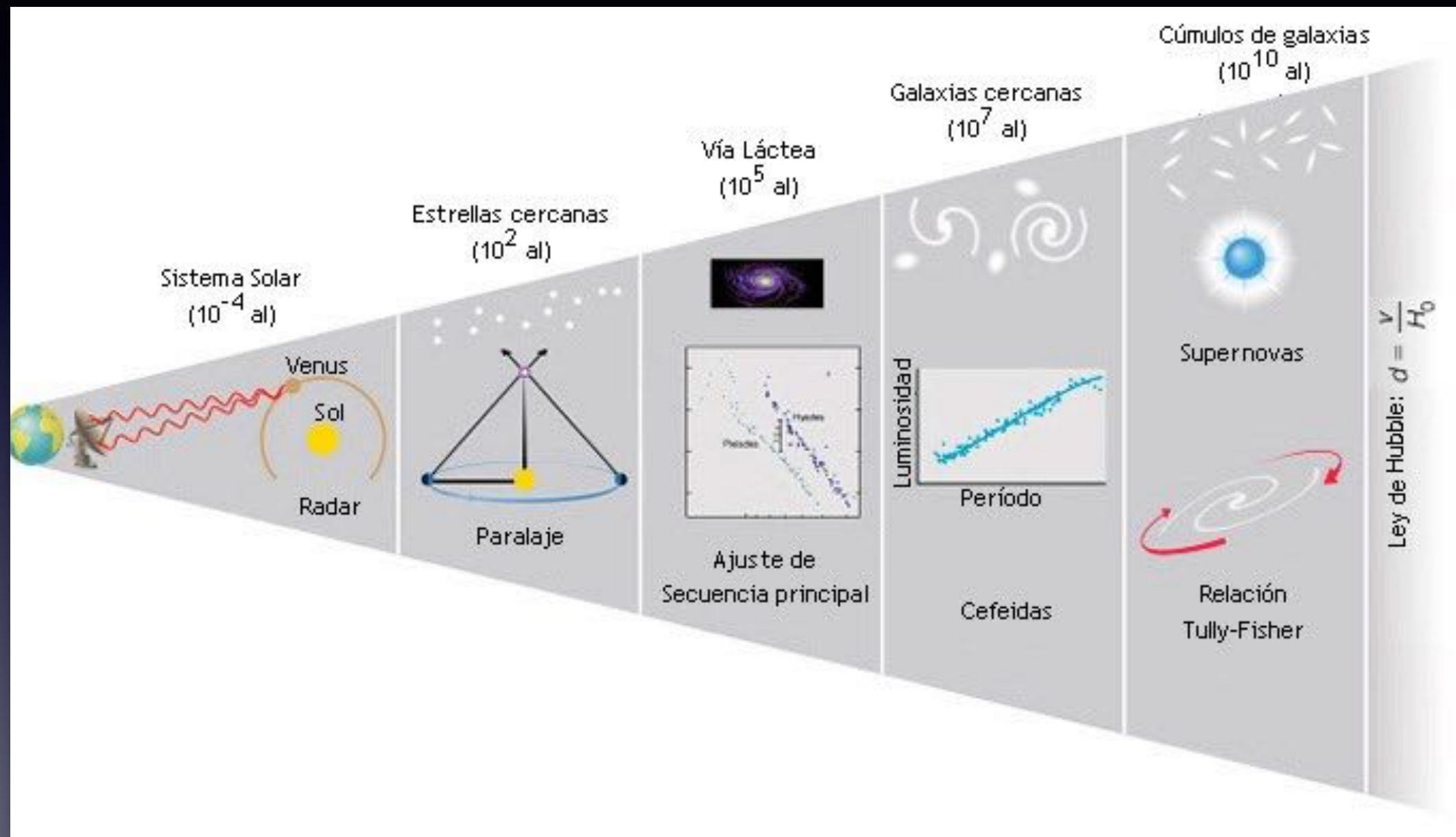


Tot mesurant l'Univers



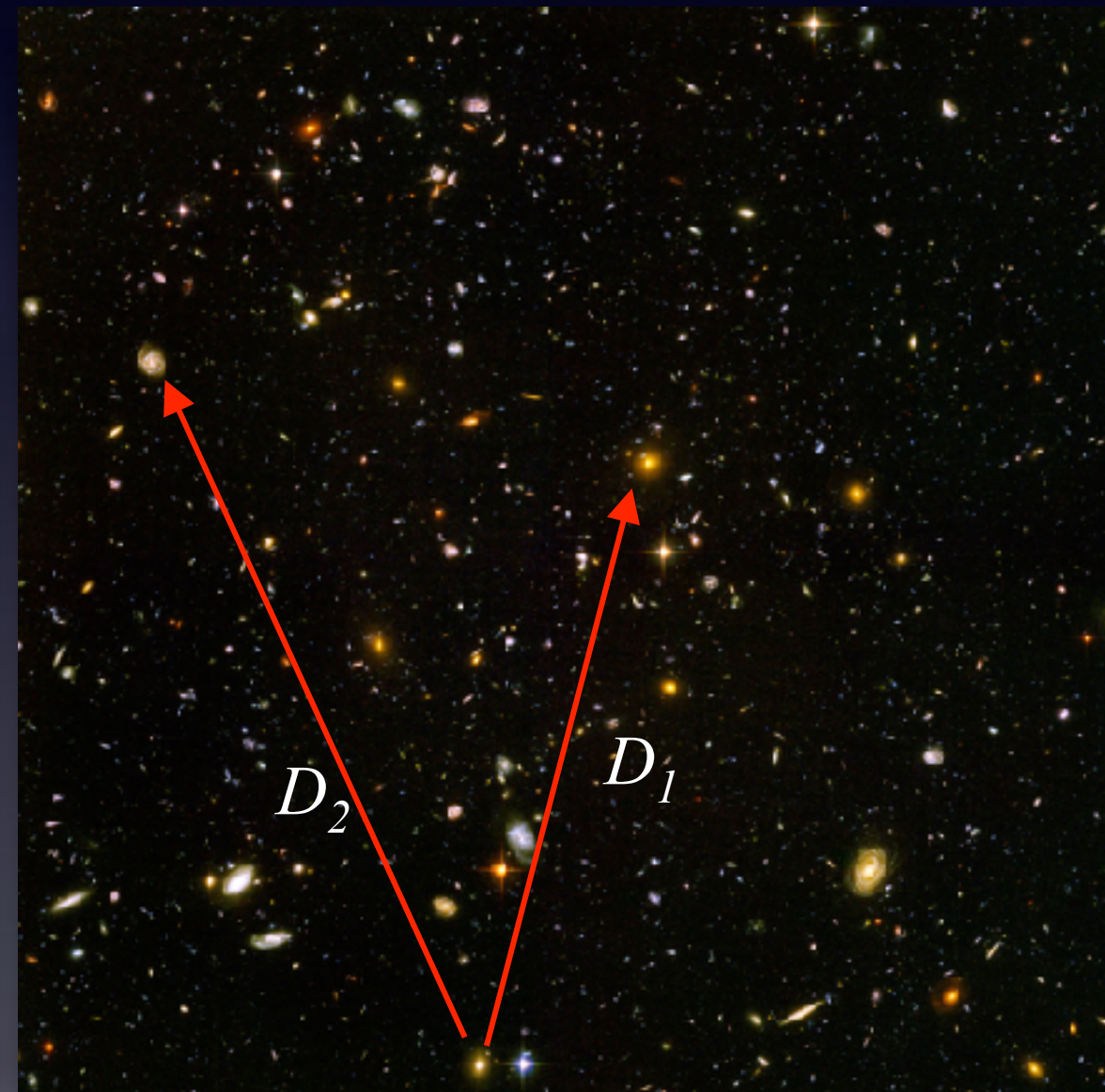
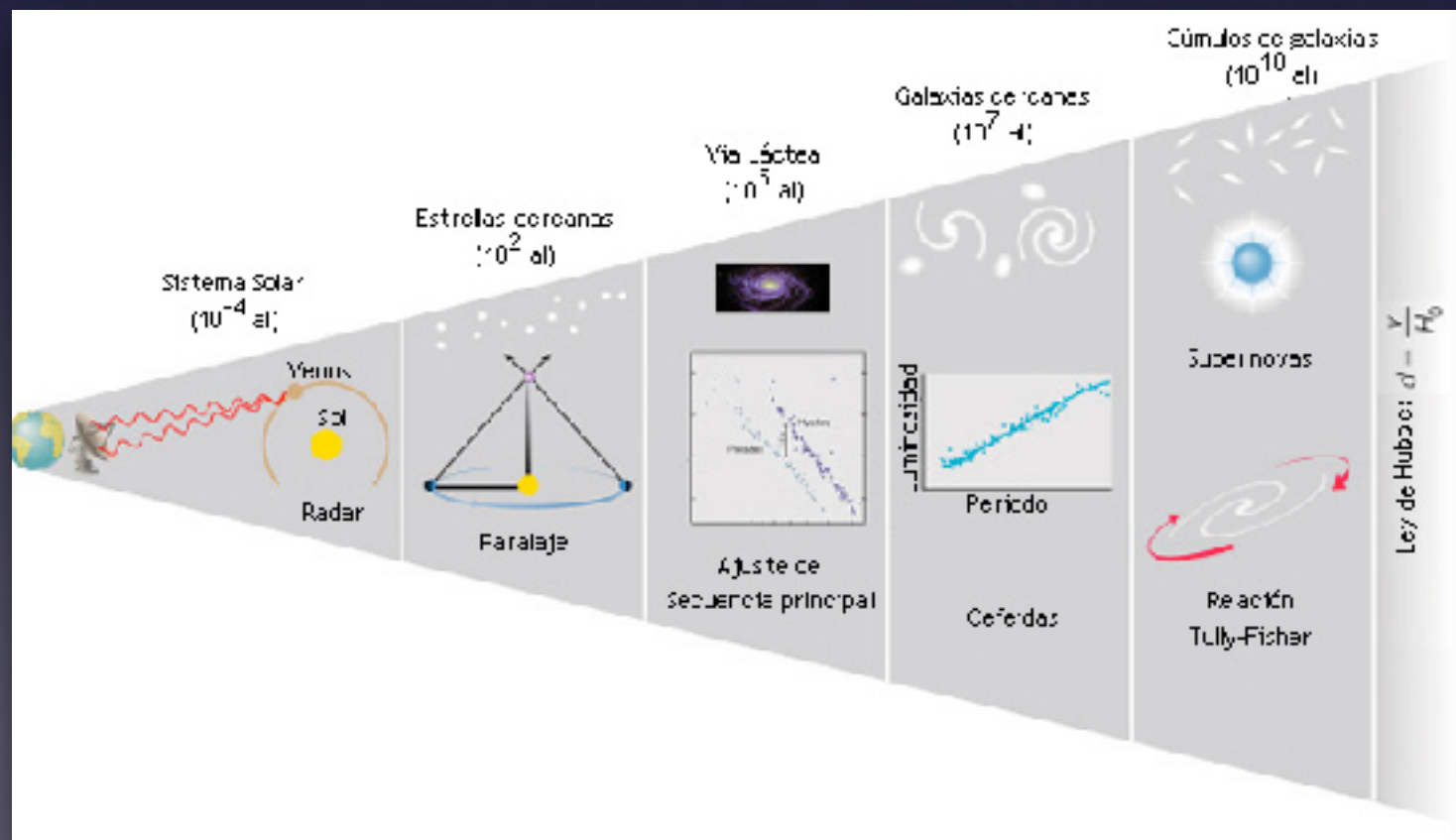
Eduard Gallego
Universitat Autònoma de Barcelona

Dissabte de les Matemàtiques
11 març 2017

- 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 estels propers, Sol i estels llunyans.*

- 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**.



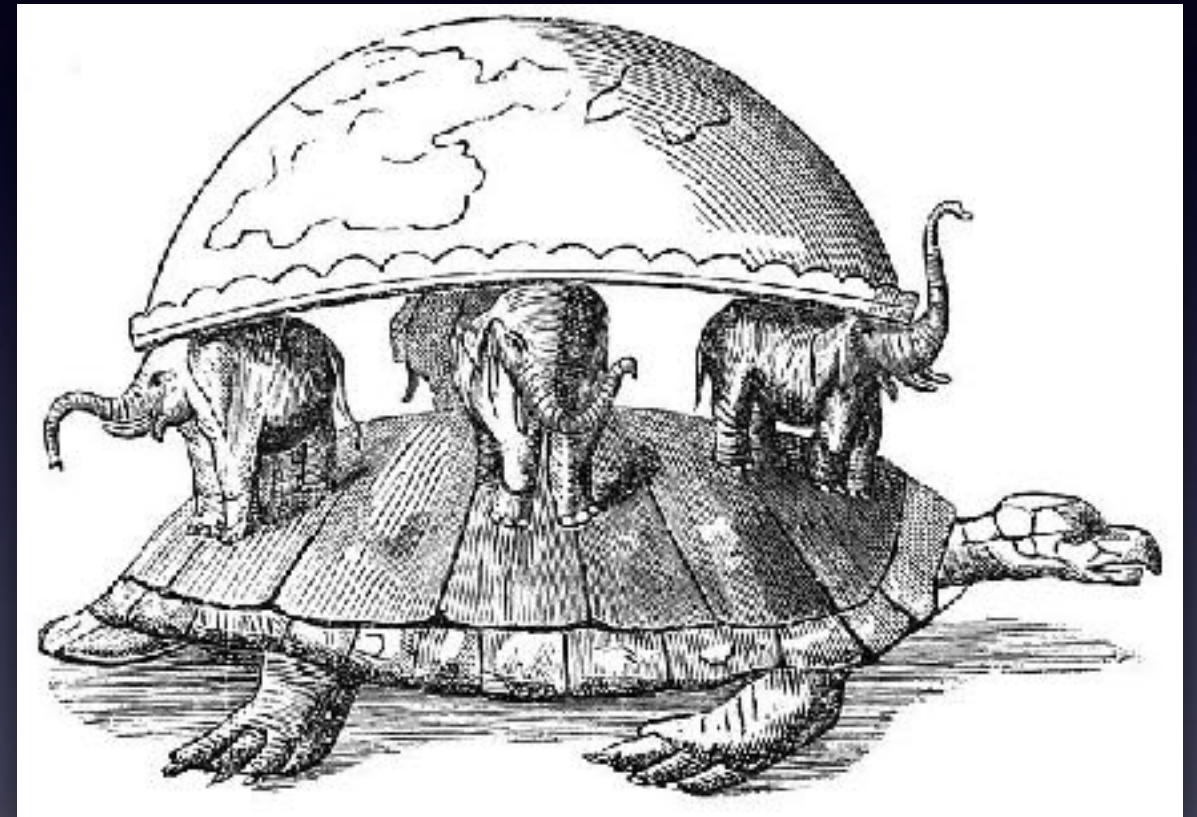
Aquesta és l'**escala de distàncies còsmiques**.

PRIMER ESGLAÓ

La Terra

Avui sabem:

- la Terra és aproximadament **esfèrica**
- **radi** a l'equador: 6378 km
(**radi** en el pol: 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

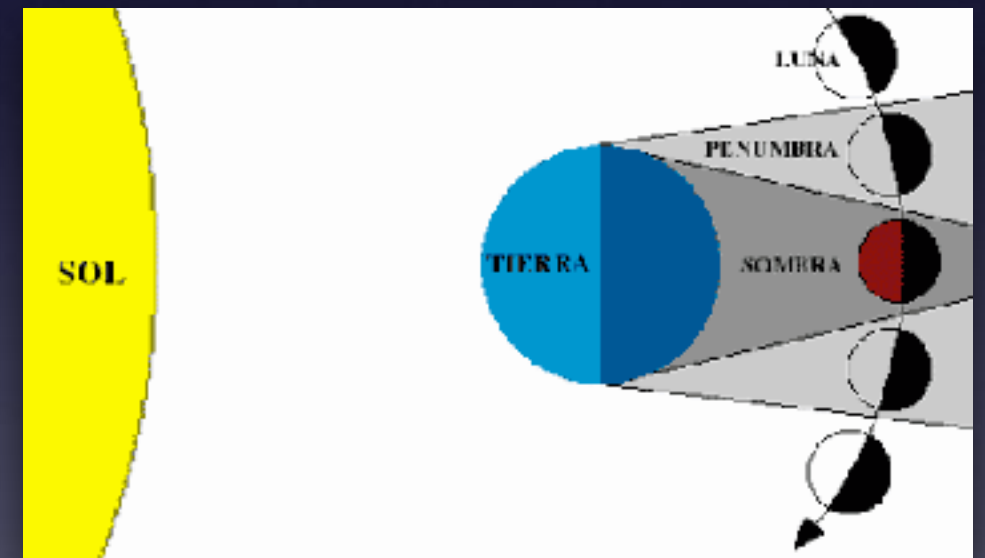
La Terra

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

Eclipsi 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 del contorn l'ombra és sempre un **arc** de circumferència sobre la Lluna.

Geometria: **l'esfera** és el cos que totes les seves ombres tenen com a contorn un arc de circumferència.

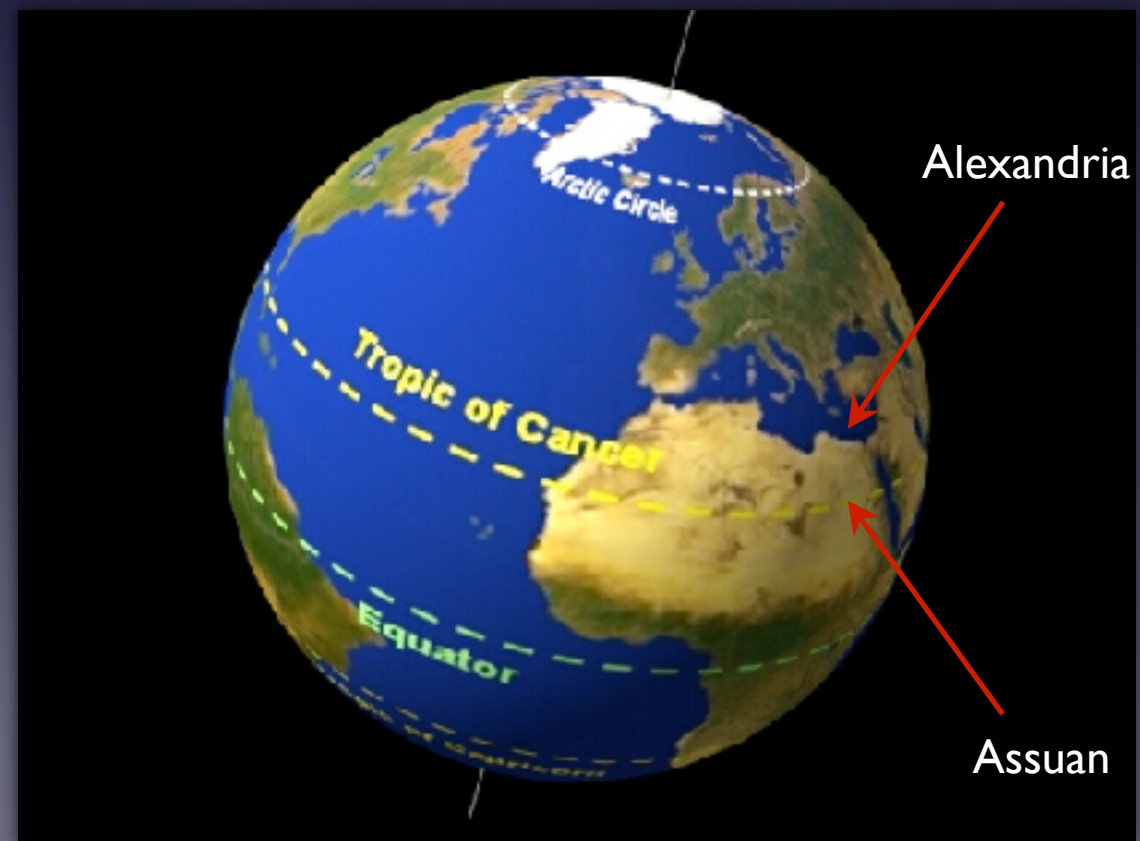
PRIMER ESGLAÓ

La Terra



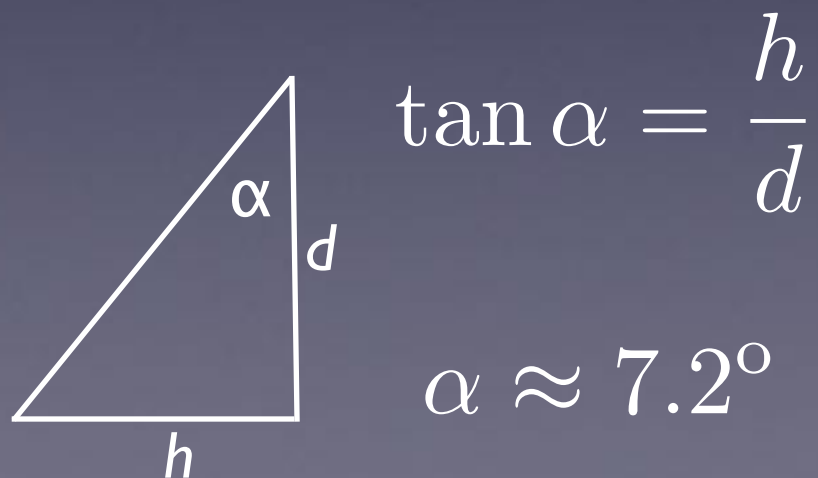
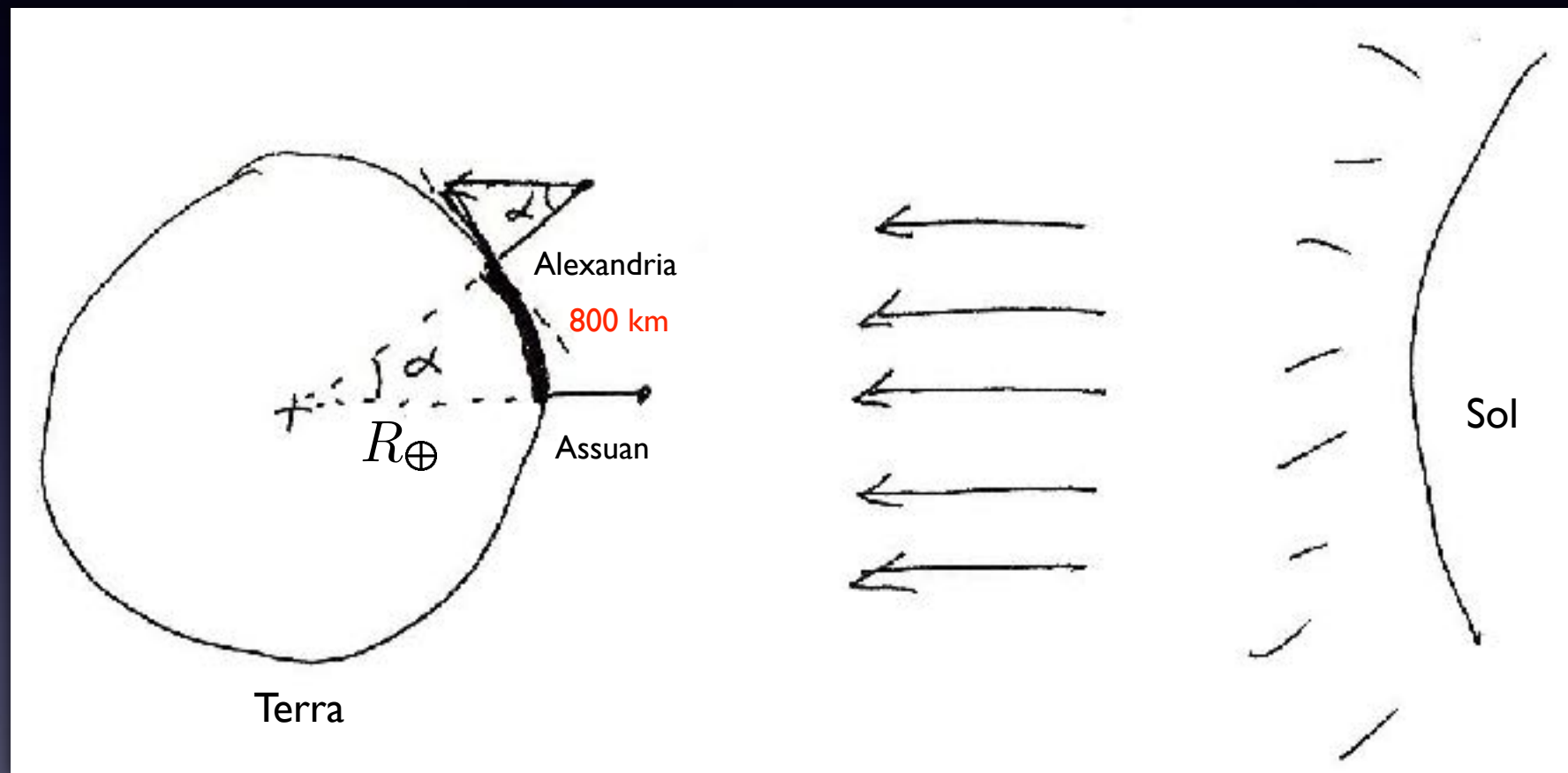
Eratòstenes (276-194 a.c.)

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



PRIMER ESGLAÓ

La Terra



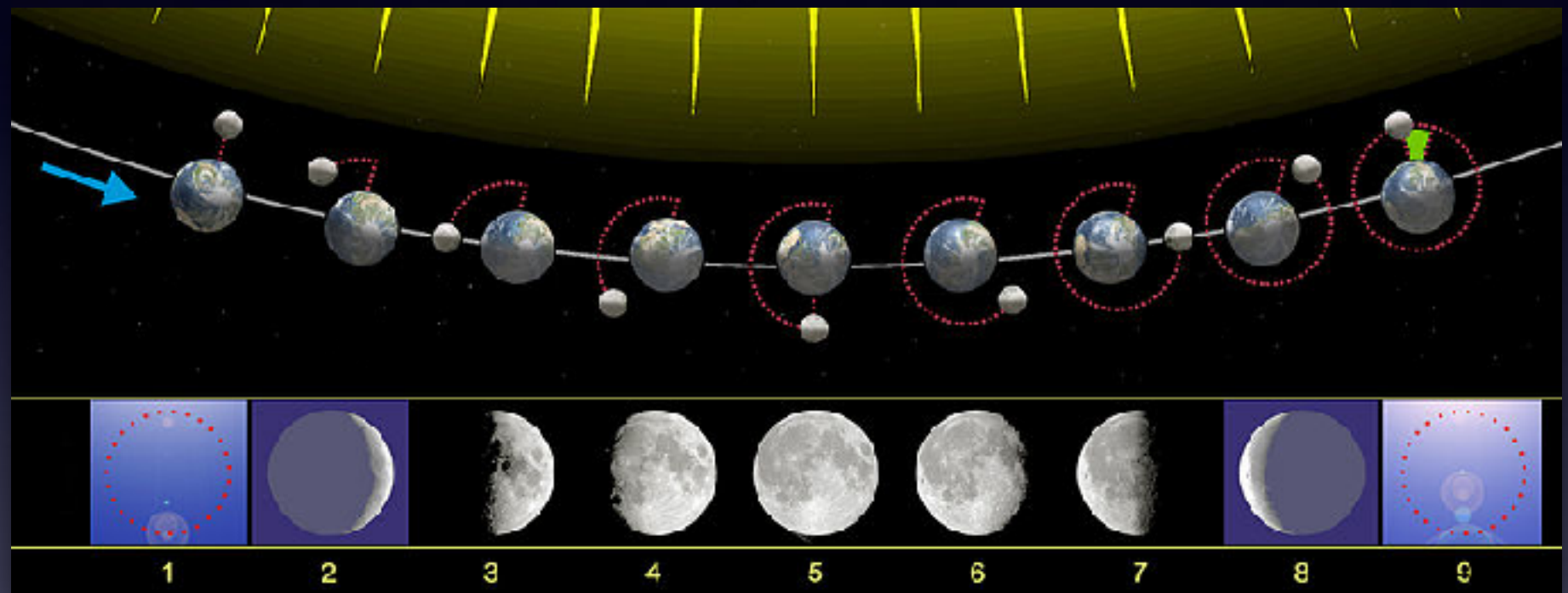
$$\alpha \approx 7.2^\circ$$

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

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

SEGON ESGLAÓ

La Lluna



Qüestions

- Forma
- Mida
- Distància a la Terra

Forma **esfèrica**

Una part de la vora de les fases de la lluna sempre és un arc d'el.lipse
Geometria: tota figura amb aquesta propietat ha de ser una esfera.

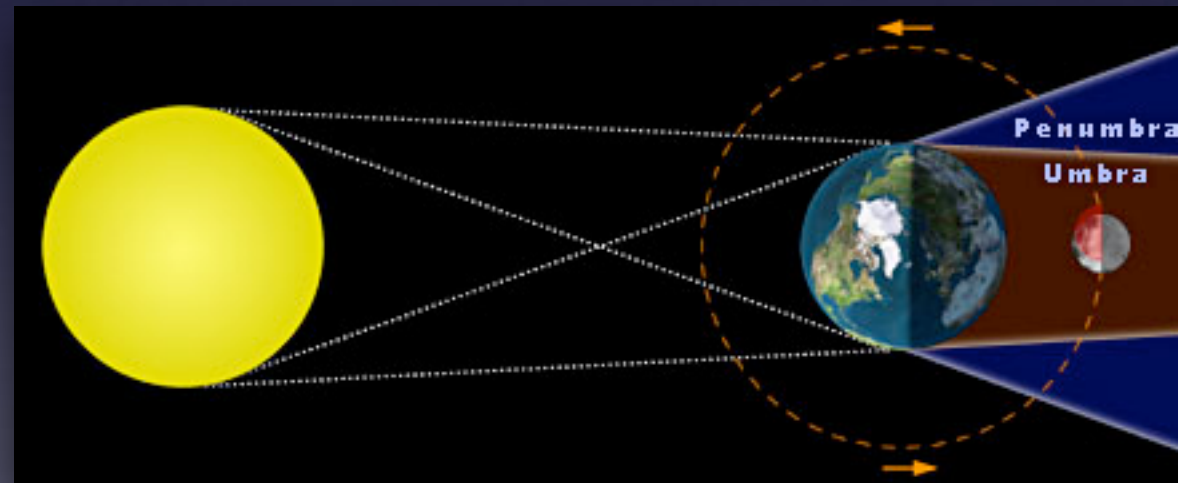
SEGON ESGLAÓ

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**).



