

Astronomia

Sergi Blanco Cuaresma

9 de febrer de 2011

Resum

Introducció a l'astronomia mitjançant una selecció i traducció dels continguts de *Astronomy Notes*¹, complementat amb apunts de l'assignatura d'Astronomia de la Universitat de Barcelona.

Índex

1	Física bàsica	5
1.1	Lleis de Kepler pel moviment planetari	5
1.2	Lleis de Newton	6
1.2.1	Tercera llei de Kepler modificada	7
1.2.2	Llei de la gravetat	7
1.3	Llei de l'invers al quadrat	8
1.4	Òrbites	8
1.5	Moment angular	10
1.6	Relativitat especial	11
1.7	Relativitat general	11
1.8	Radiació electromagnètica	11
1.8.1	Energia i intensitat	12
1.8.2	Cos negre i llei de Wien	13
1.8.3	Llei de Stefan-Boltzmann law	13
1.8.4	Àtoms i radiació	14
1.8.5	Efecte Doppler	14
1.9	Datació radiomètrica	15
2	Sistema solar	15
2.1	Planetes	15
2.1.1	Distància al sol	16
2.1.2	Massa	17
2.1.3	Tamany	17
2.1.4	Volum	18
2.1.5	Densitat	18
2.1.6	Atmosfera	18
2.1.7	Camp magnètic	20
2.1.8	Interior dels planetes	21
2.1.9	Superfície	21
2.1.10	Anells	21
2.1.11	Llunes	22
2.1.12	Comparativa terra - venus -mart	25
2.2	Asteroides	25

¹<http://www.astronomynotes.com/>

2.3	Meteorits	27
2.4	Cometes	27
2.5	Formació del sistema solar	30
3	Exoplanetes	32
4	Estrelles	32
4.1	Distància	32
4.2	Magnitud	33
4.3	Color i temperatura	34
4.4	Composició	35
4.5	Velocitat	36
4.6	Massa	38
4.7	Tamany	39
4.8	Tipus espectral	39
4.8.1	Diagrames Hertzsprung-Russell	40
4.8.2	Paral·laxis espectroscòpica	41
4.9	Font d'energia	41
4.9.1	Cadena protó-protó chain	42
4.9.2	Cadena CNO	43
4.9.3	Procés triple alfa	43
4.9.4	Altres processos	44
5	El Sol	45
5.1	Composició	45
5.2	Activitat	46
5.3	Font d'energia	47
5.4	Heliosismologia	47
6	Evolució estel·lar	48
6.1	Massa	48
6.2	Model estel·lar	48
6.3	Etapa 1: Núvol molecular gegant	50
6.4	Etapa 2: Protoestrella	50
6.5	Etapa 3: T-Tauri	50
6.6	Etapa 4: Seqüència principal	51
6.7	Etapa 5: Subgegant, gegant vermell i supergegant	52
6.8	Etapa 6: Fusió del nucli	53
6.8.1	Flash de l'heli	53
6.8.2	Pulsacions	53
6.9	Etapa 7: Gegant vermella o supergegant	55
6.10	Etapa 8: Nebulosa planetària o supernova	56
6.10.1	Tipus de supernova	57
6.11	Etapa 9: Nucli romanent	58
6.11.1	Gas degenerat	58
6.11.2	Nana blanca	59
6.11.3	Estrella de neutrons	60
6.11.4	Pulsars	61
6.11.5	Forats negres	62

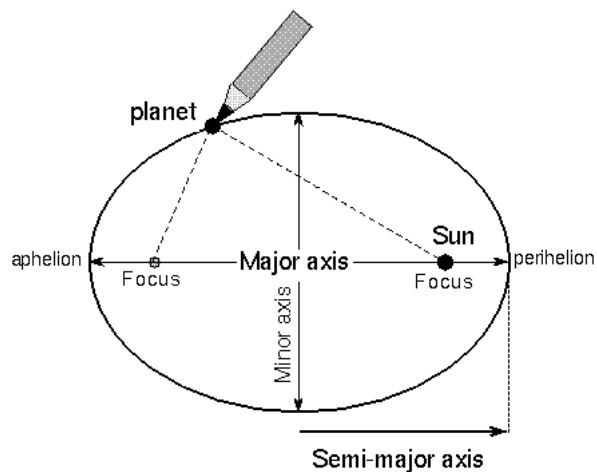
7	Medi interestel·lar	64
7.1	Pols	64
7.2	Gas	65
7.2.1	Regions HII	66
7.2.2	Regions HI	66
7.2.3	Núvols moleculars	66
8	La via lactea	67
8.1	Estructura	67
8.2	Ubicació del sistema solar	68
8.3	Moviment	68
8.4	Massa i corba de rotació	69
8.5	Braços espirals	70
8.6	Poblacions d'estrelles	72
8.7	Centre galàctic	72
9	Altres galàxies	73
9.1	Tipus	73
9.1.1	Galàxies el·líptiques	73
9.1.2	Galàxies espirals	74
9.1.3	Galàxies irregulars	75
9.2	Mesura de distàncies a galàxies	75
9.2.1	Estrelles variables o supernoves tipus Ia	75
9.2.2	Relació Faber-Jackson	75
9.2.3	Relació Tully-Fisher	76
9.2.4	Llei de Hubble	77
9.3	Nombre d'estrelles	78
9.4	Massa total	78
9.5	Cúmuls de galàxies	78
9.6	Superclusters	79
9.7	Origen	79
10	Galàxies actives	80
10.1	Quàsars	80
10.2	Altres galàxies actives	81
10.3	Font d'energia	81
11	Cosmologia	81
11.1	Expansió de l'univers	81
11.2	L'univers és uniforme a gran escala	82
11.3	Radiació còsmica microones de fons i primers instants de l'univers	83
11.4	Conversió matèria - energia	86
11.5	Destí de l'univers	87
11.6	Problemes amb la teoria del Big Bang	88
11.6.1	Problema de l'univers pla	88
11.6.2	Problema de l'horitzó	89
11.6.3	Inflació, la solució	89
12	Vida més enllà de la terra	92
12.1	Zona habitable	92
12.2	Vida	92
12.3	Planetes habitables	93
12.4	Estimació del nombre de civilitzacions	93

13 Annex I. Mesura de distàncies	94
14 Annex II. Constant i propietats	95
14.1 Constants astronòmiques	95
14.2 Constants físiques	95
14.3 Propietats dels planetes	95
14.4 Propietats del sol	96
14.5 Propietats de l'univers	97

1 Física bàsica

1.1 Lleis de Kepler pel moviment planetari

Primera llei L'òrbita de cada planeta es una el·lipse amb el sol en un dels dos focus



Drawing an **ellipse**: loop string around thumb tacks at each **focus** and stretch string tight with a pencil while moving the pencil around the tacks. The Sun is at one focus.

Figura 1: Òrbita el·líptica

Segona llei Una línia entre el planeta i l'objecte que orbita, fa un barreg d'àrees equivalents en temps equivalents

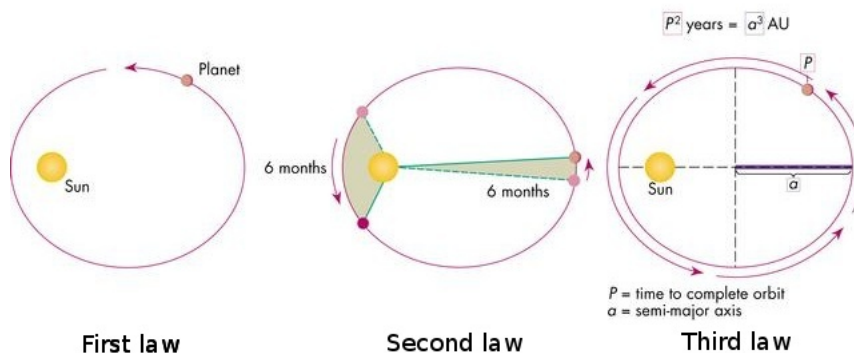


Figura 2: Variació en la velocitat

Tercera llei Pel cas de dos satèl·lits orbitat un objecte, el període (P) està relacionat amb el semieix major de cada satèl·lit (d):

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3 \Rightarrow P_1 = P_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3} \quad (1)$$

Pel cas dels planetes del sistema solar comparats amb la terra:

$$P^2 = (\text{semiaxis major})^3 \quad (2)$$

a on P és el període en anys i el semieix major es troba en Unitats Astronòmiques.

1.2 Lleis de Newton

Primera llei Un cos en repòs continua en repòs, i un que segueix un moviment en línia recta manté velocitat constant i la mateixa direcció a no ser que es vegi afectat per una força. Les forces causen acceleracions, que implica un canvi en la velocitat o en la direcció del moviment.

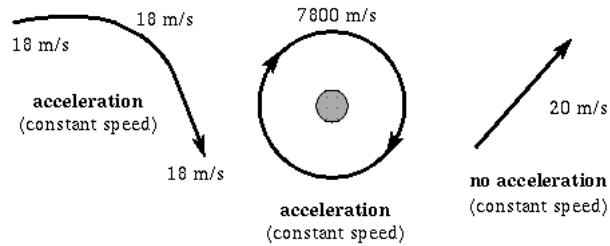


Figura 3: Primera llei de Newton

Segona llei Força és igual a massa per acceleració

$$F = m \cdot a \quad (3)$$

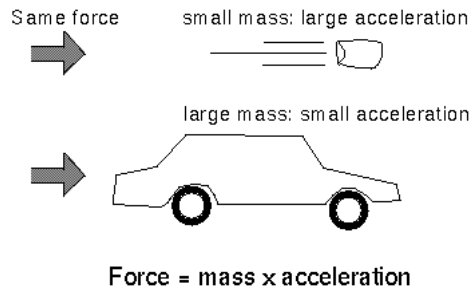


Figura 4: Segona llei de Newton

Tercera llei Per cada força aplicada a un objecte, existeix una força equivalent i oposada produïda pel mateix objecte.

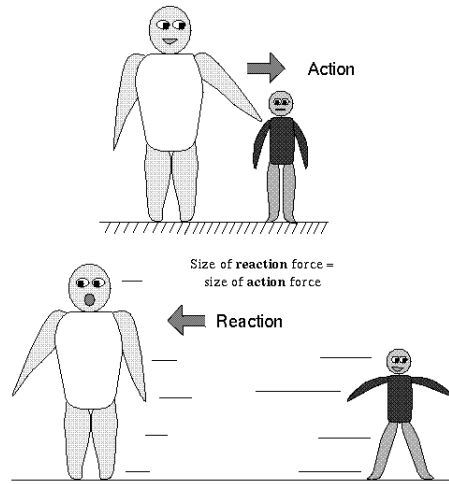


Figura 5: Tercera llei de Newton

1.2.1 Tercera llei de Kepler modificada

Per cada acció existeix una reacció oposada segons la segona llei de Newton, per tant, un planeta que orbita el sol ho fa realment al voltant del centre de masses del sistema. Aquest fet va permetre reformular la tercera llei original de Kepler ($P^2 = (\text{semiaxis major})^3$):

$$(m_1 + m_2) P^2 = (d_1 + d_2)^3 \quad (4)$$

1.2.2 Llei de la gravetat

La força de la gravetat ve determinada per:

$$F_g = \frac{GMm}{d^2} \quad (5)$$

a on la constant gravitacional és $G = 6.672 \cdot 10^{-11} m^3 / (kg \cdot sec^2)$

Per altra banda, l'acceleració produïda per la gravetat terrestre es pot deduir a partir de:

$$F = m \cdot a = m \cdot g = \frac{GMm}{d^2} \Rightarrow g = \frac{GM}{d^2} \quad (6)$$

a on l'acceleració $g = 9.8 \text{ meters/second}^2$ i d és la distància al centre de la terra.

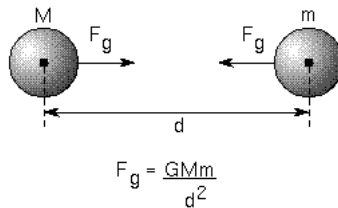


Figura 6: Llei de la gravetat

1.3 Llei de l'invers al quadrat

Una mesura en un punt determinat és equivalent a la mesura en un punt més llunya tenint en compte les distàncies:

$$X \text{ at } A = X \text{ at } B \cdot \left(\frac{\text{distance } B}{\text{distance } A} \right)^2 \quad (7)$$

a on X pot ser per exemple la gravetat al punt A i al punt B.

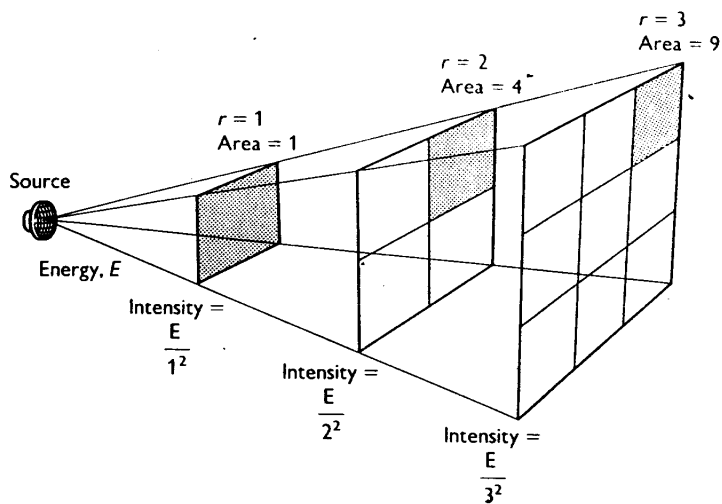


Figura 7: Llei de l'invers al quadrat

1.4 Òrbites

La força centrípeta ve determinada per la següent fórmula:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{d} \quad (8)$$

a on d és el radi del cercle.

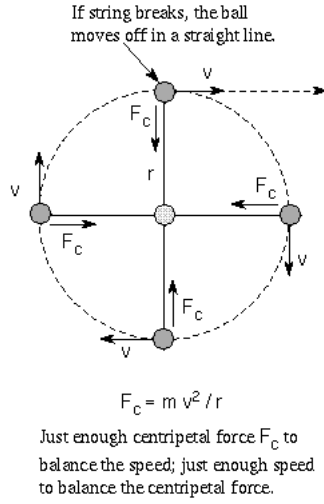


Figura 8: Força centrípeta

Per mesurar la massa d'estrelles i planetes que orbiten altres cossos de forma estable, s'igualava la força centrípeta a la força de la gravetat:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{d} = \frac{GMm}{d^2} \Rightarrow M = \frac{d \cdot v^2}{G} \quad (9)$$

La velocitat es troba relacionada amb el període (nombre de vegades que realitza una òrbita de radi d):

$$v = \frac{x_f - x_0}{t_f - t_0} = \frac{2\pi d}{P} \Rightarrow M = \frac{d \cdot (2\pi d)^2}{G \cdot P^2} = \frac{d^3 (2\pi)^2}{G \cdot P^2} \quad (10)$$

aquesta fórmula es troba relacionada amb la tercera llei de Kepler.

Per altra banda, la velocitat depèn de la massa de l'objecte orbitat (com més massiu, més ràpid orbiten els satèl·lits):

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{d}} \quad (11)$$

Cal destacar que per deslligar-se gravitatoriament d'un cos, s'ha de superar la velocitat d'escapament que ve determinada per:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{d}} \quad (12)$$

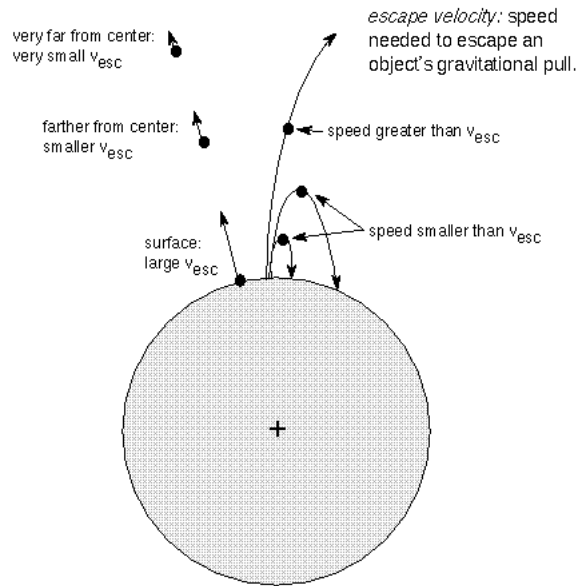


Figura 9: Velocitat d'escapament

1.5 Moment angular

El moment es una mesura de la tendència d'un objecte a moure's a velocitat constant en una trajectòria recta:

$$p = m \cdot v \quad (13)$$

El moment angular mesura la tendència d'un objecte a continuar donant voltes:

$$L = p \cdot d_{from\ center\ orbit} = m \cdot v \cdot d_{from\ center\ orbit} \quad (14)$$

La quantitat total de moment angular d'un sistema es conserva amb el temps, sense importar com els objectes interaccionen entre ells (a excepció d'interaccions externes com l'aportació extra de força gravitatòria d'un objecte alie al sistema). Exemples:

- Segona llei de Kepler: Una línia entre el planeta i l'objecte que orbita, fa un barreig d'àrees equivalents en temps equivalents. Es a dir, el moment angular per a diferents distàncies d durant l'òrbita d'un objecte de massa m es conserva per la variació en la velocitat v .
- Sistema terra - lluna: El moment angular es constant i es troba compost per la rotació dels objectes i la òrbita de la lluna. La rotació de la terra està decreixent i per tant la lluna s'allunya per compensar i equilibrar el moment angular del conjunt.
- Rotació elevada d'estrelles de neutrons: L'estrella decrementa la seva velocitat de rotació perquè produeix radiació degut al seu fort camp gravitatori.
- Disc d'acreixement en un sistema binari: A mesura que el gas s'apropa a l'objecte que l'esta capturant, la velocitat d'aquest s'incrementa.
- Formació d'estrelles: Quan un fragment de núvol molecular col·lapsa, la velocitat de rotació incrementa.

1.6 Relativitat especial

Albert Einstein va establir que les lleis de la física no depenen de la ubicació de l'experimentador o el seu moviment (sempre que sigui uniforme i constant). Dos persones, una en un laboratori fix i un altre en un laboratori en un tren en marxa (velocitat uniforme i constant), no poden efectuar cap experiment que els permeti diferenciar si estan en moviment o fixos.

Per altra banda, la velocitat de la llum és constant ($c = 299.800km/s$) per qualsevol dels anteriors laboratoris (és independent a que l'observador estigui en moviment o no).

La relativitat especial combinada amb altres lleis físiques, prediu:

$$E = m \cdot c^2 \quad (15)$$

1.7 Relativitat general

Einstein defineix la gravetat com el resultat de la distorsió del espai-temps al voltant d'un objecte massiu. La relativitat general prediu:

- La llum que passa aprop d'un objecte massiu ha de doblegar-se significativament (com més massiu, més forta és la distorsió).

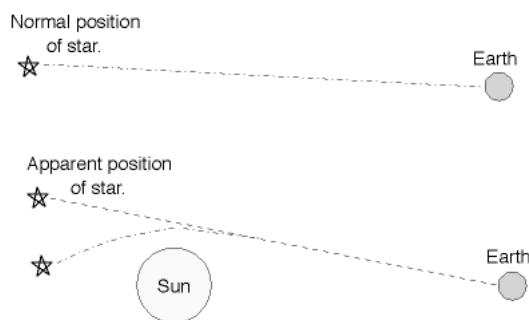


Figura 10: Distorsió de la llum per la gravetat

- Dilatació del temps: El temps és més lent aprop d'objectes massius.
- La llum que escapa d'un objecte massiu perd energia (la longitud d'ona s'incrementa, donat que la velocitat de la llum és constant).
- Els objectes massius en moviment creen oscil·lacions al espai-temps anomenades ones gravitacionals. Aquestes es desplacen a la velocitat de la llum i són molt difícils de detectar.

1.8 Radiació electromagnètica

La velocitat de qualsevol ona/radiació electromagnètica al espai buit és de $c = 299.800km/s$. Les ones es diferencien per la seva freqüència f (nombre de crestes per segon, unitat: Hz) o longitud d'ona λ .

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (16)$$

L'ull humà és sensible a la radiació amb una longitud d'ona de 400 - 800 nanometers (10^{-9} metres) o, l'equivalent 4.000 - 8.000 Angstrom.

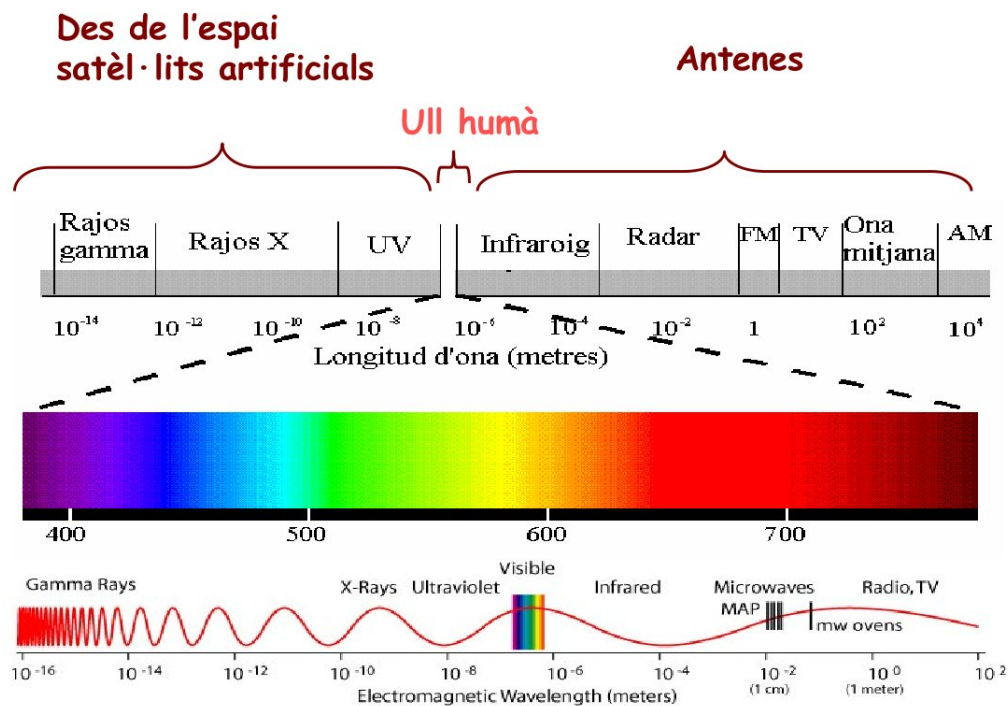


Figura 11: Radiació electromagnètica

L'atmosfera terrestre produeix extinció de la radiació electromagnètica procedent de l'espai exterior:

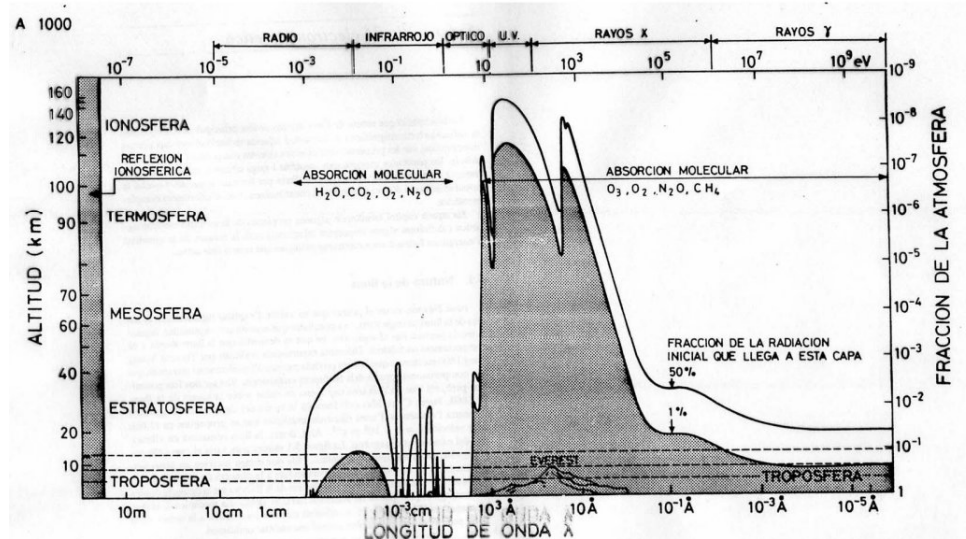


Figura 12: Extinció atmosfèrica

1.8.1 Energia i intensitat

Einstein va descobrir que la llum pot ser tractada com a paquets d'energia anomenats fotons. La llum es comporta com a una ona o una partícula en funció de com és observada.

L'energia de la llum es mesura en Ergs o Joules ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ Joule}$) i esta relacionada a la seva freqüència (o longitud d'ona):

$$E_{\text{light}} = h \cdot f \quad (17)$$

a on f és la freqüència i h la constant de Planck $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$.

Per altra banda, la intensitat de la llum es troba relacionada amb el nombre d'ones o fotons.

1.8.2 Cos negre i llei de Wien

Per tal de decodificar la informació continguda a la llum, es possible fer-la passar per un prisma o una xarxa de difracció per crear el seu espectre:



Figura 13: Espectre

El tipus de llum produït per un objecte depèn de la seva temperatura (mesura del moviment aleatori del grup de partícules). Un cos negre és un objecte que absorbeix tota la llum que li arriba (no reflecteix). Quan s'incrementa la temperatura d'aquest, emet llum de forma molt eficient sense forats:

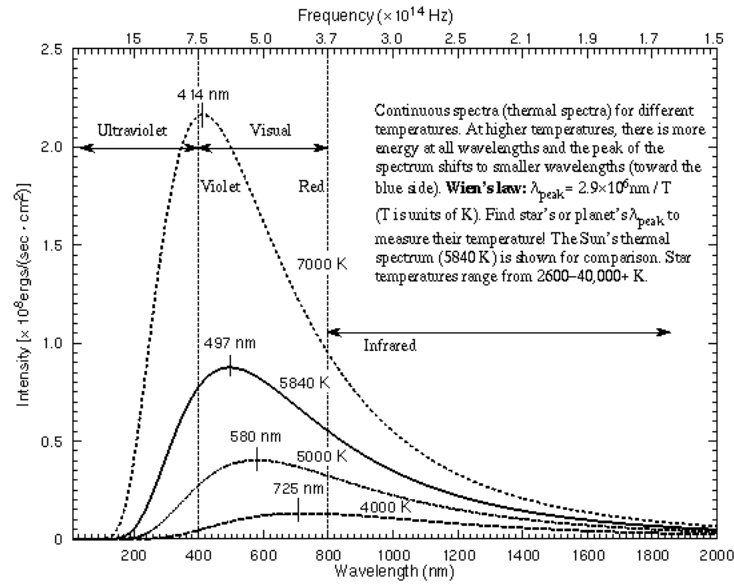


Figura 14: Radiació de cos negre

La llei de Wien relaciona la longitud d'ona (λ) que més contribueix de la llum amb la temperatura de l'objecte que l'emet (T en Kelvin):

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2,9 \cdot 10^6}{T} \quad (18)$$

1.8.3 Llei de Stefan-Boltzmann law

L'energia emesa per segon per àrea d'un metre al quadrat a la superfície de l'objecte:

$$\frac{L}{4\pi r} = \sigma \cdot T^4 \quad (19)$$

a on $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} J/(m^2 K^4 s)$ i r és el radi de l'esfera.

Com es pot observar, un petit canvi a la temperatura produeix un gran canvi en l'energia.

