

Astronomia

Lezione 5/11/2012

Docente: Alessandro Melchiorri

e.mail:alessandro.melchiorri@roma1.infn.it

Sito web per slides lezioni: oberon.roma1.infn.it:/alessandro/astro2012/

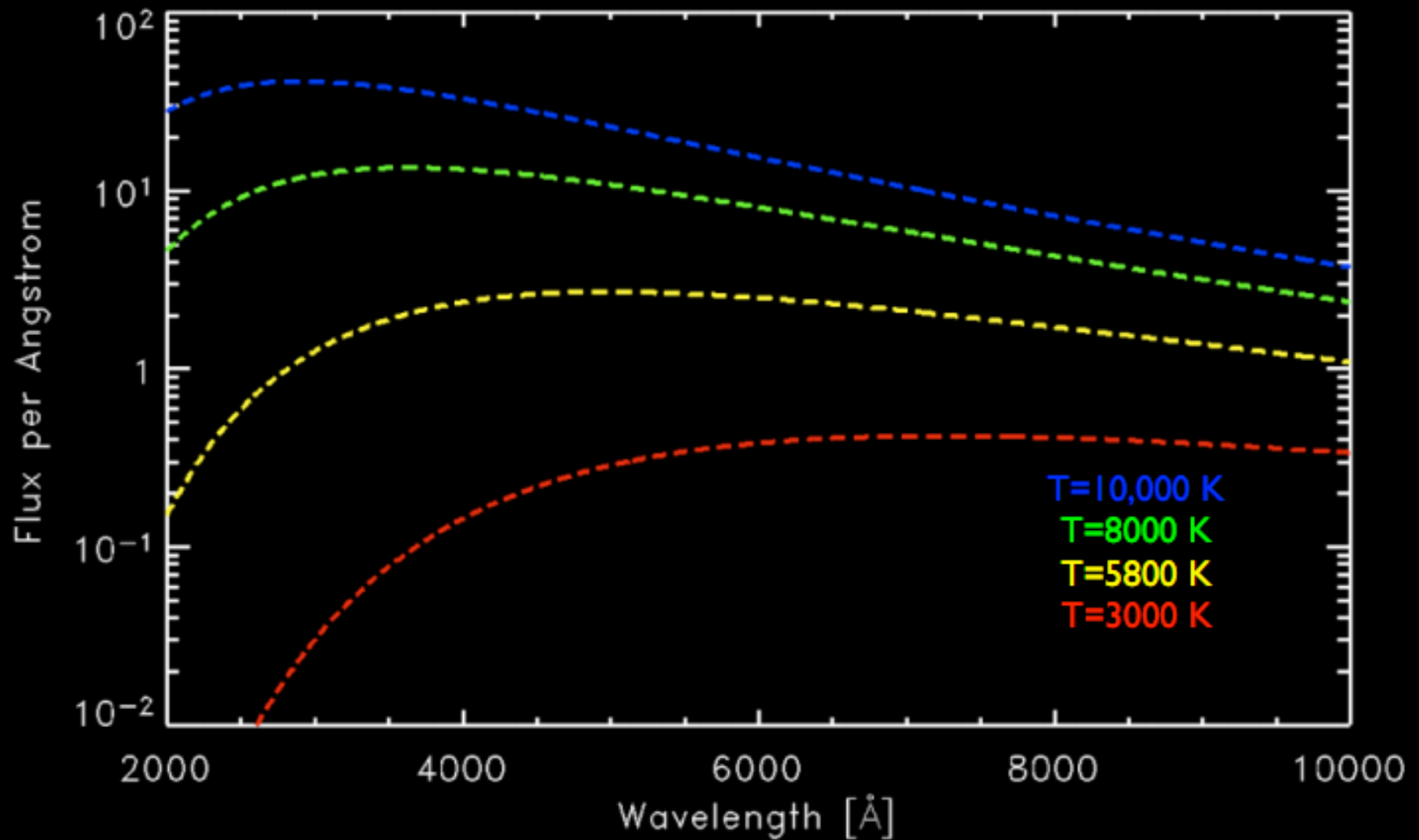
Le lezioni astronomia012_*.pdf sono quelle di quest'anno !

astronomia_*.pdf sono dell'anno scorso.

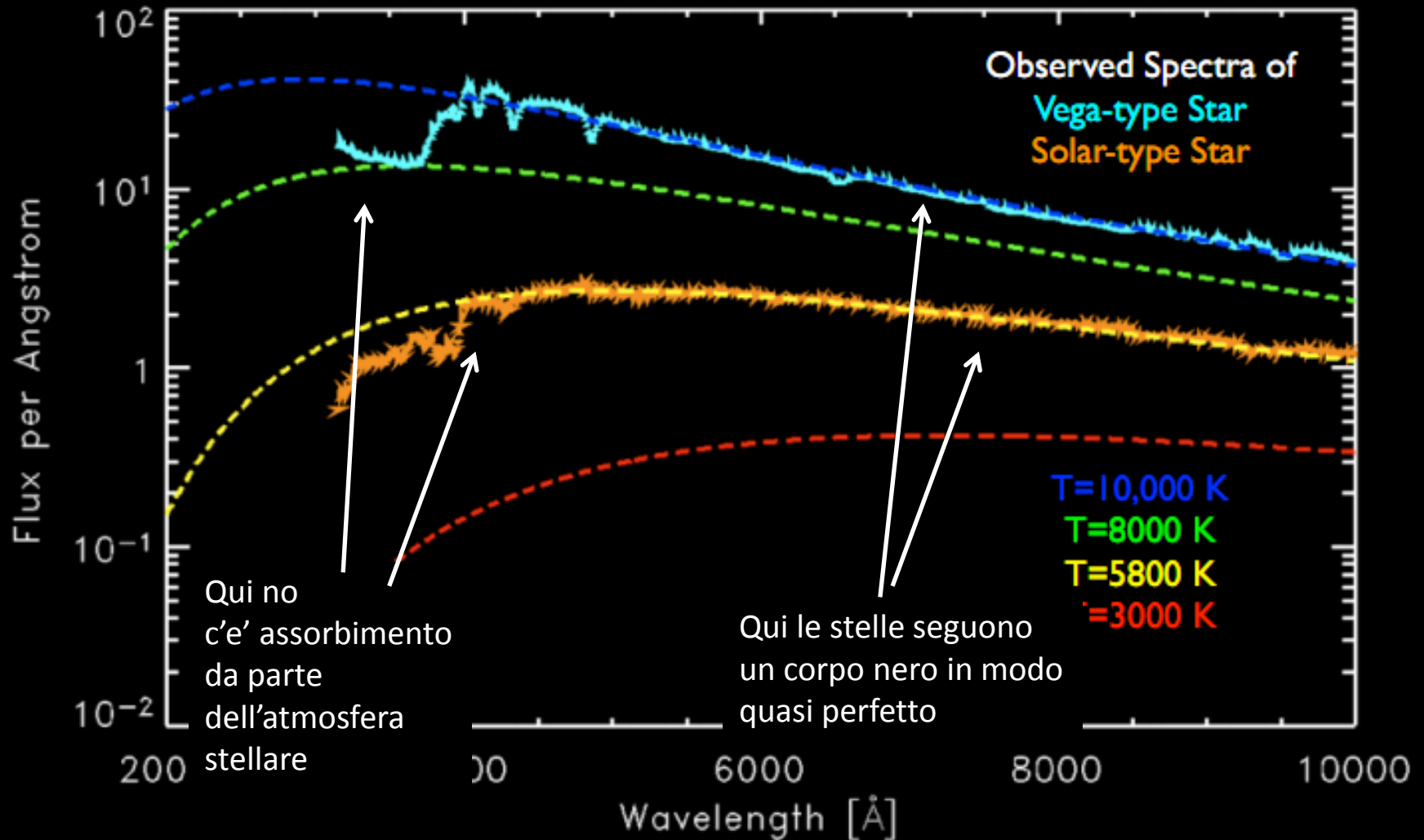
Libri di testo consigliati:

- An introduction to modern astrophysics B. W. Carroll, D. A. Ostlie, Addison Wesley
- Astronomy: A physical perspective, Marc L. Kutner, Cambridge University Press.
- Fundamental Astronomy, Karttunen e altri, Springer
- Elementi di Astronomia, P. Giannone.

Cosa possiamo imparare sulle stelle dai loro spettri ?



Cosa possiamo imparare sulle stelle dai loro spettri ?



Classificazione spettrale delle stelle



Studi pionieristici sugli spettri stellari furono realizzati dall'astronomo vaticano padre **Angelo Secchi**, fra il 1860 e il 1870. Dallo studio degli spettri di circa 4000 stelle egli riconobbe che, nonostante le diversità fra i tanti oggetti studiati, questi potevano essere raggruppati in cinque classi (da I a V) di stelle con spettri simili fra di loro. Da questa fondamentale scoperta partirono poi studi su campioni di stelle più ampi, i quali hanno portato ai moderni schemi di classificazione degli spettri stellari.

Classificazione spettrale delle stelle

La classificazione di Padre Secchi si basava sugli spettri stellari.

TIPO	COLORE	SPETTRO CARATTERISTICO	ESEMPI DI STELLE	NOTE
1	Bianco o azzurrognolo	Spettro quasi continuo, solcato da 4 intense righe dell'idrogeno più altre righe di magnesio, sodio e ferro (giallo e verde)	Sirio, Vega, Altair	Assai numerose
2	Giallo	Righe dell'idrogeno più sottili del tipo 1, presenti ferro e magnesio		Altrettanto numerose
3	Rosso o arancione	Righe nere e lucide di metalli alternate a zone oscure più sfumate	Sole, Arturo, Capra, Capella, Polluce	Poco numerose
4	Rosso sangue o rubino	Presenti le 3 righe larghe e continue del carbonio; assenti le righe dei metalli	Betelgeuse, Antares, Mira Ceti	Stelle di piccola grandezza e luminosità



Questo schema fu definito nel Novecento, da Annie Cannon dell'Harvard College Observatory sotto la direzione di Edward Pickering.

