



Istituto Nazionale di Astrofisica Osservatorio Astronomico di Palermo



LICEO SCIENTIFICO STATALE
S. CANNIZZARO PALERMO



IL CIELO

COME LABORATORIO



Terza lezione

Antonio Maggio

INAF – Osservatorio Astronomico di Palermo

Argomenti e concetti già introdotti

- Fotometria: il concetto di magnitudine
 - La risposta dell'occhio umano a uno stimolo luminoso
 - Variabili lineari e andamento logaritmico
 - ❖ Flusso radiativo (energia) \Rightarrow magnitudini
 - ❖ Equazione di Pogson
 - Legge del quadrato della distanza
 - ❖ Flusso = Luminosità / Area
 - Magnitudine assoluta e modulo di distanza
- Spettroscopia
 - La luce come onda
 - ❖ Lunghezza d'onda, frequenza, velocità di propagazione
 - ❖ La scomposizione cromatica della luce (spettro visibile)
 - La radiazione di corpo nero
 - ❖ Equilibrio termodinamico tra materia e radiazione
 - ❖ Funzione di Plank, leggi di Wien e di Stefan-Boltzmann
 - ❖ La radiazione invisibile (ma energeticamente importante)
 - ❖ Luminosità e magnitudine bolometrica



Proprietà delle Stelle: Classificazione spettrale e Diagramma H-R

Rosaria Tantalò

Dipartimento di Astronomia, Università di Padova

Adattamento di

Antonio Maggio

INAF – Osservatorio Astronomico di Palermo

Sommario

1. Temperatura efficace e Colori delle stelle
2. La relazione colore-temperatura
3. La classificazione spettrale delle stelle
4. Il diagramma di Hertzsprung-Russel

La Temperatura Effettiva

Se poniamo il flusso bolometrico alla superficie della stella, F_{TOT} , uguale al flusso uscente da un corpo nero a temperatura T , si trova che:

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

Luminosità' →

Raggio

← Temperatura effettiva

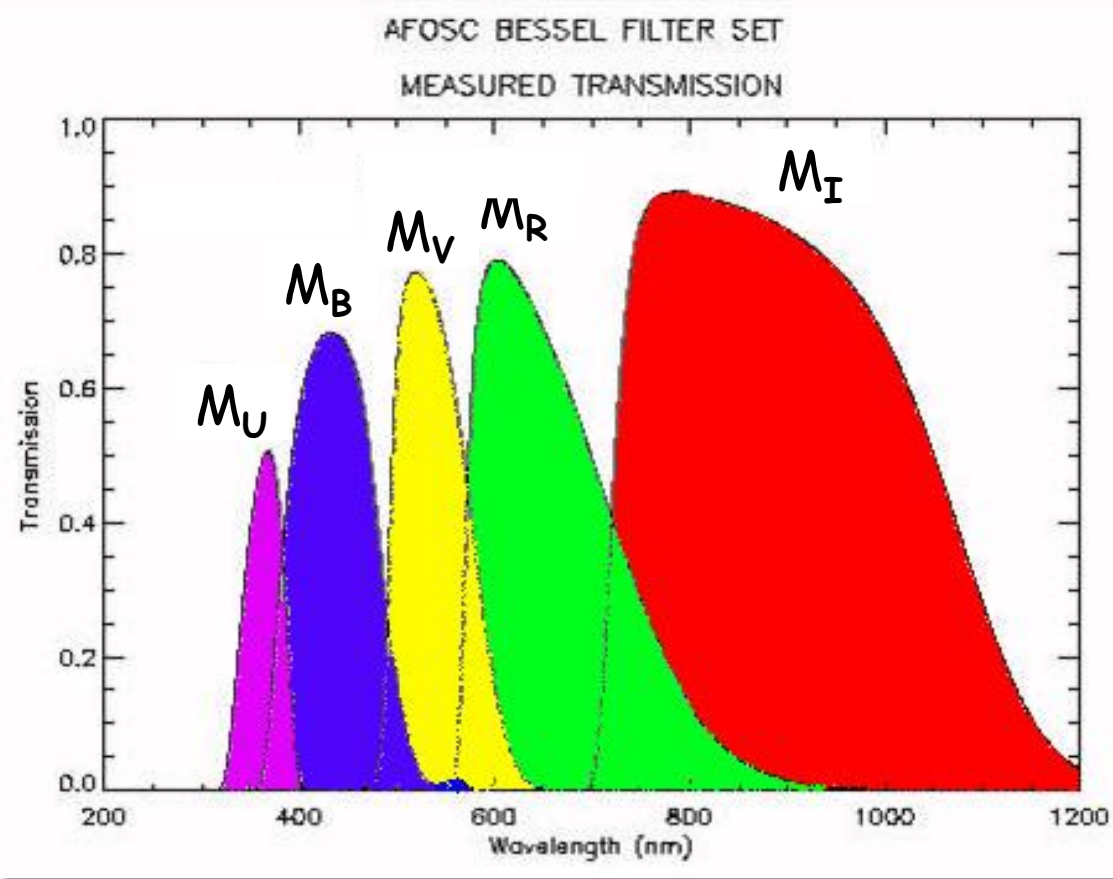
Quindi quando si parla di temperatura delle stelle ci si riferisce alla **TEMPERATURA EFFETTIVA** della stella, ovvero alla temperatura che avrebbe un corpo nero che ha lo stesso flusso bolometrico di energia emesso dalla stella.