1.8.4 Àtoms i radiació

Niels Bohr va establir que els electrons es poden trobar només a òrbites d'energia de determinat tamany. Si l'electró canvia la seva òrbita llavors s'irradiarà o absorbirà energia.

$$E_{emitted|absorbed} = h \cdot f = E_{orbit1} - E_{orbit2} \quad (20)$$

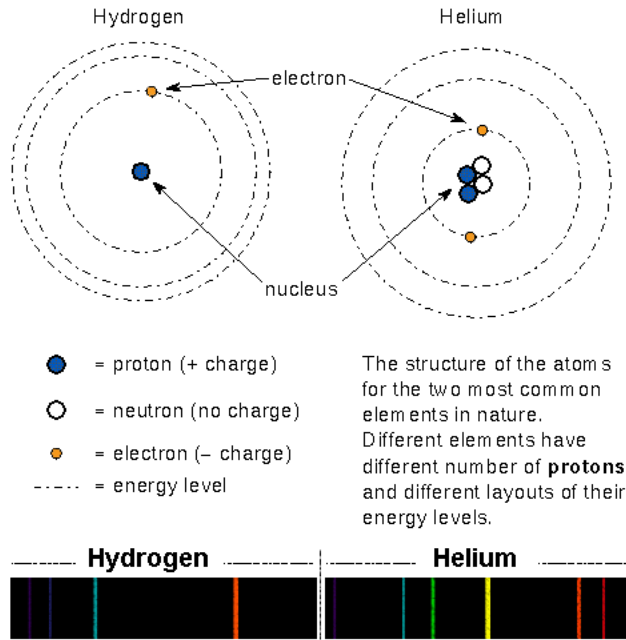


Figura 15: Àtoms i radiació

Tots els àtoms amb el mateix nombre de protons en el nucli són del mateix tipus d'isòtop i tindrà gairebé les mateixes propietats químiques, però es comporten de forma molt diferent en les reaccions nuclears.

Els àtoms que tenen una càrrega extra positiva o negativa són anomenats ions.

1.8.5 Efecte Doppler

Com més ràpid és mou un objecte, major és la modificació aparent de la longitud d'ona (efecte Doppler):

$$\Delta\lambda = \lambda_{rest} \cdot \frac{v_{radial}}{c} \quad (21)$$

a on v_{radial} és la velocitat de l'objecte a la línia de visió.

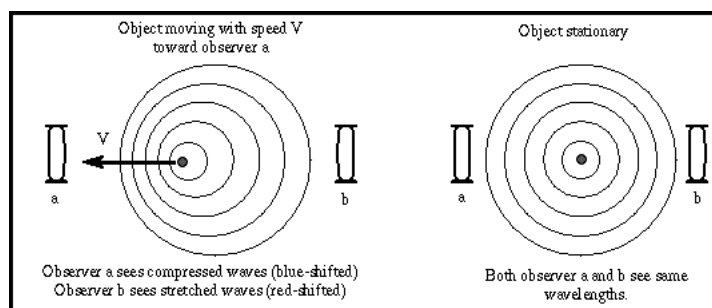


Figura 16: Efecte Doppler

1.9 Datació radiomètrica

La datació radiomètrica és un sistema de datació que determina l'edat de solidificació, donat que quan el material és líquid o gasos, els isòtops es poden escapar.

Per determinar l'edat d'una roca s'utilitzen els seus àtoms radioactius, coneixent el rati de decaïment i la regla: el nombre d'isòtops pare (p.ex. Urani-238) + el nombre d'isòtop fills (p.ex. Lead-204) = nombre constant durant el temps.

Per altra banda, per determinar l'edat de material viu (p.ex. plantes), llavors es fa ús del carboni 14:

- La majoria del carboni és carboni-12 (99%) o carboni-13 (1%) i existeixen fraccions molt reduïdes del isòtop radioactiu carboni-14.
- El carboni-14 es produeix constantment a la nostra atmosfera quan els rajos còsmics col·lisionen amb les mol·lècules de l'aire. Quan les plantes absorbeixen CO_2 al procés de fotosíntesis, una part del CO_2 conté carboni-14.
- S'assumeix que la composició de l'atmosfera i el flux de rajos còsmics no ha canviat significativament durant els darrers milers d'anys.
- És possible trobar l'edat de l'organisme viu comparant el rati de carboni-14 i carboni-12 amb el rati dels organismes vius actuals.

Aquest mètode només funciona correctament per edats de fins a 50.000 - 60.000 anys i organismes que obtenen carboni de l'aire.

2 Sistema solar

2.1 Planetes

Es defineix planeta al nostre sistema solar com un cos celeste que:

1. Orbita el sol.
2. Té suficient massa com per a que la seva autogravetat produeixi una forma gairebé esfèrica.
3. Disposa d'una òrbita neta d'altres objectes.

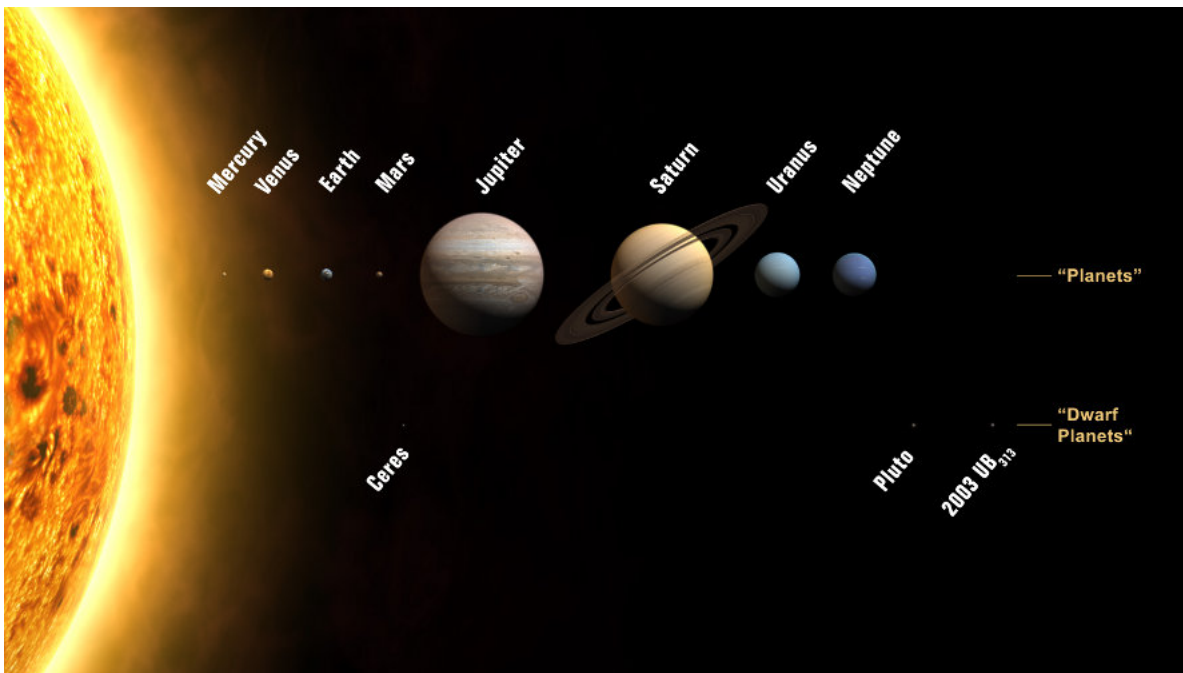
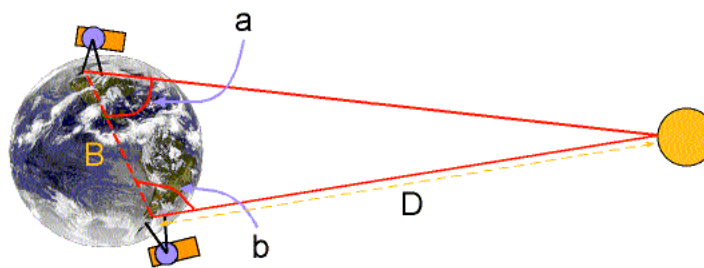


Figura 17: Planetes del sistema solar

Al sistema solar tenim com a planetes terrestres a Mercuri, Venus, la Terra i Mars. La resta, Júpiter, Saturn, Urà i Neptú són gasosos.

2.1.1 Distància al sol

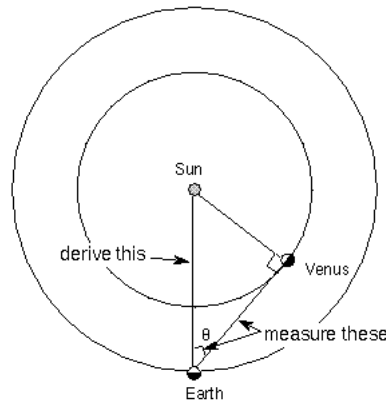
La distància al sol pot ser mesurada per paral·laxis:



Triangulation gives the distance: measure angles (a & b) and distance (B) between the observation points. Derive the distance (D) to the nearby object.

Figura 18: Distància al sol per paral·laxis

Per altra banda, també es possible mesurar la distància utilitzant un radar apuntant a Venus, mitjançant el qual obtindrem la distància d'aquest quan la senyal reboti ($d = c \cdot \frac{\text{temps}_{\text{total}}}{2}$), i fer ús de la trigonometria:



Measuring the angle θ between Venus and the Sun and the distance between Earth and Venus enables us to find the distance between the Earth and the Sun using trigonometry.

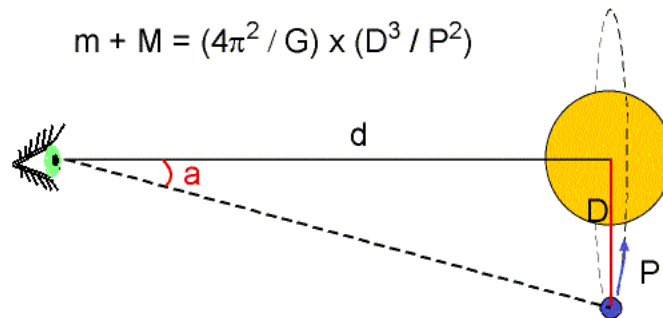
Figura 19: Distància al sol utilitzant Venus

És defineix com Unitat Astronòmica la distància al sol, que són 149.597.892km.

Respecte a la resta de planetes, és possible determinar la seva distància a partir de la distància al sol i la trigonometria.

2.1.2 Massa

Per tal de determinar la massa d'un planeta (o altre tipus d'objecte) es pot utilitzar la distància al planeta, un satèl·lit i el seu període i distància relativa: $m + M = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{D^3}{P^2} \simeq M$



Measure: angular distance (a) and orbital period (P).
Derive: orbit size (D) from known distance (d) and angle (a), then the planet mass from Kepler's 3rd law.

Figura 20: Massa d'un objecte

La massa del satèl·lit pot ser ignorada perquè habitualment és molt més petita que la massa de l'objecte que orbita.

2.1.3 Tamany

El tamany d'un planeta pot ser determinat a partir de la mesura del seu tamany angular i la distància: $Diameter = 2\pi \cdot d_{to\ planet} \cdot \frac{Angular\ size}{360^\circ}$

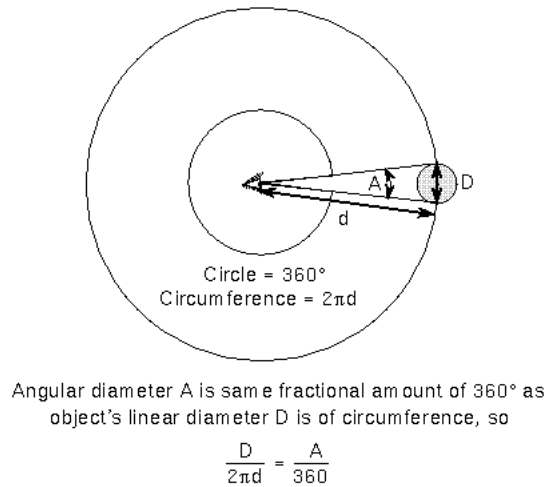


Figura 21: Tamany a partir del tamany angular i distància

Per altra banda, per objecte llunyans amb satèl·lits que es creuen just a la nostra línia de visió, llavors es pot mesurar la variació de la llum emesa (o reflectida, p.ex. per Plutó i Charon): $Diameter = v \cdot t$

2.1.4 Volum

Considerant els planetes com esferes perfectes aproximades, el volum es pot determinar a partir de la relació:

$$volume = \frac{\pi}{6} \cdot diameter^3 \quad (22)$$

2.1.5 Densitat

La densitat ve determinada per:

$$density = \frac{mass}{volume} \quad (23)$$

La densitat de l'aigua és de $density_{water} = 1gr/cm^3 = 1.000kg/m^3$, respecte a aquesta, els planetes terrestres tenen una densitat d'unes 4-5 vegades la de l'aigua. En canvi els planetes jovians tenen densitats 0.7-1.7 vegades la de l'aigua.

2.1.6 Atmosfera

Tots els planetes inicien les seves vides amb atmòsferes d'hidrogen i heli. No obstant, els planetes més propers al sol (mercuri, venus, la terra i mars) van perdre la seva atmosfera original. Les atmosferes actuals s'han format a partir del gas alliberat del seu interior, tot i que mercuri i mars han perdut de nou gairebé tota la seva segona atmosfera.

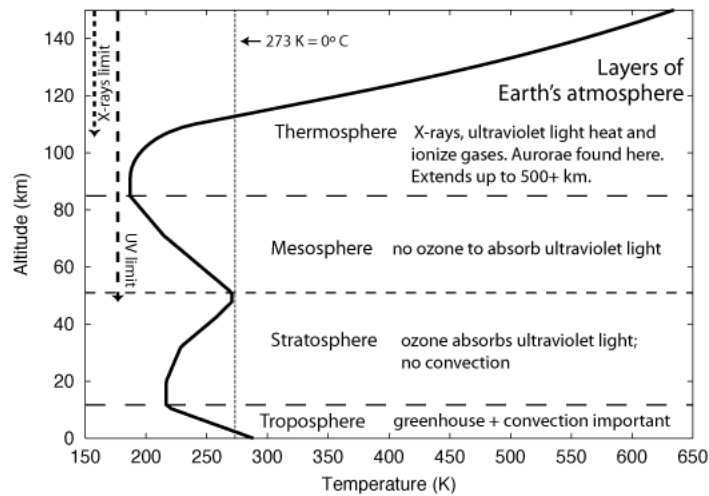


Figura 22: Atmosfera terrestres

Per tal de conserva l'atmosfera, la temperatura ha de ser prou baixa com per a fer que les molècules no superin la velocitat d'escapament:

$$v_{\text{escape}} = \sqrt{2 \cdot G \cdot \frac{\text{planet mass}}{\text{distance from center}}} \quad (24)$$

La velocitat d'una partícula relacionada amb la seva temperatura es pot obtenir mitjançant:

$$\text{Temperature} = m_{\text{gas particle}} \cdot \frac{(v_{\text{average gas particle}})^2}{3\sigma} \Rightarrow v_{\text{average gas particle}} = \sqrt{3\sigma \cdot \frac{\text{Temperature}}{m_{\text{gas particle}}}} \quad (25)$$

a on σ és la constant de Boltzmann.

Com més massiva és la molècula del gas, més lenta serà la seva velocitat. Per tant, la composició de l'atmosfera està fortament condicionada per aquest fet.

Com a regla general es considera que la velocitat mitja d'una molècula per un tipus de gas és inferior a $0.2 \cdot v_{\text{escape}}$, llavor més del $\frac{1}{2}$ d'aquest gas s'haurà perdut 1.000 milions d'anys més tard.

Un gas es veu determinat per:

- Pressió: Força exercida a la superfície per unitat d'àrea (Newtons per m^2). Unitats: Pascal i Bar ($1\text{Bar} = 100\text{kilopascals}$).
 - Llei dels gasos ideals: doblar la temperatura o la densitat comporta doblar la pressió.
 - Principi d'Arquimedes: A la mateixa pressió, menys els objectes o regions amb menys densitat flotaran (convecció).
 - Equilibri hidrostàtic: El gas de l'atmosfera no es perdrà quan la pressió tèrmica estigui en equilibri amb la compressió gravitatòria.
- Temperatura: La temperatura a la superfície es troba determinada per tres factors principals.
 - Distància al sol
 - Reflectivitat de la superfície (albedo): més reflectivitat (albedo proper a 1) comporta una temperatura més freda.

– Atmosfera (efecte hivernacle)

- Densitat: nombre de partícules per volum

L'energia radiada per un planeta equival al rati d'energia absorbida per assolir la temperatura:

$$4\pi R^2 \sigma T^4 = \pi R^2 L_{\odot} \frac{(1-a)}{4\pi d^2} \quad (26)$$

a on R és el radi del planeta, T la temperatura, σ la constant de Boltzman, L_{\odot} la lluminositat del sol i a l'albedo.

L'energia en un gas es pot transferir per tres vies:

Radiació: Els àtoms emeten fotons (paquets d'energia) que són capturats per altres àtoms distanciat.

Conducció: Àtoms a altes velocitats xoquen amb altres, “contagiant” el moviment. Aquest és el mecanisme habitual utilitzat per elements com el cobre o l'alumini en estat sòlid. No obstant, per un gas és un mecanisme molt ineficient degut a la separació de les partícules.

Convecció: L'aire calent s'expandeix i decreix la seva densitat, per tant segons el principi d'Arquímedes s'eleva. L'aire més fred i dens, cau per ocupar el lloc del més calent.

2.1.7 Camp magnètic

Alguns planetes tenen camp magnètic (mars és un exemple dels que no). No té perquè estar alineat amb l'eix de rotació, per exemple la terra el té desplaçat uns 18° .

Les línies de camp magnètic són línies imaginàries utilitzades per descriure la direcció en la que es mouen les partícules carregades

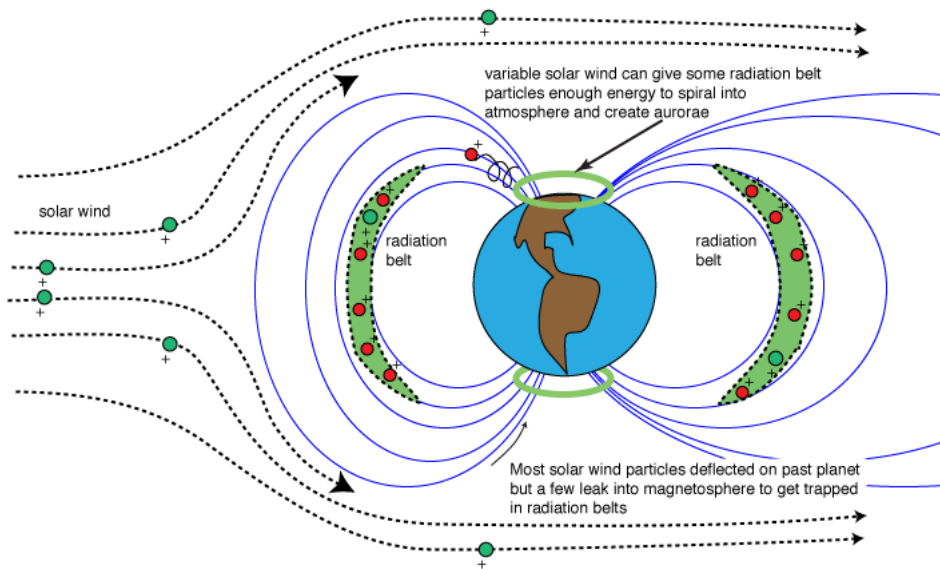


Figura 23: Camp magnètic terrestre

Els camps magnètics poden ser produïts per càrregues elèctriques en moviment (p.ex. electrons lliures a metalls condensats i líquids). Per aquest motiu, com més ràpid gira un planeta, més fort és el seu camp magnètic.

2.1.8 Interior dels planetes

L'estudi de l'interior dels planetes es pot realitzar a partir de:

- La forma del planeta
- Comparació entre la densitat total i la densitat a la superfície
- Presència de camps magnètics
- Observació de com viatgen les ones sísmiques al seu interior

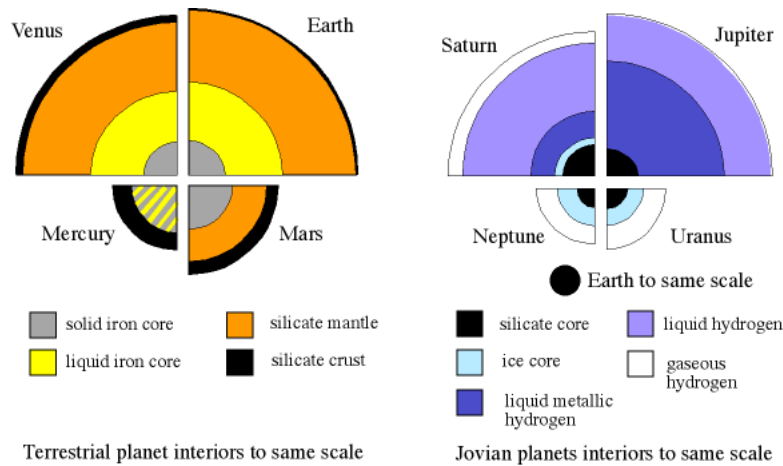


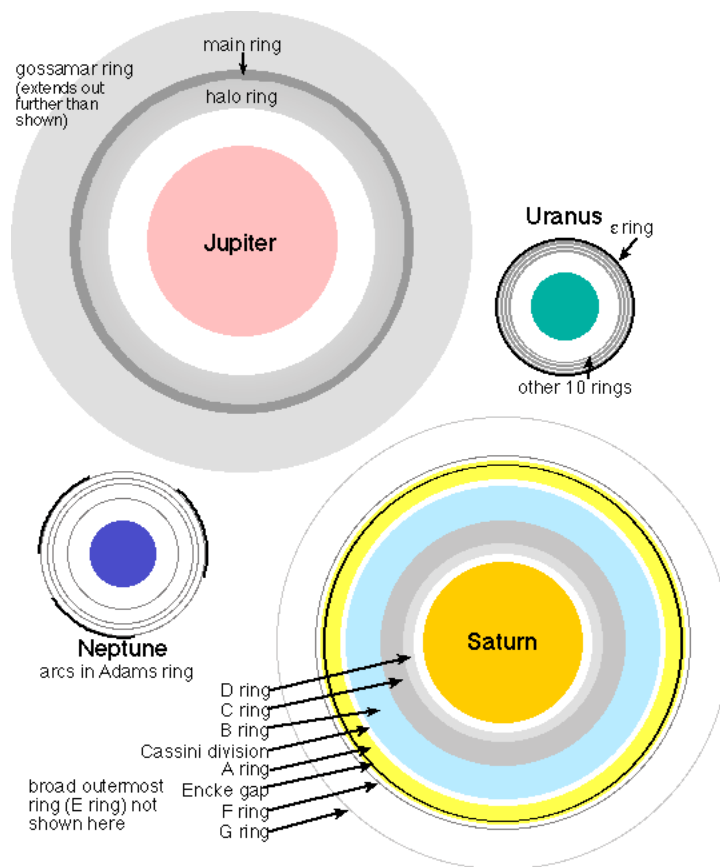
Figura 24: Interior dels planetes

2.1.9 Superfície

Tots els objectes amb una superfície terrestre tenen impactes de cràters. Aquells que tenen menys vulcanisme, erosions o activitat tectònica retenen durant més temps els impactes.

2.1.10 Anells

Tots els planetes jovians tenen sistema d'anells, tot i que els de Saturn són els més espectaculars visualment:



Rings of the jovian planets shown to the same scale

Figura 25: Anells dels planetes jovians

Els anells estan formats per petites partícules i s'especula si són una característica temporal o constant durant el temps.

2.1.11 Llunes

Un satèl·lit natural o lluna es un objecte celeste que orbita un planeta o un objecte de menor tamany que és anomenat primari.

La lluna terrestre és un quart del diàmetre de la terra, comparativament amb la resta de llunes es significativament gran respecte al seu primari. Disposa d'àrees extenses fosques que cobreixen el 17% de la superfície i que són anomenades mare (produïts per fluxos de lava).

No disposa d'aigua en estat líquid perquè no té atmosfera, no obstant sí que existeixen blocs de gel aprop dels pols.

La superfície de la lluna es tan antiga com la terra, però a diferència d'aquesta no ha patit erosió per culpa de la falta d'aigua en estat líquid, atmosfera i activitat geològica.

La teoria de l'impacte gegant proposa que 50 milions d'anys després de la formació de la terra, un objecte del tamany de mars va impactar amb la terra i el mantell es va fondre i destruir. Part d'aquest va quedar atrapat al voltant de la terra, formant al final la lluna.

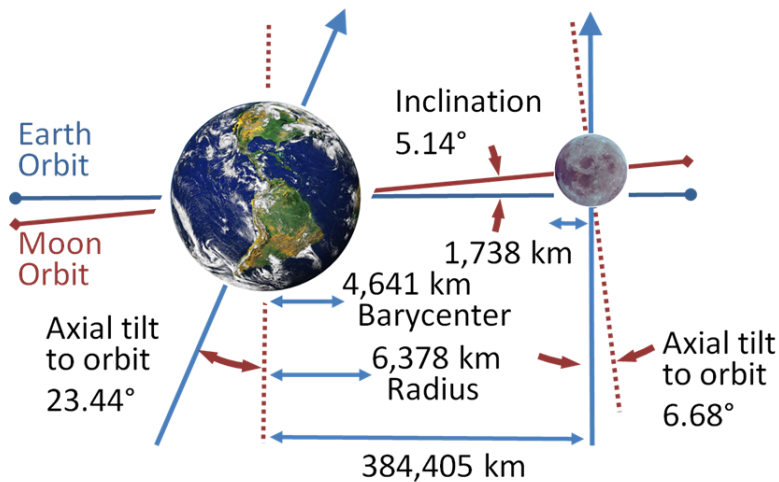


Figura 26: Òrbita de la lluna

La lluna realitza una òrbita completa al voltant de la terra cada 27,3 dies. No obstant, com la terra es mou al voltant del sol, la lluna triga 29,5 dies en mostrar la mateixa fase.

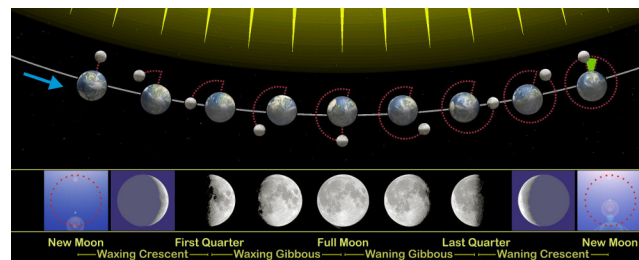


Figura 27: Fases lunars

La distància a la lluna es veu incrementada per 38 mm anuals, en conseqüència el dia terrestre s'allarga 15 microsegons cada any. Aquest fet continuarà fins que la rotació de la terra s'hagi decrescut per encaixar amb el període de la lluna (sempre estarà a la mateixa posició). No obstant, abans de que passi això el sol ja s'haurà convertit en un gegant vermell envoltant a la terra.

A més de la lluna terrestre, existeixen altres com les 4 més grans de Júpiter (descobertes per Galileu):



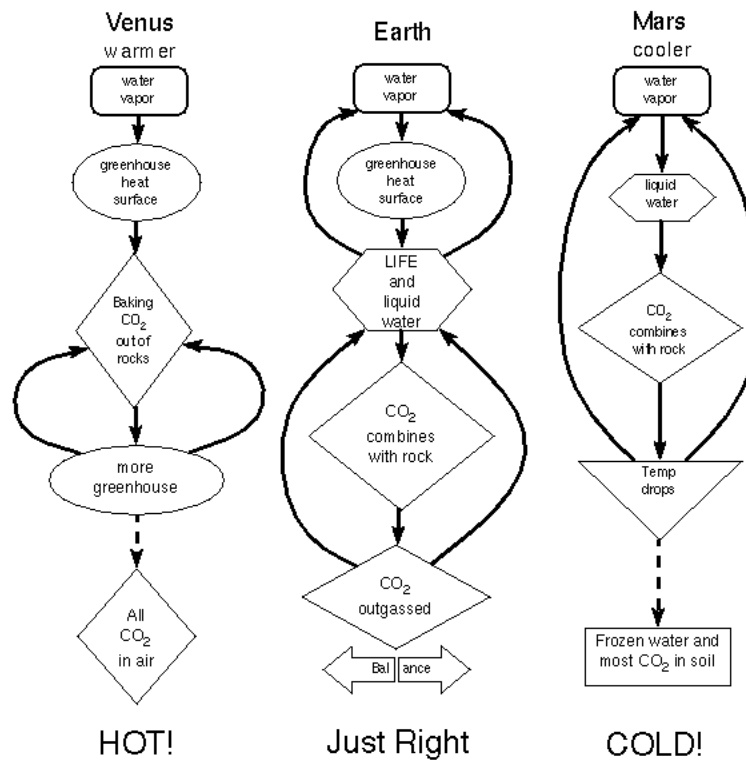
Saturno (Titan) i Neptú (Triton) també en tenen:



No obstant, no són els únics satèl·lits, existeixen altres de tamany més reduït:

	N.Satèl·lits
Júpiter	>60
Saturn	>60
Urà	>30
Neptú	>10
Terra	1
Mart	2

2.1.12 Comparativa terra - venus -mart



Venus has runaway greenhouse effect and no water left. Earth has life and liquid water keeping temperature balanced and most of its CO₂ in the rocks. Mars has runaway refrigerator with water frozen in permafrost layer and most of its CO₂ in the rocks or frozen on the surface.