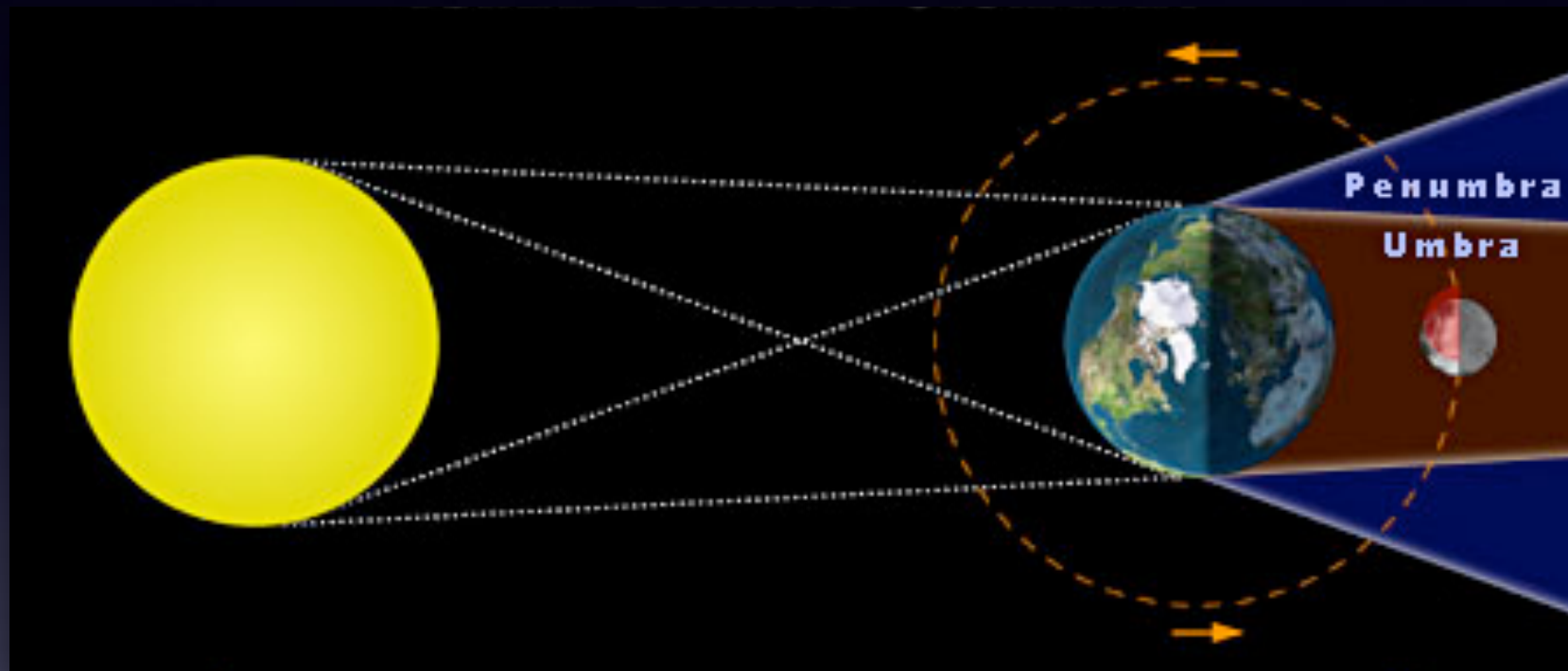
L'ombra (umbra) medeix $2R_{\oplus}$

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

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

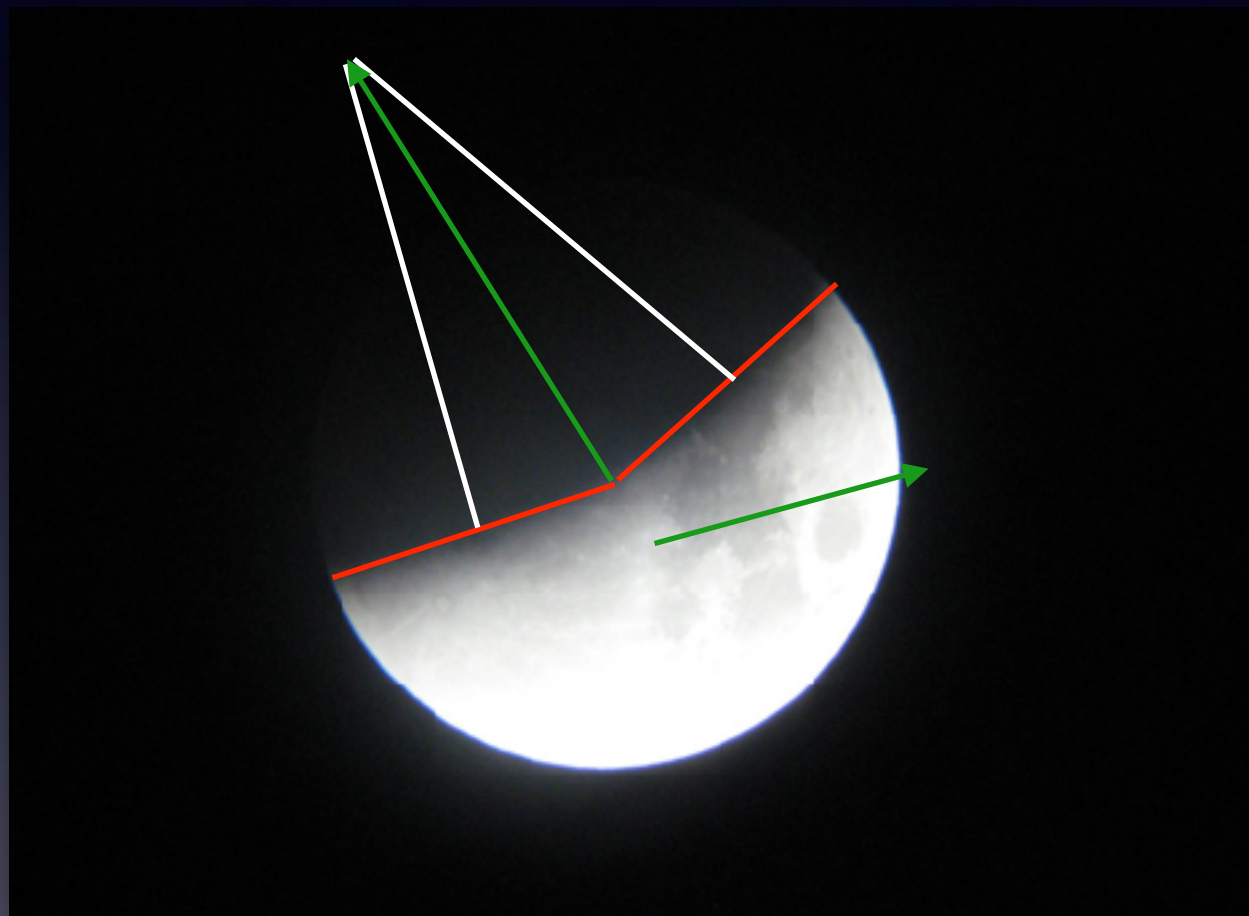
El valor de la distància de la Terra a la Lluna ja el coneixem. Per tant:

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

(En realitat és 0.27 vegades el radi terrestre)

SEGON ESGLAÓ

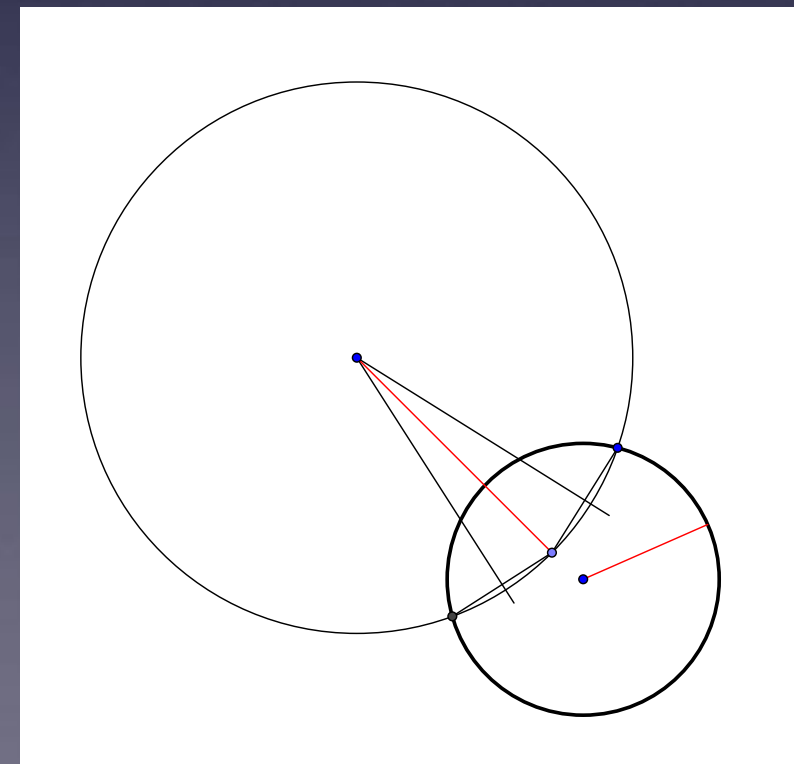
La Lluna



Dos segles més tard
Hiparc de Nicea (190-120 a.C.)
va fer servir
una altre mètode

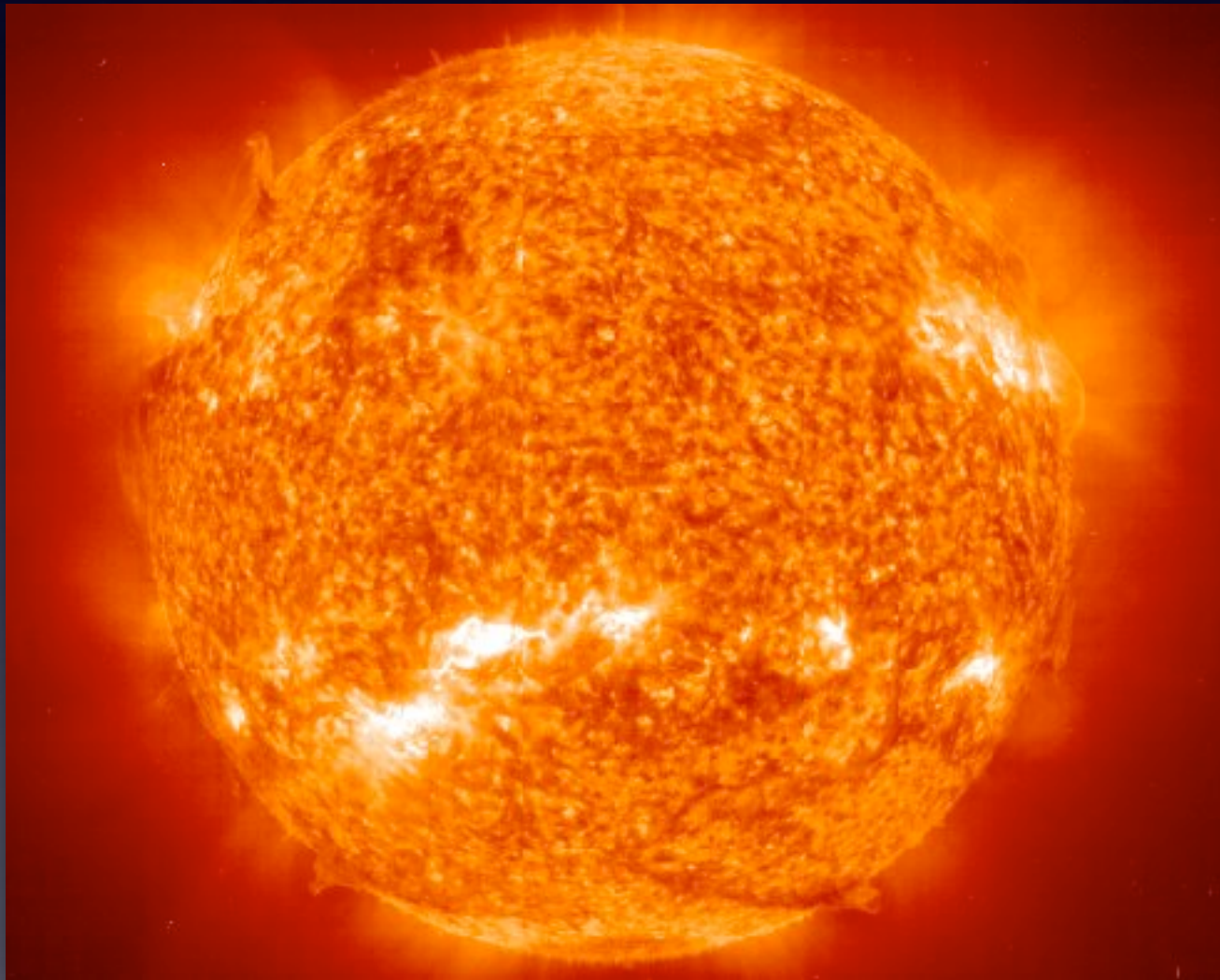
$$R_{\text{L}} \approx \frac{R_{\oplus}}{3.7}$$

Dona un valor més bo: **1719** km



TERCER ESGLAÓ

El Sol



- Mida
- 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!

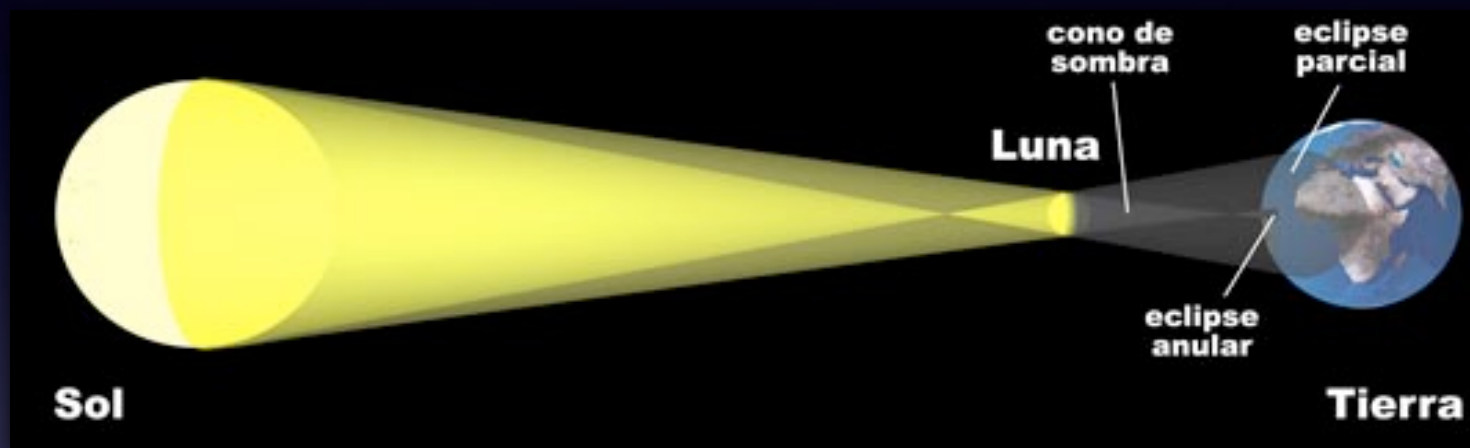
Fent servir triangles semblants
i el teorema de Tales, Aristarc
va demostrar que

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

Vegem com!

TERCER ESGLAÓ

El Sol



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



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

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

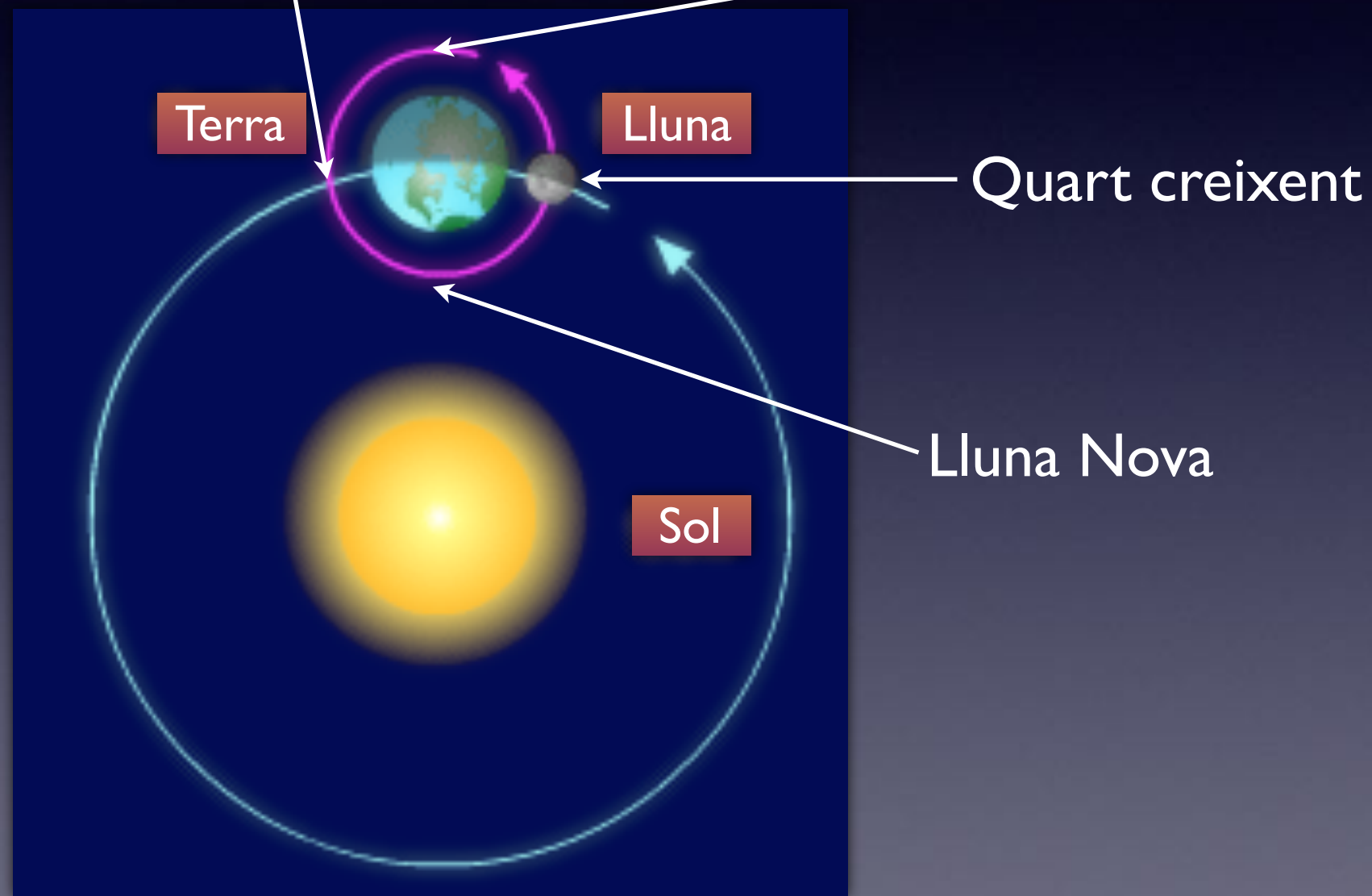
Conèixer la distància Terra-Sol **equivale** a conèixer el radi del Sol

TERCER ESGLAÓ

El Sol

Quart minvant

Lluna Plena



Terra

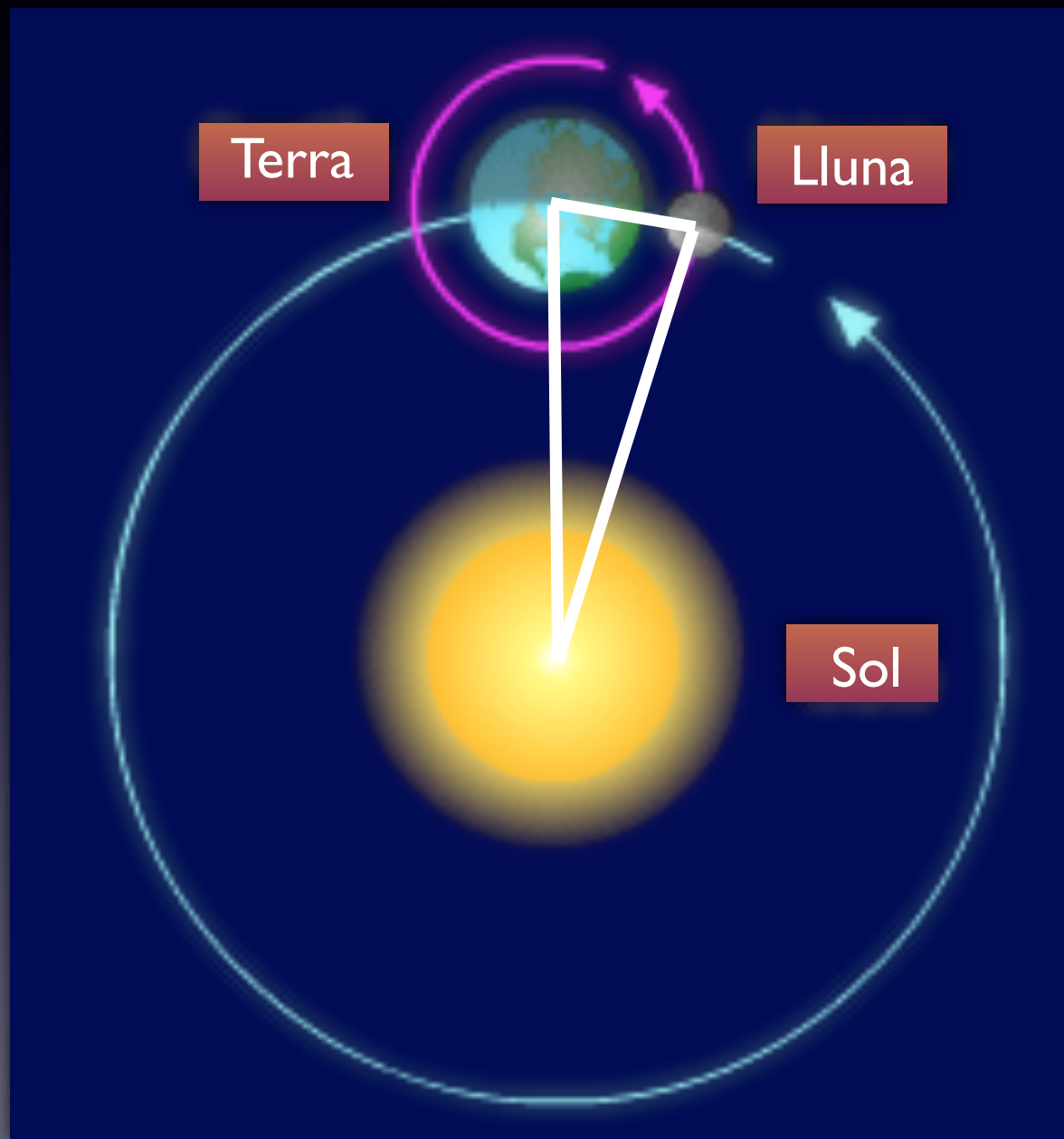
Lluna

Quart creixent

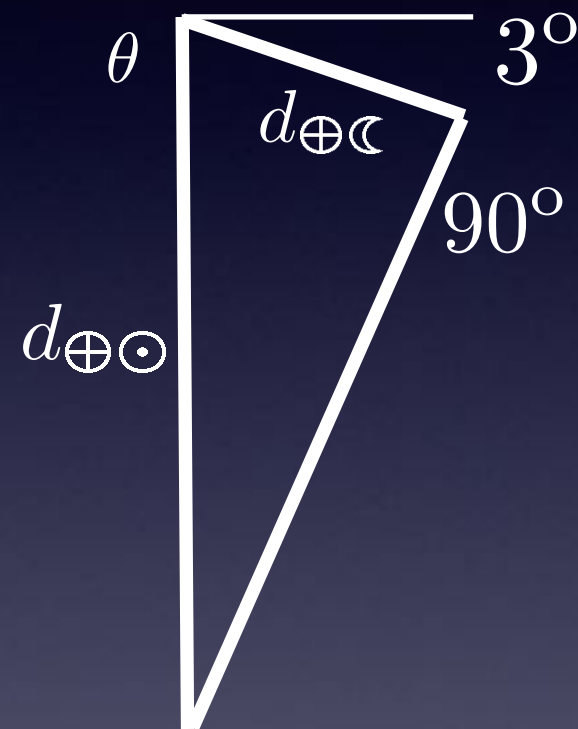
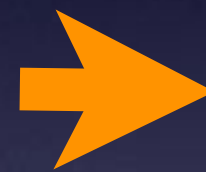
Lluna Nova

Sol

TERCER ESGLAÓ



El Sol



$$\frac{d_{\oplus\lrcorner}}{d_{\oplus\odot}} = \cos \theta$$

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

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

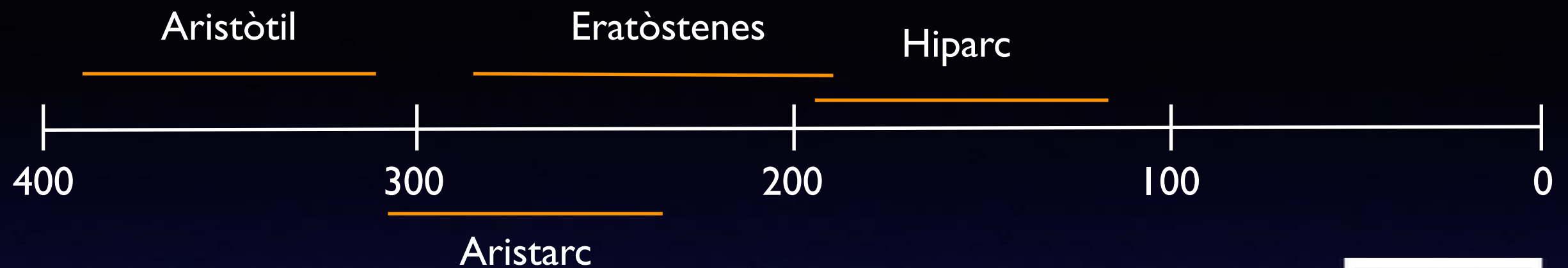
TERCER ESGLAÓ

El Sol

Distància Terra-Sol
149.597.871 km

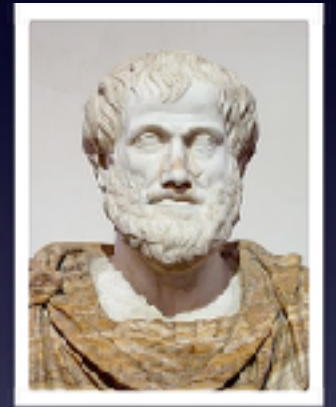
Unitat Astronòmica UA





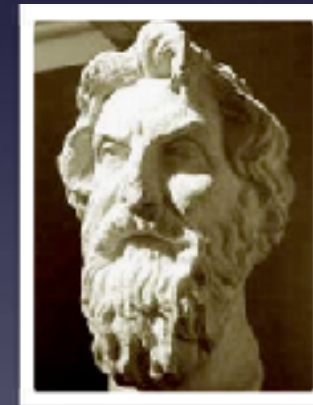
Aristòtil: la Terra i la lluna són esfèriques

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



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

Astrònom i matemàtic



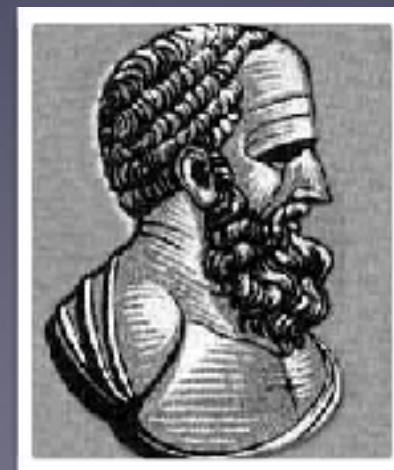
Eratòstenes: radi de la Terra

Matemàtic, astrònom i geògraf



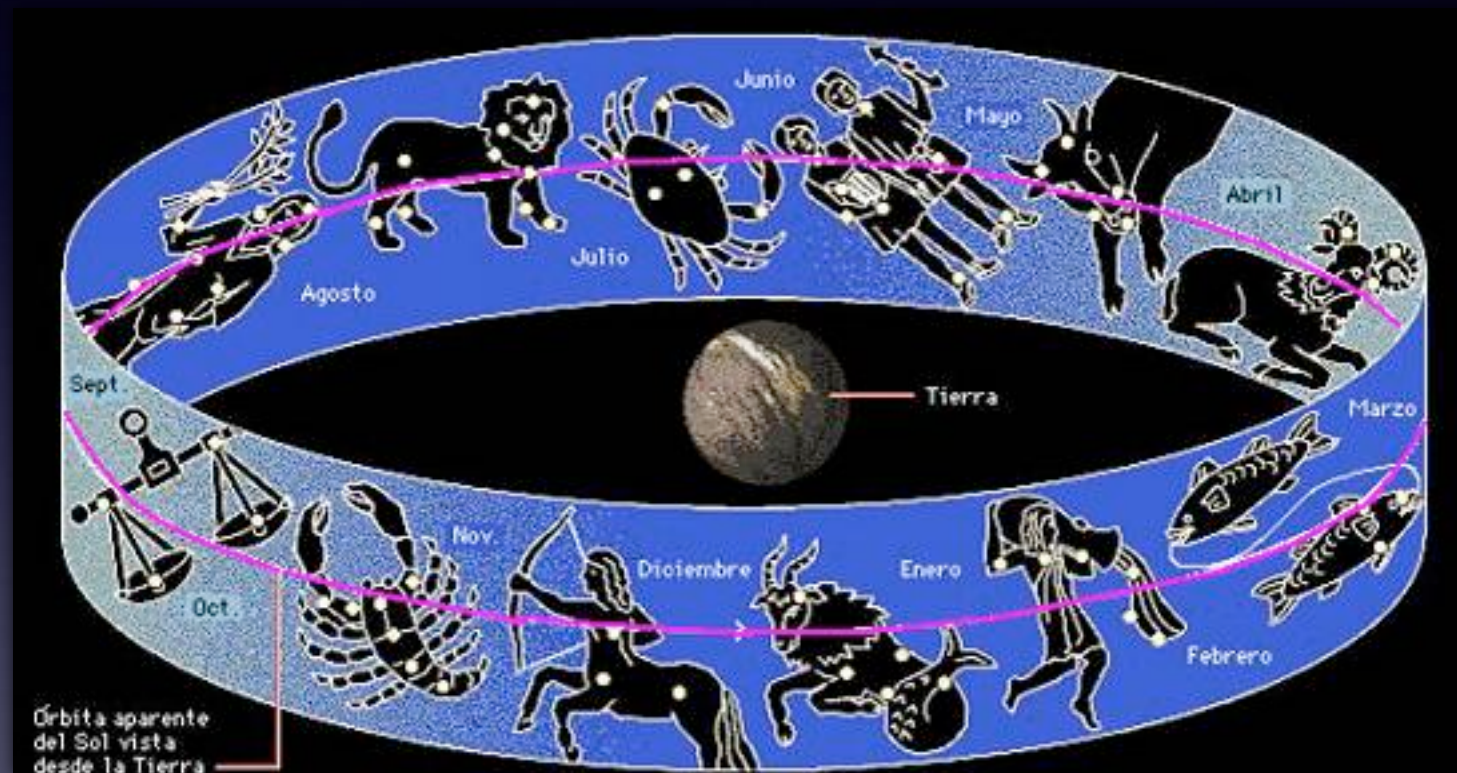
Hiparc: millora la distància a la lluna

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

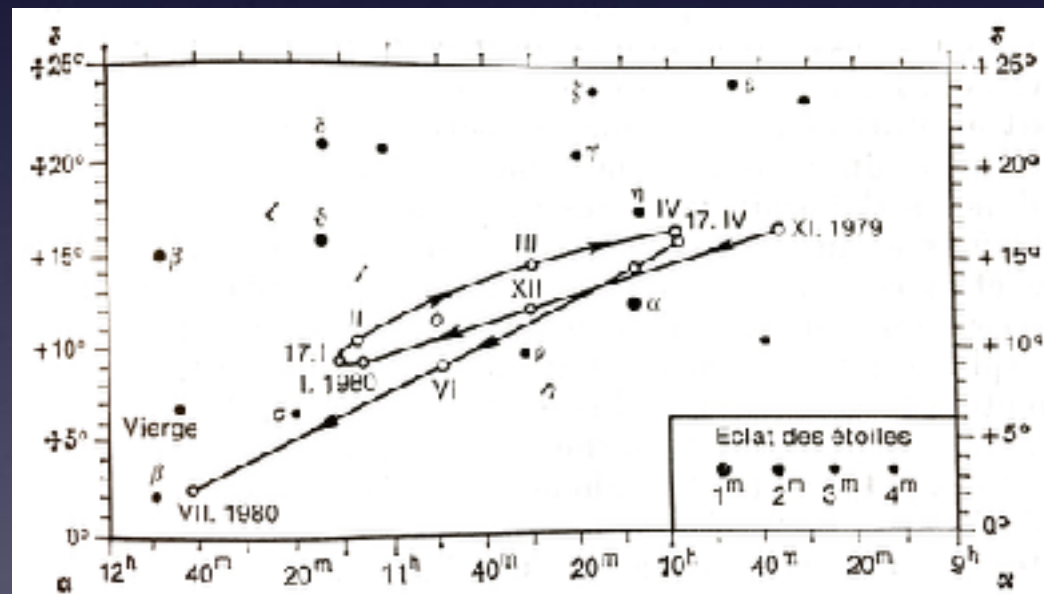
QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Qüestions

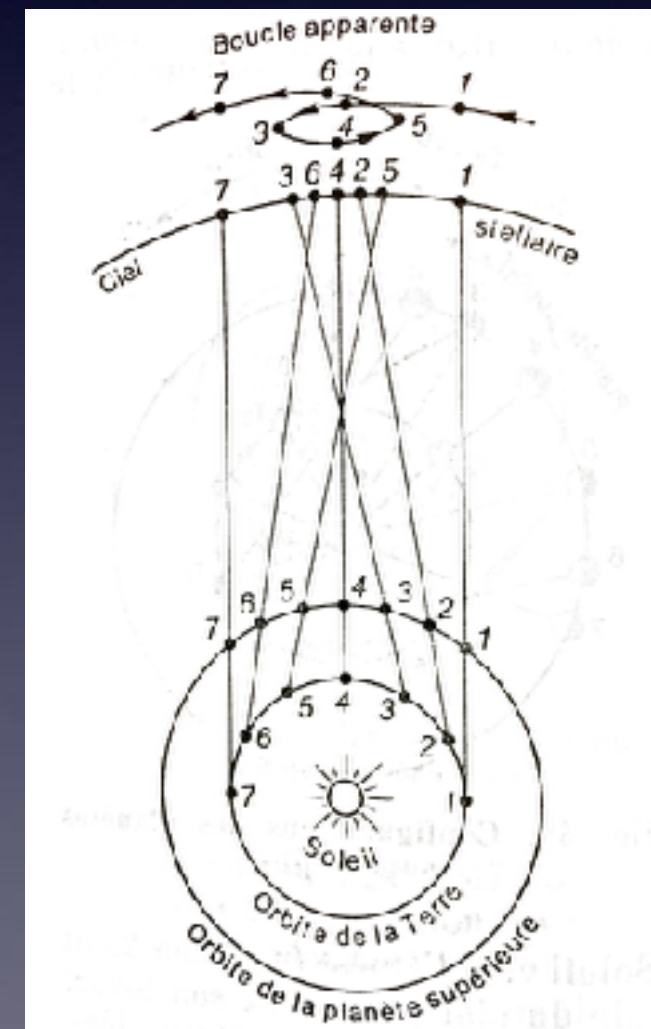
- Quina distància hi ha als planetes?
- Com són les seves òrbites?
- Quant triguen a completar una òrbita?

Moviment dels planetes, molt **estrany**:
ara van a l'est, ara a l'oest, s'aturen ...



