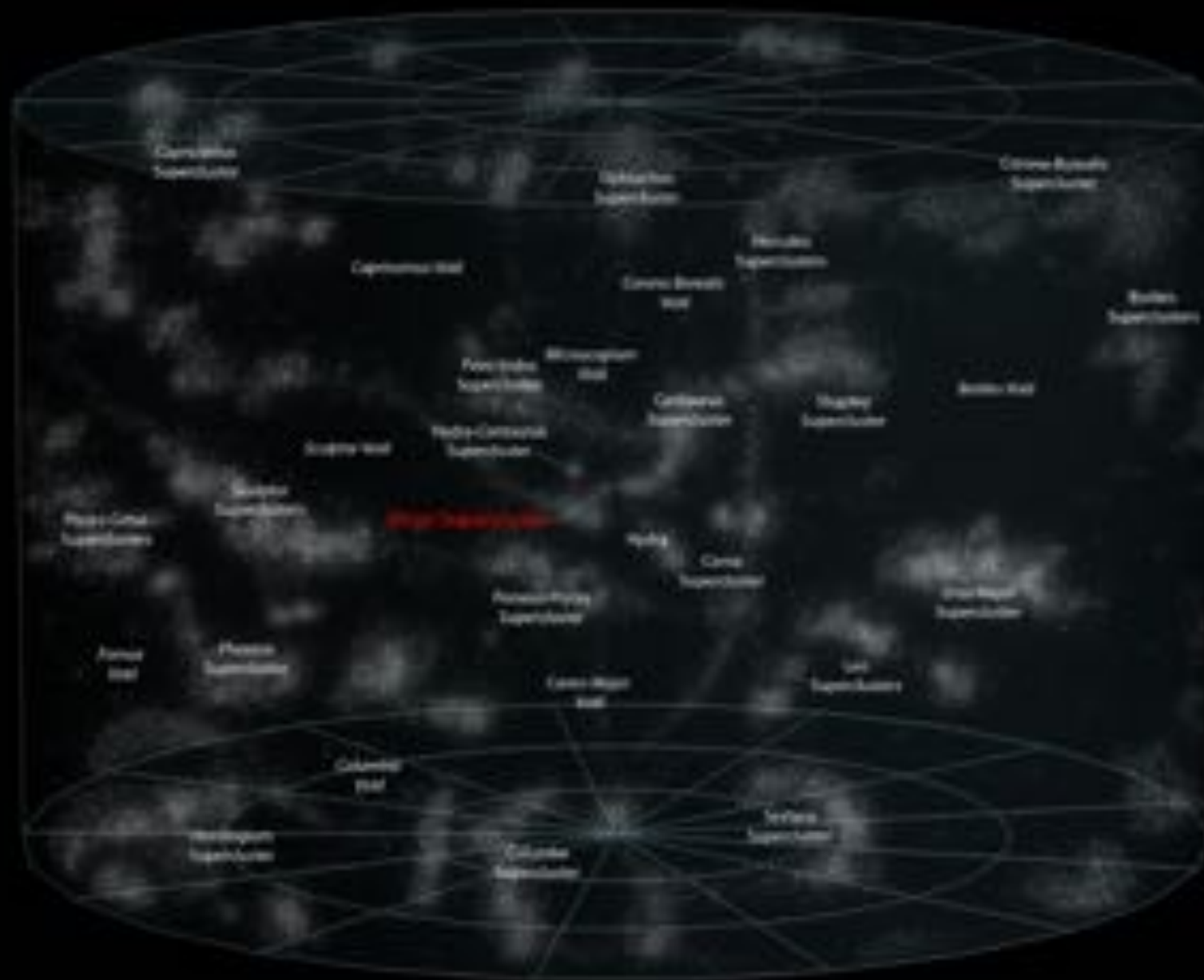
Local Galactic Group

EL VIATGE

Virgo Supercluster

EL VIATGE