Figura 28: Comparativa terra-venus-mart

2.2 Asteroides

Existeixen milions de roques petites que orbiten el sol, la majoria d'elles entre Mart i Júpiter (anomenades Trojans):

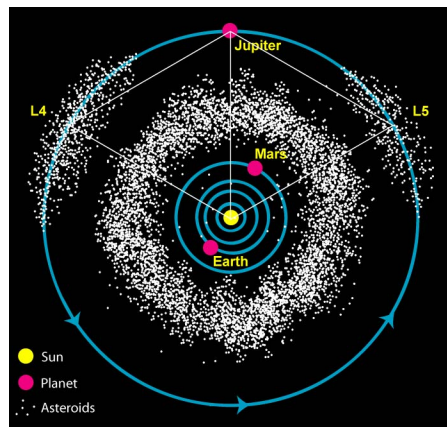


Figura 29: Cinturó d'asteroides

Aquelles de tamany inferior a 300 km tenen formes irregulars donat que la seva gravetat no és suficientment forta com per comprimir la roca en forma esfèrica. L'asteroide més gran és Ceres amb un diàmetre de 1.000 km.

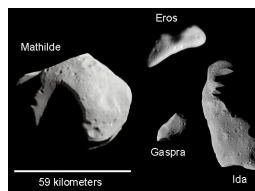


Figura 30: Asteroides

Els asteroides son peces que haguessin format un planeta si la forta gravetat de Júpiter no els hagués distribuït. Tot i que hi ha milions d'asteroides, el volum d'espai és molt gran i existeix molt espai entre ells.

La terra ha tingut una gran quantitat d'impactes d'asteroides al passat. Es creu que un dels més importants va contribuir a la ràpida desaparició dels dinosaures 65 milions d'anys enrere.

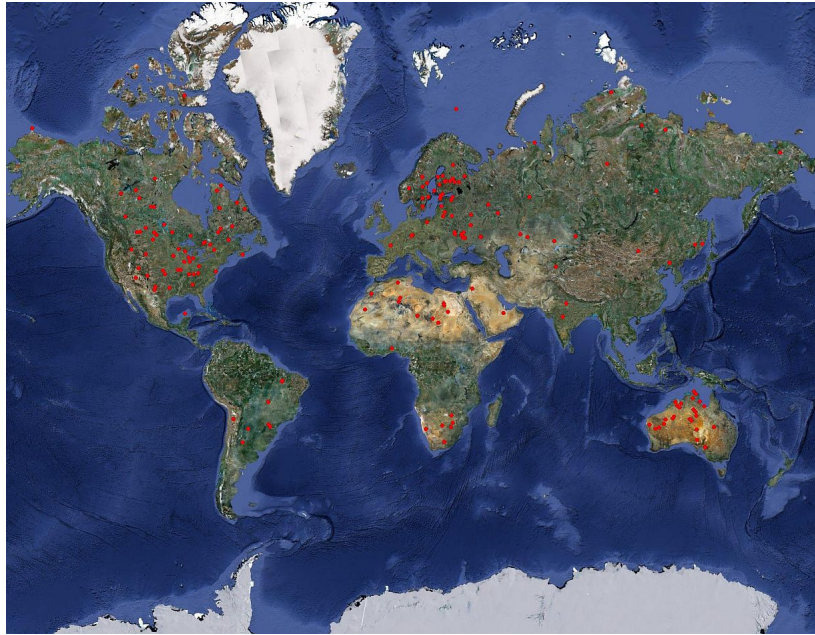


Figura 31: Impactes coneguts d'asteroides

2.3 Meteorits

Els meteors (estrelles fugaces) són peces de roca resplendeixen per la fricció amb l'atmosfera a velocitats de 20-40 km/s. La majoria dels meteors que es poden veure són en realitat del tamany d'un gra de sorra i es cremen a altituds per sobre dels 50 km.

Per altra banda, els meteorits són petites peces de roca que arriben a la superfície. Alguns meteorits tenen molècules orgàniques anomenades aminoàcids, els quals poden formar proteïnes utilitzades als processos biològics de la vida. Existeixen possibilitats de que els meteorits fossin les llavors de la vida a la terra.

Addicionalment, aquests meteorits poden haver aprovisionat als planetes terrestres amb aigua (en la formació, la major part de l'aigua es va evaporar).

2.4 Cometes

Els cometes són objectes petits i primitius d'uns pocs centenars de metres fins a 20 km. Es troben fets principalment de grans de pols i material volàtil com l'aigua.

Components Of Comets

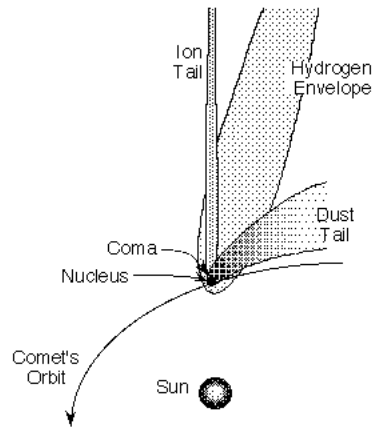


Figura 32: Components d'un cometa

Quan un cometa arriba a l'alçada de Mars, la radiació solar empeny el gas i el pols de la coma (atmosfera que envolta el nucli del cometa) formant dos tipus de cues:

- Cua d'ions: Recta i blavosa. La llum ultravioleta del sol ionitza part del gas a la coma i les partícules carregades (ions) es desplacen a través de les línies de camp magnètic del sol. Aquesta cua sempre apunta en la direcció oposada al sol, encara que el cometa s'allunyi de ell.
- Cua de pols: Corbada i groga-blanca. Es troba formada per el pols expulsat per la col·lisió amb fotons solars.



Figura 33: Cometa Hale-Bopp 1997

Part del vapor d'aigua es expulsa del nucli per la dissociació que produeixen els rajos ultraviolats a l'oxigen i l'hidrogen. L'hidrogen forma una núvol gegant al voltant del cometa que s'estén per milions de km.

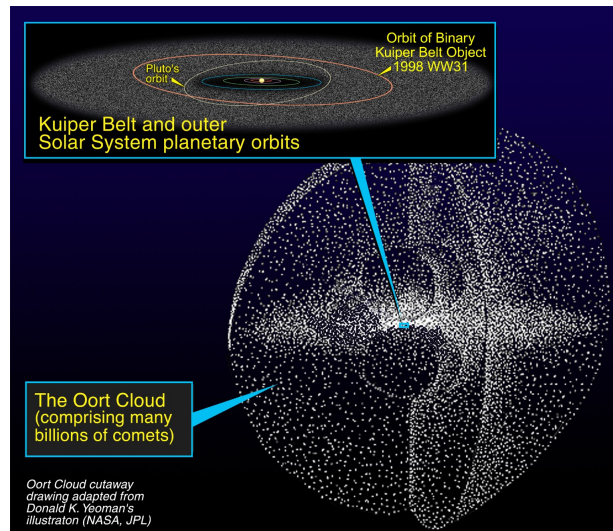


Figura 34: Cinturó de Kuiper i núvol d'Oort

Els cometes poden procedir de dos orígens diferents:

- Cometes de període llarg de milers a milions d'anys. La seva òrbita es troba orientada en tot tipus d'angles aleatoris. Procedeixen habitualment del núvol d'Oort:
 - Núvol esfèric amb un radi de 50.000 - 100.000 A.U. al voltant del sol.
 - Compost per billons de cometes.
 - No ha sigut encara observat directament.
- Cometes de període curt d'uns 200 anys. La seva òrbita es troba orientada a uns 30 graus sobre el pla del sistema solar. Procedeixen habitualment del cinturó de Kuiper:
 - Disc de 30 - 100 A.U.
 - Compost per milions de cometes.
 - Observat per primer cop al 1992.

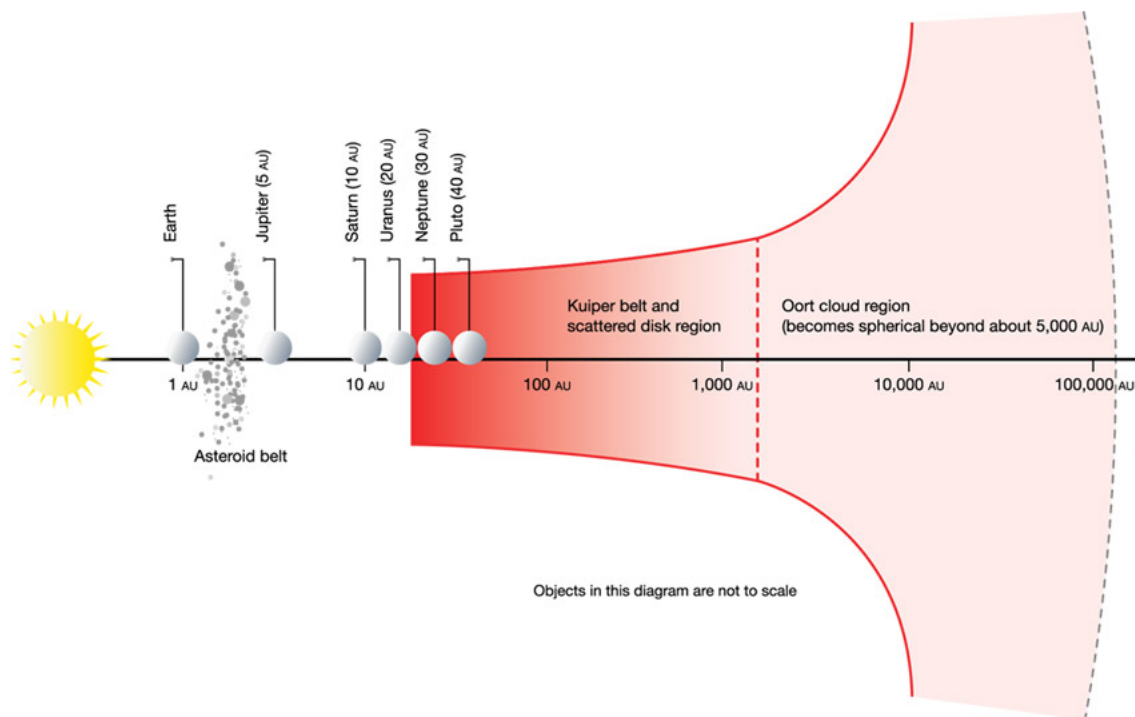


Figura 35: Disc de Kupier i núvol d'Oort. Vista lateral.

La pluja de meteors com les conegudes perseides (mitjans d'agost) tenen lloc quan la terra passa a través de l'òrbita d'un cometa (Swift-Tuttle en aquest cas). Un altre cas conegut són les Leonides (mitjans de novembre) que estan vinculades al cometa Tempel-Tuttle.

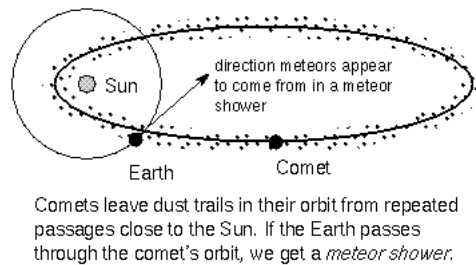


Figura 36: Pluja de meteors

2.5 Formació del sistema solar

La datació radiomètrica dels meteorits donen lloc a determinar que el sistema solar es va formar fa 4.600 milions d'anys.

Algunes de les característiques fonamentals del nostre sistema solar que ha d'incloure qualsevol teoria de la formació són:

- Tots els planetes orbiten gairebé al mateix pla.
- L'equador rotacional del sol es troba en aquest pla.
- Les òrbites dels planetes són el·líptiques però gairebé circulars.
- Els planetes giren d'oest a est.
- Els planetes tenen composicions diferents i depèn en gran mesura de la distància al sol. Els propers són més densos i rics en metalls, mentre que els llunyans són rics en hidrogen.
- Els meteorits tenen propietats químiques i geològiques diferents als planetes i llunes.
- El planetes roten d'oest a est (excepte Venus) al igual que el sol. La inclinació de l'eix de rotació (obliqüetat) es petita, a excepció d'Urà i Venus.
- La distància dels planetes al sol (en unitats astronòmiques) compleix, sense cap justificació teòrica, la llei de Bode (a excepció de Neptú): $distància = \frac{n+4}{10}$ a on $n = 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96...$
- Existència de planetes amb satèl·lits, cinturó de Kuiper i núvol d'Oort.
- Els planetes contenen el 90% del moment angular però el sol té el 99% de la massa del sistema solar.

El model que millor explica la formació del sistema solar és el model de condensació:

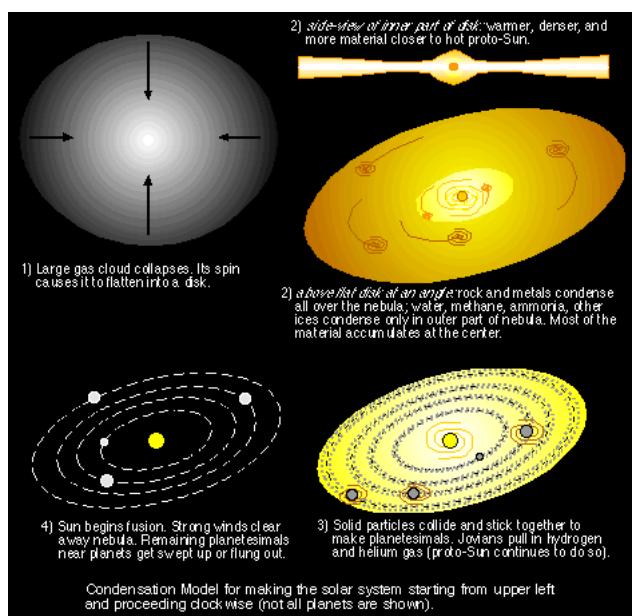


Figura 37: Formació del sistema solar

El sistema solar es va formar a partir d'un gran núvol de gas amb motes de pols. El colapse del núvol sota la seva pròpia gravetat va formar el sol i els planetes. No obstant, tot i que el model de condensació explica el sistema solar en el seu estat actual, seria necessari contrastar-ho amb altres sistemes.

3 Exoplanetes

Centenars de planetes han sigut descoberts orbitant estrelles. El seu descobriment ha sigut possible utilitzant els següents mètodes:

- Estudi en la banda de l'infraroig: l'espectre termal dels planetes tenen la màxima emissió a la banda de l'infraroig. Per altra banda, les estrelles produeixen menys energia a l'infraroig que a la banda visible.
- Tècniques astromètriques: observació dels efectes gravitacionals dels planetes a les estrelles que orbiten (rotació al voltant del centre de masses).
- Tècnica de l'efecte Doppler o velocitat radial: Com una tècnica astromètrica, és possible detectar efectes gravitacionals a les estrelles estudiant l'espectre de l'estrella i els petits desplaçaments al vermell de les línies d'emissió (apropant-se o allunyant-se).
- Tècnica del trànsit: si l'òrbita del planeta es troba alineada amb la nostra línia de visió, quant transita per davant de l'estrella és possible estudiar els canvis a la llum.
 - Addicionalment, amb aquesta tècnica també es poden determinar el diàmetre de l'estrella i el planeta, així com l'atmosfera utilitzant l'espectrografia.
- Tècnica de microlensing: Quan una estrella passa pel davant d'una estrella mes distant, la llum d'aquesta segona es veu doblegada per la gravetat produint diverses imatges de l'estrella distant. Si l'estrella propera té un sistema planetari amb un planeta a la posició correcta, aquest efecte es veu doblat amb un altre microlens per petits instants i superimposat al microlens original.
 - La massa i òrbita del planeta pot ser determinada a partir de mesures exhaustives de les desviacions observades.

4 Estrelles

4.1 Distància

La paral·laxis trigonomètrica és utilitzat en la mesura de distància d'estrelles properes.

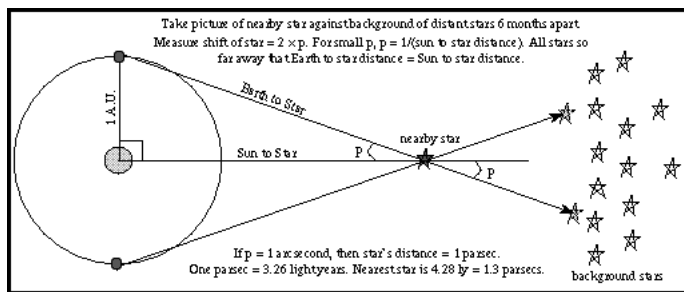


Figura 38: Paral·laxis

La paral·laxis (arcsec) des de la terra correspon a l'invers de la distància en parsecs:

$$p = \frac{1}{d} \quad (27)$$

Un parsec es la distància a l'estrella quan la paral·laxis és d'un segon d'arc utilitzant com a línia base una unitat astronòmica (1 parsec = 206.265 unitats astronòmiques = 3,26 anys llum).

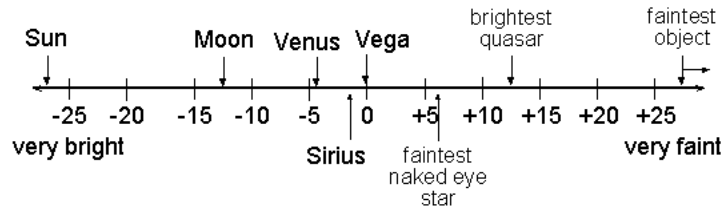
Per distàncies més llunyanes a on no es possible mesurar la paral·laxis, és pot calcular la distància a partir de la llei de l'invers al quadrat per a la brillantor de l'estrella:

$$\text{Brightness at } A = \text{Brightness at Star Surface} \cdot \left(\frac{\text{Radius}}{\text{Distance } A} \right)^2 \quad (28)$$

4.2 Magnitud

El sistema original de magnitud estava basat en com de brillant semblava ser una estrella a ull nu. Al segle XIX els astrònoms van establir que una diferència de 5 magnituds correspon a un factor de 100 vegades en intensitat. Objectes més lluminosos tenen magnituds més petites.

La brillantor aparent d'una magnitud observada des de la terra s'anomena magnitud:



Apparent brightnesses of some objects in the magnitude system.

Figura 39: Magnitud aparent

Si l'estrella es troba a 10 parsecs de distància de nosaltres, llavors la magnitud aparent seria igual a la seva magnitud absoluta.

Per altra banda, la lluminositat és l'energia total radiada per una estrella per segon, que en el cas de les estrelles acostuma a situar-se en el rang $0,0001L_{\odot} \lesssim L_{\star} \lesssim 10^6 L_{\odot}$. Existeix una classificació de tipus d'estrelles en funció de la seva lluminositat:

Classe	Descripció
0	Hipergegant
Ia	Supergegant molt lluminosa
Ib	Supergegant de menor lluminositat
II	Gegant lluminosa
III	Gegant
IV	Subgegant
V	Estrella de la seqüència principal
VI	Subenanes
VII	Enanes

En general, les propietats d'una estrella poden ser utilitzades per deduir altres paràmetres mitjançant les relacions matemàtiques:

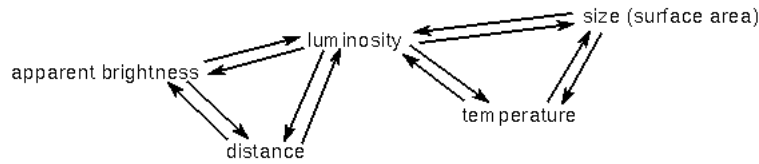


Figura 40: Relació entre les propietats d'una estrella

- Triangle esquerra:

- Utilitzant el flux com brillantor aparent:

$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

- O utilitzant la magnitud aparent m com brillantor aparent comparada a la lluminositat i la magnitud absoluta del sol M :

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

$$M = -2,5 \log_{10} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) + M_{\odot}$$

- Triangle dret:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

4.3 Color i temperatura

Les estrelles són boles denses de gas calent i el seu espectre és similar al de un radiador tèrmic perfecte, el qual produeix un espectre continu sense forats.

El color de les estrelles depèn de la seva temperatura, estrelles calentes són més blavoses i les més fredes són vermelles.

Els filtres utilitzats per a l'observació permeten acotar els rangs de longituds d'ones que es volen capturar. Mitjançant l'observació de dos rangs (o bandes) diferents, es pot determinar si es tracta d'una estrella calent o freda.

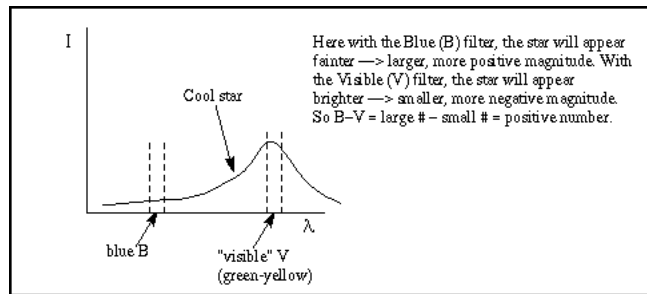


Figura 41: Filtres

Numèricament, el color és la diferència entre magnituds de 2 filtres, realitzant la resta del filtre més vermell (longitud d'ones més grans) al més blavós (longitud d'ones més petites):

$$B_{observat} - V_{obs} = m_B - m_V \text{ o } B_{intrinsec} - V_{int} = M_B - M_V$$

$$U_{obs} - R_{obs} = m_U - m_R \text{ o } U_{int} - R_{int} = M_U - M_R$$

Els objectes vermellors tendeixen a tenir un color positiu donat que les magnituds més petites (o negatives) representen que són més fortes.

Un llistat de filtres habituals:

Lletra	Descripció
U	Ultravioleta
Visible	
B	Blau
V	Visual
G	Verd
R	Roig
Infraroig proper	
I	Infraroig
Z, Y, J, H, K, L	Altres
Infraroig mitja	
M, N, Q	Altres

Una altra forma de mesurar la temperatura d'una estrella és fer us de la llei de Wien (veure secció 1.8.2 a la pàgina 13):

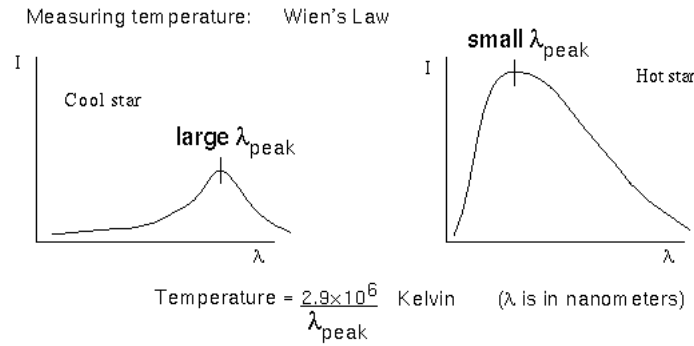


Figura 42: Llei de Wien

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T} \quad (29)$$

a on b és la constant de Wien $b = 2,8977685 \cdot 10^{-3} mK$

I per obtenir la freqüència:

$$\nu_{\text{max}} = (5,879 \cdot 10^{-3} Hz/K) \cdot T \quad (30)$$

4.4 Composició

A partir de les línies d'absorció i emissió, així com la seva fortalesa, es pot determinar molta informació relacionada amb la composició de les estrelles.

un fotó amb una energia determinada (freqüència) pot absorbir-lo, modificant l'estat d'algun dels seus electrons mitjançant el canvi d'òrbita (p.ex. pujant 2 òrbites)². Amb el temps els electrons tendeixen a voler estar a l'estat

²L'àtom queda en estat d'excitació

fonamental (òrbita més propera al nucli) i emeten energia en forma de fotons (p.ex. pot emetre 2 fotos de freqüències diferents al inicial i amb una direcció aleatòria) fins que hi arriben.

Orbita (n)	Energia
1	0 eV
2	10,19 eV
3	12,73 eV
...	...

La longitud d'ona del foto absorbit o emès es troba relacionat amb el canvi d'òrbita de l'electró (n_{in}, n_{out}):

$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n_{in}^2} - \frac{1}{n_{out}^2} \right)$ a on R és la constant de rydberg (que depèn de cada element), n_{in} és l'òrbita destí i n_{out} l'òrbita origen

Segons l'òrbita destí de l'electró, el conjunt de línies que produeixen es classifiquen en series:

Orbita destí (n_{in})	Serie	Banda	$n_{out} = n_{in} + 1$	$n_{out} = n_{in} + 2$	$n_{out} = n_{in} + 3$
1	Lyman	UV	L_{α}	L_{β}	L_{γ}
2	Balmer	V	H_{α}	H_{β}	H_{γ}
3	Paschen	IR	P_{α}	P_{β}	P_{γ}

Si l'àtom rep un fotó amb suficient energia, és possible que perdi l'electró quedant ionitzat. Nomenclatura utilitzada:

Element	Símbol	
Hidrogen neutre	H	H I
Hidrogen ionitzat	H^{+}	H II
Calci ionitzat	Ca^{++}	H III
Ferro ionitzat	Fe^{23+}	Fe XXIV

Els números romans equivalen al nombre d'electrons perduts menys un.

Les línies d'emissió i absorció són diferents segons el tipus d'elements donat que cadascun absorbeix/emet fotons amb unes quantitats d'energia determinades. D'aquesta forma podem determinar la composició d'allò que estem observant:

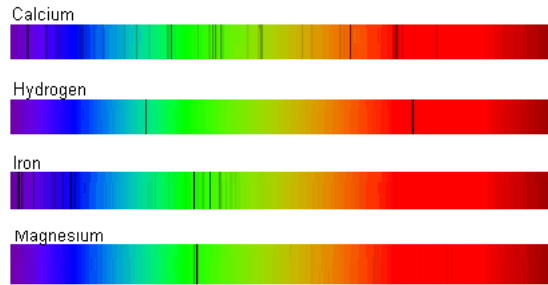


Figura 43: Línies d'emissió d'elements

4.5 Velocitat

L'efecte Doppler prové amb la velocitat a la línia de visió (velocitat radial) a partir de l'anàlisi de l'espectre. El desplaçament al vermell significa que s'allunya, mentre que al blau s'apropa.

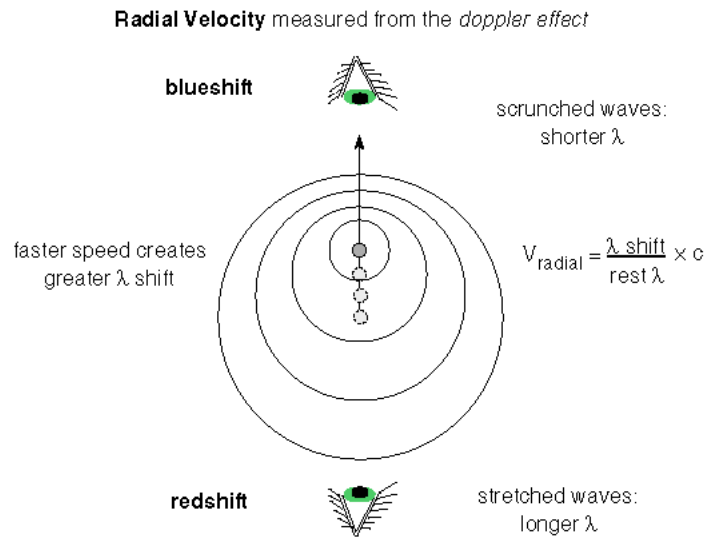


Figura 44: Efecte Doppler i velocitat radial

Per altra banda, la velocitat tangencial és aquella que és perpendicular a la línia de visió:

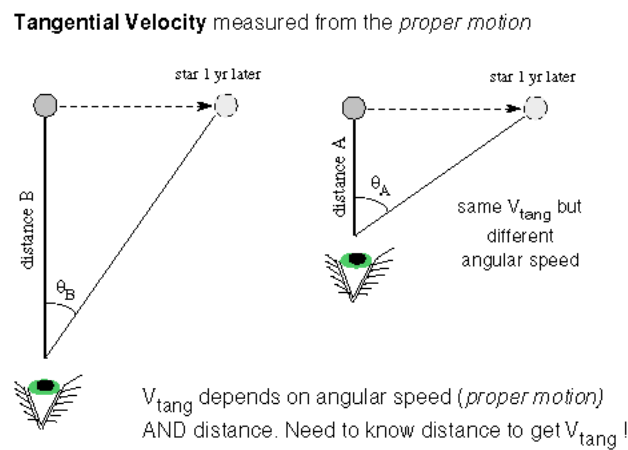
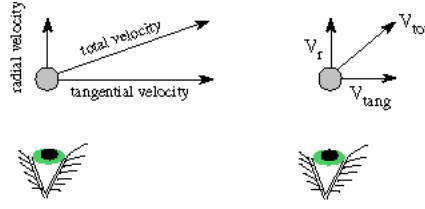


Figura 45: Velocitat tangencial

La composició de les dos configura la velocitat total de l'objecte



Two stars with the same **radial velocity** (line-of-sight) but very different **tangential velocities** and, therefore, very different **total velocities**. The radial velocity is measured from the doppler effect. The tangential velocity is derived from the angular speed and star's distance.