La ragione per questa strana disposizione delle lettere è storica. Quando si iniziò a registrare gli spettri delle stelle, si notò che queste presentavano linee spettrali dell'idrogeno molto diverse tra loro, e quindi si definì una classificazione basata sulle linee dell'idrogeno (la serie di Balmer) da A (la più forte) fino a Q (la più debole). Vennero quindi usate le linee di altri atomi, neutri o ionizzati (linee del calcio, linee del sodio D, ecc.). Si trovò in seguito che alcune di queste classi erano dei duplicati, e vennero quindi rimosse. Solo dopo molto tempo si scoprì che l'intensità delle linee dell'idrogeno erano legate alla temperatura superficiale della stella. Questo lavoro fu svolto principalmente dalle "ragazze" dell'Harvard College Observatory, **Annie Jump Cannon** e **Antonia Maury**, basandosi sul lavoro di **Williamina Fleming**. Queste classi sono ulteriormente suddivise usando i numeri arabi da 0 a 9. A0 indica le stelle più calde di classe A, e A9 quelle più fredde. Cannon catalogò circa 200.000 stelle nel catalogo Henry Draper. Alcune stelle si catalogano così. Ad esempio HD39801 e Betelgeuse.





L' «Harem» di Pickering 1913

Classificazione spettrale delle stelle

Classificazione di Harvard

La classificazione di Harvard distingue sette classi spettrali contrassegnate nell'ordine dalle lettere **O, B, A, F, G, K, M**. La classe O annovera le stelle azzurre, di **più alta temperatura superficiale**, la classe M le stelle rosse di **più bassa temperatura superficiale**.

Ecco le caratteristiche essenziali delle varie classi:

CLASSE O - Stelle bianco-azzurre di altissima temperatura fra 60.000° e 30.000° . Solo poche righe solcano lo spettro continuo e sono più che altro righe dell'elio neutro e ionizzato, nonché deboli righe dell'idrogeno.

CLASSE B - Stelle bianco-azzurre sui 30.000° - 10.000° . Mostrano righe dell'elio neutro mentre non ci sono più quelle dell'elio ionizzato; le righe dell'idrogeno sono più intense che nella classe O.

CLASSE A - Stelle bianche di temperatura fra 10.000° e 7.500° . Le righe dell'idrogeno hanno in questa classe la massima intensità; compaiono deboli righe di alcuni metalli, come calcio e magnesio.

CLASSE F - Stelle bianche di temperatura fra 7.500° e 6.000° . Le righe dell'idrogeno, più deboli che nella classe precedente, sono ancora molto intense. Le righe dei metalli appaiono numerose.

CLASSE G - Stelle bianco-giallastre di temperatura fra 6.000° e 5.000° . Le righe dell'idrogeno sono ancora più deboli che nella classe F, mentre quelle dei metalli sono numerosissime ed intense: calcio neutro e ionizzato, ferro, magnesio, titanio, ecc. Quelle del calcio ionizzato (**CaII**), note come righe **H** e **K**, che cadono nel vicino ultravioletto, sono fra le più intense dello spettro.

CLASSE K - Stelle "fredde" di colore rosso-arancio. Essendo la temperatura compresa fra 5.000° e 3.500° lo spettro è fitto di righe dovute prevalentemente a metalli. Le righe dell'idrogeno sono assai deboli.

CLASSE M - Stelle ancora più fredde, avendo temperatura sui 3.000° e quindi color rossastro. L'atmosfera, cioè gli strati più esterni di queste stelle, contengono non solo elementi ma anche composti chimici e cioè molecole, le quali danno origine nello spettro a bande.

Ciascuna classe viene suddivisa in 10 sottoclassi o tipi, indicate con i numeri da 0 a 9 aggiunti alle lettere.

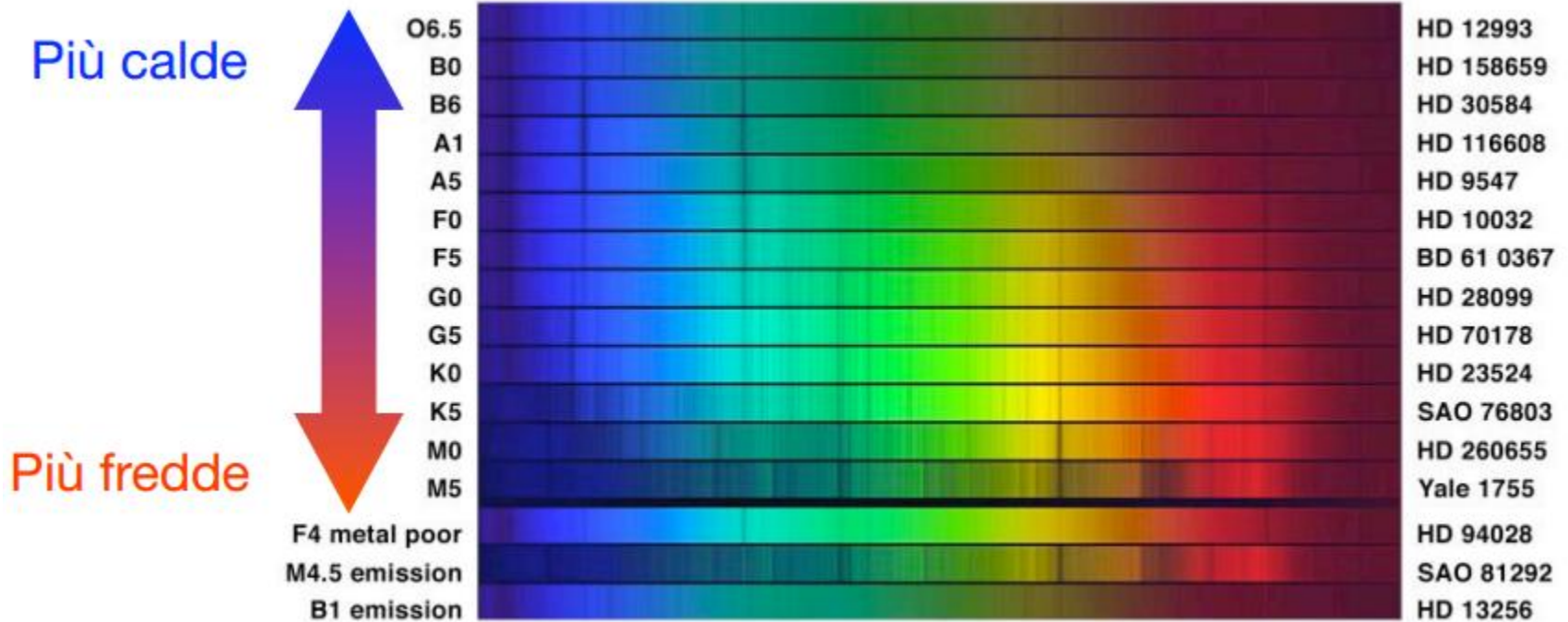
Come ricordarsi la classificazione stellare...

Oh Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me

Classificazione spettrale delle stelle

Classificazione di Harvard

Quindi, riassumendo le stelle possono essere classificate in base alle loro righe di assorbimento. Queste righe, come vedremo, dipendono per lo più dalla **temperatura superficiale della stella** e non dalla **abbondanza dell'elemento**. Spiegheremo perché si ha questo nelle prossime lezioni. Quindi la classificazione spettrale è essenzialmente **una classificazione in base alla temperatura dell'atmosfera stellare**.