Mart 1979-1980

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

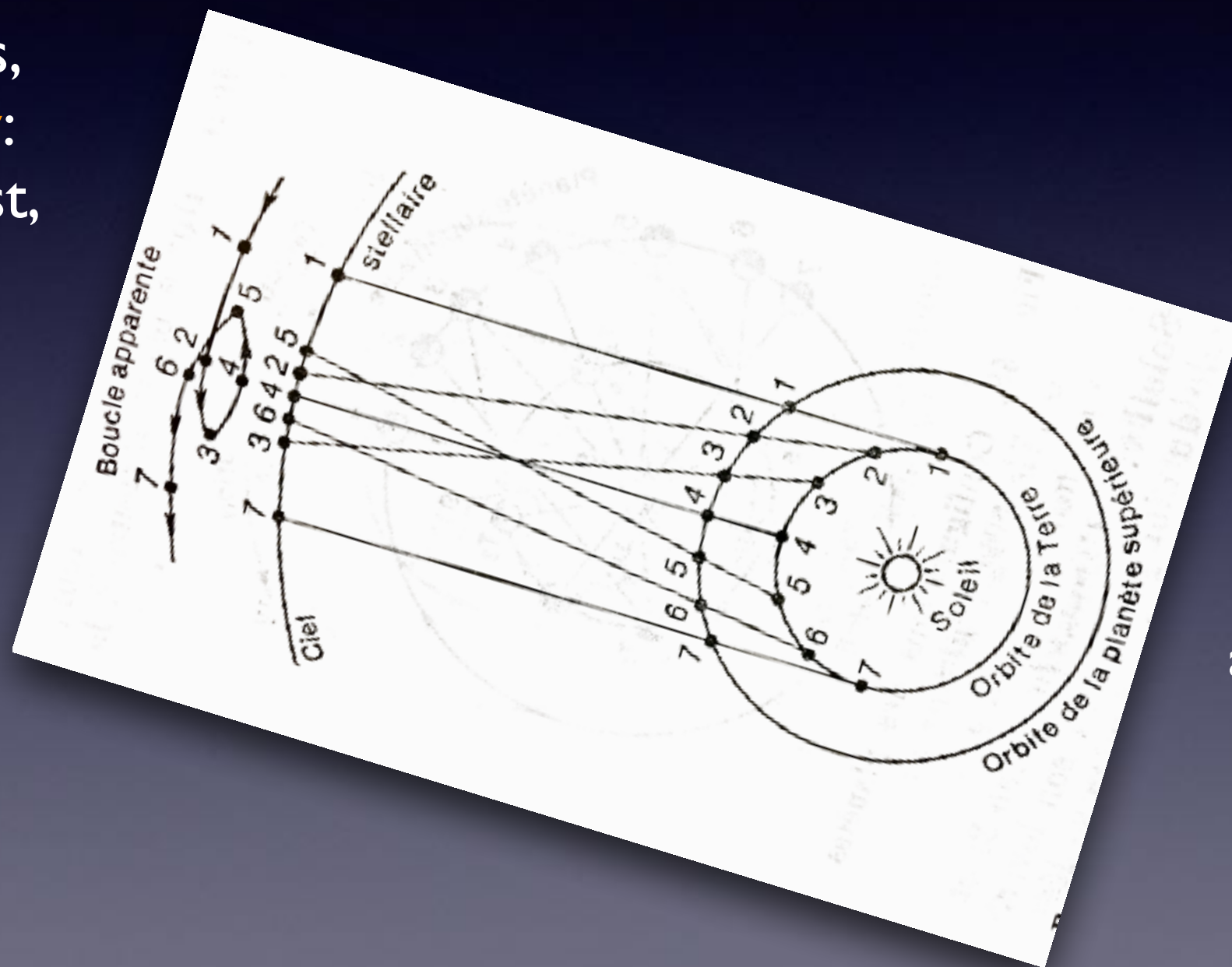


Moviment aparent d'un planeta exterior

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Moviment
dels planetes,
molt **estrany**:
ara van a l'est,
ara a l'oest,
s'aturen ...



Moviment
aparent d'un
planeta
exterior

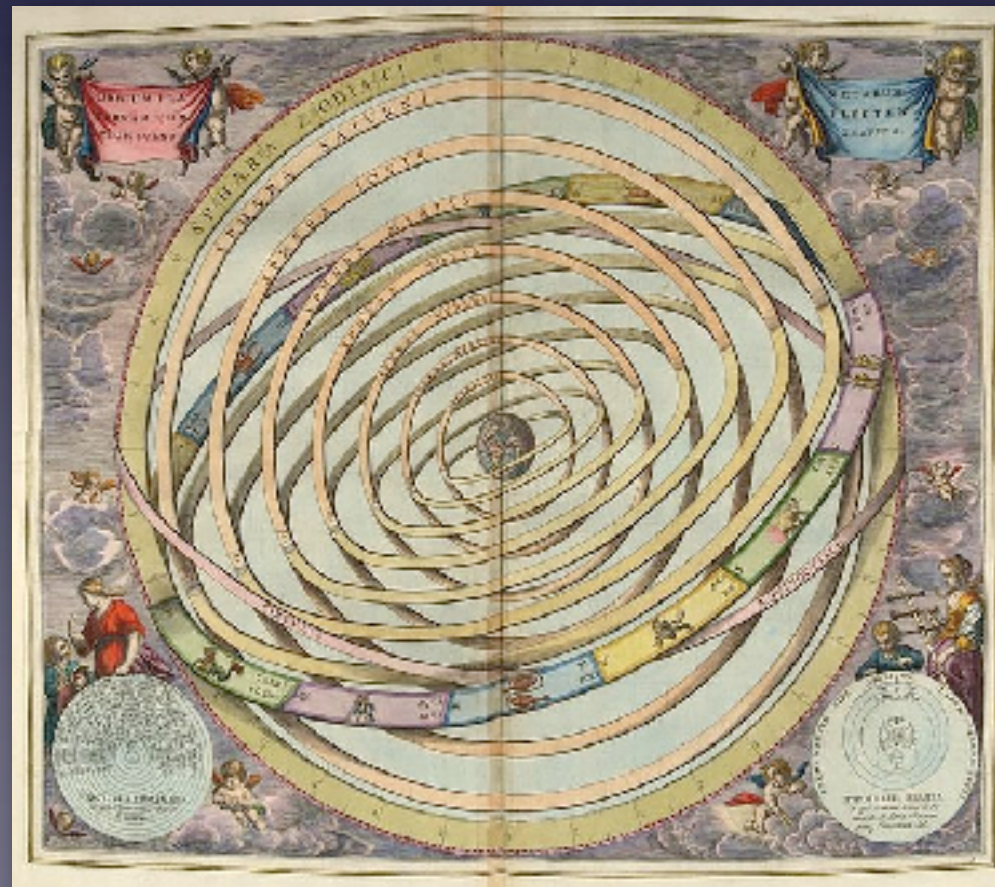
QUART ESGLAÓ

Els Planetes

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

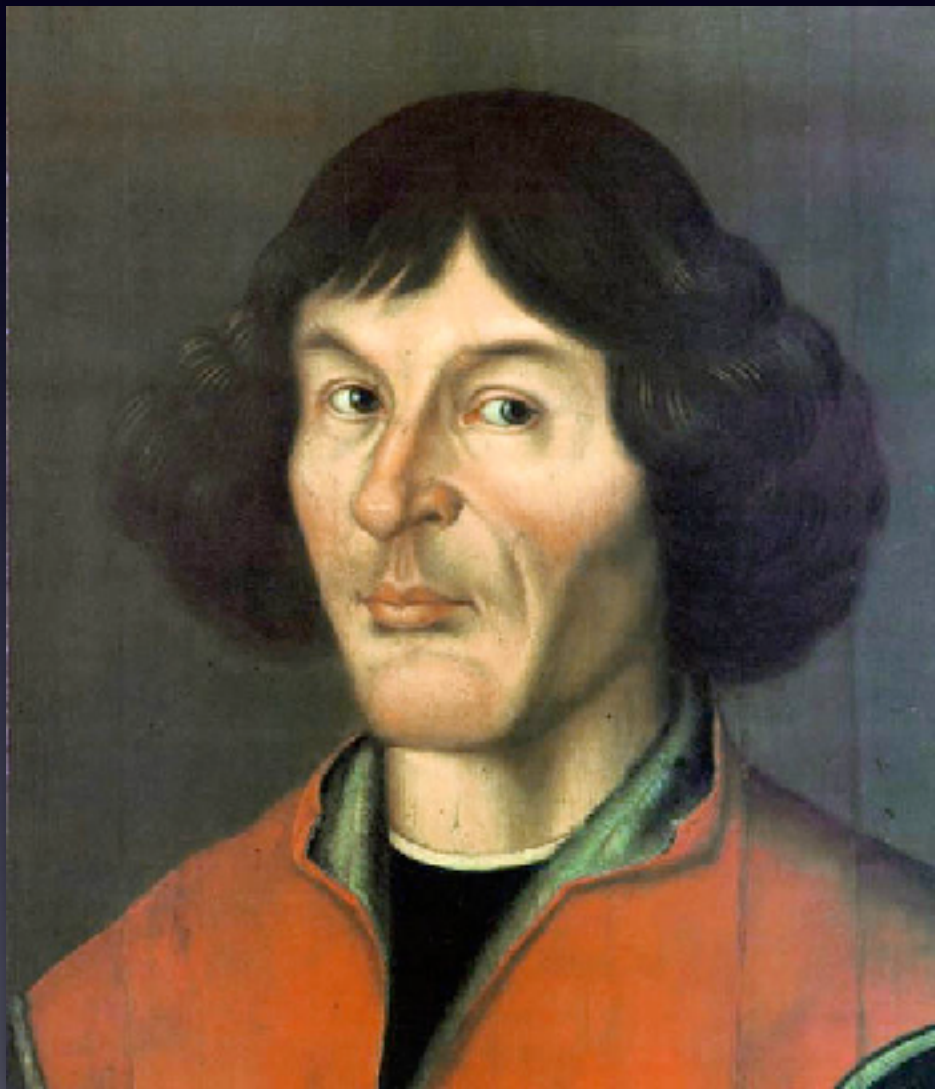


Claudi Ptolomeu (90-168 d.C.)
Astrònom, químic, geògraf i
matemàtic greco-egipci (Alexandria)



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)

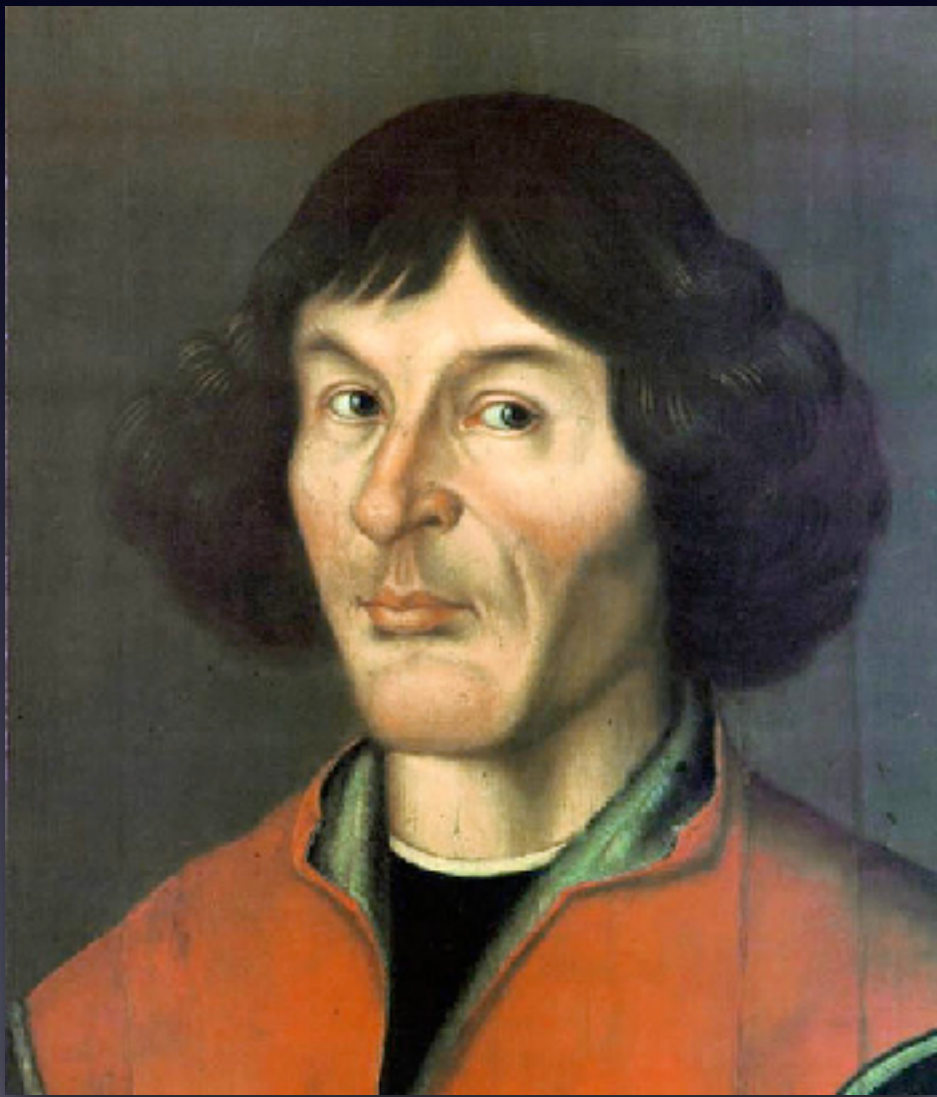
Babilonis → Grecs → Àrabs → Europa

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 compostat 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

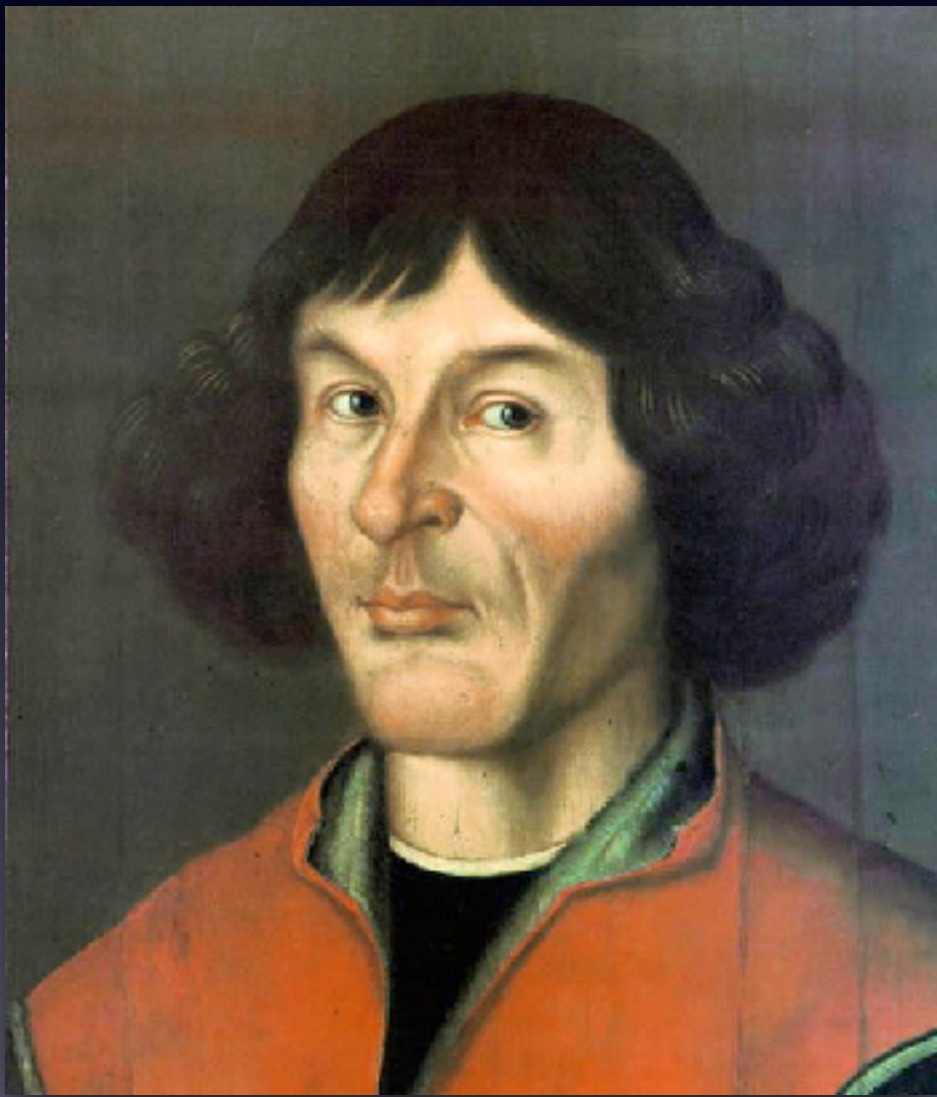


QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Va assumir els següents **postulats**

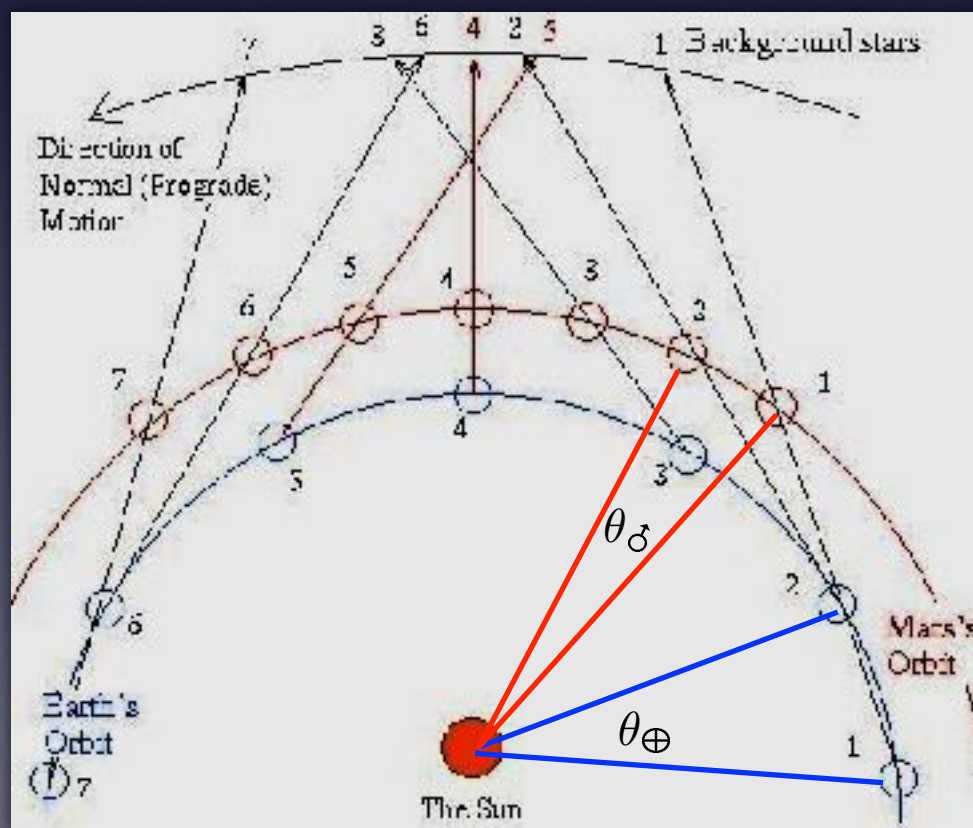
- El cel és immens en comparació amb la Terra
- Els moviments retrògrads dels planetes són **aparents**, són conseqüència del moviment de la Terra al voltant del Sol
- Els planetes es mouen de forma concèntrica al voltant del Sol en l'ordre: Mercuri, Venus, Terra, Mart, Jupiter i Saturn
- La Lluna gira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

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

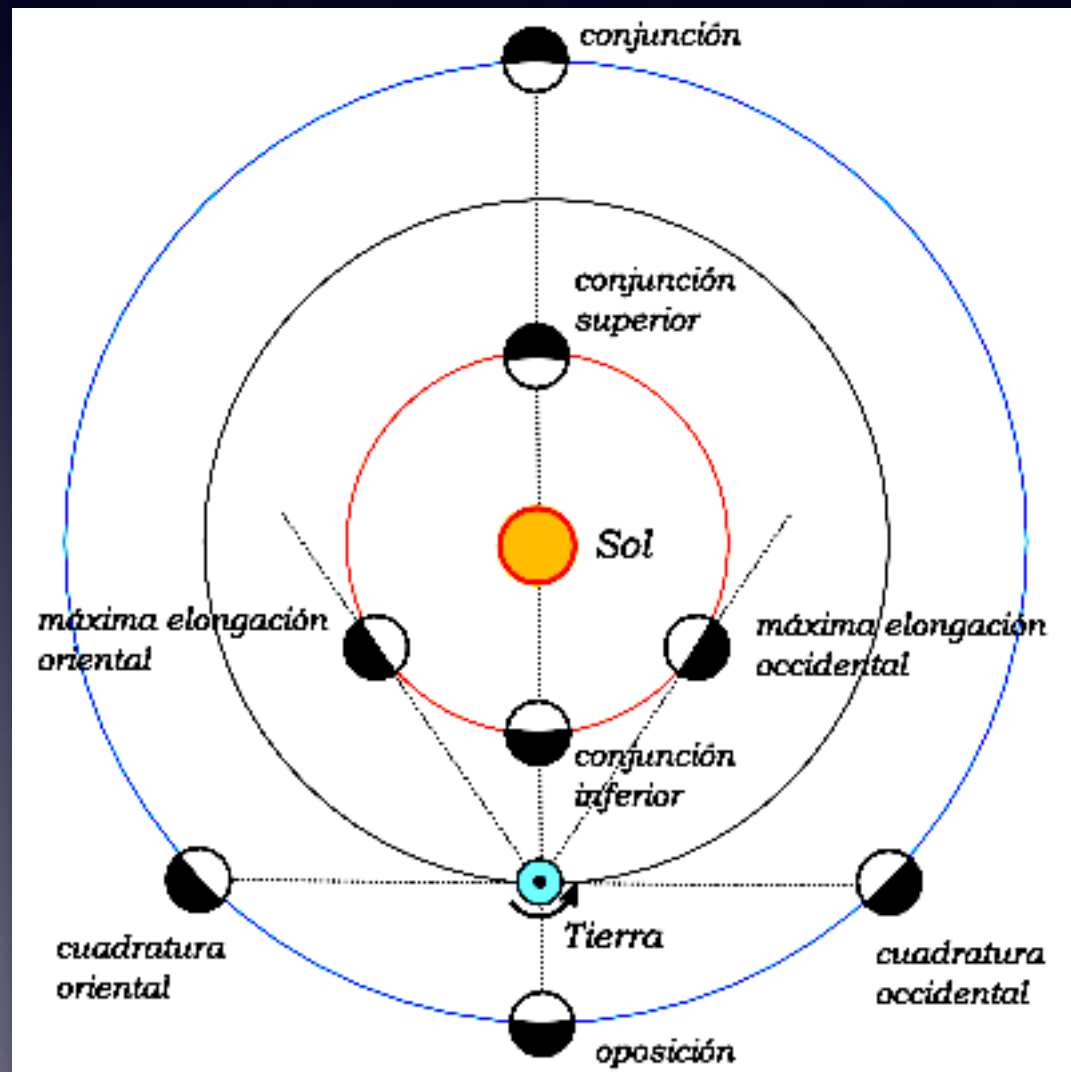
Lavors $\omega_{\delta} \approx \frac{1}{687}$ (1/per. **sidereal**)

El període de Mart és 687 dies

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

QUART ESGLAÓ

Els Planetes



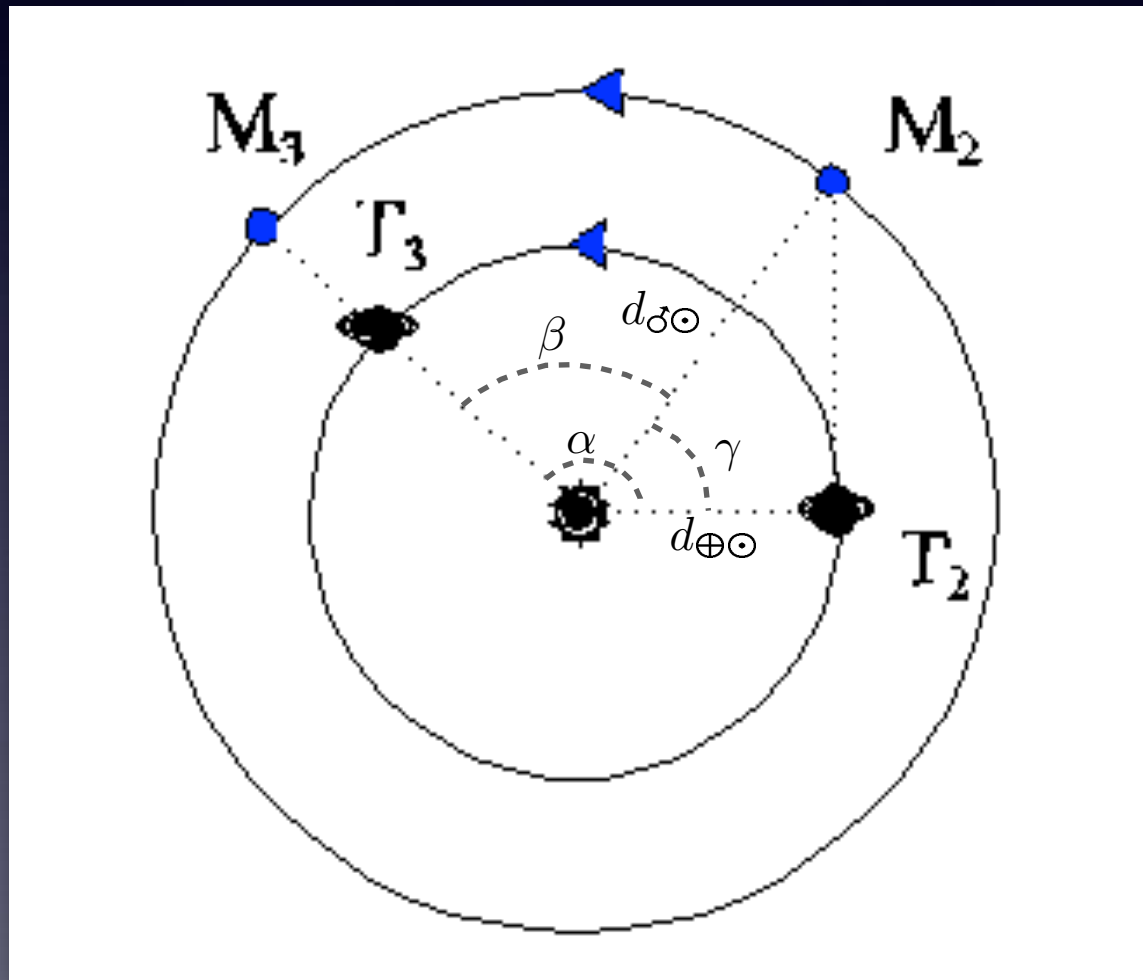
Posicions dels planetes respecte Terra i Sol

- **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



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

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

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

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

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

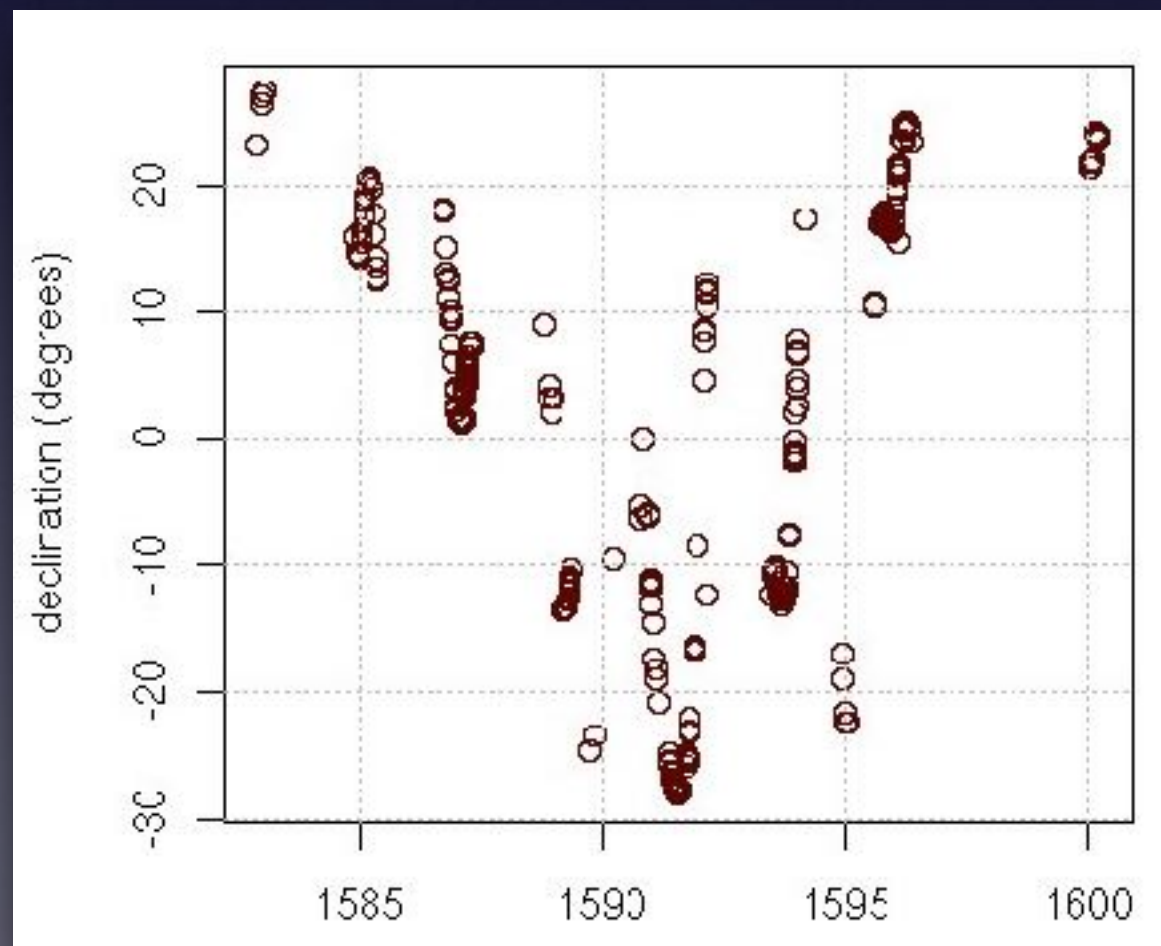
QUART ESGLAÓ

Els Planetes

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



Tycho Brahe (1546–1601)



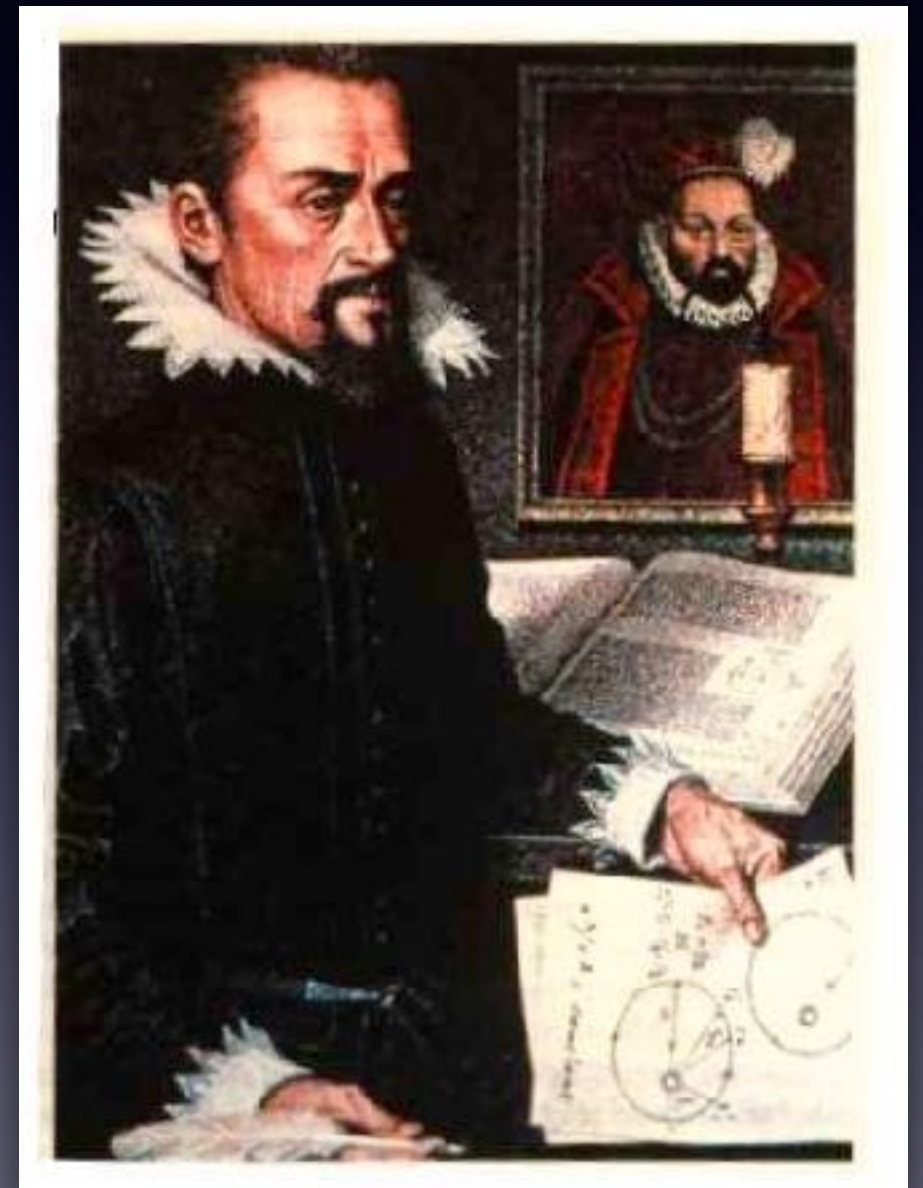
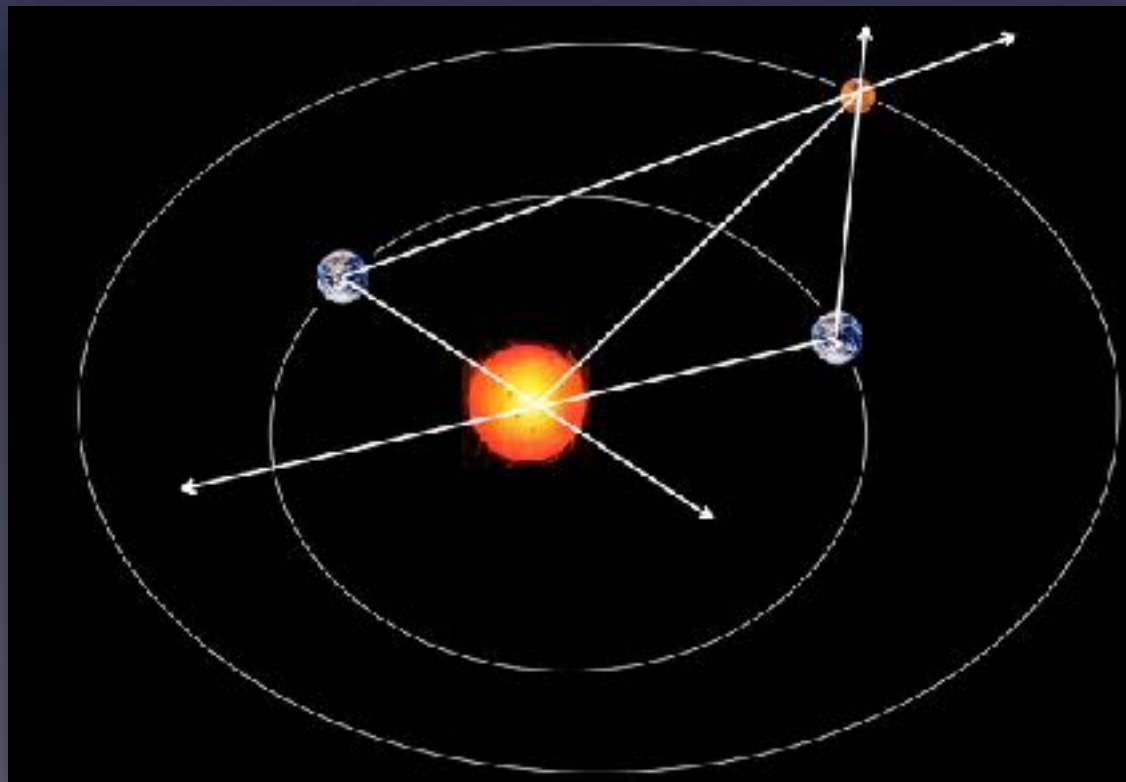
(Declinació ve a ser l'angle de les coordenades polars)

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!



