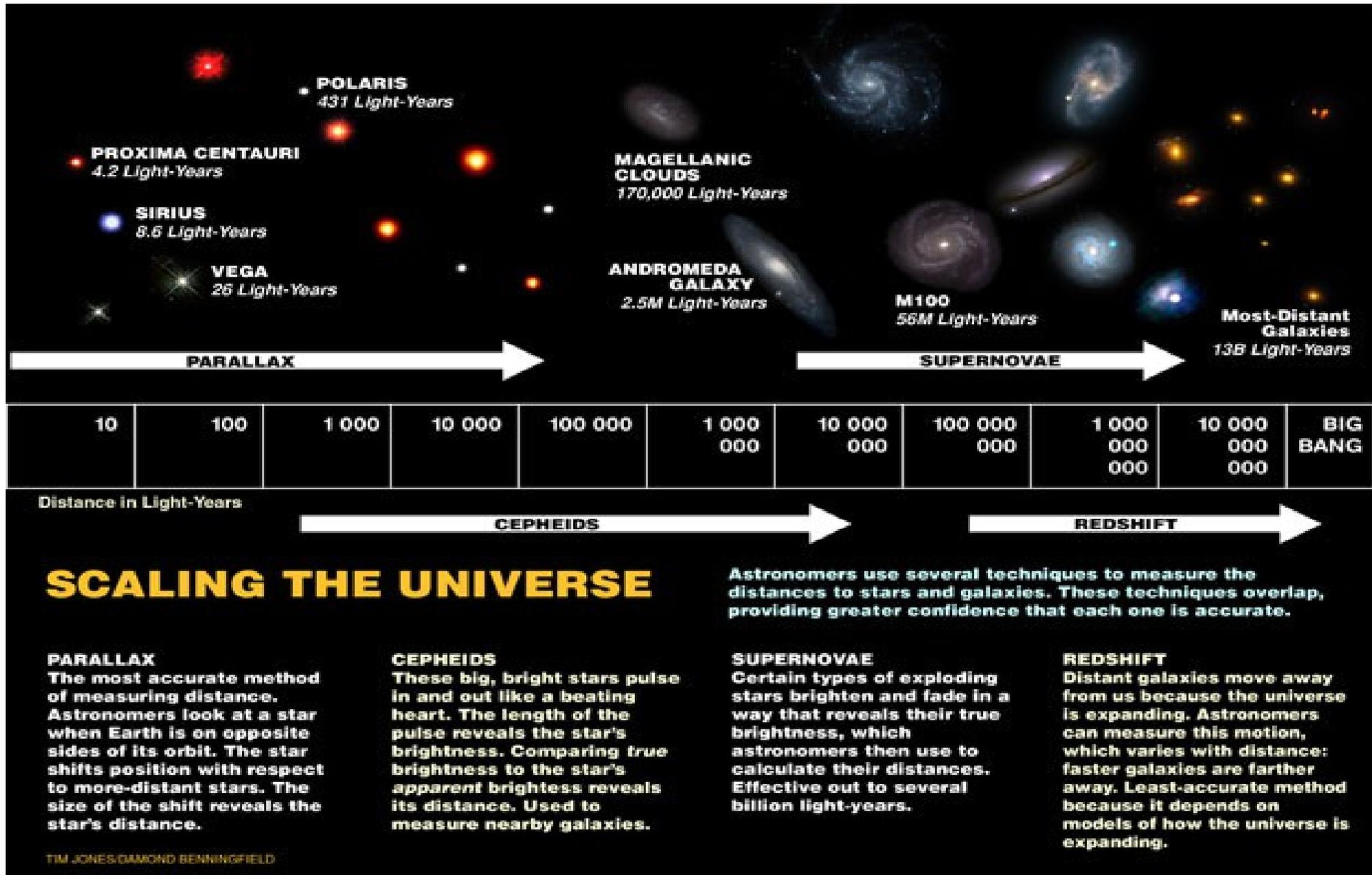


Corso di Astronomia

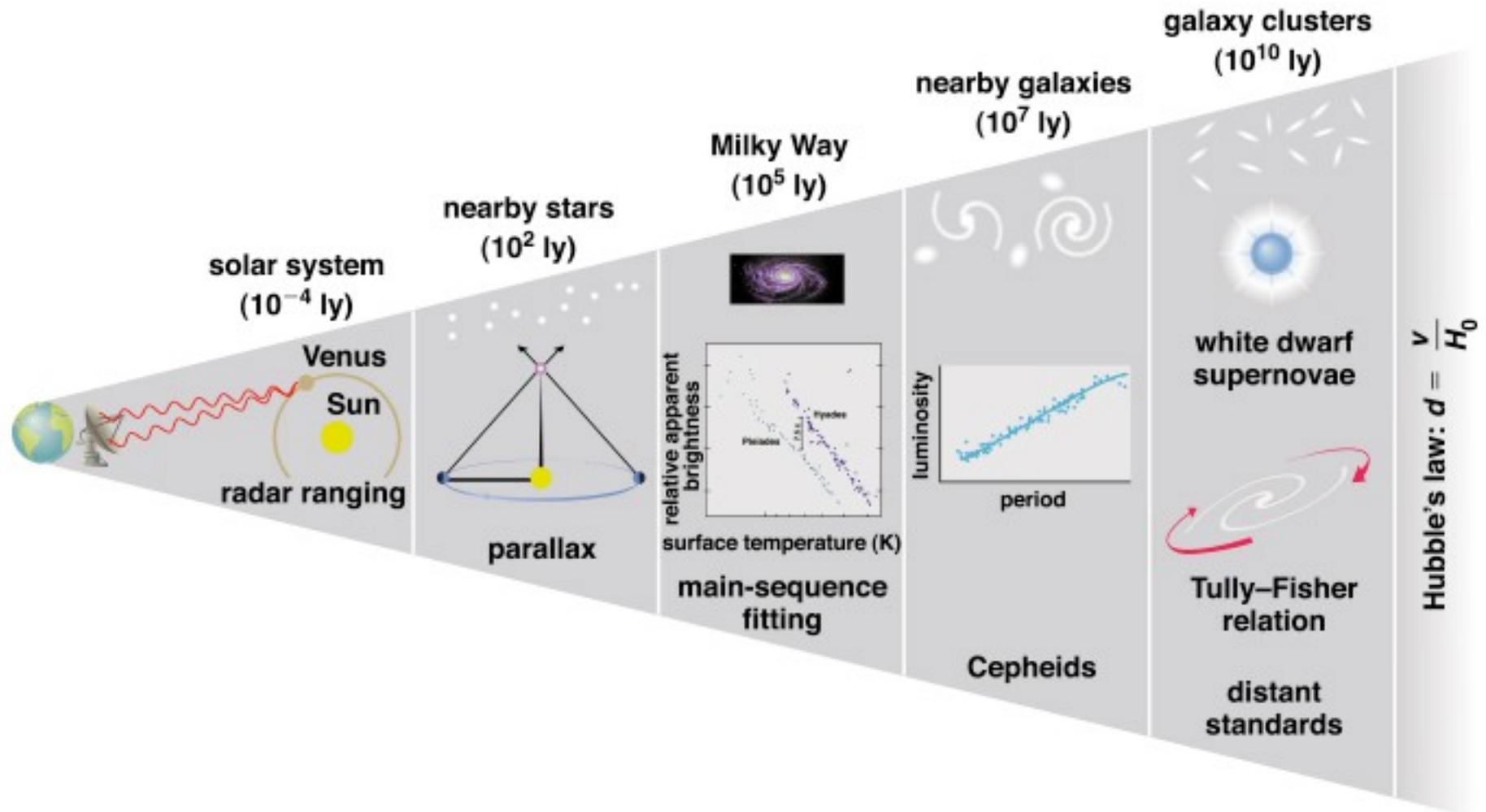
3° Incontro

Le Stelle - 1° parte

Distanze cosmiche



Calcolo delle distanze cosmiche



Definizione di stella



Una stella è un corpo celeste che brilla di luce propria. In astronomia e astrofisica il termine designa **uno sferoide luminoso di plasma che genera energia nel proprio nucleo attraverso processi di fusione nucleare**. Tale energia è irradiata nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche e particelle elementari, le quali costituiscono il vento stellare. Buona parte degli elementi chimici più pesanti dell'idrogeno e dell'elio, che sono i più abbondanti nell'Universo, vengono sintetizzati nei nuclei delle stelle tramite il processo di **nucleosintesi**. Sono oggetti dotati di una massa considerevole, compresa tra 0,08 e 150–200 masse solari . Gli oggetti con una massa inferiore a 0,08 M sol. sono detti **nane brune**, corpi a metà strada tra stelle e pianeti che non producono energia tramite la fusione nucleare, mentre non sembrano esistere, almeno apparentemente, stelle di massa superiore a 200 M sol., per via del **limite di Eddington**. Anche le dimensioni variano, passando dai pochi km delle **stelle degeneri** e i miliardi di km delle **supergiganti** e **ipergiganti**, e le luminosità, comprese tra 10^{-4} e $10^6 - 10^7$ luminosità solari.

Magnitudini apparenti e assolute

Nel cielo notturno le stelle ci appaiono più o meno luminose. Questo può dipendere da due fattori diversi: la loro effettiva **dimensione e luminosità** e la loro **distanza**.

Fin dall'antichità si tentò di descrivere le stelle suddividendole in base alla loro luminosità e vennero redatti dei cataloghi stellari. Nel II secolo Tolomeo pubblicò, come parte del suo Almagesto, un catalogo stellare che contava 1022 stelle visibili da Alessandria, e fu per oltre un secolo il catalogo di riferimento per gli astronomi del mondo occidentale ed arabo. Il catalogo di Tolomeo si basava quasi interamente su quello di Ipparco del II secolo prima di Cristo. In esso erano stabilite **6 magnitudini** stellari dalla più luminosa 1 alla più debole 6.