I Colori delle Stelle

- Non esistono strumenti in grado di misurare l'intero spettro di energia proveniente dalle stelle
- Gli astronomi, in genere, misurano il flusso proveniente da una stella attraverso dei cosiddetti *Filtri a banda larga*
- I filtri sono costruiti in modo da far passare soltanto la radiazione dello spettro stellare che rientra in un intervallo di lunghezze d'onda ben definito
- Questi filtri sono caratterizzati quindi dall'intervallo $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ e da una certa lunghezza d'onda centrale (λ_c) dell'intervallo

Filtri a banda larga



Sistema
fotometrico con
Filtri a banda larga
di Bessel

Banda	λ_c (Å)	$\Delta\lambda$ (Å) (FWHM)
U	3604	601
B	4355	926
V	5438	842
R	6430	1484
I	8058	1402

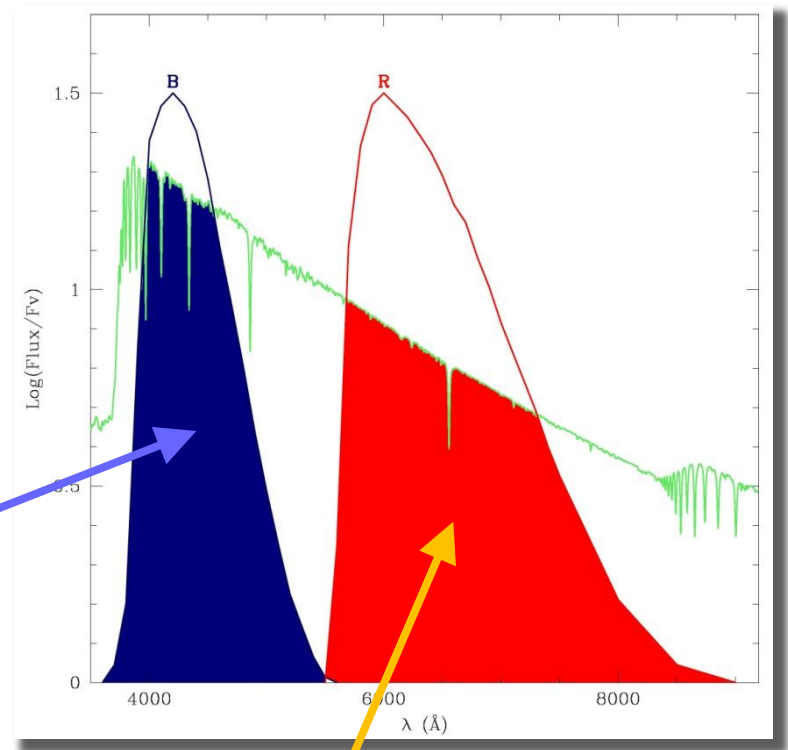
Fotometria a banda larga

Flusso e magnitudine in due diverse bande fotometriche

Area dello spettro sotto la banda considerata

Flusso nella banda B

$$M_B = -2.5 \log(F_B) + \text{cost}$$



Flusso nella banda R

$$M_R = -2.5 \log(F_R) + \text{cost}$$

I Colori delle Stelle

Se prendiamo lo spettro di una stella e misuriamo il flusso usando due diversi filtri (ad es. V e B) possiamo confrontare fra loro le corrispondenti magnitudini:

$$M_V = -2.5 \log(F_V) + \text{cost}$$

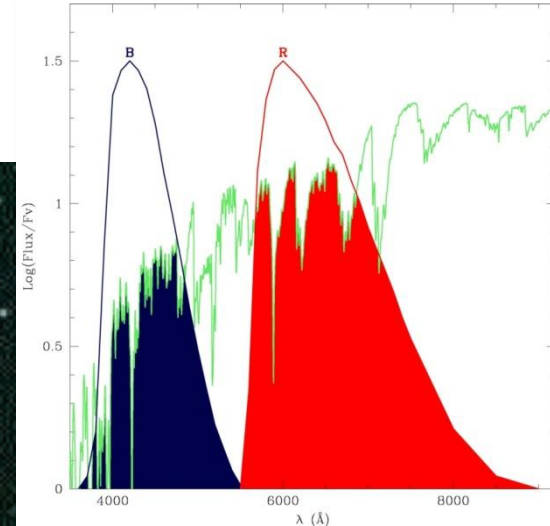
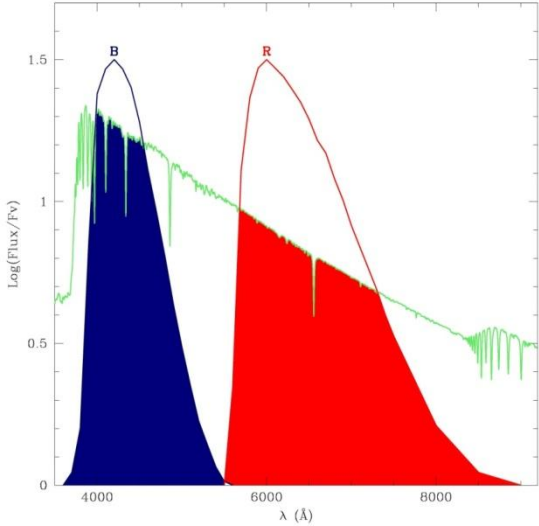
$$M_B = -2.5 \log(F_B) + \text{cost}$$

Si definisce **Indice di Colore** o **Colore** la quantità

$$C_{B,V} = B - V = M_B - M_V = -2.5 \log(F_B / F_V)$$

ovvero la differenza fra le magnitudini apparenti o assolute calcolate nelle due bande "fotometriche"