Figura 46: Velocitat total

Composició de la velocitat total:

- Velocitat radial:

$$v_{radial} = c \cdot \frac{\lambda_{moving} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} \quad (31)$$

a on c és la velocitat de la llum

- La velocitat angular o moviment propi d'una estrella a través del cel

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (32)$$

- La distància (p.ex. obtinguda per paral·laxis): $d = |r|$

- Velocitat tangencial

$$|v_{tangencial}| = \frac{\omega \cdot d}{\sin(\theta)} \quad (33)$$

- Velocitat total

$$v = \sqrt{v_{radial}^2 + |v_{tangencial}|^2} \quad (34)$$

4.6 Massa

Un sistema binari espectroscopi són dos estrelles orbitant un punt comú, les quals es troben tan lluny com per no poder resoldre-les de forma individual. No obstant, la seva naturalesa binaria es observable pels desplaçaments periòdics al vermell/blau de les línies espectrals.

La forma de Newton de la tercera llei de Kepler proporciona la massa combinada de les dos estrelles:

$$m_1 + m_2 = \frac{(d_{separation})^3}{orbital\ period^2} \quad (35)$$

a on la distancia està en A.U. i l el període en anys.

Per altra banda, el centre de masses que orbiten les dues estrelles ve determinat per:

$$m_1 \cdot d_1 = m_2 \cdot d_2 \quad (36)$$

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2 \quad (37)$$

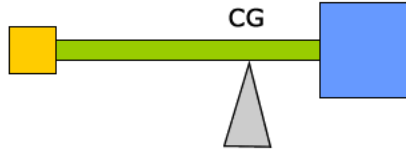


Figura 47: Centre de masses

Considerant que la distància d'una estrella durant un període és $d = v \cdot t$ a on v és la velocitat, $t = P$ és el temps del període i d la distància de la circumferència $d = 2\pi R$, llavors l'estrella:

$$d_1 = v_1 \cdot \frac{t}{2\pi} \quad (38)$$

$$d_2 = v_2 \cdot \frac{t}{2\pi} \quad (39)$$

a on t i v poden ser obtinguts per observació i d_1 és la distància al centre de masses.

Les dos estrelles tindran el mateix període orbital però l'estrella menys massiva tindrà una òrbita més llarga, per tant s'haurà de moure més ràpid per compensar.

4.7 Tamany

Les binaries eclipsant són utilitzades per determinar indirectament el diàmetre de les dues estrelles. Durant un eclipsi total, la brillantor decaurà i la velocitat pot ser mesurada per l'efecte Doppler:

$$speed = \frac{distance}{time} = \frac{diameter}{time\ of\ eclipse} \quad (40)$$

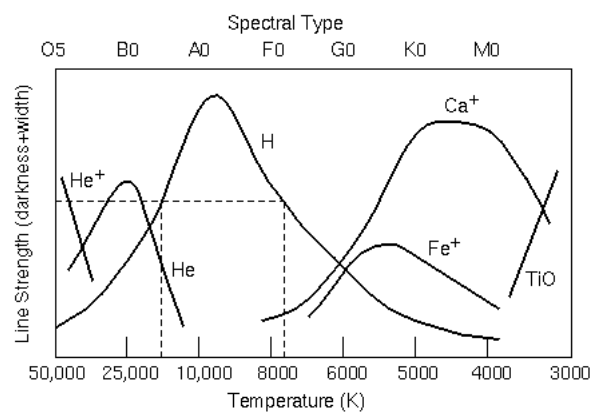
El tamany d'una estrella també es pot obtenir de forma menys acurada si comparem la lluminositat i el flux amb el sol:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \left(\frac{T_{\odot}}{T} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{\odot}}} \quad (41)$$

4.8 Tipus espectral

Mesurar la fortalesa de les línies d'absorció de l'hidrogen és habitualment el primer pas per a determinar la temperatura de l'estrella. La temperatura de la fotosfera determina el patró de línies que s'observen. Línies més fortes no indiquen major temperatura, per exemple:

- Si els àtoms d'hidrogen són escalfats a elevades temperatures, les col·lisions atòmiques poden ionitzar els àtoms.
 - Si no hi ha cap electró lligat al nucli, no es produeixen línies d'absorció d'hidrogen.
- Si la temperatura de l'estrella és baixa, llavors hi ha pocs electrons en el segon nivell d'energia.
 - La majoria dels electrons estan a l'estat base perquè no hi ha moltes col·lisions, les línies d'absorció són fortes quan els electrons estan al segon nivell d'energia.



Cross-referencing different line strengths narrows the possible temperature range. A given strength for the Hydrogen line could mean two possible temperatures (hot or warm). If Helium line is present, then the choice is the hot temperature. If the ionized Calcium line is present (and Helium not present), then the choice is the warm temperature.

Figura 48: Tipus espectral

La força de les línies d'un element determinaran dos possibles temperatures o rangs de temperatures per a una estrella. Però utilitzant les línies de dos o més elements és possible acotar el rang i determinar la temperatura.

La seqüència de tipus espectral és OBAFGKM quan estan ordenats per temperatura. Les estrelles tipus O són les més calents i les M les menys. Cada tipus es troba subdividit en 10 intervals (p.ex. G2 o F5), amb 0 com a més calent, 1 més calent que 0, etc.

Classe	Temperatura	Color intrínsec	M_{\odot}	R_{\odot}	L_{\odot}	Quantitat
O	≥ 33.000 K	Blau	≥ 16	$\geq 6,6$	≥ 30.000	$\sim 0,00003\%$
B	10.000–30.000 K	Blanc blavós	2,1–16	1,8–6,6	25–30.000	0,13%
A	7.500–10.000 K	Blanc	1,4–2,1	1,4–1,8	5–25	0,6%
F	6.000–7.500 K	Blanc grogós	1,04–1,4	1,15–1,4	1,5–5	3%
G	5.200–6.000 K	Groc	0,8–1,04	0,96–1,15	0,6–1,5	7,6%
K	3.700–5.200 K	Taronja	0,45–0,8	0,7–0,96	0,08–0,6	12,1%
M	≤ 3.700 K	Vermell	$\leq 0,45$	$\leq 0,7$	$\leq 0,08$	76,45%

* Mnemotècnica: "Oh Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me"

4.8.1 Diagrames Hertzsprung-Russell

El diagrama HR relaciona la lluminositat o magnitud amb la classificació espectral (vinculada a la temperatura o color):

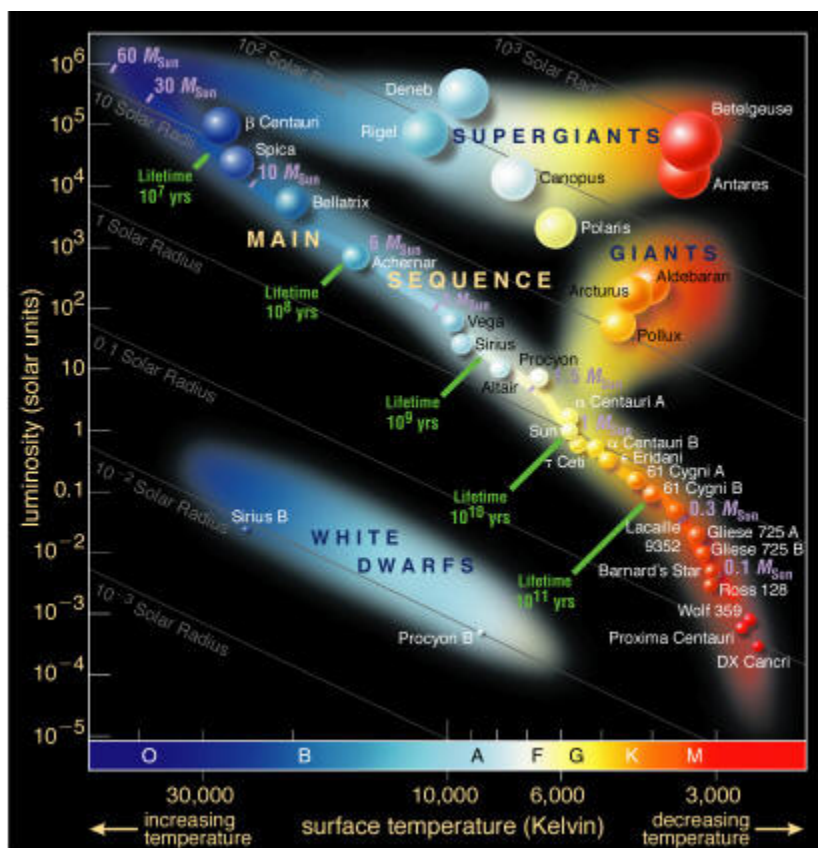


Figura 49: Diagrama HR

Cal destacar que el radi de les estrelles creix en diagonal com denoten les línies de fons del diagrama. El diagrama HR ens permet obtenir a partir de 2 variables la resta de paràmetres d'una estrella.

4.8.2 Paral·laxis espectroscòpica

Utilitzant els diagrames HR és possible obtenir la distància a una estrella mitjançant el tipus espectral. Les passes a seguir serien:

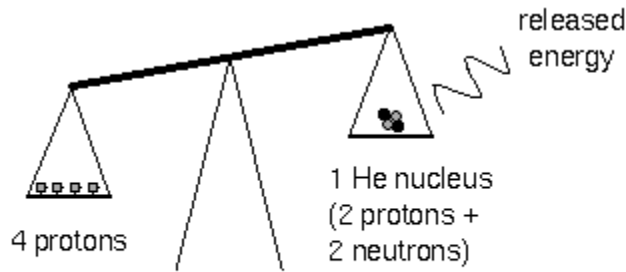
1. Determinar el tipus espectral a partir de l'espectrografia i mesura de la brillantor aparent de l'estrella (flux).
2. Utilitzar un diagrama HR calibrat per obtenir la lluminositat de l'estrella.

3. Obtenció de la distància mitjançant la llei de l'invers al quadrat $distance = distance_{calibrator} \cdot \sqrt{\frac{Brightness_{calibrator}}{Brightness}}$

4.9 Font d'energia

La fissió nuclear produeix energia trencant nuclis com l'urani en nuclis menys massius com l'heli (la bomba atòmica i les centrals nuclear utilitzen aquesta tècnica) i la fusió nuclear produeix energia fusionant nuclis com l'hidrogen per fer nuclis més massius com l'heli (p.ex. bombes d'hidrogen). La font d'energia de les estrelles prové de la fusió nuclear.

Per superar la repulsió dels nuclis carregats positivament, les temperatures per fusionar elements a l'interior d'una estrella ha de ser molt elevades (de l'ordre de 8 milions K com a mínim), així com la seva densitat.



Some mass is converted into energy ($E=mc^2$)

Figura 50: Fusió nuclear i alliberació d'energia

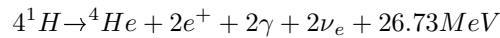
Els processos de fusió es troben controlats gràcies a l'equilibri hidrostàtic: la pressió termal de la calor que empeny cap a fora es compensa amb l'auto-gravetat.

En quant a les fusions, no es formen nuclis d'heli en una simple reacció sinó que s'utilitzen un conjunt de reaccions per acabar formant-lo pas a pas com per exemple:

- Cadenes Protó-Protó
- Cadena CNO (Carboni-Nitrogen-Oxigen)
- Procés triple alfa

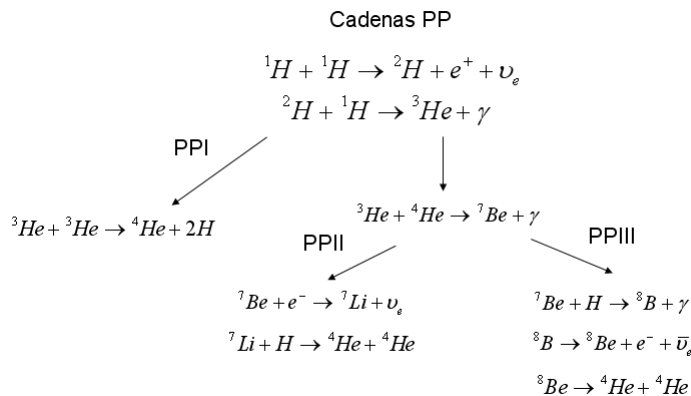
4.9.1 Cadena protó-protó chain

Tota fusió per cadenes PP produeixen nous elements i energia addicional:



A on e^+ és un positró, γ un fotó i ν un neutrí (transporta 0,52MeV).

La fusió no es produeix habitualment amb la fusió simultània de 4 nuclis d'hidrogen, sinó que segueix un procés més gradual:



El sol realitza $9,2 \cdot 10^{37}$ reaccions PP per segon i perd una massa de $6,2 \cdot 10^{11}$ kg per segon. Aquesta serà la seva evolució:

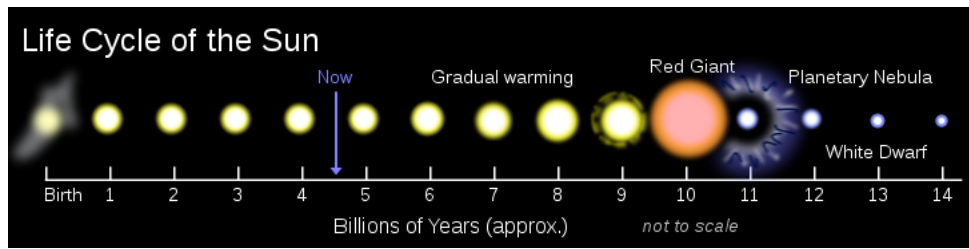
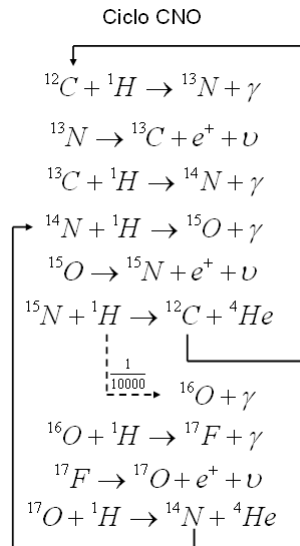
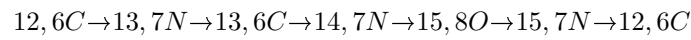


Figura 51: Cicle de vida del sol

4.9.2 Cadena CNO

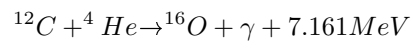
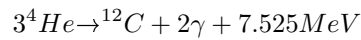
En estrelles més massives que el sol el procés dominant és la reacció CNO:



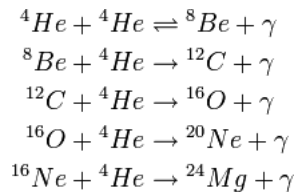
Més enllà del nitrogen i l'oxigen, és molt difícil que es produeixi una nova fusió amb un nucli d'hidrogen o d'heli donat que es tornen molt inestables i tornen de nou a l'estat original.

4.9.3 Procés triple alfa

A les estrelles molt evolucionades, quan es queden sense hidrogen i la temperatura arriba als $100 \cdot 10^6 K$, llavors té lloc el procés triple alfa que utilitza el Bèliri per produir carboni i oxigen:



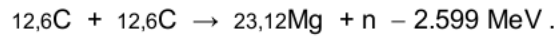
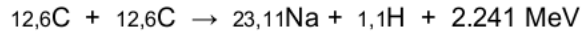
El procés pot arribar a produir neó i magnesi en més petites quantitats:



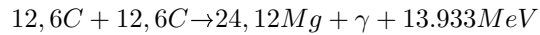
4.9.4 Altres processos

Les estrelles més massives (8-11 masses solars) arriben a sintetitzar elements fins el Ferro / Niquel, la resta d'elements més pesats es formen per col·lisions quan hi ha una supernova.

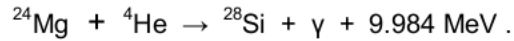
Quan el nucli es troba a $600 \cdot 10^6 K$ comença la fusió del carboni:



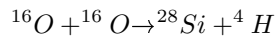
I alternativament:



A partir dels $4000 \cdot 10^6 K$ s'inicia la crema de neó:



Al finalitzar aquest procés, el nucli es contraurà augmentant la temperatura fins a $1.500.000 \cdot 10^6 K$, a on es cremarà oxigen per produir silici:



I finalment, es torna a contraure el nucli i la temperatura arriba als $2.700.000 \cdot 10^6 K$ s'inicia la crema del silici:

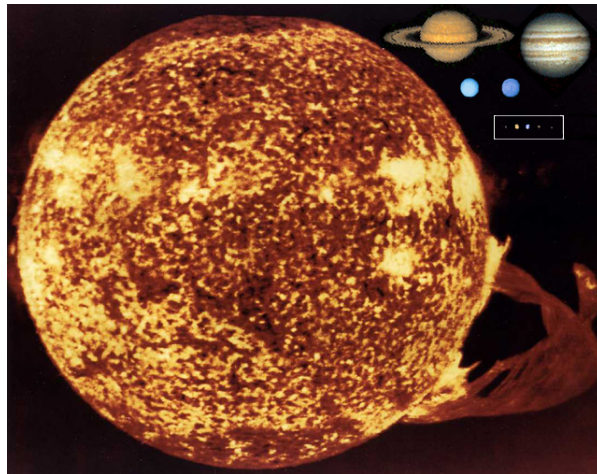


...



Aquest últim procés té una duració d'un dia i quan s'ha format níquel ha esgotat tot el combustible. El següent element a formar seria el Zinc-60 però per això es requeriria afegir energia en comptes d'alliberar. Cal destacar que el níquel decaurà en qüestió de dies.

5 El Sol



El sol es troba a una distància de 150 milions de km, té un diàmetre de 1.392.000 km.

5.1 Composició

La composició del sol:

- Per nombre d'àtoms:
 - 94% Hidrogen
 - 6% Heli
 - 0,13% Resta d'elements
 - * 0,11% Oxigen, carboni i nitrogen
- Per massa:
 - 78,5% Hidrogen
 - 19,7% Heli
 - 0,86% Oxigen
 - 0,4% Carboni
 - 0,54% Resta d'elements

Cal destacar que en quant a estrelles, qualsevol àtom més pesat que l'heli és anomenat “metall”. Com a símbols s'utilitzen els següents:

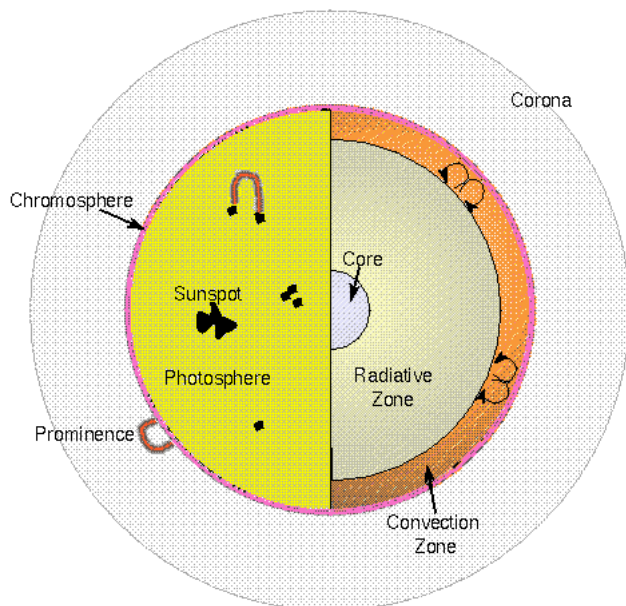
Simbol	Descripció
X	% Hidrogen
Y	% Heli
Z	% Metalls o Metallicitat

Una definició alternativa de metallicitat estel·lar es produeix per comparació d'elements A i B:

$$\left[\frac{A}{B} \right] = \log_{10} \left\{ \frac{\left(\frac{\#atoms\ d'\ A}{\#atoms\ d'\ B} \right)_{\star}}{\left(\frac{\#atoms\ d'\ A}{\#atoms\ d'\ B} \right)_{\odot}} \right\} \quad (42)$$

com per exemple $\left[\frac{Fe}{H}\right] = -2 \Rightarrow Z = 0,01$. És habitual que A sigui el ferro i B l'hidrogen, i en ocasions es denomina Ferro a tots els metalls. El sol té una metallicitat $Z_{\odot} = 0,02$.

El nucli del sol es troba a uns 16 milions K i té una densitat de 160 vegades la densitat de l'aigua. La superfície solar (fotosfera) es troba a 5.840 K.



Energy is generated in the **core** where the temperature reaches 16 million K and the density is 160 g/cm^3 and then transported outward by radiation. In the **convection zone** rising and falling gas is used to transfer the energy to the **photosphere** ("surface" of the Sun). **Sunspots** are cooler, dimmer regions with strong magnetic fields. Some sunspots have **prominences** forming over them. The **chromosphere** is a thin pink layer above the photosphere that is hotter than the photosphere. The temperature increases outward into the **corona**, the very hot (1–2 million K) but tenuous atmosphere of the sun. Fast moving ions in the corona escape the Sun to form the **solar wind**.

Figura 52: Estructura del sol

5.2 Activitat

L'equador solar rota cada 25 dies, mentre que regions a 30 graus per sobre o per sota triguen 26,5 dies i a 60 graus la rotació és de 30 dies (rotació diferencial).

Visualment el sol es caracteritza per diferents elements clau:

- Taques solars (sunspots): petites regions fosques a la fotosfera que son uns 1.000 - 1.500 K més fred que la resta (semblen fosques per la diferència amb la resta, però emeten llum també).
 - Poden durar des de dies fins a mesos
 - El nombre de taques varia en cicles amb una període mig de 11 anys. Durant els següents 11 anys, els pols solars s'intercanvien i per tant el cicle total és de 22 anys.
- Prominències: núvols de gas que es formen per sobre de les taques solars a la cromosfera, segueixen les línies del camp magnètic (en forma de loop).
 - Duren des de diversos dies fins a setmanes.

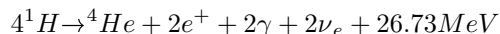
- Erupcions solars (solar flares): més potents que les prominències i, a diferència d'aquestes, tenen molt material ionitzat (electrons, protons i ions més pesats) que són ejectats a velocitats comparables a la de la llum. Produïxen radiació per totes les longituds d'ones (des de radio fins a rajos gamma).
 - Poden durar des de uns pocs minuts fins hores.
- Ejeccions de massa coronal (CME, coronal mass ejection): explosions del vent solar habitualment associats a erupcions solars. El material ejectat és plasma constituït per electrons i protons principalment, però conté petites quantitats d'elements més pesats com heli, oxigen o inclús ferro.
- Vent solar: Ions que s'escapen de l'atracció gravitatòria del sol a altes velocitats.

5.3 Font d'energia

La lluminositat del sol és de 4×10^{26} watts. Aquesta és produïda per fusió nuclear i per la quantitat de massa del sol, pot arribar a durar 10.000 milions d'anys (actualment ja porta consumits 4.500 milions d'anys).

Al sol es produeixen reaccions:

- Cadenes Protó-Protó



a on e^+ és un positró, γ un fotó i ν un neutrí (transporta 0,52MeV).

- Cadena CNO (Carboni-Nitrogen-Oxigen)

Cal destacar que els fotons produïts a fusions nuclear triguen milions d'anys per traslladar-se des del nucli del sol fins a la superfície. Quan arriben, els rajos gamma original han perdut suficient energia com per ser fotons de llum visible.

Per altra banda, un neutrino és una partícula molt poc massiva que en molt poques ocasions interacciona amb matèria ordinària. Viatgen a velocitats properes a la de la llum i es traslladen des del centre del sol fins a l'exterior en qüestió de segons. Durant el seu viatge fins a la terra, els neutrinos poden canviar entre diferents tipus.

5.4 Heliosismologia

L'heliosismologia estudia les pulsacions del sol a petites regions que poden ser observades per efecte Doppler (zones que s'apropen o s'allunyen de la terra).

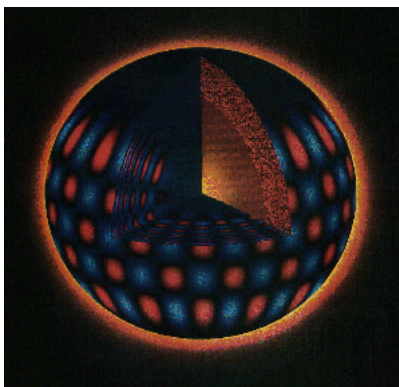


Figura 53: Heliosismologia

Observant aquestes efectes a la fotosfera es pot determinar la temperatura, densitat i composició de capes internes del sol.

6 Evolució estel·lar

6.1 Massa

Tota la resta d'aspectes solars com la lluminositat, temperatura, tamany, densitat, etc. es poden explicar utilitzant la propietat fonamental de l'estrella: la massa.

La lluminositat depèn de la massa $L \sim m^p$ a on p és usualment de l'ordre de 3 o 4. Una petita variació en la massa, produeix una gran diferència en la seva lluminositat.

Les estrelles tenen habitualment masses entre 0.08 i 150 masses solars:

- Estrelles amb poca massa no tenen una compressió gravitacional suficient com per produir la temperatura i densitat adient per a la fusió.
 - Estrelles que no arriben a fusionar hidrogen de forma estable s'anomenen nanes marrons.
- Estrelles amb masses molt elevades produeixen tanta pressió de radiació que empeny les capes més externes i l'estrella és inestable.

Les estrelles massives tenen una vida més curta donat que consumeixen el seu hidrogen a un ritme molt superior.

Massa solar	Temps (anys)	Tipus espectral
60	3 milions	O3
30	11 milions	O7
10	32 milions	B4
3	370 milions	A5
1.5	3.000 milions	F5
1	10.000 milions	G2 (Sol)
0.1	>1 bilions	M7

Així mateix, els elements que una estrella pot fusionar per reaccions nuclears estan lligats a la massa de la mateixa:

Element	Massa mínima (M_{\odot})
H	0,075 - 0,08
He	0,4
C	4
Ne	8

6.2 Model estel·lar

Per estudiar l'estructura estel·lar es realitzaran les següents simplificacions:

- Simetria esfèrica
- Autogravitants en equilibri³ format per gas en forma de plasma
- Estat estacionari
- La rotació és ignorada

³La pressió de radiació està en equilibri amb la força de gravetat

- La temperatura local del nucli es considera en equilibri

La massa és el paràmetre fonamental de l'estrella i per aquest motiu totes les fórmules en format lagrangia són més interessant, donat que s'assemblen més a la realitat.