Con l'uso degli strumenti di osservazione, la scala venne perfezionata, introducendo i valori negativi. Come stella di riferimento venne utilizzata da prima la Polare (m2), in seguito **Vega (m0)**.



Magnitudini apparenti e assolute

Mag. app.	Oggetto celeste
-26,8	Sole
-12,6	Luna piena
-4,4	Luminosità di Venere al suo massimo
-2,5	Luminosità di Giove
-1,5	Sirio, la stella più luminosa
-0,04	Arturo, la stella più luminosa del cielo estivo boreale
+0,77	Altair
+1,97	Polare
+6,0	Le stelle più deboli osservabili ad occhio nudo
+12,6	Il quasar più luminoso
+30	Gli oggetti più deboli osservabili col Telescopio Spaziale Hubble

In astronomia, la magnitudine assoluta (detta anche luminosità assoluta) è la magnitudine apparente (m) che un oggetto avrebbe se si trovasse ad una distanza dall'osservatore di **10 parsec**. Più semplicemente, è una misura della luminosità intrinseca di un oggetto, senza tener conto delle condizioni in cui si trova l'osservatore. Più un oggetto è intrinsecamente luminoso, più la sua magnitudine assoluta è numericamente bassa, anche negativa.

Nel definire la magnitudine assoluta, è necessario specificare il tipo di radiazione elettromagnetica che viene misurata. Se ci si riferisce al totale dell'energia emessa, il termine corretto è magnitudine bolometrica. Mentre se si considera lo spettro del visibile si parla di magnitudine assoluta visuale.

1 parsec = 3,2614

Elenco delle stelle più brillanti del cielo e relative magnitudini

Magn. App.		Nome pr.	Distanza (AL)	Magn. Assoluta
-26,73		Sole	0,000016	4,83
-1,47	α CMa	Sirio	8,6	1,40
-0,62	α Car	Canopo	310	-5,63
-0,27	α Cen	Alfa Centauri	4,4	4,38
-0,04 var	α Boo	Arturo	37	-0,38
0,03	α Lyr	Vega	25	0,58
0,08	α Aur	Capella	42	-0,48
0,12	β Ori	Rigel	770	-8,03
0,34	α Cmi	Procione	11	2,65
0,50	α Eri	Achernar	140	-2,77
0,58 var	α Ori	Betelgeuse	640	-5,14
0,60	β Cen	Hadar (Agena)	530	-5,20
0,77	α Aql	Altair	17	2,22
0,77	α Cru	Acrux	320	-4,19
0,85 var	α Tau	Aldebaran	65	-0,64
1,04	α Vir	Spica	260	-3,55

Ancora sulle magnitudini stellari



Nel 1856 l'astronomo britannico Pogson osservò che una stella di prima magnitudine è approssimativamente 100 volte più luminosa di una di sesta magnitudine. Egli definì quindi 5 gradi di magnitudine in modo tale che ci fosse un rapporto tra le luminosità di 100 a 1, e nel tentativo di conservare l'analogia con la vecchia classificazione di Ipparco, basata sulla capacità percettiva dell'occhio umano, pose pari a 2 la magnitudine della stella Polare. Così facendo, la differenza tra la prima e la seconda magnitudine, ad esempio, corrisponde alla radice quinta di 100: questo fattore, pari a 2,512 circa, viene detto rapporto di Pogson. La magnitudine definita da Pogson si dice apparente (m), dato che l'osservazione e la misura si effettuano dalla Terra. Esiste una relazione che ci permette di ricavare il valore della magnitudine assoluta di una stella (M), che esprime la magnitudine apparente di una stella vista da 10 parsec di distanza.

$$M = m + 5 - 5 \log_{10} d \quad \text{ovvero} \quad d = 10^{(m-M+5)/5}$$

dove d è la distanza della stella, rispetto alla Terra, in parsec.

Il colore delle stelle

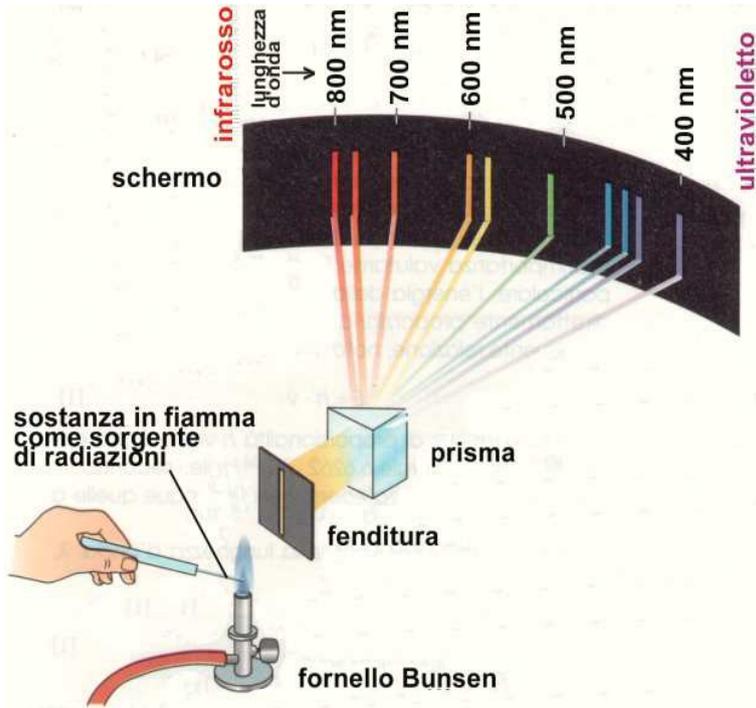


Osservando il cielo stellato, anche ad occhio nudo, almeno per le stelle più luminose, riusciamo a distinguere il loro colore. Alcune appaiono con sfumature azzurre, altre bianche, altre ancora sembrano gialle o arancio, altre infine appaiono rossastre.

Il colore di una stella è un chiaro indizio della sua temperatura superficiale: le stelle più calde hanno colore tendente al blu azzurro, poi man mano che la temperatura si abbassa troviamo stelle di colore bianco, poi giallo (come il Sole), poi arancio e infine rosso.

30-50.000 gradi	azzurro
10-30.000 gradi	azzurro-bianco
8-10.000 gradi	bianco
6-8.000 gradi	bianco-giallo
5-6.000 gradi	giallo
3.800-5.000 gradi	arancio
2.700-3.800 gradi	rosso

Spettroscopia



Spettro continuo



Linee di emissione



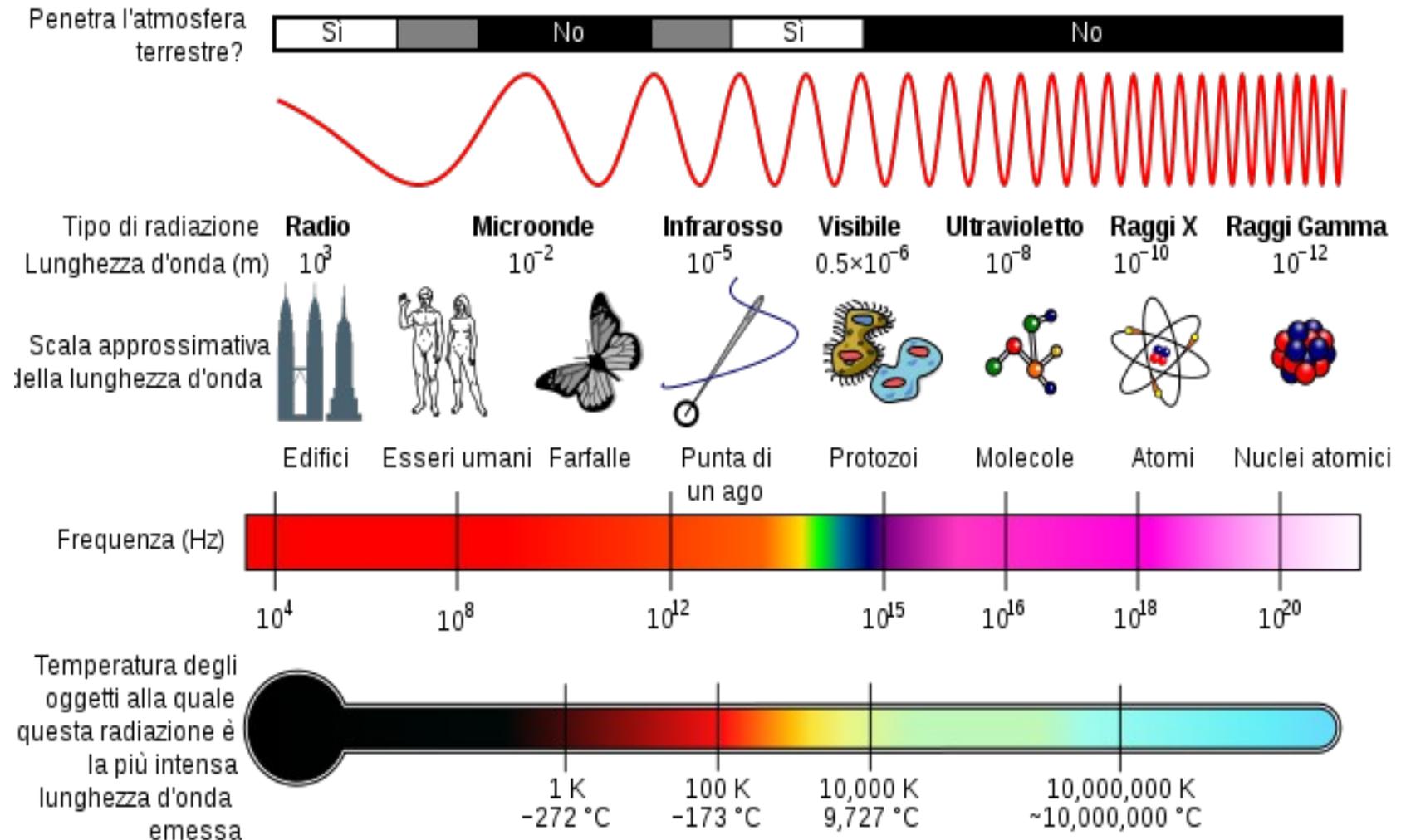
Linee di assorbimento



È noto che la luce emessa da una sorgente si propaga nello spazio in ogni direzione. Se i raggi penetrano in un corpo trasparente ma vengono deviati, allora si ha il fenomeno della rifrazione, che provoca la scomposizione della luce bianca in radiazioni di diverso colore (lunghezza d'onda) che possono essere raccolte su uno schermo dando origine allo spettro. L'esperimento di scindere la luce nei suoi colori componenti fu effettuato da Newton nel 1666, ponendo le basi della spettroscopia. Esistono tre tipi di spettri:

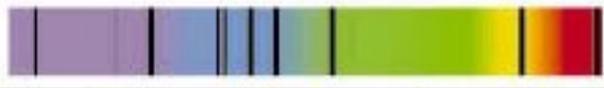
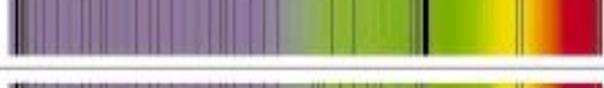
- **Ad emissione continua:** studiando la radiazione ottenuta scaldando un corpo solido si otterrà uno spettro continuo che contiene tutte le onde elettromagnetiche esistenti, poiché in esso non vi sono interruzioni tra una radiazione e l'altra.
- **Ad emissione a righe** o bande: si ottiene usando come sorgente un gas rarefatto (a bassa densità e pressione) ad elevata temperatura. Lo spettro che ne deriva non è continuo ma a righe o bande (caratteristiche di specie poliatomiche). Gas con diversa composizione danno diversi insiemi di righe caratteristiche, per questo motivo esso è utile per identificare la composizione chimica di un gas.
- **Ad assorbimento:** quando la luce emessa da una sorgente, passa per un gas a bassa pressione. Esso consente di identificare la natura chimica di una sostanza allo stato però gassoso.

Lo spettro elettromagnetico



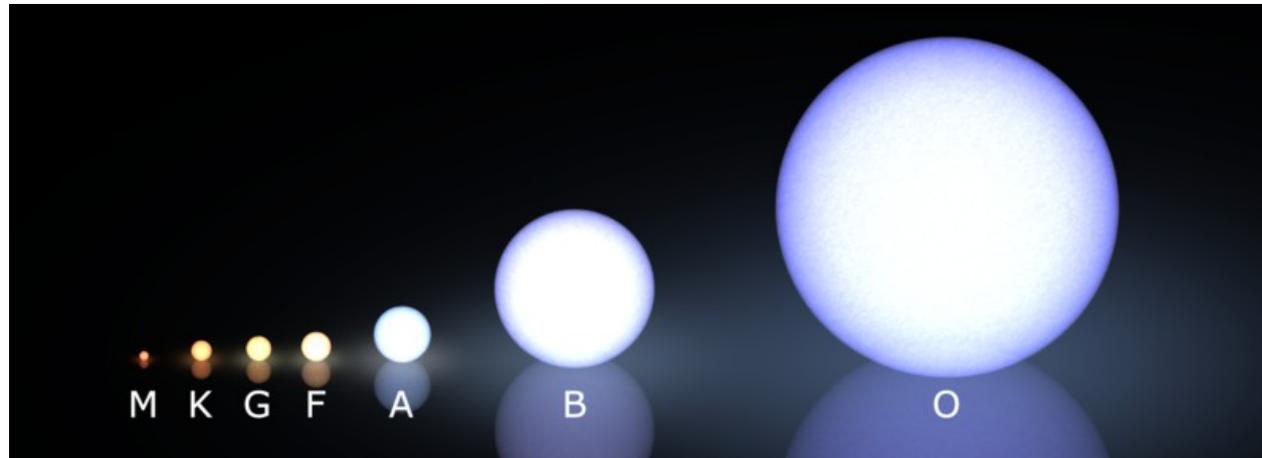
Spettri Stellari

Lo spettro di una stella è appunto uno spettro a righe di assorbimento. Sotto certe ipotesi, la parte continua di questo spettro può essere approssimata con quello di un corpo nero di temperatura pari a quella della superficie della stella, anche se a rigore una stella non è un emettitore perfetto e anche se non possiede una superficie fisica ben definita. In astrofisica una stella viene caratterizzata da un "colore" e da una "temperatura superficiale" a seconda della forma del suo spettro: questo viene confrontato con uno spettro di corpo nero, e una volta trovato quello che più si avvicina a quello della stella, si attribuisce a questa la stessa temperatura del corpo nero. Il colore è determinato dalla regione dello spettro nella quale l'intensità della luce è massima; le stelle hanno temperature superficiali di qualche migliaio o poche decine di migliaia di gradi, ed emettono la massima potenza nella regione ottica dello spettro. Il Sole emette al massimo di intensità nella regione gialla della banda ottica, perciò la sua temperatura superficiale è stata stabilita in 5780 gradi Kelvin.

spettro tipico	temperatura alla superficie delle stelle	atomi produttori le principali righe spettrali	grandezza assoluta	colore della radiazione principale	stelle di questo tipo
	O da 35.000 a 40.000 °C	elio ionizzato idrogeno neutro elio ordinario	-6,5		λ di Cefeo
	B da 11.000 a 35.000 °C	elio neutro silicio, magnesio ossigeno, azoto idrogeno neutro	-5 2		h di Orione Altair
	A da 7.500 a 11.000 °C	metalli (specialmente calcio) che danno righe deboli, idrogeno (righe molto forti)	1,3 -0,5		Sirio Vega
	F da 6.000 a 7.500 °C	metalli (specialmente calcio) che danno righe forti idrogeno (righe deboli)	3		Procione
	G da 5.100 a 6.000 °C	potassio (righe forti) metalli neutri (righe forti) idrogeno (righe molto deboli)	5 -0,5		Sole Capella
	K da 3.500 a 5.100 °C	metalli neutri (righe forti) idrogeno (righe molto deboli)	0 8		Arturo 61 del Cigno
	M da 2.000 a 3.500 °C	molecole di ossido di titanio (righe forti)	-5 -4 12 o 13		Betelgeuse Antares e molte altre

Tipi Spettrali

La classificazione stellare è generalmente basata sulla temperatura superficiale delle stelle, che può essere stimata mediante la Legge di Wien a partire dalla loro emissione luminosa. La spettroscopia permette in aggiunta di analizzare gli spettri di emissione delle stelle. Infatti possiamo associare in maniera molto approssimativa il nucleo di una stella ad un corpo nero (corpo ideale che emette tutte le onde elettromagnetiche che assorbe) e tenere conto che ciò che giunge sino ai nostri occhi è uno spettro di "assorbimento" causato dal passaggio della luce ideale prodotta dal corpo nero attraverso gli strati gassosi dell'astro. Di conseguenza analizzando tale spettro di assorbimento è possibile persino intuire la stessa costituzione chimica della stella.

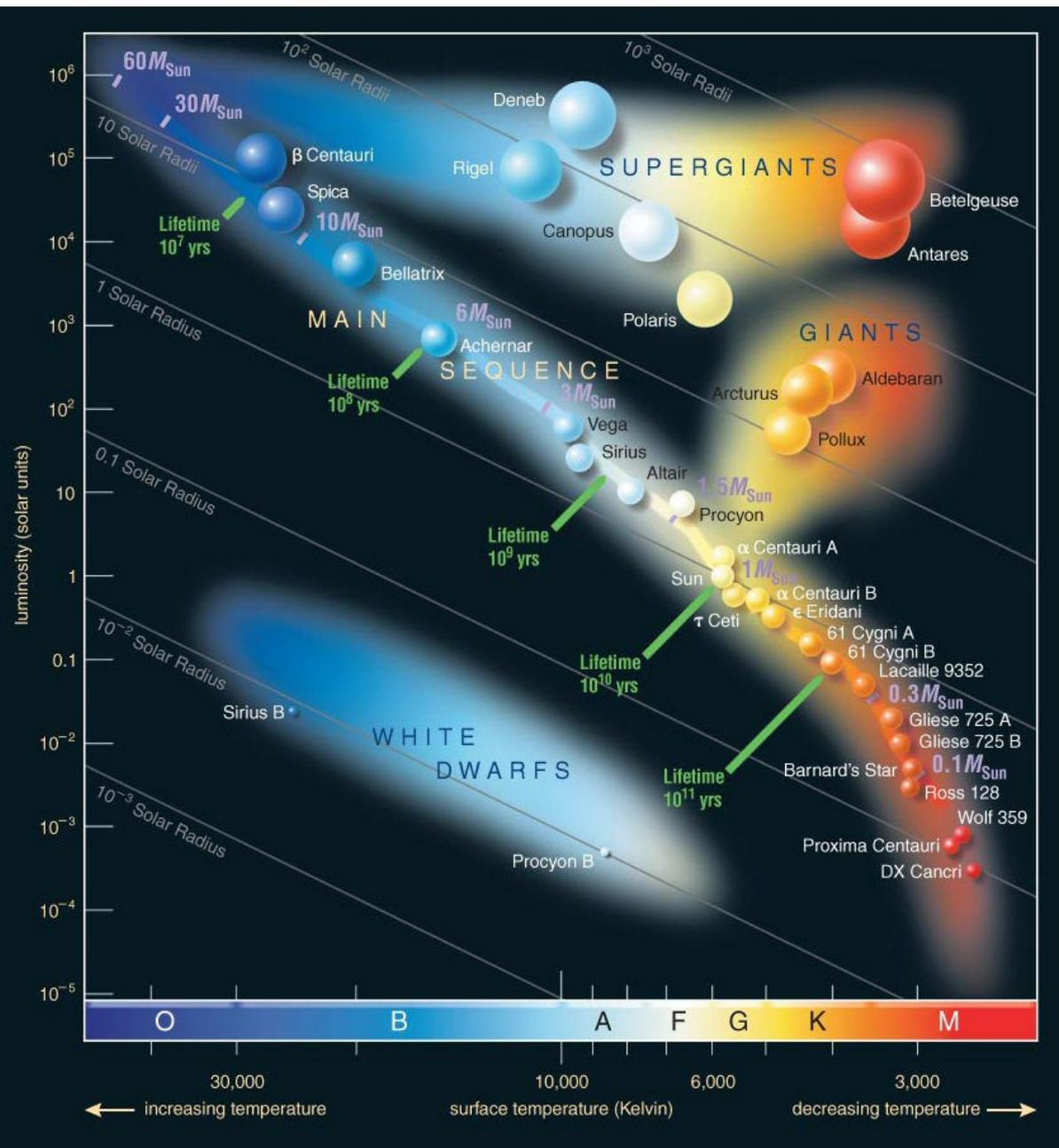


- * O: 30.000 - 60.000 K stelle blu
- * B: 10.000 - 30.000 K stelle blu-bianche
- * A: 7.500 - 10.000 K stelle bianche
- * F: 6.000 - 7.500 K stelle giallo-bianche
- * G: 5.000 - 6.000 K stelle gialle (come il nostro Sole)
- * K: 3.500 - 5.000 K stelle gialle-arancio
- * M: < 3.500 K stelle rosse