I Colori delle Stelle



$f_B > f_R \Rightarrow m_B < m_R$
 $(B-R) = (m_B - m_R) < 0$
Stella di colore blu

$f_B < f_R \Rightarrow m_B > m_R$
 $(B-R) = (m_B - m_R) > 0$
Stella di colore rosso

I Colori delle Stelle

Da notare che il colore non dipende dalla distanza, cioè ha lo stesso valore sia che si considerino le magnitudini apparenti oppure quelle assolute

$$M_B - M_V = -2.5 \log\left(\frac{L_B}{L_V}\right) = -2.5 \log\left(\frac{f_B}{f_V}\right) = m_B - m_V$$

Relazione tra Colore e Temperatura

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

Equazione di Planck

$$B_{\lambda}(\lambda, T) \approx \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-C_2/\lambda T}$$

Approssimazione di Wien, per $\lambda T \ll c_2$ (valore di λ piccolo)

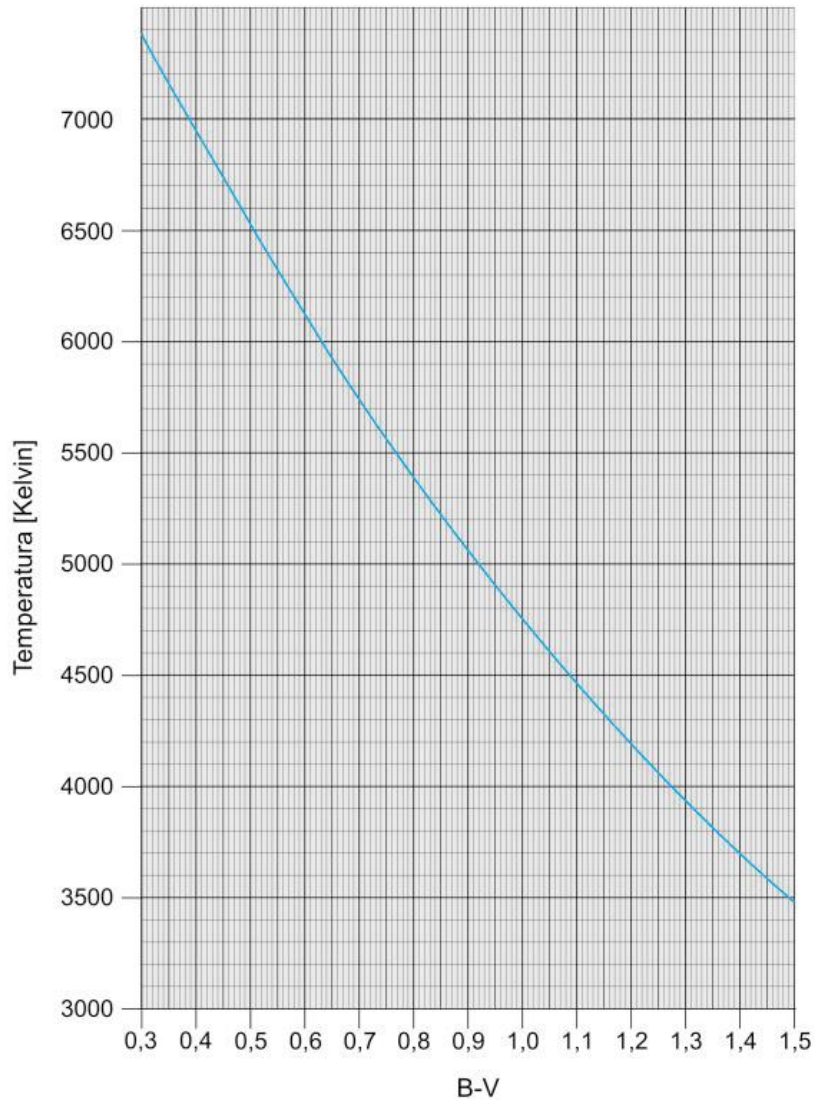
$$\frac{F_{\lambda_1}}{F_{\lambda_2}} = \frac{B_{\lambda}(\lambda_1, T)}{B_{\lambda}(\lambda_2, T)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{\left\{ \frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right\}}$$

Rapporto tra i flussi a λ_1 e λ_2

$$c_{1,2} = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2} = -2.5 \log \left(F_{\lambda_1} / F_{\lambda_2} \right) = -A + \frac{B}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

ovvero il colore (differenza fra magnitudini in due bande) può essere utilizzato come indicatore della temperatura.

Relazione Temperatura = f(B-V)



$$B-V \propto 1/T$$

Sommario

1. Temperatura efficace e Colori delle stelle
2. La relazione colore-temperatura
3. La classificazione spettrale delle stelle
4. Il diagramma di Hertzsprung-Russel

Caratteristiche spettrali e fisiche delle Stelle

Dagli spettri stellari si possono ricavare numerose informazioni:

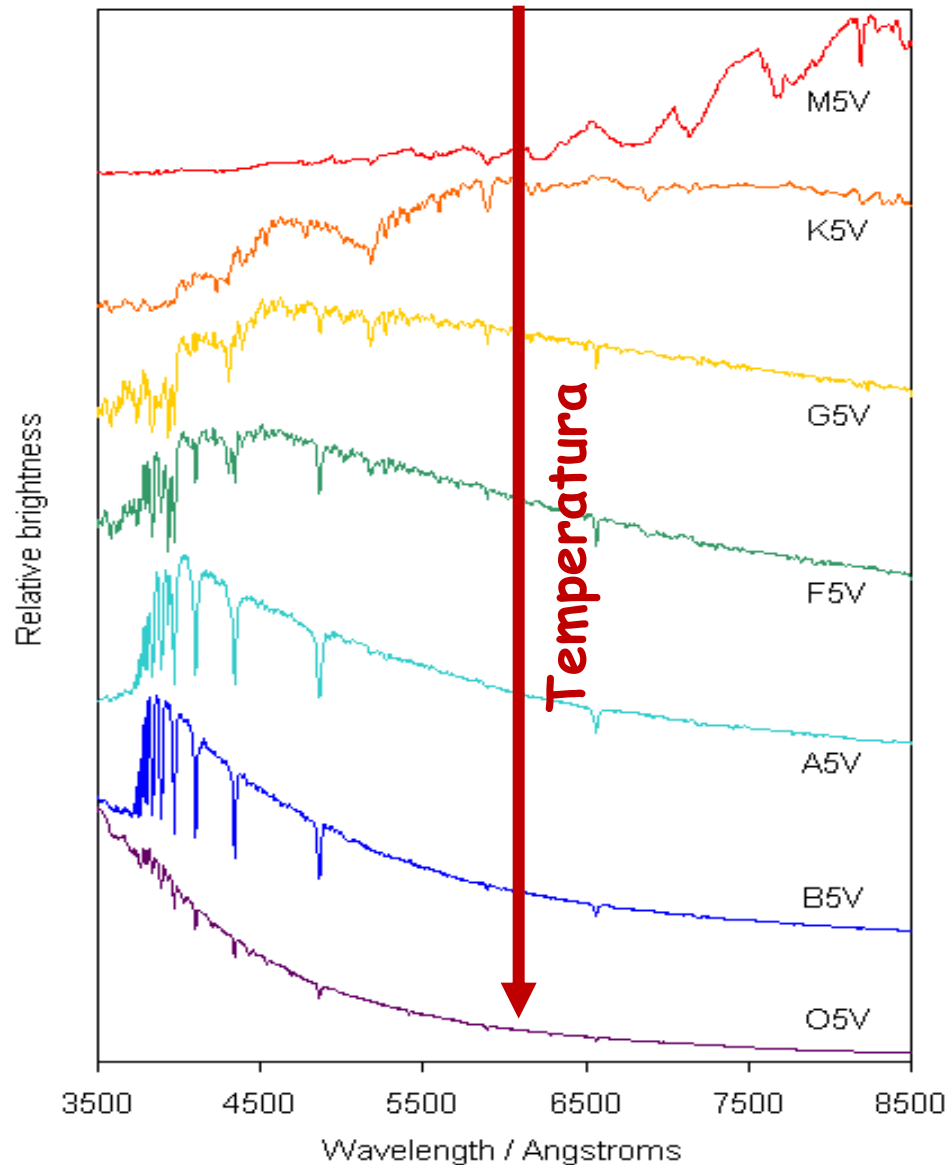
- **MAGNITUDINI** \Rightarrow **LUMINOSITA'** (potenza emessa)
- **COLORE** \Rightarrow **TEMPERATURA** (Corpo Nero equivalente)

E inoltre (ancora da spiegare):

- **COMPOSIZIONE CHIMICA** (righe spettrali)
- **VELOCITA'** (Effetto Doppler)

Si può quindi tentare una **classificazione spettrale** delle stelle in base alle caratteristiche dei loro spettri

Classificazione degli Spettri Stellari



Esempi di spettri stellari, ordinati dall'alto al basso in modo da evidenziare il valore decrescente della lunghezza d'onda nel punto di massima intensità: ciò indica temperature crescenti (legge di Wien dello spettro di Corpo Nero).

Gli spettri stellari, in pratica

La fotosfera delle stelle non è perfettamente isoterma, ed inoltre il gas che la costituisce assorbe e riemette parte della radiazione proveniente dall'interno della stella.

In pratica, lo spettro di una stella può essere descritto come una combinazione di

SPETTRO CONTINUO DI CORPO NERO
proveniente dall'interno della stella

RIGHE DI ASSORBIMENTO
dovute alla fotosfera stellare

Spettri caratteristici

Si possono distinguere idealmente tre differenti tipi di spettro:



Spettro Continuo

A horizontal bar showing a continuous spectrum of colors, transitioning from purple on the left, through blue, green, yellow, orange, and red, to magenta on the right.



Spettro di Assorbimento

A horizontal bar showing a continuous spectrum of colors, similar to the continuous spectrum, but with several vertical black lines of varying widths superimposed, representing absorption lines.



Spettro di Emissione

A horizontal bar showing a black background with several vertical lines of different colors (purple, blue, green, yellow, orange, red, magenta) superimposed, representing emission lines.