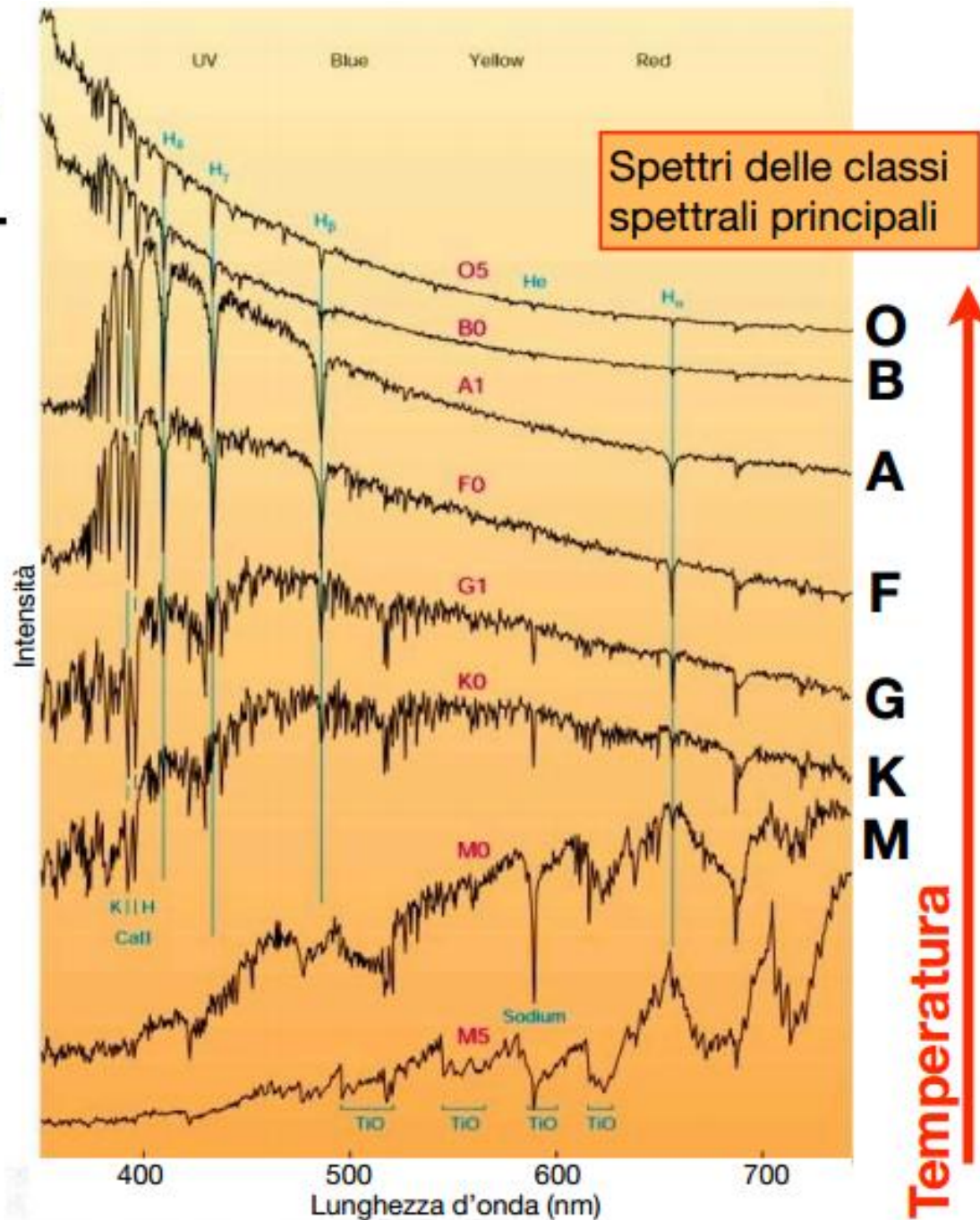


Notiamo che la misura delle righe fornisce un metodo alternativo a quello del corpo nero alla misura della temperatura superficiale stellare. È anche maggiormente usato perché più accurato (molte stelle sono solo approssimativamente corpi neri).

Spettri stellari

Notare:

1. La variazione di intensità delle righe di Balmer
2. La presenza di He alla alte temperature superficiali
3. La presenza di righe molecolari alle basse temperature superficiali
4. La variazione della forma complessiva dello spettro.



Nane Brune

Piu' recentemente si sono aggiunte due classi per stelle che emettono principalmente nel vicino infrarosso. Tali stelle prendono anche il nome di **nane brune**.

Classe L ($1300\text{K} < T < 2500\text{K}$)

La recente classe **L** contiene stelle di colore rosso molto scuro, che brillano principalmente nell'infrarosso. I loro gas sono abbastanza freddi da permettere a idruri metallici e vari metalli di mostrarsi nello spettro.

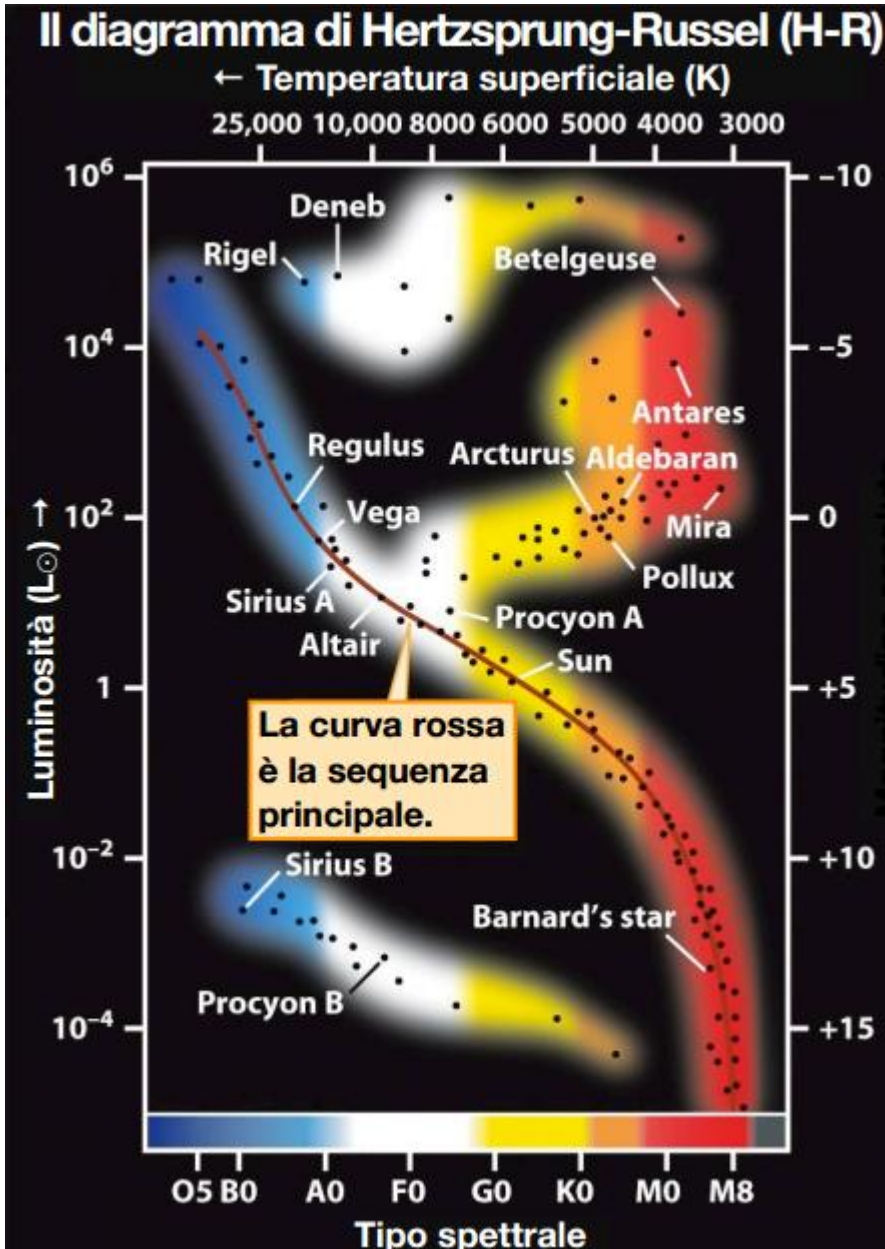
Classe T ($T < 1300\text{K}$)

Alla fine della scala si trova la **T**. In questa classe si trovano sia stelle appena abbastanza grandi da potersi definire tali, sia alcuni oggetti substellari, le cosiddette nane brune. Sono oggetti praticamente neri, che emettono poca o nessuna luce visibile ma molta radiazione infrarossa. La loro temperatura superficiale è di appena 1000 kelvin, contro i 50.000 gradi da cui partono le stelle O, all'inizio della scala. Nelle stelle di tipo T possono formarsi molecole complesse, come mostrano le spesso forti linee del metano nei loro spettri.

“Oh Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me—Less Talk!”

Le stelle di classe O,B, F sono anche dette di **primo tipo (early type)** mentre le stelle K, M sono dette di **ultimo tipo (late type)**. Questa suddivisione si fa anche per le stesse classi (es K0 e' di primo tipo In K, K8 e' di ultimo tipo). Questa suddivisione e' pero' ormai in disuso e **sbagliata** perche' si basava su una teoria gravitazionale per spiegare il meccanismo delle stelle (i.e. senza processi nucleari).

Diagramma di Hertzsprung-Russel (HR)



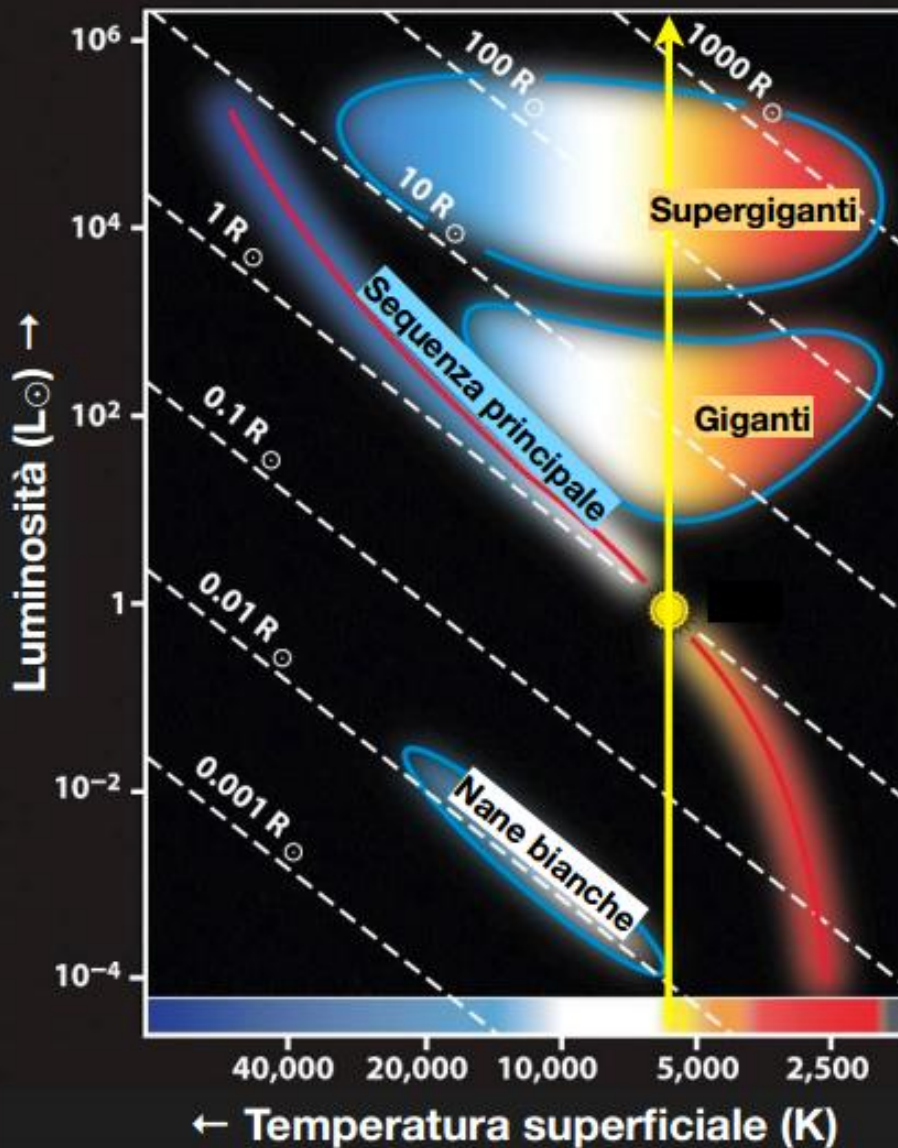
Dato un catalogo di stelle di cui si conoscono la luminosità (o magnitudine assoluta) e la loro classificazione spettrale è possibile fare un diagramma di **Hertzsprung-Russel**.