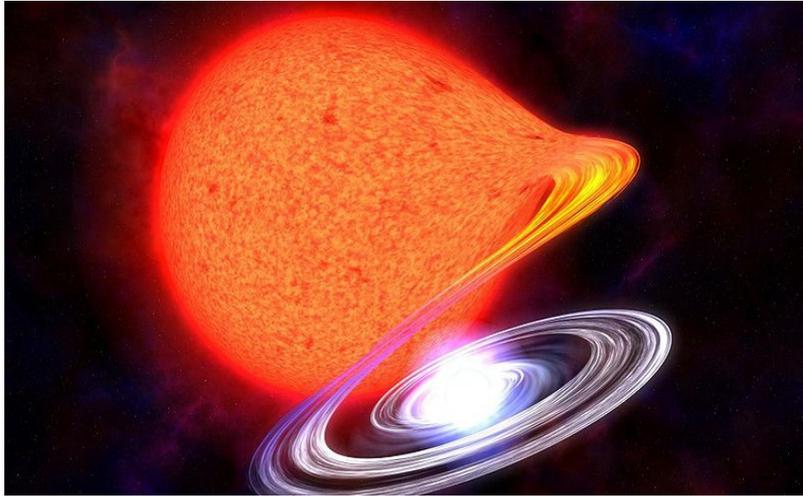
Il diagramma di Hertzsprung-Russell

Il diagramma Hertzsprung-Russell (dal nome dei due astronomi, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell, che verso il 1910 lo idearono indipendentemente; in genere abbreviato in diagramma H-R) è un potente "strumento" teorico che mette in relazione la temperatura effettiva (riportata in ascissa) e la luminosità (riportata in ordinata) delle stelle.

Da un primo esame del diagramma H-R si osserva immediatamente come le stelle tendano a posizionarsi in regioni ben distinte: la struttura evolutiva predominante è la diagonale che parte dall'angolo in alto a sinistra (dove si trovano le stelle più massicce, calde e luminose) verso l'angolo in basso a destra (dove si posizionano le stelle meno massicce, più fredde e meno luminose), chiamata la sequenza principale. In basso a sinistra si trova la sequenza delle nane bianche, mentre sopra la sequenza principale, verso destra, si dispongono le giganti rosse e le supergiganti.

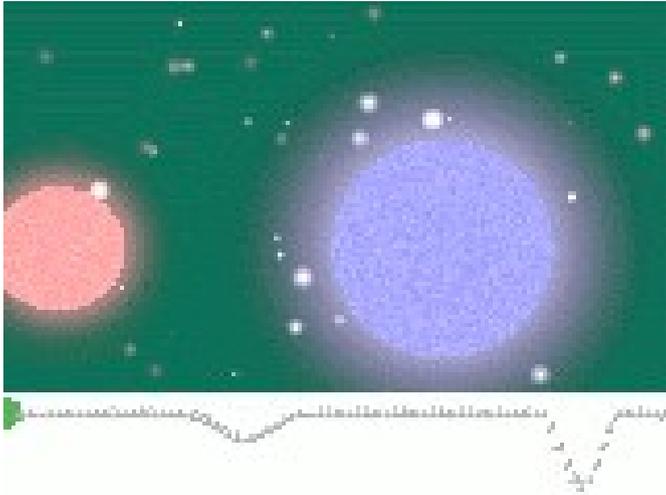


Sistemi binari o multipli

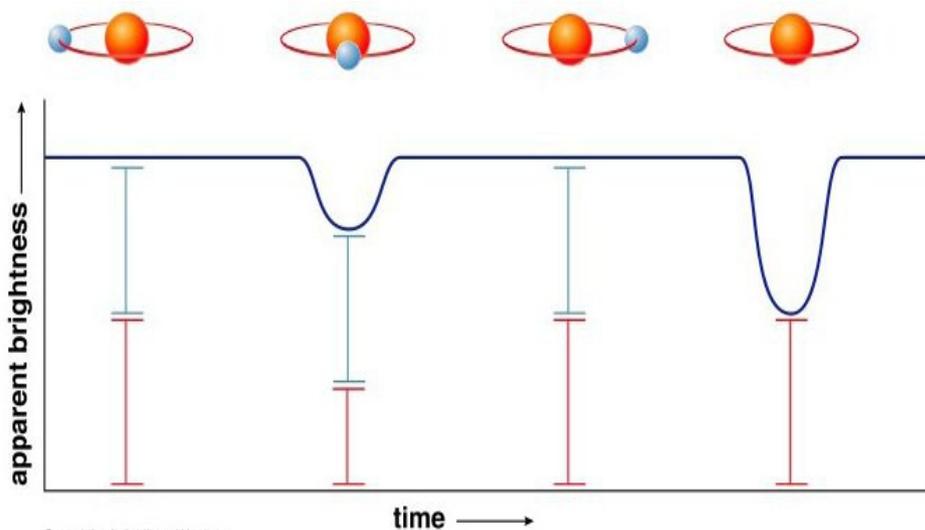


- Una stella binaria (si usano anche i termini stella doppia o sistema binario) è un sistema composto da due stelle che orbitano attorno ad un baricentro comune. Se una delle due stelle ha una massa molto superiore all'altra, il baricentro può essere così spostato verso di essa da ridurre il sistema ad una stella quasi ferma attorno alla quale ne orbita un'altra (esattamente come succede, per esempio, nel caso dell'orbita della Terra attorno al Sole). Oggi le stelle binarie sono classificate in quattro tipi a seconda di come possono essere osservate:
- **binaria visuale**, osservabile come tale ad occhio nudo oppure al telescopio
- **binaria spettroscopica**, che rivela la sua natura binaria solo con uno spettroscopio
- **binaria ad eclisse**, che mostra cambiamenti di luminosità dovuti ad eclissi reciproche
- **binaria astrometrica**, da precise misure di posizione

Binarie ad eclissi

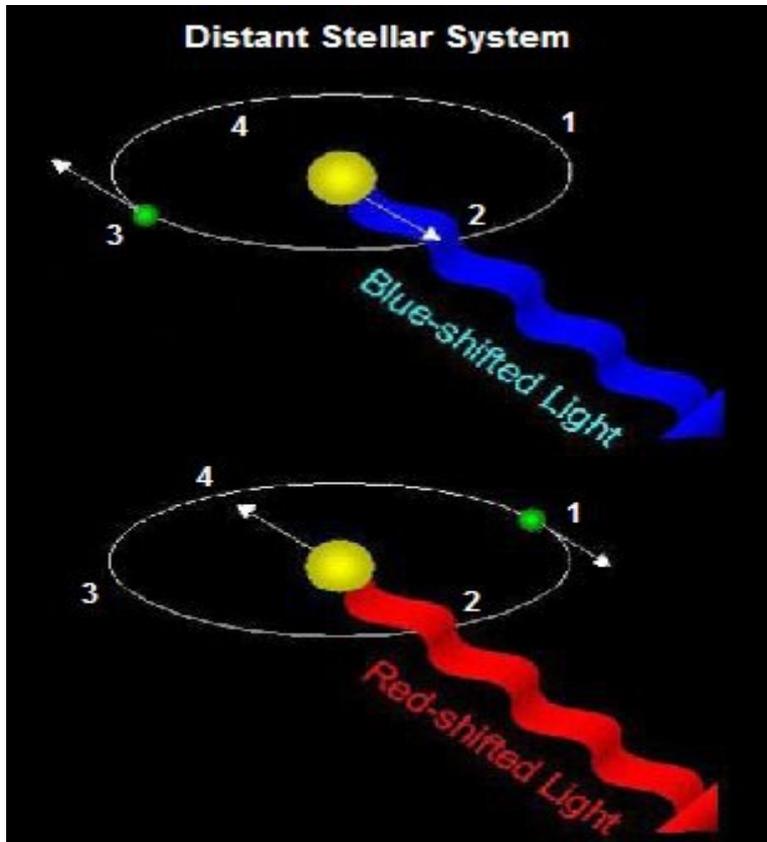


- **Binarie ad Eclissi:** le binarie ad eclissi, come suggerisce lo stesso nome, si eclissano regolarmente durante il loro moto orbitale; ciò determina una periodica variazione di luminosità del sistema. Questi sistemi stellari sono abbastanza rari poiché il loro piano orbitale deve essere perfettamente parallelo alla linea di vista dalla Terra. Ciò appare intuitivo se immaginiamo di osservare due sfere che ruotano: dall'alto osserviamo soltanto due moti circolari mentre se le osserviamo “di taglio” notiamo che una transita davanti all'altra con periodo regolare (lo stesso meccanismo avviene nelle eclissi di Sole o di Luna).