- Conservació de la massa

– Forma euleriana: $\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$

– Forma lagrangiana: $\frac{dr}{dm} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$

- Conservació del moment (equilibri hidrostàtic)

– Forma euleriana: $\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm}{r^2}$

– Forma lagrangiana: $\frac{dP}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4}$

* La pressió total (P) correspon a:

$$P = \sum p_i \begin{cases} P_{radiació} = \frac{1}{3} \frac{4\sigma}{c} T^4 & \text{a on } \sigma \text{ és la constant de stefan - boltzman} \\ P_{atoms} = n K_B T & \text{a on } K_B \text{ és la constant de boltzman} \end{cases}$$

- Conservació de l'energia

– Forma euleriana: $\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon(r)$ a on $\epsilon(r)$ és l'energia alliberada per segon i per unitat de massa

– Forma lagrangiana: $\frac{dL}{dm} = \epsilon = \epsilon_n + \epsilon_g - \epsilon_v$ (forma lagrangiana: a on ϵ_n és l'energia nuclear, ϵ_g és l'energia gravitatòria (contracció d'expansió) i ϵ_v és l'energia perduda per neutrins)

- Estructura tèrmica

– Forma euleriana: $\frac{dT}{dr} = \frac{dP}{dr} \frac{dT}{dP} = \frac{dP}{dr} \frac{T}{P} \nabla_T = -\frac{GmP}{r^2 P} \nabla_T$ amb el gradient de T $\nabla_T = \frac{d \ln T}{d \ln P}$

– Forma lagrangiana: $\frac{dT}{dm} = -\frac{GmT}{4\pi r^4 P} \nabla_T$ (forma lagrangiana)

* A la forma lagrangiana el gradient de T variarà segons el tipus de propagació⁴ que predomini:

· Transport radioactiu

$\nabla_T = \frac{3KLP}{16\pi\sigma GcmT^4}$ a on K és la opacitat, L la lluminositat, P la pressió, m la massa, T la temperatura i la resta constants.

· Transport connectiu adiabàtic⁵ i gas monoatòmic

$\nabla_{T,ad} = \frac{\gamma-1}{\gamma}$ a on $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ a on C_p és el calor específic molar a pressió constant i C_v és el calor específic molar a volum constant.

Com a equacions de contorn per a les equacions diferencials de primer ordre presentades es poden utilitzar les següents constants d'integració (forma lagrangiana):

- Constants d'integració

$R(m=0) = 0$

$L(m=0) = 0$

$P(m=M) = 0$ a la superfície la pressió és negligible

$T(m=M) = 0$ a la superfície la temperatura és negligible

- Complements:

$L(R) = 4\pi R^2 G T_{eff}^2$

$P(R) = \frac{2}{3} \frac{GM}{R^2} \frac{1}{K}$

⁴Convecció, Radiació o Conducció (només nanes blanques)

⁵No intercanvia energia amb l'entorn

6.3 Etapa 1: Núvol molecular gegant

Un núvol molecular es una gran regió de gas dens amb pols que es suficientment fred com per formar molècules (10K). No obstant, si bé els núvols són molt més dens que la resta del gas entre estrelles, la seva densitat és inferior a l'atmosfera d'un planeta.

Un núvol pot arribar a tenir des de 100.000 fins a milions de masses solars de material.

A les regions dels núvols moleculars a on s'han format estrelles molt calents (tipus O o B), l'hidrogen que les envolta pot ser ionitzat i al recombinar-se resplendeix a la banda visible formant regions HII (p.ex. nebulosa d'Orió).



Figura 54: Nebulosa d'Orió

Els iniciadors del col·lapse d'un fragment d'un núvol pot ser una ona de densitat d'una supernova propera, interaccions gravitacionals, etc. Quan el col·lapse s'inicia, s'acaba formant una protoestrella.

6.4 Etapa 2: Protoestrella

Una regió de gas que col·lapsa acaba formant un disc amb una protoestrella al centre, la qual arribarà als 2.000 - 3.000 K produint radiació de microones i a l'infraroig. No obstant, el gas i pols al seu voltant bloqueja la llum visible.

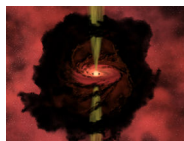


Figura 55: Il·lustració d'una protoestrella

Cal destacar que s'ha observat que les estrelles neixen en cúmuls i no de forma aïllada.

6.5 Etapa 3: T-Tauri

A l'etapa T-Tauri es començarà a produir forts vents que ejectaran el gas i pols del voltant, formant una estrella que serà visible des de l'exterior per primer cop.

6.6 Etapa 4: Seqüència principal

L'estrella es torna estable gràcies a l'equilibri hidrostàtic i comença a fusionar hidrogen de forma regular per formar heli. El 90% de la vida d'una estrella es troba situada en aquesta etapa.

Les estrelles inicien la seva vida aprop d'altres estrelles en un cúmul. No obstant, després de diverses orbites al voltant del centre galàctic, les interaccions gravitacionals amb altres estrelles fan que el cúmul es vagi desfent.



Figura 56: Cúmul jove de les Pleiades (80 milions d'anys)

El 85% de les estrelles de la Galàxia es troba a la seqüència principal. La seva lluminositat, el radi i el temps de vida és proporcional a la massa:

$$\frac{L}{L_{\odot}} \propto \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^v \begin{cases} v \sim 3,5 & \text{si } 0,5M_{\odot} \lesssim M_{\star} \lesssim 20M_{\odot} \\ v \sim 2,5 & \text{si } M_{\star} \lesssim 0,5M_{\odot} \end{cases} \quad (43)$$

$$\frac{R}{R_{\odot}} \propto \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{0,8 \sim 1} \quad (44)$$

$$\tau \approx \frac{E}{L} \propto \frac{M}{M^v} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2,5} \quad (45)$$

En quant a l'estructura interna, en funció de la massa presenta zones de fusió nuclear, convecció i/o radiació:

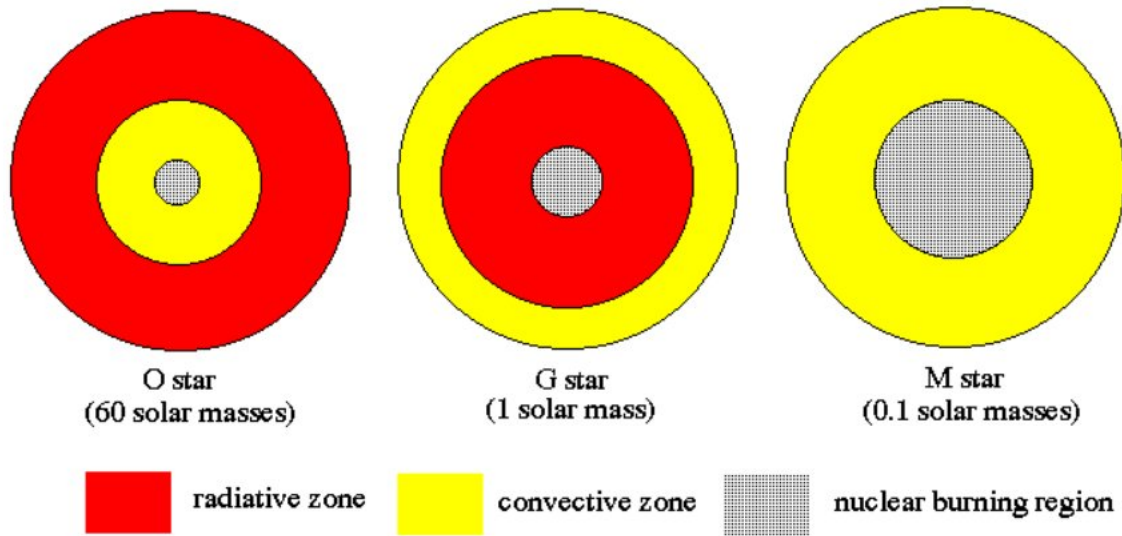


Figura 57: Estructura interna d'una estrella a la seqüència principal

6.7 Etapa 5: Subgegant, gegant vermell i supergegant

Quant tot l'hidrogen del nucli es converteix en heli i les reaccions nuclear paren, la gravetat guanya protagonisme i comprimeix el nucli.

Eventualment, les capes que envolten el nucli (*shell layers*) s'escalfen i arriben a tenir la densitat necessària per fusionar hidrogen (*shell burning*). Aquesta fusió es molt ràpida donat que aquestes capes es continuen comprimint i augmentant la seva temperatura, per tant la lluminositat també s'incrementa.

El gas que envolta les capes que estan en procés de fusió nuclear es veu empès cap a fora per la radiació i l'estrella comença a expandir-se per convertir-se en una subgegant i més tard en una gegant vermella.

En el cas del sol, quan arribi a l'etapa de gegant vermella s'estima que tindrà un tamany que arribarà fins a l'òrbita de la terra.

Si bé la seva lluminositat serà molt elevada donada la gran superfície, l'energia per centímetre quadrat serà inferior.

En el cas d'estrelles molt massives, l'expansió continuarà fins arribar a ser supergegants (p.ex. Betelgeuse a la constel·lació d'Orió).

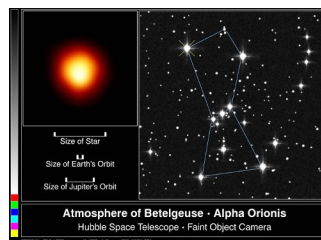


Figura 58: Betelgeuse: supergegant

6.8 Etapa 6: Fusió del nucli

Si l'estrella es prou massiva, la gravetat comprimeix el nucli fins a crear la temperatura necessària (al voltant del 100 milions K) per fusionar Heli, o temperatures de bilions de K per fusionar elements més pesats en futures repeticions d'aquesta etapa.

6.8.1 Flash de l'heli

En estrelles poc massives com el sol, la fusió de l'heli al nucli pot arribar a ser molt ràpida, produint una explosió d'energia interna anomenat flash de l'heli.

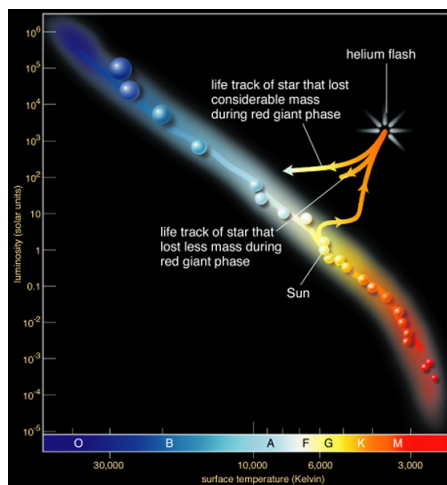


Figura 59: Flash de l'heli en un diagrama HR

El flash de l'heli no es observable des de l'exterior, l'energia emesa es utilitzada íntegrament per transformar la matèria degenerada del nucli (pressió pel principi de Pauli) en no degenerada.

6.8.2 Pulsacions

Estrelles entren i surten d'aquesta etapa poden crear les condicions necessàries per a que quedi energia atrapada al seu interior. La pressió tèrmica cap a l'exterior augmenta com per expandir les capes externes de l'estrella, així l'energia atrapada és capaç d'escapar quan les capes exteriors s'expandeixen i la temperatura decau. Llavors la gravetat torna a tenir protagonisme i redueix l'estrella, realitzant una contracció més enllà del punt d'equilibri. L'energia queda atrapat de nou i el cicle continua.

L'equilibri hidrostàtic acaba disminuint les pulsacions, però el temps que trigarà en aturar-se dependrà de la massa. Durant aquesta etapa, l'estrella es variable intrínsecament per les seves pulsacions.

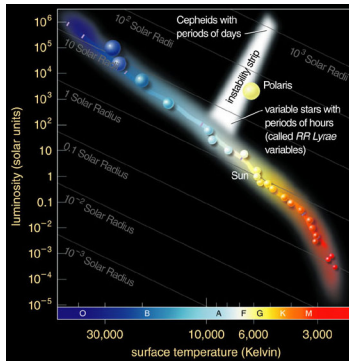


Figura 60: Regió de pulsacions en un diagrama HR

Com més lluminosa és l'estrella, les pulsacions tindran períodes més grans:

- Cefeïdes variables
 - Cefeïdes clàssiques
 - * Estrelles variables de població I
 - * 4-20 vegades més massives que el sol
 - * Períodes de l'orde de dies fins mesos
 - Cefeïdes tipus II
 - * Estrelles variables de població II
 - * Objectes menys massius que el sol (0.5 masses solars)
 - * Períodes entre 1 i 10 dies
- RR Lyrae
 - Estrelles variables de població II
 - Objectes menys massius que el sol (0.8 masses solars)
 - Períodes entre 7 hores i pocs dies
 - Més abundant que les cefeïdes però menys lluminoses

Es coneix una relació entre el període i la lluminositat, calibrat utilitzant cefeïdes de la nostra galàxia per Harlow Shapley. Comparant la brillantor aparent amb la seva lluminositat, es possible obtenir la distància utilitzant la llei de l'invers al quadrat:

$$distance = distance_{calibrator} \cdot \sqrt{\frac{Brightness_{calibrator}}{Brightness}}$$

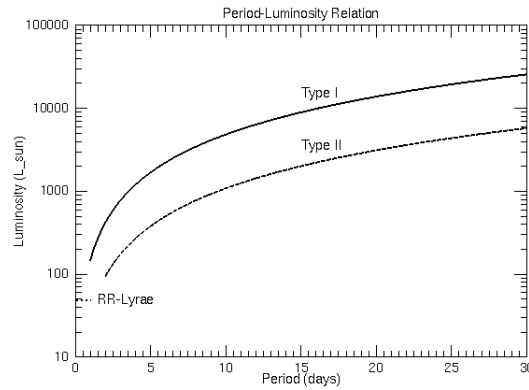


Figura 61: Relació període-luminositat per estrelles variables

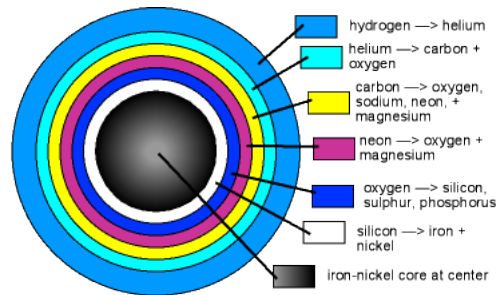
Les cefeides més lluminoses poden ser utilitzades per calcular distàncies fins a 40 milions de parsecs (130 milions d'anys llum). En canvi, les RRLyrae poden ser utilitzades per distàncies fins a 760.000 parsecs (2,5 milions d'any llum).

6.9 Etapa 7: Gegant vermella o supergegant

Quan el nucli deixa de fusionar elements, comença el seu col·lapse gravitacional. Si l'estrella es prou massiva és repetirà l'etapa 5. El nombre de vegades que una estrella pot passar per les etapes 5, 6 i 7 dependrà en la massa i cada cop tenen una durada més curta. Cada cicle crea elements més pesats al seu nucli a partir dels elements creats a cicles anteriors, aquest procés és anomenat nucleosíntesi estel·lar.

Les estrelles més massives arriben a formar ferro al seu nucli. Estrelles com el sol només arribaran a sintetitzar carboni i oxigen. Les temperatures necessàries per iniciar la fusió d'elements més pesats que l'heli són:

- Carboni: 600 milions K
- Neo: 1.200 milions K
- Oxígen: 1.500 milions K
- Silici: 2.700 milions K



The "onion layers" of an evolved core of a high-mass star at the end of its red giant stage. Each shell of material is fusing to make the material in the shell inside it, from hydrogen in the outermost shell to iron at the very center.

Figura 62: Capes internes d'una estrella massiva

La fusió de nuclis de ferro, al contrari de la resta d'elements menys pesats, requereix energia extra. Per tant, el nucli acaba implosionant i la densitat augmenta fins a tal punt com per a que protons i electrons es combinin per formar neutrons i neutrinos. Les capes externes són expulsades en una explosió supernova.

En el cas d'estrelles menys massives, la seva mort no serà tant explosiva i es formarà una nebulosa planetària.

6.10 Etapa 8: Nebulosa planetària o supernova

Les capes més externes de l'estrella són expulsades a mesura que el nucli es comprimeix fins al seu estat més compacte:

- Estrelles poc massives (0,08 - 6 o 7 masses solars durant la seqüència principal)
 - El nombre de fotons que flueixen cap a l'exterior des del nucli, ejectarà les capes externes formant una nebulosa planetària.
 - * Les nebuloses planetàries poden ser distingides de les regions HII per la seva forma compacta i les línies d'emissió d'oxigen doblement ionitzat, neó doblement ionitzat i heli ionitzat.



Figura 63: Ull de deu, nebulosa planetària

- * La brillantor del gas de la nebulosa planetària dura només entre centenars fins a milers d'anys.
 - Els rajos ultravioleta del nucli calent (nana blanca) fa que el gas resplendeixi.
 - Aquest procés és important per enriquir el medi interestel·lar amb elements pesats.
- Estrelles massives (8 - 50 masses solars durant la seqüència principal)
 - Quan el nucli de ferro d'una estrella massiva implosiona, els protons i electrons es fusionen en menys d'un segon per formar una estrella de neutrons del tamany una ciutat petita.
 - Les capes externes que cauen cap a l'interior, xoquen amb el nucli i l'impacte eleva la temperatura a milions de K produint una supernova (tipus II, Ib o Ic)
 - * Elements més pesats que el ferro es produeixen als primers 15 minuts de la supernova per la combinació d'abundants neutrons amb nuclis pesats.
 - * A mesura que s'expandeix el gas a milers de km per segon i xoca contra el gas interestel·lar del voltant, es formen romanents de supernova que resplendeixen.

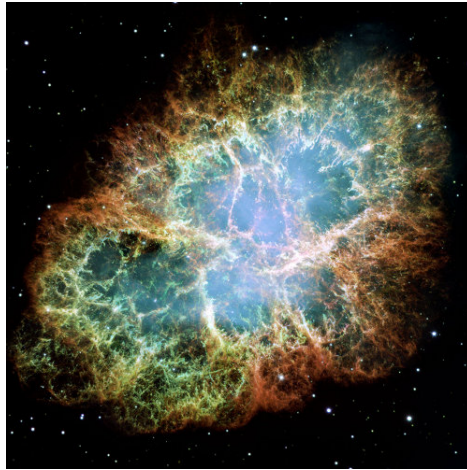


Figura 64: Nebulosa Crab: romanent d'una supernova

- * Cada 100 anys es produeix una supernova en una galàxia qualsevol, però com existeixen bilions de galàxies, es possible observar varies supernoves per any.
- * La brillantor d'una nebulosa produïda per una supernova dura només uns milers d'anys.
- Les estrelles més massives també produeixen potents explosions de rajos gamma que són ejectats en forma de jets als pols de l'estrella al moment que el nucli col·lapsa per formar un forat negre.

6.10.1 Tipus de supernova

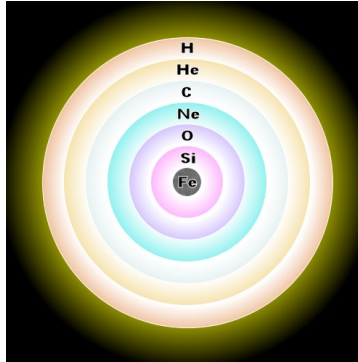


Figura 65: Capes d'elements d'una estrella massiva

- Tipus II: Supernoves amb línies d'emissió d'hidrogen
 - Col·lapse del nucli d'una estrella
 - Creen la majoria de l'oxigen que es troba al medi interestel·lar
 - Poden ser utilitzades per mesurar la distància a galàxies molt llunyanes utilitzant la llei de l'invers al quadrat.

- Tipus I: Supernoves sense línies d'emissió d'hidrogen
 - Tipus Ia:
 - * Colapse d'una nana blanca que ha adquirit gas d'una estrella companya (sistemes binaris)
 - * Son diverses vegades més lluminoses que qualsevol altre tipus de supernova
 - Tipus Ib i Ic:
 - * Col·lapse del nucli d'una estrella que ha perdut les seves capes externes d'hidrogen per transferència a una estrella companya o per vent solar
 - * Les supernoves de tipus Ib tenen línies d'emissió d'heli mentre que les de tipus Ic no.

6.11 Etapa 9: Nucli romanent

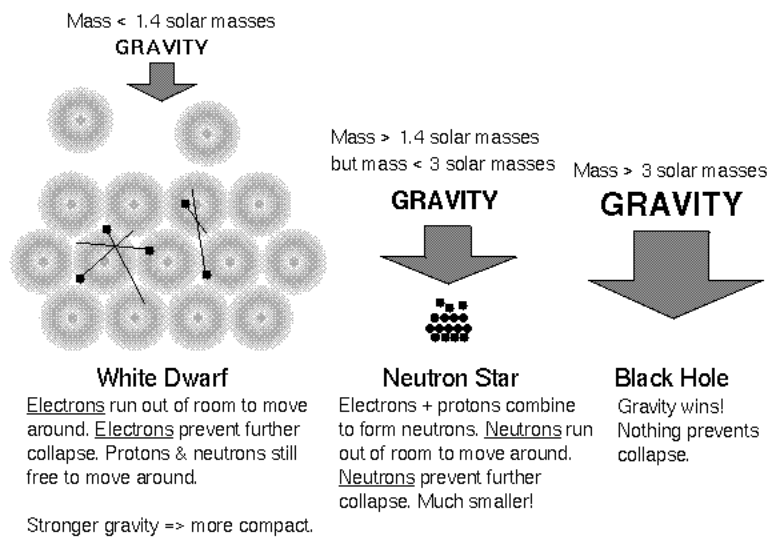


Figura 66: Tipus de romanents del nucli d'una estrella

6.11.1 Gas degenerat

La física quàntica estableix que per cada nivell d'energia en un àtom pot estar ocupat com a màxim per dos partícules. En un gas degenerat, tots els nivells d'energia més baixos estan omplerts.

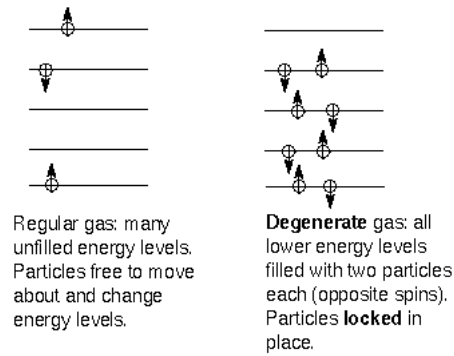


Figura 67: Matèria degenerada

En general, es pot trobar:

- Nanes blanques: les partícules degenerades són electrons.
- Estrelles de neutrons: les partícules degenerades són neutrons, menys massius que els electrons i per tant confinats en un espai més reduït.

6.11.2 Nana blanca

Per una estrella amb un nucli de menys de 1,4 masses solars (l'estrella a la seqüència principal tenia $0,08M_{\odot} < M_{\star} < 8M_{\odot}$), el resultat després de produir-se una supernova (tipus II, Ib o Ic) és una nana blanca de gas degenerat.

- És el final de vida més comú per a una estrella
- La brillantor de les nanes blanques només prové de l'alliberació del calor romanent (no es produeixen reaccions nuclears)
- El seu reduït tamany fa que sigui molt difícil detectar-les.

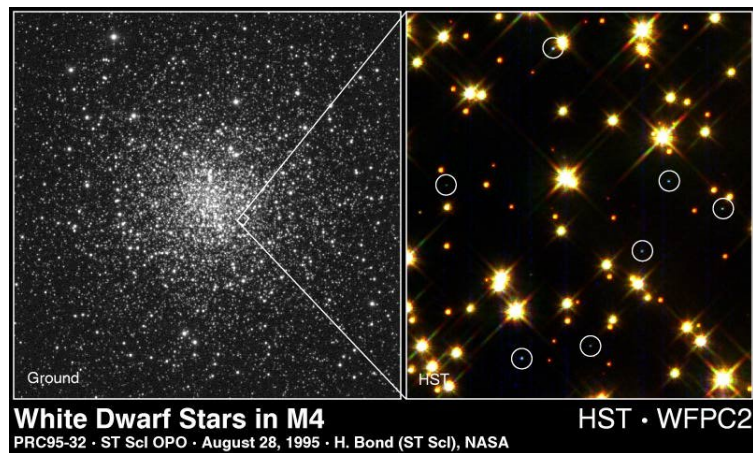


Figura 68: Nanes blanques a M4

Existeixen diversos tipus de nanes blanques:

- D'heli: no s'han trobat encara, l'univers no és prou vell.
- De carboni-oxigen: $0,08M_{\odot} < M_{\star} < 8M_{\odot}$
- De neo, magensi i oxigen $8M_{\odot} < M_{\star} < 10M_{\odot}$

– Detectades gràcies a noves en sistemes binaris.

Amb el temps les nanes es van refredant i l'interior es cristal·litza, en cas de que estiguin fetes de carboni llavors l'interior és forma un diamant gegant. El final de la seva vida pot prendre dos camins:

- A mesura que es refredi i deixi d'emetre llum es convertirà en una nana negra. El temps per a que passi això és superior a l'edat de l'univers (13.700 milions d'anys), per tant s'assumeix que actualment encara no existeixen.
- En cas de que l'estrella es trobi en un sistema binari amb una companya de la seqüència principal o en fase gegant prou aprop, el gas d'aquesta segon caurà a la nana blanca produint dos possibilitats:
 - Nova: L'hidrogen acumulat al voltant de la nana arriba a la temperatura i densitat necessària per produir una reacció nuclear explosiva que no destruirà la nana. Aquest procés es pot repetir recurrentment.
 - * Una nova ràpida trigarà habitualment menys de 25 dies en decaure en 2 magnituds, mentre que una lenta triga al voltant de 80 dies.
 - Supernova de tipus Ia: Si s'acumula suficient massa a la nana blanc com per arribar a superar el límit de Chandrasekar $M \leq 1.38M_{\odot}$, els electrons degenerats no podran aturar el col·lapse per gravetat:
 - * El col·lapse es repentin, escalfant el carboni i oxigen del nucli fins a la temperatura necessària per tenir una reacció nuclear.
 - * S'allibera una gran quantitat d'energia en un temps curt i la nana blanca es desintegra en el procés.

Cal destacar que existeixen altres tipus de nanes:

- Nanes vermelles: estrella $0.05M_{\odot} < M_{\odot} < 0.075M_{\odot}$. No relacionat amb nanes blanques.
- Nanes marrons: objectes que no arriben a realitzar fusionar hidrogen de forma constant. $M_{\odot} < 0.07M_{\odot}$. No relacionat amb nanes blanques.
- Nanes negres: final d'una nana blanca quan ha perdut tota la seva calor.

6.11.3 Estrella de neutrons

Les estrelles amb nuclis entre 1,4 i 3 masses solars que pateixen una supernova (l'estrella a la seqüència principal tenia $8M_{\odot} < M_{\star} < 10M_{\odot}$), acaben generant una estrella de neutrons de gas degenerat.

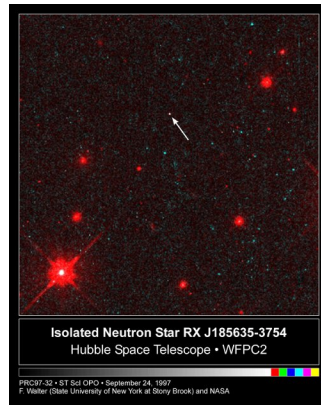


Figura 69: Estrella de neutrons

- Característiques:

$$Radi \sim 10 - 15 km$$

$$\rho \sim 10^{17} km/m^3$$

$$v_{esc} \sim 100.000 km/s$$

$$camp magnetic \sim 10^{12} gauss$$

6.11.4 Pulsars

Els pulsars són fonts de radio que polsen de forma molt regular amb períodes que van des de fraccions de segon fins a diversos segons. Si analitzem l'origen d'aquestes pulsacions:

- Pulsacions com les produïdes per les estrelles variables intrínseques (veure secció 6.8.2):
 - Les estrelles normals i les nanes blanques no són prou denses com per polsar a ratis inferiors al segon.
 - Les estrelles de neutrons polsarien massa ràpid degut a la seva elevada densitat.
- Un objecte que rota a gran velocitat i conté un punt brillant produiria flashes si el punt estigués alineat amb la terra:
 - Les estrelles normals i les nanes blanques no poden rotar amb la suficient velocitat, no tenen prou gravetat per mantenir-se estable.
 - Les estrelles de neutrons són molt més compactes com per rotar a la velocitat adient.

Per altra banda, si considerem per exemple que cada pulsació dura $\frac{1}{1000}$ segons, un objecte no pot canviar la seva brillantor més ràpid del que triga la llum en creuar el diàmetre. Per tant, per tenir aquest ritme de pulsació l'objecte hauria de ser de $(300.000 km/s) \cdot (\frac{1}{1000} s) = 300 km$.

- Aquest diàmetre és massa petit per estrelles normals o nanes blanques
- Encaixa per estrelles de neutrons

L'explicació física de perquè una estrella de neutrons pot acabar sent un pulsar es basa en que quan es forma, es troba rotant molt ràpidament (degut a la conservació del moment) i té un camp magnètic molt fort ($\sim 10^{12} gauss$, 109 - 1.012 vegades el del sol).

El camp magnètic crea un corrent elèctric que fa que les partícules carregades (principalment electrons) flueixin pels pols magnètics. Mentre aquestes partícules viatgen en espiral per les línies del camp magnètic, produeixen radiació electromagnètica.