Come si vede dalla figura le stelle non si distribuiscono uniformemente nel diagramma ma popolano alcune determinate regioni.

La zona più popolosa (la curva rossa) è detta **sequenza principale**.

Diagramma HR – Raggi Stellari

Raggi stellari nel diagramma H-R



Dalla relazione:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4.$$

è possibile ricavare il raggio della stella una volta note luminosità e temperatura superficiale.

Questo genera una serie di rette (la scala è semilogaritmica) nel diagramma HR.

Notiamo che le zone più popolate non si distribuiscono in zone a raggio costante.

In figura si evidenziano altre regioni:

- Supergiganti
- Giganti
- Nane bianche

Notiamo però che alcune giganti sembrerebbero avere raggio maggiore delle supergiganti.

Che tipo di classificazione è ?

Classificazione spettrale di Yerkes

La **classificazione spettrale di Yerkes**, chiamata anche il sistema **MKK**, è un sistema di classificazione spettrale introdotto nel 1943 da William W. Morgan, Phillip C. Keenan e Edith Kellman dello Yerkes Observatory.

Questa classificazione si basa su linee spettrali sensibili alla **gravità superficiale** della stella, la quale è in genere legata direttamente alla sua densità, invece che alla sola temperatura come la tradizionale classificazione di Harvard.

Tutte queste differenze si manifestano come *effetti di luminosità*, che influenzano sia la larghezza che l'intensità delle linee spettrali.

Questa classificazione distingue **sette** tipi diversi di stelle:

I supergiganti

Ia supergiganti più luminose

Ib supergiganti meno luminose

II giganti luminose

III giganti normali

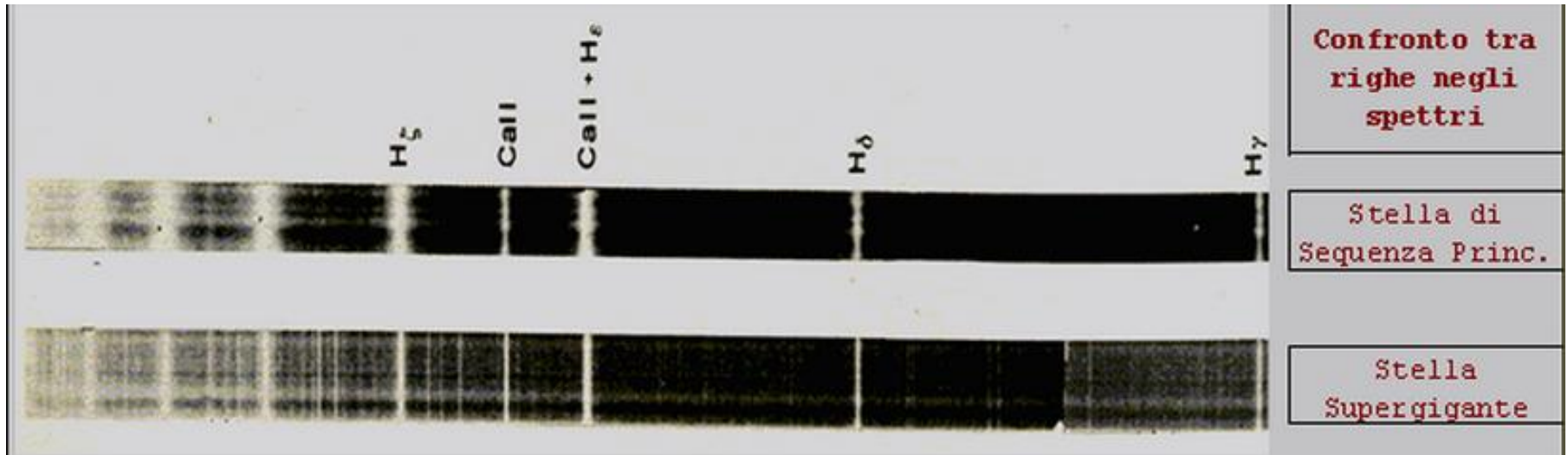
IV subgiganti

V stelle di sequenza principale (nane), come il Sole

VI subnane (usata raramente)

VII nane bianche (usata raramente)

Classificazione di Yerkes



In pratica si osserva che alcuni spettri, pur presentando le righe nelle stesse posizioni, e quindi stesse temperature, mostrano un **profilo** di riga molto diverso.

Si può vedere che maggiore è la pressione in un gas maggiore è l'allargamento della riga.

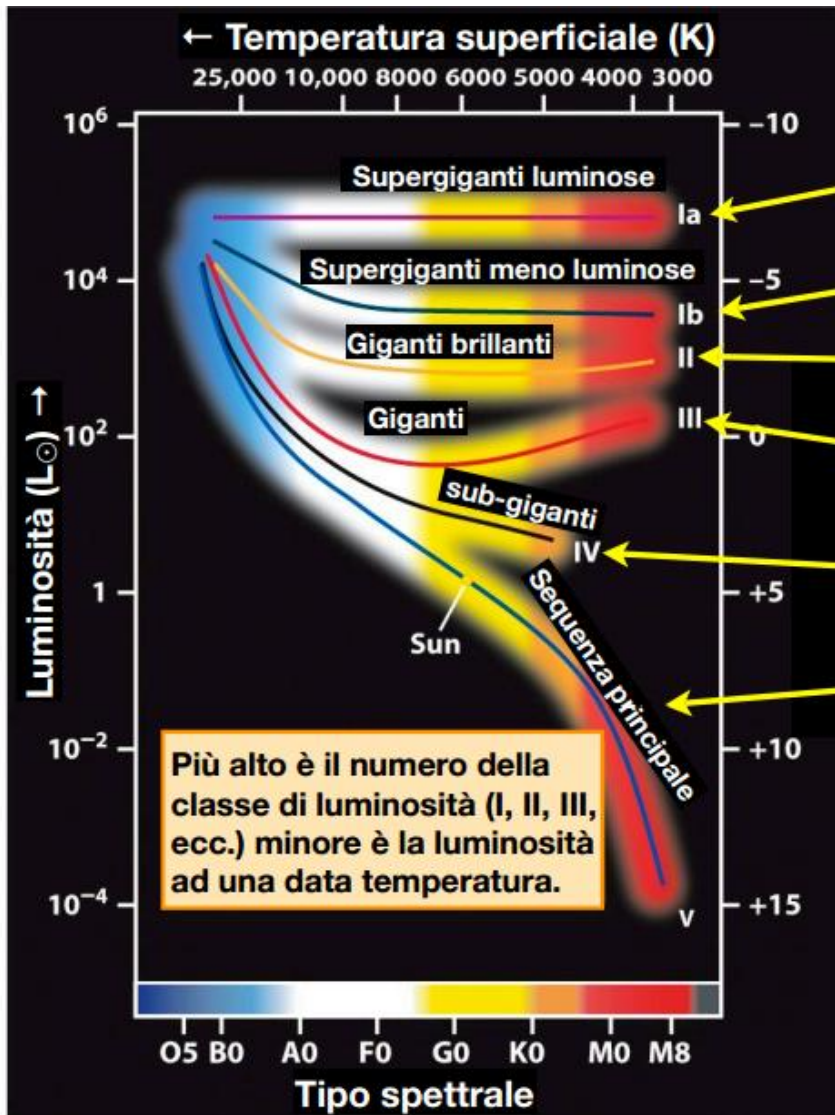
La pressione in una stella di raggio maggiore sarà ovviamente minore a parità di massa rispetto ad una stella di raggio minore (vedi figura).

La classificazione di Yerkes si basa essenzialmente sullo studio del profilo delle righe e quindi dipende dalla densità superficiale della stella.

Questa dipende dalla **massa** della stella (e quindi dalla sua **luminosità**) e dal suo **raggio**.

Quindi la definizione di giganti, nane etc non dipende solo da quanto sono grandi ma anche da quanto sono luminose. La classificazione di Yerkes si basa solo sulle righe.

Classificazione spettrale di Yerkes



Ia Super giganti brillanti

Ib Super giganti

II Giganti brillanti

III Giganti

IV Sub-giganti

V Sequenza principale

Questa classificazione non si basa sulla temperatura ma anche su raggio e luminosità (massa) della stella.

Riassumendo io di una stella conosco: temperatura superficiale, raggio e luminosità che non sono parametri indipendenti. Per classificare una stella mi bastano quindi **due** classi.

Classificazioni spettrali

In pratica se fornisco il tipo spettrale (e quindi la temperatura) più la classe di luminosità (quindi luminosità e raggio) individuo un punto specifico nel diagramma H-R e la mia stella e' classificata.

Come vediamo da questi esempi fornire solo la temperatura non basterebbe !!