La prima stella binaria ad eclissi fu scoperta addirittura dagli astronomi arabi che individuarono nella stella **Algol** (l'occhio del diavolo) una tenue variabilità visibile ad occhio nudo. Questa variabilità fu spiegata soltanto nell'ultimo secolo quando si scoprì che in realtà la suddetta stella è costituita da un sistema rotante di due stelle distinte. Tutti i sistemi stellari che vengono classificati come “binaria ad eclissi” vengono studiati attraverso l'utilizzo di un metodo chiamato “Curva di Luce” .

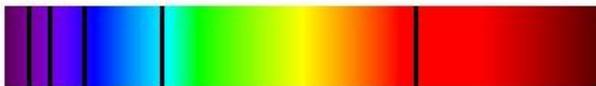
Binarie spettroscopiche



- **Binarie Spettroscopiche:** le binarie spettroscopiche si chiamano così perché possono essere rivelate soltanto mediante l'utilizzo della spettroscopia. Esse si trovano in sistemi stellari con orbite strette, le componenti sono distinguibili attraverso l'analisi dell'effetto Doppler nelle righe spettrali. Se le righe si spostano verso il rosso (Redshift) il corpo si sta allontanando da noi, se invece esse migrano verso il blu (Blueshift) il corpo si sta avvicinando a noi. Nel sistema doppio solo una stella può essere vista. Nel complesso sistema orbitale le due stelle influenzano reciprocamente i loro moti, in particolare la stella più piccola perturba la posizione statica della stella principale facendola muovere "avanti e dietro" in un moto periodico determinato dal periodo di rotazione della stella piccola. Questo moto periodico indotto, causa un continuo avvicinamento e allontanamento verso un ideale osservatore che poniamo nel vertice delle frecce rosse e blu. L'osservatore posto in questo punto vedrà la luce della stella principale arrossarsi quando essa si allontanerà e tendere al blu quando essa si avvicinerà al punto d'osservazione. Per capire meglio come vengono analizzate le righe spettrali possiamo concentrarci sul disegno qui a fianco.



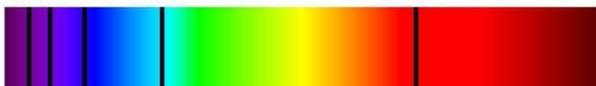
Spettro dell'Idrogeno in Laboratorio



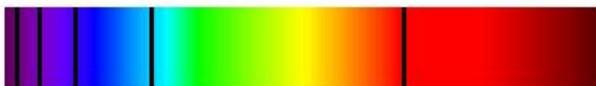
Spettro della Stella... Giorno 1



Spettro della Stella... Giorno 2

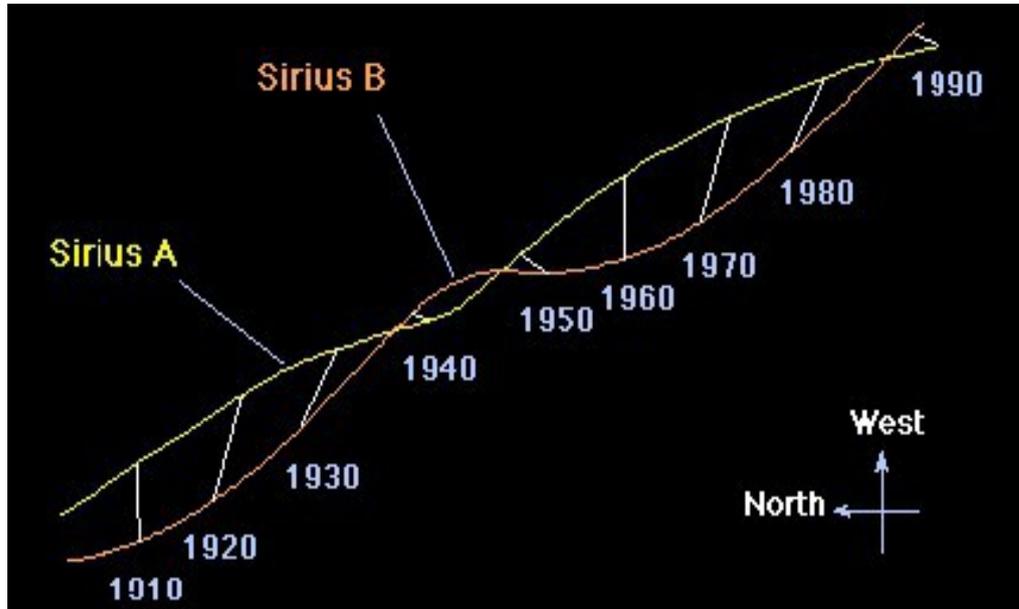


Spettro della Stella... Giorno 3



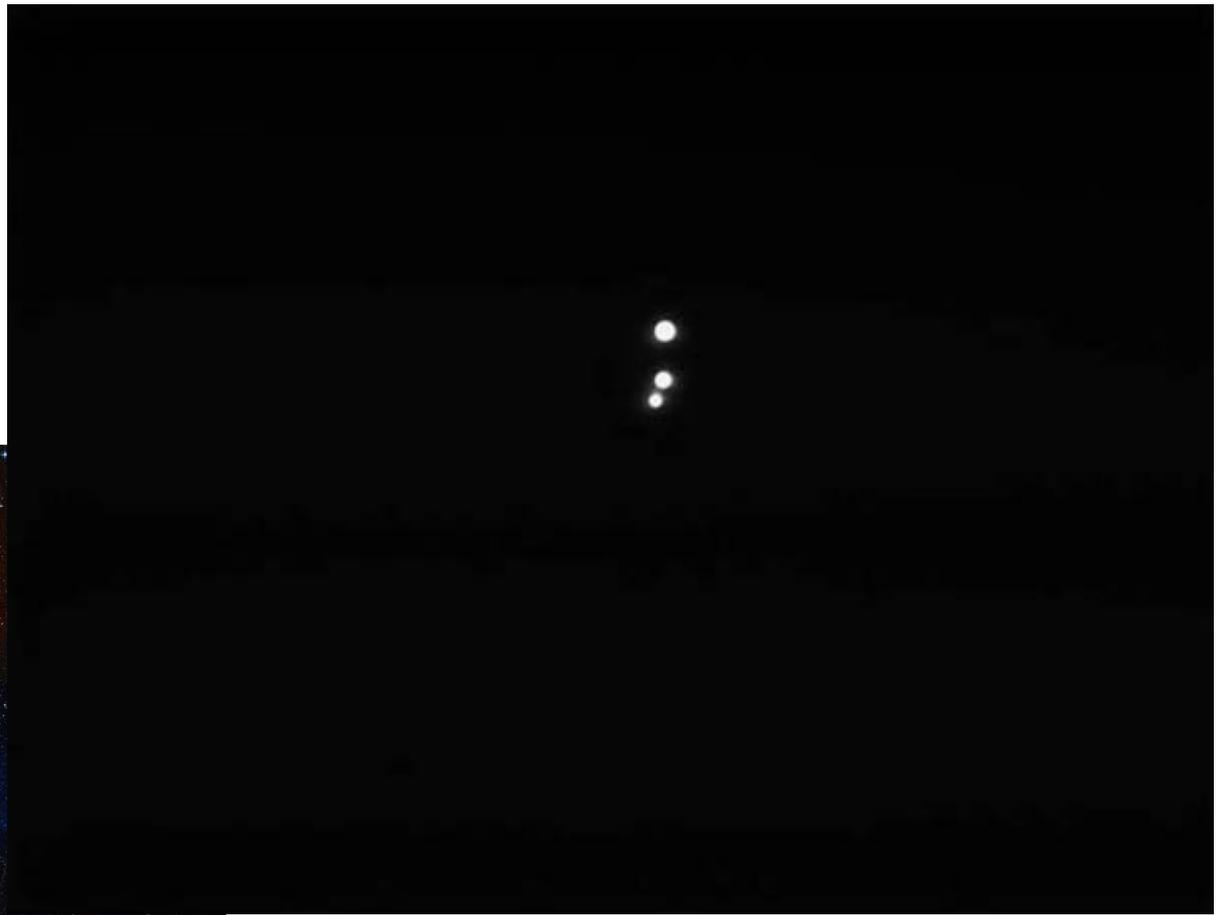
Spettro della Stella... Giorno 4

Binarie Astrometriche



Binarie Astrometriche: le binarie astrometriche costituiscono i sistemi più difficili da studiare poiché soltanto una stella del sistema si rende visibile, la compagna non è direttamente osservabile poiché di solito o è molto più debole oppure l'effetto Doppler da essa prodotto non è misurabile. In questi sistemi si utilizzano procedimenti matematici legati alla leggi di Keplero o alla definizione di centro di massa attraverso cui è possibile stimare la massa della stella invisibile mediante l'analisi della stella più massiva. Un esempio molto famoso di binarie astrometriche si trova nella costellazione del Cane Maggiore in cui intorno agli anni 40' è stata scoperta una piccola stella nota con il nome di **Sirio B** compagna della notissima stella **Sirio** che, con magnitudine pari a $-1,46$, è la più luminosa di tutto il cielo. Lo schema orbitale del sistema doppio della stella Sirio è evidenziato nell'immagine qui sotto:

Beta Monocerotis



Rigel

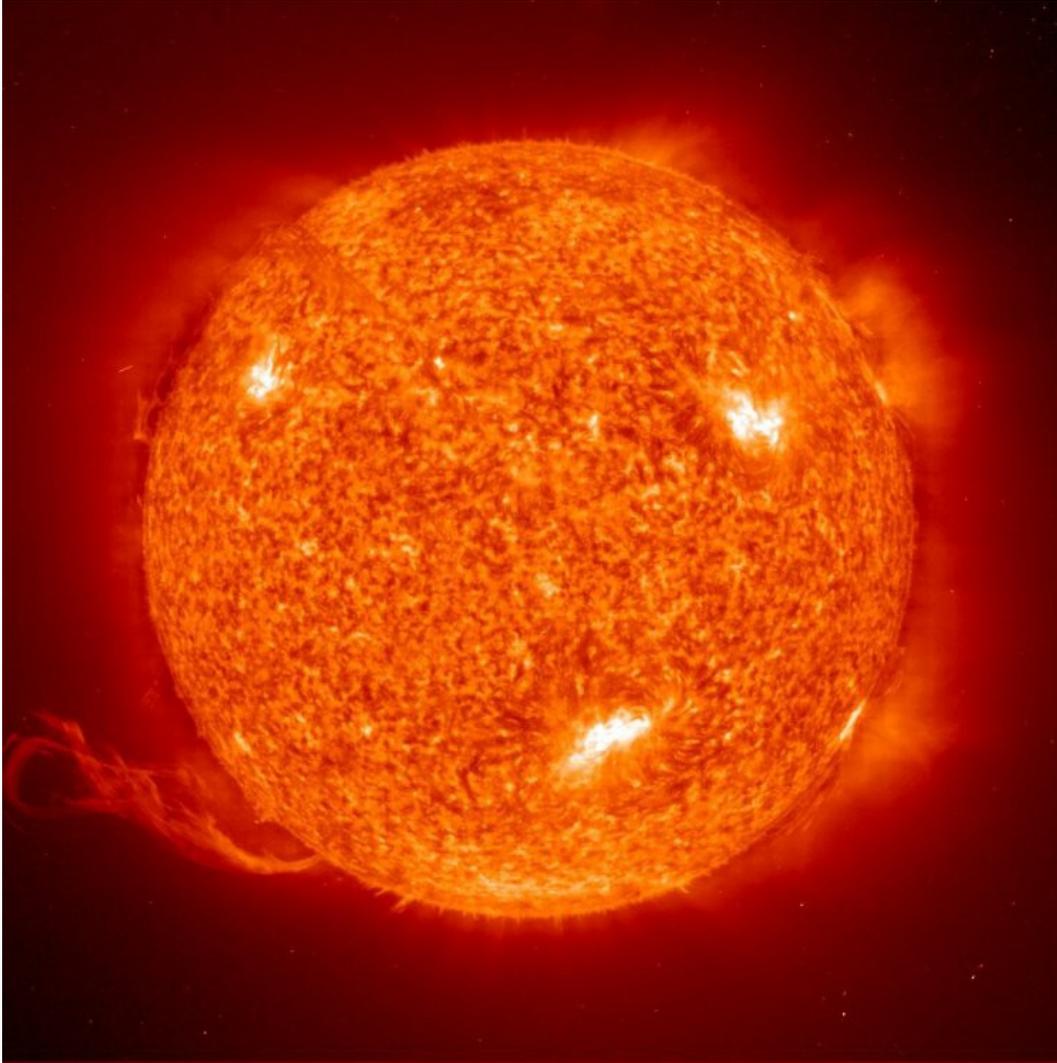
Albireo



Mizar



IL SOLE la nostra stella



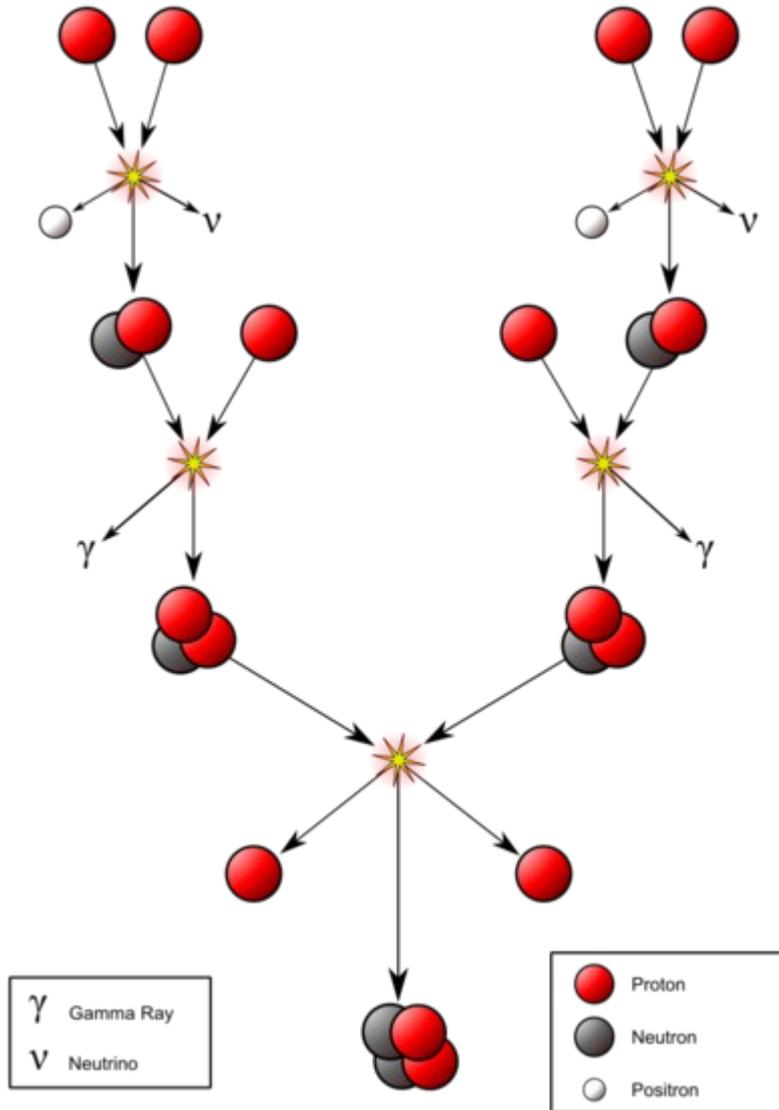
- Nana gialla (sequenza principale)
- Classe spettrale G2 V
- Periodo orbitale 250 milioni di anni circa
- Velocità orbitale 217 km/s (media)
- Sistema planetario sì (sistema solare)
- Diametro medio 1.391.000 km
- Velocità di fuga 617,54 km/s
- P. Rot. a 60° di latitudine: 30 g 19 h 12 m
- Temp.superficiale 5778 K (media)
- Magnitudine app -26,8 (media)
- Magnitudine ass. 4,83

Reazione protone protone

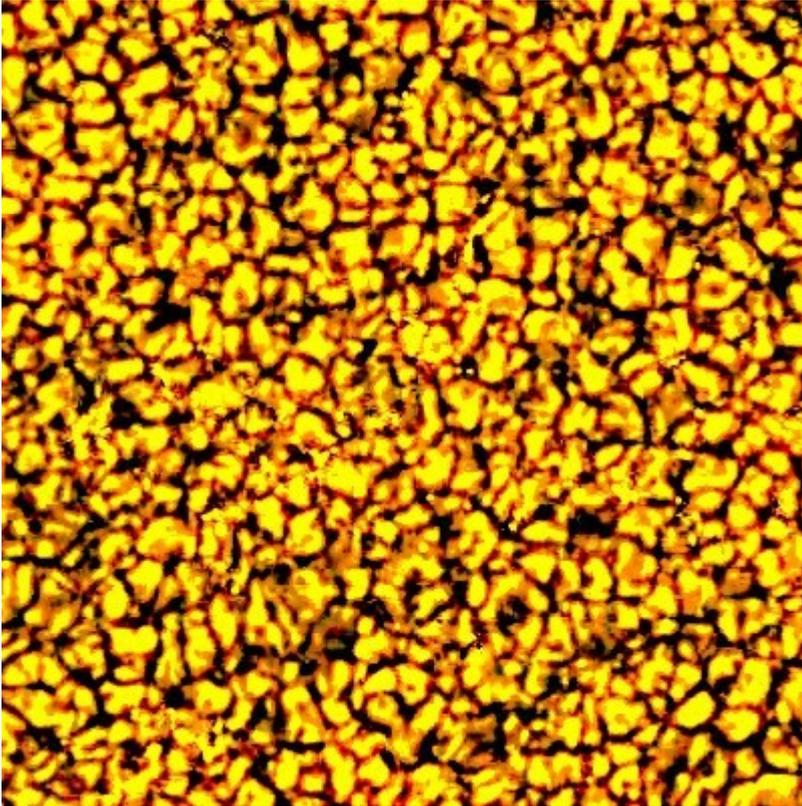
La catena protone-protone è un processo nucleare che trasforma idrogeno (protoni) in nuclei di elio. È la sorgente di energia principale per la maggior parte delle stelle dell'universo, compreso il Sole nel quale questa catena è il processo predominante.

- ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ MeV}.$
- ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5.49 \text{ MeV}$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H} + 12.86 \text{ MeV}$

Il sole converte ogni secondo 564 milioni di tonnellate di idrogeno in 560 milioni di tonnellate di elio. La differenza è convertita in energia secondo la formula $E = mc^2$