Local Superclusters

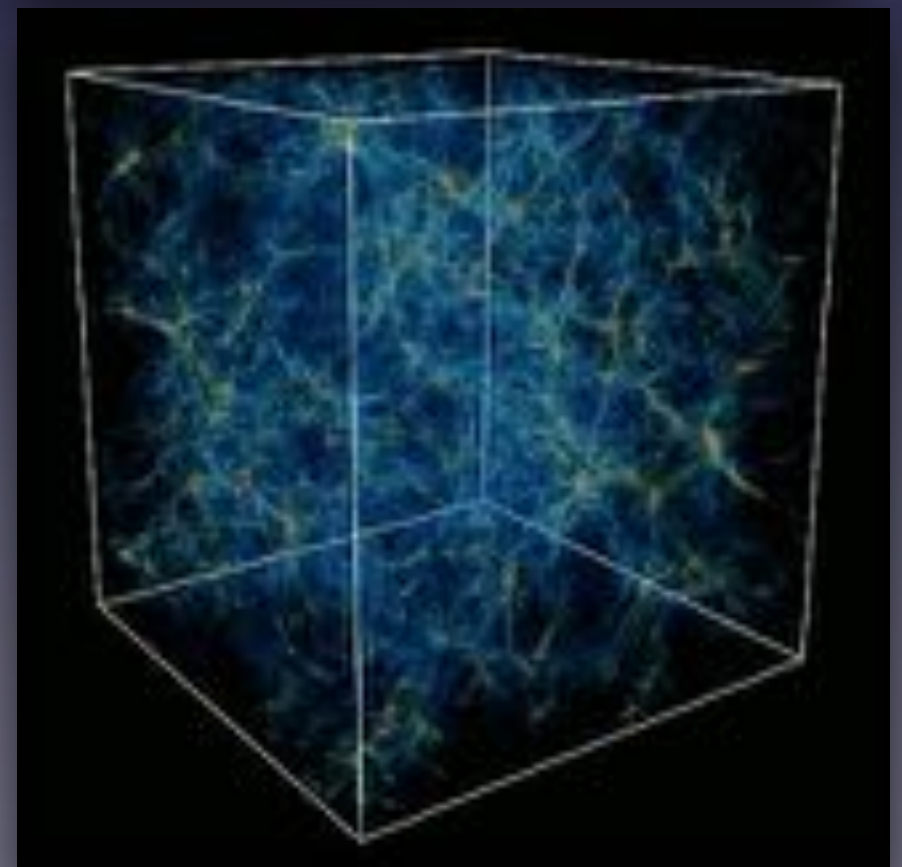
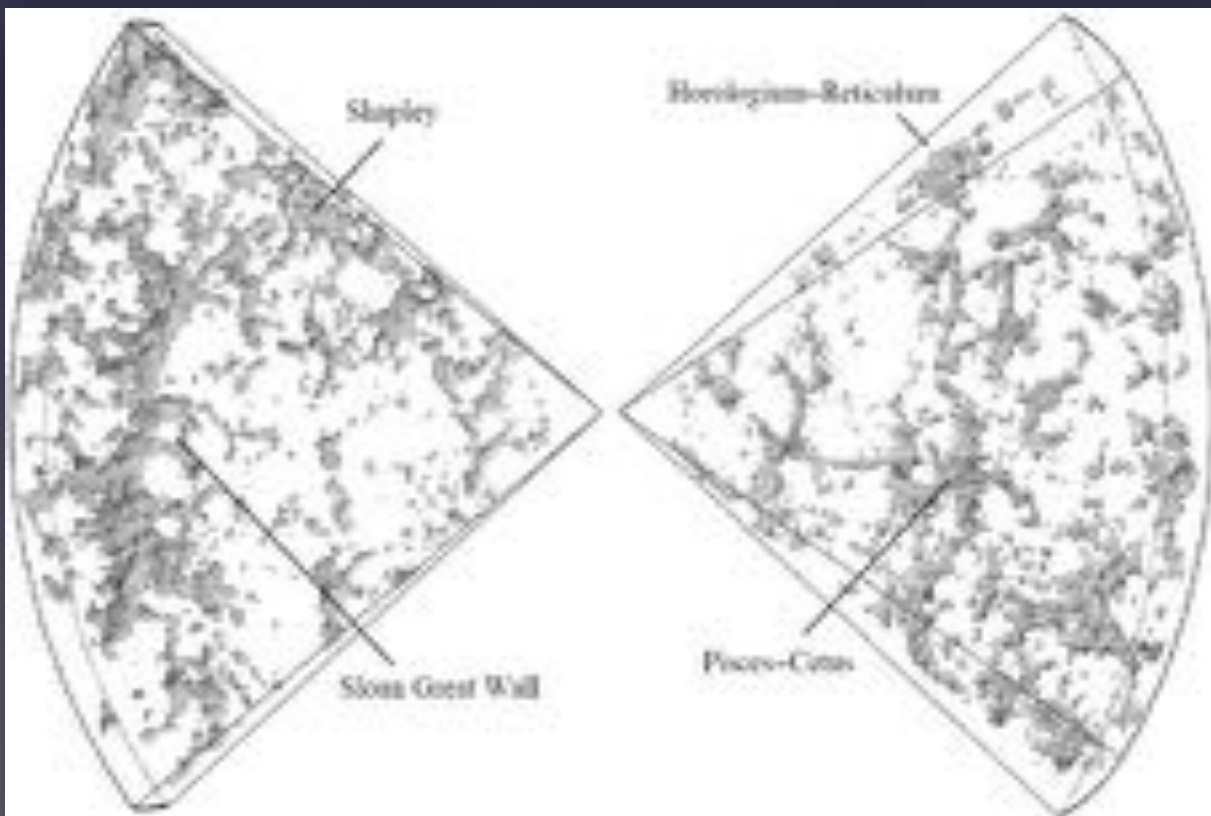