Sole	G2V	Gialla, sequenza principale, $T=5800$ K
Stella Polare	G2Ib	Gialla, supergigante, $T=5800$ K, $R=100 R_{\odot}$
Sirio	A1V	Bianca, sequenza principale, $T\sim 10000$ K, $R\sim 2 R_{\odot}$
Rigel	B8Ia	Blu-bianca, supergigante brillante, $T\sim 12000$ K, $R\sim 100 R_{\odot}$
Betelgeuse	M2Ia/b	Rossa, supergigante, $T\sim 3000$ K, $R\sim 1000 R_{\odot}$



Observation data	
Epoch J2000	Equinox J2000
Constellation	Puppis
Right ascension	08 ^h 03 ^m 35.16 ^[1]
Declination	-40° 00' 11.6 ^[1]
Apparent magnitude (V)	2.21
Characteristics	
Spectral type	O5 Iaf
U-B color index	-1
B-V color index	-0.27
Astrometry	
Proper motion (μ)	RA: -30.82 ^[1] mas/yr Dec.: 16.77 ^[1] mas/yr
Parallax (π)	3.00 ± 0.10 mas
Distance	1090 ± 40 ly (330 ± 10 pc)
Absolute magnitude (M _V)	-5.96
Details	
Mass	60 ^[2] M _☉
Radius	17 ^[2] R _☉
Luminosity	(bolometric)360,000 ^[2] L _☉
Temperature	34,326 ^[3] K
Metallicity	?
Rotation	>211 km/s.(>4.8 days)
Age	4 × 10 ⁵ years

Classe O 30.000 - 60.000 K stelle blu

Le stelle di classe **O** sono molto calde e luminose, mostrando un colore decisamente blu. **Naos** (o zeta Puppis, nella costellazione della Poppa) brilla con una luce pari a 360000 volte quella del Sole. Queste stelle hanno forti linee dell'elio neutro e ionizzato, e solo deboli linee dell'idrogeno. La maggior parte della luce da loro emessa è composta da raggi ultravioletti.

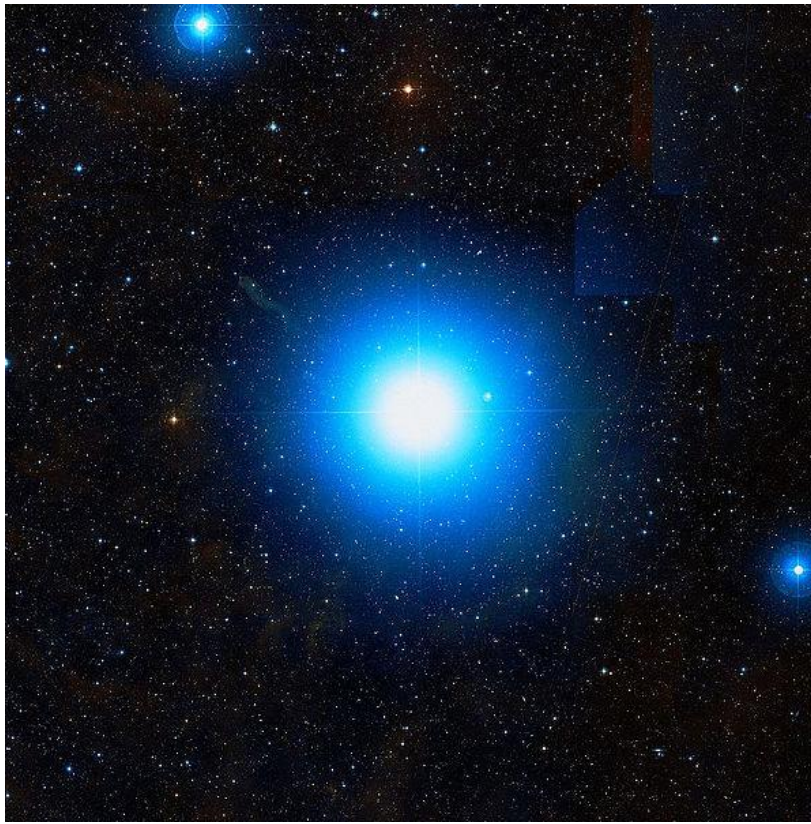
Un'altra stella di tipo O famosa è Mintaka o δ Orionis.

In realtà questo e' un sistema stellare multiplo composto da sei stelle !!

Classe spettrale	Aa1: O9 II ^[1]
	Aa2: B 0,5 III ^[2]
	Ab: O9 IV ^[3]
	B: ?
	Ca: B2 V ^[4]
	Cb: A0 V ^[5]

Temperatura superficiale	Aa1: 30.000 K ^[3]
	Aa2: 21.960 \pm 2310 K ^[3]
	Ab: 32.000 K ^[3]
	B: ?
	Ca: 20.000 K ^[5]
	Cb: 10.000 K ^[5] (media)





Observation data	
Epoch J2000.0	Equinox J2000.0
Constellation	Orion
Pronunciation	/ˈraɪdʒəl/{normal-en}
Right ascension	05 ^h 14 ^m 32.272 ^s [1]
Declination	−08° 12′ 05.91″[1]
Apparent magnitude (V)	0.18 ^[1]
Characteristics	
Spectral type	B8Iab ^[2]
U−B color index	−0.66
B−V color index	−0.03
Variable type	Slightly irregular
Astrometry	
Radial velocity (R _v)	20.7 ^[2] km/s
Proper motion (μ)	RA: 1.87 ^[1] mas/yr Dec.: −0.56 ^[1] mas/yr
Parallax (π)	4.22 ± 0.81 mas
Distance	772.51 ly (238.96 pc)
Absolute magnitude (M _V)	−6.7
Details	
Mass	17 M _☉
Radius	78 ^[3] R _☉
Luminosity	66,000(bolometric) L _☉
Temperature	11,000 K

Classe B 10.000 - 30.000 K stelle blu-bianche

Le stelle di classe **B** sono anch'esse molto luminose e molto calde, anche se non come le precedenti. **Rigel** (nella costellazione di Orione) è una supergigante di tipo B. I loro spettri mostrano linee dell'elio neutro e dell'idrogeno.

Un'altra stella di tipo spettrale B e' Spica (Spica Virginis) . Questa stella in realtà è doppia (è stata una delle prime binarie spettroscopiche ad essere scoperta).



Classe spettrale	B1 III-IV ^[1] / B2 V ^[2]
Tipo di variabile	β Cep ^[3] , Variabile rotante ellissoidale ^[3]
Periodo di variabilità	4,17036 ore ^[3] , 4,014 giorni ^[3]
Distanza dal Sole	250 \pm 13 anni luce ^[4]
Costellazione	Vergine

Raggio medio	7,40 \pm 0,57 ^[6] / 3,64 \pm 0,28 ^[6] R _☉
Massa	10,25 \pm 0,68 ^[6] / 6,97 \pm 0,46 ^[6] M _☉
Acceleraz. di gravità in superficie	log g 3,5 ^[8] / 4,2 \pm 0,2 ^[9]
Periodo di rotazione	2,3 giorni ^[8] / ?
Velocità di rotazione	199 \pm 5 ^[6] / 87 \pm 6 km/s ^[6]
Temperatura superficiale	22.400 \pm 1000 ^[5] / 17.000 ^[8] K (media)
Luminosità	14.800 \pm 300 ^[5] / 2300 ^[5] L _☉



Observation data	
Epoch J2000	Equinox J2000
Constellation	Cygnus
Right ascension	20 ^h 41 ^m 25.9 ^s
Declination	+45° 18' 49"
Apparent magnitude (V)	1.25
Characteristics	
Spectral type	A2 Ia
U-B color index	-0.24
B-V color index	+0.09
Variable type	Alpha Cyg
Astrometry	
Radial velocity (R _v)	-4.5 km/s
Proper motion (μ)	RA: 1.99 mas/yr Dec.: 1.95 mas/yr
Parallax (π)	2.29 ± 0.32 mas
Distance	approx. 1400 ly (approx. 440 pc)
Absolute magnitude (M _v)	-7.0
Details	
Mass	~20 M _☉
Radius	108 to 114 ^[2] R _☉
Luminosity	~54,000 L _☉
Temperature	8,525 K
Rotational velocity (v sin i)	-4.5 km/s

Classe A 7.500 - 10.000 K stelle bianche

Stelle di tipo **A** sono la maggioranza di quelle visibili ad occhio nudo. **Deneb** (nel Cigno) è un'altra stella di luminosità formidabile, mentre **Sirio** è anch'essa di classe A, ma neanche lontanamente comparabile. Come le altre stelle di classe A, sono entrambe stelle bianche. Molte nane bianche sono anch'esse di classe A. Presentano forti linee dell'idrogeno e anche di metalli ionizzati. **Vega** è anch'essa una stella di classe A.



Observation data	
Epoch J2000	Equinox J2000
Constellation	Ursa Minor
Right ascension	02 ^h 31 ^m 49.09 ^s [1]
Declination	+89° 15' 50.8" [1]
Apparent magnitude (V)	1.97
Characteristics	
Spectral type	F7 Ib-II SB
U-B color index	0.38
B-V color index	0.80
Variable type	Cepheid variable
Astrometry	
Radial velocity (R _v)	-17 km/s
Proper motion (μ)	RA: 44.48 ± 0.11 [1] mas/yr Dec.: -11.85 ± 0.13 [1] mas/yr
Parallax (π)	7.54 ± 0.11 [1] mas
Distance	433 ± 6 ly (133 ± 2 pc)
Absolute magnitude (M _v)	-3.63 ± 0.14 [2]
Details	
Mass	7.54 ± 0.8 [2][3] M _⊙
Radius	30 R _⊙
Luminosity	2200 L _⊙
Temperature	7200 K
Metallicity	112% solar [4]
Rotation	~17 km/s
Age	? years

Classe F (6.000 - 7.500 K stelle giallo-bianche)

Le stelle **F** sono più fredde delle A. Un esempio è Polaris (la stella polare) nella costellazione dell'orsa minore. I loro spettri sono caratterizzati da linee di idrogeno più deboli e alcuni metalli ionizzati. Il loro colore è bianco con una tinta gialla.

Un altro esempio di stella classe spettrale F e' Canopo (α Carinae)
Canopo è la seconda stella più brillante del cielo dopo Sirio ma è poco
conosciuta (si vede meglio dall'emisfero sud).
E' inoltre una supergigante, cosa molto rara per una
stella di classe F.