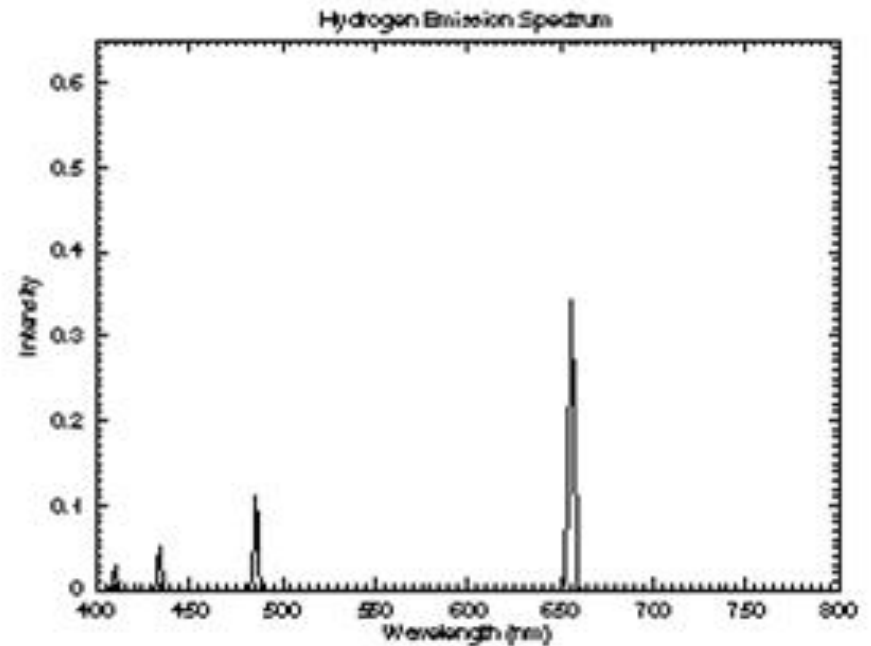
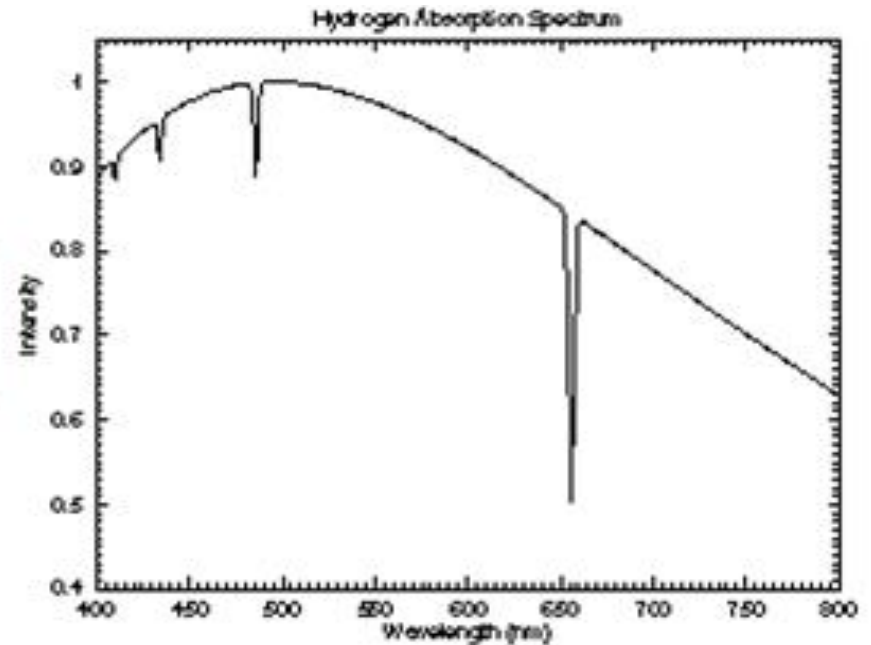
Esempio di spettro di assorbimento