ELVIATGE

Observable Universe



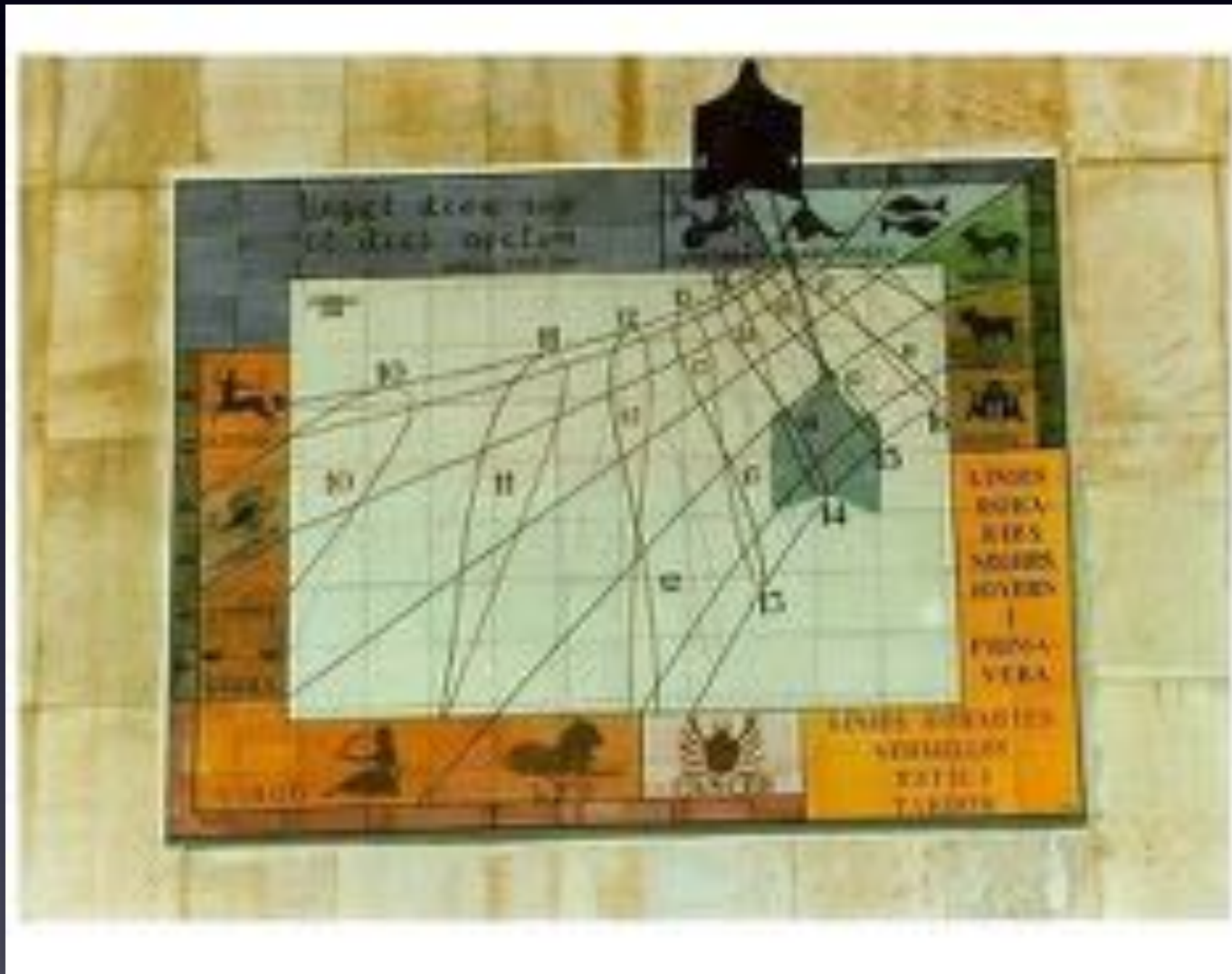
ELVIATGE



REFERENCIAS

- *Cosmos*, Carl Sagan
- *El Universo*, Isaac Asimov
- *Hiperespacio*, Michio Kaku
- *The Cosmic Distance Ladder*, Terence Tao (UCLA)
- Portal d'Astronomia, Wikipedia
- *Los tres primeros minutos del Universo*, Steven Weinberg
- La Tierra en el Universo
http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_location_in_the_universe
- Gravity Probe:
<http://einstein.stanford.edu/MISSION/missionI.html>

REFERENCIES



Rellotge de Sol
Facultat de Ciències de la UAB

Curs d'Astronomia Joan Girbau

[http://www.uab.cat/servlet/Satellite/
divulgacio/videos-dels-dissabtes-curs-d-
astronomia-llicons-/curs-d-
astronomia-1345658878522.html](http://www.uab.cat/servlet/Satellite/divulgacio/videos-dels-dissabtes-curs-d-astronomia-llicons-/curs-d-astronomia-1345658878522.html)

GRÀCIES!