Classificazione	Supergigante gialla
Classe spettrale	F0Ia
Distanza dal Sole	310 anni luce ^[1]
Costellazione	Carena

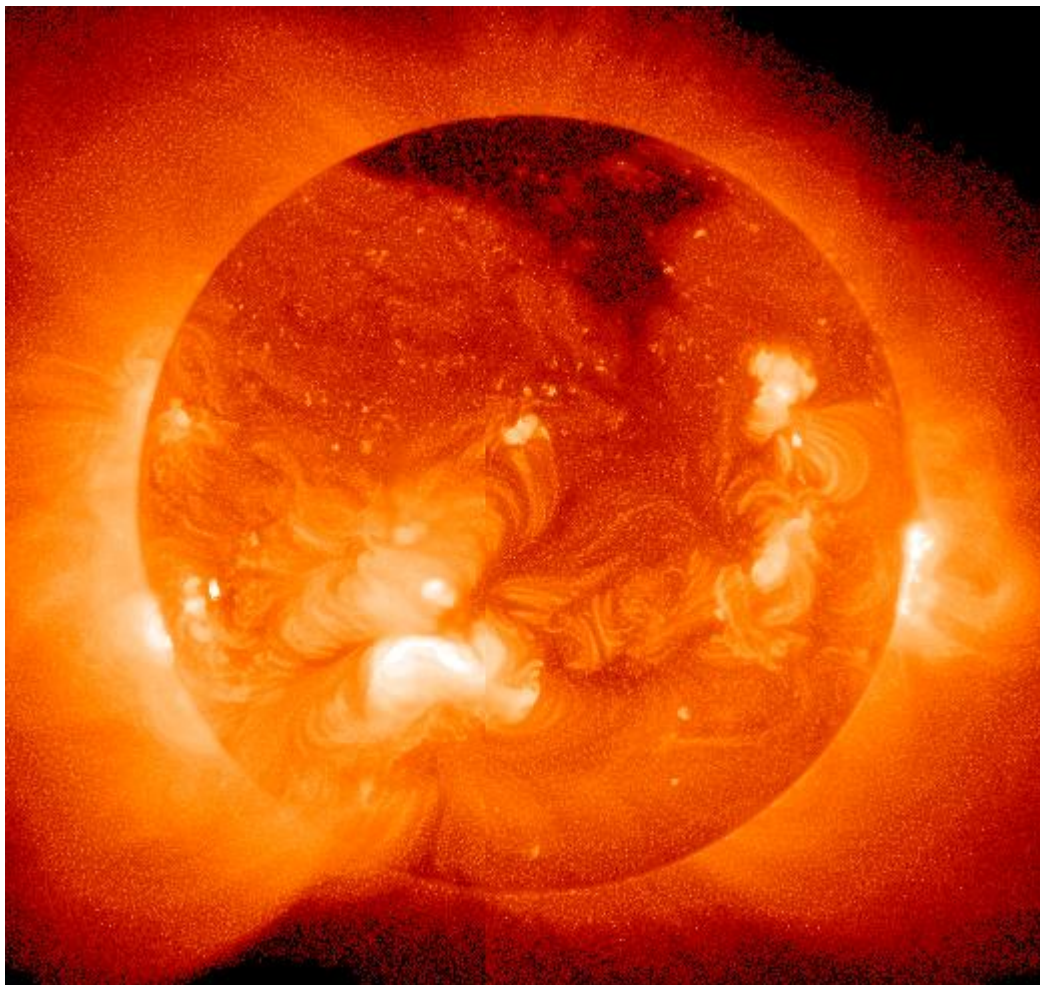
Diametro medio	99 528 000 km
Raggio medio	71,5 R_{\odot}
Massa	8-9 ^[4] M_{\odot}
Temperatura superficiale	7500 K ^[6] (media)
Luminosità	20000 ^[5] L_{\odot}
Indice di colore (B-V)	0,15 ^[3]



Altro esempio interessante di stella di classe F è Procione (α Canis Minoris). A occhio nudo appare come una stella singola, l'ottava più brillante dell'intera volta celeste con una magnitudine apparente di 0,34. In realtà si tratta di un sistema binario composto da una stella bianco-gialla di classe spettrale F5IV-V, chiamata *Procione A*, e da una debole nana bianca, chiamata *Procione B*. L'elevata luminosità apparente di Procione non è dovuta tanto alla sua brillantezza intrinseca (è circa 7 volte più luminosa del Sole) quanto alla sua vicinanza alla Terra: la sua distanza di 11,4 anni luce dal nostro pianeta ne fa una tra le stelle più vicine a noi.

Classificazione	Stella doppia (nana bianco-gialla + nana bianca)
Classe spettrale	A: F5 IV-V ^[1] / B: DQZ ^[2]
Tipo di variabile	BY Draconis ^{[3][4]}
Distanza dal Sole	11,4 anni luce ^[3]
Costellazione	Cane Minore





Observation data	
Mean distance from Earth	1.496×10^8 km 8 min 19 s at light speed
Visual brightness (V)	-26.74 [1]
Absolute magnitude	4.83 [1]
Spectral classification	G2V
Metallicity	$Z = 0.0122$ [2]
Angular size	$31.6' - 32.7'$ [3]
Adjectives	solar
Orbital characteristics	
Mean distance from Milky Way core	$\sim 2.5 \times 10^{17}$ km 26,000 light-years
Galactic period	$(2.25 - 2.50) \times 10^8$ a
Velocity	~ 220 km/s (orbit around the center of the Galaxy) ~ 20 km/s (relative to average velocity of other stars in stellar neighborhood) ~ 370 km/s [4] (relative to the cosmic microwave background)

Classe G (5.000 - 6.000 K stelle gialle)

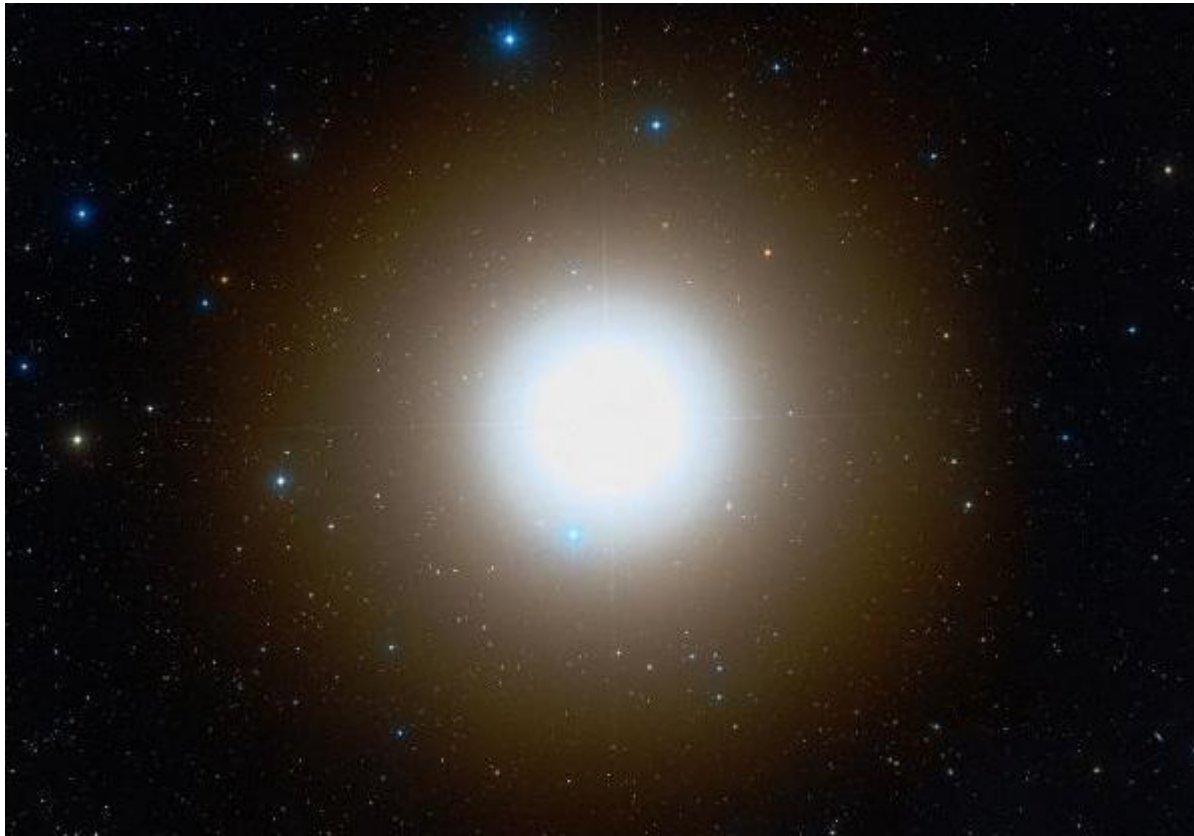
Le stelle **G** sono probabilmente le meglio conosciute, perché il nostro Sole è di questo tipo. Hanno linee di idrogeno ancora più deboli delle F, ma mostrano righe di metalli neutri accanto a quelle dei metalli ionizzati.

Un altro esempio di stella di classe G e' Capella (o α Aurigae). Benché appaia ad occhio nudo come una stella singola, si tratta in realtà di un sistema multiplo, composto da due stelle binarie, per un totale di quattro componenti. La prima coppia è formata da due stelle giganti di classe spettrale G, aventi entrambe un raggio che si aggira intorno a 10 volte quello del Sole, in orbita stretta intorno al loro comune baricentro. Si ritiene che le due stelle stiano lentamente espandendosi e preparandosi a diventare delle giganti rosse. L'altra coppia, distante circa 10.000 UA dalla prima, è composta da due piccole e deboli stelle nane rosse. Capella è un sistema relativamente vicino, distante 42,5 anni luce dalla Terra.