absorption line spectrum

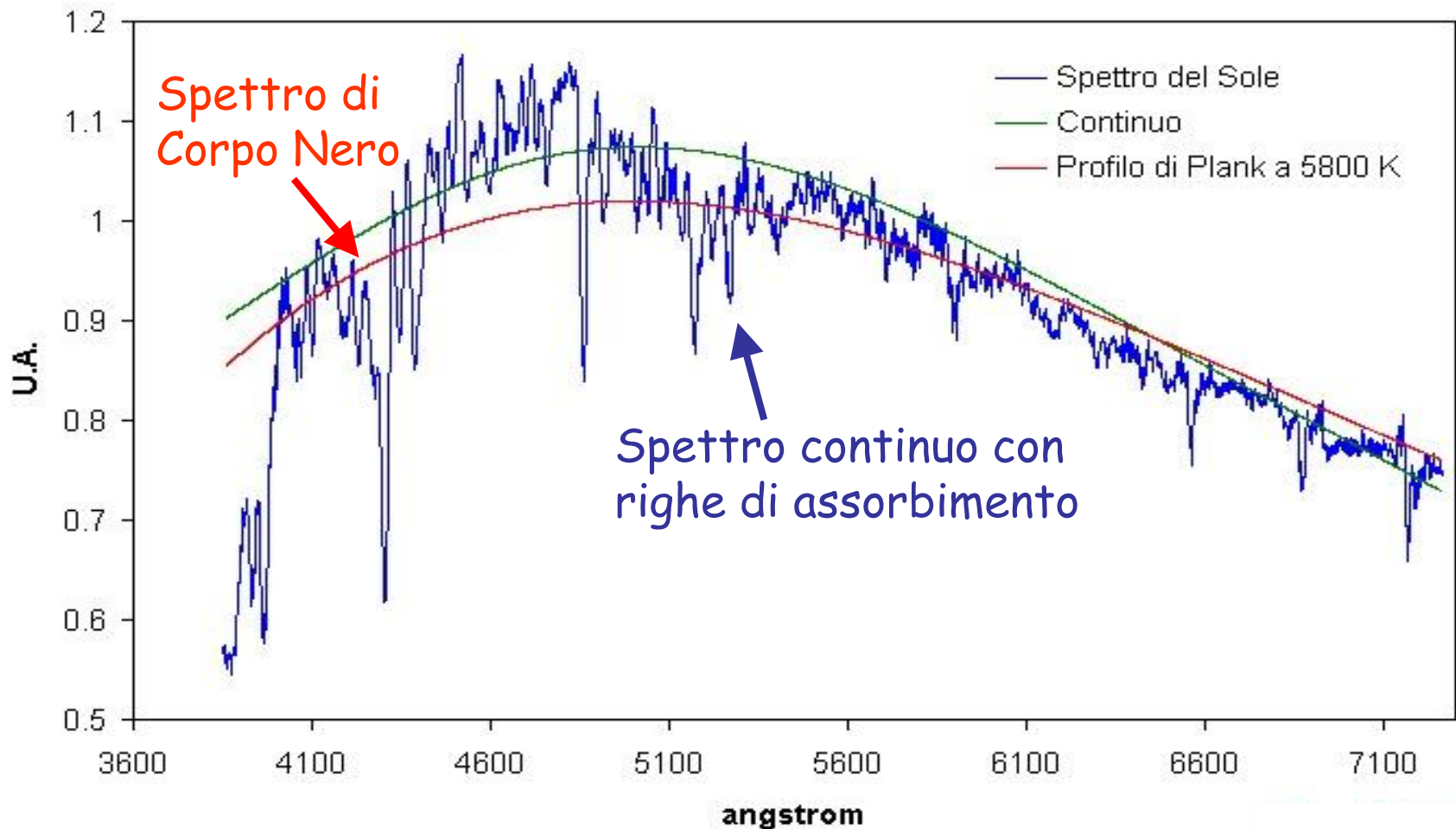


emission line spectrum

...e spettro in emissione




Lo spettro del Sole, in pratica



Classificazione degli Spettri Stellari

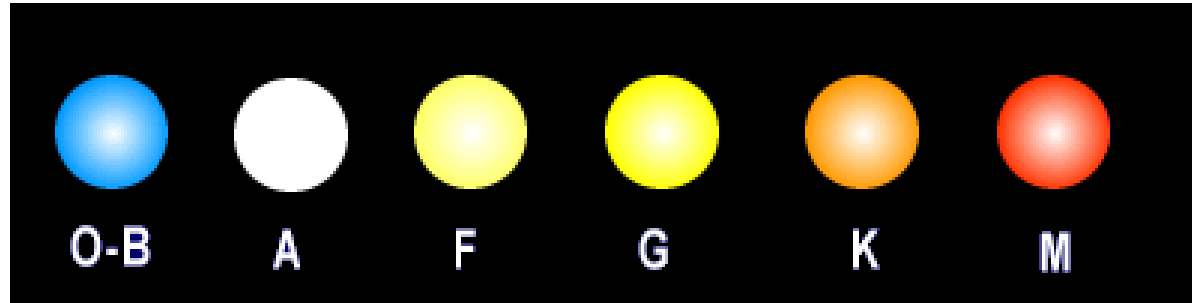
Sulla base delle caratteristiche dello spettro le stelle vengono classificate in **Tipi Spettrali**

- Il parametro fisico fondamentale per la classificazione spettrale delle stelle è la **temperatura (T)** 
- Al variare della **T** varia la forma del continuo ma anche il tipo di **righe e bande di assorbimento**
- Un esame accurato dimostra che a parità di T lo spettro dipende anche dalla **pressione** del gas alla superficie della stella (cioè in fotosfera), che a sua volta dipende dalla **gravità** e quindi dal **raggio** della stella:

$$g = \frac{G \cdot M}{R^2}$$

Classificazione spettrale delle stelle

I **Tipi Spettrali** fondamentali sono 7: **O, B, A, F, G, K, M**



Suddivisi a loro volta in 10 sottotipi in ordine di Temperatura decrescente: 0,1,...,9

Inoltre si distinguono 5 **classi di luminosità** in ordine di gravità superficiale crescente: I, II, III, IV, V

Esempio:

il Sole è una **G2V** (stella nana di Sequenza Principale)

Righe di assorbimento principali negli Spettri Stellari

Classe	Temperatura (K)	Righe
O	25000-50000	He II
B	12000-25000	He I, H I
A	~ 9000	H I, Ca II
F	~ 7000	H I, banda G
G	~ 5500	H I, Ca II, CN,...
K	~ 4500	Ca II, Ca I,...
M	~ 3000	TiO

1 K = -273.15 °C

Sommario

1. Temperatura efficace e Colori delle stelle
2. La relazione colore-temperatura
3. La classificazione spettrale delle stelle
4. Il diagramma di Hertzsprung-Russel