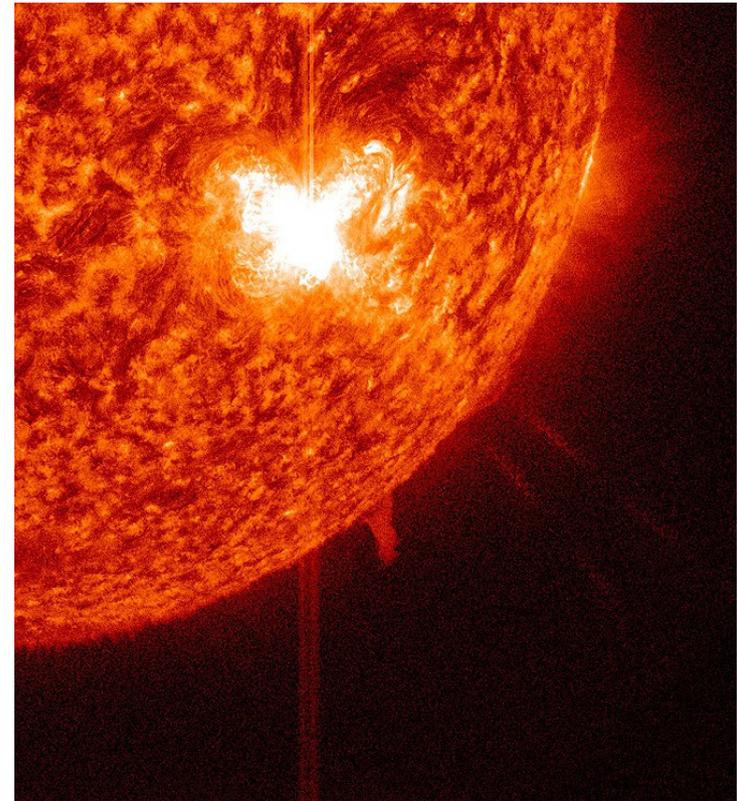
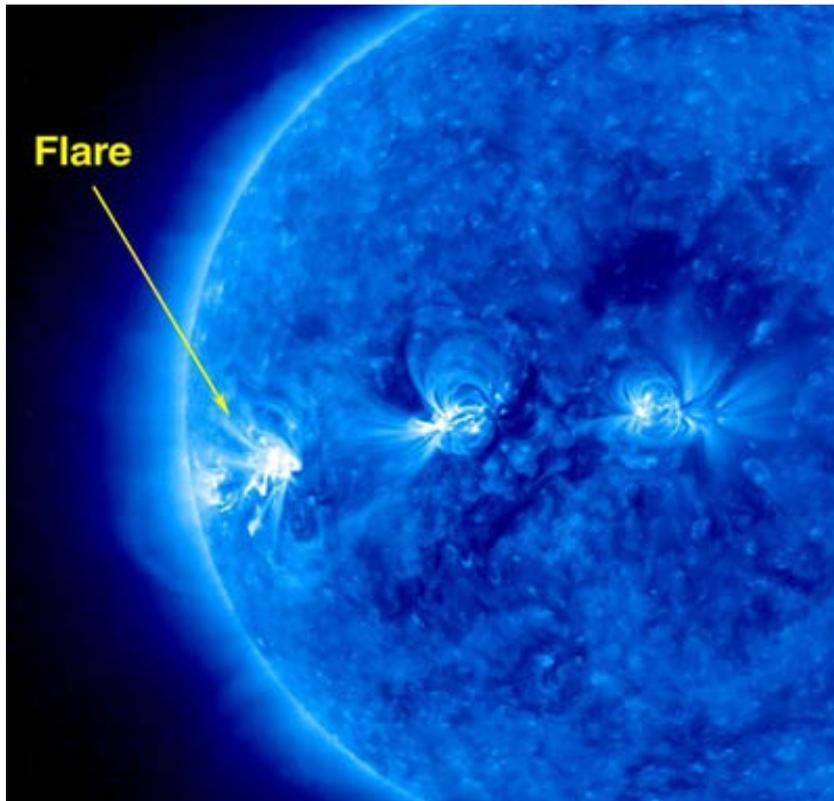


La fotosfera solare

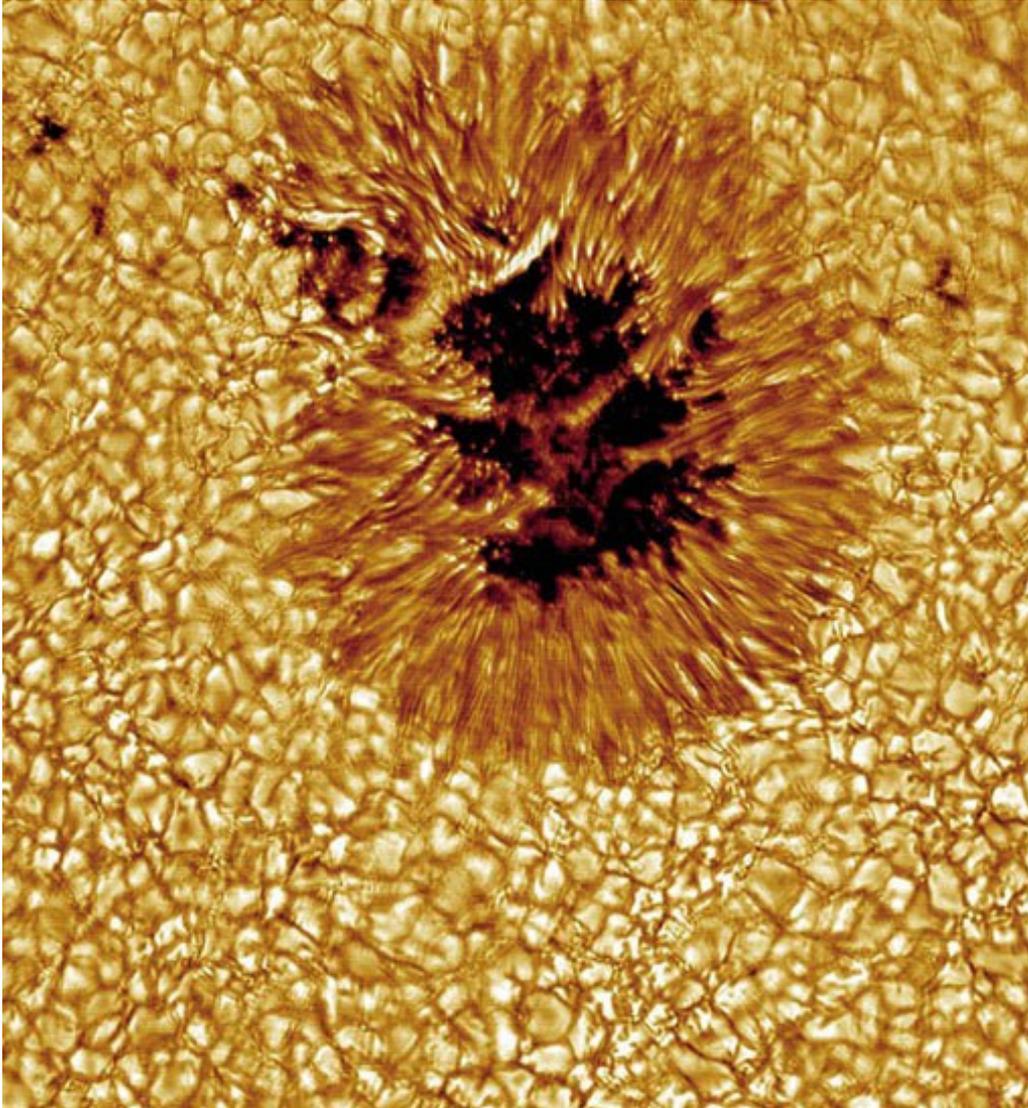


- La **fotosfera** del Sole ha una temperatura che varia dagli 8000 ai 4200 °C circa, decrescendo con l'allontanamento dagli strati più interni per quelli più esterni. Per questo ha un colore giallo.
- La fotosfera solare è composta da celle di convezione chiamate **granuli**; ogni granulo è una tempesta di fuoco larga da 500 a 1000 km, al centro della quale del gas caldo sale dall'interno della stella, raffreddandosi e ricadendo ai bordi per moto convettivo. Un singolo granulo ha una vita media di soli 8 minuti, ma se ne formano di nuovi continuamente, dando alla fotosfera un aspetto complessivo simile ad una lenta ebollizione. Tra i granuli normali si trovano dei supergranuli grandi fino a 30.000 chilometri, capaci di resistere fino ad un giorno
- Altre formazioni presenti sulla fotosfera sono le **macchie solari** e i **flare solari o brillamenti**.