Classificazione	Stella multipla (coppia di giganti gialle + coppia di nane rosse)
Classe spettrale	Combinata: G5IIIe+ ^[1] A: G8III ^[2] B: G0III ^[2] C: M1 ^[3] D: M5 ^[4]
Distanza dal Sole	A/B: 42,53 ± 0,09 anni luce (13,042 ± 0,028 pc) ^[5]
Costellazione	Auriga

Temperatura superficiale	A: 4.920 ± 70 ^[5] B: 5.680 ± 70 ^[5] C: 3700 ± 150 ^[8] D: ? K (media)
---------------------------------	--

Raggio medio	A: 11,87 ± 0,56 ^[7] B: 8,75 ± 0,32 ^[7] C: 0,54 ± 0,03 ^[8] D: 0,25 ^[9] R _☉
---------------------	---



Classe K (3.500 - 5.000 K stelle gialle-arancio)

Le stelle **K** sono leggermente più fredde del Sole, e di colore arancione. Alcune sono stelle giganti (come **Arturo** terza stella più luminosa del cielo) e supergiganti, mentre altre come Alfa Centauri B, la secondaria del sistema di Alfa Centauri sono stelle di sequenza principale. Hanno linee dell'idrogeno estremamente deboli.

Observation data	
Epoch J2000	Equinox J2000
Constellation	Boötes
Pronunciation	/orkˈtjuərəs/
Right ascension	14h 15 m 39.7s
Declination	+19° 10' 56"
Apparent magnitude (<i>V</i>)	-0.04
Characteristics	
Spectral type	K1.5IIIFe-0.5
U-B color index	1.27
B-V color index	1.23
R-I color index	0.65
Variable type	Variable star
Note (category: variability):	H and K emission vary.
Astrometry	
Radial velocity (<i>R_v</i>)	+5 km/s
Proper motion (<i>μ</i>)	RA: -1093.45 mas/yr Dec.: -1999.40 mas/yr
Parallax (<i>π</i>)	88.98 ± 0.68 mas
Distance	36.7 ± 0.3 ly (11.24 ± 0.09 pc)
Absolute magnitude (<i>M_V</i>)	-0.29
Details	
Radius	25.7 ± 0.3 ^[1] <i>R</i> _☉
Luminosity	210 ± 10 ^[2] <i>L</i> _☉
Temperature	4,300 ^[3] K
Metallicity	20–50% Sun
Rotational velocity (<i>v</i> sin <i>i</i>)	<1.7 km/s



Classificazione	Gigante arancione
Classe spettrale	K5 III ^[1]
Distanza dal Sole	66,64 anni luce ^[2]
Costellazione	Toro

Diametro medio	61,12 milioni di km ^[3]
Raggio medio	43,9 ^[3] R _☉
Massa	2 ^[4] M _☉

Temperatura superficiale	3.913 K ^[9] (media)
Luminosità	518 ± 32 ^[5] L _☉

Altro esempio di stella di classe K è **Aldebaran** (α Tau / α Tauri / Alfa Tauri) appartenente alla costellazione del Toro. Avendo magnitudine 0,98, essa è la stella più luminosa della costellazione, nonché la quattordicesimastella più luminosa del cielo notturno. Distante circa 65 anni luce dalla Terra, è una gigante arancione di classe spettrale K5 III circa 500 volte più luminosa del Sole e una quarantina di volte più grande. Si tratta in realtà di una stella doppia in quanto la principale possiede una piccola e debole compagna.



Observation data	
Epoch J2000.0	Equinox J2000.0 (ICRS)
Constellation	Centaurus
Pronunciation	^{i}/ˈprɒksɪmə sɛn ˈtɔːrɪ/^{[nb]} ^[1]
Right ascension	14 ^h 29 ^m 42.9487 ^s ^[1]
Declination	−62° 40′ 46.141 [″] ^[1]
Apparent magnitude (V)	11.05 ^[1]
Characteristics	
Spectral type	M5.5 Ve ^[1]
U−B color index	1.43 ^[1]
B−V color index	1.90 ^[1]
Variable type	Flare star
Astrometry	
Radial velocity (R _v)	−21.7 ± 1.8 ^[2] km/s
Proper motion (μ)	RA: −3775.40 ^[1] mas/yr Dec.: 769.33 ^[1] mas/yr
Parallax (π)	768.7 ± 0.3 ^[3] mas
Distance	4.243 ± 0.002 ly (1.3009 ± 0.0005 pc)
Absolute magnitude (M _v)	15.49 ^[4]
Details	
Mass	0.123 ± 0.006 ^[5] M _⊙
Radius	0.141 ± 0.007 ^[6] R _⊙
Surface gravity (log g)	5.20 ± 0.23 ^[5]
Luminosity (bolometric)	0.0017 ^[7] L _⊙
Temperature	3,042 ± 117 ^[5] K
Metallicity [Fe/H]	0.21 ^[8] dex
Rotation	83.5 days ^[9]
Rotational velocity (v sin i)	2.7 ± 0.3 ^[10] km/s
Age	4.85 ^[11] Gyr

Classe M (2.500 3.500 K stelle rosse)

Le stelle di classe **M** sono di gran lunga le più numerose. Tutte le nane rosse appartengono a questa classe, e sono comunissime: si calcola che circa il 90% di tutte le stelle siano nane rosse. Nonostante questa abbondanza, nessuna nana rossa è visibile ad occhio nudo nel cielo notturno, perché sono estremamente deboli: **Proxima Centauri**, la stella più vicina al Sole, è una nana rossa, ed occorre un telescopio di dimensioni rispettabili per osservarla. La classe M ospita anche molte stelle giganti e supergiganti, come Antares e Betelgeuse, e come le variabili Mira. Lo spettro delle stelle di classe M mostra linee attribuibili a molecole (la temperatura è abbastanza bassa perché gli atomi possano legarsi tra loro), ma l'idrogeno è in genere assente. Una riga spesso molto prominente è quella dell'ossido di titanio.

Classificazione	supergigante rossa
Classe spettrale	M1,5Iab/B2,5V ^[1]
Tipo di variabile	pulsante semi-regolare
Distanza dal Sole	604 anni luce
Costellazione	Scorpione

Un esempio di stella di classe M non nana è Antares (α Scorpii).

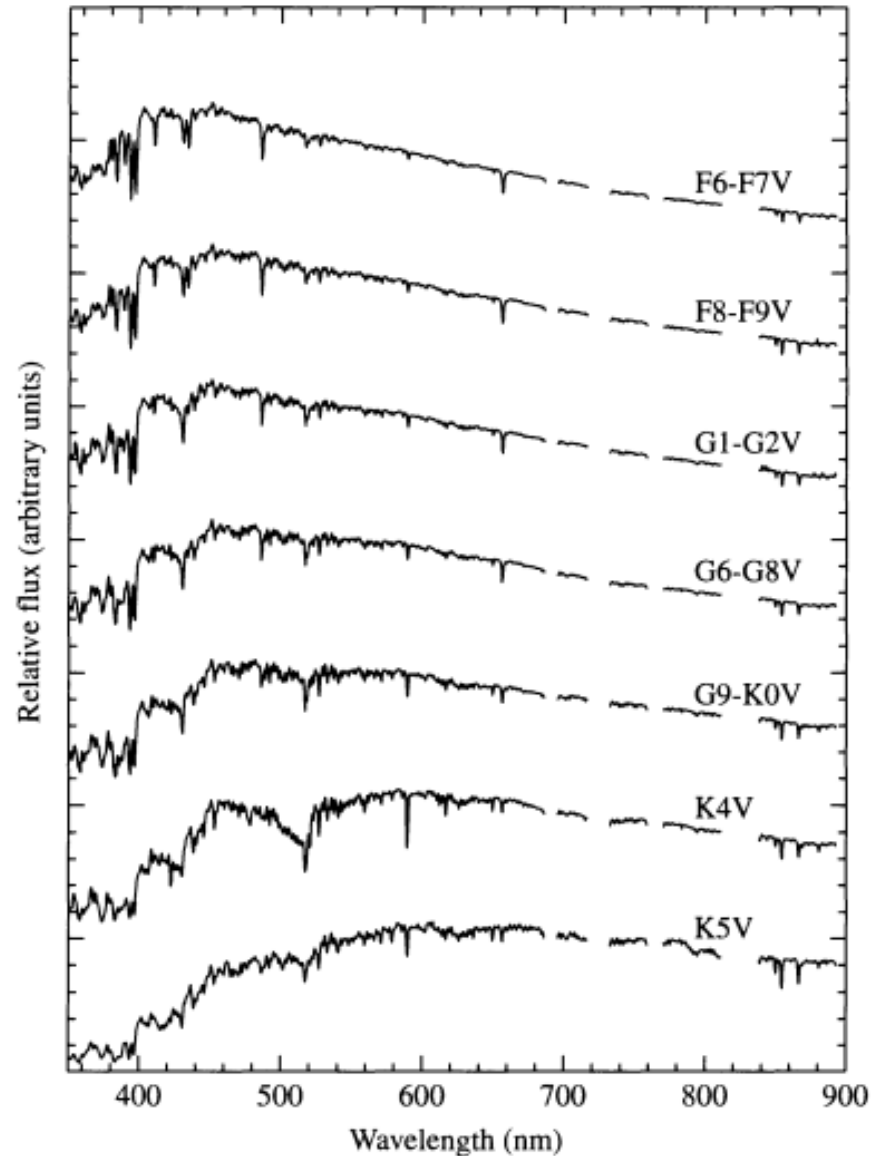
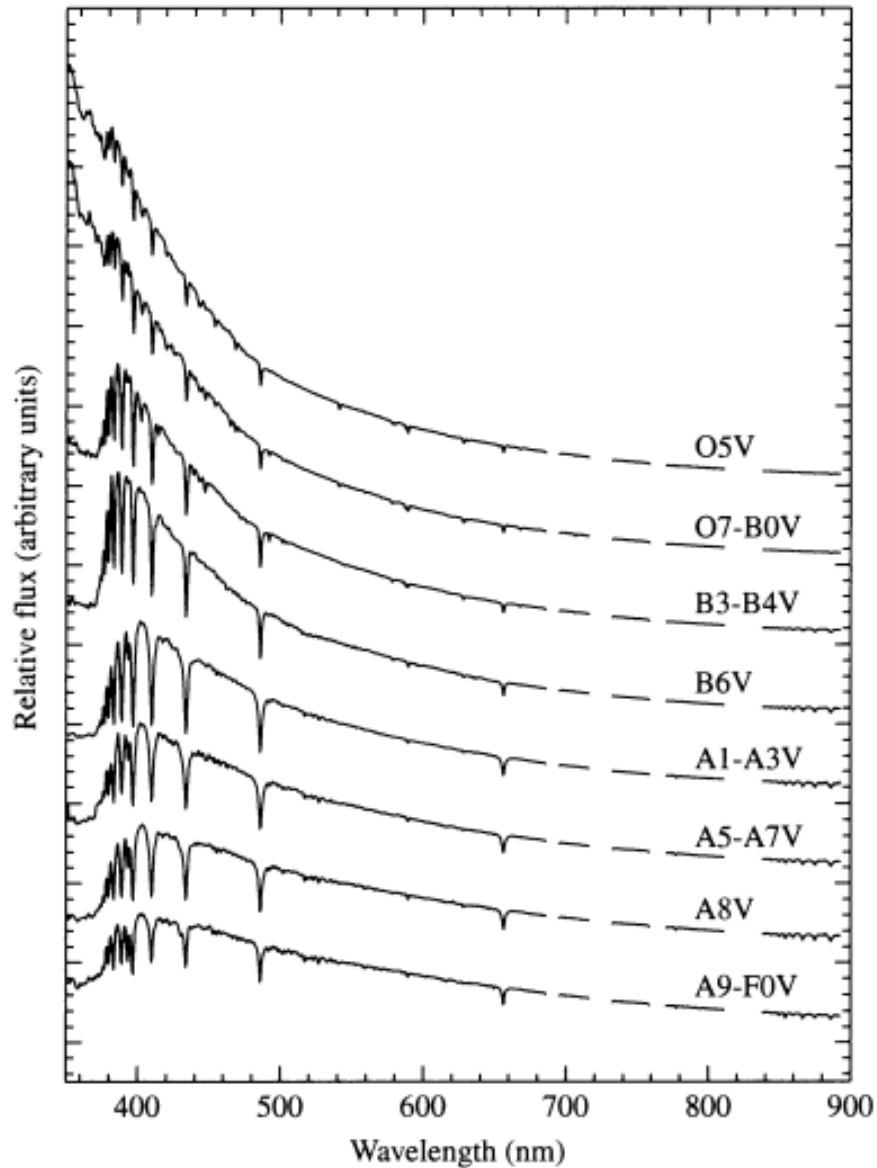
Antares è una supergigante rossa situata a circa 600 anni luce dal sistema solare; avendo un raggio che è circa 850 volte quello del Sole, essa è una delle stelle più grandi conosciute.