Il Diagramma Hertzsprung-Russel

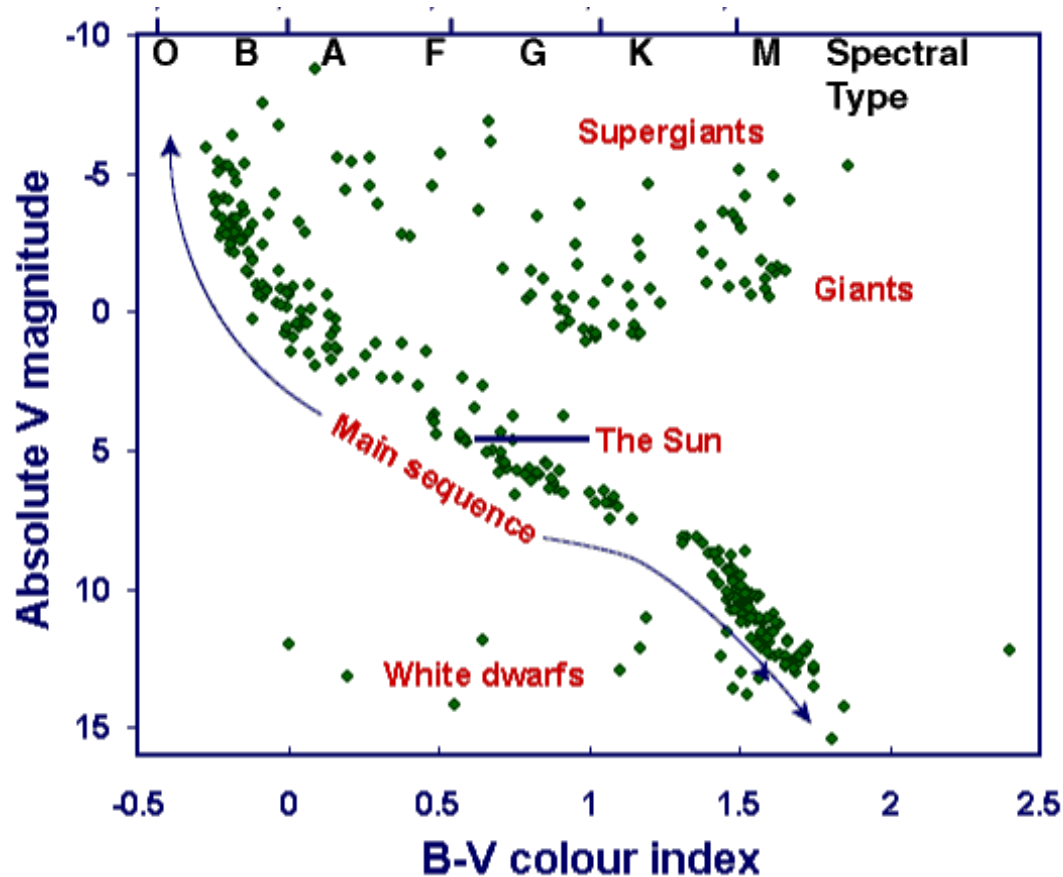
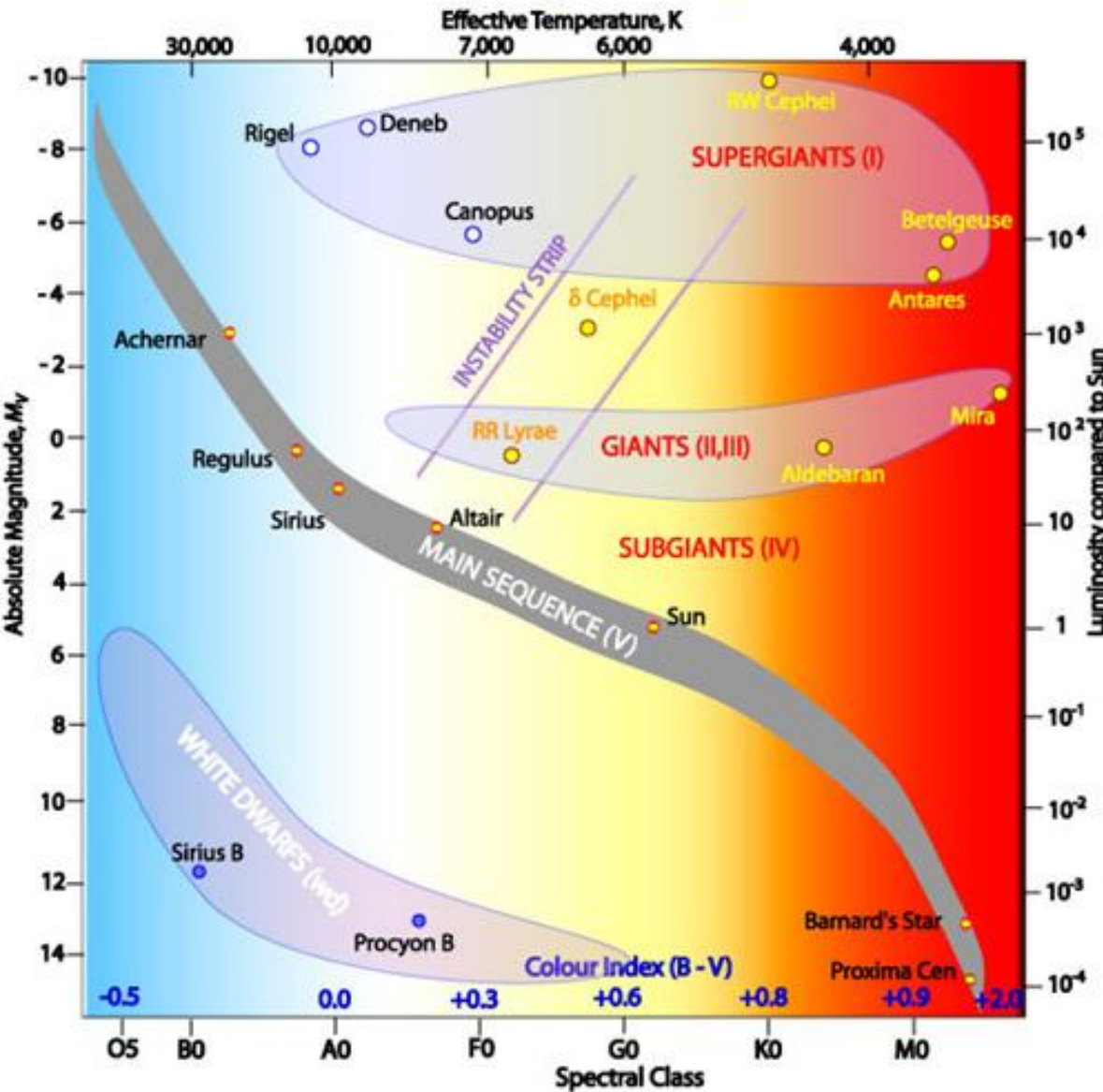