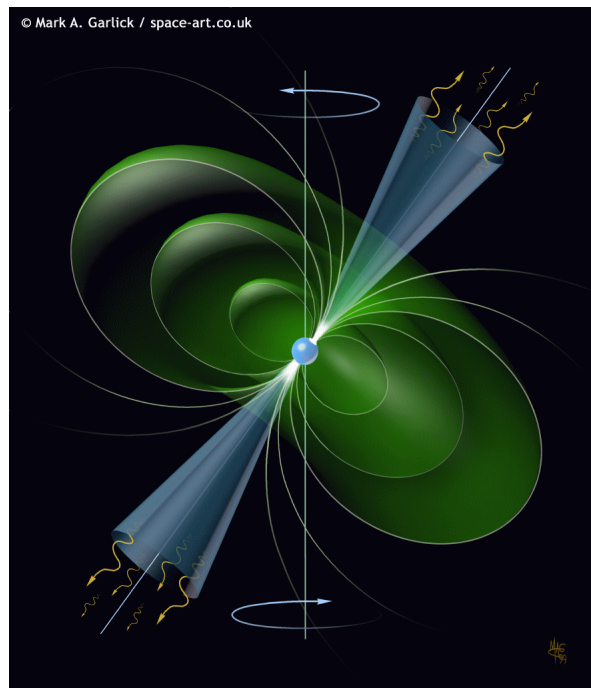


Figura 70: Il·lustració d'un pulsar. Cal destacar que l'eix de rotació no té perquè estar alineat amb l'eix magnètic.

L'estrella de neutron produeix un feix de radiació que, en cas d'estar alineat amb la línia de visió de la terra i combinat amb la pròpia rotació del pulsar, genera pulsacions d'ones electromagnètiques.

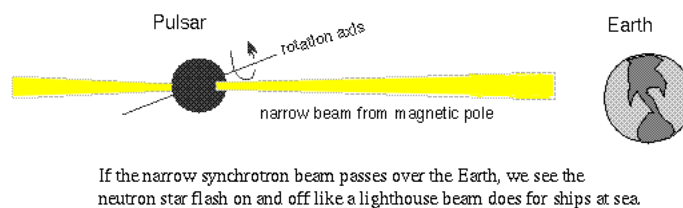


Figura 71: Pulsar en la línia de visió de la terra

Amb les emissions electromagnètiques el pulsar perd energia i s'anirà frenant molt lentament.

6.11.5 Forats negres

Per estrelles amb nuclis de més de 3 masses solars, el col·lapse produeix un forat negre (singularitat matemàtica de densitat infinita). Aquests objectes no es poden explicar amb les lleis de la física que coneixem i es requereix una teoria gravitatòria quàntica. En qualsevol cas, molt poques estrelles tenen aquest final (aquelles que originalment tenien més de 10 masses solars).

El teorema "No hair theorem" estableix que els forats negres només es poden diferenciar els uns dels altres a partir de tres propietats:

- Moment angular
- Massa
- Càrrega elèctrica

La distància a la que la velocitat d'escapament del forat negre s'equilibra amb la velocitat de la llum s'anomena l'horitzó d'esdeveniments (o radi Schwarzschild) perquè res del que passa a partir d'aquest punt pot sortir.

$$v = c = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{distance_{to\ center}}} \Rightarrow distance = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$$

Aquesta distància s'anomena radi de Schwarzschild:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 2.95km \frac{M}{M_{\odot}} \quad (46)$$

Cal destacar que els forats negres no actuen com aspiradores, si el sol fos reemplaçat per un forat negre de la mateixa massa, els planetes el continuarien orbitant sense cap canvi.

Si caiguéssim cap a un forat negre:

- Ens estiraria donat que els nostres peus notarien una força que els atrau molt superior a la percebuda pel cap.
- Una persona observant-nos des de l'exterior veure com la nostra imatge cada cop és més lenta fins aproximar-se a l'horitzó d'esdeveniments (dilatació temporal).

La detecció de forats negres és pot portar a terme mitjançant el mètodes següents:

- Sistemes binaris formats per un forat negre i una estrella visible
 - Aplicant la versió newtoniana de la tercera llei de Kepler:

$$(m_1 + m_2) = \frac{(d_1 + d_2)^3}{P^2}$$

- Si deduïm la massa de l'estrella visible per la correlació amb la lluminositat i temperatura d'estrelles normals, podem extreure la massa de la seva companya. Si es massa elevada com per a ser una estrella de neutrons o una nana blanca, és més que probable que es tracti d'un forat negre.
- Sistemes binaris formats per un forat negre i una estrella visible que es troben suficientment aprop
 - El forat negre captura gas de la seva companya i forma un disc d'acreciement que emet rajos X amb una variabilitat en brillantor important.

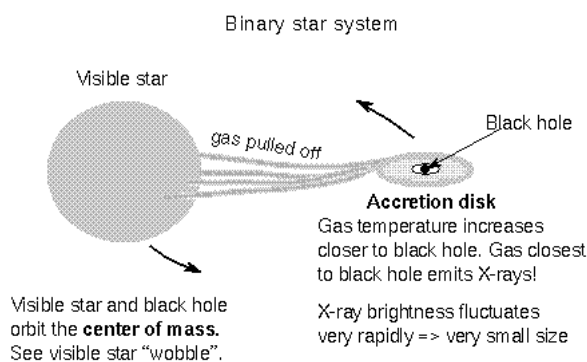


Figura 72: Disc d'acreciement d'un forat negre en un sistema binari

- **Lent gravitatòria:** Quan estrelles o galàxies passen pel darrera d'un forat negre, la llum es veurà doblegada i podrà ser detectat de forma indirecte.

Segons la radiació Hawking, els forats negres s'evaporen (no ha sigut possible provar-ho encara) per les partícules+antipartícules que es creen just a l'horitzó temporal. La temperatura de radiació de Hawking ve determinada per:

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M K_B} \quad (47)$$

I el temps d'evaporació, així com la potència de radiació:

$$t \sim 2 \cdot 10^{67} \text{ anys} \quad (48)$$

$$P = 10^{-28} W \quad (49)$$

No obstant, només es poden evaporar si la temperatura és superior a la radiació còsmica de fons $T > 2.7K$. Per tant, actualment únicament els forats amb masses igual o inferior a la lluna es poden evaporar.

7 Medi interestel·lar

L'espai entre les estrelles és més buit que el millor buit artificial que podem crear a la terra, no obstant encara existeix material compostat per gas (99%) i pols (1%).

7.1 Pols

Si bé la quantitat de pols és inferior al gas, els seus efectes sobre l'extinció de la llum visible són més importants.

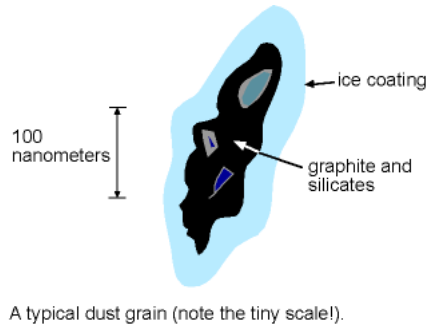


Figura 73: Mota de pols

La pols provoca desplaçament al vermell (redshift) de les ones electromagnètiques originals (especialment les de la banda visible). Aquest efecte es representa per la lletra 'z':

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emesa}}{\lambda_{eme}} = \frac{f_{eme} - f_{obs}}{f_{obs}} \quad (50)$$

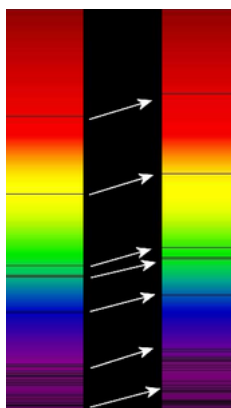


Figura 74: Desplaçament al vermell

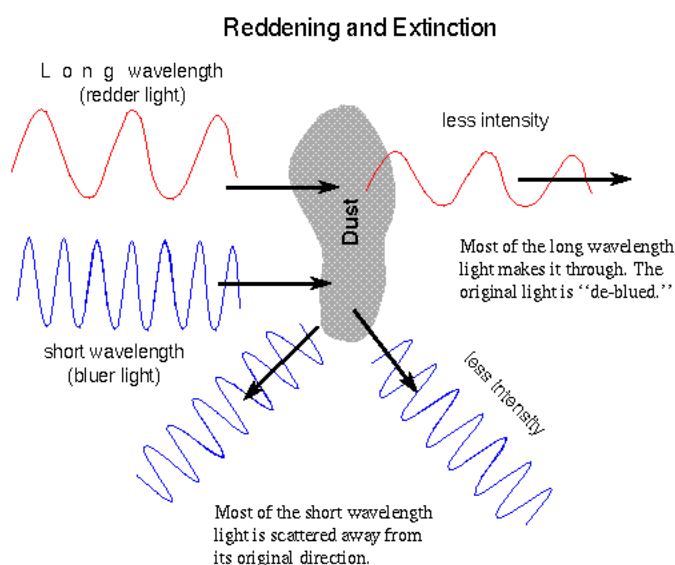


Figura 75: Extinció per pols

Cal destacar que la pols no és l'única causa de desplaçament al vermell, també es pot donar degut a l'expansió de l'univers, l'efecte Doppler (moviment dels objectes/observador) i per la força de la gravetat d'un objecte massiu.

7.2 Gas

El 99% del medi interestelar està compost per gas, 90% en forma d'àtoms o molècules d'hidrogen, el 10% restant és heli i algunes petites traces d'altres elements. No obstant, a longituds d'ona visible, el gas té efectes més significatius sobre la llum.

El gas d'hidrogen observat es troba en diversos estats:

- Hidrogen ionitzat (HII): emet llum a la banda visible quan els electrons es recombinen amb els protons.
- Hidrogen neutre (HI): emet llum a la banda radio de l'espectre electromagnètic.
- Forma molecular: al igual que HI, emet llum a la banda radio.



Figura 76: Nebulosa d'Orió: núvol molecular

7.2.1 Regions HII

Les estrelles de tipus O o B es troben habitualment en regions de formació estel·lar (núvols moleculars) donat que no viuen prou com per ser desplaçades a algun altre lloc.

Una forma de formar regions HII es per la ionització del gas neutre que envolta una estrella O o B emeten rajos ultravioleta.

7.2.2 Regions HI

Un aspecte important de les regions d'hidrogen neutre (HI) es la radiació de 21 cm. Un àtom d'hidrogen té un electró que pot tenir:

- Un spin en la mateixa direcció que el protó que orbita (p.ex. paral·lel).
- Un spin en la direcció oposada al protó que orbita (p.ex. anti-paral·lel). L'energia d'aquest estat és inferior al cas paral·lel.

Els àtoms sempre tendeixen a estar a l'estat d'energia més baix possible, per tant els electrons canviaran el seu spin a la direcció anti-paral·lela emeten a la longitud d'ona de 21,1 cm (banda radio, no bloquejada pel pols). Un àtom d'hidrogen pot arribar a esperar diversos milions d'anys per realitzar la transició, però donat que existeix una gran quantitat de gas és molt fàcil detectar la radiació.

Les regions HI i HII permeten construir un mapa acurat de l'estructura d'una galàxia.

7.2.3 Núvols moleculars

A les regions més fredes de l'espai (al voltant dels 10K), diferents tipus d'àtom es poden combinar per formar molècules.

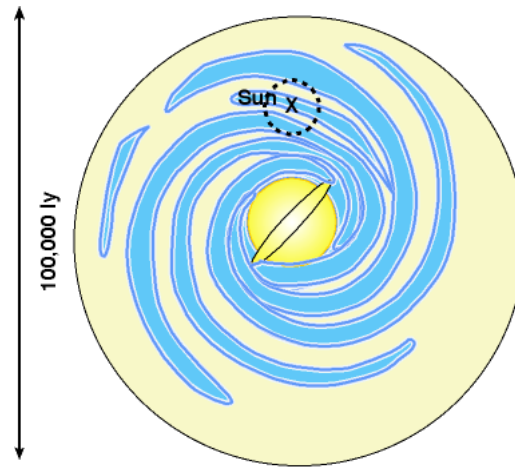
- Les més abundants:
 - Molècules d'hidrogen (H_2): produeixen línies d'absorció a l'ultraviolat.
 - Monòxid de carboni (CO): emeten a la banda radio.
- Altres: H_2O (aigua), OH (hidròxid), NH_3 (amoníac), SiO (monòxid de silici), CO_2 (diòxid de carboni)

Les molècules orgàniques, l'aigua i les molècules d'amoniac són utilitzades a reaccions bioquímiques per crear els blocs fonamentals per la vida: aminoàcids i nucleòtids. La presència d'aquestes molècules al medi interestel·lar mostren que els ingredients per a la vida existeixen per tota la galàxia.

8 La via lactea

8.1 Estructura

Gràcies a la radiació en 21 cm, s'ha determinat que la nostra galàxia (la via lactea) té una estructura espiral en forma de disc. Presenta un bulb el·líptic al centre amb una barra central de gas, pols i estrelles.



Top View of the Milky Way Galaxy

Hot, blue stars delineate spiral structure. Since hot stars are so luminous, they make the spiral arms stand out. Cool, orange and red stars are found in and between the spiral arms. The Sun's location in the Galaxy is marked with the "X". We are not at the center! Interstellar dust limits our view in visible light to roughly the area within the dashed circle around the Sun.

Figura 77: Vista superior de la Galàxia

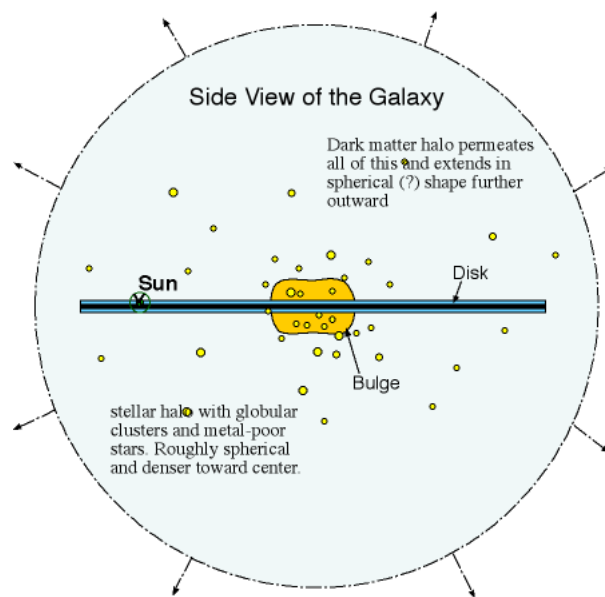


Figura 78: Vista lateral de la Galàxia

La Galàxia conté aproximadament 200.000 milions d'estrelles.

8.2 Ubicació del sistema solar

Utilitzant cefeides per la mesura de distàncies a cúmuls globulars, Harlow Sapley va anunciar al 1918 que el nostre sistema solar no es troba al centre de la Galàxia.

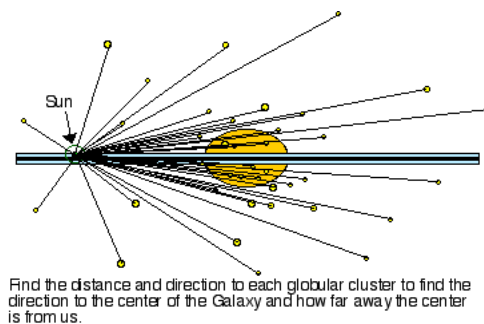


Figura 79: Ubicació del sistema solar

Si estiguéssim al centre, s'observarien cúmuls globulars distribuïts uniformement al voltant del sistema solar.

8.3 Moviment

Els cúmuls globulars d'una banda de l'esfera celeste s'observen amb llum desplaçada al vermell, mentre que l'altra banda el desplaçament és al blau. Per tant, la Galàxia es troba rotant.

8.4 Massa i corba de rotació

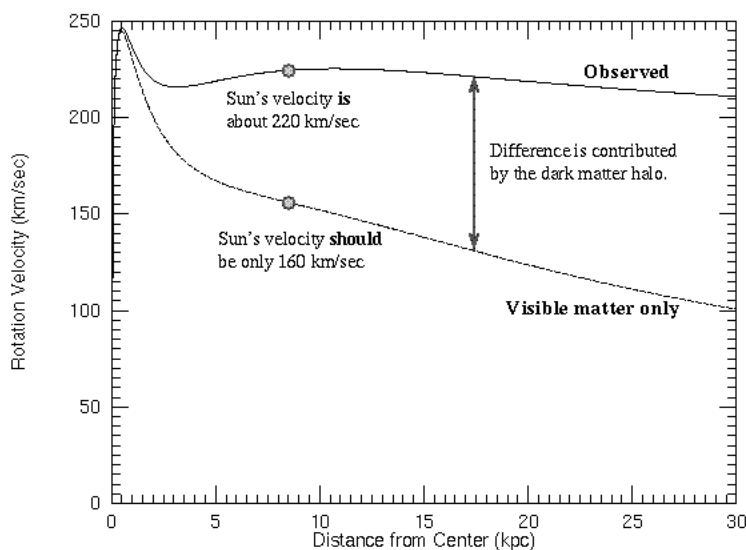
Coneixent el tamany de la òrbita d'un objecte i com de ràpid s'està movent, podem trobar la massa de l'objecte central:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{d} = \frac{GMm}{d^2} \Rightarrow M_{in\ orbit} = \frac{d_{to\ galactic\ center} \cdot v_{in\ orbit}^2}{G} \quad (51)$$

Utilitzant aquesta fórmula és possible calcular la massa total de la Galàxia i determinar la corba de rotació observada en comparació a la corba de rotació teòrica segons la massa visible:

$$v_{in\ orbit} = \sqrt{\frac{G \cdot M_{visible\ in\ orbit}}{d_{to\ galactic\ center}}} \quad (52)$$

El resultat mostra una diferència significativa entre la corba de rotació observada i la teòrica segons la massa visible.



The gravity of the visible matter in the Galaxy is not enough to explain the high orbital speeds of stars in the Galaxy. For example, the Sun is moving about 60 km/sec too fast. The part of the rotation curve contributed by the visible matter only is the bottom curve. The discrepancy between the two curves is evidence for a **dark matter halo**.

Figura 80: Corba de rotació de la Galàxia

La gravetat és més feble com més gran és la distància, per tant les estrelles més externes haurien d'orbitar a una velocitat més lenta, però les observacions indiquen que es mouen a la mateixa velocitat aproximadament que estrelles més properes al centre.

La corba de rotació pot ser descomposta en les parts individuals que contribueixen cada component de la Galàxia:

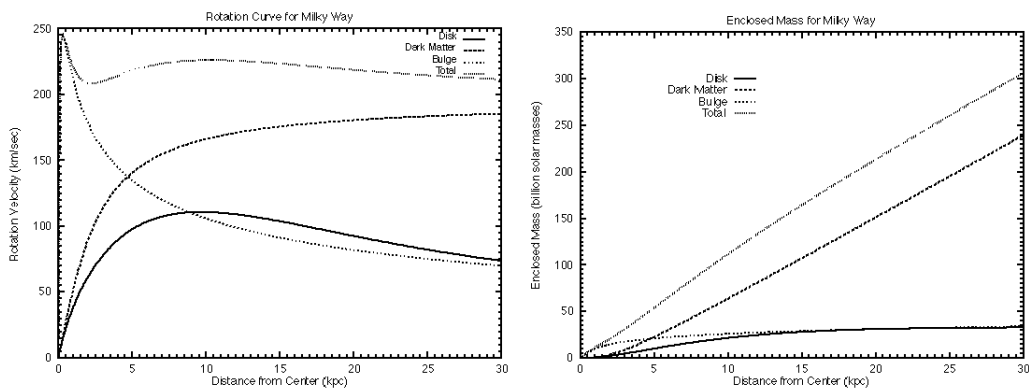


Figura 81: Corba de rotació descomposta de la Galàxia

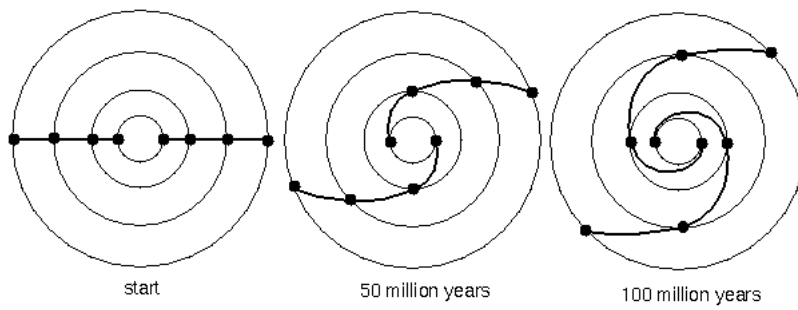
Per a justificar la velocitat de rotació observada, es considera l'existència d'un halo de matèria fosca, la qual pot trobar-se en forma de planetes, nanes marrons (estrelles que no brillen per fusions nuclears), nanes blanques, forats negres, neutrinos amb massa o altres partícules exòtiques que no han sigut descobertes als laboratoris encara (p.ex. WIMPs, Weakly interacting massive particles).

8.5 Braços espirals

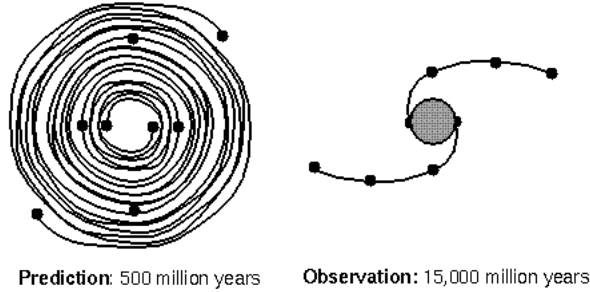
Les estrelles, el gas i el pols al disc es congreguen en un patró espiral amb 4 braços principals.

Les estrelles més antigues es desplacen dintre i fora dels braços a mesura que orbiten la galàxia. La formació d'estrelles té lloc als braços perquè els núvols de gas són pertorbats gravitatòriament.

L'origen dels braços podria ser explicat per la rotació diferencial, no obstant aquest patró es trencaria als 500 milions d'anys i aquest fet no coincideix amb les observacions



Differential rotation: stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.



The “winding problem”: because of differential rotation, the spiral arms should be so wound up after a short time that the spiral structure has disappeared. Observation contradicts the prediction. What keeps the spirals loose?

Figura 82: Formació dels braços espirals per rotació diferencial

Per altra banda, la teoria de l'ona de densitat explica que l'estructura espiral ve produïda per una ona que es mou a través del disc causant agrupacions d'estrelles i gas.

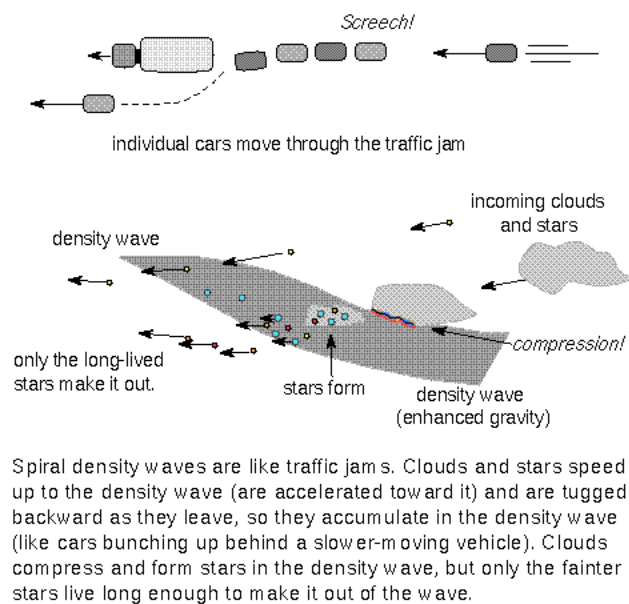


Figura 83: Teoria de l'ona de densitat

8.6 Poblacions d'estrelles

Els cúmuls joves estan formats per estrelles de població I i són anomenats cúmuls oberts donat que estan lleugerament unides (en contrast als vells cúmuls globulars).

Les estrelles de població I tenen una major abundància d'elements més pesats que l'heli, per altra banda les de població són més velles.

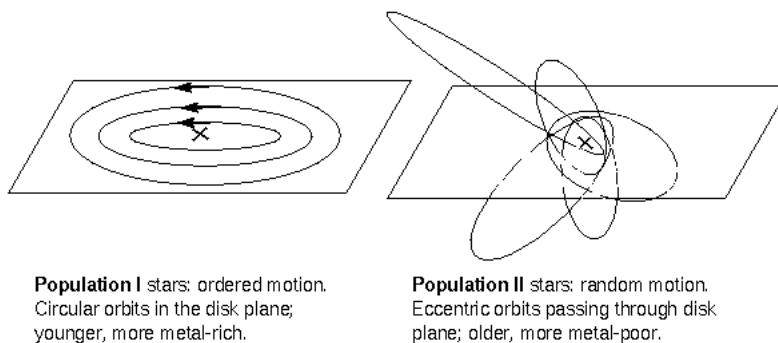


Figura 84: Poblacions d'estrelles

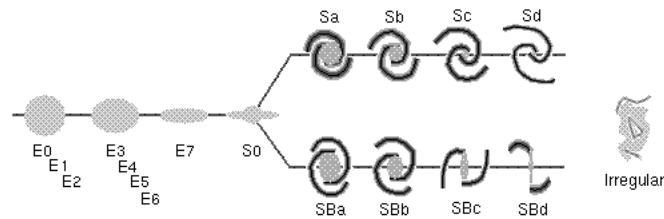
8.7 Centre galàctic

Les velocitats de les estrelles aprop del centre galàctic (derivades per l'anàlisi de l'efecte Doppler) indiquen l'existència d'un forat negre supermassiu de com a mínim 4 milions de masses solars.

9 Altres galàxies

9.1 Tipus

Edwin Hubble va classificar les galàxies en tres grups bàsics: el·líptiques, espirals i irregulars.



The Hubble “tuning fork” Sequence of galaxy classification. Galaxies are classified by shape. The **elliptical** galaxies go from circular (E0) to significantly flattened (E7). The spirals are sub-divided into **regular spirals** and **barred spirals**. Each of them is further sub-divided into groups depending on the size of the central bulge and how tightly the arms are wound around the center. The **irregular** galaxies have no definite structure. This is **not** an evolutionary sequence!

Figura 85: Seqüència de tipus de galàxies de Hubble

No es tracta d'una seqüència evolutiva donat que s'ha observat que totes les tipologies contenen estrelles d'edats antigues.

Si bé la classificació es realitzava inicialment per inspecció visual, també existeix una forma numèrica que es basa en la comparació de la massa de les regions de gas amb la lluminositat total:

- $\frac{M_{HI}}{L_B} \sim 1$ Galàxies irregulars petites
- $\frac{M_{HI}}{L_B} \sim 0.1$ Galàxies espirals
- $\frac{M_{HI}}{L_B} \ll 1$ Galàxies el·líptiques

9.1.1 Galàxies el·líptiques

Les galàxies el·líptiques es suporten per la velocitat de dispersió de les seves estrelles i no per rotació, a excepció de les galàxies el·líptiques nanes que si roten ràpidament. Les seves característiques principals són:

- el moviment de les estrelles és aleatori sense un sentit rotacional fix.
- tenen molt poc gas i pols entre estrelles (no hi ha formació de noves estrelles)

Les galàxies el·líptiques es troben subclassificades en funció del seu grau d'aplanament (p.ex. E7 és més pla que E0).

Les nanes el·líptiques, junt amb les nanes irregulars, són el tipus més comú de galàxia.



Figura 86: M32, nana el·líptica tipus E2 al costat de la galàxia andromeda

També existeixen el·líptiques gegants anomenades galàxies cD que s'han format a partir de col·lisions i fusions de galàxies.

9.1.2 Galàxies espirals

Les galàxies espirals tenen discos plans amb braços, algunes tenen també una barra de gas al centre. Les principals característiques:

- presenten un moviment ordenat rotant al voltant del centre.
- disposen de gas i pols entre les estrelles (formació d'estrelles en marxa).