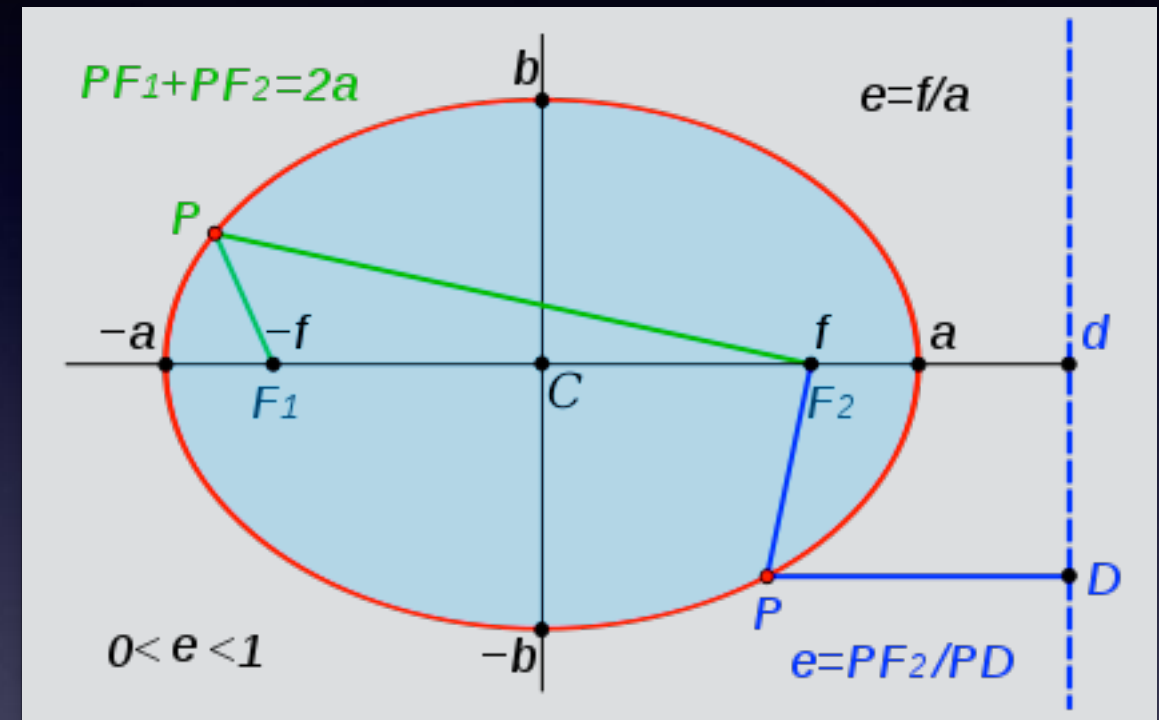
Johannes Kepler (1546–1601)
(Tycho Brahe al fons)

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

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

El.lipse



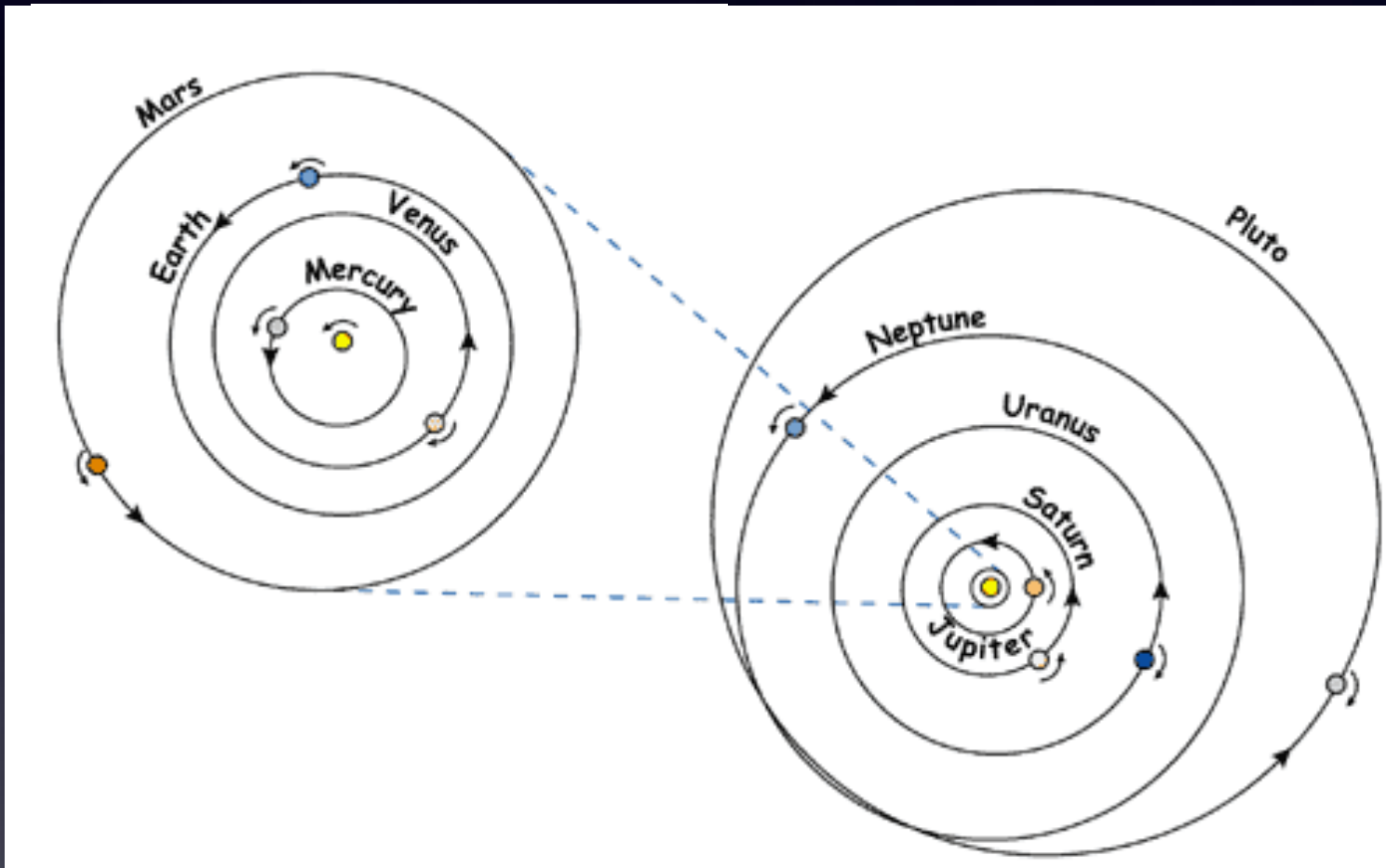
Punts tals que la suma de les distàncies a dos punts fixos (**focus**) és constant
Excentricitat indica la forma d'una el.lipse. Si **e** cap a zero, més arrodonida

$$0 < e < 1$$



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 **0.02**

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

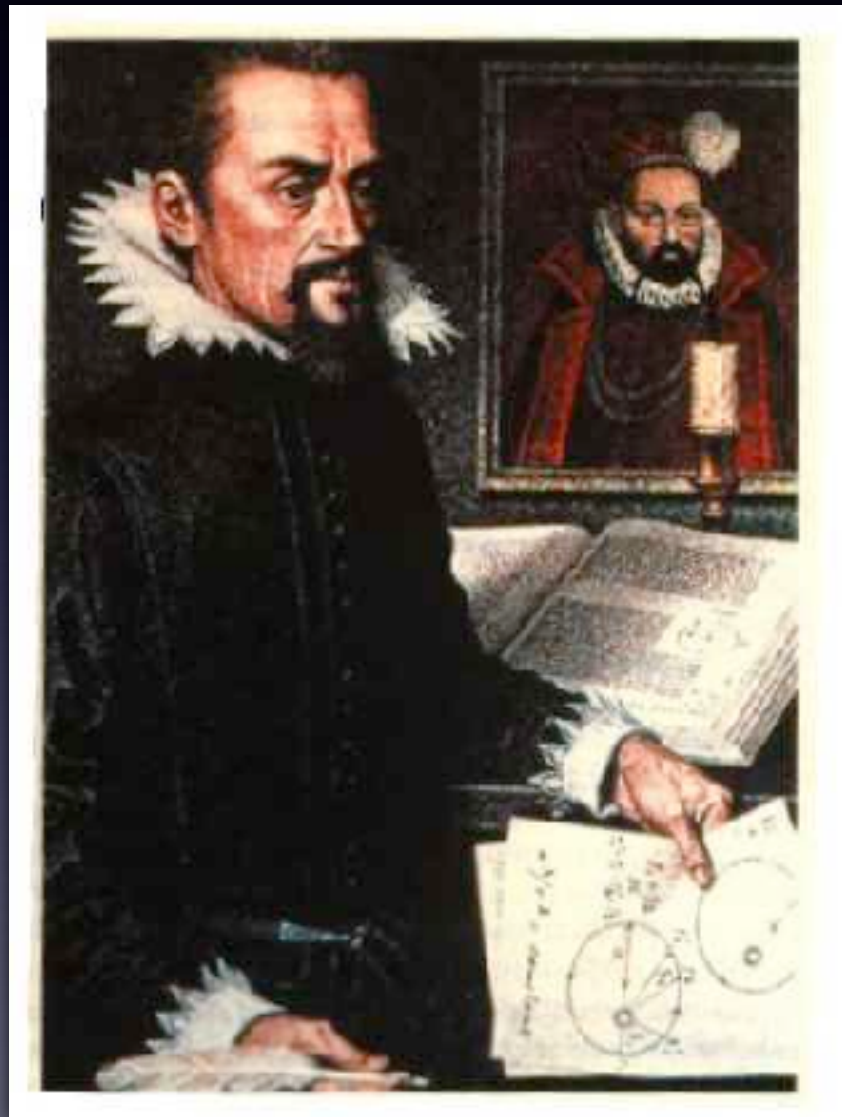
Molts objectes tenen òrbites extremadament excèntriques. Per exemple, el cometa Halley, té una excentricitat orbital de gairebé **0.97**!

QUART ESGLAÓ

Els Planetes

Lleis de Kepler (1609-1618)

1. Les òrbites dels planetes formen **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**

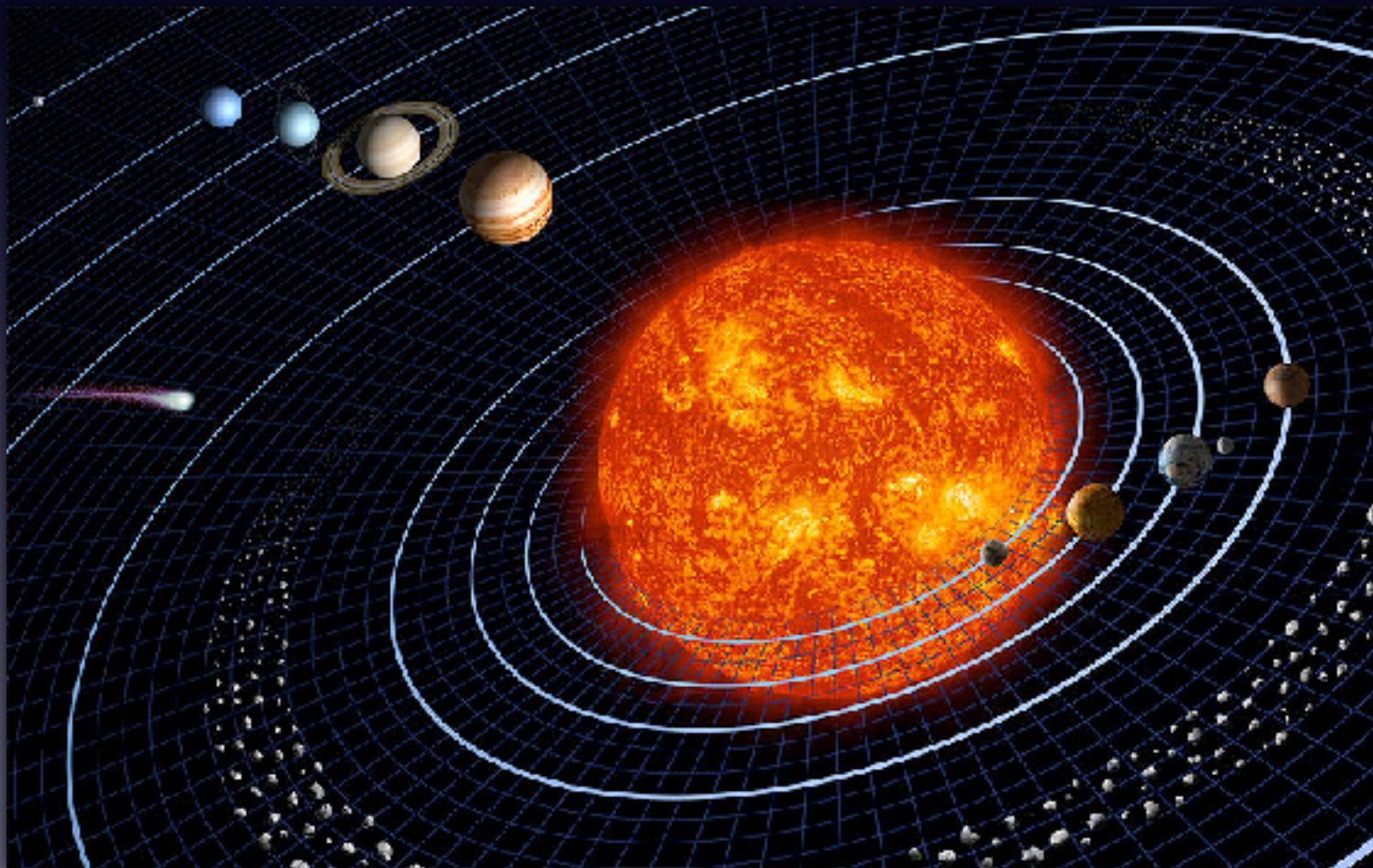
$$\frac{T^2}{D^3} = k$$

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



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

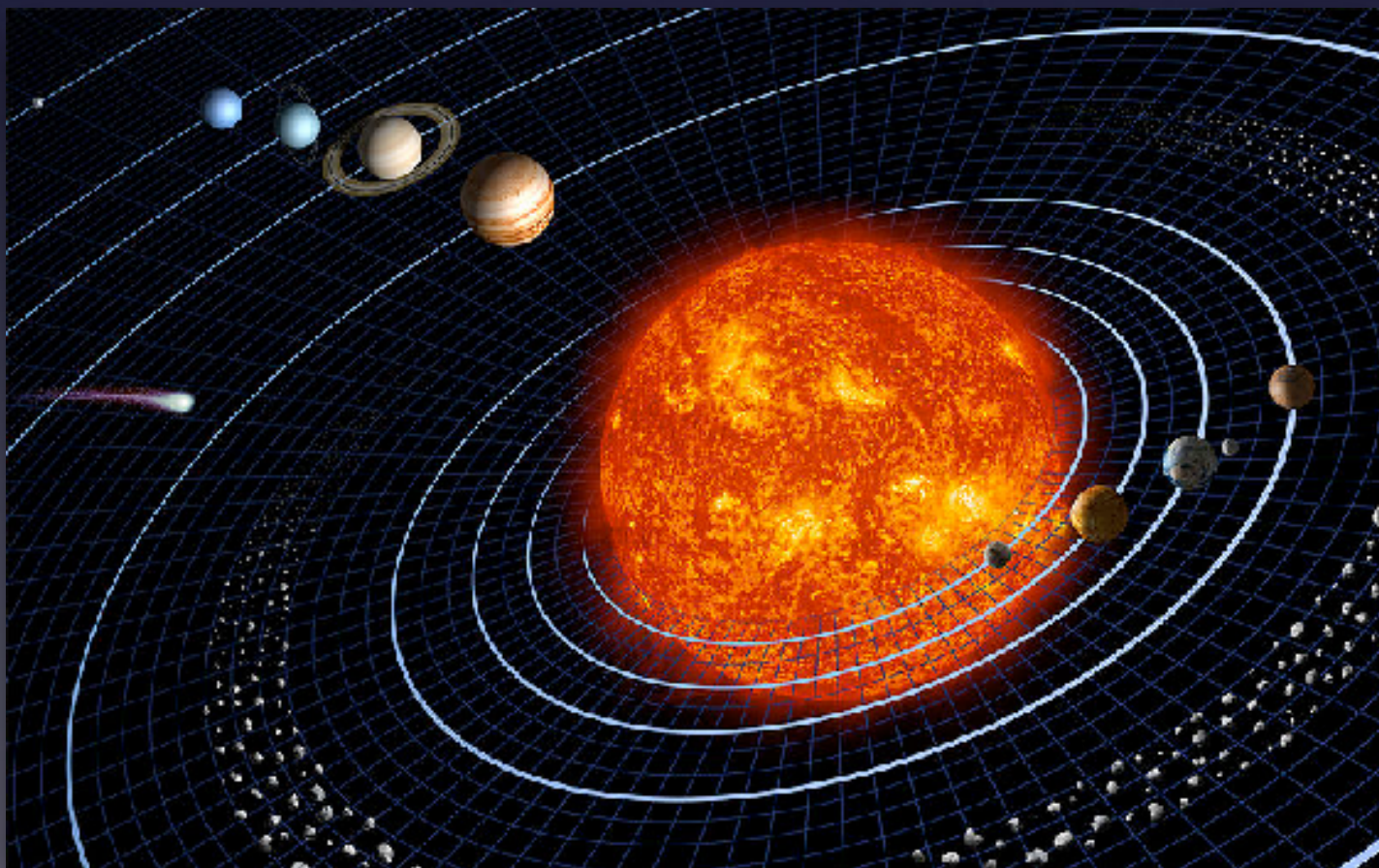
Terra: 0.98-1.1 UA

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

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 ’

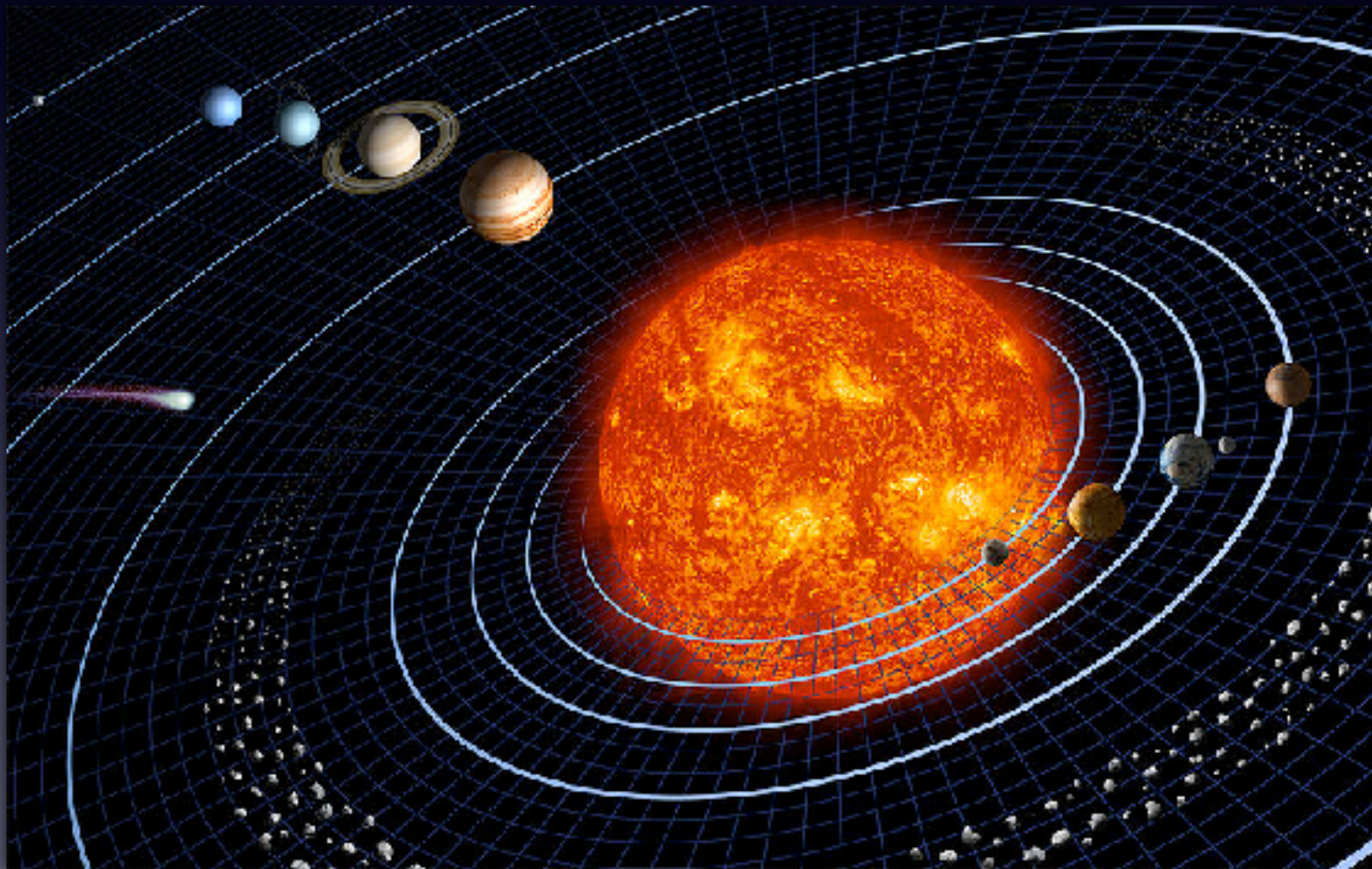
$$|F| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

m_1 — r — m_2

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

QUART ESGLAÓ

Els Planetes



Llei de Bode
(imprecisa, casuística, va anticipar
l'existència de Ceres)

Planeta	<i>k</i>	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 un esglaó 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 seva velocitat. 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



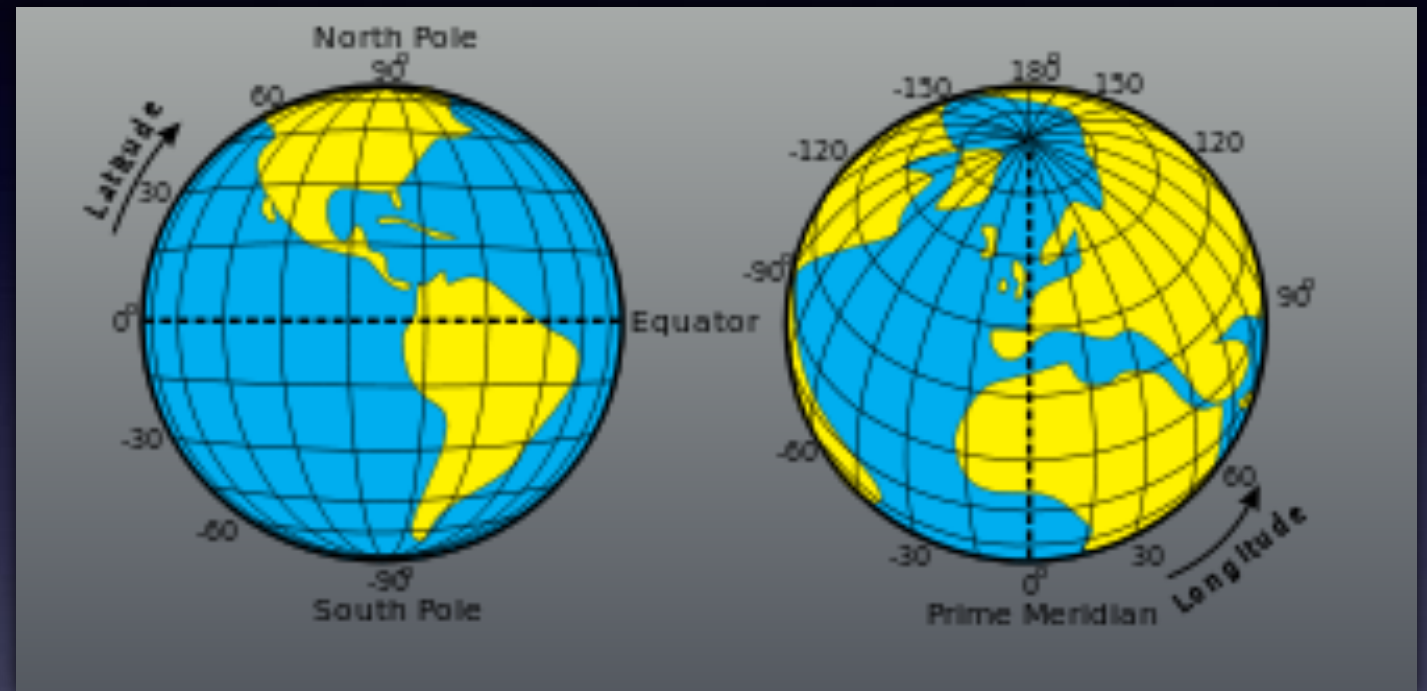
Va estudiar l'ocultació del satèl·lit **Io** de Júpiter

- Relotges
- Telescopis
- Instruments de mesura
- Moltes dades

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.

Relotges sense **precisió**

Mètodes astronòmics

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

Eclipsis de lluna: **POCS**

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

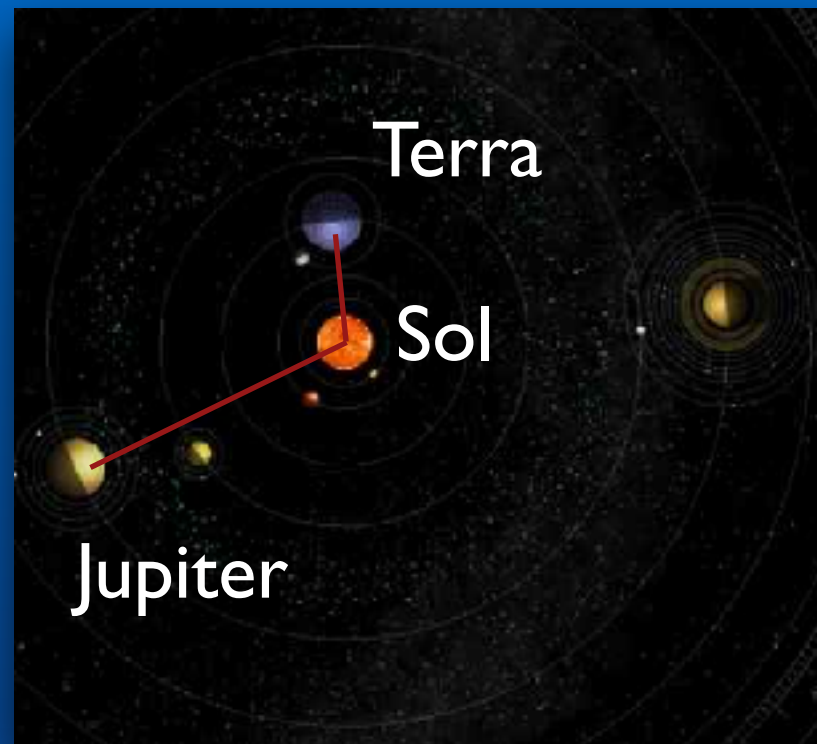
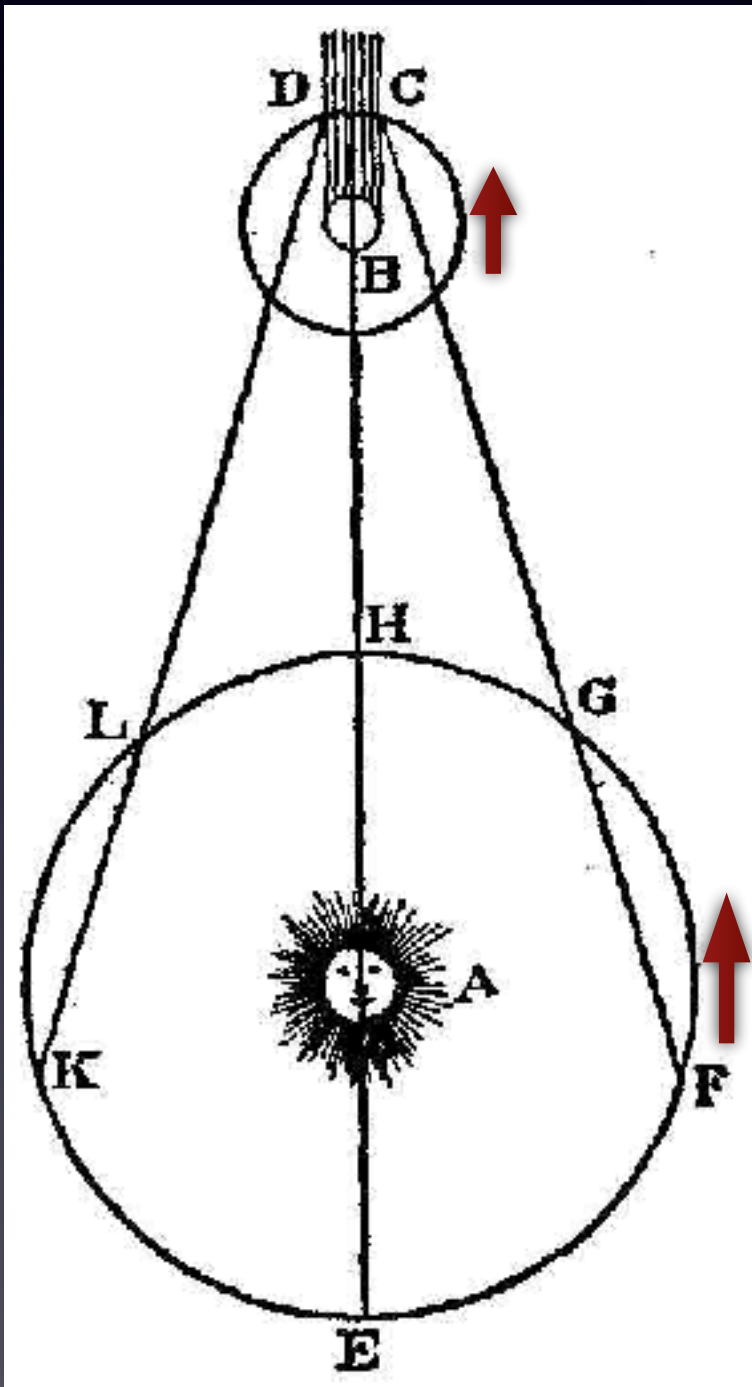


Es tenien taules dels eclipsis al meridià de referència.