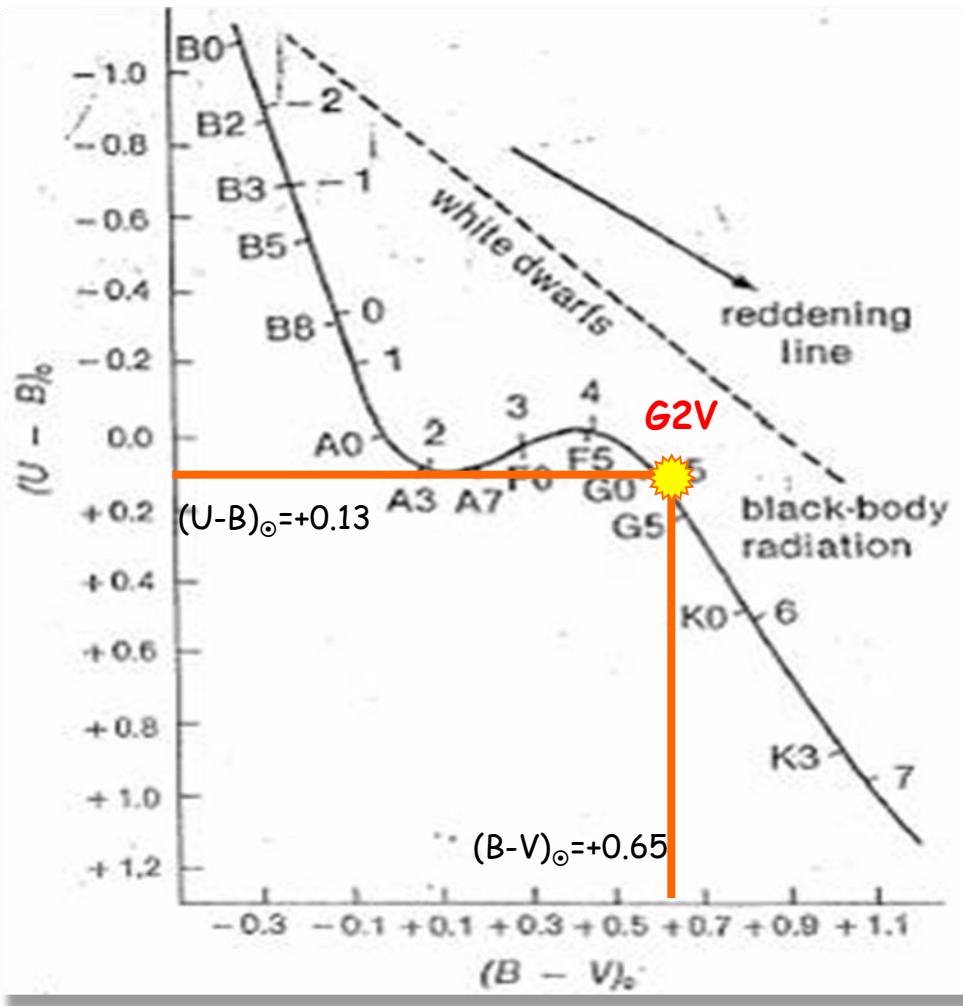
Grafico empirico che mostra le possibili combinazioni tra indice di colore (o tipo spettrale) e magnitudine assoluta delle stelle: si chiama per questo **Diagramma Colore-Magnitudine** o **Diagramma H-R**

Il Diagramma Hertzsprung-Russel



Dal punto di vista teorico è equivalente a una **relazione Temperatura-Luminosità**

Diagrammi Colore-Colore



Per ogni banda fotometrica si possono calcolare le magnitudini apparenti e/o assolute e diversi indici di colore: ad es.

U-B, B-V, V-R, B-R, V-I

Mettendo in grafico coppie di indici di colore si ottengono i cosiddetti **diagrammi colore-colore**

Effetti dell'assorbimento interstellare

Il gas e la polvere che si trovano nello spazio interstellare che ci separa dagli oggetti celesti assorbe parte della luce emessa dalle stelle, ma non in modo uguale a tutte le lunghezze d'onda. Distinguiamo due effetti:

- **Estinzione:** la stella apparirà più debole
- **Arrossamento:** la stella apparirà più rossa

Effetti dell'assorbimento interstellare

- **Estinzione:** la stella appare più debole, ovvero la sua magnitudine apparente sarà minore del caso ideale senza assorbimento. Occorre fare una correzione per risalire alla magnitudine assoluta reale e tale correzione dipende dalla banda fotometrica: Ad es., in banda V

$$M_V = m_V - A_V + 5 - 5 \log(d)$$

- **Arrossamento:** l'assorbimento cresce al decrescere della lunghezza d'onda, quindi le stelle appariranno più rosse di quanto non lo siano effettivamente. Occorre correggere anche il colore, di una quantità chiamata Eccesso di Colore:

$$(B-V)_0 = (B - A_B) - (V - A_V) = (B-V) - (A_B - A_V)$$

$$(B-V)_0 = (B-V) - E(B-V)$$