Figura 87: M31, la galàxia andromeda

La brillantor al disc a galàxies de tipus espiral cau en forma exponencial:

$$I(R) = I_d e^{\left(\frac{-R}{R_d}\right)} \quad (53)$$

a on $I_d = I(0)$ i R_d és la longitud d'escala del disc (2-3kpc a la nostra galàxia)

Mentre que la brillantor al bulb es comporta com una galàxia el·líptica:

$$I(R) = I(0) e^{-kR^{\frac{1}{n}}} = I(R_e) e^{-b_n \left(\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/n} - 1\right)} \quad (54)$$

a on $n \sim 4$ i $b_n \sim 2n - 0.324$ per el·líptiques. R_e és el radi efectiu, a on hi ha el 50% de la lluminositat ($n \sim 1$ per espirals, $n \sim 4$ per el·líptiques)

Per altra banda, la distribució vertical de brillantor al disc (eix z) presenta la següent relació:

$$I(R, z) = I(R) e^{\frac{-|z|}{h_z}} \quad (55)$$

9.1.3 Galàxies irregulars

Les galàxies irregulars no tenen una forma definida. Algunes contenen molt gas i pols i per tant, hi ha formació estel·lar.

Les nanes irregulars, juntament amb les nanes el·líptiques, són el tipus de galàxia més comú.



Figura 88: Núvol gran de Magellanes (orbita la via lactea)

9.2 Mesura de distàncies a galàxies

Les distàncies entre galàxies són molt grans i es mesuren habitualment en megaparsecs (1 megaparsec = 3,3 milions d'anys llum). Per exemple, la distància entre la via lactea i andromeda (la galàxia espiral més propera) és de 0,899 megaparsecs.

9.2.1 Estrelles variables o supernoves tipus Ia

Per galàxies properes, un mètode per determinar la distància és utilitzant la relació període-luminositat de les cefeides.

D'altra banda, per les galàxies més distant s'utilitzen les supernoves tipus Ia per la seva elevada brillantor.

9.2.2 Relació Faber-Jackson

Sandra Faber i Robert Jackson van descobrir al 1976 una relació entre les velocitats de dispersió de les estrelles i la lluminositat de les galàxies el·líptiques:

$$v_{dispersion} = 220 \cdot \left(\frac{L}{L_{\star}} \right)^{0.25} \quad (56)$$

a on L_{\star} és la lluminositat característica d'una galàxia (al voltant dels 10.000 milions de lluminositat solars).

La velocitat de dispersió pot ser obtinguda a partir del gruix de les línies d'absorció d'estrelles o les emissions radio del gas en una galàxia. Aquestes seran més amples com més elevada sigui la velocitat de dispersió.

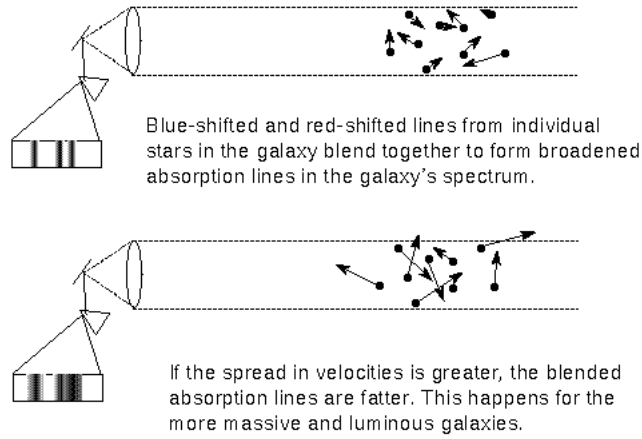


Figura 89: Velocitat de dispersió d'una galàxia el·líptica

Amb la relació Faber-Jackson es possible obtenir la lluminositat i deduir la distància utilitzant la llei de l'invers al quadrat.

9.2.3 Relació Tully-Fisher

Al 1977 Brent Tully i Richard Fisher van descobrir una relació similar entre la velocitat de rotació del disc (mesurat utilitzant la radiació de 21 cm) i la lluminositat d'una galàxia espiral. Com més ràpid rota el disc, més amples són les línies d'emissió de 21 cm.

$$v_{\text{circular}} = 220 \cdot \left(\frac{L}{L_{\star}} \right)^{0.22} \quad (57)$$

a on L_{\star} és la lluminositat característica d'una galàxia (al voltant dels 10.000 milions de lluminositat solars).

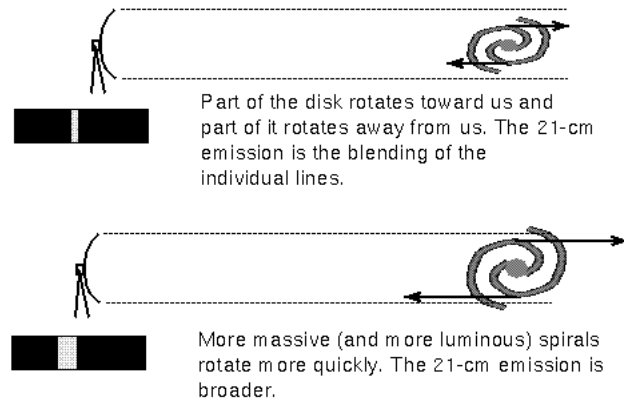


Figura 90: Velocitat de rotació d'una galàxia espiral

Amb la relació Tully-Fisher es possible obtenir la lluminositat i deduir la distància utilitzant la llei de l'invers al quadrat.

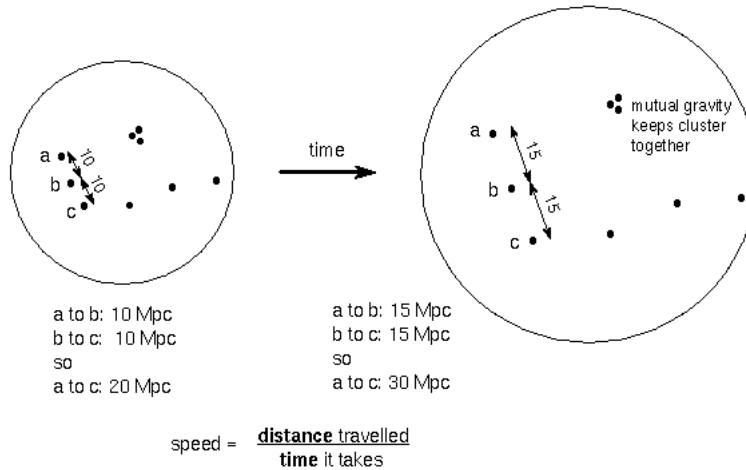
9.2.4 Llei de Hubble

Un altre mètode per trobar distàncies és utilitzar la llei de Hubble, la qual relaciona la distància a la que es troba una galàxia amb la velocitat que s'allunya de nosaltres degut a l'expansió de l'univers:

$$speed_{recession} = H_0 \cdot distance \quad (58)$$

a on H_0 és la constant de Hubble.

Si la distància es mesura en megaparsecs i la velocitat en km/s, la constant de Hubble es troba entre 70 i 80 km/s/Mpc.



expansion of **space between** galaxies (or galaxy clusters) moves galaxies away from each other. If the time interval for the situation above is 6.5 billion years, then galaxy (b) appears to be moving at a speed of $5 \text{ Mpc} / (6.5 \text{ billion yr}) = 0.77 \text{ Mpc/by} (= 770 \text{ km/sec})$ from galaxy (a). Galaxy (c) is **twice as far** and appears to be moving **twice as fast**: $10 \text{ Mpc} / (6.5 \text{ billion yr}) = 1.54 \text{ Mpc/by} (= 1,540 \text{ km/sec})$.

Figura 91: Velocitat d'expansió de l'univers

La llei de Hubble seria aplicable des de qualsevol punt de l'univers donat que aquest s'expandeix uniformement.

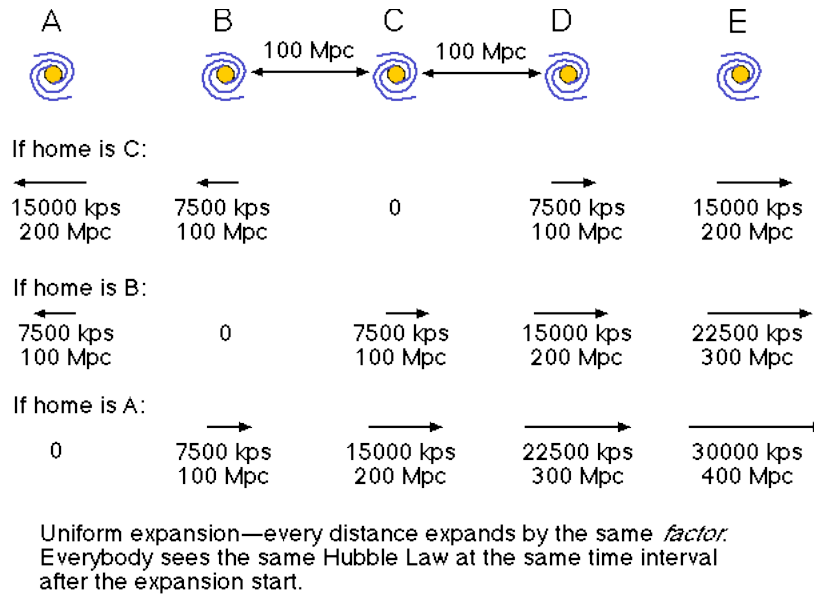


Figura 92: Expansió de l'univers vista des de diferents galàxies

9.3 Nombre d'estrelles

És possible estimar el nombre d'estrelles d'una galàxia dividint la lluminositat o massa total pel la lluminositat o massa d'una estrella típica, o utilitzant la funció de lluminositat o massa d'una galàxia (relació de la proporció d'estrelles per cada rang de lluminositat o massa).

9.4 Massa total

Per galàxies espirals, la corba de rotació pot ser utilitzada per determinar la seva massa:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{d} = \frac{GMm}{d^2} \Rightarrow M_{in\ orbit} = \frac{d_{to\ galactic\ center} \cdot v_{in\ orbit}^2}{G} \quad (59)$$

La velocitat pot ser obtinguda per observació de l'efecte Doppler de la radiació de 21 cm. La distància al centre galàctic s'obté mitjançant:

$$d_{to\ galactic\ center} = \frac{2\pi \cdot d_{to\ galaxy} \cdot d_{angular\ in\ degrees}}{360^\circ} \quad (60)$$

Per galàxies el·líptiques, el gruix de les línies d'absorció de totes les estrelles s'utilitza per determinar la velocitat de velocitat i així aplicar:

$$M_{elliptical} = k \cdot \frac{v_{dispersion}^2 \cdot d_{to\ galactic\ center}}{G} \quad (61)$$

a on k és un factor que depen de la forma de la galàxia i l'angle des del que es veu des de la terra.

9.5 Cúmul de galàxies

La via lactea forma part d'un cúmul poc poblat de galàxies anomenat Grup Local. Aquest conté:

- Dos grans galàxies espirals (via lactea i andromeda)
- Una petita galàxia espiral

- Dos galàxies el·líptiques
- I com a mínim
 - 19 irregulars
 - 17 nanes el·líptiques
 - 5 nanes esferoïdals

El cúmul de Virgo és el més proper, es troba a 45-59 milions d'anys llum. La massa total es suficientment gran per a estar lligada als grups del seu voltant (inclos el grup local).

9.6 Superclusters

Els cúmuls de galàxies s'atrauen mutuament per formar supercluster de decenes fins a centenars de cúmuls.

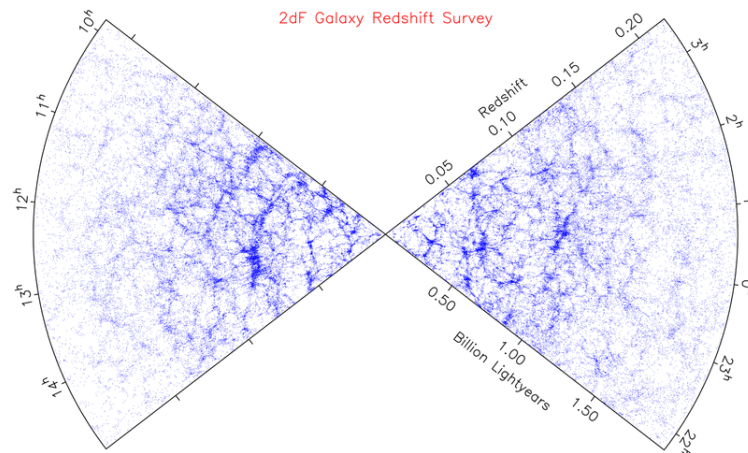


Figura 93: Estructura de galàxies a l'univers

L'estructura de l'univers mostra com hi ha una estructura a on determinades galàxies es troben properes i existeixen regions buides. Les simulacions per ordinador han arribat a aconseguir obtenir el mateix patró.

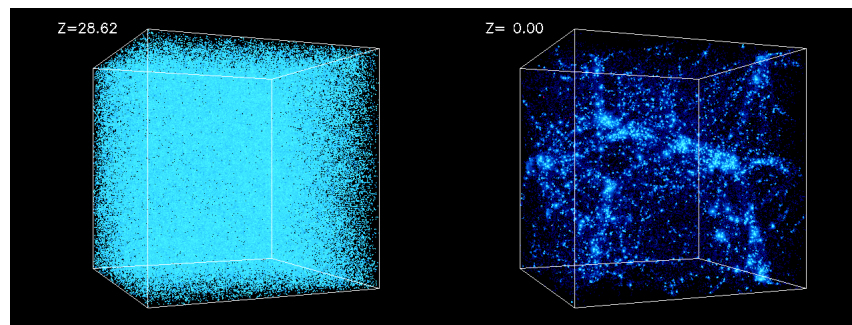


Figura 94: Simulació de la formació de l'estructura de galàxies

9.7 Origen

Totes les galàxies van iniciar la seva formació fa 13.000 milions d'anys. Existeixen principalment dos models que expliquen la seva formació:

- Model top-down: Les galàxies es van formar a partir de núvols enormes de gas, més grans que la galàxia resultant i aquesta pot ser:
 - El·líptica: el gas tenia una rotació lenta, la majoria de les estrelles es van formar abans de que el núvol s'arribés a aplanar per crear un disc.
 - Espirals: el núvol de gas presentava una rotació elevada.
- Model bottom-up: la fusió de grups més petits de l'ordre de milions de masses solars van formar les galàxies.
 - Aquests grups van iniciar el seu col·lapse quan l'univers era molt jove.
 - Aquest model prediu dos fets que encaixen amb les observacions:
 - * Existeixen més galàxies petites que grans.
 - * Els cúmuls de galàxies i els supercluster han d'estar encara en procés de formació

La col·lisió i fusió de galàxies també té un rol important en la evolució d'aquestes. Quan dos galàxies col·lisions, les estrelles es veuen afectades gravitatoriament però no es produeix cap xoc degut a l'ampli espai existent. En canvi, el gas que col·lisiona es veu pertorbat i s'inicia la formació massiva d'estrelles.

10 Galàxies actives

10.1 Quàsars

Els quàsars (quasi-stellar radio sources) són galàxies amb un nucli molt lluminós i amb les següents característiques:

- Amplis envermelliments: per la llei de Hubble es pot determinar que aquests objectes es troben a regions molt llunyanes fora de la Galàxia.
- Des de centenars fins a milers de vegades més lluminoses que una galàxia ordinària.
- La lluminositat varia en escales de temps de pocs mesos fins a pocs dies.
- Tota l'energia es produeix en un volum petit de l'espai. Els quàsars que varien la seva lluminositat en pocs mesos són del tamany del sistema solar.
- L'espectre és no termal, al contrari de les estrelles o galàxies ordinàries que depenen de la temperatura.
- Lluminoses en rajos X, ultravioleta, visible, infraroig i radio.

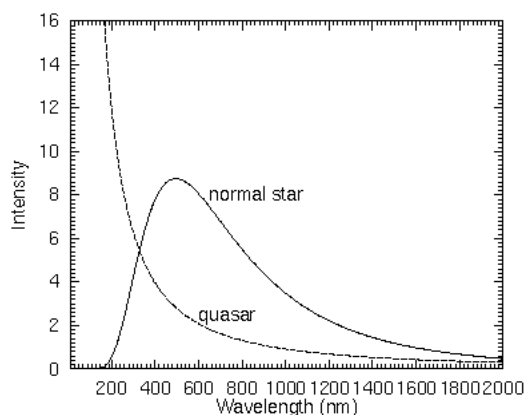


Figura 95: Espectre d'un quàsar vs estrella

- Els quàsars es troben en cúmuls de galàxies molt llunyanes.

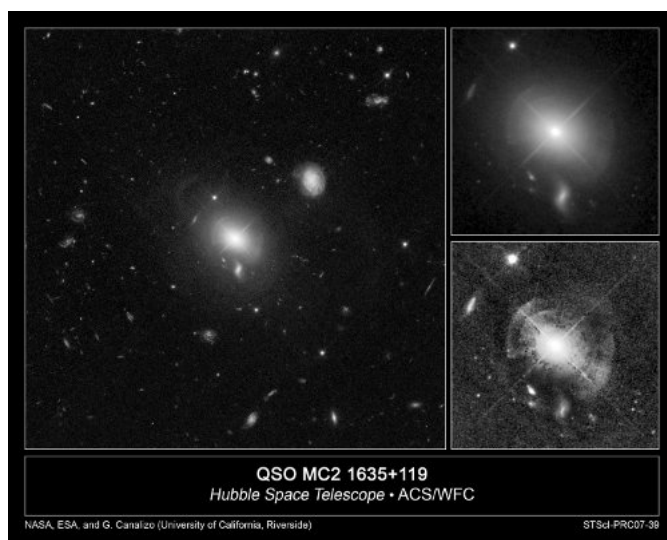


Figura 96: Quàsar MC2

10.2 Altres galàxies actives

Les galàxies actives tenen lluminositats entre la produïda per galàxies típiques i els poderosos quasars:

- Galàxies Seyfert: galàxies espirals amb un nucli compacte i molt brillant que produeix un espectre continu no termal.
- Galàxies Radio: el seu nucli emet una gran quantitat d'energia radio i presenta jets d'electrons.

10.3 Font d'energia

El nombre d'estrelles necessàries per produir la lluminositat d'una galàxia activa no pot ser encabida en una regió tan petita i tampoc produirien una radiació no tèrmica.

La radiació podria provenir de gas calent en un disc d'acreciment al voltant d'un forat negre supermassiu. Si existeix un fort camp magnètic, podria ser el causant del jets d'electrons que emeten en la banda radio.

Amb el temps, es consumirà el disc d'acreciment i la galàxia deixarà d'emetre amb tanta intensitat. Fusions i col·lisions amb altres galàxies pot ajudar a incrementar el disc, no obstant, degut a l'expansió de l'univers, el rati al que es poden donar aquest tipus d'interaccions ha decrescut considerablement.

11 Cosmologia

La cosmologia és l'estudi de la naturalesa, origen i evolució de l'univers com a conjunt.

11.1 Expansió de l'univers

Newton va proposar tres opcions per les quals l'univers no col·lapsa per la gravetat de la massa que conté:

- L'univers es infinit en volum i massa (opció escollida per Newton).
- L'univers s'està expandint a una velocitat suficient per superar l'atracció gravitatòria.

- L'univers té un principi i un final.

La paradoxa de Olbers postula que si l'univers és infinit, etern i estatic, llavors el cel hauria de brillar amb la mateixa intensitat que el sol. Si l'univers es uniformement omplert amb galàxies, llavors en qualsevol direcció trobaríem una galàxia. En canvi, el cel visible és fosc.

Einstein va aplicar la seva relativitat general al univers com a conjunt i va mostrar que aquest ha d'expandir-se o contraure's. Com no hi havia evidència d'aquest moviment a gran escala, va afegir un terme a les seves equacions anomenat "constant cosmologica" per mantenir l'univers estàtic.

Més tard, Einstein va estar d'acord amb l'astrofísic i religiós belga Georges Lemaître en que l'univers s'esta expandint quan Hubble va anunciar les seves observacions al 1929.

Més tard, Lemaître va apuntar sobre com podria haver sigut el principi de l'univers, a la teoria es va anomenar Big Bang i Einstein també la va acceptar.

A mesura que l'univers s'expandeix, l'energia de la llum es veu reduïda. Per tant, la brillantor aparent es redueix lo suficient com per fer que el cel sigui fosc (resolent així la paradoxa d'Olbers).

La constant de Hubble H_0 es troba relacionada amb l'expansió de l'univers i l'edat de l'univers es pot estimar a partir de la relació $time = \frac{distance}{speed}$. Llavors, si es rescric la llei de Hubble $\frac{1}{H_0} = \frac{distance}{speed}$, es pot relacionar el temps de l'univers amb la constant de Hubble:

$$time = \frac{1}{H_0} \quad (62)$$

Aquest valor determina el límit superior de l'edat de l'univers donat que l'expansió s'ha anat aturant per efecte de la gravetat (l'actual constant de Hubble és més gran que al passat). Si es pren en consideració aquest fet, es pot deduir que:

$$time = \frac{2}{3 \cdot H_0} \quad (63)$$

Per tant, com més gran és la constant de Hubble, més petita és l'edat de l'univers.

11.2 L'univers és uniforme a gran escala

A escales de milers de milions d'anys llum, el principi cosmològic és acceptat donat que fa que els models d'univers siguin més simples i raonables:

- L'univers és homogeni. No hi ha cap lloc privilegiat a l'univers.
- L'univers és isotròpic. No hi ha cap diferència en l'estructura de l'univers segons mires en diferents regions.

La relativitat general descriu la gravetat com la distorsió de l'espai temps aprop d'objectes massius. Utilitzarem una analogia utilitzant un mon bidimensional curvat en una tercera dimensió.

Per escales petites, la superfície semblarà que les regles de la geometria regular són vàlides (els angles d'un triangle sumen 180°), però a grans escales hi haurà diferències en funció de la forma de la curvatura de l'espai:

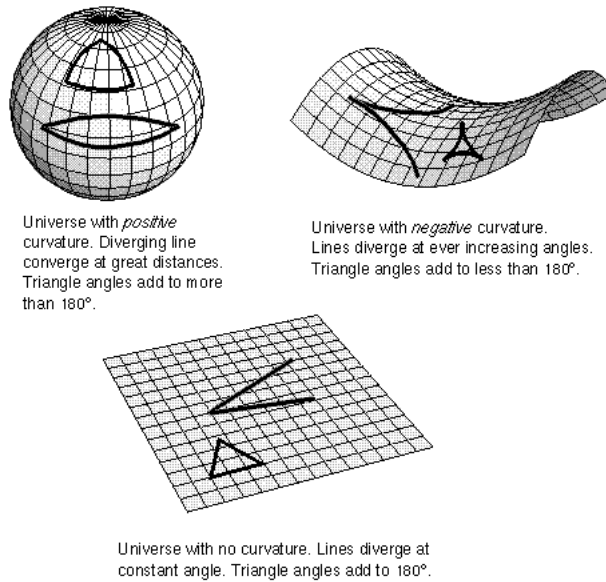


Figura 97: Curvatura de l'espai

Per determinar com és el nostre univers, es valora com incrementa el nombre de galàxies per distàncies grans:

- Si l'univers no té curvatura, les galàxies es distribuïran de forma uniforme i incrementaran de forma lineal com més lluny observem.
- Si l'univers té una curvatura positiva, llavors el nombre de galàxies incrementaria per distàncies llunyanes per després decrementar per distàncies molt molt llunyanes.
- Si l'univers té curvatura negativa, llavors el nombre de galàxies incrementa més ràpidament que en un univers pla (sense curvatura).

11.3 Radiació còsmica microones de fons i primers instants de l'univers

Inicialment l'univers es trobava concentrat en un volum molt petit i resplendia en la banda dels rajos gamma, més tard a la banda dels rajos X i cada cop en bandes menys energètiques fins que avui en dia ho fa en la banda radio i l'anomenem radiació còsmica microones de fons (CMB per les sigles en anglès de Cosmic Microwave Background Radiation).

La CMB radia com una font termal continua a 2.728 ± 0.004 K segons mesurat pel satèl·lit COBE.

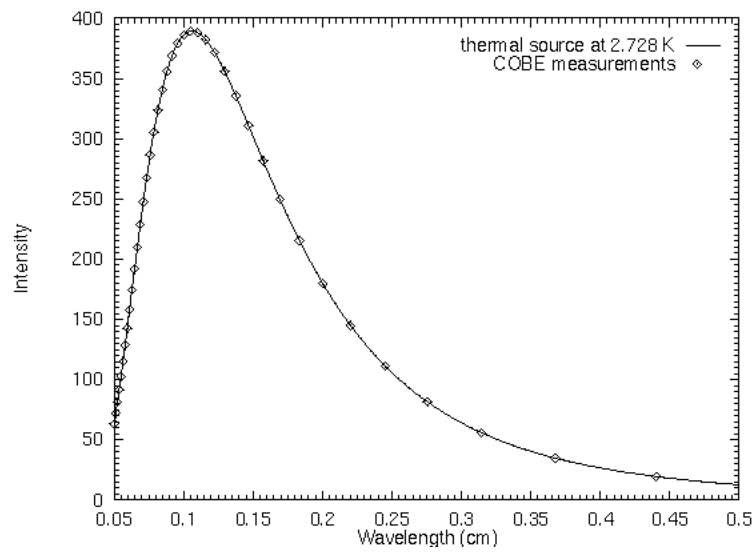


Figura 98: Radiació còsmica microones de fons

La radiació microones prové de l'univers de poc centenars de milers d'anys després del Big Bang. L'univers era molt calent i opac, els fotons no es podien desplaçar molt lluny abans que no fossin absorbits. A mesura que l'univers s'ha expandit i refredat, els electrons i protons es van poder recombinar per formar àtoms d'hidrogen sense ser trencats per fotons energètics.

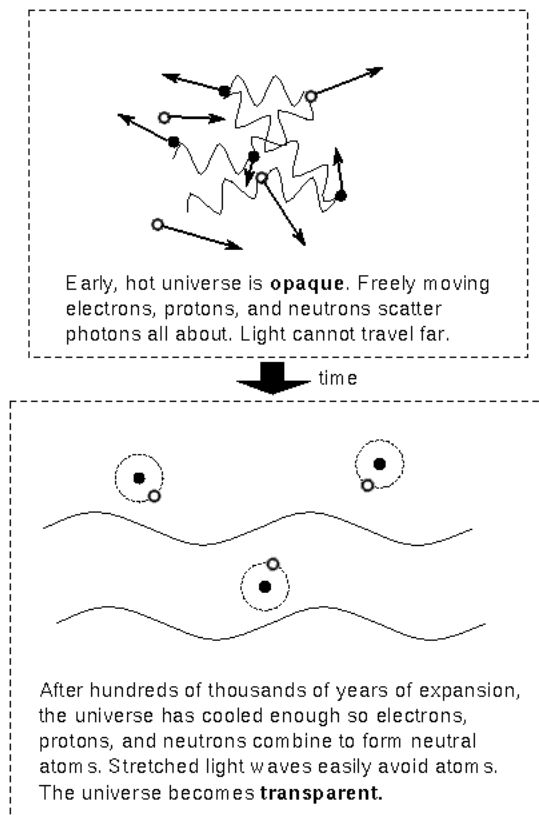


Figura 99: Procés de recombinació

L'univers es va fer transparent 380.000 anys després del Big Bang quan estava a una temperatura de 3.000 K.

Donat que la gravetat és simètrica, són necessàries petites variacions inicials per fer que la matèria s'agrupi per l'atracció i per tant l'univers no era perfectament uniforme. El satèl·lit COBE va trobar petites variacions en la radiació de fons i el satèl·lit WMAP va mesurar-ho amb major precisió:

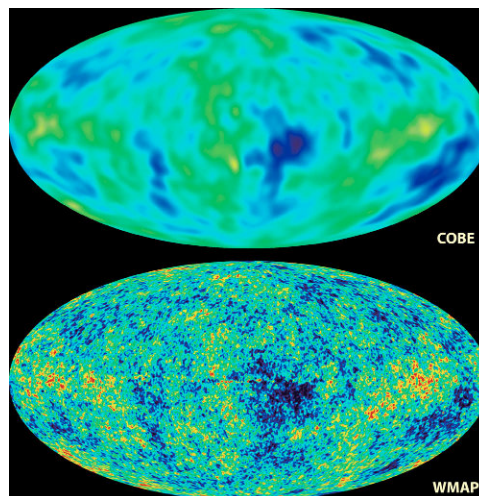


Figura 100: Radiació de fons segons COBE i WMAP

Els models cosmològics anomenen com a època fosca, l'era en la que l'univers va fer-se transparent:

- Formació de les primeres estrelles a les galàxies i els forats negres als quàsars, els quals van començar a omplir l'univers amb llum ultravioleta.
- La llum ultra-violeta va re-ionitzar el gas, alliberant electrons.
- La llum del CMB va dispersa els electrons i es va polaritzar, per tant les ones tendeixen a oscil·lar en una determinada direcció.
- WMAP va detectar la polarització de la CMB i va derivar que aquesta es va produir 400 milions d'anys després del Big Bang.