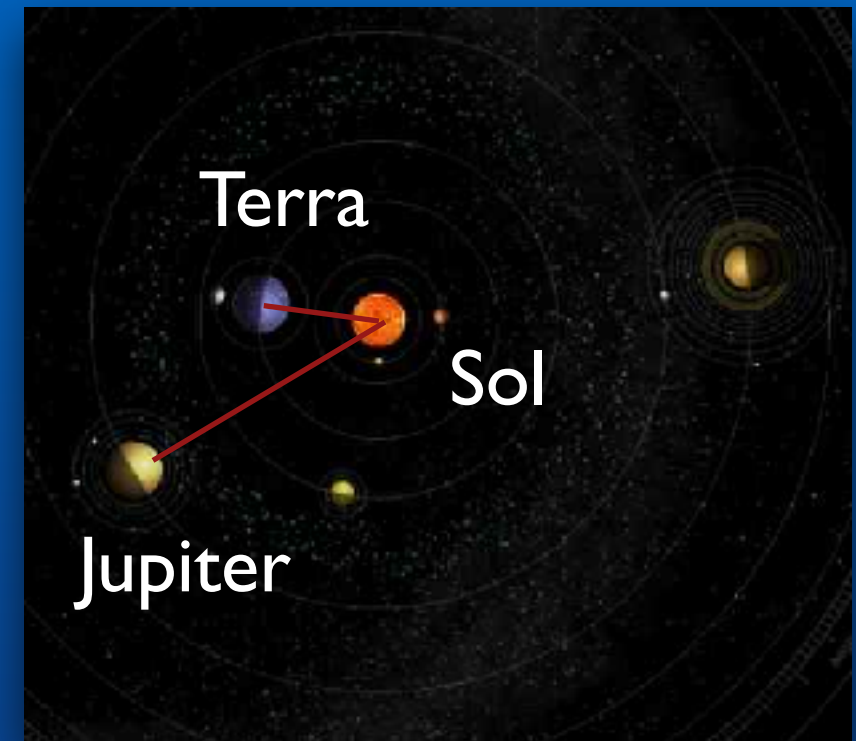
Impossible observacions en un vaixell

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum

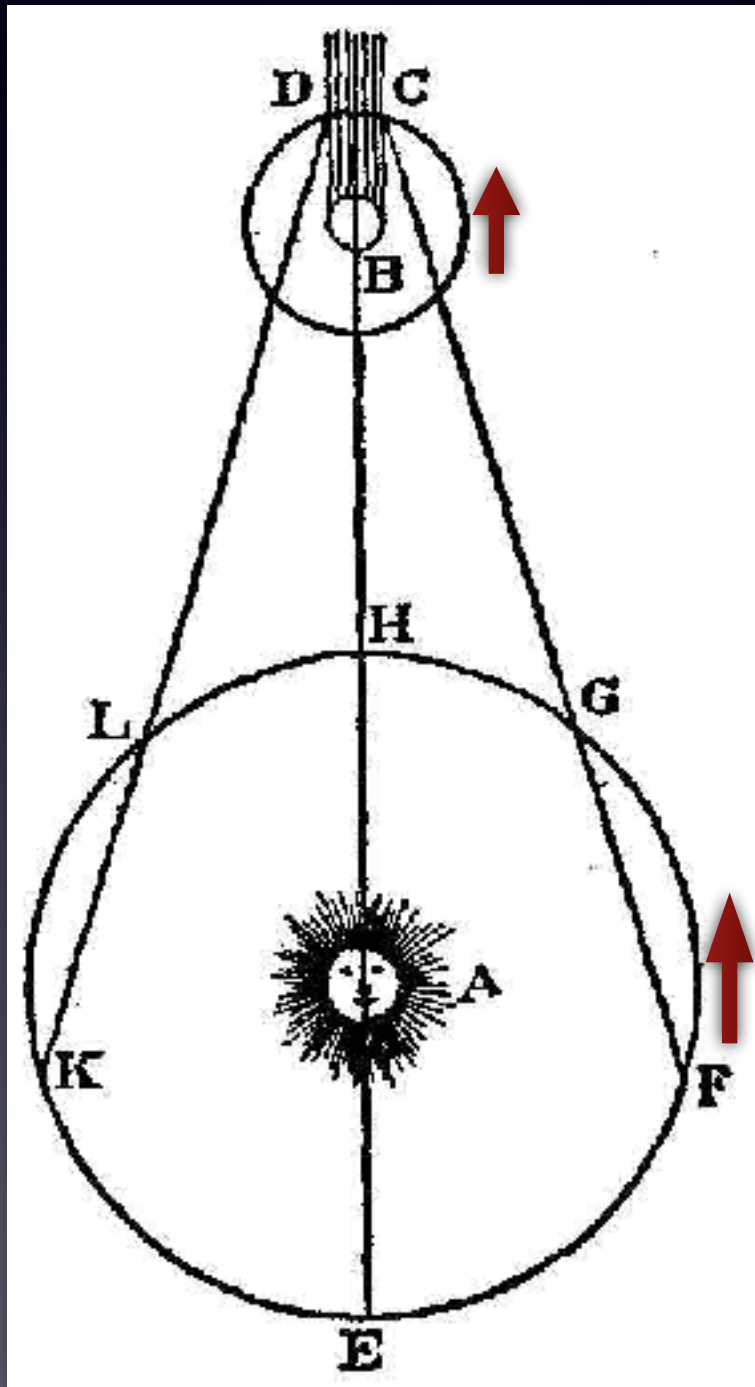


F



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

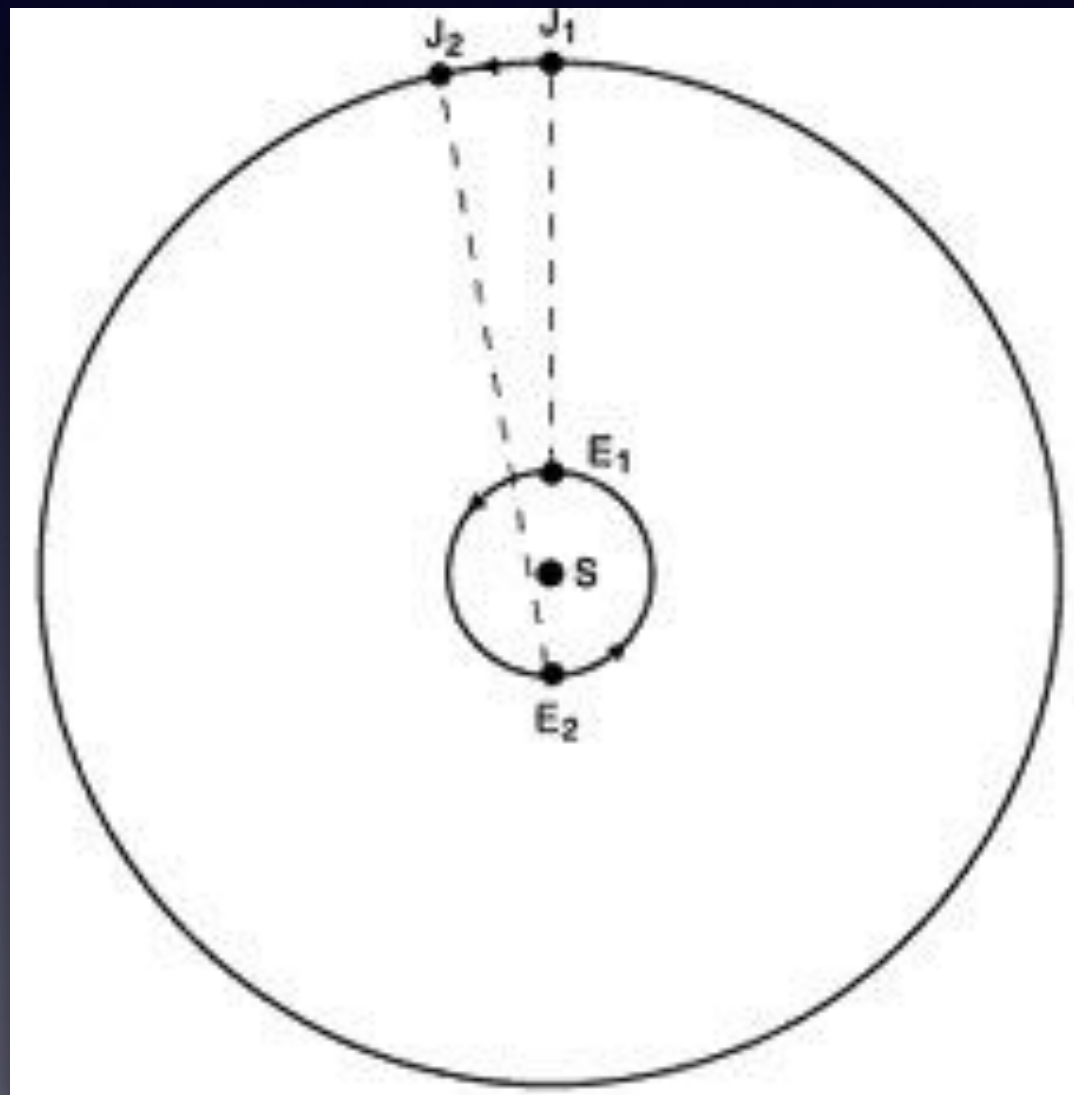
$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{2 \cdot GF}{c} = 7'$$

**MOLT
GRAN!!**

Si $c = 1d_{\oplus}/s$ $GF = 210d_{\oplus}$ $c \gg 1d_{\oplus}/s$

CINQUÈ ESGLAÓ

La velocitat de la llum



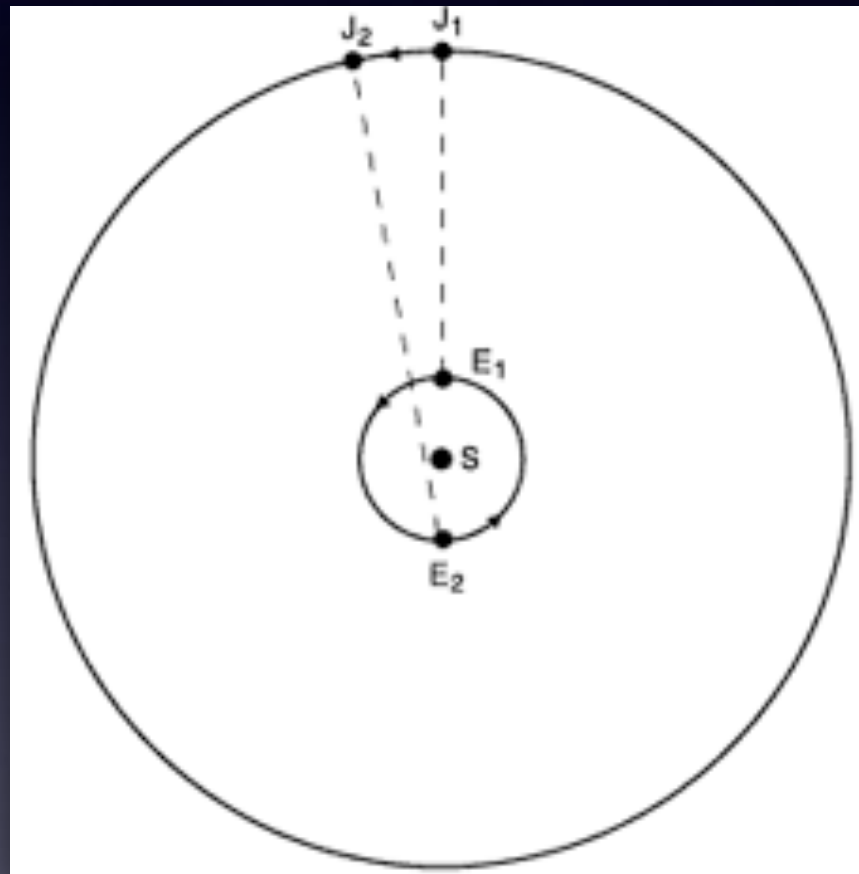
Una òrbita de lo voltant de Júpiter triga 1.76 dies terrestres

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

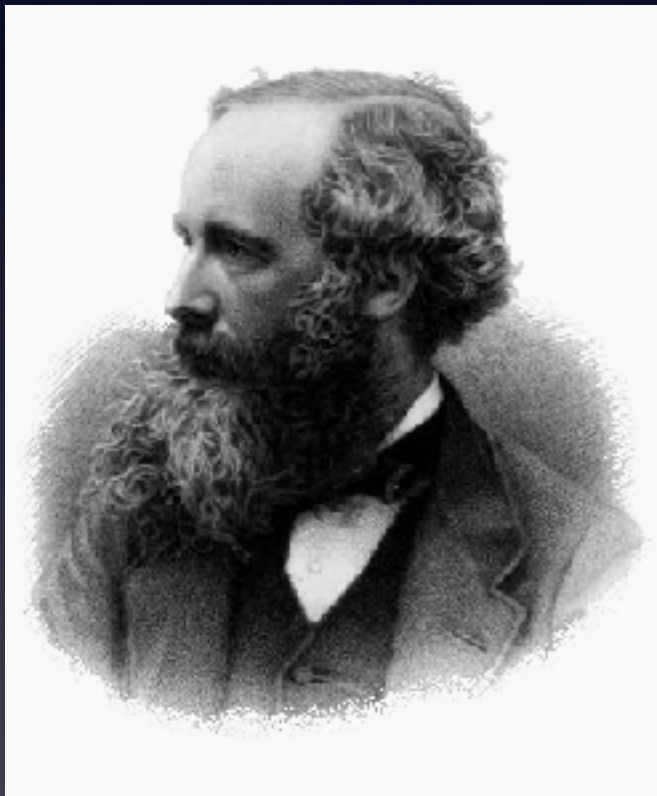
La velocitat de la llum

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

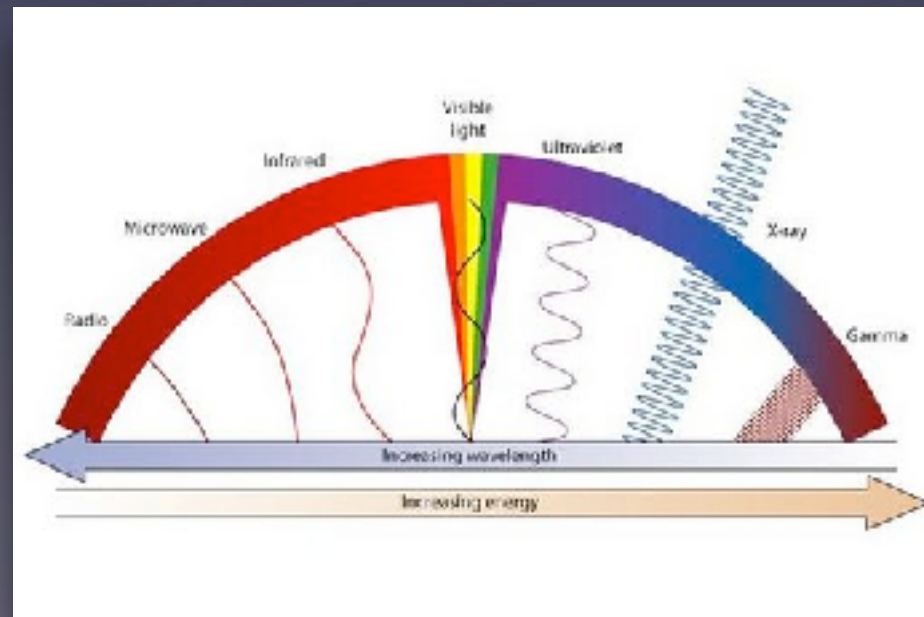
Maxwell observà que c era igual a la velocitat de les ones electromagnètiques predita per les seves equacions

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

radiació electromagnètica



James Clerk Maxwell (1831- 1879)

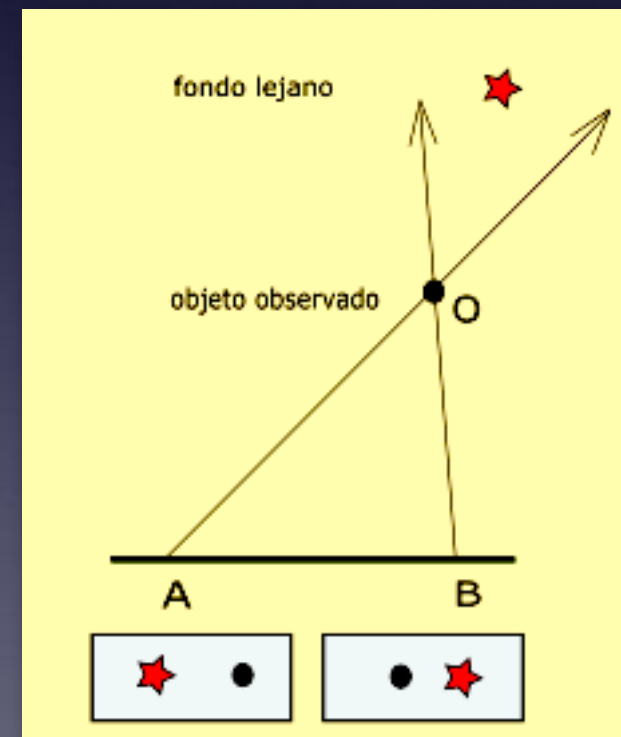
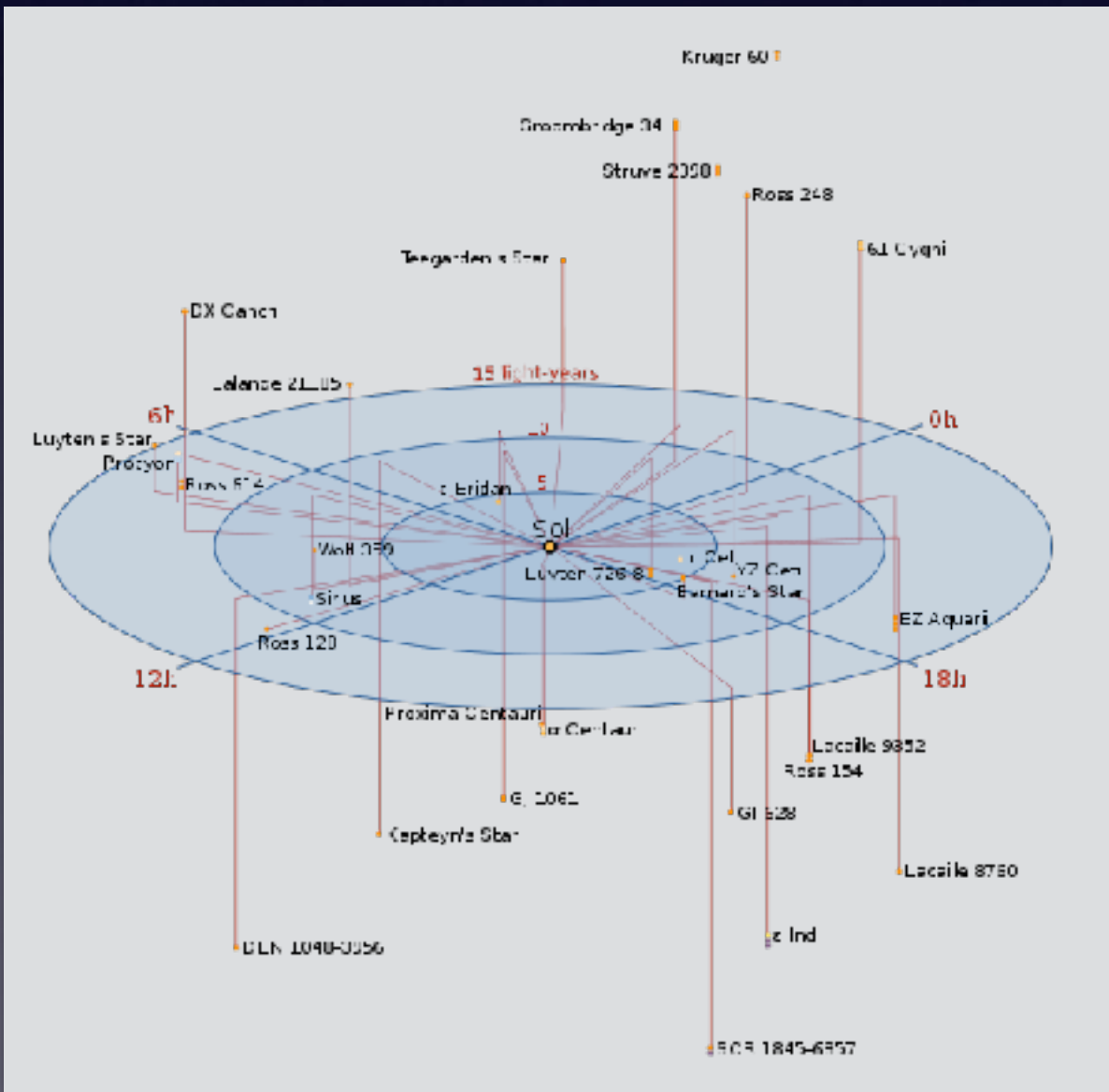


Espectroscòpia
Relativitat

SISÈ ESGLAÓ

Estels 'propers'

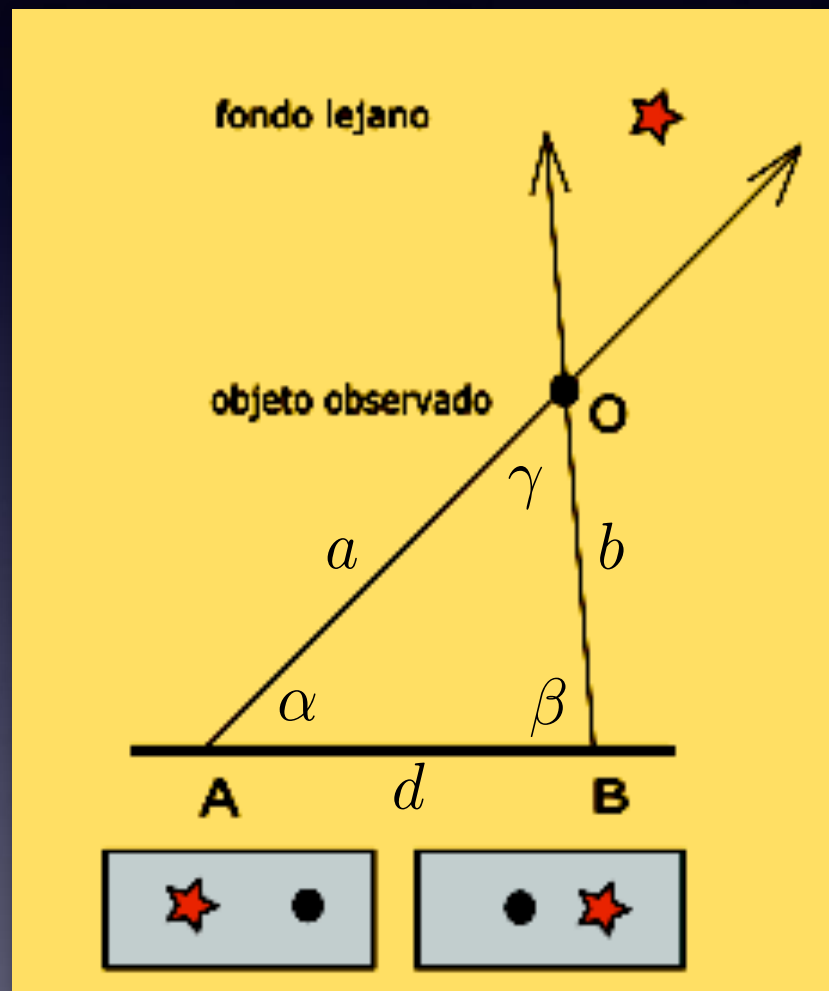
La paral.laxi permet calcular distàncies a planetes



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

SISÈ ESGLAÓ

Estels 'propers'



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

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

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

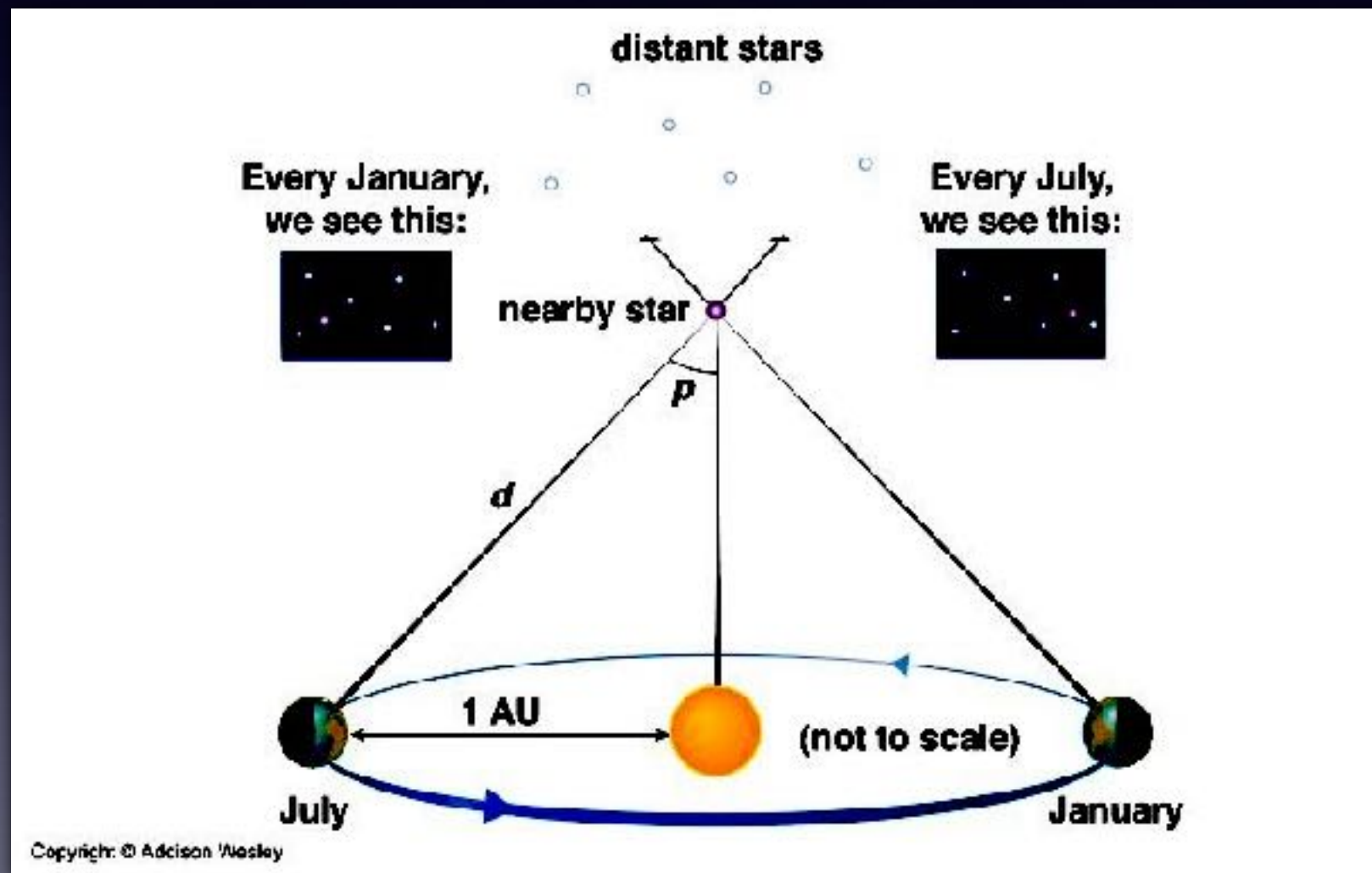
SISÈ ESGLAÓ

Estels 'propers'

TRUC:

fer mesures en
diferents
moments.

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

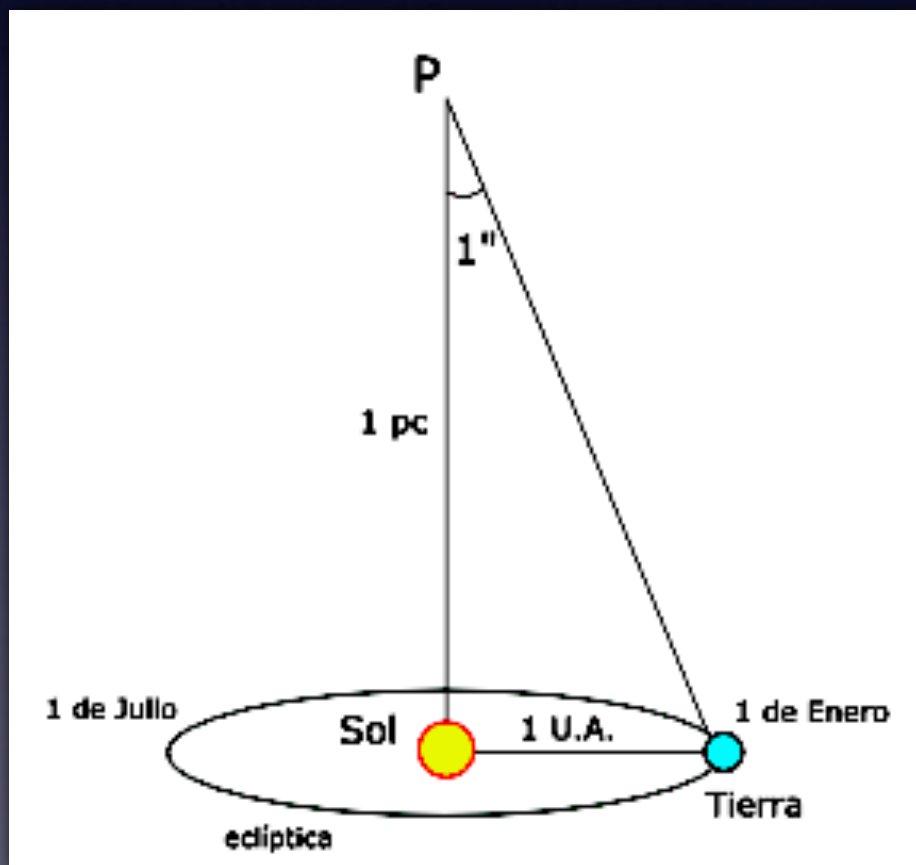


Es poden mesurar distàncies fins a **100 anys llum!**

SISÈ ESGLAÓ

Estels 'propers'

Nova unitat de mesura: el **parsec**



És la distància per 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

Estels 'propers'

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 ser a
distàncies tan grans

SISÈ ESGLAÓ

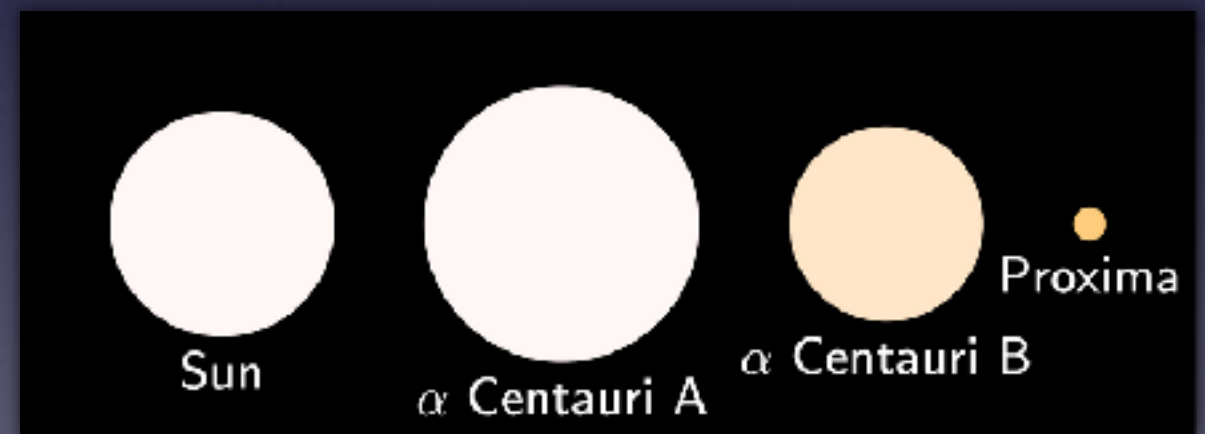
Estels 'propers'

Estel **més proper** al sol:

Proxima Centauri 4.22 anys llum



A l'hemisferi sud



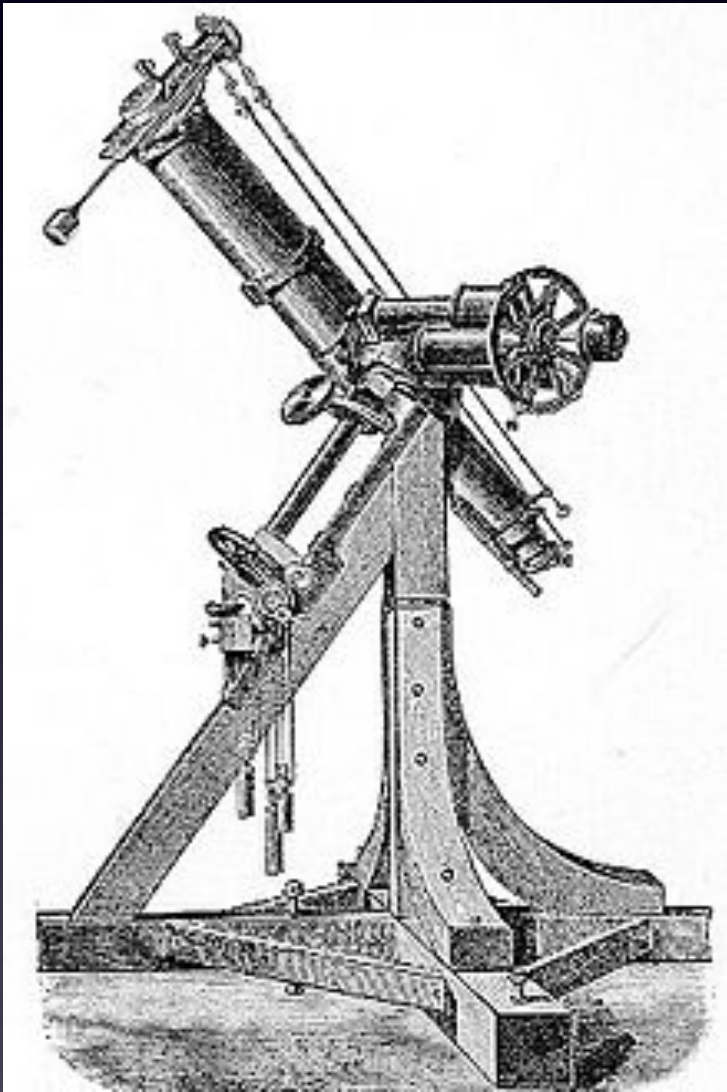
Estel binari

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

Estels 'propers'



Heliòmetre de Bessel

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



SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia



Podem fer servir les
observacions
dettallades d'estels
propers per donar un
mètode de càlcul de
les distàncies a estels
més **llunyans**

Els estels propers són a la Via Làctia
però no tots els estels de la Via Làctia
(entre **200 mil** i **400 mil milions!**) són propers

SETÈ ESGLAÓ

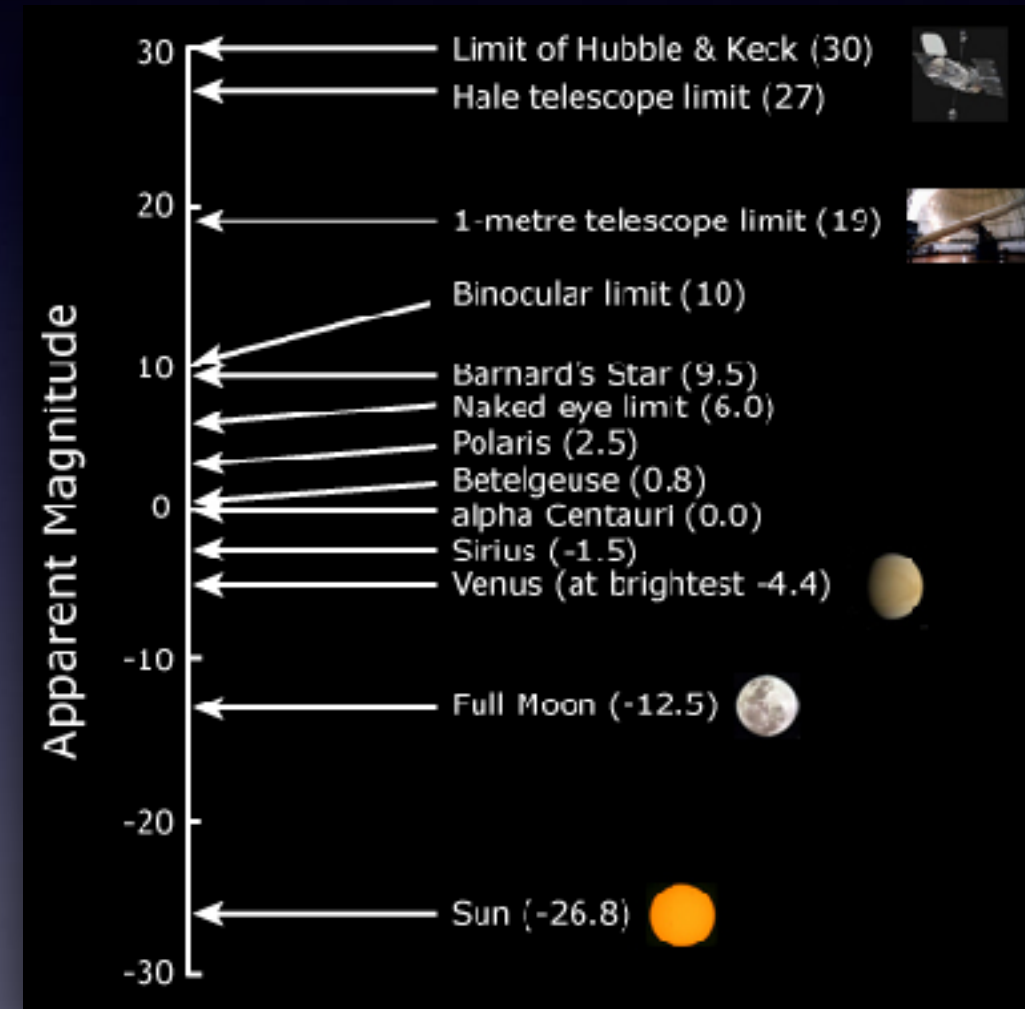
La Via Làctia

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.)