Flare e brillamenti



Macchie solari

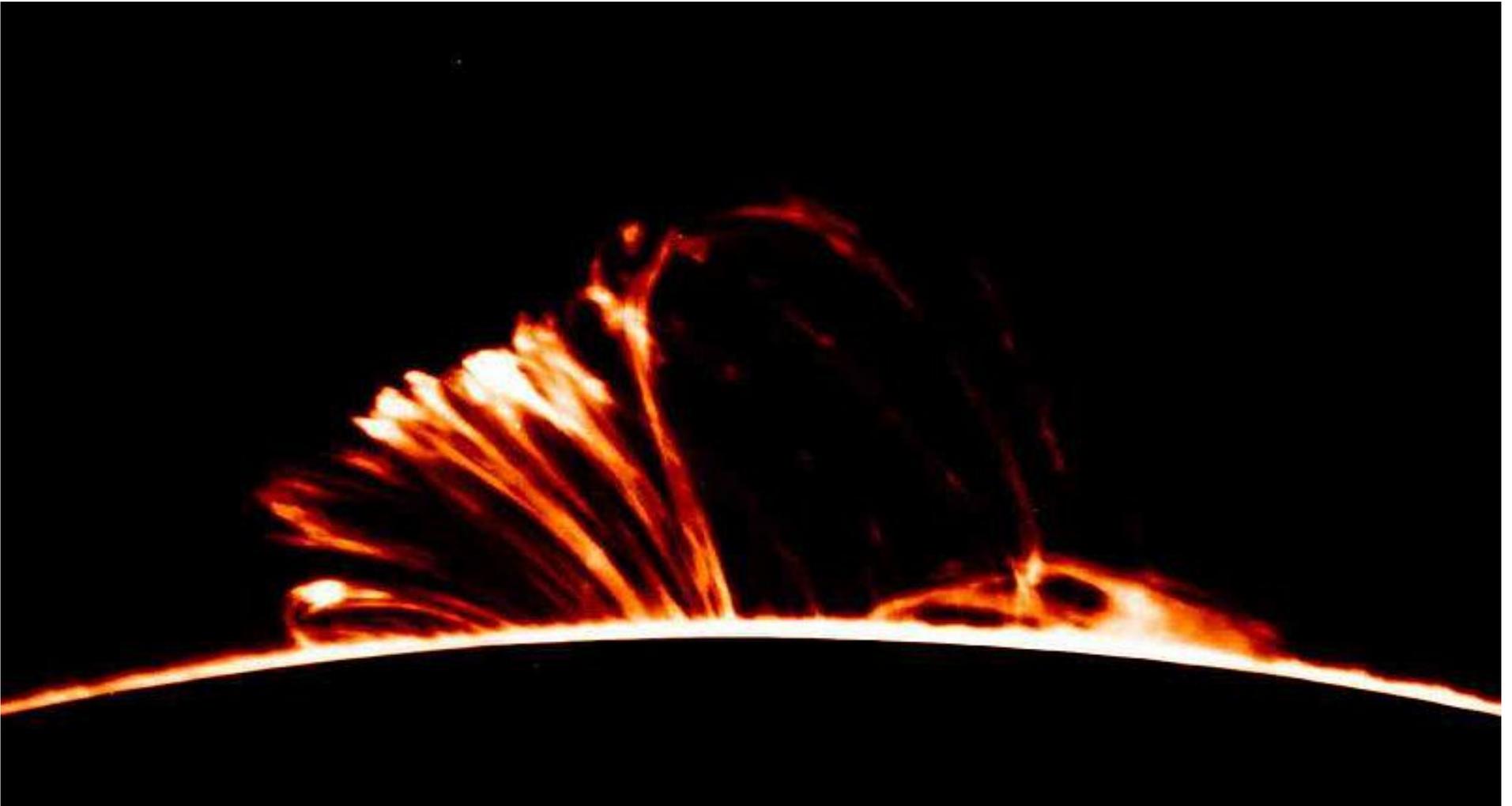


- Una macchia solare è una regione della superficie del Sole (la fotosfera) che è distinta da una temperatura minore dell'ambiente circostante, e da forte attività magnetica.
- Il numero di macchie che appaiono sulla superficie del Sole è stato misurato a partire dal 1700, e stimato all'indietro fino al 1500. La tendenza è quella di un numero in aumento, e i valori più grandi sono stati registrati negli ultimi 50 anni
- Alcuni ritengono che le macchie solari siano la causa alla base del riscaldamento globale e l'uomo e i suoi consumi abbiano contribuito in minor parte al fenomeno. O, meglio, le macchie solari sono indice dell'attività solare, che determina la radiazione solare trasmessa al nostro pianeta. Piccole variazioni di questa radiazione, secondo gli ultimi studi, avrebbero una visibile influenza sul clima terrestre.
- Tra 1645 e il 1715 una drastica riduzione nel numero delle macchie solari (minimo di Maunder) determinò la piccola era glaciale.

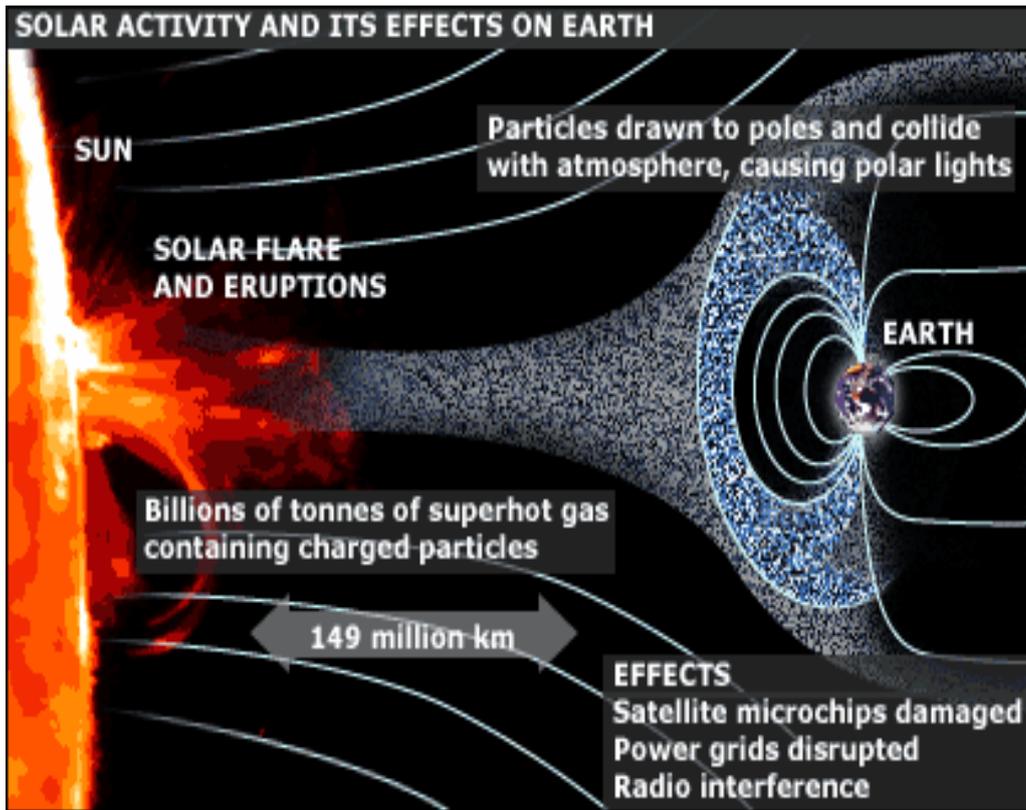
Protuberanze:

Sono enormi e luminosi getti di plasma solare che, partendo dalla cromosfera, si estendono nella zona della corona solare allontanandosi per migliaia di chilometri, spinto dalle forze del campo magnetico del Sole. La composizione dei gas in essi contenuti è simile a quella della cromosfera.

Una protuberanza si può formare in circa una giornata, e può persistere per diverse settimane. Alcune protuberanze possono frammentarsi e dare origine a giganteschi brillamenti. La protuberanza osservata nel 1997 dalla sonda solare SOHO raggiunse una distanza di 350.000 chilometri dalla superficie del Sole. Nonostante i molti studi, il meccanismo secondo cui si formano le protuberanze non è ancora molto chiaro.

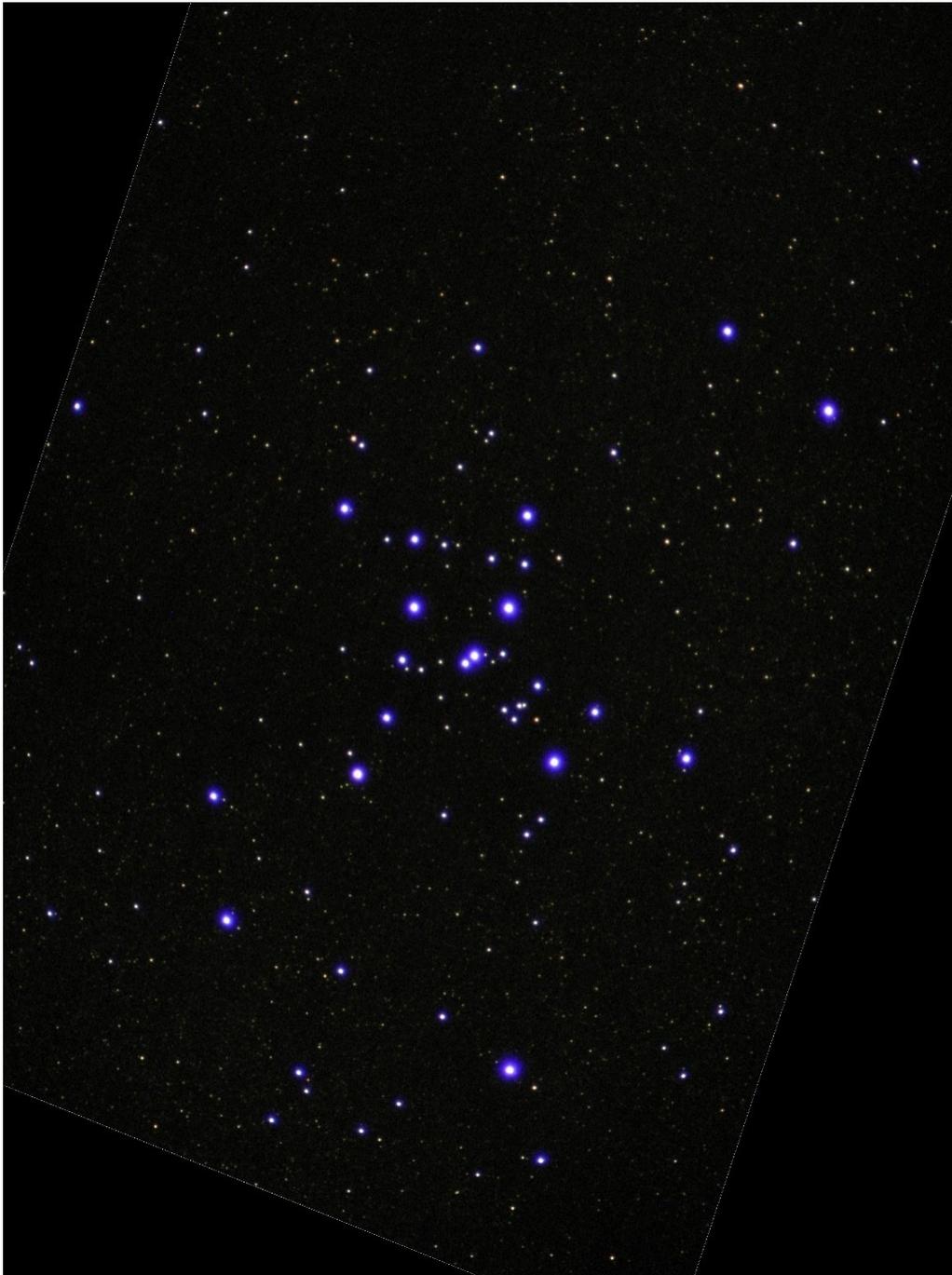


Solar flare prominence





Duplici ammasso del Perseo – distanza 7500 al – dim. 70 al



Ammassi aperti M6 ed M7 nella costellazione dello Scorpione. Distanze M6 2000 al, M7 980 al



M37 nella costellazione dell'Auriga. Distanza 4000 al, estensione 20 al



Ammasso aperto M45 Pleiadi (Toro) – Distanza 443 al estensione 12 al – età 100 ml anni