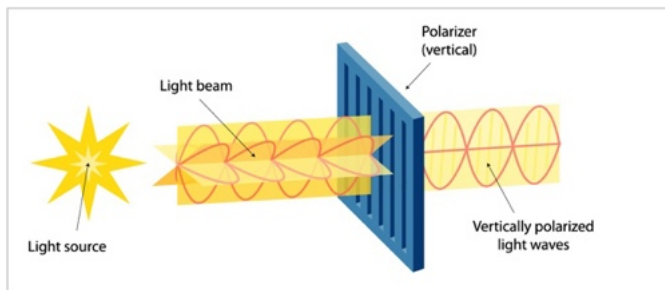


Figura 101: Polarització de la llum

11.4 Conversió matèria - energia

La massa pot ser convertida en energia i viceversa ($E = m \cdot c^2$). Els primers 10^{-6} segons de l'univers, l'energia dels fotons era suficientment gran com per crear partícules:

- Matèria: electrons i protons
- Antimatèria: anti-electrons (positrons) i anti-protons (mateixa massa però signe oposat)

Les trobades de matèria i antimatèria provoquen la seva anihilació i generen de nou fotons molt energètics, fent el procés recursiu.

Quan la temperatura de l'univers va arribar als $10^{13} K$ al primer microsegon després del Big Bang, aquest procés es va aturar pels protons. I a la temperatura de $6 \cdot 10^9 K$ també es va aturar pels electrons.

Els neutrons van ser creats en el procés de conversió energia-matèria però altres van ser creats per la fusió de protons i electrons.

Per raons encara no conegudes, existeix un excés de matèria ordinària per sobre d'antimatèria. Tots els protons, neutrons i electrons a la matèria actual van ser creats als primers segons després del Big Bang.

Als 2-3 minuts, l'univers es va expandir i refredar per sota dels $10^9 K$ i els protons i neutrons van poder fusionar-se. Als 15 minuts, aquest procés es va aturar degut a l'expansió i refredament de l'univers.

La composició de l'univers era de 10% d'heli + 90% d'hidrogen en nombre d'àtoms i 25% d'heli + 75% d'hidrogen en massa.

11.5 Destí de l'univers

L'univers està en expansió i la gravetat és la força que pot aturar-ho. En comptes d'intentar mesurar tota la massa de l'univers, una aproximació més raonable és trobar la densitat d'una regió representativa de l'espai:

$$\text{density} = \frac{\text{mass in the region}}{\text{volume of the region}} \quad (64)$$

$$\text{mass in the universe} = \text{density} \cdot \text{volume of the universe} \quad (65)$$

Per determinar el destí de l'univers s'ha de comparar la densitat actual amb la densitat crítica:

$$W = \Omega_0 = \frac{\text{density}}{\text{critical density}} \quad (66)$$

$$\text{critical density} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (67)$$

a on H_0 és la constant de Hubble.

En conseqüència:

- Si hi ha suficient matèria (gravetat) com per recol·lapsar l'univers, aquest és tancat ($\Omega_0 > 1$).
- Si no hi ha suficient matèria, l'univers es mantindrà expandint per sempre i és obert ($\Omega_0 < 1$).
- Si l'univers té exactament la densitat crítica, llavors es pla ($\Omega_0 = 1$).

Tornant a l'analogia d'un món bidimensional que es corba en una tercera dimensió:

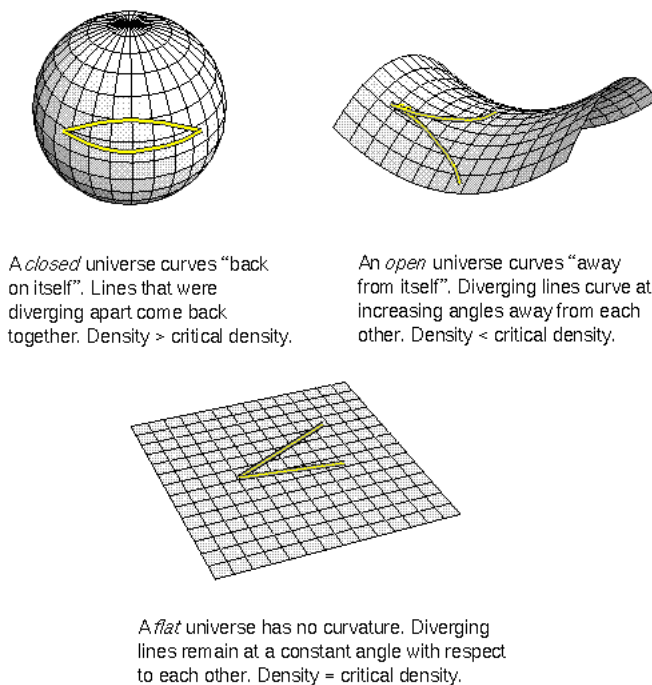


Figura 102: Tipus d'univers segons la seva curvatura

Les estimacions actuals de la massa total (matèria visible i fosca) indiquen que només hi ha un 28% de la matèria necessària per aturar l'expansió (5% matèria ordinària + 23% matèria fosca).

Una forma alternativa d'observar la geometria de l'univers és analitzant les fluctuacions a la CMB:

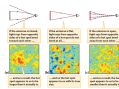


Figura 103: Fluctuacions a la CMB i la curvatura de l'univers

Experiments amb COBE i WMAP indiquen que la geometria de l'univers és plana, en contradicció amb els càlculs de massa total. Per tant, per fer que això sigui possible es creu que existeix l'energia fosca (72%).

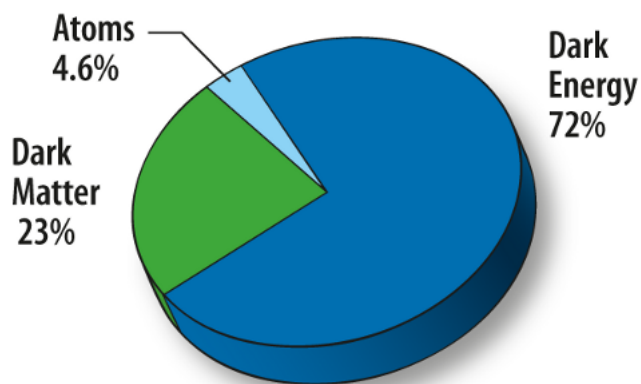


Figura 104: Percentatges d'àtoms, energia i matèria fosca

Encara és un misteri si l'energia fosca actua com la constant cosmològica d'Einstein (univers en expansió infinita) o com una forma de quintaessència que incrementa el rati d'expansió. Fins i tot, altres formes d'energia fosca podrien fer que l'univers es recol·lapsi després de l'actual període d'acceleració de l'expansió.

11.6 Problemes amb la teoria del Big Bang

11.6.1 Problema de l'univers pla

El balanç necessari per a que la densitat de l'univers sigui tan propera a la densitat crítica és un fet difícil i poc probable. Qualsevol petita desviació a la creació de l'univers es magnificaria amb el pas del temps.

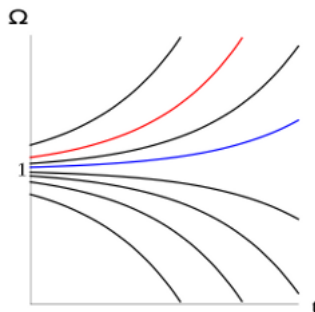


Figura 105: Densitat superior a la crítica (vermell) i densitat actual (blava)

Per exemple, si la densitat de l'univers fos lleugerament més gran que la densitat crítica, milers de milions d'anys després del Big Bang l'univers ja hauria col·lapsat.

11.6.2 Problema de l'horitzó

Qualsevol direcció en la que s'observi l'univers és uniforme, especialment la CMB. No obstant, per a que dos regions tinguin les mateixes condicions (p.ex. temperatura), han d'estar suficientment aprop com per haver intercanviat informació en el temps de vida que té l'univers (la informació no pot viatjar més ràpid que la velocitat de la llum).

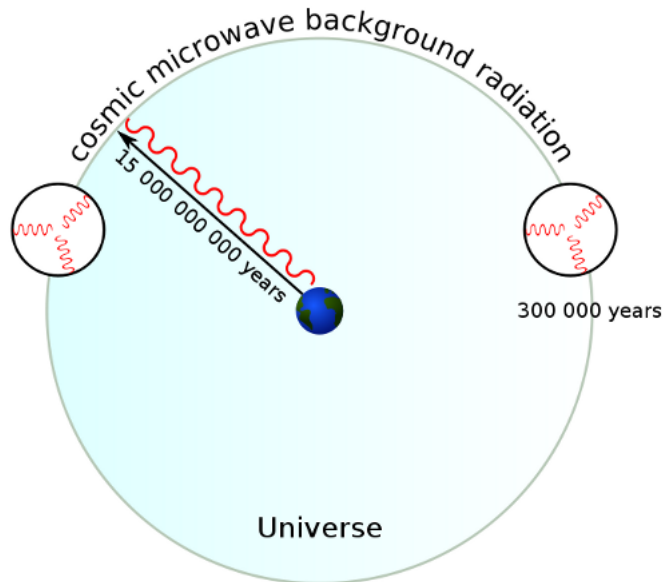


Figura 106: Problema de l'horitzó

Els fotons de la CMB que han viatjat fins nosaltres des d'una regió de l'espai no han pogut intercanviar informació amb aquells que procedeixen de la regió oposada.

11.6.3 Inflació, la solució

En termes teòrics, s'ha establert que durant una època inicial l'univers va experimentar una expansió del espai-temps superior a la velocitat de la llum (inflació). La teoria més popular que explica aquesta expansió ultra-ràpida indica que va tenir lloc quan hi va haver una separació de la força fonamental de la natura.

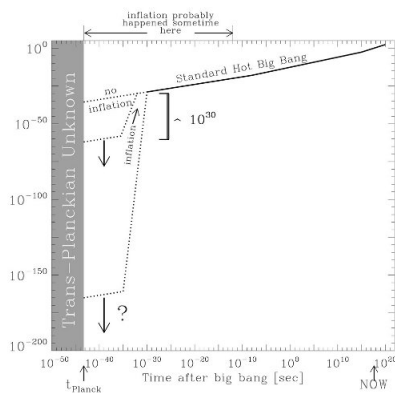


Figura 107: Història de l'expansió de l'univers

Als 10^{-38} segons després del Big Bang, l'univers es va refredar fins als $10^{29} K$ i la força nuclear es va separar de la força feble i de les forces electromagnètiques. Aquesta separació va produir una expansió de l'univers de 10^{50} vegades en només 10^{-36} segons.

Aquesta teoria resol els següents problemes:

- Problema de l'univers pla: Un univers corbat que ha sigut fortament expandit pot semblar pla de forma local.

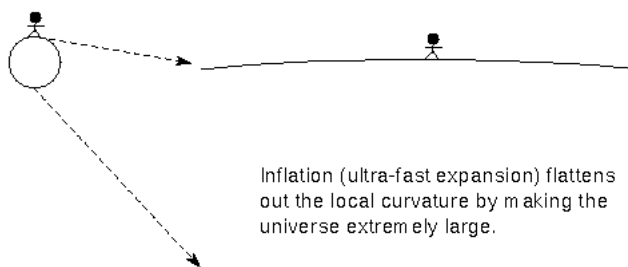


Figura 108: Solució al problema de l'univers pla

- Problema de l'horitzó: hi va haver una època a on les regions que ara observem estaven en contacte.

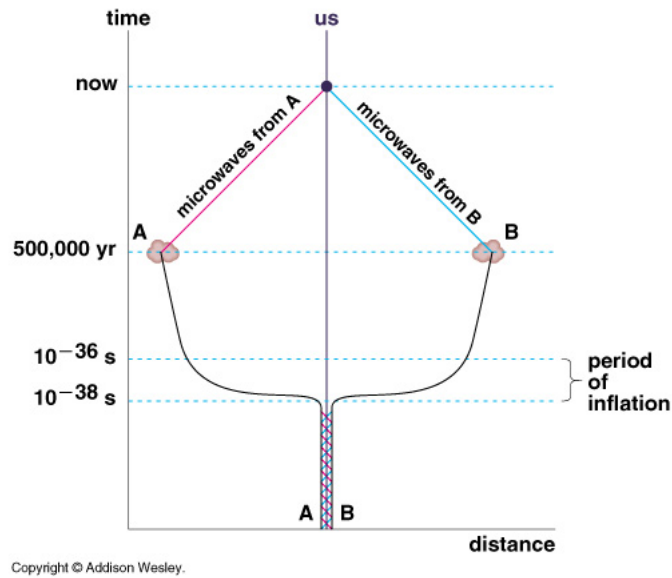


Figura 109: Solució al problema de l'horitzó

- Asimetria entre matèria i antimatèria: La teoria inflacionista prediu que un dels efectes de l'expansió ultra-ràpida és l'existència de matèria que no ha sigut anihilada.

Per altra banda, la física quàntica prediu que existeixen fluctuacions espontànies de matèria-energia a qualsevol punt de l'espai (inclús al buit). Aquestes es donen en un temps suficientment curt com per a que no puguin ser notades. Aquestes partícules virtuals produeixen efectes mesurables com:

- L'aparició de partícules virtuals electró-positró altera el nivell d'energia d'un electró orbitant un nucli.
- Efecte Casimir: Dos plaques properes són empeses per l'existència d'un nombre superior de partícules virtuals als costats que al forat entre les plaques.

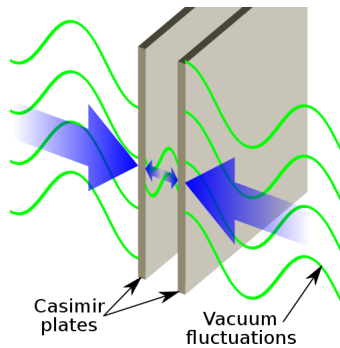


Figura 110: Efecte Casimir

A l'inici de l'univers, la ultra-ràpida expansió de l'univers podrien haver estirat les fluctuacions quàntiques fins a tamanyos suficientment grans com per ser les llavors per a la formació de les galàxies.

12 Vida més enllà de la terra

12.1 Zona habitable

La zona habitable és una regió a on un planeta que orbita una estrella pot tenir una temperatura a la superfície per sobre del punt de congelació (0°C) i el punt de d'ebullició (100°C) de l'aigua.

Considerant que el planeta:

- Té la mateixa reflectivitat que la terra (núvols i material de la superfície)
- Radia l'energia solar que absorbeix del sol amb la mateixa eficiència que la terra.
- Té un període rotacional com el de la terra

Llavors, la zona d'habitabilitat per a una estrella com el sol (G2 a la seqüència principal) es troba entre els 0,63 i 1,15 A.U. Per altres tipus d'estrelles es pot utilitzar la llei inversa al quadrat:

$$\text{star boundary} = \text{Sun boundary} \cdot \sqrt{\frac{L_{\star}}{L_{\odot}}} \quad (68)$$

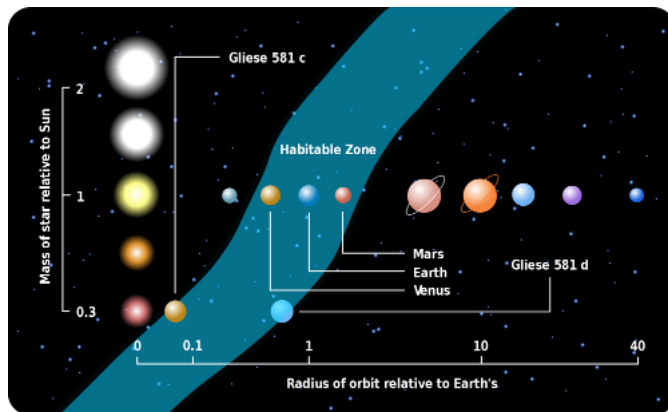


Figura 111: Zona d'habitabilitat

La cerca s'està centrant actualment en estrelles de la seqüència principal entre 0,5 i 1,4 masses solars.

Les estrelles menys massives tenen temps de vida més llargs però les zones habitables són més estretes i properes a l'estrella.

Per altra banda, es necessita que el núvol de gas del qual s'ha format l'estrella hagi sigut ric en elements pesats (p.ex. carboni, nitrogen, oxigen, fòsfor, sulfur, crom, ferro i níquel) necessaris per a les reaccions bioquímiques.

La majoria d'estrelles a la Galàxia tenen una companya (sistemes binaris o múltiples). En aquest cas, els sistemes més adients són aquells que:

- les estrelles binàries orbiten molt aprop i els planetes orbiten les dues en conjunt a distàncies llunyanes
- o el sistema binari orbita lluny una estrella de l'altre, de forma que els planetes tenen una òrbita estable aprop de cadascuna de les estrelles.

12.2 Vida

Característiques per a considerar un organisme viu:

1. Organització: Tots els organismes vius estan organitzats i estructurats en molècules, cèl·lules, òrgans, sistemes, individus i fins i tot poblacions, comunitats i ecosistemes.

2. Manteniment (metabolisme): Per superar l'entropia (tendència d'un sistema a desordenar-se i perdre complexitat), els organismes vius utilitzen energia per mantenir l'homeòstasi (p.ex. mantenir l'estructura interna constant). El metabolisme és un terme per descriure les reaccions químiques i físiques que tenen resultat en la vida.
3. Creixement: l'organisme viu es desenvolupa i creix.
4. Resposta a estímuls: l'organisme viu reacciona a la informació que prové del seu exterior i de l'interior
5. Reproducció: Els individus es reproduïxen com a conjunt i a nivell cel·lular. En ocasions la informació genèrica és alterada i aquestes mutacions donen lloc a variacions en l'espècie.
6. Variacions: Els organismes vius són molt diversos degut a les mutacions i recombinacions genètiques.
7. Adaptació als canvis en el medi

12.3 Planetes habitables

Un planeta habitable ha de tenir:

- Temperatura estable
- Un mitja líquid, preferentment aigua.
- Els elements essencials per a la vida: carboni, hidrogen, nitrogen, oxigen, fòsfor, sulfur, ferro, crom i níquel. El carboni es la base per a la vida gràcies a la seva versatilitat per formar compostos amb altres elements o amb si mateix.
- Una superfície sòlida per concentrar els elements essencials per a la vida i el mitja líquid.
- Suficient gravetat per mantenir una atmosfera: proporciona protecció contra radiació, modera els canvis de temperatura i prove a la superfície de la pressió necessària per a l'existència del líquid.
- Una lluna gran podria ser necessària per evitar grans canvis de temperatura donat que evitaria que l'eix de rotació del planeta patís de grans desviacions.
- Tectònica de plaques podria ser necessària per tal de:
 - Regular la temperatura a la superfície gràcies al cicle del carboni
 - Creació d'un camp magnètic per protegir el planeta del vent estel·lar
 - Creació de terra a per sobre del mitja líquid

La vida podria existir en un planeta sense oxigen i la fotosíntesis podria utilitzar algun altre element com el sulfur. La vida podria utilitzar un mitjà líquid diferent a l'aigua com per exemple el metà o l'età. I com element bàsic podria utilitzar el silici en comptes del carboni. No obstant, la cerca actual s'enfoca en aquells processos que són més familiars amb el nostre entorn.

12.4 Estimació del nombre de civilitzacions

L'equació de Drake proporciona un mecanisme per estimar el número de civilitzacions avançades amb capacitat de comunicacions que viuen a la Galàxia. N és un número obtingut multiplicant els factors proposats per Drake al 1961, no obstant no existeix un acord científic sobre els valors de cada element:

- Rati de formació estel·lar: 10 estrelles per any
- Mitja de la fracció d'estrelles amb planetes: 50% de les estrelles

- Mitja del nombre de planetes tipus terra: 50% dels planetes
- Mitja de la fracció de planetes amb vida: 100% del planetes tipus terra
- Mitja de la fracció de planetes a on la vida ha arribat a ser intel·ligent: 1% dels planetes amb vida
- Mitja de la fracció de planetes amb vida intel·ligent que poden realitzar comunicacions interestel·lars: 1% dels planetes amb vida intel·ligent
- Temps mig de vida de la civilització amb tecnologia activa: 10.000 anys

L'equació de Drake dona $N = 10 \times 0.5 \times 2 \times 1 \times 0.01 \times 0.01 \times 10,000 = 10$ civilitzacions avançades amb capacitats de comunicació han habitat la nostra Galàxia.

13 Annex I. Mesura de distàncies

Identificar distàncies és crític en astronomia donat que permet:

- Obtenir la lluminositat i massa d'estrelles i galàxies
- Determinar la distribució de massa d'estrelles a galàxies/cúmuls
- Estimar quanta matèria fosca es troba distribuïda entre galàxies
- Determinar la geometria de l'espai a gran escala

A continuació és llisten alguns mètodes per determinar distàncies començant per les més acurades:

1. Reflectivitat d'ones radar: per exemple, utilitzant Venus s'ha pogut determinar la distància al sol (Unitat Astronòmica). Pot ser utilitzat fins a 50 A.U.
2. Mètodes geomètrics: mesura de paral·laxis trigonometriques o cúmuls en moviment. Poden ser utilitzats fins a centenars de parsecs.
3. Seqüència principal i paral·laxis espectroscòpica: Utilitzant l'espectre d'una estrella es possible obtenir la lluminositat a partir d'un diagrama color-magnitud calibrat, calculant la distància a partir de la llei de l'invers al quadrat. Aquests mètodes poden arribar fins als 50 kiloparsecs.
4. Relació període-lluminositat per estrelles variables: Cefeides i RR-Lyrae tenen ratis de pulsació lligats a la seva lluminositat. Amb aquesta és possible determinar la distància aplicant la llei de l'invers al quadrat. Poden determinar-se distàncies d'entre 4 i 40 megaparsecs en funció del telescopi.
5. Supernoves tipus Ia: és possible determinar el màxim de lluminositat i obtenir distàncies d'entre 50 i 150 megaparsecs.
6. Llei de Hubble: La relació entre la velocitat de la galàxia i la seva distància ens permet determinar com de llunyanes esta.

14 Annex II. Constant i propietats

14.1 Constants astronòmiques

Constant	Valor
Unitat astronòmica (A.U.)	149,597,870.691 km
Any llum (ly)	$9.460536207 \cdot 10^{12}$ km = 63,240 A.U.
Parsec (pc)	$3.08567802 \cdot 10^{13}$ km = 206,265 A.U.
Any sideral	365.2564 dies
Any tropical	365.2422 dies
Any gregorià	365.2425 dies
Massa de la terra	$5.9736 \cdot 10^{24}$ kilograms
Massa del sol	$1.9891 \cdot 10^{30}$ kg = 332,980 × Terra
Radi mig de la terra	6371 km
Radi del sol	$6.96265 \cdot 10^5$ km = 109 × Terra
Lluminositat del sol	$3.827 \cdot 10^{26}$ Watts

14.2 Constants físiques

Constants	Valor
Velocitat de la llum (c)	299,792.458 km/s
Constant gravitacional (G)	$6.6726 \cdot 10^{-11}$ m ³ / (kg sec ²)
Constant de Boltzman (k)	$1.380658 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin
Constant de Stefan-Boltzmann (σ)	$5.67051 \cdot 10^{-8}$ J/(m ² · K ⁴ · s)
Constant de la llei de Wien	$2.897756 \cdot 10^6$ nanometres Kelvin
Constant de Planck (h)	$6.6260755 \cdot 10^{-34}$ Joules segon

14.3 Propietats dels planetes

Planeta	Distància (A.U.)	Revolució orbital	Eccentricitat	Inclinació (deg)
Mercuri	0.387	87.969 d	0.2056	7.005
Venus	0.723	224.701 d	0.0068	3.3947
Terra	1	365.256 d	0.0167	0
Mart	1.524	686.98 d	0.0934	1.851
Júpiter	5.203	11.862 y	0.0484	1.305
Saturn	9.537	29.457 y	0.0542	2.484
Urà	19.191	84.011 y	0.0472	0.77
Neptú	30.069	164.79 y	0.0086	1.769
<i>Pluto (*)</i>	39.482	247.68 y	0.2488	17.142

Planeta	Massa (x Terra)	Diàmetre (km)	Densitat (g/cm ³)	Rotació	Inclinació eix (deg)	Camp Mag. (x Terra)
Mercuri	0.0553	4879	5.427	58.785 d	~0	0.0006
Venus	0.815	12104	5.243	243.686 d	177.36	0
Terra	1	12742	5.515	23.9345 h	23.45	1

Mart	0.107	6779	3.933	24.6229 h	25.19	0
Júpiter	317.83	139822	1.326	9.9250 h	3.13	19519
Saturn	95.159	116464	0.687	10.656 h	26.73	578
Urà	14.536	50724	1.27	17.24 h	97.77	47.9
Neptú	17.147	49244	1.638	16.11 h	28.32	27
<i>Pluto (*)</i>	0.0021	2390	1.75	6.405 d	122.53	0

Planeta	Gravetat (x Terra)	V esc (km/s)	Albedo (%)	Temperatura (K)	Press. Atm. (x Terra)
Mercuri	0.378	4.3	0.119	100 nit, 590?725 dia	10 ⁻¹⁵
Venus	0.905	10.36	75	737	92
Terra	1	11.186	30.6	283 nit, 293 dia	1
Mart	0.379	5.03	25	184 nit, 242 dia	0.004 - 0.009
Júpiter	2.53	59.5	34.3	165	>>1000
Saturn	1.065	35.5	34.2	134	>>1000
Urà	0.905	21.3	30	76	>>1000
Neptú	1.14	23.5	29	72	>>1000
<i>Pluto (*)</i>	0.059	1.2	40 to 60	~50	3 x 10 ⁻⁶

14.4 Propietats del sol

- Radi: $R_{\odot} = 700.000 km$
- Massa: $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} kg$ en comparació, la via lactea té $M_{MW} = 2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
- Edat: $\approx 5 \cdot 10^9 anys$ i la terra ha existit des de $\approx 4,5 \cdot 10^9 anys$
- Lluminositat: $L_{\odot} = 3,86 \cdot 10^{26} W$
- Constant solar a la terra (flux): $f = 1,36 \cdot 10^6 erg s^{-1} cm^{-2} = 1,36 \cdot 10^3 W m^{-2}$
- Temperatura efectiva a la superfície (fotosfera): $T_{eff\odot} = 5.800 K$
- Magnituds a diferents bandes
 - $M_{B,\odot} = 5,48 mag$
 - $M_{V,\odot} = 4,83 mag$
 - $M_{K,\odot} = 3,31 mag$
- Magnitud bolomètrica: $M_{Bolometrica,\odot} = 4,75 mag$
- Metalicitat: $Z_{\odot} = 0,02$
- Composició atòmica:

Element	% en massa
H	70%
He	30%
Altres	$\sim 2\%$

14.5 Propietats de l'univers

- Edat de l'univers: $\approx 13,7 \cdot 10^9 \text{ anys} = 13,7 \text{ Gyr}$ (*Gigayear*)
- Diàmetre: $\approx 28 \cdot 10^9 \text{ pc} \sim 93 \cdot 10^9 \text{ al}^6$
- Densitat actual: $\rho \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \sim 1,5 \cdot 10^{11} M_{\odot} \sim 5 \text{ atoms } H/\text{m}^3$
- Nombre d'estrelles: $\sim 3 \cdot 10^{22}$
- Contingut:

Tipus	%
Energia fosca	74%
Matèria fosca	22%
Gas intergalàctic	3,6%
Estrelles	0,4%

- Composició atòmica

Element	% en massa
H	75%
He	25%
Altres	$\ll 1\%$

⁶El diàmetre de l'univers és superior a la seva edat, això es suporta per la teoria de l'univers inflacionista a on l'espai es va dilatar a velocitat superior a la de la llum (no incomplèix la relativitat general).