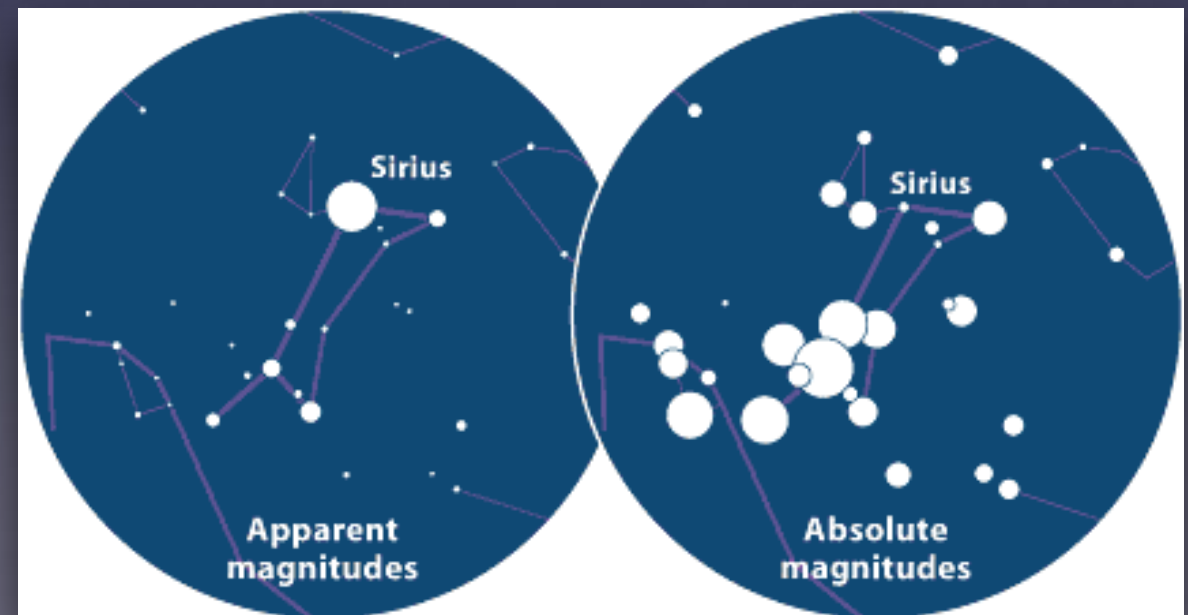
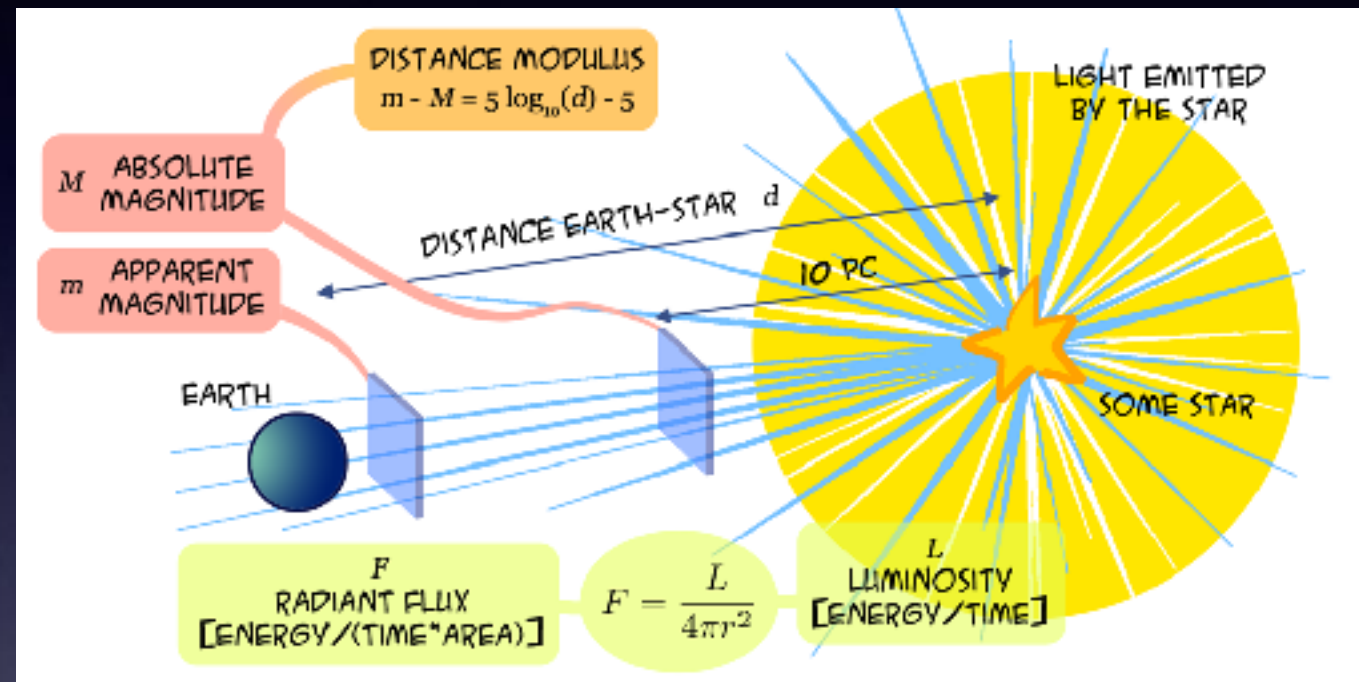


SETÈ ESGLAÓ

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: Sírius
-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	Quàsar 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)

Un estel 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



**BRILLANTOR
ABSOLUTA (M)**

(la brillantor disminueix amb el quadrat de la distància)

$$100^{\frac{m-M}{5}} = \frac{F_{10}}{F} = \left(\frac{D_L}{10 \text{ pc}} \right)^2$$



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

SETÈ ESGLAÓ

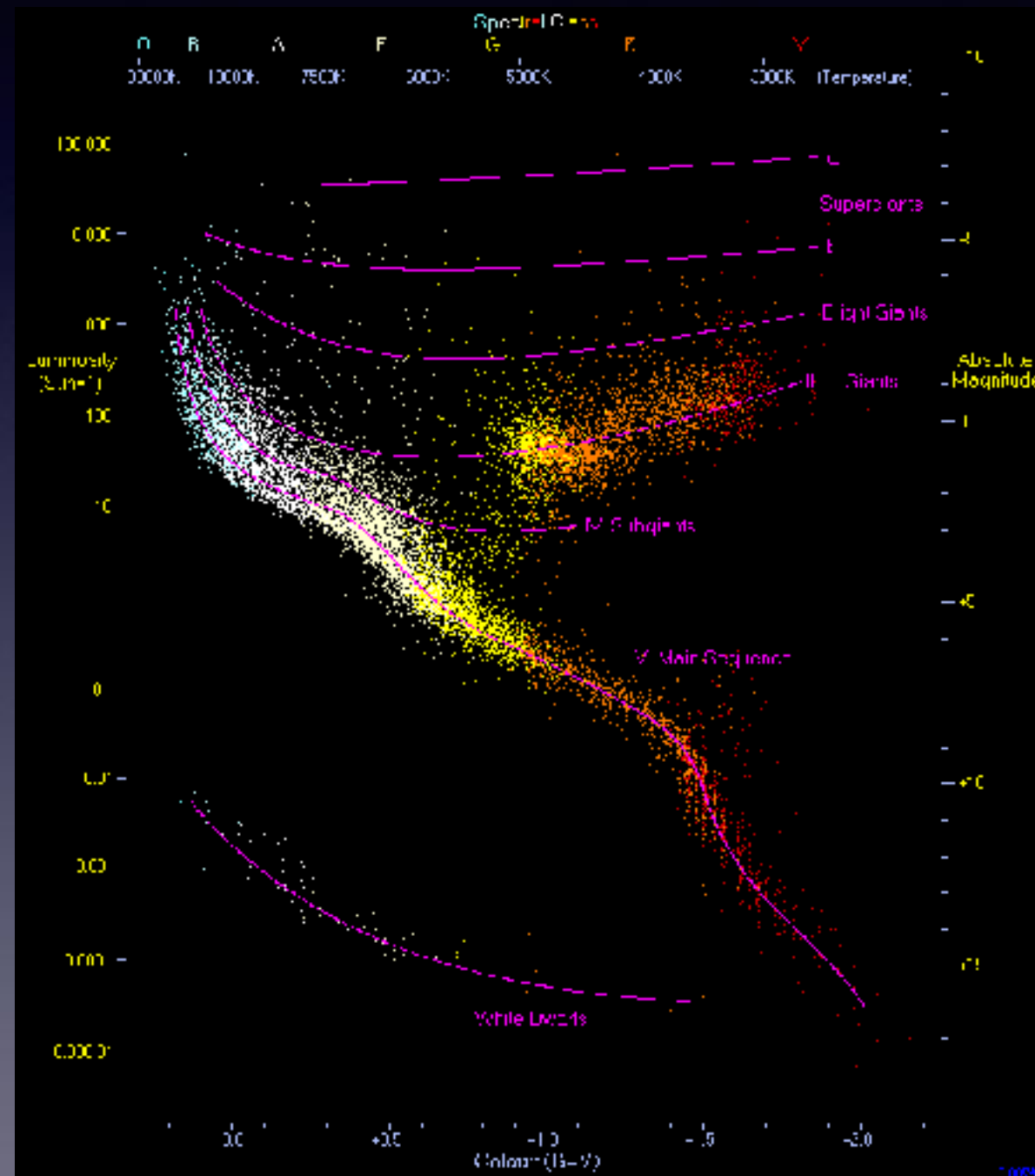
La Via Làctia



Ejnar Hertzsprung
(1873-1967)



Henry Russell
(1877-1957)



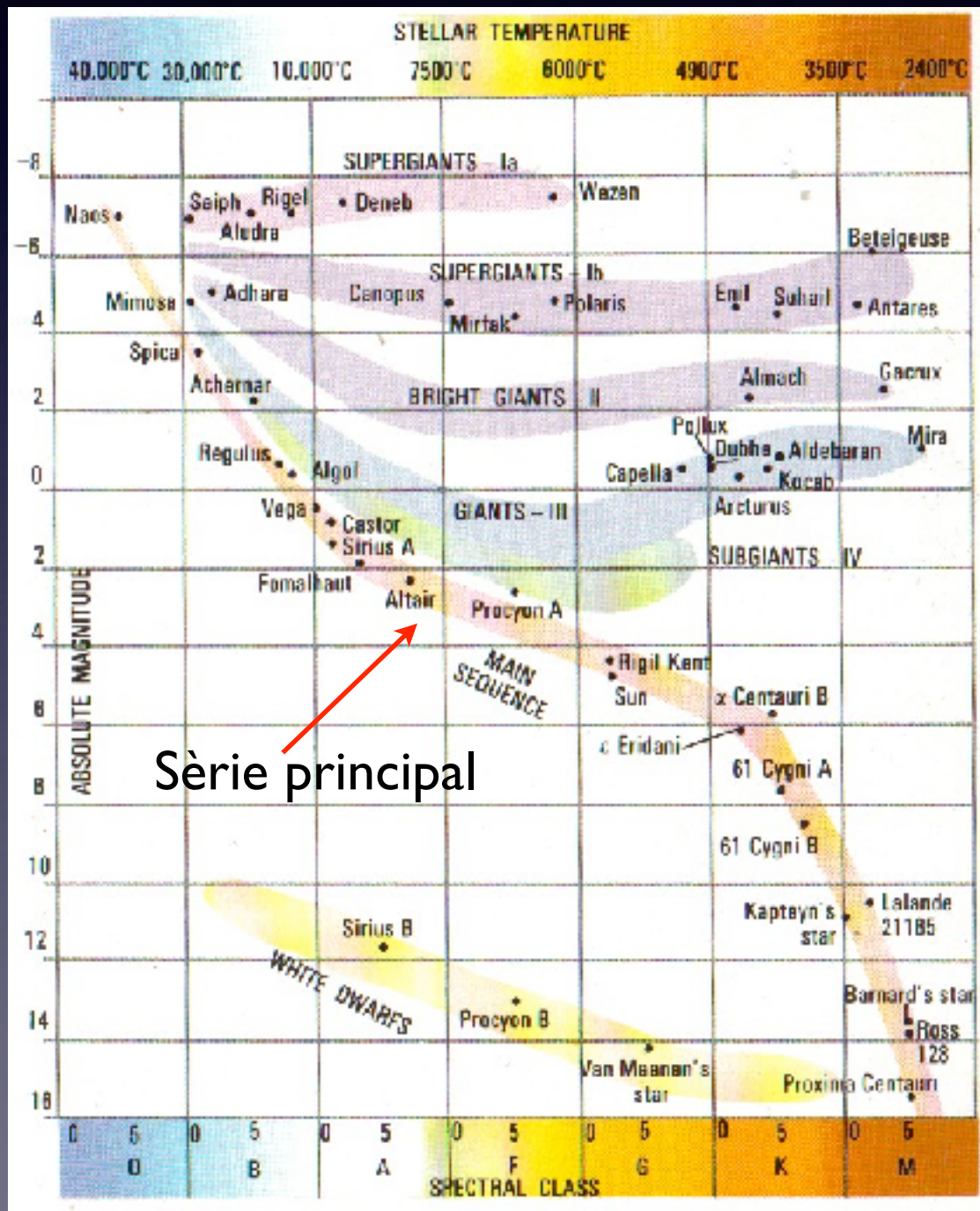
Hertzsprung i Russell van fer la **gràfica** Color-Brillantor absoluta pels estels ja coneguts (1905-1915).

Un 90% dels estels es troben a la **sequència principal**

22000 estels en aquest diagrama HR

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia



EXTRAPOLACIÓ

Donat un estel:

Color
(espectroscòpia)



Brillantor absoluta



Brillantor aparent
(fotografia)



DISTÀNCIA

Fent servir la fórmula

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

s'obté la distància

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

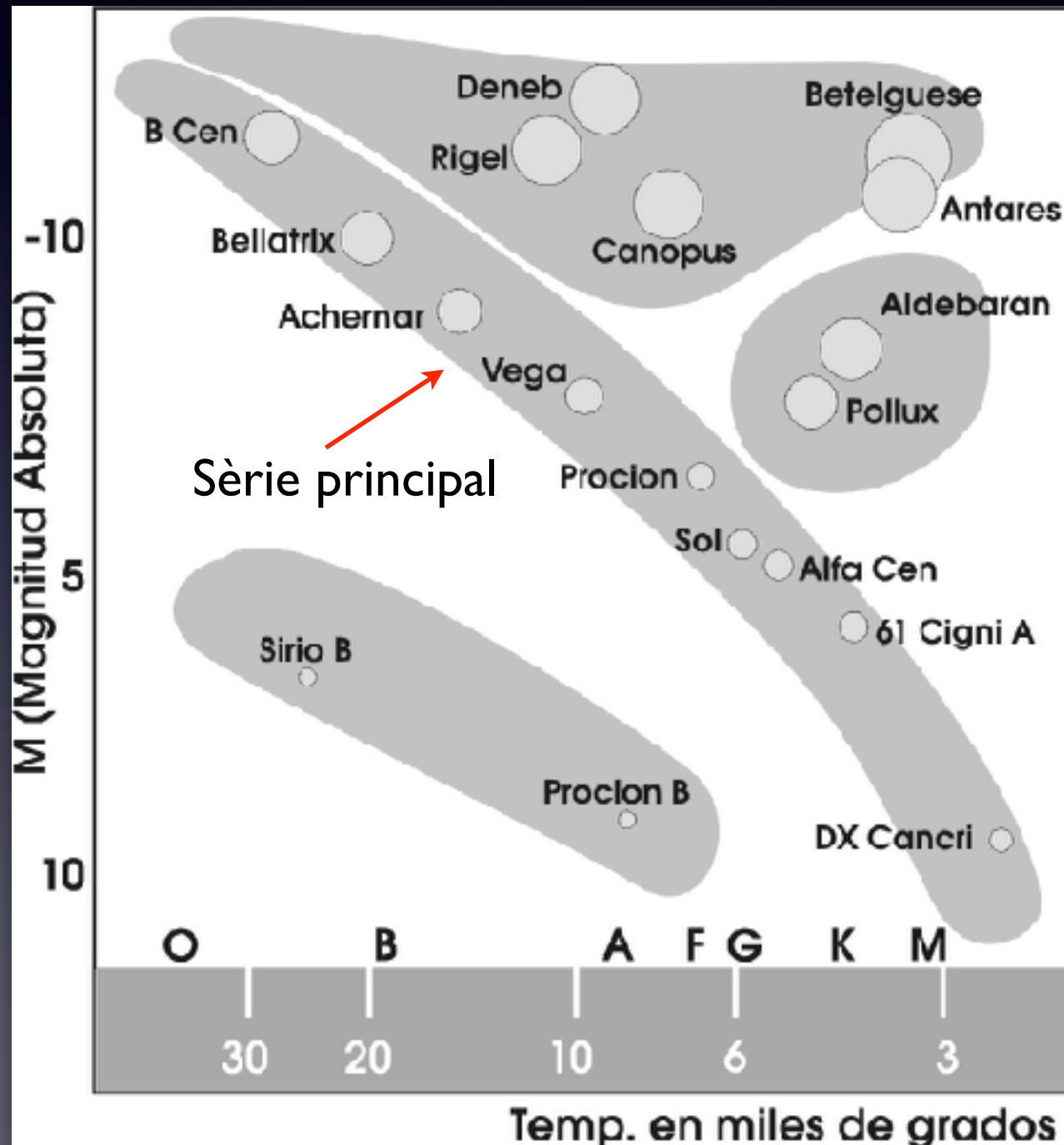


Diagrama de
Hertzsprung-Russell
simplificat (**90% a SP**)

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

Temperatura:
**Oh Be A Fine Girl
(Guy) Kiss Me**

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**

Gruix de la Via Làctia: **~ 10.000 anys llum**

SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Una mica d'història

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

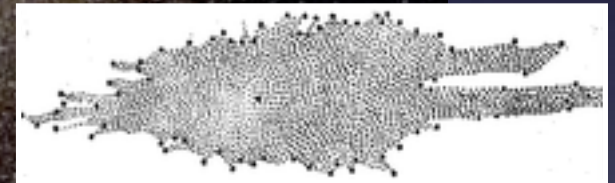
SETÈ ESGLAÓ

La Via Làctia

Una mica d'història

- **Kant** (1755): va especular (correctament) que podria ser un **cos en rotació** d'un gran nombre d'estels, units 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



2,5 mil.lions a.l. = 778.000 pc de la Terra

VUITÈ ESGLAÓ

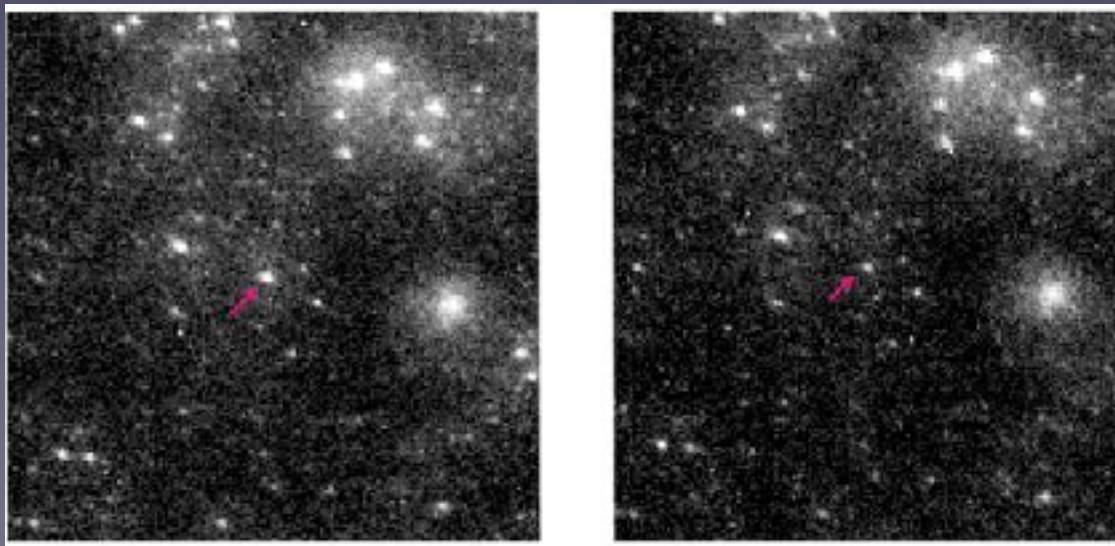
Altres galàxies



Henrietta Swan Leavitt (1868–1921)

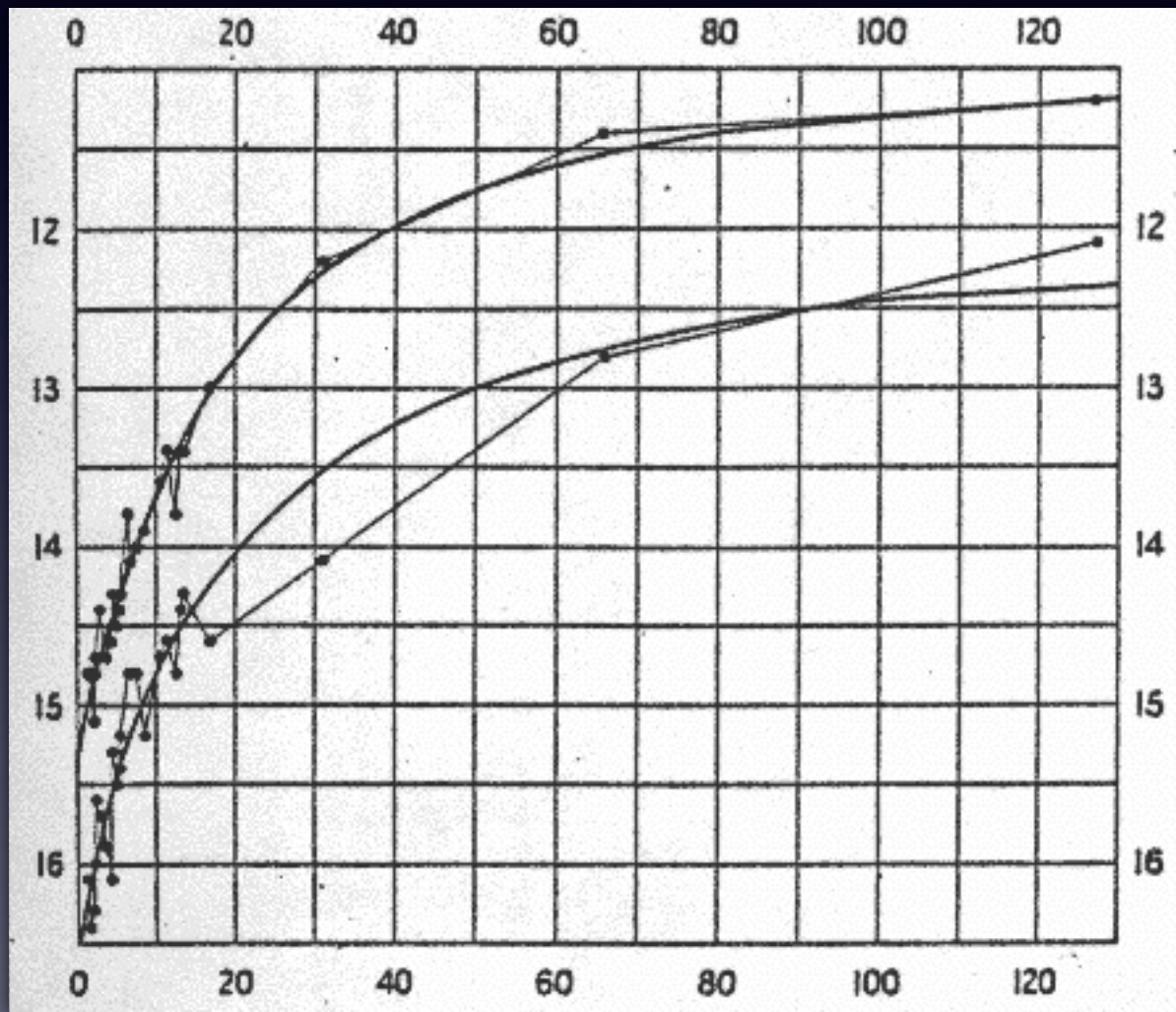
Henrietta Swan Leavitt (1912) va notar que alguns estels (les **Cefeïdes**) tenien **brillantor oscil.lant** (variable periòdicament)

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 dels estels polsants propers

Per **extrapolació** podem determinar la brillantor absoluta d'altres estels variables. Per la fórmula logarítmica trobem la distància

VUITÈ ESGLAÓ

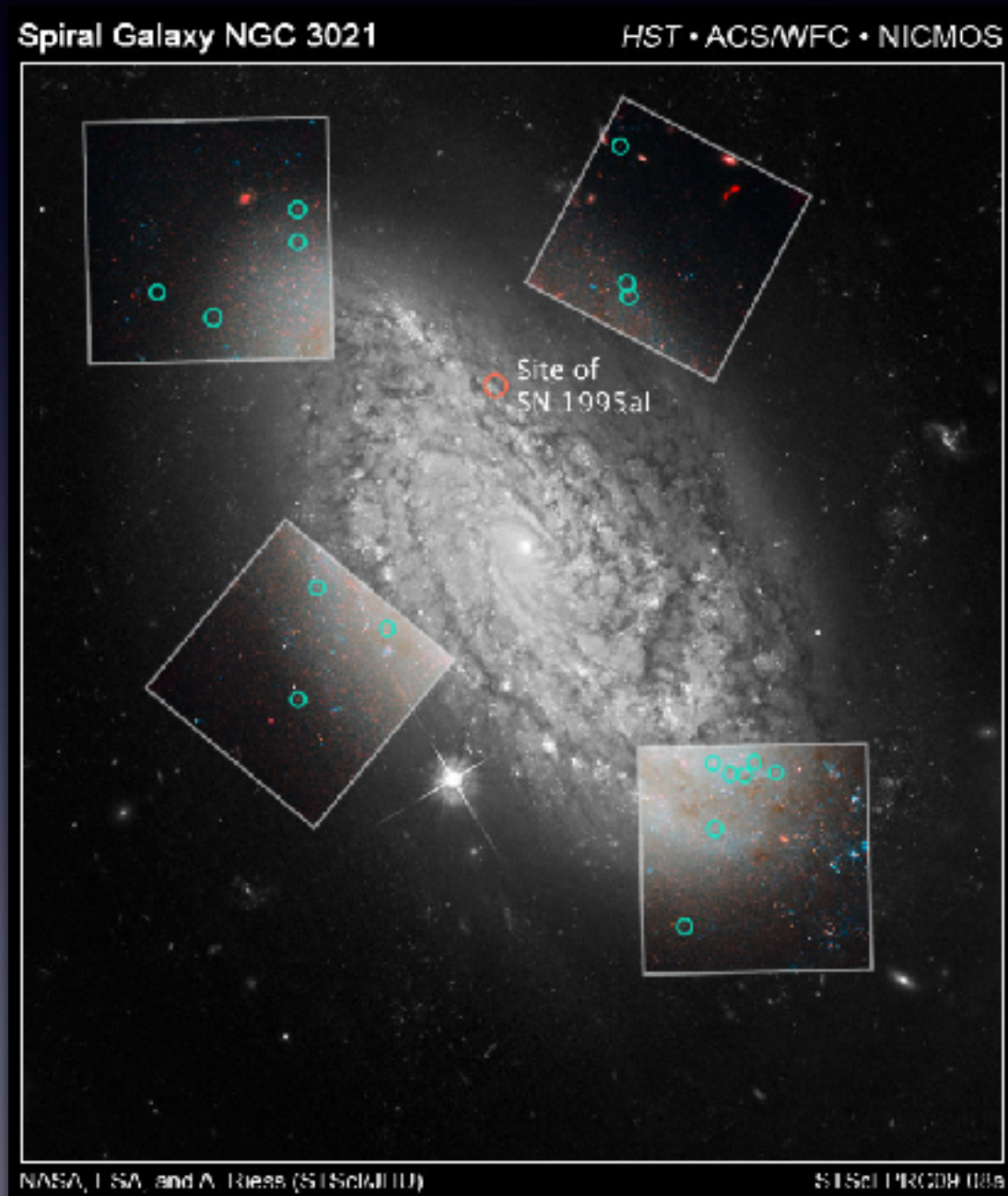
Altres galàxies

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

100.000.000 anys llum

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

- Diàmetre de la Via Làctia:
100.000 anys llum
- Distància a la Cefeïda 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.ll.

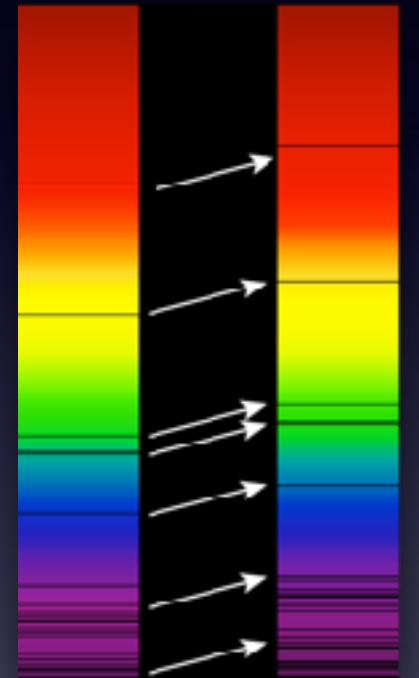
Diàmetre de l'Univers > 76.000.000.000 a.ll.