Diametro medio	~1,185 miliardi di km
Raggio medio	~850 R_{\odot}
Massa	15-18 M_{\odot}

Temperatura superficiale	3.600 \pm 150 K (media)
Luminosità	60.000-90.000 L_{\odot}



Tra noi ed Antares
si trova la nube
molecolare di
Rho Ophiuci.
Nella foto vediamo
la nube illuminata
da Antares e da altre
stelle blu.



Altri spettri: notare come il picco di corpo nero si sposti verso frequenze minori diminuendo la classe. Le righe dell'idrogeno della serie di Balmer (656.2 nm, 486.1 nm, 434.0 nm, 410.2 nm) incrementano da O a A e poi decrescono. Gli spettri per ultimi tipi (K) hanno righe un po' dovunque caratteristiche della presenza di molecole.

Perche' ho questa variazione nelle righe ? Non dipende da una diversa composizione delle stelle perche' queste hanno piu' o meno le stesse quantita' di elementi (chiaramente In prima approssimazione).

TABLE 6-2

The Most Abundant Elements in the Sun

Element	Percentage by Number of Atoms	Percentage by Mass
Hydrogen	91.0	70.9
Helium	8.9	27.4
Carbon	0.03	0.3
Nitrogen	0.008	0.1
Oxygen	0.07	0.8
Neon	0.01	0.2
Magnesium	0.003	0.06
Silicon	0.003	0.07
Sulfur	0.002	0.04
Iron	0.003	0.1

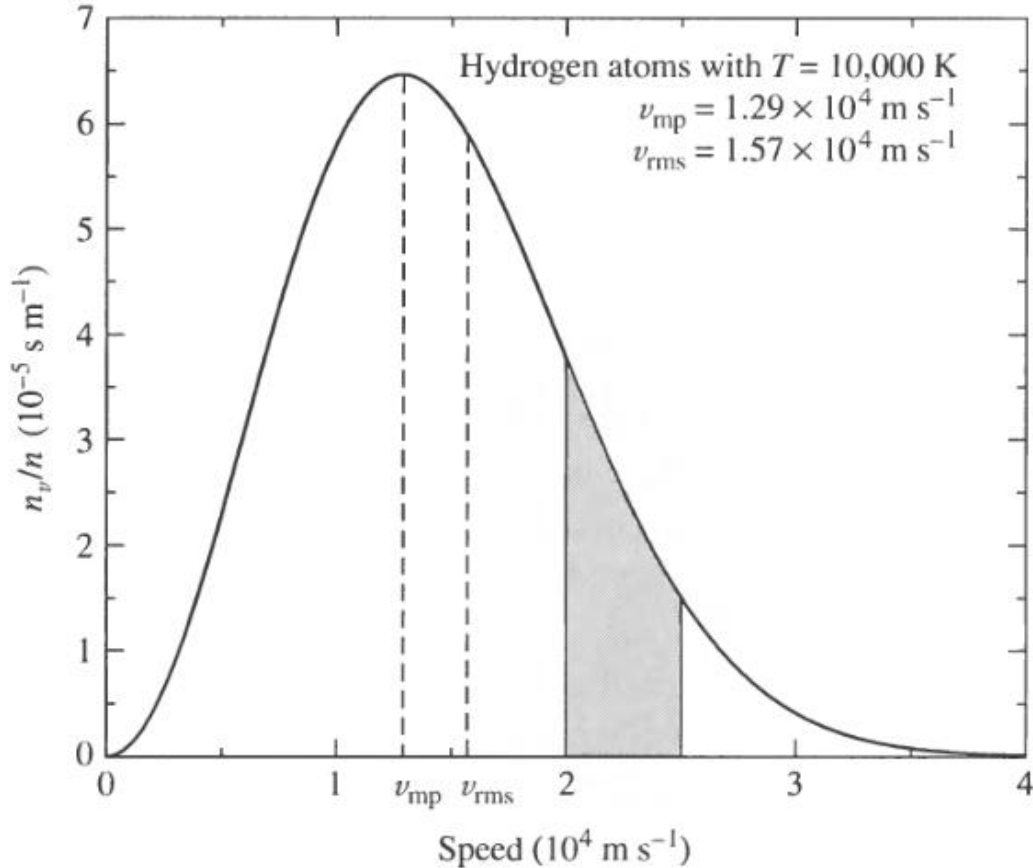
Spiegazione fisica dell'andamento delle righe

Per farlo e' necessario ricorrere alla meccanica statistica. Vale a dire non possiamo seguire l'andamento di ciascuna particella di un gas ma possiamo determinare alcune proprieta' del gas nel suo insieme come pressione, densita' e temperatura.

Dato un gas in equilibrio termico si ha la distribuzione di velocita' di **Maxwell-Boltzmann** che fornisce la densita' di particelle per unita' di volume aventi velocita' nell'intervallo v e $v+dv$ per un gas di particelle di massa m alla temperatura T :

$$n_v dv = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} 4\pi v^2 dv,$$

Distribuzione di Maxwell-Boltzmann



$$n_v dv = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} 4\pi v^2 dv,$$

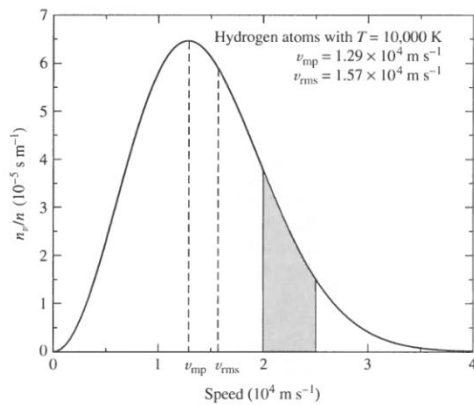
Ha un picco (velocità di massima probabilità v_{mp}) per:

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

ma la distribuzione non è simmetrica intorno a v_{mp} e quindi ha un valore quadratico medio pari a:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

$$\begin{aligned}v_{\text{rms}} &= \sqrt{\int_0^{\infty} v^2 p(v) dv} \\&= \sqrt{\int_0^{\infty} 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^4 e^{-\frac{v^2 m}{2kT}} dv} \\&= \sqrt{4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{3}{8} \pi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2kT}{m}\right)^{\frac{5}{2}}} \\&= \sqrt{\frac{3kT}{m}}\end{aligned}$$



Example 8.1.1. The area under the curve between two speeds is equal to the fraction of gas particles in that range of speeds. In order to determine the fraction of hydrogen atoms in a gas of $T = 10,000$ K having speeds between $v_1 = 2 \times 10^4$ m s $^{-1}$ and $v_2 = 2.5 \times 10^4$ m s $^{-1}$, it is necessary to integrate the Maxwell–Boltzmann distribution between these two limits,

$$\begin{aligned} N/N_{\text{total}} &= \frac{1}{n} \int_{v_1}^{v_2} n_v dv \\ &= \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_{v_1}^{v_2} e^{-mv^2/2kT} 4\pi v^2 dv. \end{aligned}$$

$$N/N_{\text{total}} = \frac{1}{n} \int_{v_1}^{v_2} n_v(v) dv \simeq \frac{1}{n} n_v(\bar{v}) (v_2 - v_1)$$

$$\bar{v} \equiv (v_1 + v_2)/2$$

$$\begin{aligned} N/N_{\text{total}} &\simeq \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m\bar{v}^2/2kT} 4\pi \bar{v}^2 (v_2 - v_1) \\ &\simeq 0.125. \end{aligned}$$