NOVÈ ESGLAÓ

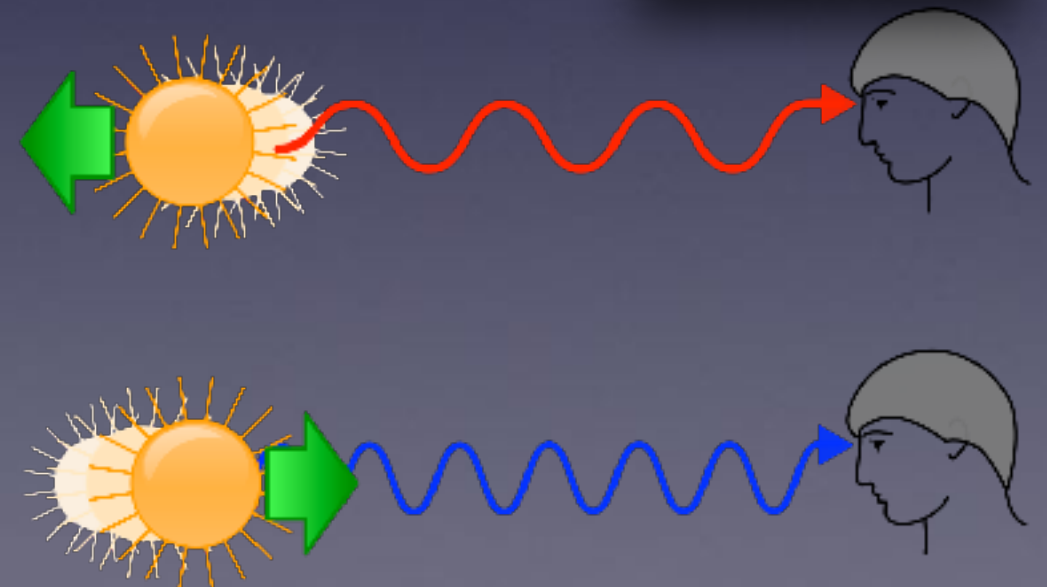
L'Univers

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

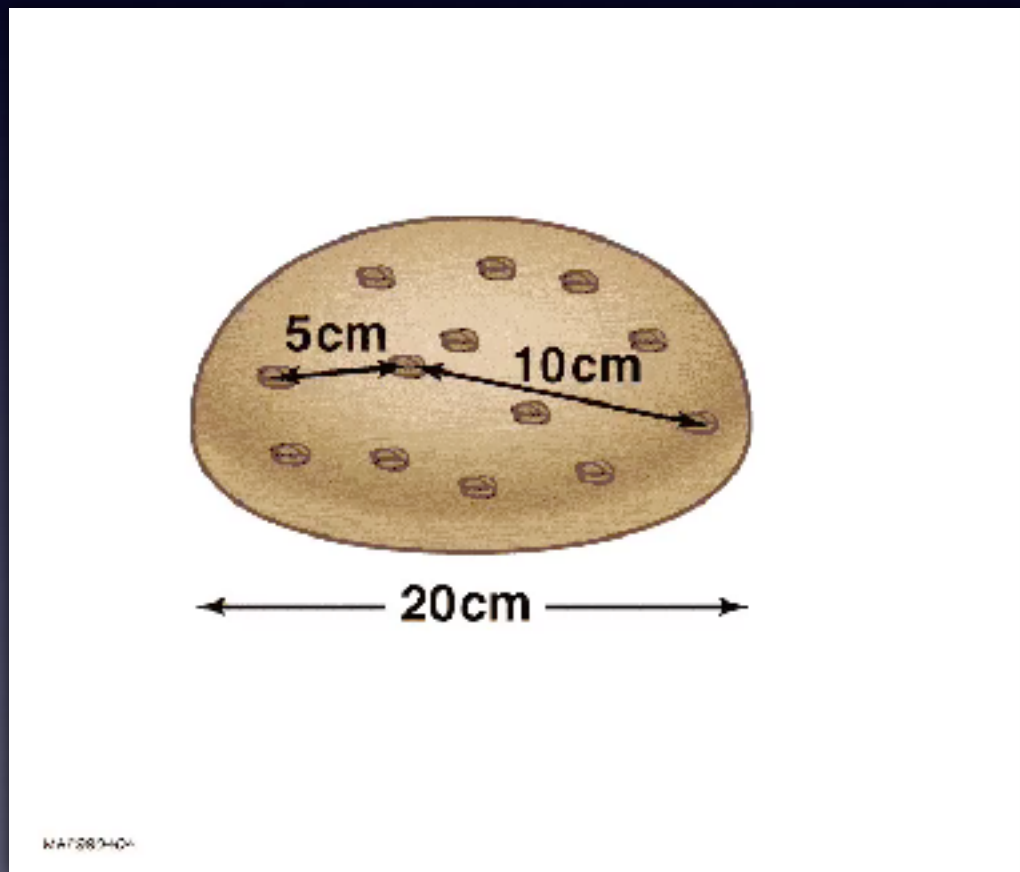
NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

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)

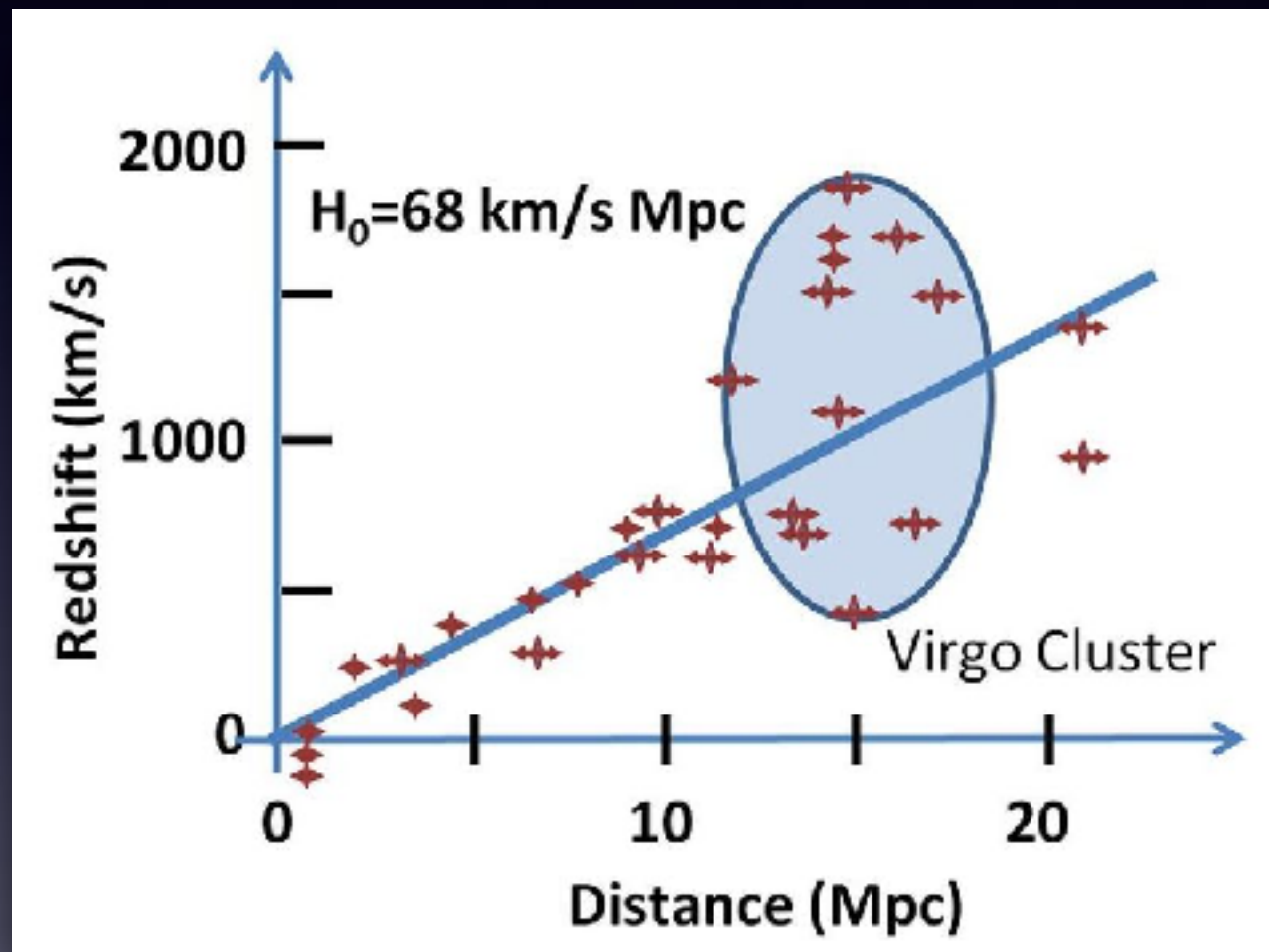


Com més lluny més
desplaçament al roig

NOVÈ ESGLAÓ

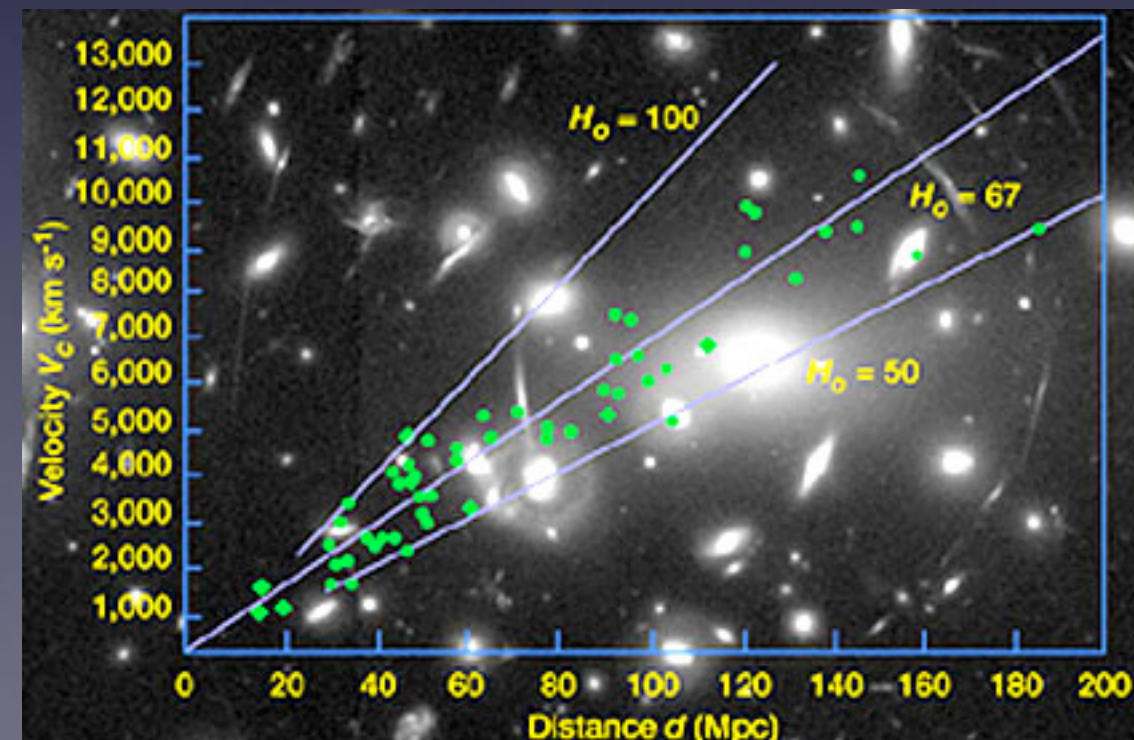
L'Univers

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

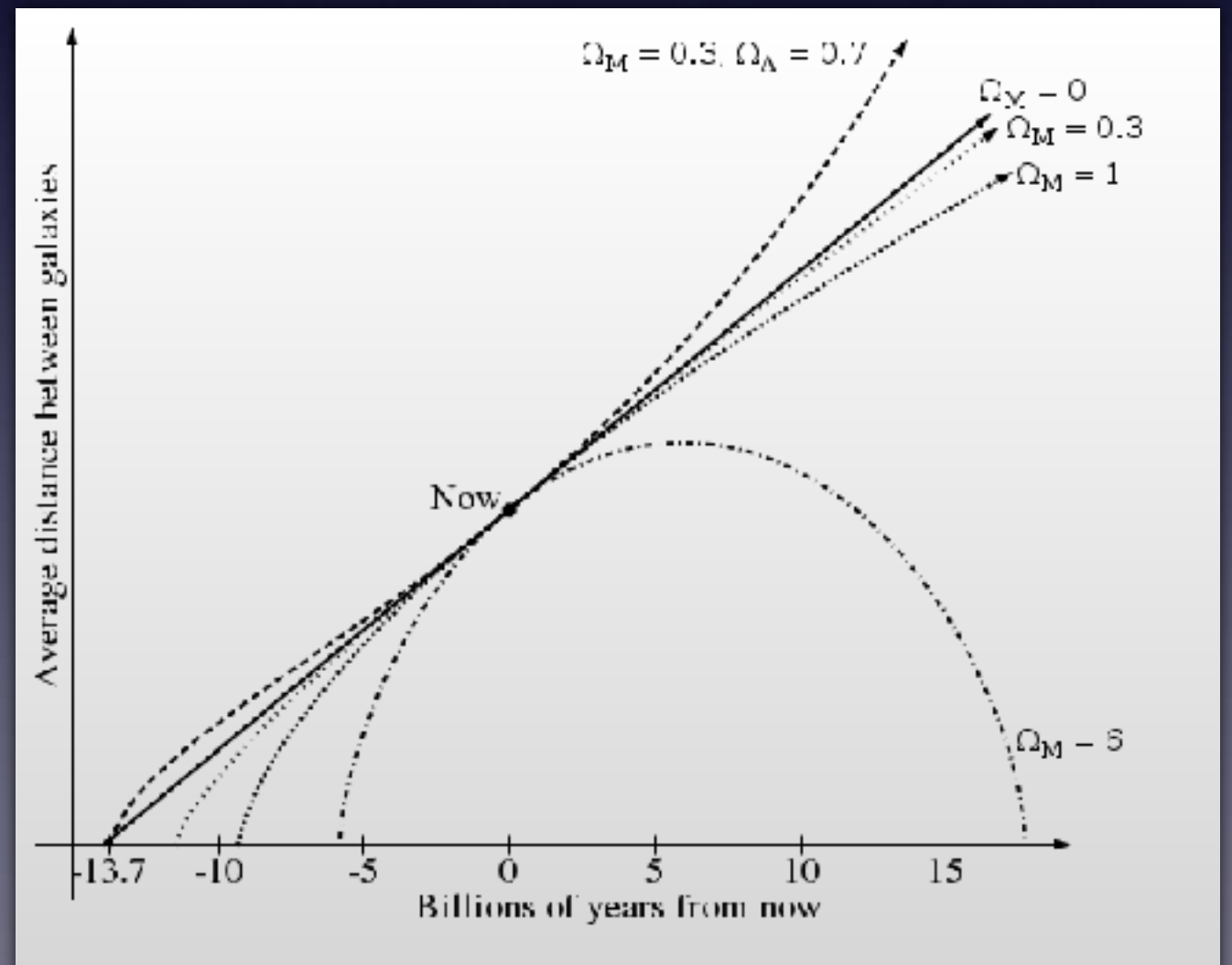
Llei de Hubble

$$v = H \cdot d$$

- ▶ 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

$$v = H \cdot d$$

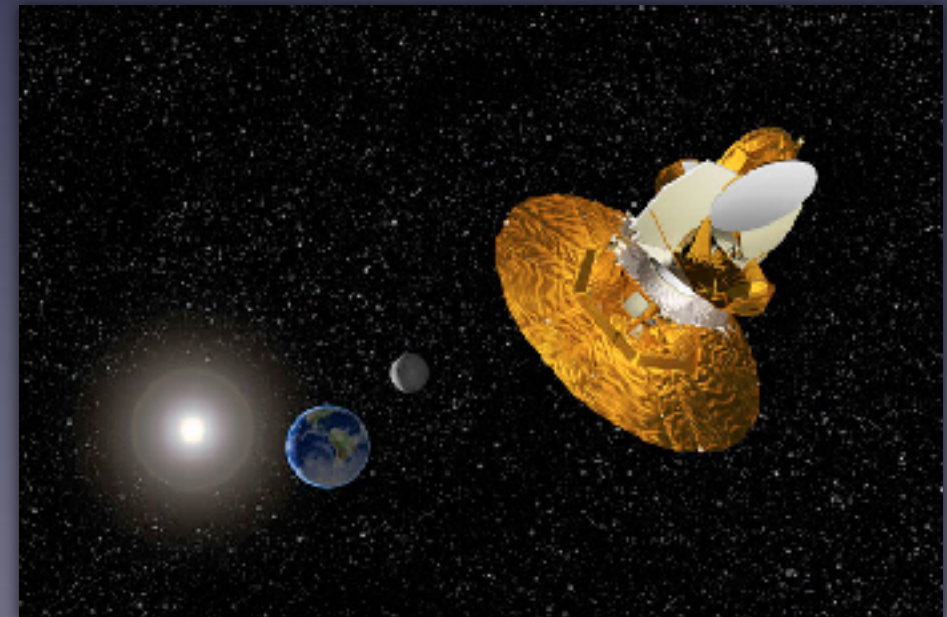
Calcular v i d i llavors H .
 v : per desplaçament al roig
 d : mètodes indirectes



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



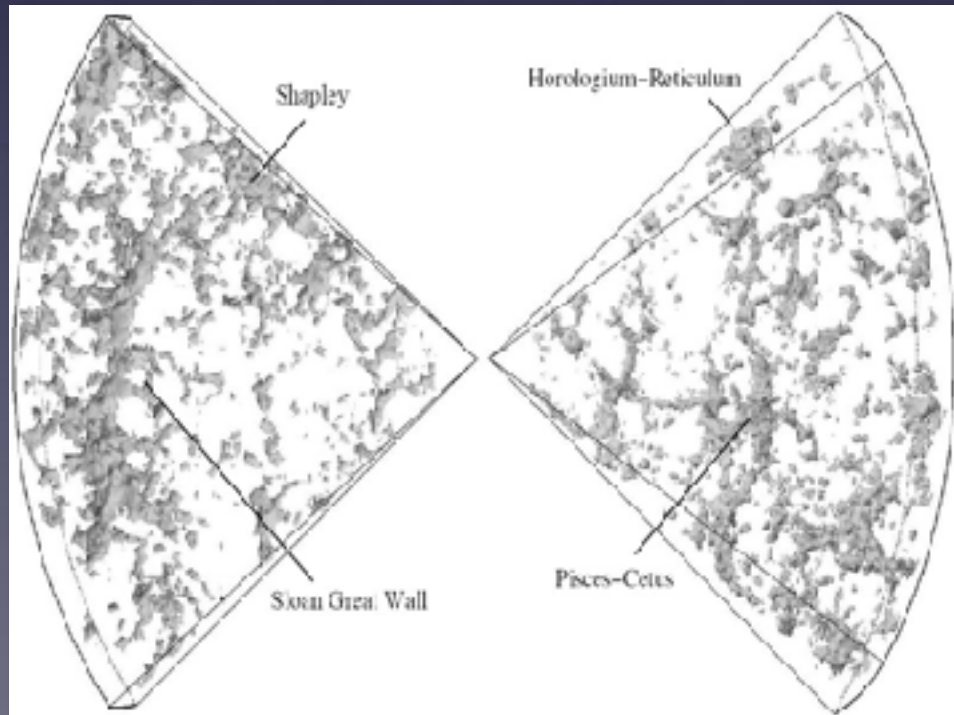
Distància



Vel. llum



Llei Hubble

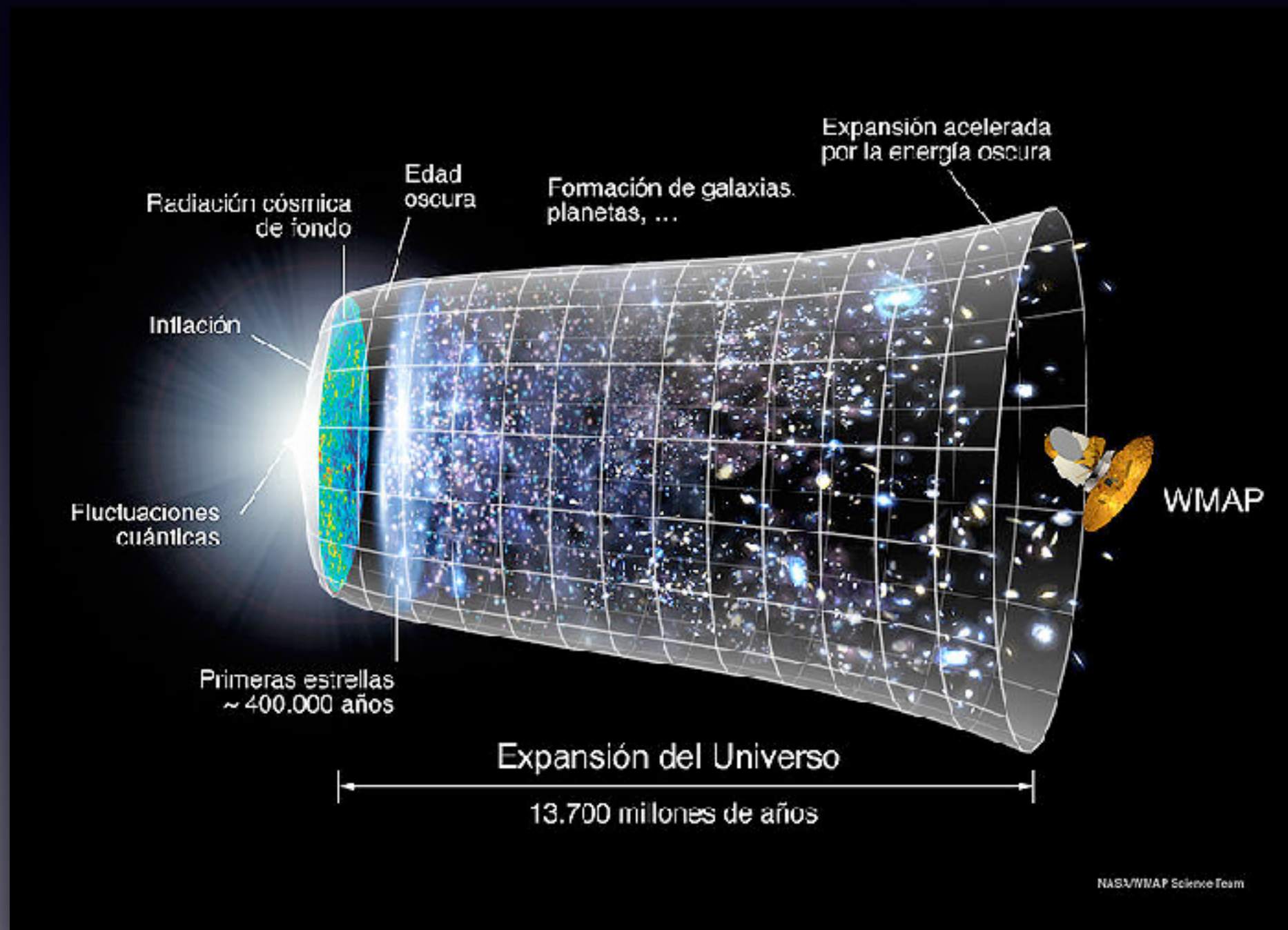


Sondeig del desplaçament roig de galàxies en un camp de 2 graus

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

NOVÈ ESGLAÓ

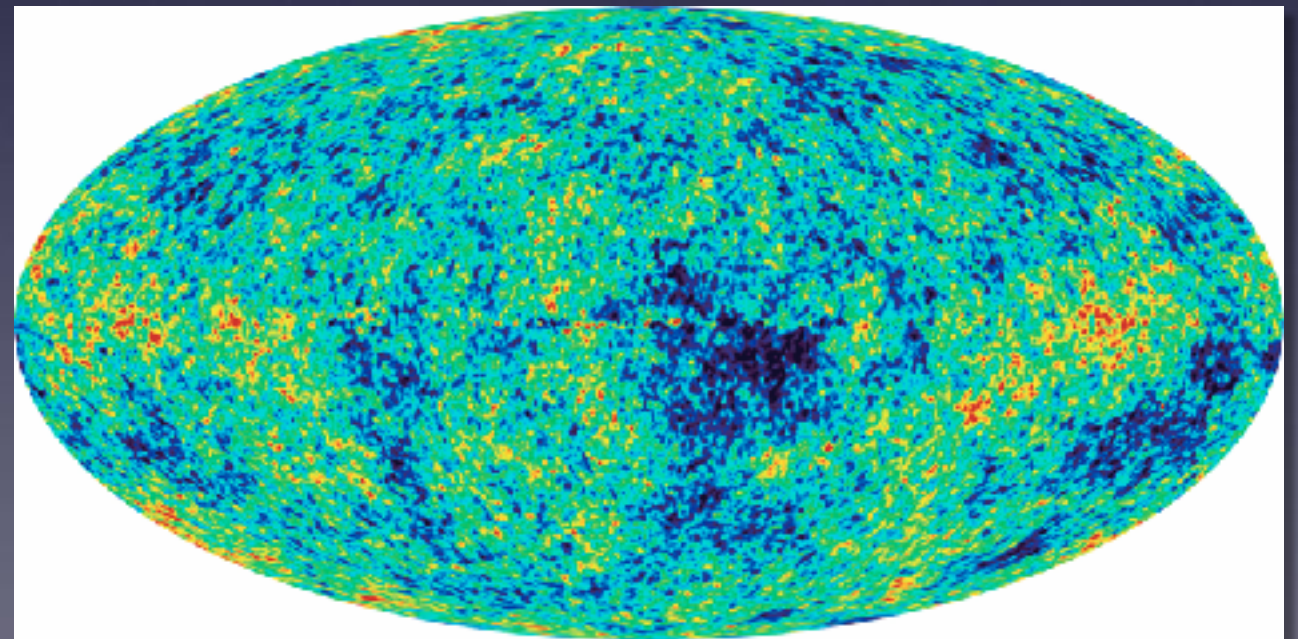
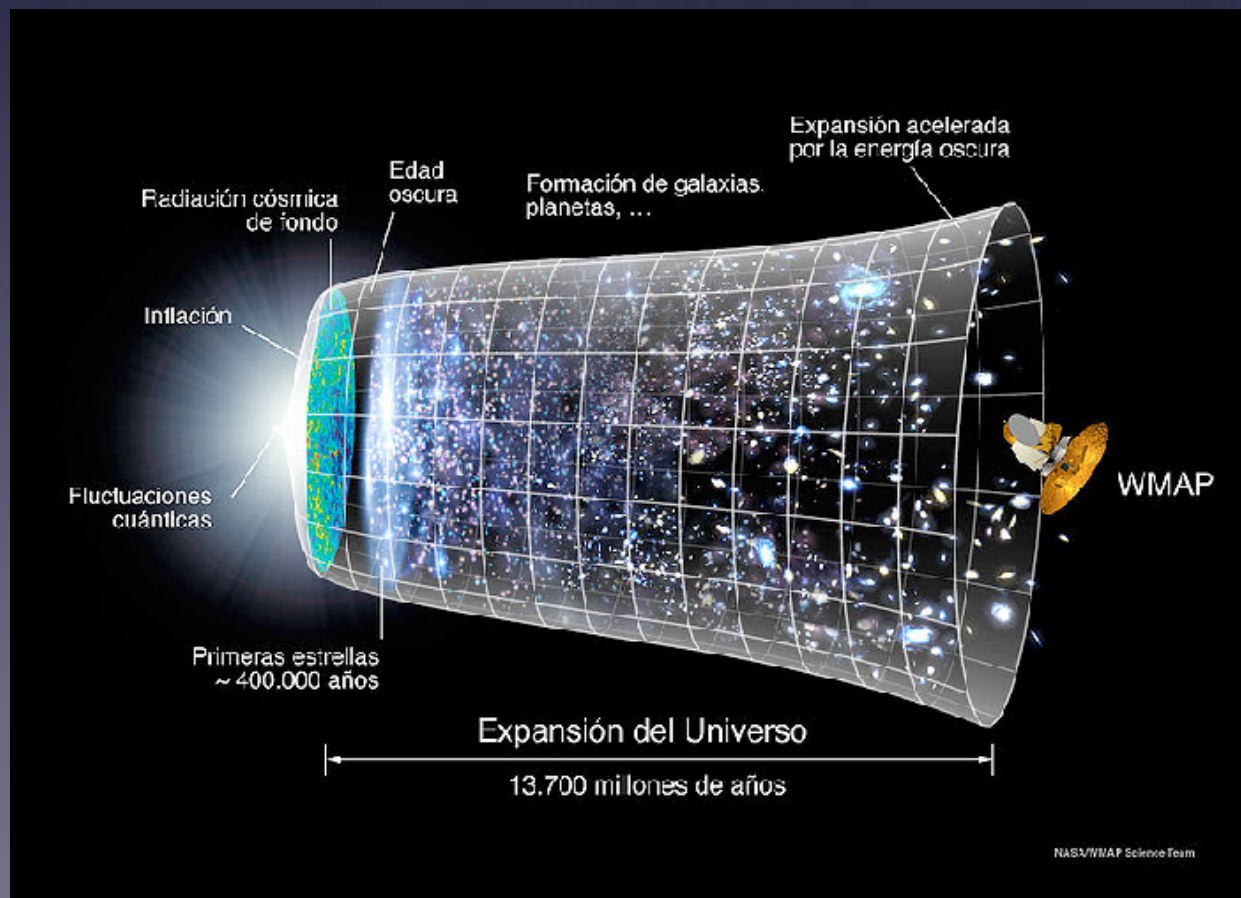
L'Univers



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 = 13800 milions d'anys



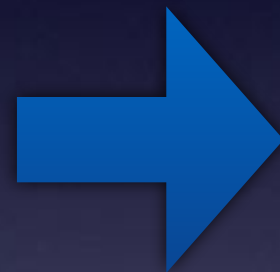
Cosmic microwave background fluctuation, WMAP

NOVÈ ESGLAÓ

L'Univers

Aquest esglaó és **molt actiu**

- Relativitat General
- Quàntica, Cordes ...



Moltes Matemàtiques

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

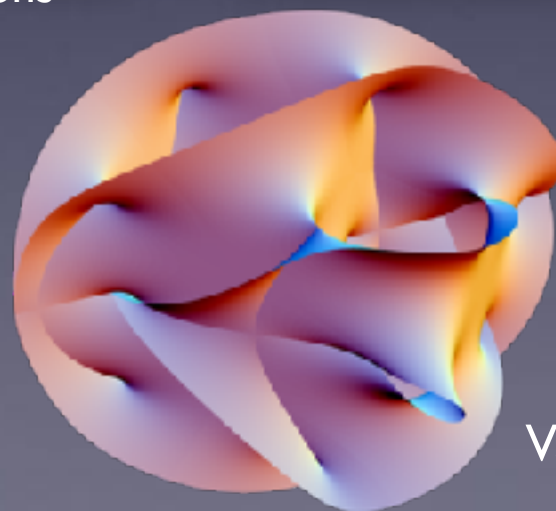
Forma matemàtica de les equacions
del camp d'Einstein

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

Solució de Schwarzschild
(forat negre)

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

Equació de Schrödinger



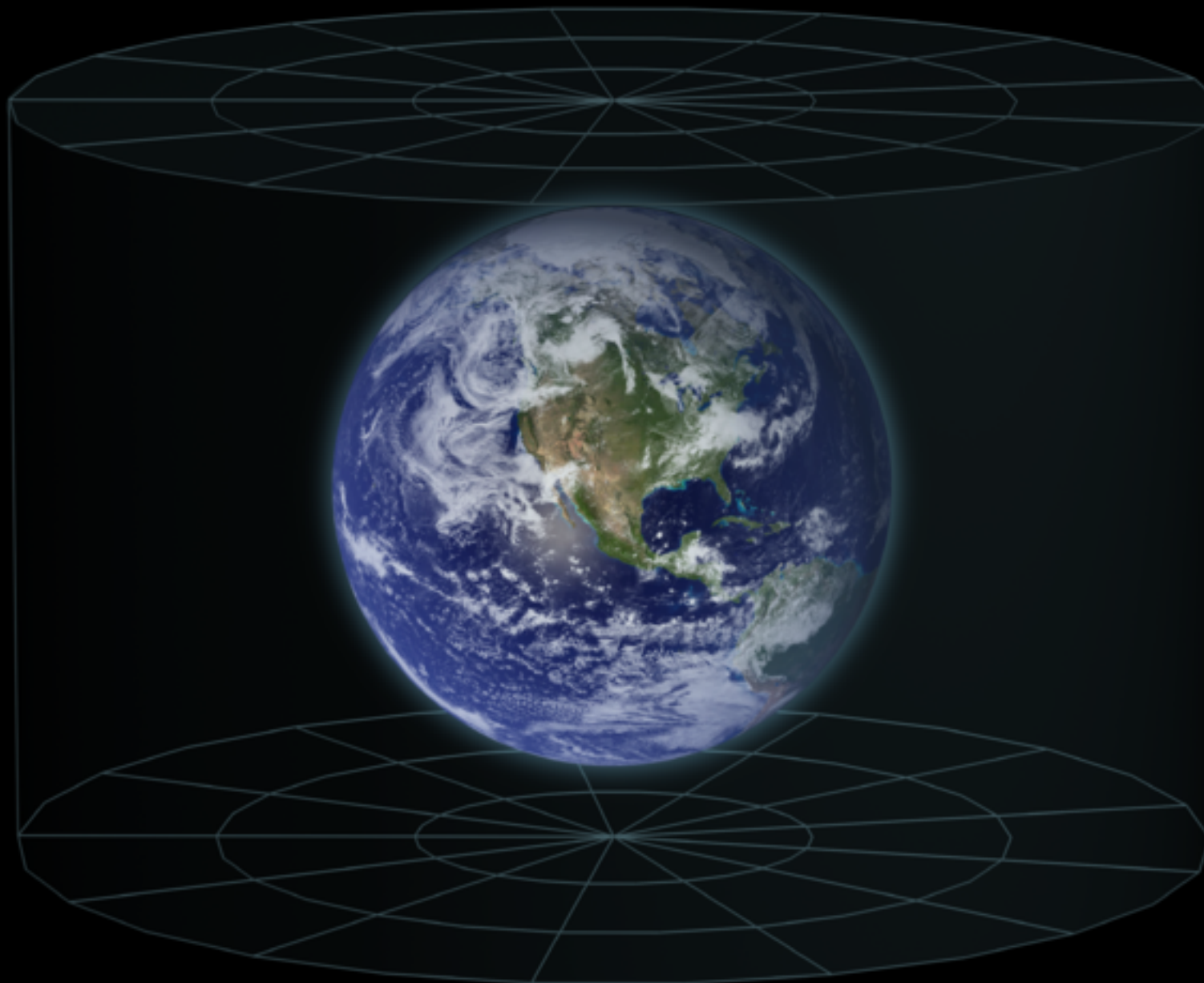
Varietat de Calabi-Yau, Teoria de
Supercordes

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

Primera Llei de un forat negre

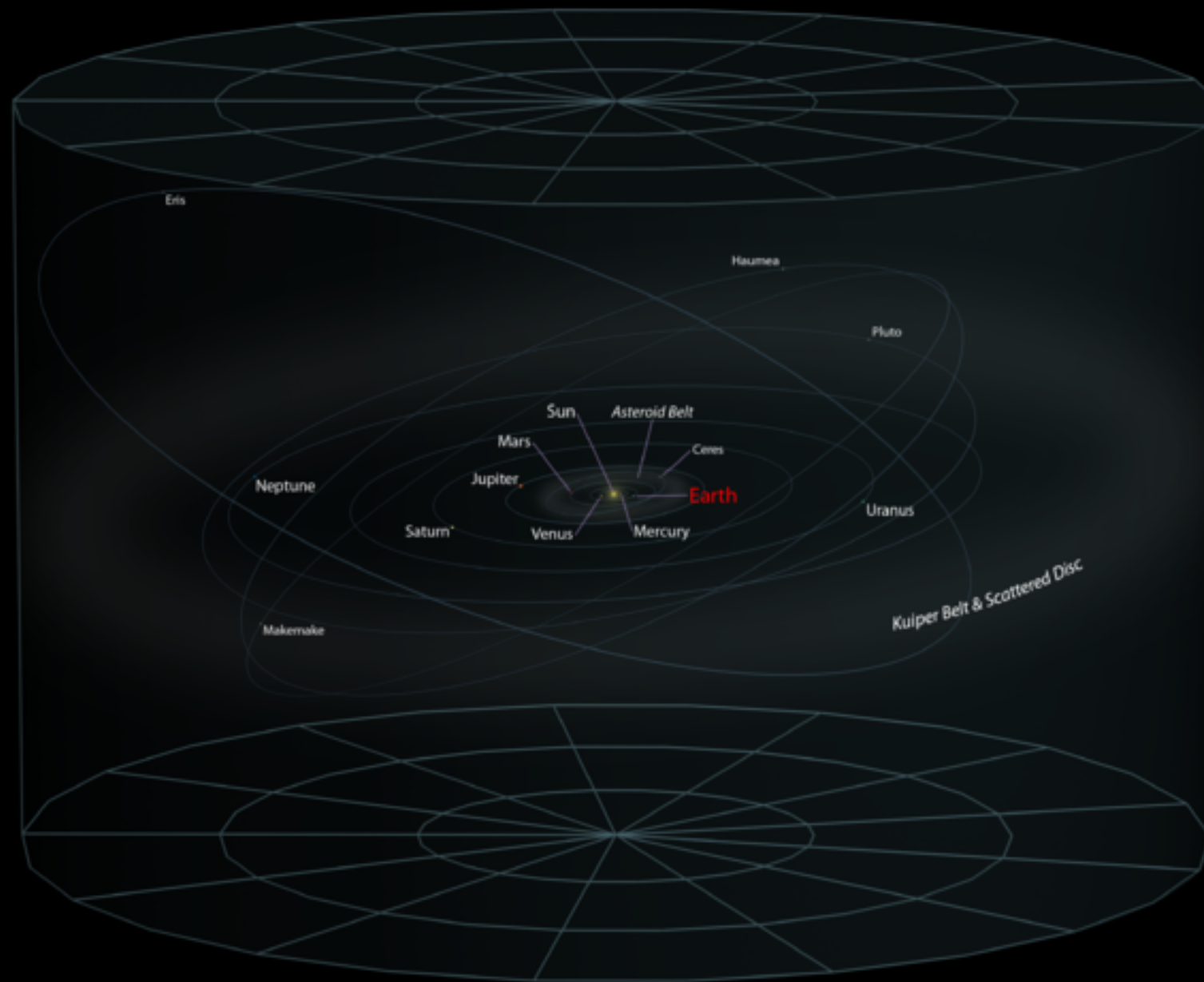
ELVIATGE

Earth



ELVIATGE

Solar System



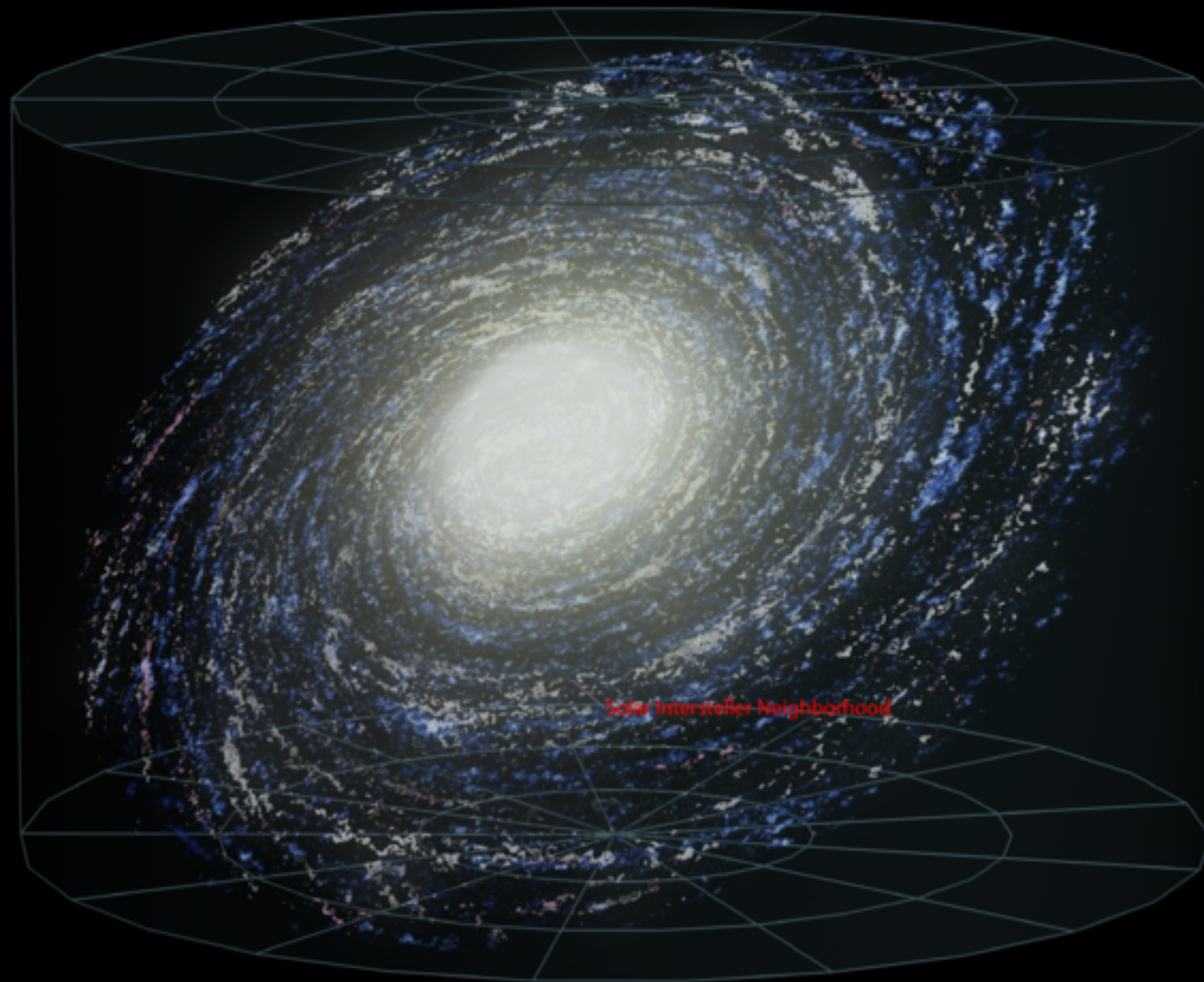
ELVIATGE

Solar Interstellar Neighborhood



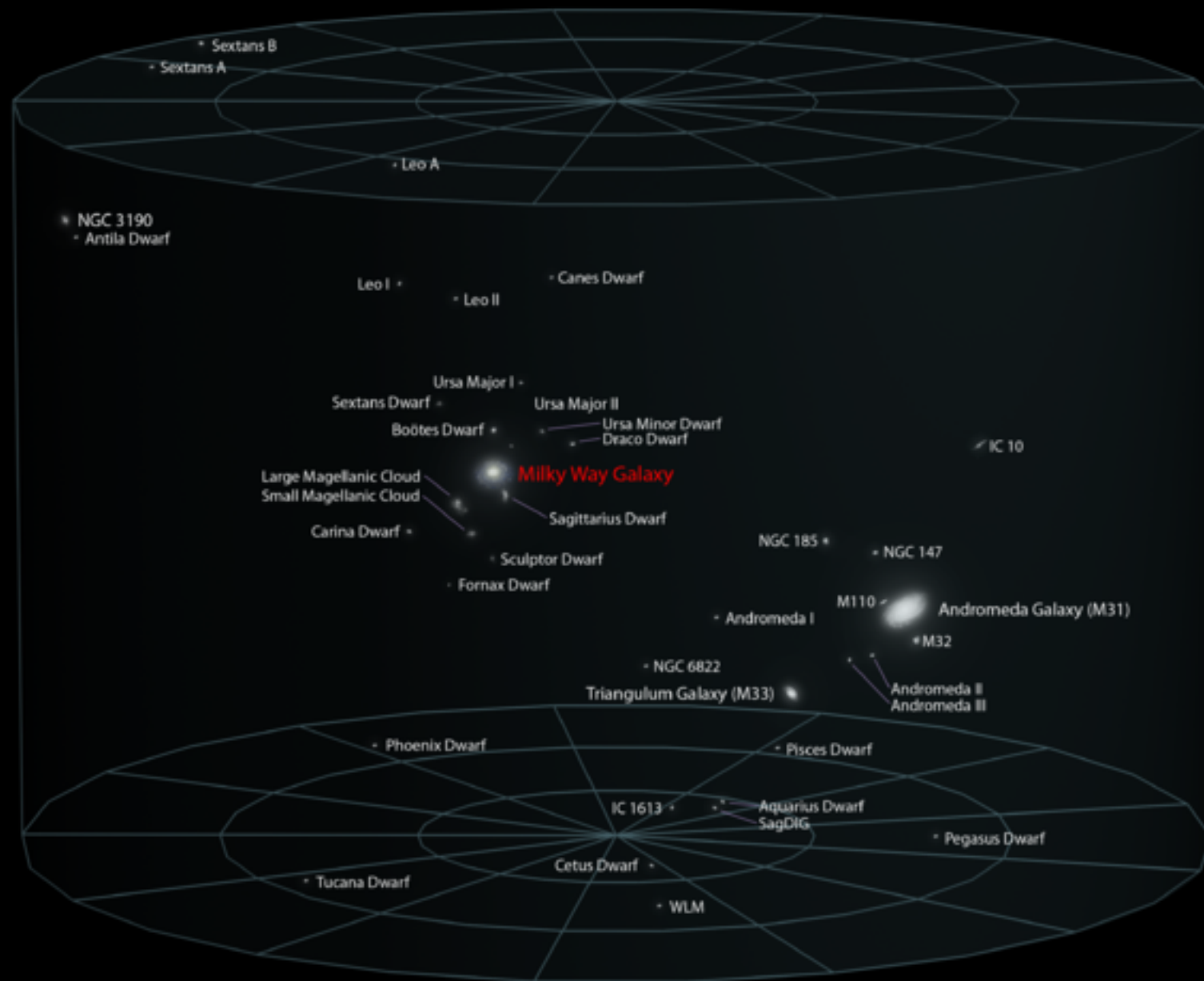
ELVIATGE

Milky Way Galaxy



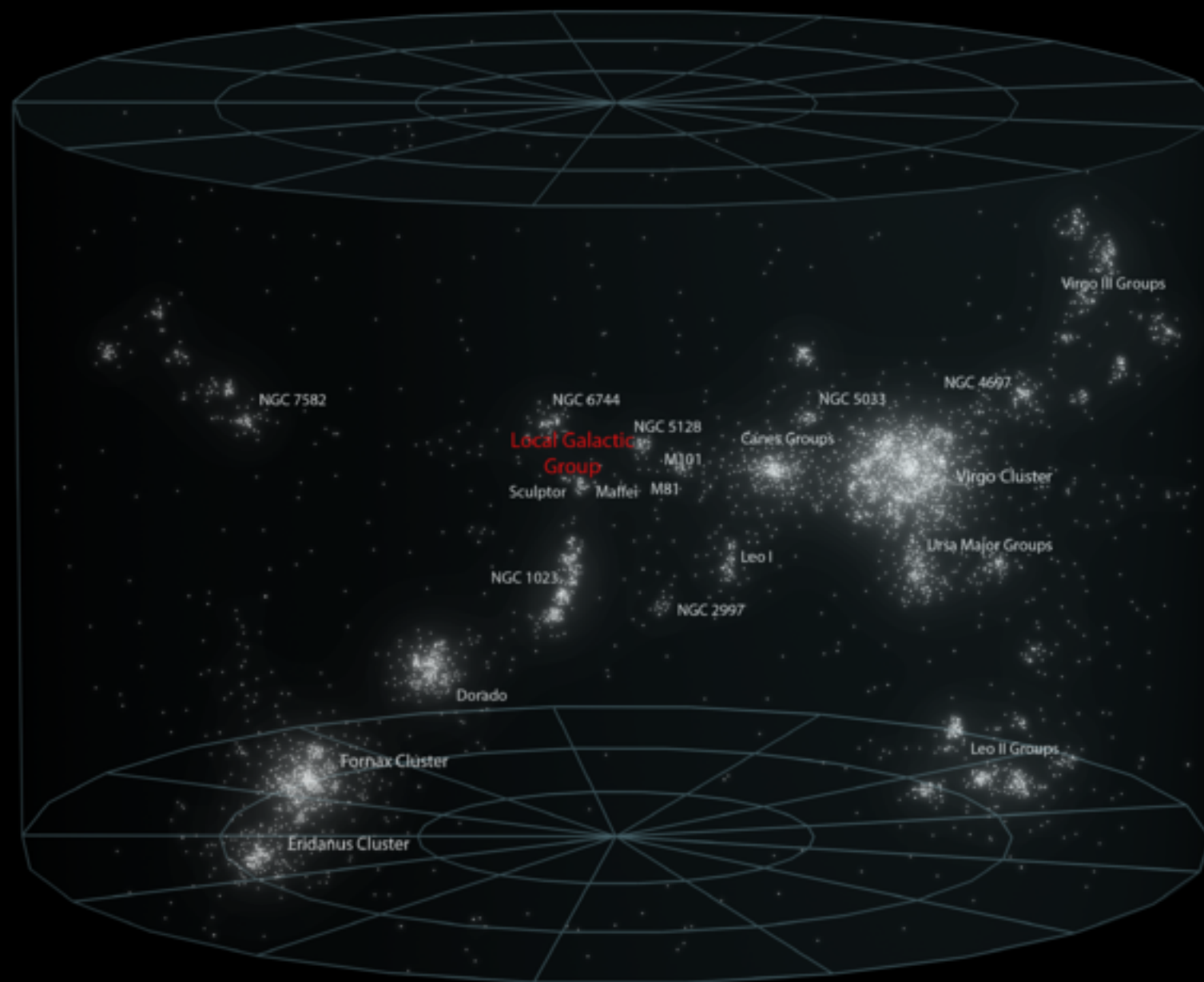
ELVIATGE

Local Galactic Group



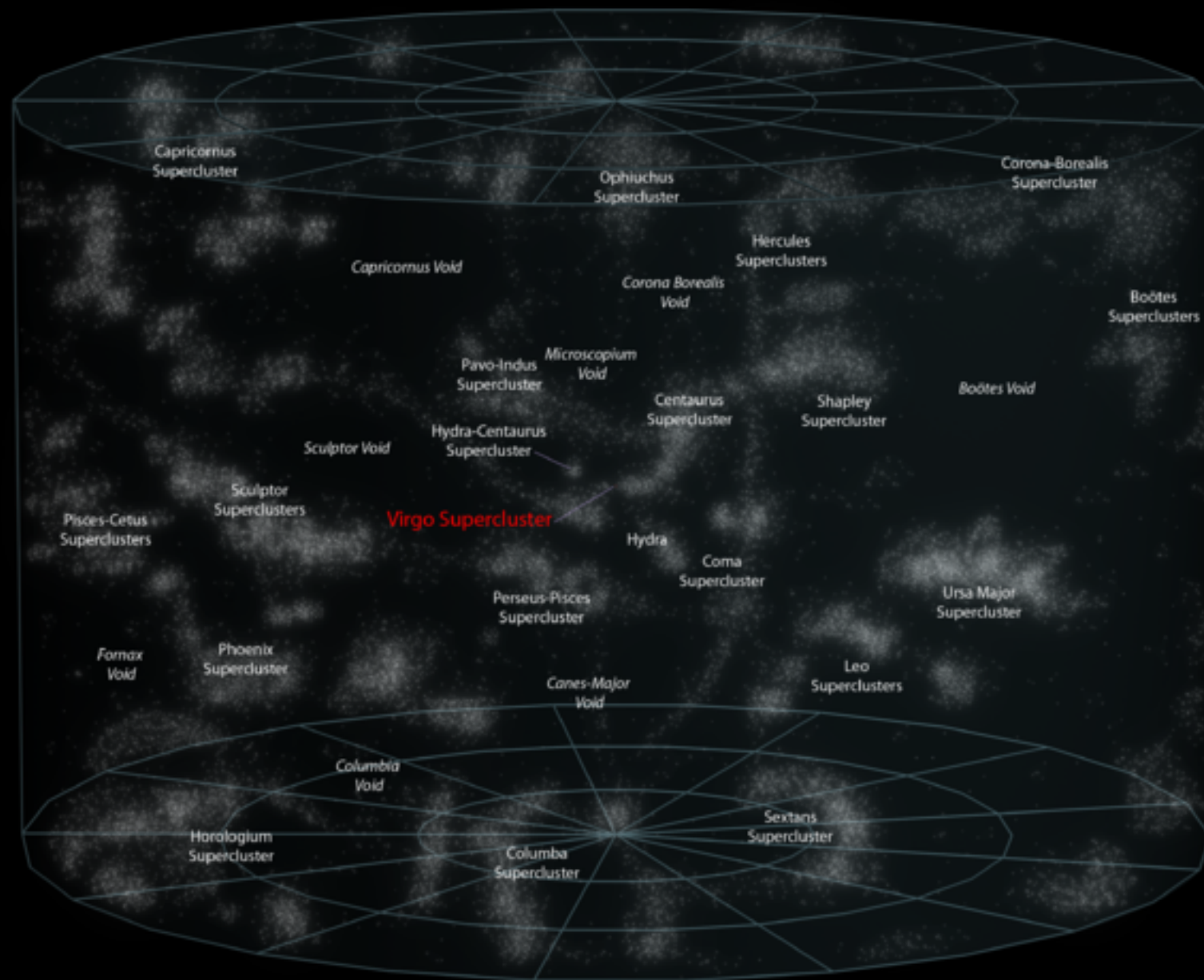
EL VIATGE

Virgo Supercluster



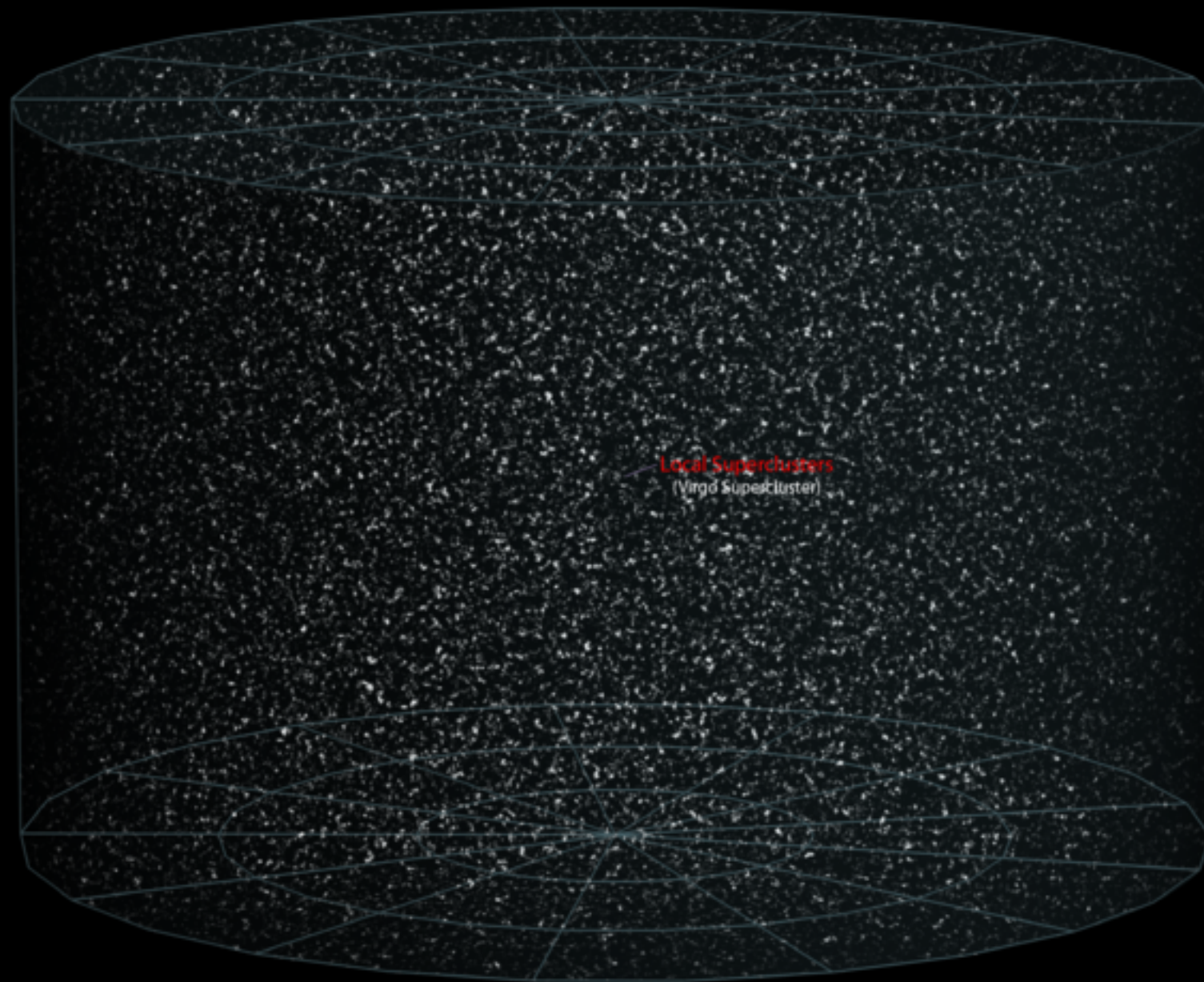
EL VIATGE

Local Superclusters

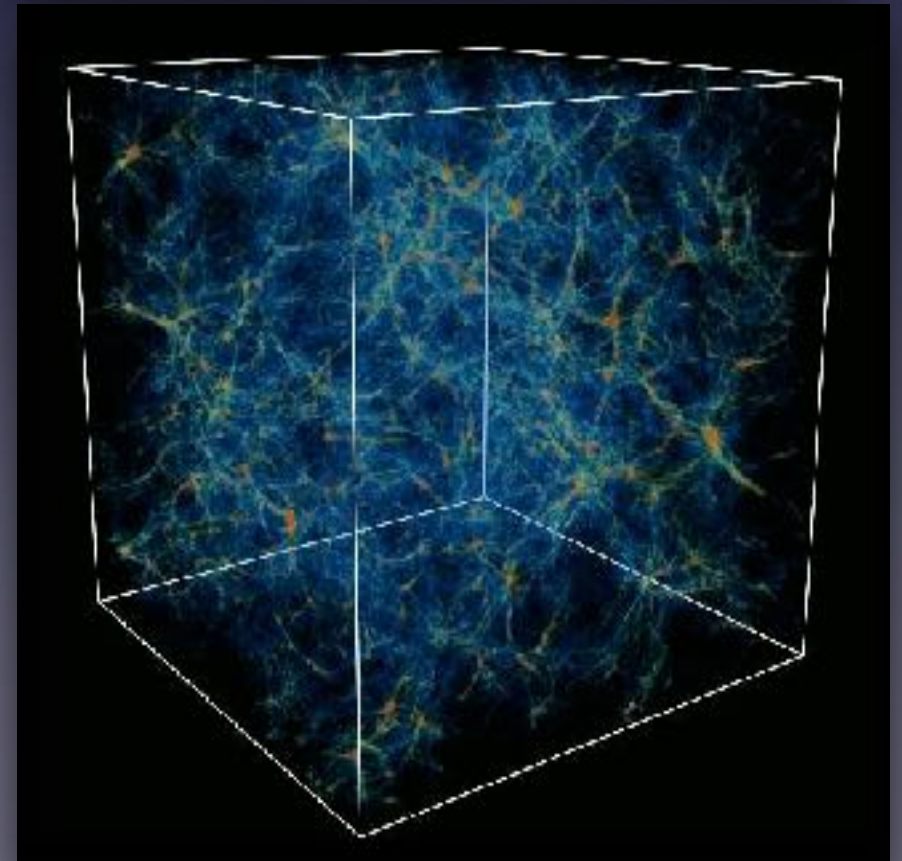
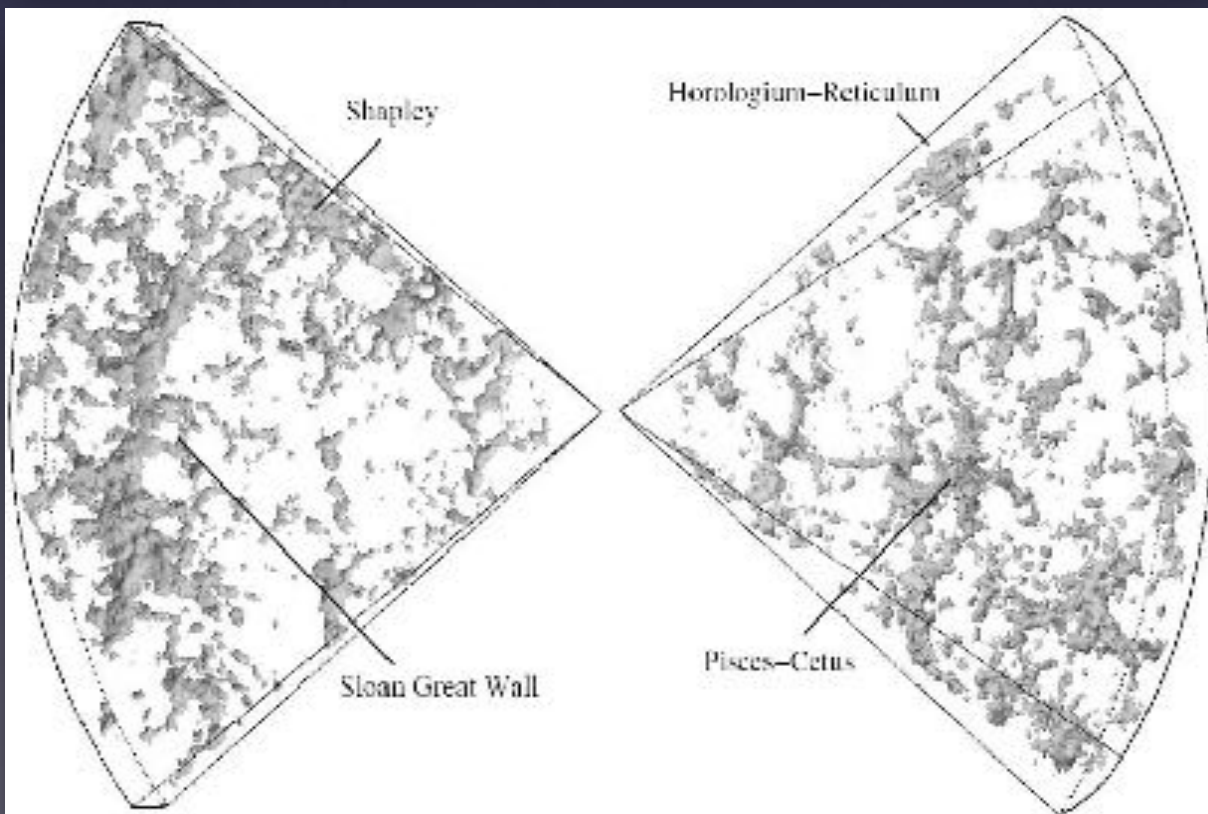
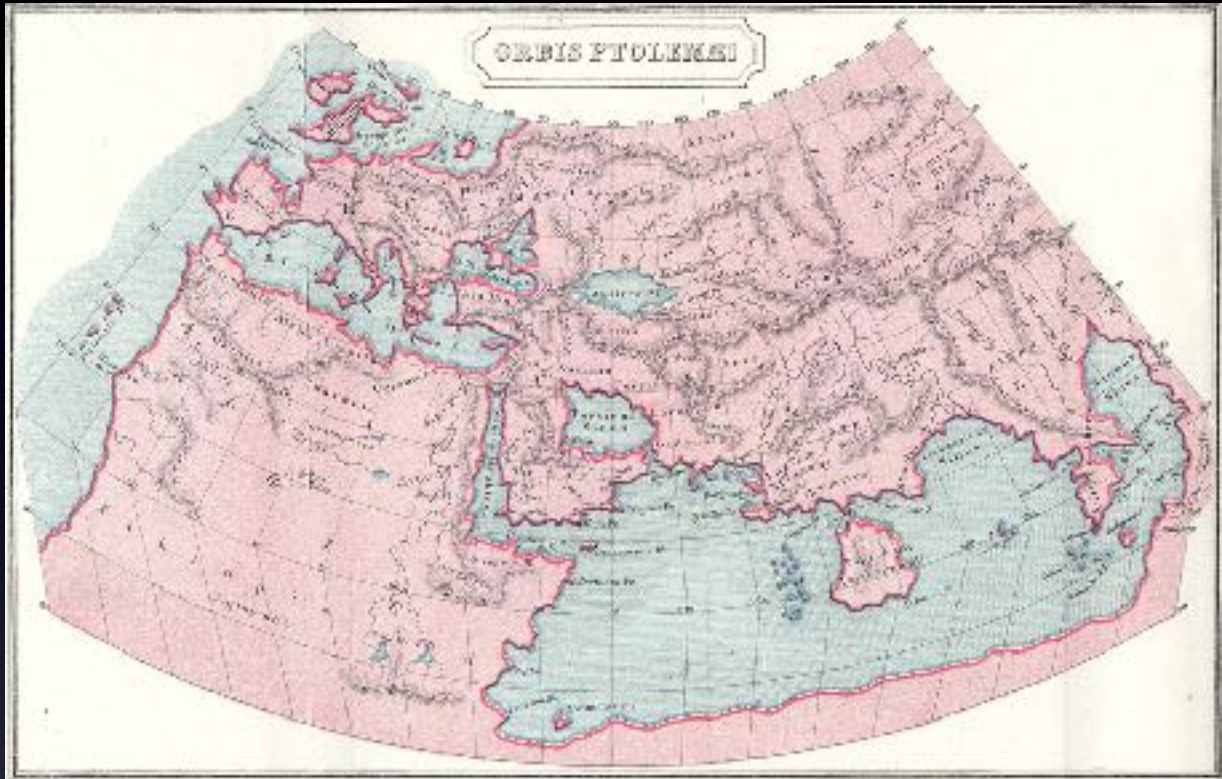


ELVIATGE

Observable Universe



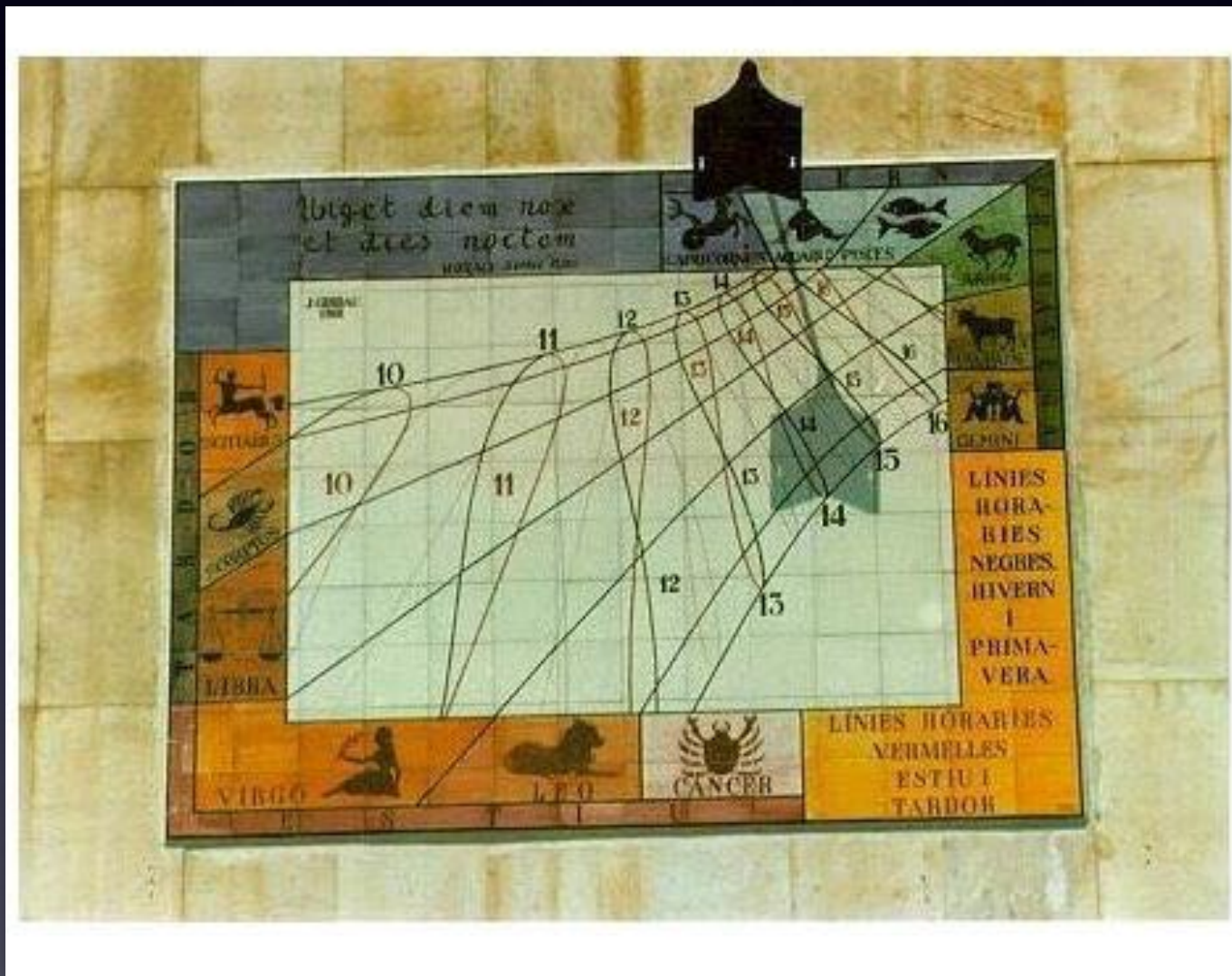
ELVIATGE



REFERENCIAS

- *Cosmos*, Carl Sagan
- *El Universo*, Isaac Asimov
- *Hiperespacio*, Michio Kaku
- *The Cosmic Distance Ladder*, Terence Tao (UCLA)
- Portal d'Astronomia, Wikipedia
- *El Universo en tu mano*, Christophe Galfard
- 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



Curs d'Astronomia **Joan Girbau**

<http://www.uab.cat/servlet/Satellite/divulgacio/videos-dels-dissabtes-curs-d-astronomia-llicons-/curs-d-astronomia-1345658878522.html>

Rellotge de Sol
Facultat de Ciències de la UAB

GRÀCIES!